Sergei B. Kozlachkov[1], Andrew M. Bonch-Bruevich[1], Sergey V. Dvoryankin[2]
Nadezhda V. Vasilevskaya[3], Alexandra L.Selenina[1]
[1]Bauman Moscow State Technical University, 2nd Bauman Street, 5, Moscow, 105005, Russia
e-mail: ksb.perovo@mail.ru, ORCID 0000-0002-7096-6711
e-mail: 123andryb@mail.ru, ORCID 0000-0002-4453-2979
e-mail: so.zz.va@yandex.ru,ORCID 0000-0002-4280-8214
[2]Financial University under the Government of the Russian Federatio (Financial University),
LeningradskyProspect, 49, Moscow, 125993, Russia
e-mail: SVDvoryankin@fa.ru, ORCID 0000-0001-6908-0676
[3]FSTEC of Russia, Staraya Basmannaya street, 17, Moscow, 105066, Russia
e-mail: infuzoriavalenoc@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0078-8665

Specific features of the formation of an acoustoelectric channel of speech information leakage

Keywords: voice acoustic reconnaissance, acoustoelectric transducers, formants, phonemes, information protection, speech intelligibility, speech signal.

Abstract. We address the problem of assessing the protection level of the acoustoelectric channel of speech information with respect to leakages associated with specific operation principles of various electromechanical transducers. We analyze the scope of methodological and technical tools for the acoustical speech intelligence (ASI) with respect to corresponding technical channels of leakage of acoustic speech information (TCLSI). Special attention is paid to the regime of timed analysis of speech messages (distorted by noise and interference), allowing one to significantly improve the quality of the original audio signals. We list basic methods of noise reduction that can be used for processing the secondary signals of acoustoelectric leakage channels. We describe typical distortions that occur in the process of the acoustoelectric leakage channel formation. We examine the nature and the degree of the impact of various distortions on the measures of the speech information protection (SIP). We find the effect of the nonlinear distortions of the “upper limit” type (most typical for an acoustoelectric leakage channel) on the speech intelligibility to be in significant. Along with Pokrovsky’s static model of speech signals, we consider a dynamic model based on Pirogov’s phonetic function. The limitations of the static model are discussed, along with revealing the nature of the effect of the dynamic characteristics on speech intelligibility. We explain the effects of invariance with respect to linear distortions in the leakage channel. We perform an experimental study the results of which contradict, to a certain extent, the postulates of the formant theory used to assess the SIP level. We identify a number of mechanisms to improve the noise immunity of voice communications, allowing one to reconstruct speech signals (SS) distorted by noise and interference. We conclude with specifying a number of ways of improving SIP assessment methods in TCLSI.

Сергей Б. Козлачков[1], Андрей М. Бонч-Бруевич[1], Сергей В. Дворянкин[2],
Надежда В. Васильевская[3], Александра Л. Селенина[1]
[1]Московский Государственный Технический Университет им. Баумана,
2-я Бауманская, 5, Москва, 105005, Россия
e-mail: ksb.perovo@mail.ru, ORCID 0000-0002-7096-6711
e-mail: 123andryb@mail.ru, ORCID 0000-0002-4453-2979
e-mail: so.zz.va@yandex.ru,ORCID 0000-0002-4280-8214
[2]Финансовый Университет при Правительстве Российской Федерации (Финансовый университет),
Ленинградский проспект, 49, Москва, 125993, Россия
e-mail: SVDvoryankin@fa.ru, ORCID 0000-0001-6908-0676
[3]ФСТЭК России, Старая Басманная ул., 17, Москва, 105066, Россия
e-mail: infuzoriavalenoc@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0078-8665

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАНАЛА УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Ключевые слова: акустическая речевая разведка, акустоэлектрические преобразователи, форманты, фонемы, защита информации, разборчивость речи, речевой сигнал.

Аннотация. В статье рассмотрены актуальные вопросы оценки защищенности акустоэлектрического канала утечки речевой акустической информации, обусловленные различными физическими принципами функционирования разных типов электромеханических преобразователей.

Проведен анализ возможностей технических средств и методов, используемых при ведении акустической речевой разведки (АР-Р) по соответствующему техническому каналу утечки акустической речевой информации (ТКУРИ).

Особое внимание уделено использованию режима отложенного анализа речевых сообщений (искаженных шумами и помехами), позволяющий значительно повысить качество исходных аудиосигналов. Приведен краткий перечень основных методов шумопонижения, которые могут быть использованы при обработке вторичных сигналов акустоэлектрического канала утечки речевой информации.

Описаны типовые искажения, возникающие в процессе формирования акустоэлектрического канала утечки речевой информации. Рассмотрены характер и степень влияния различных видов искажений на показатели оценки защищенности речевой информации (ЗРИ). Показано, что нелинейные искажения вида «ограничение сверху», наиболее характерные для акустоэлектрического канала утечки, в малой степени снижают разборчивость речи. Наряду со статической моделью речевых сигналов Покровского А.Н., рассмотрена динамическая модель, описываемая фонетической функцией Пирогова А.А.. Указаны ограничения статической модели и показан характер влияния динамических признаков на разборчивость речи. Дано объяснение эффектам инвариантности разборчивости речи относительно линейных искажений в канале утечки.

Приведены результаты экспериментальных исследований, в определенной степени, противоречащие некоторым положениям формантной теории разборчивости речи, применяемых для оценки ЗРИ. Определен ряд механизмов повышения помехоустойчивости речевых сообщений, позволяющих выполнять реконструкцию речевых сигналов (РС), искаженных шумами и помехами.

