

РЕЧЕПОДОБНАЯ ПОМЕХА, СТОЙКАЯ К ШУМООЧИСТКЕ, КАК РЕЗУЛЬТАТ СКРЕМБЛИРОВАНИЯ ЗАЩИЩАЕМОЙ РЕЧИ

Дворянкин С.В.¹, Дворянкин Н.С.², Устинов Р.А.³

Цель статьи: показать возможность создания речеподобной помехи на основе скремблирования защищаемого речевого сигнала, стойкой к процедурам шумоочистки, восстановления и реконструкции искаженной речи, посредством обработки изображений ее спектрограмм, в том числе с использованием базы голосовых данных диктора.

Методы исследования: используются методы прикладного системного анализа, цифрового спектрально-временного анализа, цифровой обработки сигналов и изображений, образного анализа сонограмм.

Результаты: в качестве основного показателя защищенности речевой информации предложено использовать понятие потенциальной речевой разборчивости, определены способы оценки потенциальной разборчивости. Разработан алгоритм цифровой шумоочистки компенсационного типа с использованием технологии образного анализа-синтеза. Сформированы требования к создаваемым РПП, заключающиеся в изменении спектрально-временной огибающей речи, удалении («ослаблении») следов гармонической структуры речи, выравнивании мощностей защищаемого речевого сигнала и маскирующей его РПП. Изложены подходы к формированию РПП, стойкой к процедурам цифровой шумоочистки и реконструкции искаженных сонограмм, представлены предложения по методике оценки эффективности помех через показатель потенциальной разборчивости. Полученные результаты позволят лучше понять работу атакующих средств, разработать методы и средства эффективного противодействия возможным угрозам, расширить возможности существующих систем защиты речевой информации.

Научная новизна состоит в том, что разработаны критерии оценки эффективности речеподобных помех с учетом возможностей нарушителя по восстановлению разборчивости искаженных речевых сообщений, предложены способы формирования РПП скремблерного типа, удовлетворяющие таким критериям, обоснованы предложения по совершенствованию существующих методик оценки и контроля защищенности речевой информации от её утечки по техническим каналам.

Ключевые слова: средства акустической речевой разведки, защита речевой информации, разборчивость речи, акустическая помеха, скремблирование речевого сигнала, спектрограмма.

DOI: 10.21681/2311-3456-2022-5-14-27

Введение

Известно, что информация, получаемая в момент ее озвучивания или демонстрации является самой оперативной, ёмкой и готовой к немедленному использованию злоумышленником (ЗЛ). В личном порядке сообщают и показывают те сведения, которые по тем или иным причинам не могут быть доверены техническим средствам передачи, хранения и обработки, и/или которые являются выжимкой больших

объемов знаний и массивов данных, циркулирующих и хранящихся в информационном пространстве.

Вот почему неослабевающий интерес ЗЛ обращен к непосредственному прослушиванию речи и/или сопровождающего ее акустического фона (иногда несущего не меньше инфосведений, чем речь), обуславливает непрерывное совершенствование технических каналов и средств съема, перехвата, получе-

1 Дворянкин Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры стратегических информационных исследований НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия. E-mail: svdvoryankin@mephi.ru

2 Дворянкин Никита Сергеевич, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия. E-mail: nik.dvrn@gmail.com

3 Устинов Роман Андреевич, аспирант Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия. E-mail: public-ura@yandex.ru

ния и последующей обработки акустической речевой информации (РИ), в том числе в отложенном режиме с применением современных средств шумоочистки и восстановления разборчивости искажённых помехами речевых сигналов и сообщений (РС).

Поэтому вопросам защищенности РИ от утечки по техническим каналам, в том числе посредством поставки активных акусто-загрязняющих помех, до сих пор уделяется много внимания специалистами по ЗИ и ИБ и, конечно же, при аттестации выделенных помещений по требованиям безопасности информации⁴.

Основной задачей активных средств защиты акустической информации является создание шумов и помех в речевом диапазоне частот для маскировки смыслового содержания и тематики разговора в защищаемом помещении в основном за счет превышение уровня шума, помехи над информативным сигналом [1, 2].

Особое место здесь занимают речеподобные помехи (РПП), сформированные путем микширования звуковых речевых фрагментов от одного или нескольких звуковых речевых источников, которые как считается обладают наилучшим эффектом для предотвращения разборчивости речи ЗЛ по сравнению с другими видами шумов и помех [1-5].

По оценке эффективности таких РПП проведено немало исследований и экспериментов [1-5], в которых показано, что РПП обеспечивают заданный уровень разборчивости при меньших отношениях сигнал-шум чем белый и другие виды шумов.

Однако практически нигде не учитывалась стойкость РПП к процедурам их подавления и компенсации в процессе цифровой шумоочистки ими маскируемых РС. Тем не менее, применение процедур шумоочистки может значительно улучшить словесную разборчивость и позволяет ЗЛ повысить ранг перехваченной речевой информации⁵.

Что касается самого понятия РП-помехи как одного из видов речеподобного сигнала (РПС), то будем придерживаться определения, данного в работах^{6, 7},

а также [1]: «синтезируемый по случайному закону акустический сигнал, который по своим основным характеристикам соответствует речевому сигналу, но не содержит смысловой информации». При этом под основными характеристиками понимаются усреднённые спектральные и временные характеристики.

Потенциальная разборчивость как новый показатель защищенности речи

Попробуем оценить эффективность речеподобных и иных помех через показатель потенциальной разборчивости, учитывающий потенциальные (максимальные) возможности средств и методов акустической разведки по восстановлению искаженных РС.

Под разборчивостью речи (РР) в самом общем виде понимают отношение числа принятых на выходе канала речевой связи и понятых элементов речи (слов, слов, фраз) к числу переданных на его вход. Считается, что все виды разборчивости взаимосвязаны и могут быть пересчитаны из одного вида в другой⁸. Например, слоговая в фразовую, фразовая в словесную и т.д.

Для оценки эффективности технических каналов утечки речевой информации (ТКУРИ) наиболее часто применяется показатель словесной разборчивости W , которую можно определить инструментально-расчетным методом через измеренные отношения сигнал-шум в октавных полосах [8, 9], а также [1, 4]. Полученное таким образом значение словесной разборчивости сравнивается с нормой и, если она не превышена, принимается решение о защищенности речевой информации по данному каналу.

Однако, следует заметить, что при таких условиях с нормой сравнивается лишь значение текущей, одномоментно определяемой РР, а не потенциальной РР, которую может достичь ЗЛ путем обработки принятых по ТКУРИ аудиоданных, с применением существующих и перспективных технологий шумоочистки, реконструкции и восстановления искаженной речи, в том числе в отложенном режиме обработки предварительно сделанных аудиозаписей.

Такая потенциальная РР по своим значениям может существенно отличаться от измеренной текущей РР в большую сторону и превышать норму, позволяя ЗЛ понимать перехваченное сообщение и делать определенные выводы.

Именно эту потенциальную РР можно и нужно рассматривать как основной показатель защищенности речи и

4 Дураковский А.П., Куницын И.В., Лаврухин Ю.Н. Контроль защищенности речевой информации в помещениях. Аттестационные испытания вспомогательных технических средств и систем по требованиям безопасности информации. НИЯУ МИФИ. 2015. 152 с.

5 Григорьев И. А. Экспериментальная оценка влияния шумоочистки на разборчивость речи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т.6. № 5. С. 86–89.

6 Воробьев В.И., Давыдов А.Г., Давыдов Г.В. Речеподобные сигналы: разновидности, основные параметры, способы формирования, области применения // Минск: Доклады БГУИР. 2009. №3. С. 9–16.

7 Зельманский О.Б. Методика синтеза речеподобных сигналов на разных языках для систем защиты информации // Информационные системы и технологии. 2012. № 4. С. 122–133.

8 Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи // М.: Связь-издат. 1962.

Речеподобная помеха, стойкая к шумоочистке, как результат...

