

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 534;53.08:681.3

В. К. ЖЕЛЕЗНЯК, К. Я. РАХАНОВ

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ В КАНАЛАХ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ

Полоцкий государственный университет

(Поступила в редакцию 20.11.2013)

Введение. Защита речевой информации на объекте информатизации в значительной мере определяется полнотой исследований по выявлению ее каналов утечки (КУ). Защищенность объекта информатизации оценивают выделенным измерительным сигналом в КУ речевой информации на основании нормативного критерия [1].

Точность оценки нормативного критерия характеризует степень приближения результатов к истинному значению измеряемой величины, а на практике – к ее действительному значению [2], что непосредственно связано с погрешностью. Анализ методической (теоретической) погрешности позволяет совершенствовать метод измерений, устанавливать потенциальные точностные возможности метода и ограничивающие факторы.

Цель работы – обоснование преимуществ нового метода широкополосной линейно-частотной модуляции сигнала для оценки разборчивости речи, превосходящего известные методы по величине методической погрешности в КУ, разрешающей способности по частоте.

Распространенные методы в США (%Alcons) [3, 4] и Германии (коэффициенты четкости C50 и C80) [5], ориентированные, в первую очередь, на фонетическую особенность речи, как и группа международных методов (STI, RASTI, STITEL и STIPA) [6], одновременно учитывающих влияние и шумовых, и реверберационных помех, не учитывают все факторы, влияющие на методическую погрешность.

Проанализируем методы оценки защищенности речевой информации в октавных полосах шумовым сигналом и полосах равной разборчивости гармоническим сигналом, действующие в Республике Беларусь согласно СТБ 34.101.29–2011.

Метод шумового сигнала. Шумовой сигнал рассматривают как случайный процесс с нормальным законом распределения плотности вероятности, основные параметры которого – математическое ожидание, дисперсия и корреляционная характеристика.

Минимальный пороговый уровень шумового сигнала на фоне шума (подчиненного нормальному закону) получен в [7] и представлен следующим выражением:

$$Z_{\text{ОПТ}} = \frac{\sigma_N \sqrt{2}}{\sigma_S / \sigma_N} \sqrt{\left[\ln \left(1 + \frac{\sigma_S^2}{\sigma_N^2} \right) - \ln \frac{p}{g} \right] \left[1 + \left(\frac{\sigma_S}{\sigma_N} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

где σ_S , σ_N – среднеквадратические отклонения сигнала и шума; p , g – вероятности наличия и отсутствия шумового сигнала соответственно.

При использовании выражения (1) устанавливают зависимость минимального уровня обнаружения $Z_{\text{ОПТ}}$ от отношения сигнал/шум. Как правило, в системах передачи информации вероятности наличия и отсутствия сигнала принимают одинаковыми ($p = g = 0,5$). Для этих вероят-

ностей минимальный пороговый уровень измерительного шумового сигнала лежит в пределах от 3,72 дБ и выше. Следовательно, с одной стороны, пороговый уровень шумового сигнала $Z_{\text{ОПТ}}$ является положительным и не позволяет обнаруживать шумовой сигнал под фоновыми (естественными) шумами, тем самым ограничивая предельную чувствительность оценки.

С другой стороны, уровень речевого и шумового сигнала P_s не должен превышать 84 дБ, так как деформируется спектр речевого сигнала [8, 9] и нарушаются санитарные нормы [10]. Это ограничивает использование шумового сигнала, а превышение уровня 84 дБ обуславливает значительную методическую погрешность.

Для измерения уровней шумовых акустических сигналов используют шумомер, не обладающий пространственной избирательностью диаграммы направленности акустического приемника (микрофона). Он также не избирателен к искусственным помехам, что вносит значительные методические погрешности в результаты измерения.

Метод гармонического измерительного сигнала. Гармонический сигнал научно обоснован в качестве измерительного сигнала корреляционной теорией разборчивости речи [1] и апробирован в измерительных автоматизированных системах К6-6 (Российская Федерация), ФИЛИН-А (Республика Беларусь). Для обработки гармонического сигнала используют согласованный квадратурный приемник [11], нечувствительный к начальной фазе измерительного сигнала.