В заключении перечислены предложения по перспективным направлениям совершенствования методов оценки ЗРИ в ТКУРИ.

Введение

Среди многочисленных технических каналов утечки акустической речевой информации (ТКУРИ) типичным и одним из наиболее сложных в оценке эффективности его защищенности от средств акустической речевой разведки (АР-Р) является акустоэлектрический канал. В первую очередь это связано с тем обстоятельством, что его формирование осуществляется с помощью различных по своей физической природе принципов преобразования механического (звукового поля) вида энергии в электрический сигнал [1, 2]. Значительное разнообразие типов акустоэлектрических преобразователей: электродинамические; электростатические (конденсаторные, пьезоэлектрические, электретные); электромагнитные; релейные (угольные, транзисторные, оптические и др.) – создает определенные сложности корректного учета условий их функционирования. Другими важными факторами, влияющими на достоверность и точность оценок защищенности речевой информации (ЗРИ) представляются:

- определение возможностей соответствующей модели нарушителя (модель АР-Р);
- оценка характера и степени влияния искажений, вносимых соответствующими преобразователями в канал утечки, на основной показатель оценки защищенности ТКУРИ – разборчивость речи;
- проблема выбора адекватных тестовых сигналов, предназначенных для определения характеристик и измерений значимых параметров опасных сигналов;
- метрологические аспекты при выполнении измерительных процедур.

В рамках данной статьи будут рассмотрены: современные и перспективные способы и методы ведения АР-Р по акустоэлектрическому каналу утечки акустической речевой информации, учитывающие возможности технологий шумопонижения и реконструкции, перехваченных речевых сообщений (РС); а также влияние различного вида искажений, типичных для этого канала.

Модель нарушителя и методы шумопонижения

В отличие от прямого акустического канала утечки, где в т.ч. учитывается вероятность непреднамеренного прослушивания, реализация остальных ТКУРИ принципиально невозможна без использования специальных технических средств АР-Р. Как правило, в состав таких технически сложных и многофункциональных комплексов разведки входят средства звукозаписи (усиления и фиксации) перехваченных сообщений, что позволяет в полной мере реализовать основные достоинства режима отложенного анализа РС [1, 3, 4, 5].

При этом, одним из главных преимуществ такого режима являются не только возможности многократного прослушивания и контекстного анализа с использованием опорных тематических словарей, но и применение достижений современных компьютерных технологий, в т.ч. в области речевых технологий и систем автоматического распознавания речи [4, 5, 6]. Так, многие специалисты отмечали, что с помощью различных методов шумоочистки, точнее методов шумопонижения, коррекции и реконструкции РС можно значительно повысить качество исходных аудиосигналов, что безусловно должно учитываться при оценках ЗРИ [6 - 9].

Применительно к акустоэлектрическому каналу представляется труднореализуемым использование многоканальных синхронных систем шумопонижения, позволяющих с определенными ограничениями повысить предельное соотношение сигнал-шум (*SNR*) в смеси РС с некоррелированными маскирующими шумами [7, 8]. В то же время, наиболее простые и распространенные асинхронные (одноканальные) способы шумопонижения: узкополосные фильтры, медианные фильтры, методы спектрального вычитания, адаптивные фильтры и др. – могут применяться в полном объеме [5, 6, 9].

Отдельного рассмотрения требуют вопросы, связанные с характерными искажениями, возникающими при формировании вторичного сигнала (прошедшего через электроакустический тракт преобразователя), его трансляции по проводным линиям и обработке звукоусилительными каскадами приемного устройства.

Нелинейные искажения

В процессах формирования, преобразования, трансляции и приема исходный аудиосигнал подвергается определенным трансформациям и искажениям, которые могут оказать значительное влияние на его характеристики, в т.ч. на такой показатель ЗРИ, каким является РР. Оценку характера таких влияний на РР целесообразно проводить не по месту формирования соответствующих искажений, а по их видам и степени влияния: нелинейные искажения, линейные искажения, частотные ограничения.

В общем случае причиной появления нелинейных искажений является нелинейность амплитудной характеристики цепи. По виду нелинейности и характеру изменения сигнала искажения подразделяют на три основных типа: ограничения сверху, центральное ограничение и модуляционные искажения [2, 10]. Основной вклад в образование нелинейных искажений вносят активные элементы электрических цепей с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

Как правило, в результате проявлений нелинейных искажений в спектре исходного сигнала появляются новые спектральные составляющие. Мерой нелинейности принято считать коэффициент гармоник. Все искажения незаметны на слух, если уровень

продуктов нелинейности ниже абсолютного порога слышимости. В музыкальной акустике принято считать, что порог слуховой заметности нелинейных искажений, измеренных по методу полного коэффициента гармоник (Кг) в диапазоне частот 40Гц…1 кГц, составляет -52 дБ, или 0,25%. Заметность нелинейных искажений существенно снижается за счет эффектов слухового маскирования и других свойств слухового восприятия, повышающих его помехозащищенность.