использовать в методиках оценки уровня защиты РИ, в том числе и с помощью РПП, для сравнения с нормой.

Как определить потенциальную РР? Для этого можно воспользоваться:

- связью спектрально-временных описаний РС с фонетической функцией Пирогова (ФФП) [6], отвечающей за смысловое наполнение речевого сигнала;
- уточненной синусоидальной моделью речевого сигнала и РП-помехи⁹, [7], позволяющую выделять параметры (следы) их составляющих опорных узкополосных компонент;
- основными положениями образного анализа-синтеза изображений сонограмм¹⁰ [7-9], позволяющими выделять, добавлять, удалять на них параметры (следы) узкополосных составляющих указанной модели речевых и речеподобных сигналов (РПС);
- методами и алгоритмами цифровой компенсационной шумоочистки РС от РПП, используя найденные и обработанные следы узкополосных составляющих речи и помех для последующей реконструкции РИ в том числе на основе голосовой базы данных диктора¹¹.

Фонетическая функция Пирогова и спектрально-временная огибающая речи

В трудах профессора Пирогова было показано, что в качестве сигналов, определяющих процесс кодирования речевой информации, человек воспринимает фонетическую функцию [6]:

$$P(\varpi, t) = \lg \left[\frac{S(\varpi, t)}{S(\varpi, t - D)} \right], \quad (1)$$

где S — спектральная плотность мгновенного спектра речевого сигнала в моменты времени t и $t - \tau$ на определяющей (средней) частоте, соответствующей, например, равноартикуляционной частотной полосе в стандартной полосе канала тональных частот 0,3...3,4 кГц.

Таким образом фонетическая функция P устанавливает прямую связь между спектрально-временными описаниями $S(\varpi, t)$ и смысловым содержанием РС.

Это дает основания полагать и многократно экспериментально подтверждено¹¹ [7-9], что:

9 R. McAulay and T. Quatieri, Speech analysis/Synthesis based on a sinusoidal representation, in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. V. 34, no. 4. P. 744-754, August 1986.

10 Дворянkin С.В. Речевая подпись. М.: РИО-МТУСИ. 2003. – 184 с.

11 Дворянkin С.В. Цифровая шумоочистка аудиоинформации. Под ред. А.В. Петракова. М.: ИП РадиоСофт, 2011. 208 с.

— звуки или РС, имеющие одинаковые узкополосные амплитудные динамические спектрограммы воспринимаются на слух схожим образом, идентично, хотя могут иметь несовпадающие волновые формы во временной области (различные осциллограммы);

— речевые сигналы, сонограммы которых имеют одинаковую фонетическую функцию Пирогова (огигающую спектра, формантную структуру), имеют одинаковое смысловое наполнение.

Иллюстрация последнего утверждения представлена на рис. 1, где одна и та же динамическая частотно-временная огибающая накладывалась на различные текстуры и затем производилась спектральная инверсия во временную область. Текстовая запись фраз всех просинтезированных по спектрограммам с разной текстурой сигналов совпадает несмотря на отличия в звучании по естественности и натуральности.

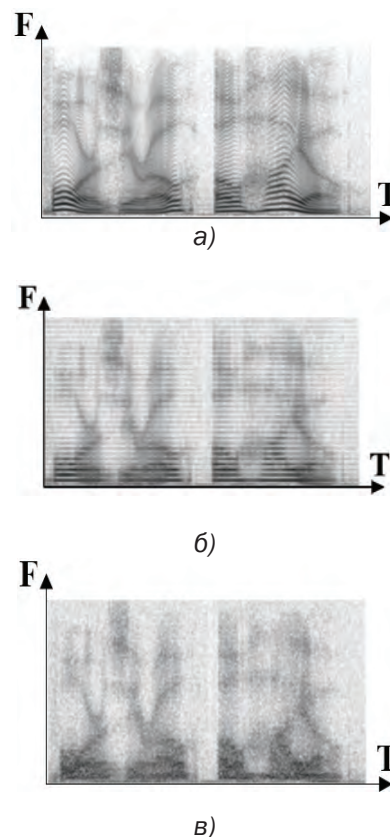


Рис.1. Сонограммы речевых сигналов с одинаковой фонетической функцией.

На рис. 1 представлены:

а) сонограмма исходного речевого сигнала – эталонное звучание речи из 4-х слов;

б) динамическая огибающая РС, наложенная на кратные гармоники – звучит как монотонная речь;

в) огибающая РС, наложенная на спектр белого шума – звучит как громкий шёпот.

На изображениях сонограмм (спектрограмм звука и речи) рис. 1 и последующих, построенных при помощи специализированного программного обеспечения (СПО) «Лазурь», параметр времени откладывается по оси абсцисс, а частоты – по оси ординат, начиная с левого нижнего угла изображения. Максимальная мощность исследуемого сигнала в узле частотно-временной сетки указана черным цветом, минимальная – белым. Промежуточные значения – в градациях серого.

Таким образом, спектрально-временная огибающая РС, определяющая его формантную структуру, несет основную смысловую нагрузку и отвечает за разборчивость речи. Вот почему при формировании генератором РП-помехи необходимо, чтобы она так разрушала спектральную огибающую защищаемого РС, чтобы ЗЛ не смог ее восстановить и прослушать потом просинтезированную по восстановленной спектрограмме разборчивую речь, пусть и с некоторыми дефектами звучания (монотон, шёпот, металл и др.).

Уточненная узкополосная синусоидальная модель РС

Помимо требования к разрушению динамической спектральной огибающей защищаемой речи необходимо, чтобы формируемая РПП хорошо маскировала параметры («следы») узкополосных составляющих защищаемой речи, по которым также возможна ее реконструкция и восстановление РР по уточненной синусоидальной модели РС.

Развитие этой модели в¹¹ [7-9] показало, что РС при размере анализируемого K -го кадра речи 16–40 мс с шагом анализа 4–12 мс скользящим временным усеченным окном Гаусса с размером выборки в $N=1024$ отсчетов при $F_s=8$ КГц может быть описан как:

$$s(n) = \sum_{l=1}^L A_l e^{\frac{-n^2}{2\sigma}} \cos(\omega_l n + \theta_l(n) + \varphi_l) + e(n) \quad (2)$$

где n – номер временного отсчета; L – количество опорных значимых синусоид в фрейме; A_l – амплитуда; ω_l – частота; φ_l – начальная фаза каждой l -й синусоиды, составляющей звучание этого речевого фрейма; θ_l – функция нелинейности фазы, σ – эффективная ширина окна Гаусса, $e(n)$ – остаточный сигнал.

Указанные параметры узкополосных составляющих речи и/или помехи могут быть оценены на этапе анализа изображений амплитудных спектрограмм (рис. 2), построенных по результатам выполнения кра-

тковоременного преобразования Фурье (КПФ) с базой быстрого преобразования Фурье (БПФ) – N .

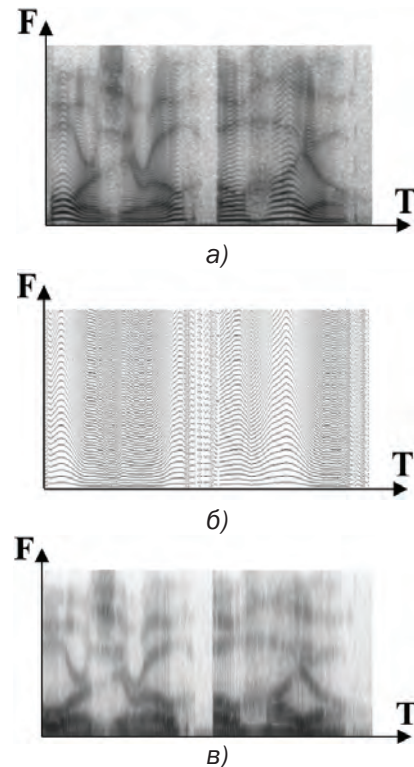


Рис. 2. Расслоение сонограммы в контексте узкополосной модели РС:

а) исходная полутоновая сонограмма фразы из 4-х слов (гармоническая и формантная структуры сложены вместе);
б) бинарная компонента из контуров, треков ЛМ или «следов» узкополосных составляющих (только гармоническая структура РС);
в) широкополосная полутоновая компонента (только формантная структура РС).

