

УДК 621.3

**О. В. Рыбальский<sup>1</sup>, В. И. Соловьев<sup>2</sup>, В. В. Журавель<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Национальная академия внутренних дел

пл. Соломенская, 1, 02000 Киев, Украина; e-mail: rybalsky\_ol@mail.ru

<sup>2</sup>Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

Проспект Советский, 59-А, 93400 Северодонецк, Украина; e-mail: mettilyd@mail.ru

<sup>3</sup>Государственный научно-исследовательский

экспертно-криминалистический центр МВД Украины

ул. Б. Окружная, 4, 03680 Киев, Украина; e-mail: fonoscopia@ukr.net

## **Следы монтажа в цифровых фонограммах, выполненного способом вырезания и перестановки фрагментов**

*Рассмотрены процессы, происходящие при монтаже цифровых фонограмм, выполненного способом вырезания и перестановки фрагментов в таких фонограммах. Теоретически и экспериментально доказано, что монтаж, выполненный таким способом, приводит к образованию следов в обработанных цифровых фонограммах. Показано, что следы такой обработки проявляются в виде возникновения дополнительных высокочастотных спектральных составляющих и изменяют фрактальную структуру речевых сигналов и сигналов шумов пауз в области малых масштабов самоподобных структур.*

**Ключевые слова:** *аппаратура цифровой звукозаписи, цифровая фонограмма, шумы фонограммы, шумы аппаратуры записи, спектр сигналов, фрактальная структура.*

Известно, что одним из самых сложных для выявления способов подделки цифровых фонограмм является способ цифровой обработки, называемый вырезанием и перестановкой фрагментов из одного места фонограммы в другое [1]. Эта операция проводится в звуковых редакторах в паузах речевого сигнала. Ранее теоретически было показано, что проведение этой операции приводит к изменению спектрального состава вырезаемого участка [2, 3]. Однако проверить теоретические положения долго не удавалось, поскольку для этого требовался специальный инструментарий. Недавно была предпринята попытка проведения экспериментальной проверки этого положения. Проверялся спектр сигналов в паузе на месте вырезания фрагмента и спектр сигналов в паузах в начале и конце вставляемого фрагмента [1]. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в случае такого монтажа спектральный состав сигналов пауз изменяется.

© О. В. Рыбальский, В. И. Соловьев, В. В. Журавель

**Целью статьи** является разработка модели процессов, происходящих при цифровом монтаже фонограмм, который выполняется в паузах между звуковыми сигналами, что позволит осмыслить возникающие при этом идентификационные признаки и определить направления построения системы, предназначенной для выявления такого монтажа (по сведениям авторов такой системы в настоящее время не существует).

## Основная часть

В [2; 3] принято предположение, что вырезание какого-либо блока из непрерывной последовательности сигналов (в каком бы виде эти сигналы не были представлены) эквивалентно умножению данного отрезка на функцию  $rect \frac{t}{\Delta}$ .

Под данной операцией подразумевается, что длительность выделяемого отрезка равна  $\Delta$ , а сама операция называется операцией стробирования. Рассмотрим эту операцию с учетом различия речевых сигналов и сигналов в паузе. Примем модель, при которой фонограмма представлена в виде двух чередующихся участков:  $s_1(t) = A_{m1} \cos \omega_{01}t$  — участок с сигналом речи, а сигнал паузы — в виде  $s_2(t) = A_{m2} \cos \omega_{02}t$ , при этом  $A_{m1} \gg A_{m2}$  и  $\omega_{02} > \omega_{01}$ . Очевидно, что спектр этого сигнала состоит из двух частот —  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$ . Из этого сигнала во временной области вырезается отрезок длительностью  $\Delta$ . Заранее оговорим, что вырезаемый фрагмент начинается и заканчивается в паузах между речевыми сигналами. При этом путем растягивания временного масштаба, точки начала и конца операций вырезания и вставки в паузах выбираются так, что устраняются разрывы сигнала (например, выбираются точки с нулевой фазой).

