

УДК 534; 53.08:681.3

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ВИГНЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ

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

*Приводится формализованный алгоритм цифровой обработки сигнала с линейно-частотной модуляцией частотно-временным преобразованием Вигнера для оценки разборчивости речи, включающий обобщенный алгоритм оценки защищенности и принятых мер защиты объекта информатизации (ОИ), алгоритм снижения порогового эффекта сигнала с линейной частотной модуляцией и алгоритм оценки разборчивости речи. В работе представлена оценка эффективности предложенного алгоритма по времени выполнения. Предлагается способ снижения времени выполнения алгоритма за счет введения коэффициента снижения количества полос разбиения частотно-временной области. Сравниваются теоретические и практические результаты выполнения алгоритмов.*

**Ключевые слова:** оценка разборчивости речи, частотно-временное преобразование Вигнера, канал утечки информации, разрешающая способность, сигнал с линейно-частотной модуляцией.

**Введение.** Совершенствование методов оценки разборчивости речи определяется измерительным сигналом и методами их обработки в каналах утечки информации. Значительная неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) каналов утечки информации (КУИ) обуславливает методическую погрешность при использовании гармонического сигнала в полосах равной разборчивости. Применение сигнала линейной частотной модуляции (ЛЧМ), предложенного в работах [1–4] обуславливает решение этой научной задачи. Предложенный метод базируется на преимуществах ЛЧМ-сигнала в надпороговой области при устранении основного его недостатка – порогового эффекта. Частотно-временное представление сигнальной энергии функцией Вигнера позволило учесть тонкую структуру ЛЧМ-сигнала. Дополнение к корреляционной теории разборчивости речи, разработанной для метода гармонического сигнала, позволяет значительно снизить методические (теоретические) погрешности, обусловленные рядом факторов, искажающих акустический сигнал в замкнутом объеме.

Принципиальное различие в построении приемников для гармонического и сигнала с ЛЧМ обусловило необходимость разработки нового алгоритма цифровой обработки и формирования стимулирующего сигнала. Программно-аппаратный комплекс (ПАК) для ЛЧМ-сигнала включает наряду с аппаратными средствами специальный программный компонент, назначение которого состоит в имитации функционирования ряда аппаратных средств [4]. Функциями ПАК являются автоматизированное управление и генерация стимулирующих сигналов, адаптивная цифровая их обработка, вычисление и представление результатов оценки защищенности каналов утечки речевой информации (КУРИ). Основные требования, предъявляемые к программному компоненту, – адекватность функционирования, быстрое действие, минимальный объем занимаемой оперативной памяти.

Для оценки разборчивости речи методом сигнала с ЛЧМ предложено максимальный объем функций вынести в специальный программный компонент. Это упрощает аппаратную реализацию ПАК и, как следствие, снижает его стоимость. Кроме того, специальный программный компонент с максимальным количеством интегрированных функций (управления, синхронизации, генерации сигнала, фильтрации, оценки показателей и т.д.) повышает надежность, масштабируемость, устойчивость, адаптивность всего ПАК.

**1. Обобщенный алгоритм оценки разборчивости речи.** С учетом положительных решений обработки гармонического сигнала, реализованной в изделиях «К6-6», ФИЛИН-А и в пособии [5], разработан обобщенный принцип оценки защищенности и принятых мер защиты ОИ методом обработки ЛЧМ-сигнала частотно-временным преобразованием Вигнера. На базе этого принципа разработаны способ и устройство оценки разборчивости речи [1, 2].

Принцип оценки защищенности и принятых мер защиты ОИ заключается в последовательном выполнении следующих этапов:

- 1.1) исследуются возможные КУРИ на ОИ и анализируются предъявленные требования к их защищенности;
- 1.2) определяются возможные КУРИ, в которых существует потенциальная возможность извлечения речевой информации;
- 1.3) по каждому КУРИ задаются необходимые нормативные величины показателя защищенности  $W_0$ , которые зависят от степени защищенности, особенностей КУРИ, источников излучения, среды пространства и средств извлечения информации, места и времени эксплуатации ОИ;

1.4) проводится снижение порогового эффекта ЛЧМ-сигнала методом синхронного накопления спектральных составляющих с автоматическим принятием решения о достижении порога чувствительности;

1.5) осуществляется оценка величины показателя  $W_i$  методом ЛЧМ-сигнала с учетом влияния воздействующих внешних факторов с отображением и документированием полученных результатов;

1.6) вычисляется разборчивость речи  $W_i$  для принятия решения о степени защищенности КУИ на основании нормативных значений величины разборчивости речи  $W_0$ , ( $W_0 > W_i$  либо  $W_0 < W_i$ ;). В случае  $W_i > W_0$  применяются схемно-конструктивные и организационные меры для выполнения требований защищенности согласно общим принципам защиты информации. Осуществляется повторение процедуры оценки величины нормативного показателя (этап 4).

При достижении требуемой величины нормативного показателя (на основании принятого решения о защищенности) КУРИ признается защищенным, что позволяет перейти к следующему каналу (этап 2).