В таком виде (2) исходный речевой или речеподобный сигнал (РПС) помехи можно рассматривать как суперпозицию элементарных узкополосных сигналов, вейвлетов Морле, или коротких синусоид, взвешенных окном Гаусса. Заметим, что при минимизации длительности временного шага анализа КПФ формула (2) сводится к известной синусоидальной модели Макалая-Кватъери¹⁰.

Из свойств преобразования Фурье следует, что умножение функции на синусоиду во временной области приводит к сдвигу спектра этой функции на частоту этой синусоиды в частотной области. Для функции временного окна Гаусса спектром тоже является функция колокола Гаусса, но уже другой ширины и смещенная на частоту синусоиды модели (2). Следовательно вся информация о работе узкополосной синусоидальной модели (2) будет содержаться на изображениях спектрограмм в амплитудах, часто-

тах и фазах локальных максимумов (ЛМ) или пиках мгновенного спектра, и, соответственно, в треках, контурах их развития еще называемых следами узкополосных фонообъектов.

Информации о параметрах следов фонообъектов (амплитуде и частоте опорных синусоид), выделяемых как треки ЛМ на изображениях спектрограмм вполне достаточно для реализации преобразования «звук — изображение — звук» или образного анализа-синтеза широко применяемого в последнее время в компьютерных технологиях шумоочистки¹².

Образный анализ-синтез речевого сигнала и методы спектральной инверсии

Если модель (2) справедлива и корректно проведено КПФ, то:

- по любой заданной амплитудной спектрограмме РС или РПС можно восстановить его фазовую спектрограмму и в итоге сам новый речеподобный сигнал с точностью до начальной фазы его опорных узкополосных составляющих;
- и, наоборот, по фазовой спектрограмме — восстановить амплитудную, с точностью до постоянного множителя спектральных огибающих узкополосных компонент.

Эти основные положения образного анализа, задающие связь между амплитудными и фазовыми спектрами речи или РПС, на основе речевой модели (2) также подтвердились в результате многочисленных экспериментов¹¹ [7-9].

В свою очередь это дало возможность предложить использовать технологию «звук — изображение — звук» разбив ее на две процедуры — анализа и синтеза, между которыми проводить необходимую обработку изображений амплитудных спектрограмм, в целях решения той или иной задачи, в частности шумоочистки, скремблирования и др.

Получить изображение спектрограммы смеси РС и помех для последующего анализа и обработки (разделения, фильтрации, сшивки, удаления, добавления следов) можно воспользовавшись базовыми принципами кратковременного преобразования Фурье (КПФ) [7-9] и моделью (2) речевого сигнала.

Напрямую же использовать для преобразования обработанного изображения, спектрограммы в звук обратное КПФ будет невозможно, поскольку информация о фазе отсутствует, а спектрограммы содержат информацию только об амплитуде квазигармонических составляющих [7-9]. Поэтому если сразу делать обратное кратковременное преобразование Фурье,

то результат звучания нового синтезированного РПС будет неудовлетворительным.

Для решения этой коллизии можно использовать быстрый алгоритм Гриффина-Лима¹², [7]. С его помощью делается обратное преобразование Фурье (ОПФ) построенной спектрограммы, получая изначально «плохой звук». Затем делается прямое преобразование Фурье этого звука с получением комплексного спектра, в котором уже содержится некая первичная информация о возможной фазе.

Далее, к так полученной фазовой составляющей снова подставляется исходная амплитудная составляющая спектра и снова берётся ОПФ, что приводит к получению уже более «чистого» звука. Так делается несколько десятков раз. Для более-менее хорошего звучания потребуется не менее 80-100 таких итераций.

В качестве замены алгоритма синтеза Гриффина-Лима в речевых приложениях сегодня используются такие нейронные вокодеры, как WaveNet, WaveRNN, WaveGlow и другие [10-12], также требующие значительных вычислительных и временных ресурсов, но дающих более качественное звучание синтезированной речи. Чаще других сегодня, для такого вокодерного синтеза используется нейронная сеть, основанная на WaveRNN, которая постепенно создает из мел-спектрограммы звуковую волну, что дает улучшение качества чем по методу Гриффина-Лима.

В тоже время используя в процессе шумоочистки восстановленные и реконструированные параметры (следы) узкополосной модели (2) для первоначального старта процедур синтеза речи и/или РП-помех по спектрограмме с последующим подхватом восстанавливаемой фазы процедурами обработки Гриффина-Лима можно кратно сократить количество итераций для получения нового синтезированного по следам РПС с улучшенным качеством звучания и в масштабах времени близких к реальному даже с использованием стандартной вычислительной техники. Рассмотрим такие процедуры шумоочистки более подробно.

Восстановление и реконструкция спектрограмм искаженной помехами речи

Как уже отмечалось в требованиях к создаваемой РПП, которая помимо разрушения формантной структуры защищаемого РС, определяющейся формой спектрально-временных огибающих, должна также

12 D. Griffin and J. Lim, «Signal estimation from modified short-time fourier transform» Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 32, no. 2, pp. 236-243, 1984.

разрушать и его гармоническую структуру. Поскольку имея в распоряжении только часть информации о гармонической структуре спектрограммы защищаемого речевого сигнала, оставшуюся после действия некорректно сформированной РПП, другую её часть ЗЛ может попытаться восстановить или реконструировать на основе свойств самого РС, например, используя в том числе свойства кратности гармоник основного тона, как это показано на рис. 3.

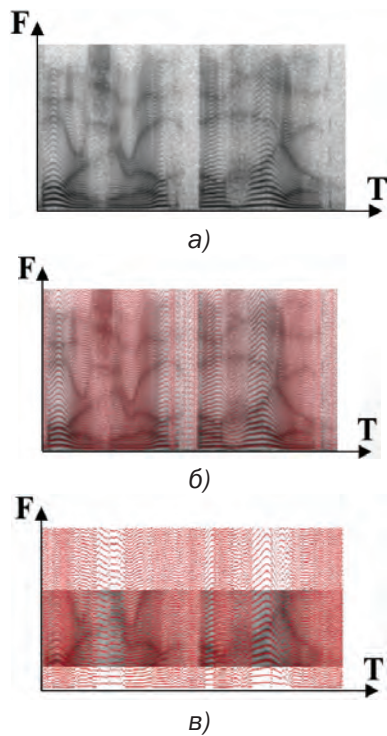


Рис. 3. Восстановление и реконструкция гармонической структуры РС:

- а) сонограмма исходной речи;
 б) получение гармонической структуры (красный) по всей спектрограмме РС;
 в) реконструкция всей полной гармонической структуры (красный) РС по сохранившемуся участку спектрограммы.

Как видим результат такого восстановления гармонической структуры очень близок к оригиналу.

Восстановленный участок гармонической структуры как некоторый образец (маску) ЗЛ может использоваться для нейросетевого поиска необходимого речевого фрагмента в базе голосовых данных предполагаемого диктора¹², [13], который затем и вставляется на место искаженного речеподобной помехой. Процесс такого поиска похож на поиск отпечатка пальца из дактилоскопической базы по некачественному образцу, которому сопоставляется несколько подходящих вариантов.

Затем проводится окончательная сборка и обработка полученных изображений спектрограмм вос-

становленных участков речи совмещая, сшивая, добавляя и удаляя следы её узкополосных составляющих и ретушируя формантную структуру для получения нужного результата в рамках предположительной тематики разговора. На последнем этапе по так обработанному изображению спектрограммы проводится синтез нового РС с заданными спектральными свойствами используя методы и алгоритмы образного анализа-синтеза и спектральной инверсии.