Инерционные свойства временных характеристик слухового восприятия человека, время адаптации к нелинейным искажениям составляет величину около 10…30 мс, что также позволяет в определенной мере нивелировать негативное влияние нелинейных искажений. Однако необходимо учитывать, что характеры слухового восприятия нелинейных искажений музыкальных и речи имеют существенные различия. Так появление в структуре РС дополнительных спектральных составляющих, обогащающих его спектр, с уровнем коэффициента гармоник до 20…30%, практически не влияет на его разборчивость [11]. Ограничение сверху оказывает минимальное влияние на снижение РР, в силу того, что слуховое восприятие уровня сигнала уже имеет логарифмическую зависимость (log_2x), а это в некоторой степени даже способствует повышению его помехоустойчивости. Даже глубокое клиппирование снижает разборчивость не более чем на 50% [2, 10, 11]. По этим причинам наличие в составе звукоусилительных каскадов систем автоматической регулировки уровня звукозаписи (АРУЗ) с функцией ограничения сигналов высокого уровня не только не снижает РР, а напротив, в определенной степени способствует расширению динамического диапазона фиксируемых сигналов.

Центральное ограничение всегда негативно влияет на РР, поскольку значительно ухудшает восприятие энергии слабых консонантных фонем, составляющих от 30 до 50% разборчивости РС [2].

Наихудшее влияние на РР оказывают нелинейные искажения модуляционного характера, изменяющие не только спектральные, но и временные и динамические параметры РС.

В подавляющем большинстве случаев в акустоэлектрическом канале утечки РИ, в основном, возникают нелинейные искажения вида ограничения сверху, не оказывающие значительного влияния на снижение РР.

Линейные искажения

Наиболее распространенными и наименее значимыми в вышеприведенном перечне искажений являются линейные искажения. Линейные искажения приводят только к изменению соотношения амплитуд и фаз спектральных составляющих сигнала. Такого рода изменения обладают свойством аддитивности: сумма реакций на два воздействия равна реакции на сумму двух воздействий. То есть на выходе линейной цепи не появляются продукты взаимодействия входных сигналов, в результате чего в спектральной структуре РС не образуются новые компоненты.

Основной вклад в образование линейных искажений вносят пассивные элементы электрических цепей с линейными вольт-амперными характеристиками: трансформаторы, конденсаторы, индуктивности, импеданс которых имеет частотную зависимость. Определенную роль оказывают также различные интерференционные волновые эффекты, наиболее характерные для акустических звукоусилительных систем.

В общем случае коэффициент передачи линейного тракта можно представить в виде следующего выражения:

$$K = |K| \bullet e^{j\varphi} \quad (1),$$

где:

$|K|$ – модуль коэффициента передачи, φ – сдвиг фазы, j – комплексная единица.

Зависимость $|K|$ от частоты представляет собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), а $j\varphi$ – фазочастотную характеристику (ФЧХ).

Наиболее скрупулезно заметность искажений АЧХ исследована в области музыкальной акустики. Так, принято считать, что линейные искажения не будут заметны, если отклонения АЧХ не превышают значений, приведенных в таб.1

Таблица 1 Допустимые значения линейных искажений в акустических системах стереовещания

Диапазон частот	Допустимое отклон ние АЧХ	Разбаланс уровней между каналами	Разбаланс фаз между каналами
40…125 Гц	1 дБ	2 дБ	45°
0,125…10 кГц	0,5 дБ	0,5 дБ	30°
10…14 кГц	1 дБ	1,5 дБ	50°
14…15 кГц	2 дБ	2 дБ	90°

В литературе неоднократно отмечалась весьма низкое влияние линейных искажений на восприятие РС [10, 11]. Наихудшее влияние на волновую форму сигнала оказывает нелинейность ФЧХ, которое в определенной степени нивелируется за счет интеграционных процессов механизмов слухового восприятия. Наиболее заметны на слух неравномерности ФЧХ, вызывающие групповое время задержки, которое может достигать существенных значений по мере роста порядка фильтров акустоэлектрического тракта.

В наименьшей степени на РР влияют искажения, вызванные неравномерностью АЧХ передаточного тракта. Так, в музыкальной акустике считается, что пики и провалы АЧХ, ширина которых не превышает 1/8 октавы, на слух практически незаметны. Даже высокие уровни неравномерности АЧХ, формируемые с помощью регулировок эквалайзеров, практически не снижают РР, а только изменяют тембр РС.

Эти факты и другие экспериментальные результаты не укладываются в стандартную формантную теорию РР.

Одним из основных базисов форматной теории является форматный спектр речи, определяемый в виде распределений артикуляционых значений. Принято считать, что интегральный индекс артикуляции речи (R) зависит от вероятности появления формант (k_i) в заданной i-й полосе частот и от уровня эффективного восприятия формант ($P_i(E)$):

$$R = \sum_{i=1}^{N} P_i(E) k_i \qquad (2),$$

В соответствии с этим выражением каждое уменьшение уровня эффективного восприятия формант ($P_i(E)$) должно сопровождаться соответствующим снижением артикуляционного индекса и РР, чего на самом деле не происходит [12].

Данный парадокс можно объяснить, прибегнув к иной модели механизма слухового восприятия РС, разработанной А.А. Пироговым [13, 14]. По модели ученого, «каждая фонема отличается главным образом характерным для этой фонемы изменением спектрального распределения, а не самим спектральным распределением, сопутствующим данной фонеме». Исходя из этих соображений, он ввел понятие «фонетической функции речи», согласно которому фонетические элементы речи целиком определяются законом изменения спектров во времени. В качестве оценки спектральных изменений А.А. Пирогов предложил использовать разность логарифмов интенсивностей двух спектральных разрезов, взятых через интервалы, соответствующие разрешающей способности слуха во времени:

$$P(\omega,t)=\ln\left|\frac{S(\omega,t)}{S(\omega,t-\tau)}\right| \quad (3),$$

где:

$S(\omega, t)$ и $S(\omega, t\text{-}\tau)$ – интенсивности спектральных отсчетов РС, взятые через интервал τ, учитывающий разрешающую способность слуха во времени.

