

УДК 534; 621.391.16

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ ОЦЕНКИ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ МЕТОДОМ ЛЧМ-СИГНАЛА

д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, К.Я. РАХАНОВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается имитационная модель автоматизированной помехоустойчивой оценки разборчивости речи методом измерительного ЛЧМ-сигнала, основанного на частотно-временном представлении сигнальной энергии. Обосновывается применение преобразования Вигнера в качестве частотно-временного распределения. Предлагаются математическая модель измерителя отношения сигнал/шум для распределения Вигнера и метод дисперсионного анализа, который позволит установить метрологическую чувствительность измерителя, определить диапазон чувствительности в зависимости от контролируемых параметров и влияющих факторов. С помощью регрессионного анализа получено аналитическое представление чувствительности измерителя отношения сигнал/шум. На основании полученной математической модели измерителя и обратной функции чувствительности создана имитационная модель автоматизированной помехоустойчивой оценки разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала. Полученная имитационная модель показала, что применение ЛЧМ-сигнала в системе измерительной автоматизированной контроля защищенности каналов утечки речевой информации реализует преимущества метода гармонического сигнала и исключает его недостаток, обусловленный значительной неравномерностью АЧХ канала утечки.

Введение. Работы А.А. Алексеева, С.В. Дворникова, Л. Коэна, Т.А. Клаасена рассматривают подход частотно-временного представления сигнальной энергии, который позволяет создать то или иное частотно-временное распределение конкретного сигнала и оценить тонкую структуру сигнальной энергии. Такой подход явился предпосылкой создания нового метода контроля защищенности каналов утечки речевой информации (КУРИ), превосходящий существующие методы по точности.

В [1] предложен метод измерительного ЛЧМ-сигнала для контроля защищенности информации в КУРИ, основанный на частотно-временном представлении сигнальной энергии. Метод позволяет оценивать интенсивность физических полей за пределами выделенных объектов путем выявления слабых ЛЧМ-сигналов в точке наблюдения. По результатам оценки определяется информационный критерий защищенности – коэффициент разборчивости речи [2].

Для достоверного выявления КУРИ необходимо учитывать ряд факторов, которые влияют на точность оценки разборчивости речи: фоновые, искусственные, мешающие и маскирующие помехи; неравномерности АЧХ канала утечки речевой информации; резонансные явления замкнутых помещений и реверберационные помехи, обусловленные эффектом послезвучания. Исключение влияния этих факторов достигается применением оптимальной системы приема. Создание и проверку возможностей системы такого приема удобней осуществлять с помощью имитационной модели.

Таким образом, цель работы – создание имитационной модели приема для оценки разборчивости речи методом измерительного ЛЧМ-сигнала. Исходя из поставленной цели выделены следующие задачи:

- создать математическую модель измерителя отношения мощности ЛЧМ-сигнала к мощности шума на совместном частотно-временном представлении сигнальной энергии;
- установить метрологическую чувствительность измерителя с помощью дисперсионного анализа и описать ее количественно методом регрессионного анализа.

Создание имитационной модели приема основывается на создаваемой математической модели измерителя отношения мощности ЛЧМ-сигнала к мощности шума и функции чувствительности для частотно-временного распределения. Перейдем к решению первой задачи.

Математическая модель измерителя отношения сигнал/шум. Одним из продуктивных методов решения задач оценивания параметров сигналов является подход на основе частотно-временных распределений класса Коэна. Фундаментальность распределений Коэна определяется сохранением всех полезных свойств синтезируемых на его основе частотно-временных распределений и согласованием их с теорией оценивания параметров сигналов [3].

Обобщенное выражение для всех видов частотно-временных распределений класса Коэна предложено в работе [4]:

$$\rho(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi(\xi t - f\tau - \xi v)] \Phi(\tau, \xi) z_a^* \left(v - \frac{\tau}{2}\right) z_a \left(v + \frac{\tau}{2}\right) \partial v \partial \tau \partial \xi, \quad (1)$$

где ξ – мгновенная частота; τ, v – текущее время; z_a – аналитический сигнал; * – знак комплексного сопряжения; $\Phi(\tau, \xi)$ – ядро преобразования.