Выбор минимальной величины нормативного показателя (этап 3) и принятие решения о защищенности (этап 6) осуществляется оператором (специалистом по защите информации) на основании полученных ПАК показателей защищенности (разборчивости речи) ОИ и предъявляемых требований к степени защищенности. Функции по оценке величины показателя защищенности в КУИ (этап 5) обеспечивают методом широкополосного ЛЧМ-сигнала программно-аппаратным компонентом.

На рисунке 1 представлен принцип обобщенной оценки методом ЛЧМ-сигнала защищенности и принятых мер защиты ОИ, реализованный с помощью алгоритма.

Обобщенный алгоритм формализует и делит обработку ЛЧМ-сигнала на дискретные модули (снижение порогового эффекта и оценка разборчивости речи), что позволяет выполнить его автоматизацию с помощью ПАК. Обработка ЛЧМ-сигнала представлена дискретными алгоритмами снижения порогового эффекта ЛЧМ-сигнала и оценки разборчивости речи, которые в составе обобщенного алгоритма оценки защищенности и принятых мер защиты ОИ реализуют приемник ЛЧМ-сигнала.

**2. Снижение порогового эффекта.** Положительные свойства ЛЧМ-сигнала в шумах высокого уровня проявляются при достижении отношения сигнал/шум больше нуля [4]. Выполнение этого условия осуществляется за счет применения синхронного накопления спектральных составляющих ЛЧМ-сигнала, реализуемого следующими операциями<sup>1</sup>:

2.1) программный компонент инициализирует приемо-передающий тракт ПАК (приемо-передающего устройства, акустической системы, регистрирующего устройства, измерительного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), принимающего смесь ЛЧМ-сигнала с шумом цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) формирования стимулирующего сигнала);

2.2) на основании достоверных сведений, характеризующих отсутствие сигнала, рассчитывают величину порога чувствительности  $G_0$ , которая каждый спектр входной реализации делит на наличие или отсутствие в шумах надпорогового ЛЧМ-сигнала;

2.3) осуществляют цифровую генерацию стимулирующего ЛЧМ-сигнала с последующим преобразованием его в аналоговую форму посредством ЦАП и излучают акустической системой;

2.4) синхронно с излучением стимулирующего ЛЧМ-сигнала посредством ЦАП выполняют захват данных с измерительного АЦП, которые представляют смесь ЛЧМ-сигнала с шумом в цифровой форме;

2.5) вычисляют спектр дискретной смеси ЛЧМ-сигнала с шумом быстрым преобразованием Фурье, которое имеет быстродействие  $O(N \cdot \log(N))$  для любого  $N$  – простого или составного. В случае если длина преобразования  $N$  является составным числом, используется алгоритм Cooley – Tukey, сводящий преобразование Фурье к более коротким преобразованиям с простым множителем  $N$ . Преобразования короткой длины ( $N \leq 5$ ) вычисляются с использованием коротких преобразований, а длинные преобразования, соответствующие простому  $N$  или крупным простым множителям составного  $N$ , вычисляются с использованием алгоритма Блюштейна (Bluestein);

2.6) производят синхронное накопление и нормирование спектральных составляющих спектра смеси ЛЧМ-сигнала с шумом;

2.7) рассчитывают порог принятия решения  $G_p$  по критерию максимального правдоподобия [6];

2.8) проверяют достижение величиной порога принятия решения накопленной смеси ЛЧМ-сигнала с шумом  $G_p$  величины порога чувствительности  $G_0$ . Если  $G_p < G_0$ , процедуру накопления повторяют (осуществляют переход к операции 2.3);

2.9) если уровень порога принятия решения  $G_p$  достиг необходимой величины ( $G_p > G_0$ ), выполняют обратное быстрое преобразование Фурье.

<sup>1</sup> Нумерация пунктов дана в соответствии с рисунком 2.