Высокая селективность согласованного приемника решает задачу достоверного выявления измерительного сигнала во всех КУ речевой информации (акустического, виброакустического, магнитного, электрического, электроакустического, побочных высокочастотных электромагнитных излучений и наводок, при подключении измерительной автоматизированной системы к низкочастотному выходу измерительного приемника). Гармоничный сигнал в отличие от шумового сигнала не имеет факторов, снижающих методическую погрешность измерения.

Как следует из корреляционной теории разборчивости речи [1], относительная среднеквадратическая погрешность оценки разборчивости зависит от отношения сигнал/шум и представлена следующим выражением:

$$\frac{\xi^2}{\xi_{\text{max}}^2} = \frac{P_n}{P_s + P_n} = \frac{1}{1 + P_s/P_n}, \quad (2)$$

где P_s, P_n – мощность сигнала и мощность шума на выходе приемника.

Из выражения (2) следует, что минимум среднеквадратической погрешности достигается при максимальном отношении сигнал/шум на выходе приемника.

Формируемый измерительный сигнал ограничен по времени. При слабом измерительном сигнале в шумах высокого уровня время его выделения увеличивается. При этом происходят его накопление (увеличение отношения сигнал/шум) и уменьшение деформации спектральной плотности ограниченного гармонического сигнала [12, 13].

Локальная измерительная схема для гармонического сигнала обладает преимуществом по сравнению со схемой измерения для шумового сигнала – установлены метрологические требования на величины погрешности и чувствительности. Результатом измерений методом гармонического сигнала является величина разборчивости речи, полученная на основании корреляционной теории разборчивости речи. Она представляет собой единый критерий оценки КУ речевой информации.

Величину разборчивости речи измеряют с помощью 20 гармонических сигналов, излучаемых на средних частотах полос равной разборчивости. Этим учтено, что спектральная характеристика речевого сигнала зависит от частоты, кривая чувствительности уха человека неравномерная, спектральная плотность фонового шума экспоненциально спадает от нижних частот, затухание речевого сигнала в среде распространения неравномерное.

Использование гармонического измерительного сигнала на средних частотах полос равной разборчивости допускает увеличение погрешности в КУ речевой информации с явно выраженными неравномерностями их АЧХ (например, электроакустический КУ).

Метод широкополосной линейно-частотной модуляции сигнала. Среди множества сложных сигналов преимуществами обладает сигнал широкополосной линейно-частотной модуляции (ШЛЧМ), основные характеристики которого представлены в [14]. В отличие от гармонического сигнала ШЛЧМ-сигнал позволяет расширить возможность оценки защищенности речи и контролировать полосы частот (полосы равной разборчивости), на которые разбивается спектр речевого сигнала, а не отдельные точки на оси.

Для снижения методической погрешности оценки защищенности речи впервые предложены метод и устройство с использованием ШЛЧМ-сигнала с большой базой в качестве измерительного сигнала [15, 16], который имеет значительные преимущества перед узкополосным сигналом линейно-частотной модуляции.

Недостатком измерительного ШЛЧМ-сигнала является наличие порогового эффекта [17]. При уменьшении отношения сигнал/шум до определенного значения (порога) наблюдается резкое снижение возможности выделения сигнала из шумов. Снижение порогового эффекта ШЛЧМ-сигнала осуществляется с помощью синхронного накопления [18]. На практике случайное запаздывание измерительного ШЛЧМ-сигнала при прохождении через среду распространения обуславливает отклонение мгновенного значения частоты.

Пороговый эффект снижен синхронным накоплением спектральных составляющих ШЛЧМ-сигнала, полученных быстрым преобразованием Фурье, при исключении влияния отклонения мгновенного значения частоты и случайной фазы для снижения порогового эффекта. В результате отношение накопленных энергий ШЛЧМ-сигнала и помехи растет пропорционально количеству накоплений сигнала P .