Из определения фонетической функции логически вытекает следующий вывод: анализ речи слуховым аппаратом ведется не по изолированным фонемам, а по их звукосочетаниям (дифонам, трифонам – характерным перестройкам речевого аппарата), и именно они являются базовыми фонетическими элементами речи.

Исходя из сказанного, можно сделать вывод о том, что человеческий слух практически инвариантен в отношении амплитудных и фазовых нелинейных искажений, если, конечно, эти искажения не выходят за пределы артикуляторных модуляций и пределов слухового восприятия. Даже полное удаление из РС одной либо двух формант влияет только на тембр звука, однако словесная разборчивость остается высокой.

Данное утверждение можно доказать математически – спектр сигнала, прошедшего через электрический тракт, определяется выражением:

$$Si(\omega,t)=S(\omega,t)Ki \quad (4),$$

где:

$S(\omega,t)$ – спектр входного сигнала, Ki – коэффициент передачи электрического тракта, а $Si(\omega,t)$ – спектр сигнала, прошедшего через электрический тракт.

При допущении, что Ki в период прохождения сигнала не претерпевает нелинейных трансформаций можно выражение (3) представить в следующем виде:

$$P(\omega,t)=\ln\left|\frac{S(\omega,t)Ki}{S(\omega,t-\tau)Ki}\right| \quad (5).$$

Из чего следует фактическая инвариантность фонетической функции А.А. Пирогова (ФФП) относительно АЧХ (Ki) передаточного тракта.

В данной связи применение методов оценки разборчивости речи, основанных на анализе только статических характеристик РС (артикуляционного индекса), представляется недостаточным и неполным. В рамках оценки ЗРИ целесообразно адекватно учитывать и динамические характеристики речи.

В подавляющем большинстве случаев в акустоэлектрическом канале утечки РИ, линейные искажения возникают: в механо-электрических звеньях соответствующих акустоэлектрических преобразователей; в меньшей степени в соединительных проводных линиях (в виду их относительно малой длины); и практически отсутствуют в тракте звукозаписывающей аппаратуры разведывательных комплексов.

В целом можно констатировать относительно незначительный вклад линейных искажений в РР.

Частотные ограничения

Как уже отмечалось выше, наряду с линейными и нелинейными искажениями для акустоэлектрического канала характерными могут являться так же ограничения частотного диапазона РС, записанного техническими разведывательными комплексами. Так, частотный диапазон сигнала может быть ограничен из-за наличия в канале различных фильтров: ФНЧ, ФВЧ или полосовые фильтры - формируемых различными резонансными

цепями. В соответствии с выражением (2), при удалении из состава РС части частотных сегментов его разборчивость должна снижаться [12], однако экспериментально было установлено: при фильтрации РС в полосе частот 100…570 Гц остаточная фразовая РР составляет около 90%, вместо ожидаемых 10…15% [15]. Из чего можно сделать вывод, что данная модель (2) не позволяет в полной мере получить адекватные оценки ЗРИ, поскольку в ней учитываются только статические параметры РС. Между тем, в ряде исследований [13-17] отмечался существенный вклад в РР иных параметров РС, в т.ч. динамических, принципиально не учитываемых Н.Б. Покровским [12].

В общем случае в модели (2) также не всегда справедливо правило аддитивного сложения, что можно доказать в т.ч. экспериментально. Например, если из временной формы РС с регулярным шагом (30 мс) удалить часть сегментов суммарной длительностью около 50%, то можно убедиться, что словесная разборчивость практически не изменилась. Этот эффект можно объяснить влиянием интеграционных процессов слухового восприятия, которые позволяют без особых потерь восстанавливать информацию (сигнальную структуру) пропущенных сегментов речи. Математически это можно пояснить превалирующим положительным влиянием интерполяционных методов над экстраполяционными методами восстановления (реконструкции) сигнала.

Некоторые результаты этого эксперимента, в виде временных и графических сонограмм, приведены на рисунках 1, 2.

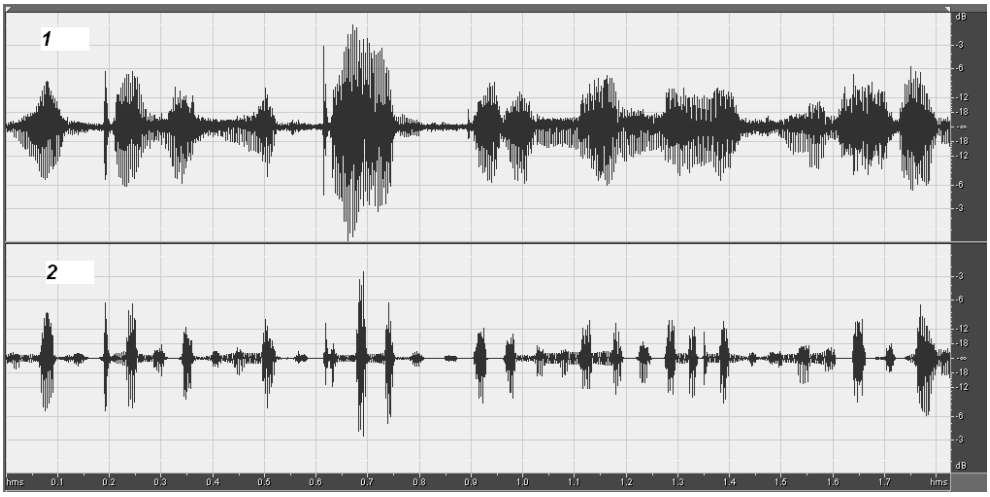

Рисунок 1 - Волновые формы речевого сигнала: 1 – без купюр, 2 – с удаленными сегментами.