Другой вариант шумоочистки основан на обнаружении следов помехи на изображении спектрограммы, ее синтез по найденным следам в соответствии с (2) и вычитание из исходной смеси.

Алгоритм цифровой шумоочистки компенсационного типа с применением основных положений образного анализа-синтеза сонограмм представлен на рис. 4. В зависимости от того, чьи следы (речи или помехи) выбираются за опорные в данном конкретном случае, обработка идет либо по левой, либо правой ветке алгоритма, используя описанные выше приемы обработки (реконструкции и восстановления) следов фонообъектов.

Возможна и в ряде случаев весьма уместна последовательная поочередная обработка по обоим веткам.

На практике предлагается начинать шумоочистку по изначальному выявлению в смеси следов помех. Поскольку уровень мощности РПП как правило превышает уровень защищаемой речи следы помехи, имея определенные демаскирующие признаки, могут явно обнаруживаться на спектрограммах и подлежат компенсации – синтезу с последующим вычитанием из исходной смеси.

Примеры реализации веток данного алгоритма для шумовой и речеподобной помехи приведены на рис. 5 и 6.

Причем в первом случае (рис. 5) на изображении зашумленной спектрограммы выделялись оставшиеся следы речи с их дальнейшей реконструкцией и наложением восстановленной гармонической структуры на исходную спектрограмму и синтезом по ней нового очищенного РС. А во втором (рис. 6), определялись следы самой РПП, в виде речи «мешающего» диктора, по которым проводился ее синтез с последующим вычитанием из исходной полезной смеси «сигнал-помеха».

Оценив возможности ЗЛ по восстановлению и реконструкции искаженных РС методами образного анализа спектрограмм суммируем *требования к создаваемым РПП*, которые должны обеспечивать:

Речеподобная помеха, стойкая к шумоочистке, как результат...

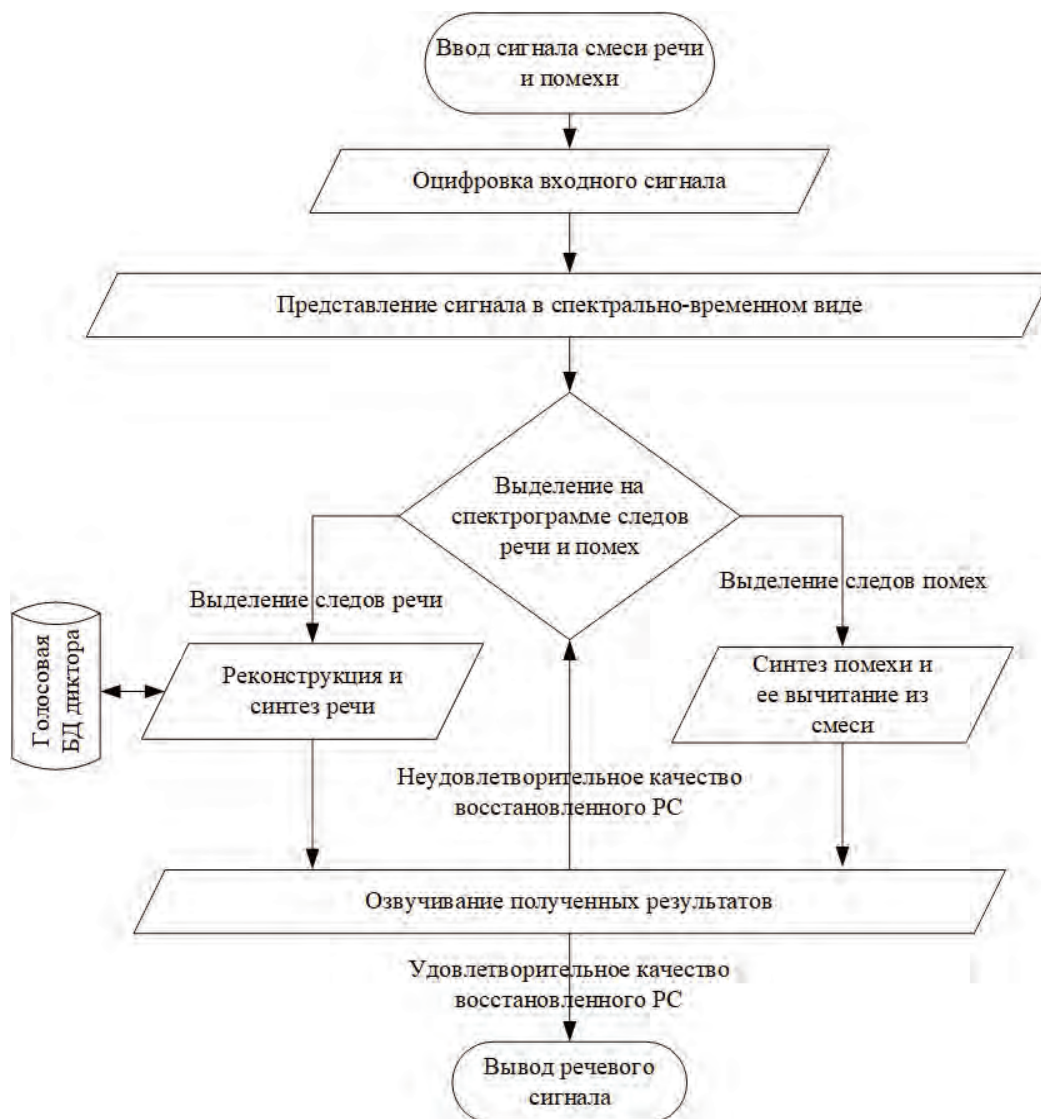


Рис 4. Алгоритм цифровой шумоочистки компенсационного типа с использованием техники образного анализа.

- кардинальное изменение спектрально-временной огибающей защищаемой речи: полное изменение уничтожение, «размытие» ее исходной формантной структуры;
- удаление, ослабление следов гармонической структуры исходной речи, добавление ложных следов;
- выравнивание мощностей защищаемого РС и его маскирующей РПП, чтобы следы помехи не превалировали над следами речи и наоборот, что облегчает ЗЛ процесс расслоения следов речи и помех, и в конечном итоге восстановление РР.

Предполагается, что удовлетворить указанным требованиям сможет РПП, формируемая из потока исходной защищаемой речи путем ее скремблирования.

Речеподобные помехи на основе скремблирования защищаемой речи

Схема формирования речеподобной помехи из исходного защищаемого от утечки РС показана на рис. 7.

На рисунке 7 схематично обозначены: $s(t)$ – исходный речевой сигнал; $WR[s(t)]$ – блок записи (задержки) исходного речевого сигнала; $FFT[s(t-\tau)]$ – блок быстрого преобразования Фурье над исходным речевым описанием; $M\{|S(\omega, t-\tau)|\}$ – блок модификации амплитудного спектра огибающих; $IFFT[M\{|S(\omega, t-\tau)|\}]$ – блок обратного преобразования Фурье над модифицированным амплитудным спектром огибающих; $\hat{s}(t)$ – модифицированный речеподобный сигнал (речеподобная помеха); $\bar{s}(t)$ – смесь исходного речевого сигнала и производной от него речеподобной помехи.