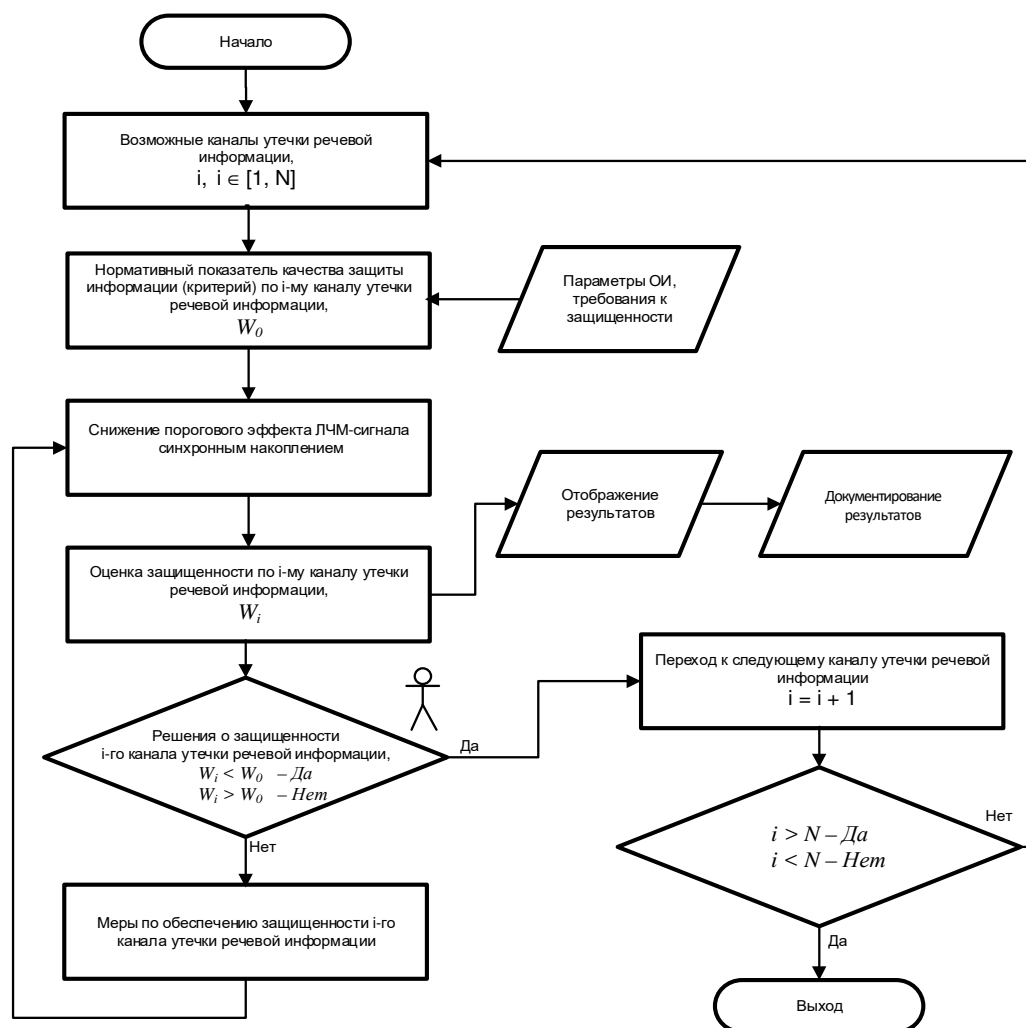


Рисунок 1. – Обобщенный алгоритм оценки защищенности и принятых мер защиты объекта информатизации

Снижение порогового эффекта ЛЧМ-сигнала представлено на рисунке 2 в виде алгоритма. Результатом выполнения алгоритма снижения порогового эффекта является надпороговый сигнал с ЛЧМ с присущими ему положительными свойствами. Цель дальнейшей обработки ЛЧМ-сигнала – величина разборчивости речи.

**3. Оценка разборчивости речи.** Применение частотно-временного представления сигнальной энергии функций Вигнера позволяет оценивать интенсивность физических полей за пределами ОИ надпорогового ЛЧМ-сигнала. По результатам оценивания на базе корреляционной теории разборчивости речи [5] определяется информационный критерий защищенности – разборчивость речи.

Расчет разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала включает следующие операции<sup>2</sup>:

3.1) программный компонент обеспечивает инициализацию приемо-передающего тракта ПАК (приемо-передающего устройства, акустической системы, регистрирующего устройства, измерительного АЦП, принимающего смесь ЛЧМ-сигнала с шумом, ЦАП формирования стимулирующего сигнала);

3.2) осуществляют цифровую генерацию стимулирующего ЛЧМ-сигнала с последующим преобразованием его в аналоговую форму посредством ЦАП и излучением акустической системой;

3.3) производят снижение порогового эффекта ЛЧМ-сигнала методом синхронного накопления спектральных составляющих. Накопление осуществляется за счет  $P$ -кратного повторения стимулирующего ЛЧМ-сигнала;

3.4) получают частотно-временное разложение сигнальной энергии без получения его спектра – формирование тонкой структуры ЛЧМ-сигнала с количеством составляющих  $M$ ;

<sup>2</sup> Нумерация пунктов дана в соответствии с рисунком 3.

3.5) вычисляют мощность сигнала в  $j$ -й полосе  $P_{C_j}$ , где  $j \in [1; M]$ , с помощью оптимального корреляционного приемника [7]. Согласованная частота оптимального корреляционного приемника определяется в зависимости от исследуемой  $j$ -й полосы;

3.6) вычисляют мощность сигнала с шумом в  $j$ -й полосе  $P_{C+Ш_j}$ ;

3.7) определяют отношение сигнал/шум на выходе преобразования  $Q_{вых_j}$ ;

3.8) на основании отношения сигнал/шум на выходе преобразования  $Q_{вых_j}$  и количества накопленний  $P$  получают отношение сигнал/шум на входе приемника  $Q_{вх_j}$  согласно обратной функции чувствительности;

3.9) вычисляется парциальный коэффициент разборчивости речи в  $j$ -й полосе согласно корреляционной теории разборчивости речи [5];

3.10) усредняют коэффициент разборчивости речи в полосе равной разборчивости, что значительно снижает методическую погрешность при количестве полос  $M$ ;

3.11) переходят к следующей полосе равной разборчивости с перестройкой излучающей и принимающей части ПАК;

3.12) производят повторный расчет интегрального коэффициента разборчивости следующей полосы равной разборчивости (этап 3.2) либо переходят к этапу 3.13;

3.13) после анализа коэффициентов разборчивости в каждой полосе равной разборчивости рассчитывают коэффициент разборчивости для всей полосы [8];

3.14) вычисляют слоговую и словесную разборчивость в исследуемом КУИ. Программно-аппаратный комплекс отображает и документирует результаты в генерализованном виде.