На основании выражения (1) возможен синтез любого типа частотно-временного распределения. Для этого достаточно определить форму функционального (порождающего) ядра преобразования $\Phi(\tau, \xi)$. Так, выбор ядра вида $\Phi(\tau, \xi) = -0,5 \cos(\pi \xi \tau)$ позволяет получить плотность распределения активной энергии; при $\Phi(\tau, \xi) = -j \cdot \sin(\pi \xi \tau)$ дает мнимую часть плотности распределения энергии.

Однако из всей совокупности возможных распределений целесообразно применять только те, у которых ядро представлено выражениями [3]:

$$\Phi(\tau, \xi) = \exp(j2\pi\alpha\xi\tau); \quad (2)$$

$$\Phi(\tau, \xi) = \cos(2\pi\alpha\xi\tau), \quad (3)$$

где $0 \leq \alpha \leq 1/2$.

Особенность выбора ядер преобразования (2) и (3) состоит в том, что выбором параметра α регулируется вид распределения. Так, например, выбор $\alpha = 1/2$ в (2) представляет комплексное распределение Рихачека, а $\alpha = 0$ в (3) – распределение Вигнера [4]:

$$\rho_w(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} Z_a^*(t - \tau/2) Z_a(t + \tau/2) \exp(-j2\pi f \tau) d\tau, \quad (4)$$

где $Z_a(t) = Z(t) + j\tilde{Z}(t)$ – аналитический сигнал; $\tilde{Z}(t)$ – преобразование Гильберта действительного сигнала $Z(t)$; * – знак комплексного сопряжения.

По отношению к другим билинейным распределениям класса Коэна распределение Вигнера характеризуется предельной концентрацией энергии (минимальным локальным и глобальным разбросом) сигнала вдоль линии его мгновенных частот [5; 3]. Это свойство указывает на преимущество распределения Вигнера перед другими частотно-временными распределениями.

Таким образом, обладая априорной информацией о частоте сигнала в определенный момент времени, возможно локализовать энергию сигнала и установить энергетический критерий защищенности речевой информации по отношению сигнал/шум. Для этого рассмотрим процедуру оценки мощности сигнала к мощности шума на распределении Вигнера.

Из (4) функция Вигнера может быть получена как спектр некоторого сигнала вида:

$$\delta(\tau, t) = Z_a^*(t - \tau/2) Z_a(t + \tau/2), \quad (5)$$

где $\delta(\tau, t)$ – свертка сигнала Z_a со своей комплексно сопряженной копией Z_a^* .

Основной особенностью функции $\delta(\tau, t)$ является механизм ее реализации – свертываемые части сдвигаются в противоположные стороны относительно друг друга на величину, равную половине дискретного значения. Следовательно, реализация частотно-временного распределения Вигнера требует избыточности описания, которое достигается повышением частоты дискретизации Котельникова.

Оценка мощности гармонической составляющей на реализации $\delta(\tau, t)$ возможна с помощью оптимального корреляционного приемника сигнала со случайной начальной фазой, представленного, например, в работах [6; 7]. С его помощью исключается влияние случайного значения фазы сигнала, а информационным (наблюдаемым) параметром выступает амплитуда сигнала. Принцип работы приемника основан на корреляции смеси сигнала плюс шум с опорным гармоническим сигналом. Схему приемника строят как реализацию выражения [7]:

$$X(\omega) = \sqrt{\left(\int_0^T y(t) \cdot \sin(\omega t) dt \right)^2 + \left(\int_0^T y(t) \cdot \cos(\omega t) dt \right)^2}, \quad (6)$$

где $y(t) = s(t) + n(t)$ – смесь сигнала плюс шум; $X(\omega)$ – амплитуда гармонического сигнала частоты ω ; T – длительность сигнала.

Используя в формуле (6) свертку $\delta(\tau, t)$ из выражения (5) в качестве смеси сигнал плюс шум $y(t)$, получим функцию:

$$P_c(\omega, \tau) = (X(\omega, \tau))^2 = \left(\int_0^T \delta(\tau, t) \cdot \sin(\omega t) dt \right)^2 + \left(\int_0^T \delta(\tau, t) \cdot \cos(\omega t) dt \right)^2. \quad (7)$$

В выражении (7) $P_c(\omega, \tau)$ может выступать оценкой мощности гармонической составляющей частоты ω на реализации функции частотно-временного распределения Вигнера в момент времени τ , так как время интегрирования T выбираем достаточно большим ($T > 1$ с). Также время интегрирования T может быть увеличено в зависимости от внешних факторов.