Таким образом, фрагмент исходной защищаемой речи длительностью до 100 мс задерживается в стеке

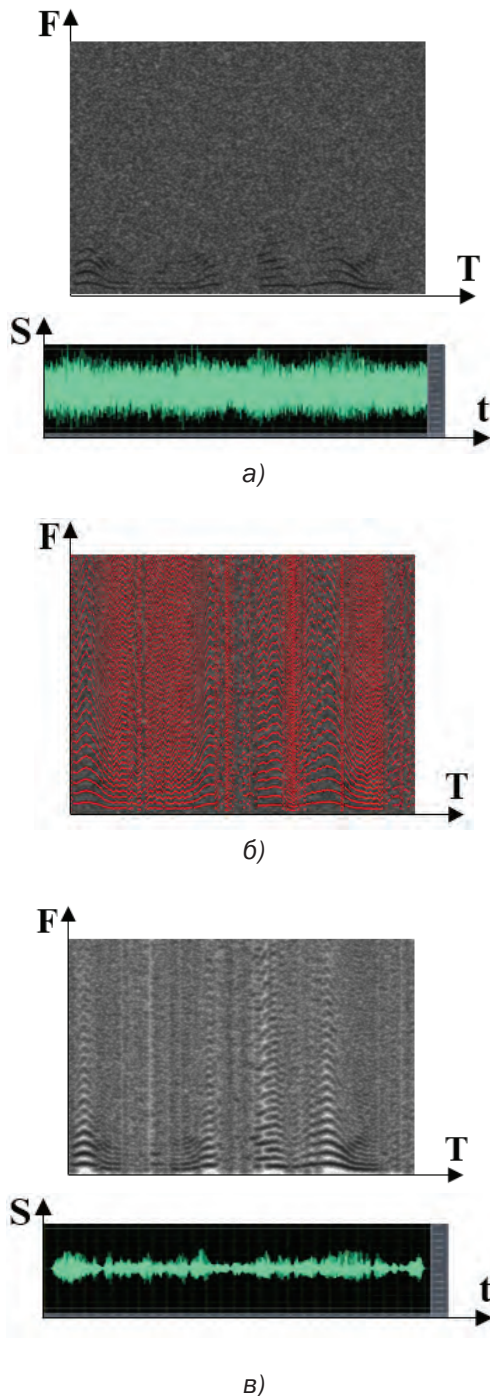


Рис. 5. Спектрограмма и осциллограмма полученной ЗЛ смеси РС и белого шума при SNR=-12 дБ

- а) реконструкция по оставшимся на 1-й спектрограмме следам РС его возможной гармонической структуры;
- б) спектрограмма и осциллограмма РС;
- в) синтезированного по новым реконструированным следам.

памяти, где над ним производится одна из выбранных процедур скремблирования амплитудной спектрограммы с последующим синтезом нового спектрально-временного описания, после чего измененный фрагмент уже как РПП суммируется с исходной речью

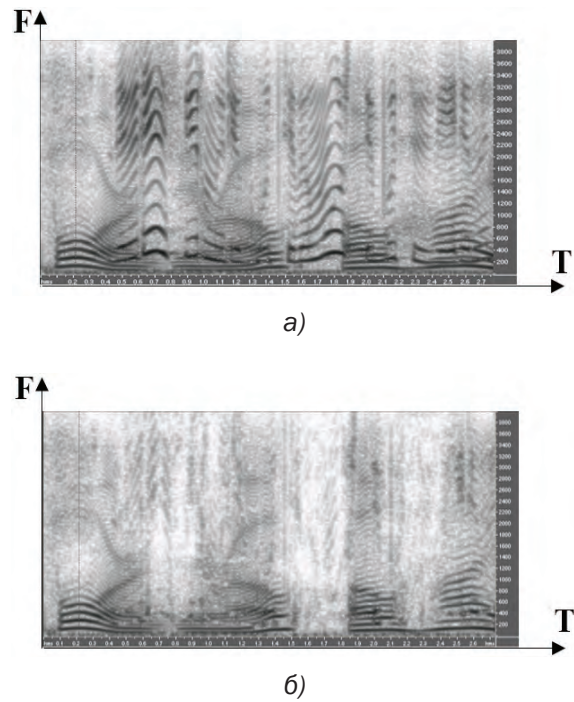


Рис. 6:

- а) спектрограмма смеси РС и РПП;
- б) очищенной речи после расслоения следов речи и РП-помехи с последующим синтезом и вычитанием из смеси последней.

Можно предположить, что, как и для защиты телефонных переговоров^{13, 14, 15} [14] базовыми процедурами скремблирования для создания РПП являются:

1. Инверсия спектра речи (ИС).
2. Частотные перестановки (ЧП).
3. Временные перестановки (ВП).
4. Частотно-временные перестановки (ЧВП).
5. Специальные процедуры речепреобразования (СПР).

Заметим, что инвертированная по спектру речь достаточно легко восстанавливается. Уровень стойкости процедур скремблирования позиций 1-4 существенно повышается с возрастанием порядкового номера процедуры^{14, 15, 16} [14]. В тоже время, моменты коммутации процедур перестановок, достаточно заметны на изображениях спектрограмм (рис. 8, а), что может позволить ЗЛ успешно сепарировать следы помехи от следов защищаемой речи и применить к ним затем один из алгоритмов цифровой шумоочистки (рис. 4).

13 Дворянkin С.В., Девочкин Д.В. Методы закрытия речевых сигналов в телефонных каналах // Защита информации. Конфидент, №5, 1995, с. 45-54.
 14 Барсуков В.С., Дворянkin С.В., Шеремет И.А. Безопасность связи в каналах телекоммуникаций. — М.: Электронные знания, 1992-1993. — 122 с.
 15 Петраков А.В., Лагутин В.С. Утечка и защита информации в телефонных каналах. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 317 с.

Речеподобная помеха, стойкая к шумоочистке, как результат...

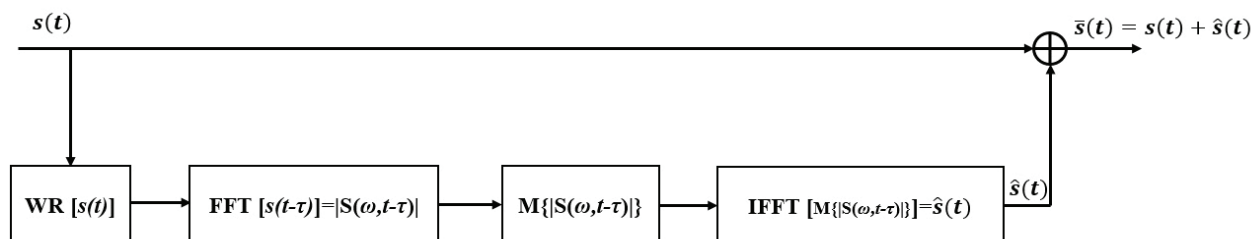


Рис. 7. Схема формирования речеподобной помехи в точке разведдоступности путем скремблирования исходного РС

В этой ситуации могут выручить специальные процедуры речепреобразования, вводящие неразборчивость в речевой сигнал путем модификации изображений амплитудных спектрограмм исходной речи (рис. 8, б и в).

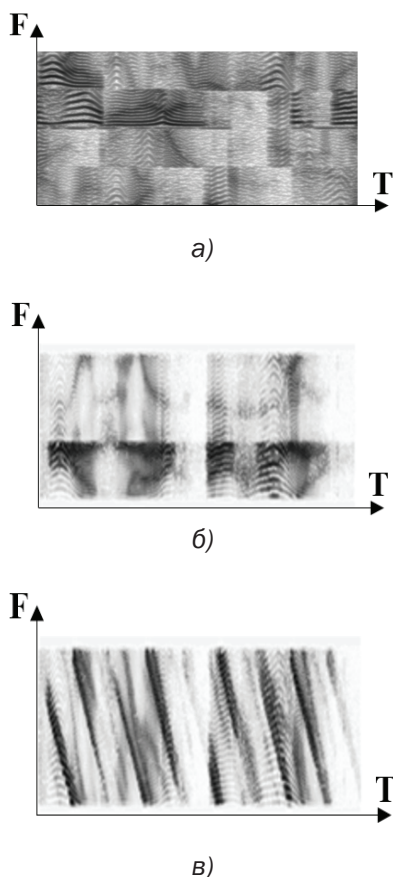


Рис. 8. Спектрограммы скремблирующих РПП:

- а) скремблирование ЧВП;
- б) СПР через инвертирование огибающей РС и ее сдвиг (формантный инвертор);
- в) СПР как динамический кольцевой сдвиг огибающей речи.