Тогда вырезанный участок сигнала следует записать как

$$s_{11}(t) = rect \frac{t}{\Delta} \cdot (A_{m1} \cos \omega_{01}t + A_{m2} \cos \omega_{02}t), \quad (1)$$

а спектр этого сигнала как

$$\begin{aligned} S_{11}(j\omega) &= F\{s_{11}(t)\} = \frac{1}{2\pi} F\left\{rect \frac{t}{\Delta}\right\} \otimes F\{A_{m1} \cos \omega_{01}t + A_{m2} \cos \omega_{02}t\} = \\ &= \frac{A_{m1}}{2} \Delta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \frac{v\Delta}{2}}{\frac{v\Delta}{2}} \cdot [\delta(\omega - v - \omega_{01}) + \delta(\omega - v + \omega_{01})] dv + \frac{A_{m2}}{2} \Delta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \frac{v\Delta}{2}}{\frac{v\Delta}{2}} \times \\ &\quad \times [\delta(\omega - v - \omega_{02}) + \delta(\omega - v + \omega_{02})] dv, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F\{\}$  — оператор прямого преобразования Фурье;  $v$  — дополнительная переменная запаздывания, определяемая операцией свертки.

Приравнивая выражения  $(\omega - v - \omega_0)$  и  $(\omega - v + \omega_0)$  для обоих значений частоты в формуле (2), стоящие под знаком  $\delta$ -функции, к нулю, и применяя теорему

запаздывания для  $\delta$ -функции, окончательно получаем:

$$S_{11}(j\omega) = \frac{A_{m1}\Delta}{2} \left[ \frac{\sin(\omega - \omega_{01}) \cdot \frac{\Delta}{2}}{(\omega - \omega_{01}) \frac{\Delta}{2}} + \frac{\sin(\omega + \omega_{01}) \cdot \frac{\Delta}{2}}{(\omega + \omega_{01}) \frac{\Delta}{2}} \right] + \\ + \frac{A_{m2}\Delta}{2} \left[ \frac{\sin(\omega - \omega_{02}) \cdot \frac{\Delta}{2}}{(\omega - \omega_{02}) \frac{\Delta}{2}} + \frac{\sin(\omega + \omega_{02}) \cdot \frac{\Delta}{2}}{(\omega + \omega_{02}) \frac{\Delta}{2}} \right]. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что в спектре исходных сигналов появляются дополнительные спектральные составляющие.

Рассмотрим вырезанный участок исходного сигнала, состоящего из чередующихся участков речи и пауз после того, как он прошел через систему аналого-цифро-аналогового преобразования (АЦАП). Это соответствует процессу цифровой записи-воспроизведения в аппаратуре цифровой звукозаписи (АЦЗЗ).

Сигналы на входе АЦАП АЦЗЗ, можно записать как

$$s_1(t) = A_{m1} \cos \omega_{01}t + A_{m2} \cos \omega_{02}t. \quad (4)$$

Тогда сигнал на выходе системы АЦАП запишется в виде

$$s_{12}(t) = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) \cdot [\cos \omega_{01}(n_1T_1) + \cos \omega_{02}(n_1T_1)], \quad (5)$$

где  $n_1$  — номер отсчета (выборки) сигнала на выходе дискретизатора АЦП АЦЗЗ;  $T_1$  — шаг дискретизации АЦАП в АЦЗЗ.

Спектр этого сигнала записывается как преобразование Фурье сигнала (5) и имеет вид

$$S_{12}(j\omega) = \frac{(A_{m1} + A_{m2})\omega_{D1}}{\omega} \sin \omega \frac{T_1}{2} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} [\delta(\omega - \omega_{01} - k_1\omega_{D1}) + \delta(\omega + \omega_{01} - k_1\omega_{D1}) + \\ + \delta(\omega - \omega_{02} - k_1\omega_{D1}) + \delta(\omega + \omega_{02} - k_1\omega_{D1})], \quad (6)$$

где  $\omega_{D1}$  — частота дискретизации в АЦАП АЦЗЗ;  $\omega_{D1} = \frac{2\pi}{T_1}$ .

Соответственно, отрезок сигнала, подвергнутый операции стробирования, на выходе системы АЦАП запишется как

$$s_{12d}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\Delta_B}\right) \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) \cdot [\cos \omega_{01}(n_1T_1) + \cos \omega_{02}(n_1T_1)], \quad (7)$$

где  $\Delta_B$  — длительность вырезанного участка сигнала ( $\Delta_B > T_1$ ).

