

# НЕСТАНДАРТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАНЕСЕНИЯ ВОДЯНОГО ЗНАКА ЗВУКОВОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРИЗАЦИИ

Балакирев Н.Е., Фадеев М.М.

Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

balakirev1949@yandex.ru, Fadeev\_mix@bk.ru

*Аннотация.* В данной работе на основе исследований по извлечению информационного содержания волн была использована возможность структуризации значений амплитуд звукового потока в последовательность качественных структур и последующего восстановления значений амплитуд из этих структур с нанесением водяного знака.

*Ключевые слова:* потенциальная точка, аудиофайл, коды маркеров, схема нанесения и извлечения водяного знака из аудиофайла.

## Введение

Нанесение водяных знаков является широко используемым способом маркировки тех или иных производимых продуктов с целью определения контрафактной, подделанной копии этих продуктов. От обычной маркировки нанесённые водяные знаки отличаются тем, что маркировка производится таким образом, чтобы сложно или невозможно было определить их местоположение и даже выделить, не используя специальные инструменты или средства, которые должны находиться в распоряжении только у уполномоченных для этого организаций.

Совершенно очевидно, что в современных условиях актуальным является нанесение уже цифровых «водяных» знаков (сокр. ЦВЗ) на информационную продукцию, включая аудио- и видеoinформацию, которая хранится и распространяется в цифровой форме. Само содержание ЦВЗ — это некоторая цифровая последовательность, представляющая из себя некоторую, как правило общепринятую кодировку текстовых или графических символов.

В контексте аудиофайлов существует множество различных алгоритмов нанесения «водяных» знаков, например метод встраивание «водяных» знаков в служебную информацию аудиофайла, метод замены наименее значащих битов, метод расширения спектра, метод фазового сдвига, метод изменения времени задержки эхосигнала и т. д. [1]

Несмотря на то, что в основе данных алгоритмов лежат разные разумные идеи и способы нанесения, но большинство из них обладают общим свойством детерминированности ввиду наличия огромного количества программных инструментов анализа данных. Обладая предварительной информацией о применяемом алгоритме и, соответственно, методах нанесения «водяного» знака, злоумышленник может попытаться модифицировать или удалить его. Кроме этого, весьма сложно незаметно внести изменения в поток значений, не нарушая информационную связанность всего потока.

В данной статье, по вполне понятным причинам опуская сущность алгоритма выделения потенциальных точек для возможного изменения значения амплитуды, рассматривается формальная постановка задачи нанесения такого «водяного» знака на аудиофайлы, технология его нанесения и извлечения, а также исследования, доказывающие устойчивость водяного знака, невозможность предварительного определения местоположения потенциальных точек и переносимость водяного знака при преобразованиях в другие форматы звуковых файлов с записями без потерь.

## 1. Структурирование звукового потока

Предполагается, что (звуковой) поток оцифровывается через равные промежутки времени  $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ , где для любого  $i$  выполняется  $|t - t_{i-1}| = \Delta i - const$ , с получением значений амплитуд  $s_1(t_1), s_2(t_2), \dots, s_n(t_n)$  в этих точках. Далее, с учётом равномерности интервалов между амплитудами, отбросив временной указатель, который можно отождествить с номером амплитуды, умноженной на  $\Delta i$ , обозначим его, как поток набора значений амплитуд (1).