Несомненным преимуществом скремблирующих РПП на основе СПР является, то, что они уже согласованы по уровню с защищаемым РС, поскольку являются от него производными, поэтому не требуют автоматической регулировки мощности после

суммирования с защищаемой речью. Плюс имеют формантоподобный спектр, изменяющий и маскирующий оригинальную речевую спектральную огибающую. Кроме того, маскируют исходные и добавляют ложные следы, изначально не присутствующие в модели (2) защищаемого РС, что осложняет для ЗЛ процесс реконструкции принятого РС по выявленным следам.

Тем самым скремблированная из самой защищаемой речи РПП априори удовлетворяет всем вышеуказанным требованиям к речеподобным помехам для противодействия техникам ЗЛ по шумоподавлению и реконструкции принятых искаженных РС.

Кроме того, рассматривая сам РС как помеху можно включить в схему рис. 7 компенсатор его узкополосных составляющих перед самим процессом скремблирования, существенно понизив интегральный уровень РС и помехи в точке возможного съёма

Заметим, что по эффективности к скремблирующим РПП на основе методов ВП приближается помеха речевого хора как сумма независимых речевых сигналов, напрямую не связанных с защищаемой речью. Такие несвязанные прямо с защищаемой речью помехи, суммирующие РС от не менее 3-5 дикторов [1, 4] уже применяются в практике активной акустозащиты и требуют отдельного внимания на предмет оценки их стойкости к современным методам шумоочистки и реконструкции, поскольку здесь могут наблюдаться «пролазы» следов опорных гармоник исходной речи [8] и динамики ее спектральной огибающей в маскируемом РС. Особенно для случаев форсированной речи.

Кроме того, из-за независимости источников РС и такой РПП трудно выровнять мощности защищаемого РС и маскирующей его помехи хора или клонера. Поэтому следы помехи и речи на спектрограммах вполне возможно разделить и восстановить затем РР по одной из веток алгоритма рис. 4.

Все это приводит к необходимости оценки эффективности РПП через показатель ПР.

Об оценке показателя потенциальной разборчивости и эффективности РПП

Рассмотрев способы формирования различных видов РПП скремблерного типа, встает резонный вопрос, как на практике оценить ПР при применении той или иной РПП и тем самым оценить эффективность самой помехи.

Здесь возможны следующие подходы. Первый – корректировка существующей методики для каждого типа помех [1]. Второй – универсализация методики Покровского для всех типов помех за счет внесения в нее поправочных коэффициентов выигрыша в отношении сигнал-шум как теоретически предельного результата возможной шумоочистки и реконструкции искаженного помехой РС⁹. Третий – создание новой методики оценки защищенности РИ через показатель ПР, измеряемый в точках разведдоступности с учетом максимальных возможностей ЗЛ по шумоочистке и реконструкции искаженных РС на основе технологий образного анализа-синтеза речи.

Третий подход представляется наиболее перспективным, поскольку опирается на те же принципы обработки РИ, что и слуховая система человека¹⁶, и использует те же принципы формирования тестовых речевых сигналов при оценках эффективности технологий шумоочистки, что рекомендованы в работах^{9,17}, [1, 15].

Исходя из вышеизложенного предлагается оценивать ПР в 2-а этапа.

В первом оценивается возможности ЗЛ по реконструкции и восстановлению гармонической структуры РС, защищаемого той или иной помехой. Во втором – возможность восстановления динамической спектральной огибающей РС, защищаемого маскируемой и/или изменяемой помехой.

Рассмотрим их подробнее.

1. В процессе измерений ПР предлагается непрерывно озвучивать выделенное помещение (ВП) тестовым речеподобным сигналом с интегральным уровнем речи $L_s=70$ дБ с размеченными границами псевдослов меняющейся длительности от 100 до 350 мс каждое, с характеристиками усредненного спектра русской речи и с изменяющейся частотой основного тона (ЧОТ) от 60 до 350 Гц⁹.

В качестве тестовых сигналов (ТС) можно использовать наборы кратных гармоник с изменяющейся

длительностью таких речевых вокализмов и их ЧОТ в указанных выше пределах (рис. 1б) или же РПС, в виде искусственных псевдослов, спектрограммы которых представлены на рис. 9. Заметим, что такие ТС содержат большое число гармонических составляющих, амплитуды которых уменьшаются с ростом частоты как у усредненного речевого спектра.

Далее включить и озвучивать в точке возможного съема РИ в закольцованном режиме выбранный тип помехи с заданным отношением сигнал-шум (SNR).

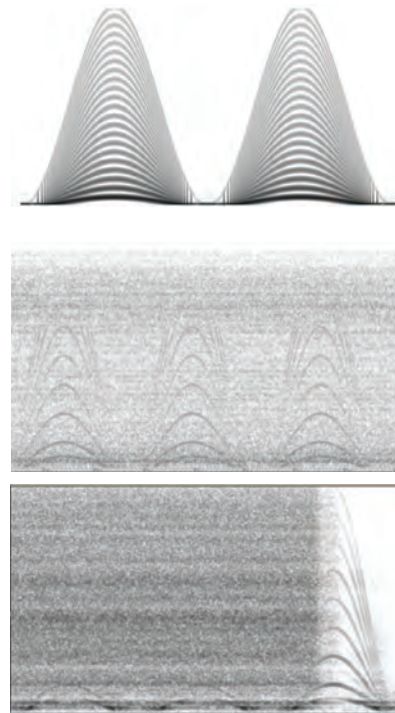


Рис. 9. Спектрограмма тестового сигнала из псевдослов без помехи

а) Спектрограмма смеси ТС-«белый шум» с SNR= -12 дБ и ПР=1.

б) Спектрограмма смеси ТС-«белый шум» с SNR= -16 дБ и ПР=0, снятая в той же точке наблюдения в момент отключения акустозащиты (выключения помехи).

На рис. 9 тестовый РПС маскируется помехой типа «белый шум» с SNR=-12 дБ (рис. 9б) и SNR=-16 дБ (рис. 9в). Как видно из рис. 9 при значении SNR=12 дБ следы гармоник уверенно обнаруживаются. По ним может быть восстановлена гармоническая и подобрана из базы голосовых данных диктора формантная структура, по которым посредством спектральной инверсии ЗЛ может быть восстановлено смысловое содержание защищаемого помехой РС. Поэтому здесь показатель ПР=1. На рис. 9 в) во время действия помехи с SNR=-16 дБ следы ТС практически не обнаруживаются. Поэтому здесь ПР=0.

16 Гришин В.Г. Образный анализ экспериментальных данных. – М.: Наука, 1982. – 237 с.

17 Рашевский Я.И., Каргашин В.Л. Обзор зарубежных методов определения разборчивости речи. // Специальная техника, №№ 3-6 за 2002 год, № 1 за 2003 год.

Общая интегральная ПР определяется как отношение числа выявленных отрезков с $PR=1$ к общему числу словесных отрезков в тестовом сигнале.

Понятно, что в отсутствии помех или их слабом воздействии $PR=1$, так как следы тестового РПС на спектрограммах псевдослов легко обнаруживаются

Таким образом, если в точке возможного съёма РИ в результате образного анализа снимаемой смеси «РС-помеха» на её размеченных псевдословесных отрезках определяется хотя бы один след гармонической структуры тестового сигнала, то считается что гармоническая структура и сам РПС могут быть полностью восстановлены ЗЛ и ПР на этом псевдословесном отрезке равна 1, в противном случае 0. То есть ПР может принимать два значения: либо 1 (сигнал восстанавливаем методами образного анализа), либо 0 (сигнал не восстанавливаем).

Затем предлагается повторить описанную выше процедуру, используя в качестве опорного сигнала заранее подготовленную голосовую базу размеченных записей основного диктора. Достаточно закольцевать запись опорного дикторского РС с периодом цикла озвучивания не менее 60 с. В работах¹⁸, [1] показано, что для получения стабильного долговременного спектра речи, соответствующего спектру связного текста, достаточно аудиосигнала с длительностью более 1 минуты.