Расчет разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала в виде алгоритма представлен на рисунке 3.

Обработка ЛЧМ-сигнала для оценки величины разборчивости речи, включающая пункты 3.3 – 3.14, осуществляется в цифровом виде программным компонентом. Эта часть обработки является наиболее емкой по вычислительным ресурсам, поэтому необходимо рассмотреть ее эффективность.

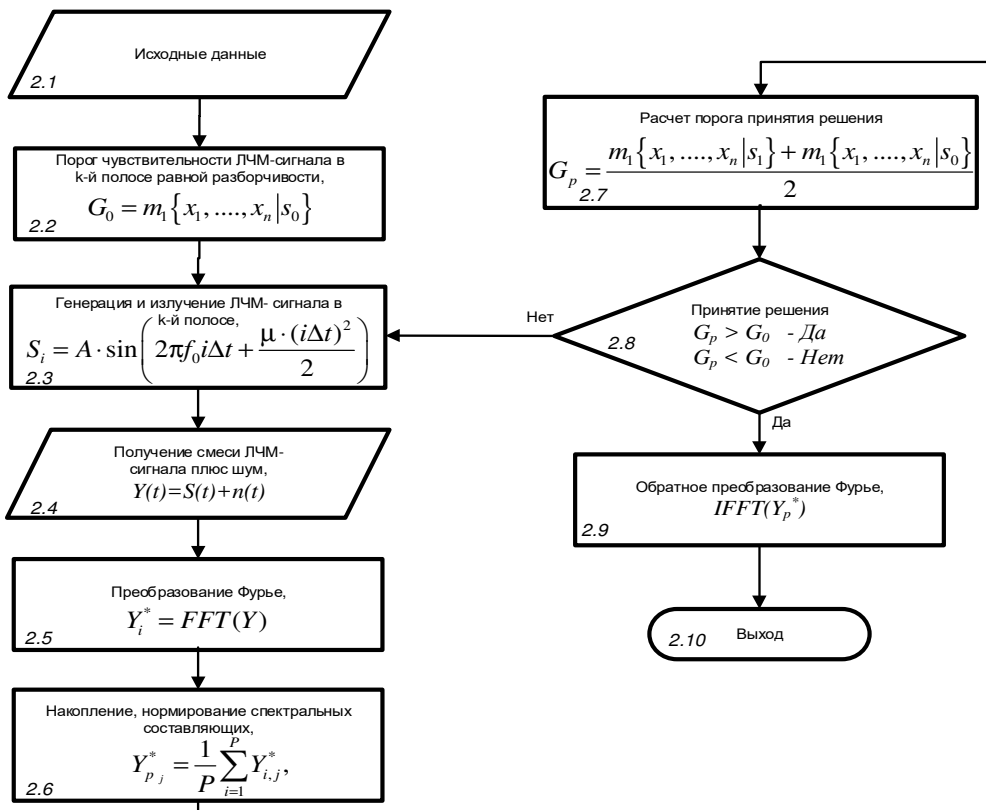


Рисунок 2. – Алгоритм снижения порогового эффекта ЛЧМ-сигнала

**4. Эффективность цифровой обработки.** Совокупная эффективность представленного алгоритма оценки разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала (см. рисунок 3) включает временную эффективность и пространственную. Временная эффективность является показателем скорости выполнения обработки. Пространственная эффективность показывает, сколько дополнительной оперативной памяти нужно для выполнения обработки.

В настоящее время требования к дополнительному объему оперативной памяти, необходимой для работы программного компонента, стали не так важны, как раньше. Здесь следует учесть, что существует значительная разница между быстрой основной памятью, относительно медленной вторичной памятью и кеш-памятью. Однако в основном внимание следует сосредоточить на временной эффективности.

Для анализа временной эффективности обработки можно воспользоваться временем между предъявлением программному компоненту входных данных и появлением результатов на выходе. Общепринятой единицей такой оценки является время (секунды, миллисекунды и т.д.). Однако у такого подхода существуют явные недостатки, поскольку результаты измерения будут зависеть от посторонних факторов [9]:

- быстродействия конкретного компьютера;
- тщательности реализации обработки в виде программы;
- типа компилятора;
- точности хронометрирования реального времени выполнения программы.

В данном случае для анализа эффективности целесообразно использовать подсчет количества выполнения базовых (основных) операций, которые вносят наибольший вклад в общее время выполнения обработки. Такой подход не зависит от посторонних факторов. Время выполнения программной реализации цифровой обработки  $T(n)$  на конкретной ПЭВМ можно представить по следующей формуле [10]:

$$T(n) \approx c_{op}C(n), \quad (1)$$

где  $c_{op}$  – время выполнения основной операции на ПЭВМ;

$C(n)$  – количество выполняемых базовых операций в зависимости от размера входных данных  $n$ .