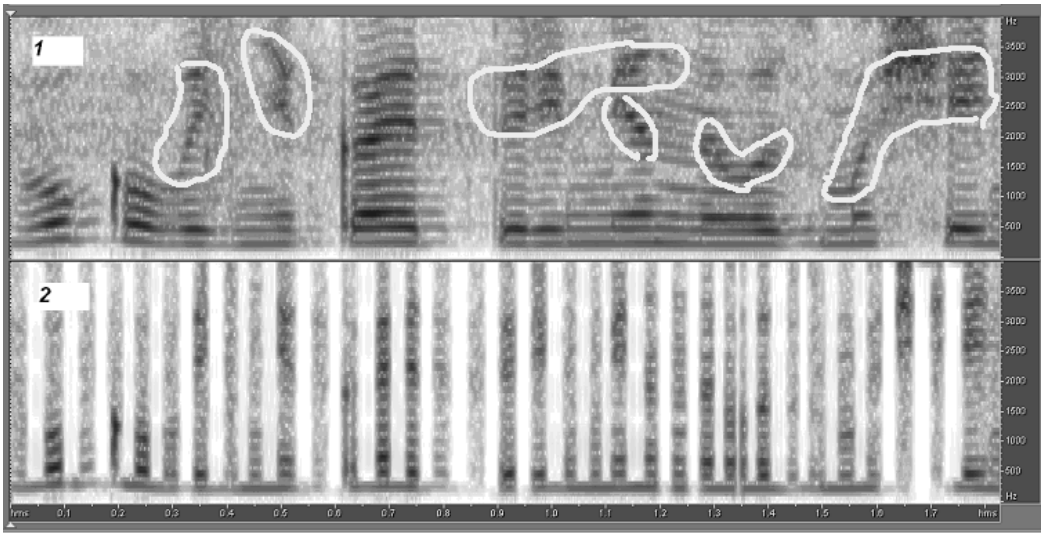

Рисунок 2 - Графические сонограммы речевого сигнала: 1 – без купюр, 2 – с удаленными сегментами. На сонограмме 1 выделены области дифонных переходов.

Визуально можно убедиться, что на сонограмме 2 (рис. 2) полностью удалены чередующиеся участки сигнала длительностью 30…33 мс, равной или большей длительности оставшихся фрагментов РС.

Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что математические интерполяционные методы, сочетающиеся с интеграционными свойствами слухового восприятия, позволяют существенно повысить помехозащищенность РС.

В следующем эксперименте в исходном сигнале были удалены все частоты ниже 100 Гц и выше 570 Гц. Графическая сонограмма такого сигнала приведена на рисунке 3.

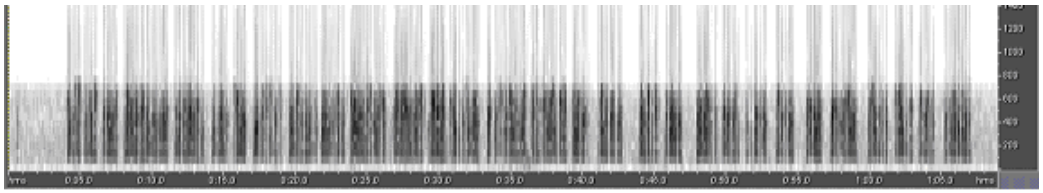

Рисунок 3 - Графическая сонограмма РС ограниченного полосой 100…570 Гц

Затем такой ограниченный сигнал был дополнительно отфильтрован режекторными фильтрами с частотами: 150 Гц, 300 Гц, 400 Гц и 500 Гц. В результате чего из него были удалены участки суммарной шириной полосы около 200…210 Гц. Волновые формы и графические сонограммы преобразованного РС представлены на рисунках 4, 5. В итоге, остаточная полоса частот этого сигнала составила не более 270 Гц, но фразовая разборчивость снизилась незначительно – до 80…85%.