Дискретную функцию накопления спектральных составляющих накоплений ШЛЧМ-сигнала S_p^* представим следующим выражением:

$$S_{p\ j}^* = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P FFT(S_i)_j, \quad (3)$$

где P – количество накоплений сигнала; j – номер спектральной составляющей измерительного сигнала ($j \in [1...N]$); N – количество спектральных составляющих; $S_{p\ j}^*$ – усредненная спектральная составляющая с номером j ; i – порядковый номер накопления ($i \in [1...P]$); S_i – ШЛЧМ-сигнал i -го накопления; FFT – быстрое преобразование Фурье.

Измерительный сигнал со сниженным пороговым эффектом представлен $S_p = IFFT(S_p^*)$, где $IFFT$ – обратное быстрое преобразование Фурье.

Для учета тонкой структуры сигналов линейной частотно-временной модуляции предлагается использование техники совместных частотно-временных описаний сигналов. Среди множества форм частотно-временных описаний предпочтение отдается функции плотности распределения сигнальной энергии Вигнера [19]:

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

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

Главное достоинство распределения Вигнера состоит в том, что оно обладает свойством максимальной локализации сигнальной энергии, благодаря чему возможно измерять параметры сигнала на интервале частот ШЛЧМ-сигнала [20].

Дискретная форма записи распределения Вигнера (4) представлена следующим выражением [21–23]:

$$Pw(k, n) = 2 \sum_{m=-N+1}^{N-1} Z_a^*(n-m) Z_a(n+m) e^{-j\frac{2\pi km}{M}}, \quad (5)$$

где $M > 2N - 1$; $k \in -N + 1 \dots N - 1$; $Z_a(t) = Z(t) + j\tilde{Z}(t)$ – аналитический сигнал; $\tilde{Z}(t)$ – преобразование Гильберта действительного сигнала $Z(t)$; * – знак комплексного сопряжения. Отметим, что процедура перехода от аналоговой формы распределения Вигнера к дискретной форме не является тривиальной. Подробное описание этой процедуры приведено в [21–23].

Из выражения (5) следует, что для обработки аналогового сигнала он должен быть предварительно дискретизирован с тактовой частотой, более чем вдвое превышающей частоту дискретизации Котельникова. Практически для наиболее достоверного выделения слабого сигнала в шумах высокого уровня в [13] обосновано применение величины частоты дискретизации в десять или двадцать раз выше значения частоты дискретизации Котельникова.

Процедура вычисления аналитического сигнала (5) заключается в следующем [24]:

быстрым преобразованием Фурье вычисляется спектр смеси ШЛЧМ-сигнала плюс шум;
спектр для отрицательных значений частот обнуляется. Спектр для положительных значений частот умножается на два;

осуществляется обратное быстрое преобразование Фурье. В результате имеем массив комплексных значений процесса, реальная и мнимая части которого связаны между собой преобразованием Гильберта.

На рис. 1 представлено преобразование Вигнера измерительного ШЛЧМ-сигнала (в полосе от 100 до 420 Гц с длительностью 1 с) и шума, на котором отслеживается изменение интенсивности сигнальной энергии по времени.

Так как измерительный сигнал модулирован линейно по частоте, то целесообразно разделить полученную частотно-временную матрицу на срезы по времени. На каждом таком срезе присутствуют мгновенные гармонические составляющие ШЛЧМ-сигнала, частоты которых линейно зависят от времени. На рис. 2 представлены временные срезы для моментов времени 0, 500, 1000 мс.