Средняя мощность реализации процесса в момент времени τ определяется выражением [8]:

$$P_{c+u}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T [\delta(\tau, t)]^2 dt \approx P_c + P_u, \quad (8)$$

где $P_{c+u}(\tau)$ – оценка средней мощности сигнала плюс шум в момент τ .

Оценка мощности шума P_u находится как разность уже известных величин [8]:

$$P_u = P_{c+u} - P_c. \quad (9)$$

Отношение сигнал/шум для частотно-временного распределения Вигнера [11]:

$$Q = \frac{P_c}{P_u}. \quad (10)$$

Предложенная обработка случайного процесса выгодно отличается от классической схемы оценки отношения сигнал/шум для метода гармонического сигнала. Во-первых, обработка упрощается за счет исключения получения спектра реализации $\delta(\tau, t)$, что сокращает вычислительные ресурсы. Во-вторых, оцениваемое значение мощности сигнала и мощности шума осуществляется за один этап. В-третьих, в результате оценивания обработке подвергается вся измеряемая полоса.

Чувствительность измерителя. Несмотря на оптимальность преобразования Вигнера в смысле локализации энергии практическое применение частотно-временного преобразования Вигнера связано с определенными сложностями. Так, бесконечность пределов в (4) и отсутствие ограничений в реализации корреляции ведут к образованию ложных выбросов энергии в частотно-временной плоскости, возникающих в результате взаимного влияния соседних сигнальных компонент друг на друга, образующих интерференционный фон [8].

Этот недостаток обуславливает необходимость установления параметрической зависимости между влияющими факторами, контролируемыми параметрами и отношением сигнал/шум на выходе частотно-временного преобразования Вигнера. Зависимость может быть получена на основании исследований имитационной модели как функция многих переменных:

$$Q_{\text{вых}} = F_W(X), \quad (11)$$

где X – вектор контролируемых параметров и влияющих факторов.

Выражение (11) определяет метрологическую чувствительность – свойство измерителя, определяемое отношением изменения выходного значения сигнал/шум $\partial Q_{\text{вых}}$ к изменению входного значения сигнал/шум $\partial Q_{\text{вх}}$: $F_W = \partial Q_{\text{вых}} / \partial Q_{\text{вх}}$ [9].

Для этого в (11), сохраняя многофакторные условия, проводят многофакторные измерения $Q_{\text{вых}}$ при различных входных факторах и контролируемых параметрах, в том числе $Q_{\text{вх}}$. По результатам измерений требуется установить F_W и описать ее количественно. Задача установления чувствительности решается методами дисперсионного анализа, а задача количественного описания – методами регрессионного анализа.

Дисперсионный анализ при каждом фиксированном значении вектора X проводится на ограниченном числе (ряде) измерений величины Q . В результате формируется массив измеренных значений:

$$\begin{matrix} X_1 & \dots & X_i & \dots & X_N; \\ Q_{11} & \dots & Q_{i1} & \dots & Q_{N1}; \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{1j} & \dots & Q_{ij} & \dots & Q_{Nj}; \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{1M} & \dots & Q_{iM} & \dots & Q_{NM}. \end{matrix}$$

Зависимость Q от X устанавливается через попарное сравнение средних арифметических значений i -го ряда между собой по схеме независимых измерений [10].

Алгоритм проведения дисперсионной обработки:

1. Вычислить среднее арифметическое значение для каждого ряда измерений:

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Q_{ij},$$

где M – число измерений в i -м ряду.

2. Вычислить дисперсии средних арифметических значений для каждого ряда:

$$D_{Q_i} = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{j=1}^M (Q_{ij} - \bar{Q}_i)^2.$$

3. Вычислить попарные разности между Q_i :

$$\Delta \bar{Q}_{i-1,i} = \bar{Q}_{i-1} - \bar{Q}_i,$$

где $i \in [2...N]$.