Количество базовых операций  $C(n)$  в представленном алгоритме снижения порогового эффекта (см. рисунок 2) зависит не только от размера входных данных  $n$ , но и от количества накоплений  $P$ , за которые сигнал с ЛЧМ достигнет надпороговой области. Согласно алгоритму количество накоплений  $P$  – динамическая величина, которая зависит от помеховой обстановки. Однако между повторениями накопления (см. рисунок 3, пункты 3.4 – 3.7) присутствует излучение ЛЧМ-сигнала акустической системой (см. рисунок 3, пункт 3.13). Излучение акустического сигнала обуславливает временную задержку перед выполнением цифровой обработки, равную длительности ЛЧМ-сигнала, которая превышает 2 с. Таким образом, количество базовых операций  $C(n)$  не зависит от количества накоплений  $P$  в случае  $C_i(n) < T_C$ , где  $T_C$  – продолжительность ЛЧМ-сигнала. Следовательно, количество базовых операций алгоритма снижения порогового эффекта можно оценить за один проход цикла накопления:

$$C(n) = n(2\log(n) + 13). \quad (2)$$

Порядок роста количества основных операций функции (2), зависящий от размера входных данных, является практически линейным, что доказывает эффективность представленного алгоритма по времени выполнения операции. Реализация алгоритма снижения порогового эффекта ЛЧМ-сигнала в виде программного компонента в среде Microsoft Visual Studio 2008 на языке C# подтверждает данные результаты.

Наиболее интересными с точки зрения оптимизации по времени являются операции 3.4 – 3.8 (см. рисунок 3). На их выполнение затрачиваются значительные вычислительные ресурсы.

Представим количество выполняемых базовых операций в зависимости от размера входных данных  $n$  по операциям 3.4 – 3.8 (см. рисунок 3):

3.4) количество базовых операций для частотно-временного представления сигнальной энергии функцией Вигнера  $C_4(n)$ :

$$C_4(n) = 5nM + 2n\log(n) + 3n,$$

где  $j \in [1; M]$ ;

$M = n/2$  – количество полос, на которые разбивается спектр ЛЧМ-сигнала  $k$ -й полосы равной разборчивости;

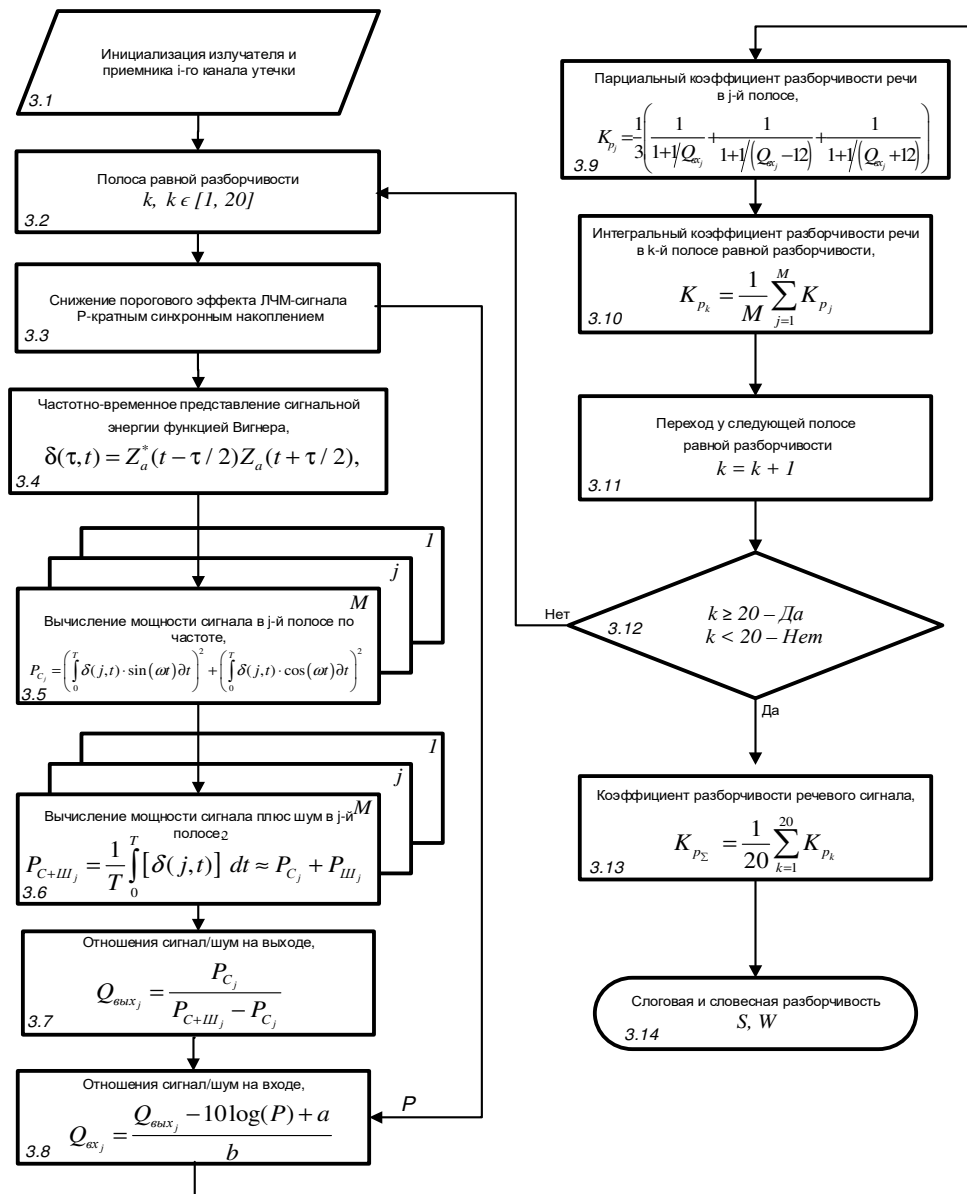


Рисунок 3. – Алгоритм оценки разборчивости речи

3.5) количество базовых операций при вычислении мощности сигнала в j-x полосах:

$$C_5(n) = M(8n + 3);$$

3.6) количество базовых операций при вычислении мощности смеси ЛЧМ-сигнала плюс шум  $C_6(n)$ :

$$C_6(n) = M(3n / 2);$$

3.7) количество базовых операций при вычислении отношения сигнал/шум выхода  $C_7(n)$ :

$$C_7(n) = 2M;$$

3.8) количество базовых операций при вычислении отношения сигнал/шум входа  $C_8(n)$ :

$$C_8(n) = 5M.$$

Таким образом, итоговое количество базовых операций  $C(n)$  описывается выражением

$$\begin{aligned} C(n) &= C_4(n) + C_5(n) + C_6(n) + C_7(n) + C_8(n) = \\ &= 14,5nM + 2n \log(n) + 3n + 10M. \end{aligned} \quad (3)$$

Частота дискретизации  $f_d$  должна иметь максимально возможное значение, что позволяет снизить методическую погрешность [4]. Согласно параметрам применяемого внешнего модуля АЦП E14-440D  $f_d = 2 \cdot 10^5$  Гц. Также учитывая продолжительность ЛЧМ-сигнала, которая составляет 2 с, можно оценить максимальный размер входных данных  $n = 4 \cdot 10^5$ . Исходя из выражения (3) итоговое количество базовых операций составит  $C(n) = 1,16 \cdot 10^{12}$ .

Для вычисления на ПЭВМ, имеющей производительность, например,  $3,18 \cdot 10^9$  флоп/с (Intel® Core™ Duo U2400) [11], на основании выражения (1) получим время выполнения алгоритма  $T(n)$

$$T(n) = \frac{1}{3,18 \cdot 10^9} \cdot 1,16 \cdot 10^{12} = 364,782 \text{ с.}$$

Такая продолжительность выполнения алгоритма является приемлемой для практического использования ПАК при исследовании ОИ, так как позволяет детально установить факторы, обуславливающие КУРИ. Использование только метода ЛЧМ-сигнала резко повысит точность их оценки. Такая оценка, проведенная неавтоматизированным методом с помощью локальной измерительной схемы, построенной на средствах измерения общего назначения, требует затрат времени более чем на 3 порядка больше по сравнению с автоматизированным методом. Локальная измерительная схема не позволяет оценить погрешность измерения.

Не составляет труда уменьшить время выполнения обработки за счет снижения количества временных составляющих  $j$  в функции Вигнера  $\delta(j, t)$  этапа 3.5. Это сокращает количество полос разбиения с  $M = n/2$  до  $M = n/2\rho$ , где  $\rho$  – коэффициент снижения количества полос разбиения,  $\rho \in [1; n/2]$ . Например, при  $\rho = 1$  количество полос разбиения ЛЧМ-сигнала составит  $M = n/2$ , а при  $\rho = n/2$  –  $M = 1$ .

Коэффициент снижения количества полос разбиения обуславливает снижение вычислительных затрат согласно выражению (3), но также снижает информативность тонкой структуры ЛЧМ-сигнала.

Для примера на рисунке 4, а представлено расчетное время выполнения алгоритма процессором Intel® Core™ Duo U2400 в зависимости от размера входных данных  $n$  и коэффициента снижения количества полос разбиения  $\rho$ .

Из рисунка 4, а следует, что снижение количества полос разбиения по временной составляющей в 2 раза дает выигрыш в эффективности вычислений более чем в 2 раза; снижение количества полос разбиения в 10 раз обеспечивает выигрыш более чем в 9 раз. Представленная оценка является приближенной, однако она позволяет судить о характере увеличения временной эффективности алгоритма.

Полученное время выполнения алгоритма показывает высокую эффективность обработки по сравнению со временем расчета классической функции Вигнера с размером входных данных  $n = 4 \cdot 10^5$ , имеющей количество базовых операций  $C(n) = 2n^3(7 + \log(n)) = 1,6 \cdot 10^{18}$  (с учетом применения быстрого преобразования Фурье).

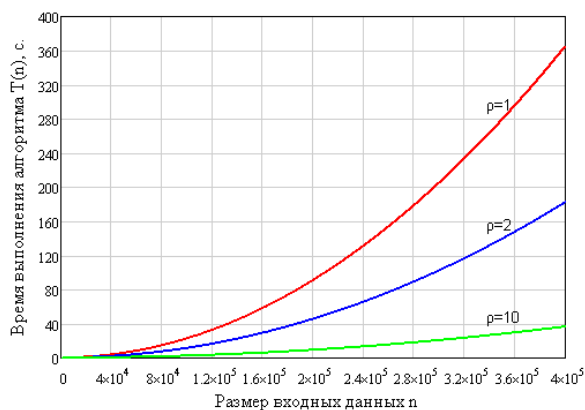
Время расчета классической функции Вигнера для процессора Intel® Core™ Duo U2400 составляет  $T(n) = 1/3,18 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{18} = 5 \cdot 10^8$  с (порядка 15-ти лет). Это говорит о том, что практическое использование классической функции Вигнера весьма затруднительно.