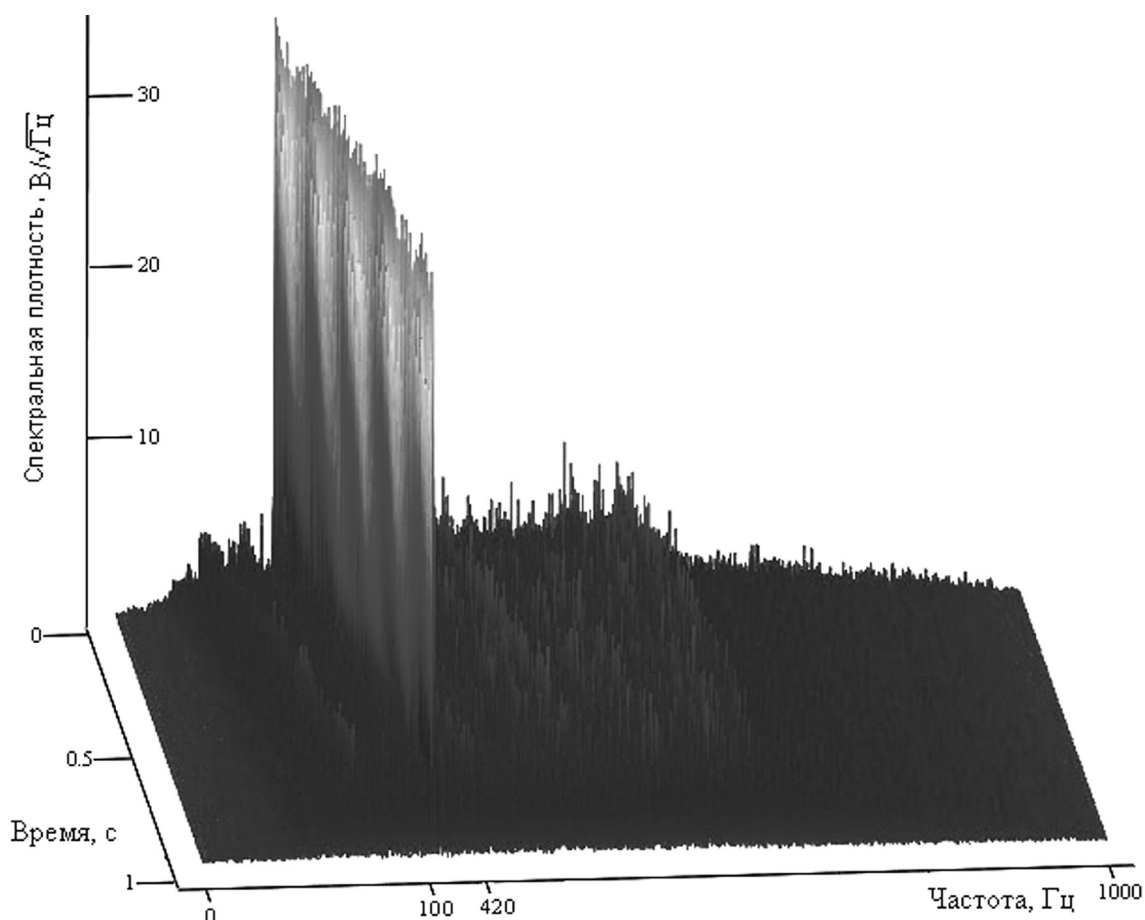


Рис. 1. Частотно-временное преобразование ШЛЧМ-сигнала и шума

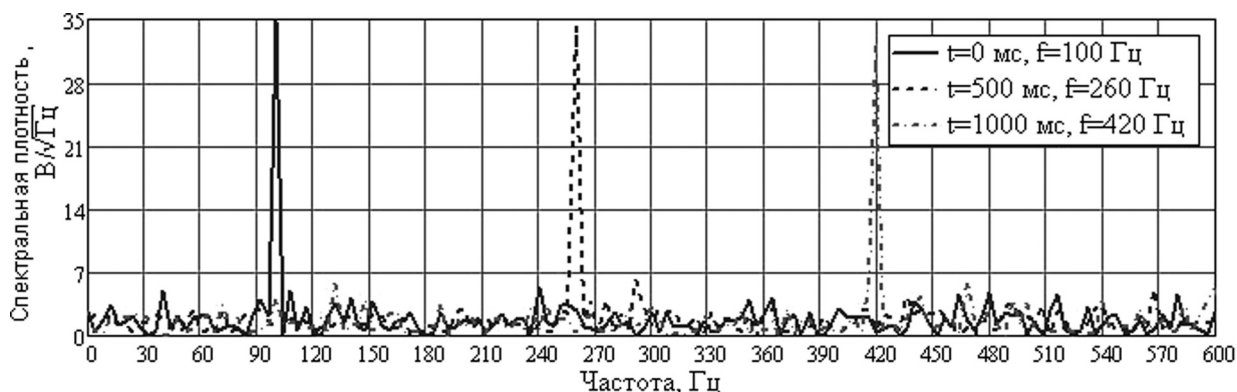


Рис. 2. Временные срезы в разные моменты времени

Анализ временных срезов позволяет применить узкочастотную фильтрацию и независимо оценить коэффициент разборчивости речи для каждой составляющей частоты. Использование коэффициента снижения количества временных срезов позволяет уменьшить время выполнения цифровой обработки за счет снижения количества базовых операций, выполняемых процессором ПЭВМ.

Оценка коэффициента разборчивости для каждой частоты аналогична оценке методом гармонического сигнала. При этом основой расчета среднеквадратической погрешности оценки разборчивости речи является функция (2), которая используется для метода гармонического сигнала.

Экспериментальная оценка разборчивости. Для подтверждения результатов оценки защищенности КУ речевой информации методом ШЛЧМ-сигнала разработаны опытный образец и комплект конструкторской документации программно-аппаратного комплекса (ПАК) «ЕРМАК» (рис. 3).

Принципиальное отличие разработанного ПАК от существующих комплексов заключается во внедрении в него нового метода ШЛЧМ-сигнала для оценки разборчивости речи. Метод гармонического сигнала реализован в ПАК для сравнительной оценки с методом ШЛЧМ-сигнала.