4. Вычислить дисперсию попарных разностей:

$$D_{\Delta \bar{Q}_{i-1,i}} = D_{\bar{Q}_{i-1}} + D_{\bar{Q}_i}.$$

5. Найти доверительные интервалы для всех попарных разностей:

$$\varepsilon_{i-1,i} = t(P_d, M) \sqrt{D_{\Delta \bar{Q}_{i-1,i}}},$$

где $t(P_d, M)$ – коэффициент Стьюдента; M – количество измерений при фиксированном значении вектора X_i ; P_d – доверительная вероятность.

6. Сравнить попарные разности $\Delta \bar{Q}_{i-1,i}$ с соответствующим доверительным интервалом $\varepsilon_{i-1,i}$. Если $\Delta \bar{Q}_{i-1,i} \geq \varepsilon_{i-1,i}$, имеет место зависимость Q_i от X_i , в противном случае X_i не позволяет установить величину Q_i .

Количественное описание зависимости чувствительности измерителя устанавливается в соответствии с методами регрессионного анализа, которые позволяют аппроксимировать зависимость $F_w(X)$ некоторой многофакторной функцией:

$$Q = F_w(X) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_k X_k,$$

где k – размерность вектора входных параметров X ; a_0, \dots, a_k – коэффициенты параметров могут быть как целыми, так и дробными, как положительными, так и отрицательными.

Оптимальные значения коэффициентов a_0, \dots, a_k определяются с помощью метода наименьших квадратов, например, представленного в работе [11].

Полученные результаты. Представленная математическая модель оценки отношения сигнал/шум на основе частотно-временного распределения Вигнера реализована с помощью имитационной модели. Так как решаемая задача предполагает внедрение в систему измерительную автоматизированную как составную часть программного обеспечения, то дисперсионный, регрессионный анализ и создание имитационной модели приема удобно проводить в дискретной форме. Для этого авторами разработан программный компонент в среде Visual Studio 2008.

При проведении дисперсионной обработки число измерений в i -м ряду выбрано $M = 70$. Такое количество повторений является оптимальным для установления доверительных границ при отсутствии данных о виде закона распределения [12]. Доверительная вероятность P_d выбирается достаточно близкой к единице для того, чтобы снизить вероятность отклонения отдельных измерений от своего математического ожидания.

Согласно результатам дисперсионного анализа установлена зависимость Q от вектора входных параметров X . На рисунке 1 представлен пример чувствительности измерителя отношения сигнал/шум при частотах дискретизации $f_d = 4096$ Гц и $f_d = 8192$ Гц.

На рисунке 1 точками изображены отношения сигнал/шум, для которых попарная разность $\Delta \bar{Q}_{i-1,i}$ не соответствует доверительному интервалу $\varepsilon_{i-1,i}$. Данные значения задают диапазон чувствительности измерителя между верхним и нижним значениями сигнал/шум с выполненным условием $\Delta \bar{Q}_{i-1,i} \geq \varepsilon_{i-1,i}$. Если нижнее значение диапазона обозначить через A , а верхнее – B , то диапазон чувствительности будет принадлежать интервалу $Q_{\text{вх}} \in (A; B)$.

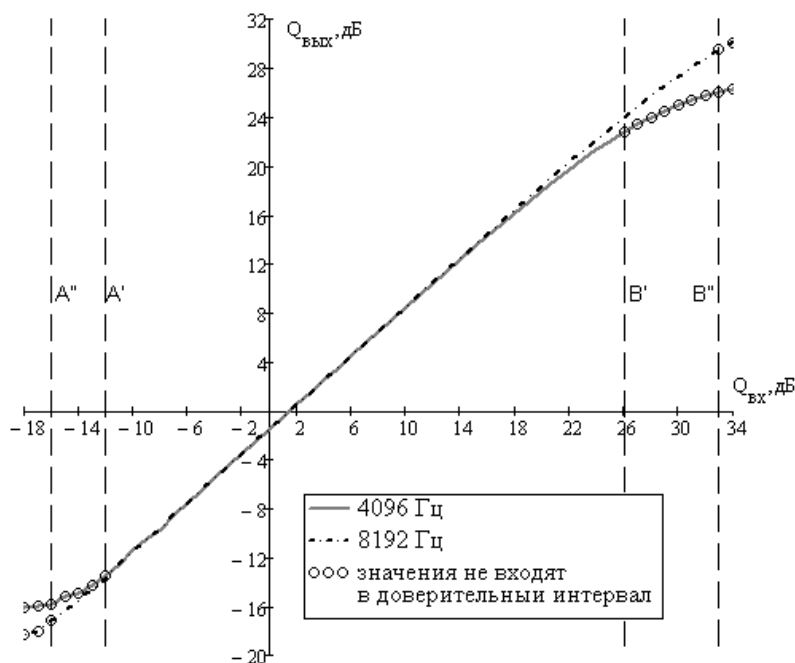


Рис. 1. Метрологическая чувствительность измерителя отношения сигнал/шум при частотах дискретизации $f_d = 4096; 8192$ Гц