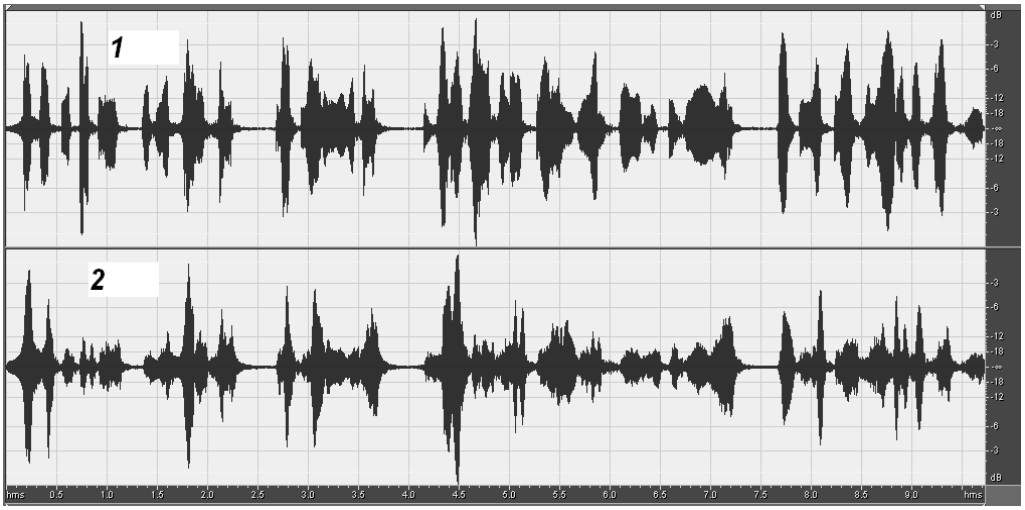

Рисунок 4 - Волновые формы речевого сигнала: 1 – исходный сигнал, отфильтрованный в полосе 100…570 Гц, 2 – отфильтрованный сигнал в полосе 100…570 Гц после применения дополнительных узкополосных фильтров

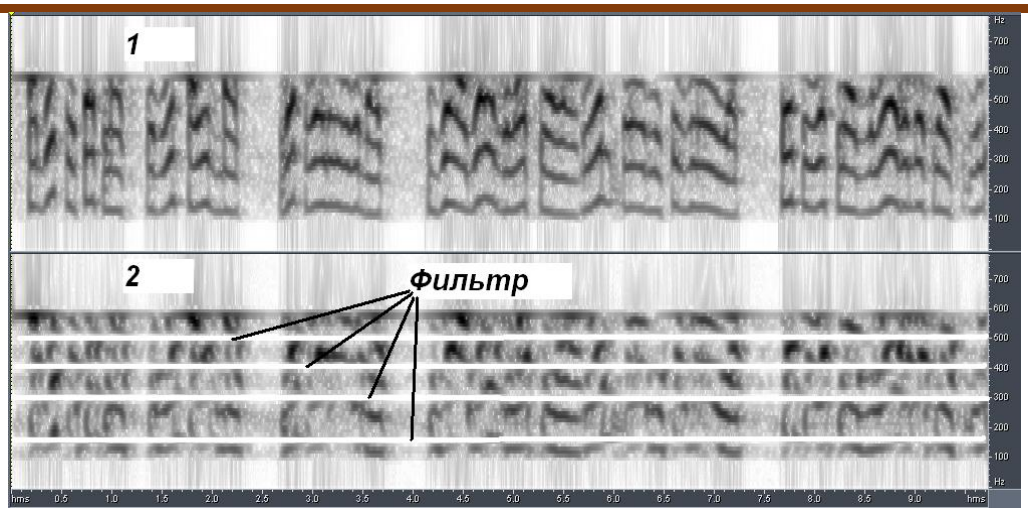

Рисунок 5 - Графические сонограммы речевого сигнала: 1 – исходный сигнал, отфильтрованный в полосе 100…570 Гц, 2 – отфильтрованный сигнал в полосе 100…570 Гц после применения дополнительных узкополосных фильтров

Усредненные долговременные спектры ограниченного и дополнительно отфильтрованного сигнала показаны на рисунке 6.

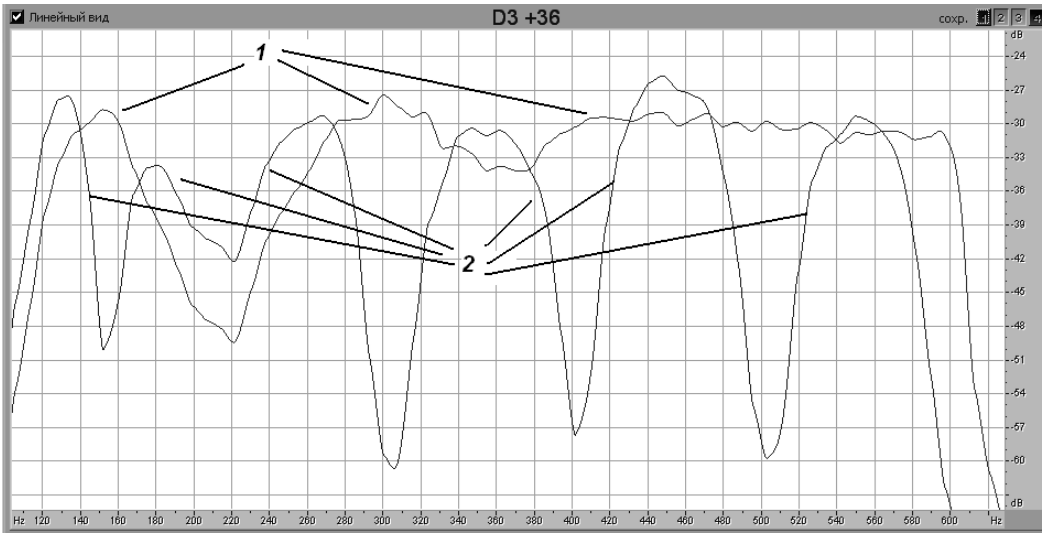

Рисунок 6 - Усредненные долговременные спектры речевого сигнала: 1 – исходный сигнал, отфильтрованный в полосе 100…570 Гц, 2 – отфильтрованный сигнал в полосе 100…570 Гц после применения дополнительных узкополосных фильтров. Удалены участки суммарной полосой частот около 200…210 Гц.

В этом эксперименте, как и в предыдущем, проявилось влияние интеграционных процессов слухового восприятия и математических интерполяционных методов, нивелирующих частичное ограничение частотного диапазона РС и способствующих повышению его помехоустойчивости.