Воздействуя оператором прямого преобразования Фурье на обе части уравнения (7), можно получить спектр этого сигнала на выходе системы АЦАП. При этом следует учесть, что преобразованию Фурье произведения сигналов во временной области представления сигналов соответствует свертка спектров этих сигналов в спектральной области, то есть:

$$S_{11d}(j\omega) = F\{s_{11d}(t)\} = F\left\{rect\left(\frac{t}{\Delta_B}\right) \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} rect\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) [\cos\omega_{01}(n_1T_1) + \cos\omega_{02}(n_1T_1)]\right\} = F\left\{rect\left(\frac{t}{\Delta_B}\right)\right\} \otimes F\left\{\sum_{n_1=-\infty}^{\infty} rect\left(\frac{t-n_1T_1}{T_1}\right) \cdot [\cos\omega_{01}(n_1T_1) + \cos\omega_{02}(n_1T_1)]\right\}. \quad (8)$$

Раскроем соотношение (8), введя новую переменную для операции свертки:

$$S_{12d}(j\omega) = \frac{\Delta_B \sin \frac{\omega\Delta_B}{2}}{\pi\omega\Delta_B} \otimes \frac{2\pi(A_{m1}+A_{m2}) \sin \frac{\omega T_1}{2}}{\omega T_1} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ [\delta(\omega - \omega_{01} - k_1\omega_{D1}) - \delta(\omega + \omega_{01} - k_1\omega_{D1})] + [\delta(\omega - \omega_{02} - k_1\omega_{D1}) - \delta(\omega + \omega_{02} - k_1\omega_{D1})] \right\} = \frac{2A_m\Delta_B}{T_1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \frac{v\Delta_B}{2}}{v\Delta_B} \cdot \frac{1}{\omega - v} \sin \frac{(\omega - v)T_1}{2} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ [\delta(\omega - \omega_{01} - k_1\omega_{D1} - v) - \delta(\omega + \omega_{01} - k_1\omega_{D1} - v)] + [\delta(\omega - \omega_{02} - k_1\omega_{D1} - v) - \delta(\omega + \omega_{02} - k_1\omega_{D1} - v)] \right\} dv, \quad (9)$$

где  $v$  — новая переменная, введенная для операции свертки.

Применив элементарные тригонометрические преобразования, соотношение (9) можно записать как:

$$S_{12d}(j\omega) = \frac{A_{m1}+A_{m2}}{T_1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos\left\{\frac{v\Delta_B - \omega T_1 + vT_1}{2}\right\}}{v(\omega - v)} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ [\delta(\omega - \omega_{01} - k_1\omega_{D1} - v) - \delta(\omega + \omega_{01} - k_1\omega_{D1} - v)] + [\delta(\omega - \omega_{02} - k_1\omega_{D1} - v) - \delta(\omega + \omega_{02} - k_1\omega_{D1} - v)] \right\} dv - \frac{A_{m1}+A_{m2}}{T_1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos\left\{\frac{v\Delta_B + \omega T_1 + vT_1}{2}\right\}}{v(\omega - v)} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ [\delta(\omega - \omega_{01} - k_1\omega_{D1} - v) - \delta(\omega + \omega_{01} - k_1\omega_{D1} - v)] + [\delta(\omega - \omega_{02} - k_1\omega_{D1} - v) - \delta(\omega + \omega_{02} - k_1\omega_{D1} - v)] \right\} dv. \quad (10)$$

Воспользуемся теоремой запаздывания для  $\delta$ -функции, но предварительно определим «нулевые» значения аргументов, стоящие под ее знаком. Они определяются как  $v = \omega - \omega_0 - k_1\omega_{D1}$  и  $v = \omega + \omega_0 - k_1\omega_{D1}$  для каждой из частот, соответствующих модели для звукового сигнала и паузы. При этом спектр вырезанного и перенесенного сигнала окончательно принимает вид:

$$\begin{aligned}
 S_{12d} = & \frac{A_{m1}}{T_1} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\cos[(\omega - \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B - (\omega_{01} + k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega - \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1})(\omega_{01} - k_1 \omega_{Д1})} + \frac{\cos[(\omega + \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B + (\omega_{01} - k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega + \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1})(-\omega_{01} + k_1 \omega_{Д1})} \right\} \\
 & - \frac{A_{m1}}{T_1} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\cos[(\omega - \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B + (\omega_{01} + k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega - \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1})(\omega_{01} - k_1 \omega_{Д1})} + \frac{\cos[(\omega + \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B - (\omega_{01} - k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega + \omega_{01} - k_1 \omega_{Д1})(-\omega_{01} - k_1 \omega_{Д1})} \right\} + \\
 & + \frac{A_{m2}}{T_1} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\cos[(\omega - \omega_0 - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B - (\omega_0 + k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega - \omega_0 - k_1 \omega_{Д1})(\omega_0 - k_1 \omega_{Д1})} + \frac{\cos[(\omega + \omega_0 - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B + (\omega_0 - k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega + \omega_0 - k_1 \omega_{Д1})(-\omega_0 + k_1 \omega_{Д1})} \right\} - \\
 & - \frac{A_{m2}}{T_1} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\cos[(\omega - \omega_{02} - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B + (\omega_{02} + k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega - \omega_{02} - k_1 \omega_{Д1})(\omega_{02} - k_1 \omega_{Д1})} + \frac{\cos[(\omega + \omega_{02} - k_1 \omega_{Д1}) \Delta_B - (\omega_{02} - k_1 \omega_{Д1}) T_1]}{(\omega + \omega_{02} - k_1 \omega_{Д1})(-\omega_{02} - k_1 \omega_{Д1})} \right\}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Сравнение формул (6) и (11) показывает, что спектр вырезанного сигнала существенно отличается от спектра сигнала, не подвергнувшегося обработке. При этом обогащается как спектр речевого сигнала, так и спектр сигналов паузы. Разумеется, что эти искажения спектра сохраняются и при перезаписи обработанного сигнала.