Увеличение частоты дискретизации приводит к расширению диапазона чувствительности, что позволяет повысить точности оценки разборчивости речи. Так, на рисунке 1 при частоте дискретизации $f_d = 8192$ Гц диапазон чувствительности $Q_{\text{вх}} \in (A''; B'')$ больше, чем диапазон чувствительности $Q_{\text{вх}} \in (A'; B')$ при частоте дискретизации $f_d = 4096$ Гц.

На интервале от A до B чувствительность измерителя имеет ярко выраженную линейную зависимость, параметрами которой является входное отношение сигнал/шум $Q_{\text{вх}}$ и не является частота дискретизации f_d . Частота дискретизации в этом случае влияет только на диапазон допустимых значений $Q_{\text{вх}}$. Линейная функция в диапазоне чувствительности хорошо аппроксимируется выражением:

$$Q_{\text{вых}} = F_W(Q_{\text{вх}}) = 0,99 \cdot Q_{\text{вх}} - 1,51, \tag{12}$$

где $Q_{\text{вх}} \in (A; B)$.

В работе [1] предложено синхронное накопление спектральных составляющих в методе измерительного ЛЧМ-сигнала. Такое накопление снижает порог чувствительности и повышает точность оценки разборчивости речи. Используя данное накопление в качестве параметра дисперсионной обработки, на рисунке 2 представим графики чувствительности измерителя. Зависимость Fw' получена без применения накопления, а зависимость Fw'' – с накоплением 30 раз.

На рисунке 2 порог чувствительности зависимости Fw'' ниже порога чувствительности зависимости Fw' примерно на 14,8 дБ.

Проведя регрессионный анализ с учетом накопления, выражение (12) примет вид:

$$Q_{\text{вых}} = F_W(Q_{\text{вх}}, P) = 0,99 \cdot Q_{\text{вх}} + 10 \log(P) - 1,51, \tag{13}$$

где P – количество накоплений спектральных составляющих; $Q_{\text{вх}}$ – отношение сигнал/шум на входе приемника.

Одним из достоинств зависимостей $Q_{\text{вых}}$ от $Q_{\text{вх}}$ (12) и (13) является их четко выраженная линейная зависимость на диапазоне чувствительности. Этот факт упростит дальнейший анализ и разработку приемной части программного обеспечения системы измерительной автоматизированной.

Получим обратную функцию чувствительности:

$$Q_{\text{вх}} = G_W(Q_{\text{вых}}, P) = \frac{Q_{\text{вых}} - 10\log(P) + 1,51}{0,99}.$$