Отдельного рассмотрения заслуживают динамические параметры РС, тесно связанные с его модуляционными характеристиками. В целом РС формируется путем модуляции гармонической или шумоподобной основы, составляющих вокализованные (гласные и сонорные) и консонантные фонемы соответственно. Сложная структура РС, обусловленная амплитудной, частотной и фазовой модуляцией, позволяет в значительной степени повысить его помехоустойчивость: утрата одних значимых параметров может быть компенсирована за счет других, не подвергшихся чрезмерному искажению.

Другими важными инструментами повышения помехоустойчивости РС являются: эффект коартикуляции, слитное произношение слогов – дифонов и трифонов, объединяющих изолированные фонемы в фонетические элементы речи; а также локусы, позволяющие восстанавливать параметры слабых консонантных фонем по спектральным параметрам примыкающих к ним вокализованных звуков [7, 8].

Крайне важную роль в процессах РР имеют дифонные переходы – выполняющие функцию согласования между консонантными фонемами в пределах одного слова. Именно через дифонные переходы, в определенном понимании, реализуется фонетическая функция А.Н. Пирогова (ФФП). Так на графической сонограмме РС без купюр (позиция 1 на рис.2) выделены области некоторых дифонных переходов. В случае утраты какого-либо участка такого перехода с помощью интерполяционных методов с высокой степенью вероятности, по тренду ФФП и остаточным следам РС можно осуществить восстановление отсутствующего сегмента. Интеграционные процессы слухового восприятия в определенной степени успешно справляются с этой задачей. Однако, необходимо учитывать, что существующие перспективные методы реконструкции РС, искаженных шумами и помехами, могут с большей эффективностью повысить РР. Так, некоторые отечественные программные продукты (Лазурь, Абессин) и другие звуковые редакторы компании Adobe уже сейчас позволяют восстанавливать графические образы (сонограммы) РС, искаженных шумами и помехами [4-6].

Таким образом, можно сделать определенные выводы относительно возможностей повышения РР для РС, подвергшегося ограничениям частотного диапазона.

Заключение

На основе анализа современных представлений о механизмах повышения помехоустойчивости речевого сигнала и результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. современные методы и способы ведения АР-Р, основанные на обработке вторичных сигналов в режиме отложенного анализа, позволяют существенно повысить качество исходного РС, искаженного шумами и помехами;
2. действующие методики, не учитывающие в полной мере возможности реконструкции РС, не могут обеспечить необходимой достоверности оценок ЗРИ;
3. формантная теория РР, учитывающая только статические параметры РС, не может далее служить единственной, базовой теоретической основой при разработке новых методик оценок ЗРИ;
4. при разработке новых методик оценки ЗРИ необходимо исследовать и рассмотреть современные модели и описания РС, в т.ч. основанные на взаимодействии динамических и статических параметров, повышающих помехоустойчивость РС.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ:

1 Герасименко В.Г., Лаврухин Ю.Н., Тупота В.И. Методы защиты акустической речевой информации от утечки по техническим каналам. М.: РЦИБ Факел, 2008. 256 с.
2 Сапожков М.А. Электроакустика. М.: Связь, 1978. 282 с.
3 Хорев А.А. Техническая защита информации: Учебное пособие для студентов вузов; В 3 т. М.: НПЦ Аналитика, 2008. Т.1. Технические каналы утечки информации. 436 с.
4 Дворянкин С.В., Макаров Ю.К., Хореев А.А. Обоснование критериев эффективности защиты речевой информации от утечки по техническим каналам // Защита информации. INSIDE, 2007. № 2. С. 18–25.
5 Дворянкин С. В., Харченко Л. А., Козлачков С.Б. Оценка защищенности речевой информации с учетом современных технологий шумоочистки // Вопросы защиты информации. 2007. №2 (77). С. 37-40.
6 Дворянкин С.В., Михайлов Д.М., Панфилов Л.А., Козлачков С.Б., Бонч-Бруевич А.М., Насенков И.Г. Интерпретация и контурный анализ спектрограмм звуковых сигналов в процессе их шумоочистки // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2015. №3. С. 88-99.
7 Козлачков С.Б., Дворянкин С.В., Бонч-Бруевич А.М. Ограничения формантной теории разборчивости речи в приложениях защиты речевой информации // Вопросы кибербезопасности. 2016. №5(18). С. 28-35.

8 Козлачков С.Б., Дворянкин С.В., Бонч-Бруевич А.М. Проблемы и перспективы защиты акустической речевой информации // Специальная техника. 2016. №6. С. 22-29.
9 Скрыль С.В., Бонч-Бруевич А.М., Козлачков С.Б., Никулин С.С. Особенности выделения речевой информации при ее зашумлении с целью защиты // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №2. С. 26-32.
10 Алдошина И.А. Основы психоакустики // Звукорежиссер. 1999. http://www.625-net.ru
11 Журавлев В.Н., Архипова А.Е. Анализ противоречий теорий речеобразования и слуха с позиции идентификации информационных параметров и характеристик речевых сигналов // Информационные технологии и компьютерная инженерия. 2007. №2(9). С. 180-185.
12 Покровский Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи. М.: Связьиздат, 1962. 392 с.
13 Пирогов А.А. Основы Фонетической теории речи. Фонетическая функция как универсальный природный механизм кодирования-декодирования речевой информации любого происхождения // Научный Журнал Русского Физического Общества. 2001. №1-12. С. 15-28.
14 Акбулатов А.Ш., Баронин С.П., Куля В.И., Лейтес Р.Д., Муравьев В.Е., Пирогов А.А., Слуцкер Г.С., Соболев В.Н., Трофимов Ю.К. Вокодерная телефония. Методы и проблемы. М..: Связь, 1974. 536 с.
15 Мишуков А.А. Моделирование процессов управления речевой разборчивостью в многоканальных системах конфиденциальной голосовой связи: диссертация канд. техн. наук: 05.13.18, 05.13.19 / Мишуков А.А.. Воронеж. 2012. С. 152
16 Fogerty D., Humes L.E. The role of vowel and consonant fundamental frequency, envelope, and temporal fine structure cues to the intelligibility of words and sentences // J. Acoustical Society of America. 2012. 131, № 2. P. 1490–1501.
17 Divenyi P. Perception of complete and incomplete formant transitions in vowels // J. Acoustical Society of America. 2009. 126, № 3. P. 1427–1439.