Более того, из соотношения (11) вытекает, что происходит «дробление» спектра сигнала, что соответствует увеличению числа высокочастотных спектральных составляющих и уменьшению их амплитуд. С точки зрения фрактального представления сигналов, такие изменения спектральных составляющих соответствуют изменению фрактальной структуры сигнала в области малого масштаба самоподобных структур.

Для подтверждения полученных теоретических результатов был проделан ряд экспериментов. Они проводились с использованием программного обеспечения «Фрактал», предназначенного для криминалистических идентификационных исследований АЦЗЗ и диагностических исследований цифровых фонограмм (ЦФ) [4]. Программа выполняет сравнение самоподобных структур, содержащихся в шумах ЦФ, которые привносятся в них паразитными параметрами АЦЗЗ. При проведении экспертизы сравниваются шумы, записанные на образцовых и спорных ЦФ. При этом, если паразитные параметры аппаратуры записи, представленные самоподобными структурами, зафиксированными в шумах ЦФ, близки, то принимается решение об идентичности АЦЗЗ, на которой были записаны эти фонограммы. Как следствие, принимается решение об оригинальности спорной фонограммы с вероятностью ошибки I рода, не превышающей заданного значения. Программа и методика ее применения подробно описаны в ряде работ и не являются предметом рассмотрения этой статьи [5, 6]. Однако отметим, что величины фрактальных масштабов, по которым производятся расчеты в программе, имеют две области существования: область близких и область различающихся характеристик АЦЗЗ. Решение о выборе области принимается на основе сравнения границ раздела областей, полученных при сравнении между собой образцовых фонограмм, где заранее известно, что исследуемые фонограммы являются оригиналами. При сравнении образцовой и спорной ЦФ определяется мера близости границ

раздела к границам, полученным при сравнении нескольких образцовых ЦФ, на основании чего и принимается решение об идентичности АЦЗЗ и оригинальности спорной ЦФ [6]. При сравнении любого файла ЦФ с самим собой граница раздела областей отсутствует, а вероятность ошибки I рода равна нулю. Эти сведения нужны для понимания сути и особенностей проведенных экспериментов.

Для проведения экспериментов на различной АЦЗЗ с различными частотами дискретизации был записан ряд ЦФ. Эти фонограммы в цифровой форме были введены в компьютер, а введенные файлы были сохранены под определенными именами. Затем каждый из этих файлов выводился на экран в редакторе звуковых файлов, и в них проводились монтажные операции. При этом отмечалось точное место расположения (по длительности фонограмм) места вырезания и длительность фрагмента, место начала и окончания вставки. При этом в звуковом редакторе убирались фазовые нестыковки в местах вырезания и вставки фрагментов. Таким образом, имитировался цифровой монтаж, выполненный в ЦФ способом вырезания и перестановки фрагментов. Полученный фальсификат сохранялся под новым именем. Были записаны на различной АЦЗЗ и затем обработаны файлы при частотах дискретизации 8 кГц, 11,025 кГц, 16 кГц и 44,1 кГц.

Затем каждый файл, подвергнутый цифровой обработке, сравнивался с оригинальным файлом. Поскольку при сравнении одинаковых файлов, границы раздела областей не существует, то появление такой границы при их сравнении свидетельствует о различии их фрактальных структур. Это, в свою очередь, доказывает достоверность полученных здесь теоретических выкладок.

Проиллюстрируем проведенные эксперименты. На рис. 1 показаны результаты расчета фрактальных масштабов для обработанного и необработанного файлов, записанных при частоте дискретизации 44,1 кГц.