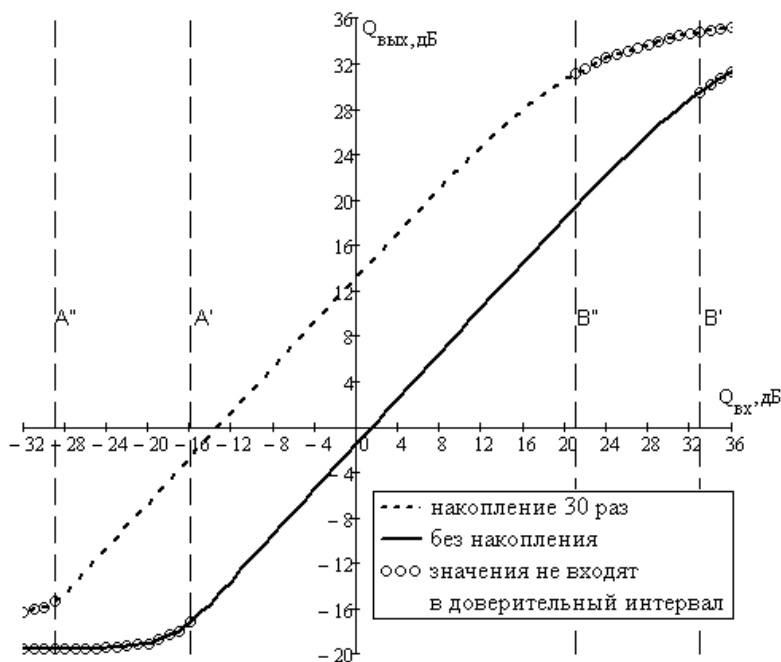


Рис. 2. Чувствительность измерителя отношения сигнал/шум без накопления (Fw'), с накоплением 30 раз (Fw'')

Выводы

На основании предложенной математической модели измерителя и обратной функции чувствительности создана имитационная модель автоматизированной помехоустойчивой оценки разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала в виде программного компонента. Это позволяет утверждать, что синтез и анализ ЛЧМ-сигнала с помощью частотно-временного представления сигнальной энергии применим к использованию в системе измерительной автоматизированной контроля защищенности КУРИ и существенно расширяет ее точностные возможности.

Применение частотно-временного преобразования позволяет, во-первых, оцениваемое значение мощности сигнала и мощности шума осуществить за один этап, во-вторых, в результате оценивания обработке подвергнуть всю измеряемую полосу.

Полученная чувствительность метода измерительного ЛЧМ-сигнала позволяет утверждать, что данный метод не уступает методу измерительного гармонического сигнала по порогу чувствительности, но превосходит его за счет снижения влияющих значительной неравномерности АХЧ канала утечки информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ измерения максимальной разборчивости речи: МПК G 10L 15/00 / В.К. Железняк, К.Я. Раханов; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20100004; заявл. 04.01.2010.
2. Железняк, В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам: учеб. пособие / В.К. Железняк. – СПб.: ГУАП, 2006. – 188 с.
3. Дворников, С.В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений / С.В. Дворников. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 268 с.

4. Алексеев, А.А. Технический анализ сигналов и распознавание радиоизлучений / А.А. Алексеев, А.Б. Кириллов. – СПб.: ВАС, 1998. – 368 с.
5. Cohen, L. Time-frequency distributions – A Review / L. Cohen // IEEE Trans. Signal Processing. – 1989. – Vol. 77, № 7. – P. 941 – 981.
6. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления: учеб. пособие / А.Г. Охонский [и др.]; под ред. А.Г. Охонского. – М.: Изд-во МГАП «Мир-книги», 1993. – 216 с.
7. Тихонов, В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
8. Автоматизированная система контроля интенсивности физических полей рассеивания сигналов / А.А. Алексеев [и др.] // Научное приборостроение. – 2000. – Т. 10, № 3. – С. 77 – 87.
9. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29-99. – Минск: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 140 с.
10. Анцыферов, С.С. Общая теория измерений: учеб. пособие / С.С. Анцыферов, Б.И. Голубь; под ред. Н.Н. Евтихеева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 176 с.
11. Ермаков, С.М. Математическая теория оптимального эксперимента: учеб. пособие / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский; гл. ред. физ.-мат. лит. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
12. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

Поступила 12.08.2011

SIMULATION MODEL OF AUTOMATED NOISE STABILITY ESTIMATION OF SPEECH INTELLIGIBILITY BY LFM-SIGNAL METHOD

V. ZHELEZNYAK, K. RAKHANAU

We consider a simulation model for automated assessment of a robust method of measuring speech intelligibility LFM-signal. Substantiates the use of the Wigner transform as a frequency-time distribution. A mathematical model of measuring the signal/noise ratio of the Wigner distribution. A method for analysis of variance, which allows you to set the sensitivity of the metrology gauge to determine the range of sensitivity depending on the controlled parameters and influencing factors. With the help of regression analysis are designed analytical presentation of the sensitivity of measuring the signal/noise. Based on this mathematical model of the meter and the back of the sensitivity function created a robust simulation model for automated assessment of speech intelligibility using LFM-signal. The resulting simulation model showed that the use of chirp signals in the system of measuring the automated control of security leakage channels of voice information, the method takes advantage of the harmonic signal and eliminates the lack of it caused a significant ripple channel leakage.