В качестве излучателя сигнала использовалась акустическая система активная [25]. Излучатель формирует акустическое поле на расстоянии 1 м от плоскости излучателя с уровнями 84, 74, 64 дБ. Акустическая система на расстоянии 1 м не излучает магнитные и электрические поля рассеивания благодаря их компенсации (соответствует 1-й категории защищенности). Неравномерность АЧХ акустической системы в диапазоне частот 70 – 16000 Гц составляет не более ± 1 дБ.

Регистрация измерительного сигнала с влияющими факторами выполнялась остронаправленным микрофоном Beyerdynamic OPUS 39S, обладающим пространственной избирательно-

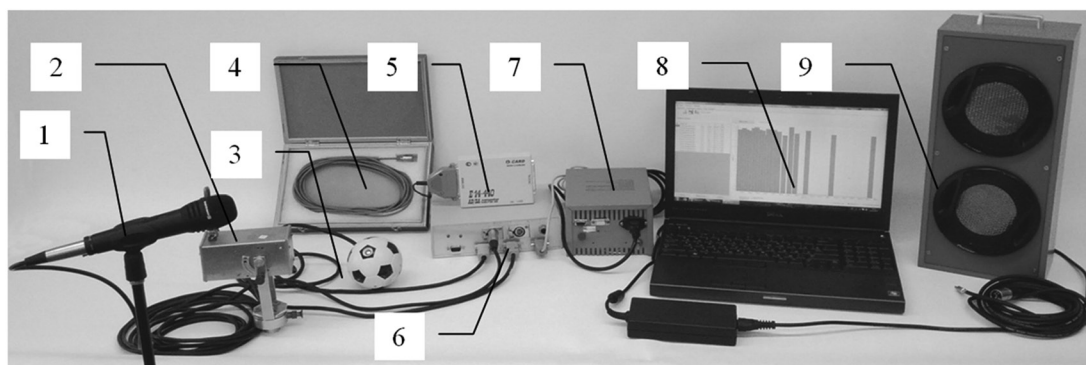


Рис. 3. Программно-аппаратный комплекс «ЕРМАК»: 1 – остронаправленный микрофон; 2 – пространственно-избирательный преобразователь измерительный магнитный активный; 3 – пространственно-избирательный преобразователь измерительный электрический активный; 4 – вибропреобразователь; 5 – измерительный аналогово-цифровой преобразователь; 6 – устройство приемопередающее; 7 – преобразователь токовый; 8 – персональная электронно-вычислительная машина; 9 – активная акустическая система

стью акустического сигнала в диапазоне частот от 50 Гц до 16 кГц, что позволяет локализовать КУ и снизить воздействие случайных помех.