Дальнейшая реализация предложенного алгоритма в среде Microsoft Visual Studio 2008 на языке C# позволила более точно оценить время выполнения обработки программным компонентом на практике.

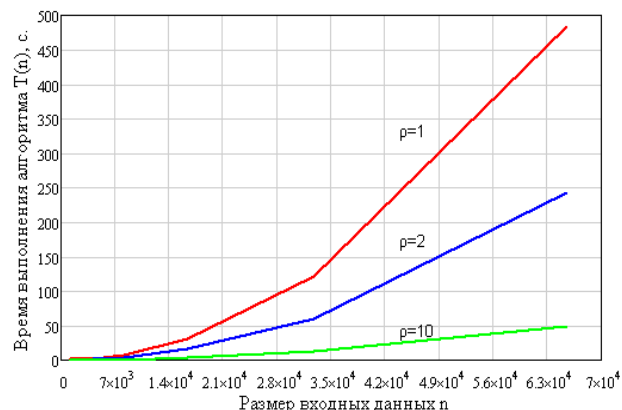
На рисунке 4, б представлено время выполнения обработки процессором AMD Sempron™ 2800+.

Полученное время выполнения обработки позволяет утверждать, что предложенная цифровая обработка пригодна для использования в ПАК с коэффициентом снижения количества полос разбиения  $\rho > 10$ , который может меняться в зависимости от производительности используемого процессора.

Так, при частоте дискретизации  $f_d = 2 \cdot 10^5$  коэффициент снижения количества полос разбиения  $\rho = 10$  снижает информативность тонкой структуры ЛЧМ-сигнала с  $M = 10^5$  до  $M = 10^4$ , что незначительно отражается на методической погрешности.



а – Расчетное время выполнения алгоритма процессором Intel® Core™ Duo U2400



б – Практическое время выполнения алгоритма процессором AMD Sempron™ 2800+

Рисунок 4. – Время выполнения алгоритма с коэффициентом снижения количества полос разбиения  $\rho = 1, 2, 10$

Кроме того, производительность обработки может быть увеличена посредством факторов, изложенных в работе [12]:

- векторных модулей процессоров, в которых массивы данных обрабатывают практически параллельно, что делает их в несколько раз более быстрыми, чем при работе в скалярном режиме (SIMD-машины).

Примерами векторных процессоров являются Intel-совместимые процессоры, поддерживающие наборы инструкций MMX, SSE;

- параллельного выполнения нескольких независимых срезов временных составляющих с применением MIMD-машин.

Количество полос разбиения с учетом возможностей дискретной формы преобразования Вигнера определяется следующим образом [3, 4]:

$$M_{\max} = \frac{f_d \cdot T}{4} = 100000.$$

Максимальная разрешающая способность на средней частоте представлена выражением

$$\eta_{\max} = \frac{f_{cp}}{M_{\max}}.$$

Разрешающую способность на средней частоте с учетом коэффициентов снижения количества полос разбиения  $\rho$  определим по формуле:

$$\eta = \frac{f_{cp} \cdot \rho}{M_{\max}}.$$

Анализ сигнала в количестве полос  $M_{\max}$  является неоправданно большим и затруднительным. Оптимальным количеством полос для каждой полосы равной разборчивости является  $M = 125$ , где коэффициент снижения количества полос разбиения  $\rho = 800$ .

В таблице приведены разрешающие способности ЛЧМ-сигнала в полосах равной разборчивости. Практическое время выполнения обработки с коэффициентом снижения количества полос разбиения  $\rho = 800$  типовым процессором AMD Sempron™ 2800+ составляет порядка 20 с.



Таблица. – Разрешающие способности ЛЧМ-сигнала в полосах равной разборчивости

| Номер полосы | Границы полосы $f_1 - f_0$ , Гц | Средняя частота $f_{cp}$ , Гц | Максимальная разрешающая способность $\eta_{max}$ , Гц | Разрешающая способность $\eta$ , Гц |
|--------------|---------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------------|
| 1            | 100 – 420                       | 250                           | 0,0025   | 2                                   |
| 2            | 420 – 570                       | 500                           | 0,005  | 4                                   |
| 3            | 570 – 710                       | 650                           | 0,0065   | 5,2                                 |
| 4            | 710 – 865                       | 800                           | 0,008  | 6,4                                 |
| 5            | 865 – 1030                      | 950                           | 0,0095   | 7,6                                 |
| 6            | 1030 – 1220                     | 1125                          | 0,01125  | 9                                   |
| 7            | 1220 – 1410                     | 1300                          | 0,013  | 10,4                                |
| 8            | 1410 – 1600                     | 1500                          | 0,015  | 12                                  |
| 9            | 1600 – 1780                     | 1700                          | 0,017  | 13,6                                |
| 10           | 1780 – 1960                     | 1875                          | 0,01875  | 15                                  |
| 11           | 1960 – 2140                     | 2050                          | 0,0205   | 16,4                                |
| 12           | 2140 – 2320                     | 2225                          | 0,02225  | 17,8                                |
| 13           | 2320 – 2550                     | 2425                          | 0,02425  | 19,4                                |
| 14           | 2550 – 2900                     | 2725                          | 0,02725  | 21,8                                |
| 15           | 2900 – 3300                     | 3100                          | 0,031  | 24,8                                |
| 16           | 3300 – 3660                     | 3500                          | 0,035  | 28                                  |
| 17           | 3660 – 4050                     | 3850                          | 0,0385   | 30,8                                |
| 18           | 4050 – 5010                     | 4550                          | 0,0455   | 36,4                                |
| 19           | 5010 – 7250                     | 6150                          | 0,0615   | 49,2                                |
| 20           | 7250 – 10000                    | 8600                          | 0,086  | 68,8                                |