REFERENCES:

1 Gerasimenko V.G., Lavruhin Ju.N., Tupota V.I. Metody zashhity akusticheskoj rechevoj informacii ot utechki po tehnicheskim kanalam. M.: RCIB Fakel, 2008. P. 256. (In Russian).
2 Sapozhkov M.A. Jelektroakustika. M.: Svjaz, 1978. P. 282. (In Russian).
3 Horev A.A. Tehnicheskaja zashhita informacii: Uchebnoe posobie dlja studentov vuzov; V 3 t. M.: NPC Analitika, 2008. T.1. Tekhnicheskie kanaly utechki informacii. P. 436. (In Russian).
4 Dvorjankin S.V., Makarov Ju.K., Horeev A.A. Obosnovanie kriteriev jeffektivnosti zashhity rechevoj informacii ot utechki po tehnicheskim kanalam // Zashhita informacii. INSIDE, 2007. № 2. pp. 18–25. (In Russian).
5 Dvorjankin S. V., Harchenko L. A., Kozlachkov S.B. Ocenka zashhishhennosti rechevoj informacii s uchetom sovremennyh tehnologij shumoochistki // Voprosy zashhity informacii. 2007. №2 (77). pp. 37-40. (In Russian).
6 Dvorjankin S.V., Mihajlov D.M., Panfilov L.A., Kozlachkov S.B., Bonch-Bruevich A.M., Nasenkov I.G. Interpretacija i konturnyj analiz spektrogramm zvukovyh signalov v processe ih shumoochistki // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'juternye sistemy. 2015. №3. pp. 88-99. (In Russian).
7 Kozlachkov S.B., Dvorjankin S.V., Bonch-Bruevich A.M. Ogranichenija formantnoj teorii razborchivosti rechi v prilozhenijah zashhity rechevoj informacii // Voprosy kiberbezopasnosti. 2016. №5(18). pp. 28-35. (In Russian).
8 Kozlachkov S.B., Dvorjankin S.V., Bonch-Bruevich A.M. Problemy i perspektivy zashhity akusticheskoj rechevoj informacii // Special'naja tehnika. 2016. №6. pp. 22-29. (In Russian).
9 Skryl' S.V., Bonch-Bruevich A.M., Kozlachkov S.B., Nikulin S.S. Osobennosti vydelenija rechevoj informacii pri ee zashumlenii s cel'ju zashhity // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2014. №2. pp. 26-32. (In Russian).
10 Aldoshina I.A. Osnovy psihoakustiki // Zvukorezhisser. 1999. http://www.625-net.ru
11 Zhuravlev V.N., Arhipova A.E. Analiz protivorechij teorij recheobrazovanija i sluha s pozicii identifikacii informacionnyh parametrov i harakteristik rechevyh signalov // Informacionnye tehnologii i komp'juternaja inzhenerija. 2007. №2(9). pp. 180-185. (In Russian).
12 Pokrovskij N. B. Raschet i izmerenie razborchivosti rechi. M.: Svjazizdat, 1962. P. 392. (In Russian).
13 Pirogov A.A. Osnovy Foneticheskoj teorii rechi. Foneticheskaja funkcija kak universal'nyj prirodnyj mehanizm kodirovanija-dekodirovanija rechevoj informacii ljubogo proishozhdenija // Nauchnyj Zhurnal Russkogo Fizicheskogo Obshhestva. 2001. №1-12. pp. 15-28. (In Russian).
14 Akbulatov A.Sh., Baronin S.P., Kulja V.I., Lejtes R.D., Murav'ev V.E., Pirogov A.A., Slucker G.S., Sobolev V.N., Trofimov Ju.K. Vokodernaja telefonija. Metody i problemy. M..: Svjaz, 1974. P. 536. (In Russian).
15 Mishukov A.A. Modelirovanie processov upravlenija rechevoj razborchivost'ju v mnogokanal'nyh sistemah konfidencial'noj golosovoj svjazi: dissertation work of candidate of technical sciences: 05.13.18, 05.13.19 / A.A.Mishukov. – Voronezh, 2012. – P. 152. (In Russian).
16 Fogerty D., Humes L.E. The role of vowel and consonant fundamental frequency, envelope, and temporal fine structure cues to the intelligibility of words and sentences // J. Acoustical Society of America. 2012. 131, № 2. P. 1490–1501.
17 Divenyi P. Perception of complete and incomplete formant transitions in vowels // J. Acoustical Society of America. 2009. 126, № 3. P. 1427–1439.