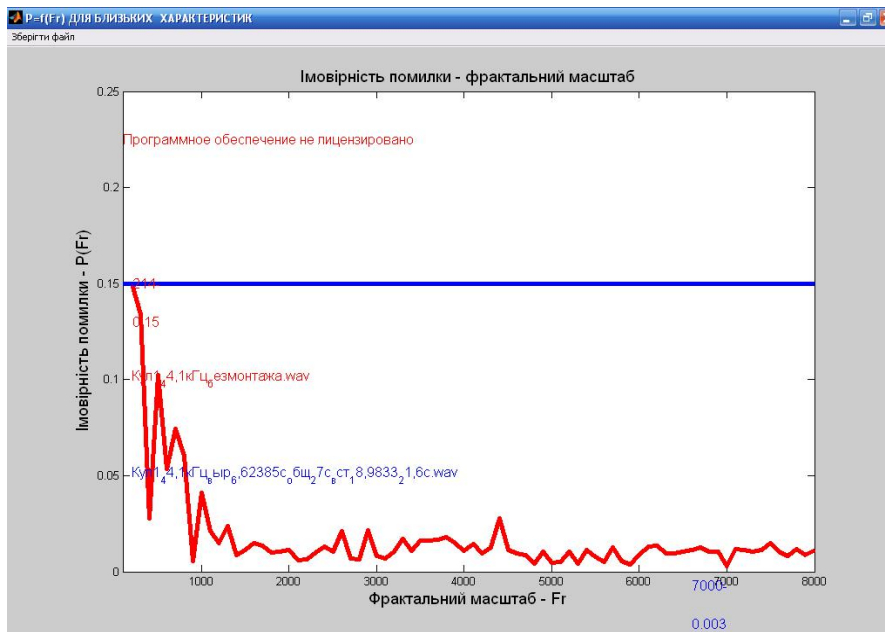


Рис. 1. Фрактальные масштабы для области близких характеристик обработанного и необработанного файлов на 44,1 кГц

Как видно на рис. 1, в результатах расчета имеется граница раздела областей. Поскольку нам заведомо известно, что один из файлов был обработан, следует принять решение о несовпадении их характеристик. Но для подтверждения этого умозаключения, проведем сравнение одного и того же файла, не подвергнутого обработке. Результаты такого сравнения показаны на рис. 2.

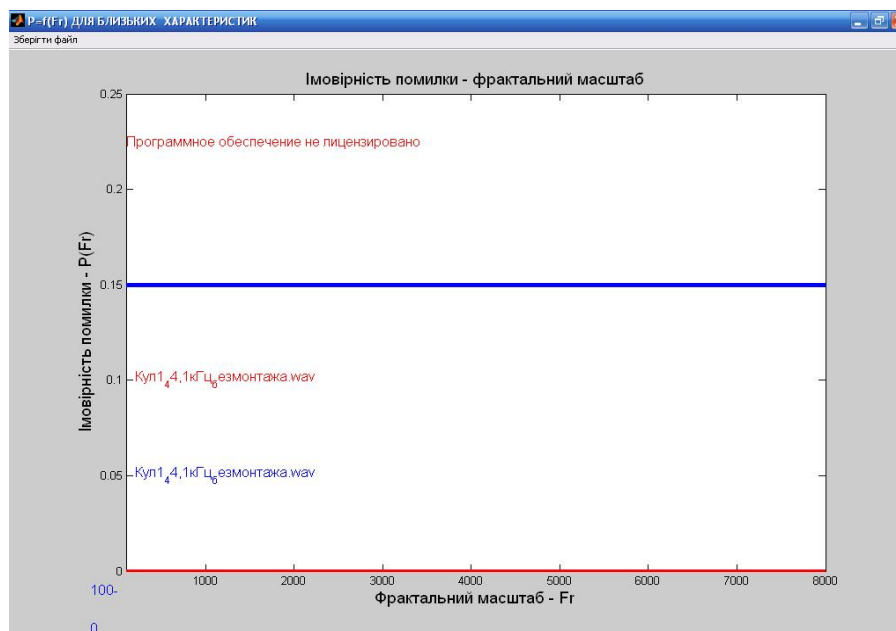


Рис. 2. Фрактальные масштабы для файла с частотой дискретизации 44,1 кГц, не подвергнутого цифровой обработке

Как видно на рис. 2, в результатах расчета фрактальных масштабов граница раздела отсутствует, а линией внизу рисунка показано, что при любом фрактальном масштабе вероятность ошибки I рода равна нулю.