С учетом полученного значения показателя ПР проводить регулировку уровня или менять тип помехи до достижения нормированного значения ПР.

2. Известно, что разборчивость зависит от сохранения спектральных различий между фонемами. Искажение речи шумом, РП-помехой или реверберацией снижает эти различия и сокращает амплитуды колебаний спектральной огибающей⁹, [1].

Поэтому на этом этапе в основе оценки потенциальной разборчивости лежит оценка сокращения индекса модуляции испытательного сигнала – m_0 , примерно так, как это делается в семействе методов оценки ПР на основе индекса передачи речи – STI (Speech Transmission Index)¹⁸, только в частотно-временной области.

Для определения индекса модуляции STI, монотонно связанного с ПР, могут использоваться специальные испытательные и речевые сигналы¹⁸. Обычно анализ отрезка речи в 1 мин хорошо отражает спектральное распределение флуктуации огибающей относительно средней интенсивности¹⁸, [1].

Уменьшение модуляции определяется по результатам сравнения интенсивности модуляции в спектрах выходного и входного сигналах.

В соответствии с тем, что спектр речи может быть представлен как спектр несущей текстуры (гармонической, шумовой), промодулированный возможной огибающей формантной структуры, то для начала речь диктора заменяется специальным испытательным сигналом с речеподобными характеристиками.

Предлагаемый испытательный сигнал имеет спектрограмму, состоящую из текстуры несущего шума и/или кратных гармоник с наложенной на нее формантноподобной огибающей (примеры на рис. 1), модулированной по интенсивности с частотой модуляции F_i из заданного набора 14-ти низких частот таких, как, например, – 0,63; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5 Гц, которые применяются для модуляции временных огибающих октавных полос в методике STI, только теперь на частотно-временной сетке спектрального описания тестового испытательного сигнала в границах длительности размеченных псевдослов.

Обозначим m_o, \bar{l}_o и m_r, \bar{l}_r - индексы модуляции и интенсивности спектральных огибающих соответственно исходного и наблюдаемого в точке съёма в условиях действия помехи сигналов в полосе $[0 \div F_A/2]$, где F_A – частота дискретизации, обычно $8 \div 11$ КГц.

Уменьшение значения индекса модуляции спектра исходного сигнала относительно наблюдаемого количественно определяется функцией передачи модуляции, обозначаемой - $m(F)$ и которая описывается¹⁸:

$$m(F) = m_o / m_r \quad (3)$$

и пересчитываются в значения соотношения $SNR_{эф}$ по формуле (4) независимо от причины сокращения индекса модуляции (реверберация, эхо, РПП или шум):

$$SNR_{эф} = 10 \cdot \lg [m(F)/(1 - m(F))] \quad (4)$$

Вычисляем индекс STI, используя соотношение (5)

$$STI = \frac{SNR_{MD} + 15}{30} \quad (5)$$

Если в точках наблюдения в смеси «сигнал – помеха» с таким тестовым сигналом индекс модуляции принимает значения менее 0,3, тогда в соответствии с табл. 1 разборчивость будет неудовлетворительная¹⁸, и можно полагать, что формантная структура РС не может быть восстановлена ЗЛ и ПР на этом словесном отрезке равна 0. В противном случае 1.

Общая интегральная ПР определяется так же, как отношение числа отрезков с $PR=1$ к общему числу отрезков псевдослов в тестовом сигнале.

Таблица 1

Значения STI и соответствующие им оценки РР

Значение STI,	0...0,3	0,3...0,45	0,45...0,6	0,6...0,75	0,75...1
Оценка разборчивости	неудовлетворительная	плохая	низкая	хорошая	отличная

Последовательность выполнения этапов 1 и 2 важна.

В итоге для сравнения с нормой выбирается максимальная РР из всех найденных по всем процедурам этапов 1 и 2.

Еще раз отметим, что найденное значение РР можно использовать для оценки эффективности не только разных скремблирующих РПП, но и других видов помех.

Предлагаемая методика, после ее доработки, может использоваться отдельно или в дополнение к традиционной методике оценки эффективности защиты ВП от утечек РИ по техническим каналам.

Заключение

В работе рассмотрены основные требования и подходы к повышению стойкости речеподобных помех к цифровой шумоочистке и реконструкции маскируемой ими РИ.

Изучены особенности разных видов РПП скремблерного типа.

Приведены результаты, показывающие, что оптимальной с учетом поставленных требований является речеподобная помеха, сформированная путем одно-

временного поточного скремблирования защищаемой речи.

Сформированы базовые процедуры создаваемой методики объективной оценки эффективности средств активной защиты конфиденциальных переговоров речеподобными и иными помехами с учетом возможностей ЗЛ по шумоподавлению и реконструкции спектрограмм искаженных сигналов.

Таким образом, научная новизна представленной работы заключается в разработке критериев оценки эффективности речеподобных помех с учетом возможностей нарушителя по восстановлению разборчивости искаженных речевых сообщений, а также способов формирования РПП скремблерного типа удовлетворяющие таким критериям, обосновании предложений по совершенствованию существующих методик оценки и контроля защищенности речевой информации от её утечки по техническим каналам.

Приведенные результаты позволят лучше понять работу атакующих средств, разработать методы и средства эффективного противодействия возможным угрозам, расширить возможности существующих систем защиты речевой информации.

Литература

1. Авдеев В.Б., Трушин В.А., Кунгуров М.А. Унифицированная речеподобная помеха для средств активной защиты речевой информации // Тр. СПИИРАН. 2020. Выпуск 19. Т. 5. С. 991–1017.
2. Асъяев Г.Д., Антясов И.С. Оценка эффективности применения шумовых «речеподобных» помех для защиты акустической информации // Вестник УрФО 2018. № 2(28). С. 19–24.
3. Трушин В.А., Иванов А.В. Возможности снижения интегрального уровня помехи в средствах активной защиты речевой информации (состояние и перспективы) // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21. № 2. С. 38–42.
4. Хорев А.А., Царев Н.В. Способ и алгоритм формирования речеподобной помехи // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 1. С. 57–67.
5. Trushin V.A. The analysis of the formant method of speech intelligibility estimation as a method of performing indirect measurements // Научный вестник НГТУ. 2019. № 4 С. 135-146.
6. Козлачков С.Б., Дворянкин С.В., Василевская Н.В. Фонетическая функция А.А. Пирогова и помехоустойчивость канала речевой коммуникации // Речевые технологии. 2018. № 1-2. С. 105-110.
7. Дворянкин С.В., Дворянкин Н.С., Устинов Р.А. Развитие технологий образного анализа-синтеза акустической (речевой) информации в системах управления, безопасности и связи // Безопасность информационных технологий =IT Security. Том 26, № 1. 2019. С. 64–76. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2019.1.07>
8. Дворянкин С.В., Зенов А.Е., Устинов Р.А., Дворянкин Н.С. Кодирование изображений спектрограмм для обеспечения переменной скорости передачи аудиоданных с сохранением качества их звучания // Безопасность информационных технологий 2021. Т. 28. № 4. С. 22-38.
9. Дворянкин С.В., Уленгов С.В., Устинов Р.А., Дворянкин Н.С., Антипенко А.О. Системное моделирование речеподобных сигналов и его применение в сфере безопасности, связи и управления // Безопасность информационных технологий. 2019. — Т. 26. № 4. — С. 101-119.
10. Многоязычный синтез речи с клонированием [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/465941/> (дата обращения: 22.02.2022)