Для достоверного представления информационного аналогового сигнала в цифровую форму для последующей обработки применен измерительный аналогово-цифровой преобразователь L-Card E14-440 (Россия), который преобразует аналоговый сигнал в цифровой в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц с программным управлением процессом сбора данных.

Автоматизация и управление измерениями осуществляются оператором ПЭВМ с помощью специального программного компонента. В качестве последнего применялось разработанное программное обеспечение, которое выполняет: генерацию, формирование, преобразование, сбор информационных сигналов через аналогово-цифровой преобразователь, адаптивную цифровую обработку, автоматизированное управление видами КУ речевой информации, обработку измерительного сигнала, расчет разборчивости речи, отображение процесса измерения и обработки, конфигурирование параметров ПАК, вычисление и представление числовых результатов оценки защищенности КУ речевой информации, которые оператор сравнивает с нормативным показателем (критерием) для принятия решения о защищенности.

Калибровка объекта информатизации включает оценку неравномерности АЧХ, искаженной резонансными и реверберационными явлениями в замкнутом пространстве. Неравномерность АЧХ устанавливается путем регистрации уровней измерительных сигналов при размещении микрофона на расстоянии 0,5 м до ограждающей конструкции и 1 м от акустической системы.

В качестве объекта исследования выбрано однослойное оконное ограждение из силикатного стекла (ширина 1 м, высота 1,2 м, толщина остекления 0,005 м) как наиболее уязвимое к утечке речевой информации на «выделенном помещении» прямоугольной формы (ширина 3 м, длина 6 м, высота 2,5 м). Уровень маскирующего шума в точке приема равен 54 дБ.

Для исследуемого оконного ограждения экспериментальные зависимости отношения сигнал/шум от частоты, полученные гармоническим сигналом и ШЛЧМ-сигналом, представлены на рис. 4.

Неравномерность АЧХ отношения сигнал/шум объекта информатизации, полученная гармоническим сигналом, представлена одной спектральной линией на каждой полосе равной разборчивости, а полученная ШЛЧМ-сигналом – 45 спектральными линиями. Выбор количества точек в каждой полосе равной разборчивости выполняется адаптивно и обусловлен необходимостью получения оценки неравномерности АЧХ с заданной точностью и экономией временного ресурса ПЭВМ и зависит от количества обрабатываемых временных срезов частотно-временного преобразования Вигнера.