**Выводы:**

1. Представлен формализованный алгоритм цифровой обработки ЛЧМ-сигнала частотно-временным преобразованием Вигнера для оценки разборчивости речи, включающий обобщенный алгоритм оценки защищенности и принятых мер защиты ОИ, алгоритм снижения порогового эффекта ЛЧМ-сигнала и алгоритм оценки разборчивости речи.

2. Получены максимальные разрешающие способности (от 0,00025 до 0,086 Гц) во всем диапазоне частот полос равной разборчивости, показывающие превосходство метода ЛЧМ-сигнала перед методом гармонического сигнала, который использует средние частоты полос равной разборчивости (с шириной полосы от 0,025 до 1 Гц).

3. Увеличена производительность алгоритма оценки разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала за счет применения коэффициента снижения количества полос разбиения, что значительно сокращает время вычисления до 20 с при реализации разрешающей способности от 2 до 69 Гц во всем диапазоне полос равной разборчивости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ определения максимальной разборчивости речи : пат. 15204 Респ. Беларусь : МПК G 10L 15/00 / В.К. Железняк, К.Я. Раханов ; дата публ. 30.12.2011.
2. Устройство для определения разборчивости речи : пат. 15314 Респ. Беларусь : МПК G 10L 15/00, H 04R 29/00 / В.К. Железняк, К.Я. Раханов ; дата публ. 28.02.2012.
3. Раханов, К.Я. Широкополосная линейно-частотная модуляция сигнала для оценки разборчивости речи в каналах утечки информации // К.Я. Раханов, В.К. Железняк // Известия национальной академии наук Беларуси: серия физико-технических наук ; редкол.: П.А. Вицязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Белорусская наука, 2014. – С. 88–95.
4. Раханов, К.Я. Синтез программно-аппаратной системы оценки разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала : результаты эксперимента // К.Я. Раханов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С, Фундаментальные науки. – 2012. – № 12. – С. 20–26.
5. Железняк, В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам : учеб. пособие / В.К. Железняк. – СПб. : ГУАП, 2006. – 188 с.
6. Обнаружение сигналов ВЧ-диапазона перемножением спектров фрагментов их реализаций / К.Я. Раханов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С, Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 29 – 34.

7. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления : учеб. пособие / А.Г. Охонский [и др.] ; под ред. А.Г. Охонского. – М. : Мир – книги, 1993. – 216 с.
8. Продеус, А.Н. О некоторых особенностях развития объективных методов измерений разборчивости речи / А.Н. Продеус // Электроника и связь. Темат. вып. «Электроника и нанотехнологии» – 2010. – № 2. – С. 217–223.
9. Цилькер, Б.Я. Организация ЭВМ и систем : учебник для вузов / Б.Я. Цилькер, С.А. Орлов. – М. : Питер, 2004. – 668 с.
10. Левитин, А. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А. Левитин ; пер. с англ. – М. : Издат. дом «Вильямс», 2006. – 576 с.
11. Характеристики процессоров Intel® в соответствии с экспортными требованиями [Электронный ресурс] // Intel Corporation, 2011. – Режим доступа: <http://www.intel.com/support/ru/processors/sb/CS-023143.htm#8>. – Дата доступа: 26.10.2018.
12. Долматов, А.В. Основы развивающего образования: теория, методы, технологии креативной педагогики / А.В. Долматов. – СПб. : ВУС, 1998. – 196 с.

Поступила 12.03.2019

### DIGITAL TREATMENT OF A SIGNAL WITH LINEAR-FREQUENCY MODULATION OF FREQUENCY-TEMPORARY TRANSFORMATION OF WIGNER TO ESTIMATE THE CURABILITY OF SPEECH

V. ZHELEZNYAK, K. RAHANOV

*A formalized digital signal processing algorithm with linear-frequency modulation of the Wigner time-frequency transform for evaluating speech intelligibility is presented, including a generalized algorithm for evaluating security and adopted measures of informatization object (OI) protection, an algorithm for reducing the threshold effect of a signal with linear frequency modulation, and an algorithm for evaluating speech intelligibility. The paper presents an estimate of the efficiency of the proposed algorithm in terms of execution time. A method is proposed for reducing the execution time of an algorithm by introducing a reduction coefficient for the number of frequency-time domain partitioning bands. Theoretical and practical results of algorithm execution are compared.*

**Keywords:** *speech intelligibility assessment, Wigner time-frequency transform, information leakage channel, resolution, linear frequency modulated signal.*