Рис. 3 демонстрирует результат сравнения обработанного файла и файла, не подвергнутого обработке. Для того чтобы подчеркнуть высокочастотный характер различия между файлами, мы использовали графическую иллюстрацию результатов без сглаживания кривых распределений [4].

На рис. 4 показан (при таком же режиме иллюстрирования) результат сравнения характеристик одного и того же файла, не подвергнутого обработке, а на рис. 5 — те же результаты при сглаженных кривых. Эти два режима иллюстрации полученных результатов предусмотрены в программе «Фрактал». Режим без сглаживания предусмотрен для эксперта, что обеспечивает ему, при необходимости, полную форму кривых распределений. Но для людей, не понимающих математической и технической сути такой экспертизы, предоставлять результаты в таком виде не следует, поскольку они вызывают у адвокатов нездоровые эмоции.

Результаты проведенного эксперимента подтвердили достоверность полученных теоретических положений и заодно показали высокую разрешающую способность программного обеспечения «Фрактал».

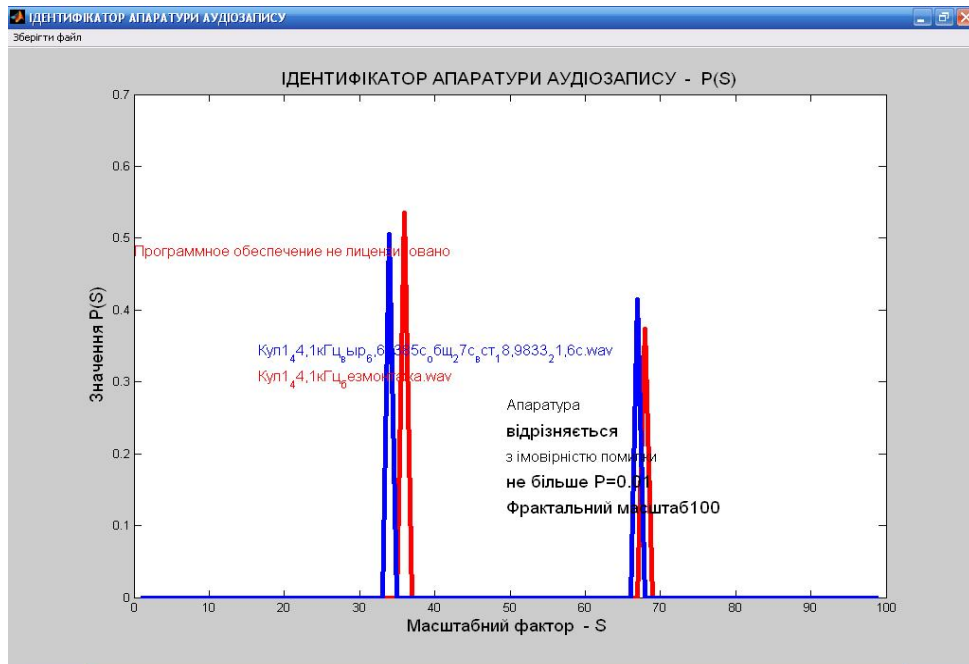


Рис. 3. Сравнение обработанного файла и файла без обработки при фрактальном масштабе 100 (кривые распределений без сглаживания)