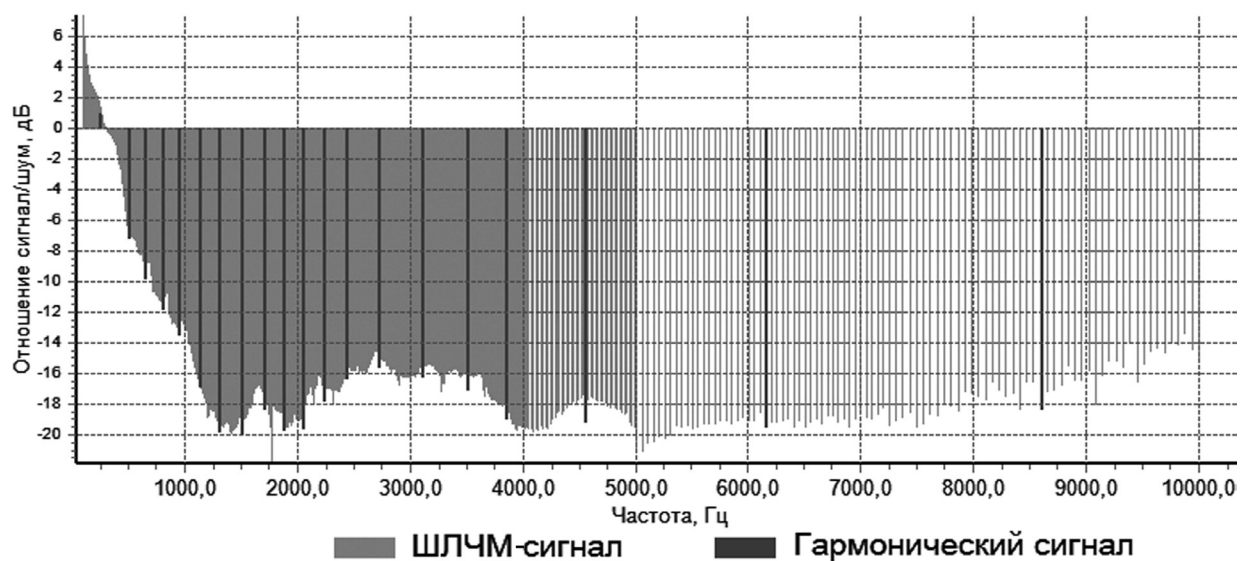


Рис. 4. Зависимости отношения сигнал/шум от частоты для оконного ограждения, полученные методами гармонического сигнала и широкополосной линейно-частотной модуляции сигнала

Как видно из рис. 4, неравномерность АЧХ отношения сигнал/шум ШЛЧМ-сигнала имеет более высокую разрешающую способность по частоте (информативность) по сравнению с гармоническим сигналом.

Экспериментальная разборчивость речи при уровнях сигнала 74 дБ и шума 54 дБ для метода гармонического сигнала составила 15,9%, а для метода ШЛЧМ-сигнала – 18,7%. Инструментальная погрешность ПАК $\pm 3\%$.

Теоретическая величина разборчивости речи в аналогичных условиях, полученная на базе математической модели формирования параметров звукоослабления оконным ограждением [26] и корреляционной теории разборчивости речи [1], составила 19,3%.

Приняв в качестве действительного значения разборчивости речи величину теоретической разборчивости речи, получены абсолютная и относительная погрешности, которые представлены в таблице.

Показатели защищенности при исследовании оконного ограждения

Показатель защищенности	Теоретический расчет	Метод ШЛЧМ-сигнала	Метод гармонического сигнала
Разборчивость речи, %	19,3	18,7	15,9
Абсолютная погрешность, %	–	0,6	3,4
Относительная погрешность, %	–	3,1	17,6

Выводы

1. Из существующих методов оценки защищенности речевой информации метод шумового сигнала функционально ограничен, методически не совершенен, метод гармонического сигнала имеет ряд преимуществ и некоторые методические погрешности.

2. Узкополосная фильтрация временных срезов частотно-временного представления Вигнера ШЛЧМ-сигнала позволяет повысить разрешающую способность по частоте от одной спектральной линии до количества спектральных линий, определяемых величиной частоты дискретизации Котельникова, деленной на два.

3. На примере оконного ограждения экспериментально установлено, что предложенный метод ШЛЧМ-сигнала в сравнении с методом гармонического сигнала снизил методическую погрешность оценки разборчивости речи, обусловленную неравномерностью АЧХ, на 14,5%.