11. WaveNet: A Generative Model for Raw Audio / Aaron van den Oord, Sander Dieleman, Heiga Zen, Karen Simonyan, Oriol Vinyals, Alex Graves, Nal Kalchbrenner, Andrew Senior, Koray Kavukcuoglu [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1609.03499> (дата обращения: 22.02.2022).
12. Дворянкин С.В., Дворянкин Н.С. Средства, способы и признаки клонирования речи. Сборник статей по материалам IV Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра» под редакцией В.В. Арутюнова. Москва, РГГУ, 2021. С. 103-111.
13. Alyushin A.M., Dvoryankin S.V. Acoustic pattern recognition technology based on the Viola-Jones approach for VR and AR systems. В сборнике: Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: BICA*AI 2020. Proceedings of the 11th Annual Meeting of the BICA Society. Сер. «Advances in Intelligent Systems and Computing» 2021. С. 1-8.
14. Blintsov V., Nuzhny S., Kasianov Y., Korytskyi V. Development of a mathematical model of scrambler-type speech-like interference generator for system of prevent speech information from leaking via acoustic and vibration channels // Technology audit and production reserves. 2019. vol. 5. no. 2(49). pp. 19-26.
15. Козлачков С. Б., Дворянкин С.В., Бонч-Бруевич А.М. Принципы формирования тестовых речевых сигналов при оценках эффективности технологий шумоочистки // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 3(27). С. 9-15. DOI:10.21681/2311-3456-2018-3-09-15

SPEECH-LIKE INTERFERENCE RESISTANT TO NOISE REDUCTION METHODS AS A RESULT OF SCRAMBLING OF THE PROTECTED SPEECH

Dvoryankin S.V.¹⁸, Dvoryankin T.S.¹⁹, Ustinov R.A.²⁰

The aim of this article is to study the possibility of creating a speech-like interference (SLI) based on scrambling of the protected speech signal that is resistant to noise cleaning, restoration and reconstruction of distorted speech through processing of its spectrogram images, including the use of the speaker's voice database.

Methods: applied systems analysis, digital spectral-time analysis, digital processing of signals and images, image analysis of sonograms

Results: it is proposed to use as the main indicator of the security of speech information the concept of potential speech intelligibility, methods for assessing potential intelligibility are determined. An algorithm of compensation-type digital noise cleaning using image analysis-synthesis technology has been developed. The requirements for the created SLI are formed, consisting in changing the spectral-temporal envelope of speech, removing («weakening») traces of the harmonic structure of speech, equalizing the capacities of the protected speech signal and the SLI masking it. The approaches to the formation of an SLI resistant to the procedures of digital noise cleaning and reconstruction of distorted sonograms are described, proposals are presented on the methodology for evaluating the effectiveness of interference through the indicator of potential intelligibility. The results obtained will allow to better understand the work of attacking tools, develop methods and means of effectively countering possible threats, and expand the capabilities of existing speech information protection systems.

The scientific novelty consists in the development of criteria for evaluating the effectiveness of speech-like interference, taking into account the capabilities of the intruder to restore the intelligibility of distorted speech messages, proposed methods for the formation of scrambler-type SLI that meet such criteria, substantiated proposals to improve existing methods for assessing and monitoring the security of speech information from its leakage through technical channels.

Keywords: acoustic speech reconnaissance means, speech information protection, speech intelligibility, acoustic interference, speech signal.

18 Sergei V. Dvoryankin, Dr.Sc.(in Tech), Professor of the Department of Strategic Information Studies NRNU MEPHI, Moscow, Russia, E-mail: svdvoryankin@mephi.ru

19 Nikita S. Dvoryankin, postgraduate NRNU MEPHI, Moscow, Russia, E-mail: nik.dvrn@gmail.com

20 Roman A. Ustinov, postgraduate Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, E-mail: public-ura@yandex.ru

References

1. Avdeev V.B., Trushin V.A., Kungurov M.A. Unificirovannaja rechepodobnaja pomeha dlja sredstv aktivnoj zashhity rechevoj informacii // Tr. SPIIRAN. 2020. Vypusk 19. T. 5. S. 991–1017.
2. Asjaev G.D., Antjasov I.S. Ocenka jeffektivnosti primenenija shumovyh «rechepodobnyh» pomeh dlja zashhity akusticheskoj informacii // Vestnik UrFO 2018. № 2(28). S. 19–24.
3. Trushin V.A., Ivanov A.V. Vozmozhnosti snizhenija integral'nogo urovnja pomehi v sredstvah aktivnoj zashhity rechevoj informacii (sostojanie i perspektivy) // Doklady TUSUR. 2018. T. 21. № 2. S. 38–42.
4. Horev A.A., Carev N.V. Sposob i algoritm formirovanija rechepodobnoj pomehi // Vestnik VGU, serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii. 2017. № 1. S. 57–67.
5. Trushin V.A. The analysis of the formant method of speech intelligibility estimation as a method of performing indirect measurements // Nauchnyj vestnik NGTU. 2019. № 4 S. 135-146.
6. Kozlachkov S.B., Dvorjankin S.V., Vasilevskaja N.V. Foneticheskaja funkcija A.A. Pirogova i pomehoustojchivost' kanala rechevoj kommunikacii // Rechevyje tehnologii. 2018. № 1-2. S. 105-110.
7. Dvorjankin S.V., Dvorjankin N.S., Ustinov R.A. Razvitie tehnologij obraznogo analiza-sinteza akusticheskoj (rechevoj) informacii v sistemah upravlenija, bezopasnosti i svjazi // Bezopasnost' informacionnyh tehnologij =IT Security. Tom 26, № 1. 2019. C. 64–76. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2019.1.07>
8. Dvorjankin S.V., Zenov A.E., Ustinov R.A., Dvorjankin N.S. Kodirovanie izobrazhenij spektrogramm dlja obespechenija peremennoj skorosti peredachi audiodannyh s sohraneniem kachestva ih zvuchanija // Bezopasnost' informacionnyh tehnologij 2021. T. 28. № 4. S. 22-38.
9. Dvorjankin S.V., Ulengov S.V., Ustinov R.A., Dvorjankin N.S., Antipenko A.O. Sistemnoe modelirovanie rechepodobnyh signalov i ego primenenie v sfere bezopasnosti, svjazi i upravlenija // Bezopasnost' informacionnyh tehnologij. 2019. – T. 26. № 4. – S. 101-119.
10. Mnogojazychnyj sintez rechi s klonirovaniem [Jelektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://habr.com/ru/post/465941/> (data obrashhenija: 22.02.2022)
11. WaveNet: A Generative Model for Raw Audio / Aaron van den Oord, Sander Dieleman, Heiga Zen, Karen Simonyan, Oriol Vinyals, Alex Graves, Nal Kalchbrenner, Andrew Senior, Koray Kavukcuoglu [Jelektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/abs/1609.03499> (data obrashhenija: 22.02.2022).
12. Dvorjankin S.V., Dvorjankin N.S. Sredstva, sposoby i priznaki klonirovanija rechi. Sbornik statej po materialam IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Informacionnaja bezopasnost': vchera, segodnja, zavtra» pod redakciej V.V. Arutjunova. Moskva, RGGU, 2021. S. 103-111.
13. Alyushin A.M., Dvoryankin S.V. Acoustic pattern recognition technology based on the Viola-Jones approach for VR and AR systems. V sbornike: Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: BICA*AI 2020. Proceedings of the 11th Annual Meeting of the BICA Society. Ser. «Advances in Intelligent Systems and Computing» 2021. S. 1-8.
14. Blintsov V., Nuzhnyj S., Kasianov Y., Korytskyj V. Development of a mathematical model of scrambler-type speech-like interference generator for system of prevent speech information from leaking via acoustic and vibration channels // Technology audit and production reserves. 2019. vol. 5. no. 2(49). pp. 19-26.
15. Kozlachkov S. B., Dvorjankin S.V., Bonch-Bruevich A.M. Principy formirovanija testovyh rechevyh signalov pri ocenkah jeffektivnosti tehnologij shumochistki // Voprosy kiberbezopasnosti. 2018. № 3(27). S. 9-15. DOI:10.21681/2311-3456-2018-3-09-15