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (1)$$

Среди этого потока  $S$ , применяя структурирование, выделяются отдельные значения  $u_j$  удовлетворяющие условиям, описанными в работе [1], которые называются характерными точками.

$$S^+ = \{u_1, s_2, \dots, s_{k-1}, u_k, s_{k+1}, \dots, s_{m-1}, u_m\} \quad (2)$$

Введём обозначение для множества характерных точек, получаемых в результате структурирования.

$$U = \{u_1, \dots, u_k, \dots, u_m\} \quad (3)$$

Между двумя соседними характерными точками  $u_k$  и  $u_m$  (где между  $u_k$  и  $u_m$  нет других характерных точек), обязательно присутствует хотя бы одно значение амплитуды, не являющееся характерной точкой. При структуризации сохраняются только характерные точки и интервал между ними в количестве отсчётов. Количество отсчётов между любыми двумя соседними характерными точками является произвольным и зависит от условий записи аудиофайла. При восстановлении звукового потока из структур (по характерным точкам и отсчётам) получаем вектор амплитуд, в котором  $r_k$  будут приблизительно равны  $S_k$

$$R = \{u_1, r_2, \dots, r_{k-1}, u_k, r_{k+1}, \dots, r_{m-1}, u_m\} \quad (4)$$

где  $r_k$  — это восстановленное значение амплитуды звукового потока,  $k$  — это порядковый номер значения амплитуды,  $R$  — это восстановленный звуковой поток, представленный в виде набора амплитуд звукового потока.

## 2. Нанесение фрагментов «водяного» знака на поток амплитуд

При восстановлении промежуточных значений  $r_k$  звукового потока из структур значения амплитуд [2] можно получать разными способами, и, в том числе, накладывая некоторую дельту на определённые точки, в качестве «водяного» кода. При этом при наложении необходимо соблюдать условия сохранения структуры потока амплитуд. Те точки, в которых наложение водяного знака не нарушает структурность потока между характерными точками, будем называть потенциальными точками  $r_p^j$  для нанесения водяного кода. Нижний индекс означает номер со значением амплитуды в общем потоке, а верхний порядковый номер потенциальной точки. Не для каждого интервала между характерными точками может быть выявлена потенциальная точка, которая зависит от значений окружающих её амплитуд. Также не фиксировано её место положение относительно любого интервала.

$$R = \{u_k, r_{k+1}, \dots, r_{p-1}, r_p^j, r_{p+1}, \dots, r_{m-1}, u_m\} \quad (5)$$

На каждую потенциальную точку предлагается накладывать часть водяного кода (кодовый маркер), в качестве которого могут использоваться символьная кодировка, графическая кодировка и другие известные кодировки, включая и звуковую кодировку. То есть, могут накладываться те кодировки, которые являются общепринятыми кодировками. Не исключается вариант уникальной кодировки.

После обнаружения потенциальной точки к ней добавляется дельта  $z_k^i$ , которая значение потенциальной точки  $r_p^j$  видоизменяет в значение  $v_p^j$ .

Отдельно взятый символ  $z_k$  представляется как конкатенация добавляемых к потенциальной точке значений  $z_k^i$

$$z_k = z_k^1 \# z_k^2 \# \dots \# z_k^8 \quad (6)$$

$$v_p^j = r_p^j + z_k^1, v_g^{j+1} = r_g^{j+1} + z_k^2; \dots v_q^{j+8} = r_q^{j+8} + z_k^8 \quad (7)$$

Таким образом, используя формулы 6 и 7, можно маркировать звуковой поток любой последовательностью кодов, которая будет представлять в целом водяной знак — как структуру, которую определяет пользователь, назначающий её содержание. А вся операция заключается только в выборе такой структуры, состоящей из последовательности кодов знаков, которые разбиваются на кодовые фрагменты  $z_k^i$  согласно формуле (6), накладываемые на поток амплитуд и не выходят за рамки общего количества потенциальных точек.

Значение кодового маркера может в принципе любым, но для обеспечения скрытности и достаточности потенциальных точек (чем больше значение, тем меньше потенциальных точек), эти значения должны быть минимальными.

## 3. Невозможность определения функции распределения вероятности для водяных знаков

Интервалы и их содержание между характерными точками зависят от момента записи звукового потока и не совпадают даже при произнесении одного и того же слова.

Например, на рисунке 1 представлены фрагмент осциллограммы наложенных друг на друга трех звуковых потоков, со звуковым информационным содержанием слова «мама». Как можно видеть, данные потоки, выделенные разными цветами, не совпадают количественно, но обладают общей «формой» и имеют одинаковые контуры.