Литература

1. Железняк В. К. Защита информации от утечки по техническим каналам: Учеб. пособие. СПб., 2006.
2. Корнеева Т. В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины: около 7000 терминов. М., 1990.
3. IEC 60849. Sound systems for emergency purposes.
4. Peutz V. M. A. // J. Aud. Eng. Soc. 1971. Vol. 19. P. 915–919.
5. Jacob K. D. // J. Audio Eng. Soc. 1989. Vol. 37. P. 1019–1030.
6. IEC 60268-16 ed. 4.0. Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
7. Тюрин А. М. Введение в теорию статистических методов в гидроакустике. Л., 1963.
8. Покровский Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи. М., 1962.
9. Гордиенко Б. А. и др. Военные коммутационные системы и телефония / Под ред. Л. Н. Щербина. Л., 1990.
10. Об утверждении Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Шум на рабочих местах, в транспортных средствах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» и признании утратившими силу некоторых постановлений и отдельных структурных элементов постановления Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь: Постановление м-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 16 нояб. 2011 г., № 115 // ЭКСПЕРТ 2 ИПС: 2.4.94.1 Сетевая версия [Электронный ресурс] / ОДО «Экспертцентр»; Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2012.
11. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем: Учеб. пособие для вузов. М., 2003.
12. Гарновский Н. Н. Теоретические основы электропроводной связи: в 2 ч. Ч. I: Общая теория пассивных линейных цепей с сосредоточенными постоянными. М., 1956.
13. Бендат Дж. С. Основы теории случайных шумов и ее применение / Пер. с англ. Ю. П. Леонова, Э. Л. Напельбаума, Ю. А. Ярошевского; Под ред. В. С. Пугачева. М., 1965.
14. Денисенко А. Н. Статистическая теория радиотехнических систем. М., 2007.

15. Способ определения максимальной разборчивости речи: Пат. 15204 РБ, МПК G 10L 15/00 / В. К. Железняк, К. Я. Раханов; заявитель Полоц. гос. ун-т. № а2010000; заявл. 04.01.2010; опубл. 30.12.2011 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. 2011. № 6. С. 164.
16. Устройство для определения разборчивости речи: Пат. 15314 РБ, МПК G 10L 15/00, H 04R 29/00 / В. К. Железняк, К. Я. Раханов; заявитель Полоц. гос. ун-т. № а20100291; заявл. 01.03.2010; опубл. 28.02.2012 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. 2012. № 1. С. 162.
17. *Горелов и др.* Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Под общ. ред. М. В. Пономаренко. М., 2001.
18. *Харкевич А. А.* Очерки общей теории связи. М., 1955.
19. *Алексеев А. А., Кириллов А. Б.* Технический анализ сигналов и распознавание радиоизлучений. СПб., 1998.
20. *Дворников С. В.* Теоретические основы синтеза билинейных распределений. СПб., 2007.
21. *Claasen T. A. C. M., Mecklenbrauker W. F. G.* // Phillips Journal of Research. 1980. Vol. 35. P. 217–250.
22. *Claasen T. A. C. M., Mecklenbrauker W. F. G.* // Phillips Journal of Research. 1980. Vol. 35. P. 276–300.
23. *Claasen T. A. C. M., Mecklenbrauker W. F. G.* // Phillips Journal of Research. 1980. Vol. 35. P. 372–389.
24. *Денисенко А. Н.* Сигналы. Теоретическая радиотехника: Справоч. пособие. М., 2005.
25. Акустическая система с малым внешним переменным магнитным полем: Пат. 16336 РБ, МПК H 02K 33/00, B 06B 1/04 / В. К. Железняк; заявитель Полоц. гос. ун-т. № а20100737; заявл. 11.05.2010; опубл. // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. 2012. № 5. С. 154–155.
26. *Железняк В. К., Раханов К. Я.* // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. 2008. № 9. С. 141–146.

V. K. ZHELEZNYAK, K. Ya. RAKHANAU

BROADBAND LINEAR FREQUENCY MODULATION ASSESSMENT FOR SPEECH INTELLIGIBILITY IN CHANNELS OF INFORMATION LEAKAGE

Summary

The methods of noise signal and harmonic signal are considered. The number of existing advantages of the method of harmonic signal is defined. A method of broadband linear frequency modulation signal to reduce the methodical error estimates of speech intelligibility by increasing the frequency resolution is proposed. A reduction of the systematic error by broadband linear frequency modulation signal by the example of window guards is experimentally shown.