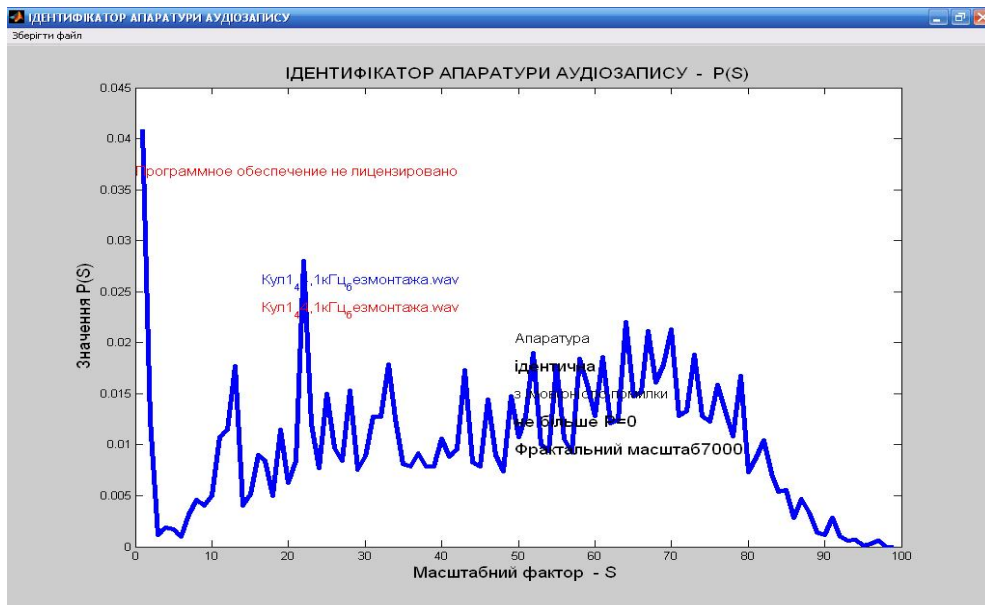


Рис. 4. Сравнение самого с собой файла без обработки, иллюстрация без сглаживания



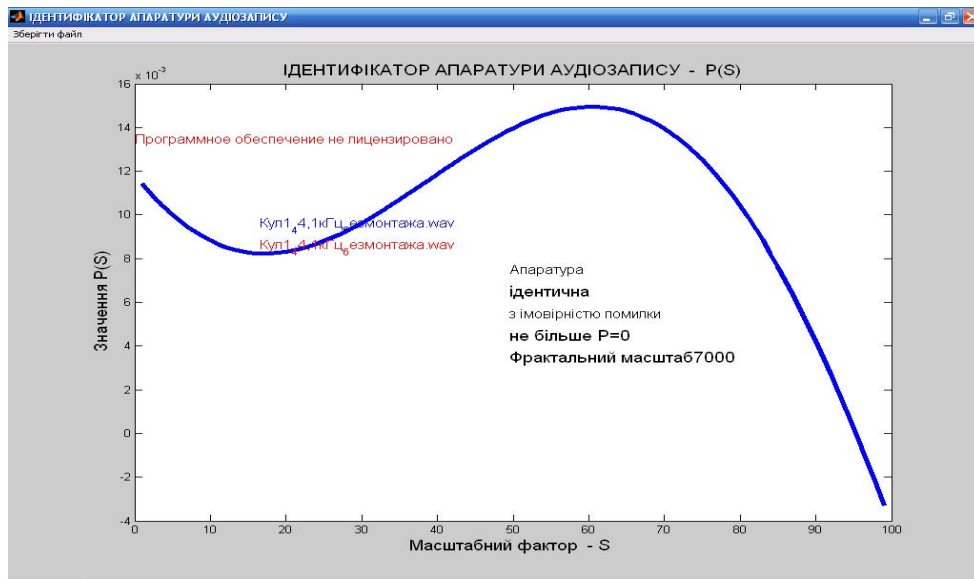


Рис. 5. Сравнение самого с собой файла без обработки, иллюстрация со сглаживанием

Чтобы окончательно убедиться в достоверности полученных результатов был проведен классический спектральный анализ на основе кратковременного (оконного) преобразования Фурье. Результаты проведенного спектрального анализа для файлов с частотой дискретизации приведены на рис. 6.

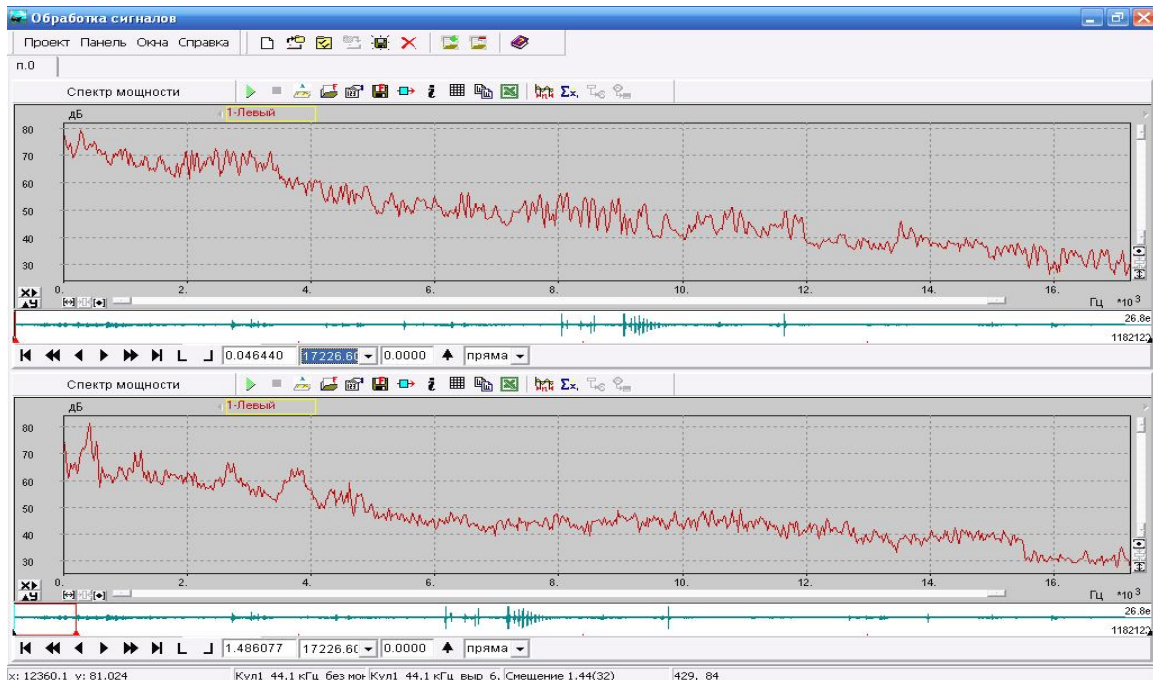


Рис. 6. Спектр сигналов по всей длине фонограмм с частотой дискретизации 44,1 кГц. Вверху — спектр сигналов файла без обработки, внизу — спектр сигналов обработанного файла

В спектре сигналов нижнего (обработанного) файла четко наблюдается эффект «дробления» спектра, уменьшение амплитуд и появление новых спектральных составляющих малой интенсивности в области высоких частот.

Аналогичные результаты были получены и для остальных файлов, записанных на других типах АЦЗЗ с частотами дискретизации 8 кГц, 11,025 кГц и 16 кГц.

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили достоверность предложенных теоретических положений.

## **Выводы**

1. Теоретически и экспериментально доказано, что цифровой монтаж, выполненный способом вырезания и перестановки фрагментов, оставляет следы в ЦФ, подвергнутых такой обработке. Эти следы являются следствием применения операции стробирования, неизбежной при выполнении такого монтажа. Такие следы возникают как в речевых сигналах, так и в сигналах пауз.

2. При этом такие следы проявляются в изменении спектрального состава и фрактальной структуры сигналов, записанных в ЦФ.

3. Эти изменения локализуются в высокочастотной части спектра сигналов и в области малого масштаба самоподобных структур, что, вероятно, позволит их использовать при построении системы выявления монтажа ЦФ, выполненного способом вырезания и вставки фрагментов.

1. *Рыбальский О.В.* Экспериментальная проверка проявления следов монтажа в цифровых фонограммах / О.В. Рыбальский, В.И. Соловьев // Информатика та математичні методи в моделюванні. — 2015. — Т. 5, № 1. — С. 38–43.

2. *Рыбальский О.В.* Модели нестандартной подделки цифровых фонограмм / О.В. Рыбальский // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2003. — Т. 5, № 4. — С. 25–32.

3. *Богданов О.М.* Методологія розробки основ теорії виявлення слідів цифрової обробки фонограм та її деякі аспекти / О.М. Богданов, В.О. Геранін, О.В. Рыбальський // Правове, нормативне, метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні. — 2004. — Вип. 8. — С. 27–28.

4. *Методика* ідентифікаційних і діагностичних досліджень матеріалів та апаратури цифрового й аналогового звукозапису із застосуванням програмного забезпечення «Фрактал» при проведенні експертиз матеріалів та засобів відео та звукозапису: наук.-метод. посіб. / [Рыбальський О.В. Соловйов В.І., Журавель В.В., Татарнікова Т.О.]. — К.: ДУІКТ, 2013. — 75 с.

5. *Рыбальский О.В.* Структурированность сигналограмм и универсальность фрактального подхода при создании инструментария фоновскопической экспертизы / О.В. Рыбальский, В.В. Журавель, В.И. Соловьев // Информатика та математичні методи в моделюванні. — 2013. — Т. 3, № 3. — С. 225–232.

6. *Автоматизированный* расчет коэффициентов фрактального масштаба в программе «Фрактал» / О.В. Рыбальский, В.И. Соловьев, В.В. Журавель [и др.] // Сучасна спеціальна техніка. — 2014. — № 4 (39). — С. 5–11.

Поступила в редакцию 10.02.2016