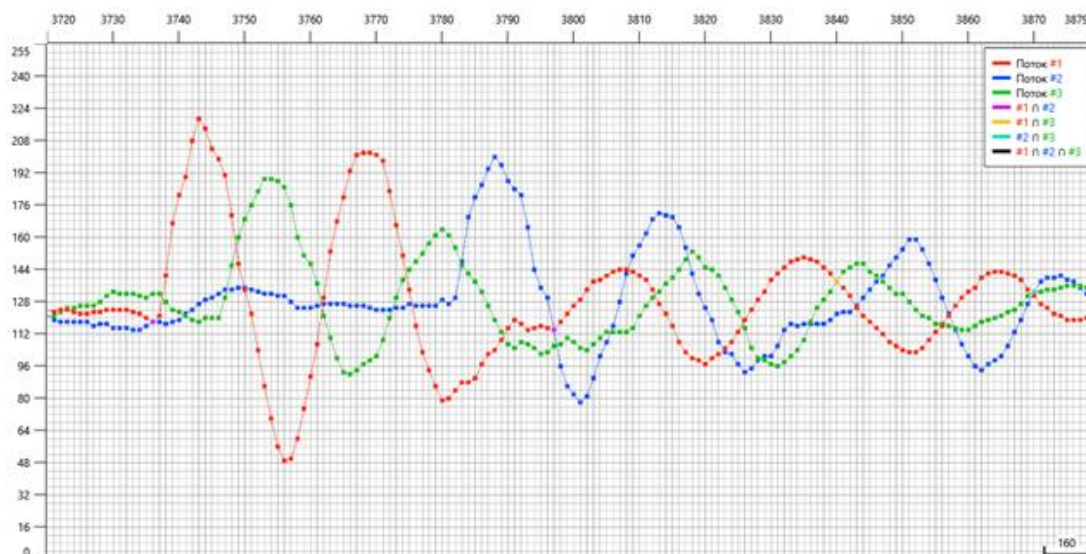


Рис. 1. Фрагмент осциллограммы для трех наложенных друг на друга звуковых потоков

Потенциальные точки, которые появляются на интервале между характерными точками, также отличны и не совпадают между собой, что представлено на рис.2 в виде вертикальных прямых разных цветов.

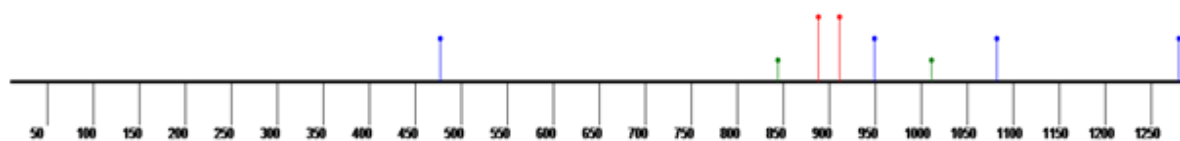


Рис. 2. Распределение мест появления потенциальных точек

Таким образом, можно утверждать о наличии множества факторов, которые затрудняют определения характерных точек, к числу которых относятся:

- $R_p, R_g, \dots, R_q$  случайная последовательность со случайной длиной интервалов
- $r_p^j$  – случайное местоположение потенциальной точки
- $z_k^1$  – случайный характер назначаемых водяных знаков

Таким образом, местоположение потенциальных точек являет собой сумму случайных вышеуказанных факторов, которые делает практически невозможным их определение. Кроме этого, структуризация позволяет отказаться от необходимости хранить исходный поток для сравнения, что также затрудняет вскрытие водяных знаков.

Косвенным подтверждением выше сказанного является таблица 1, в которой показаны результаты подсчёта количества бит информации, которые можно нанести в качестве водяного знака на аудиофайлы разной длины, обладающих одинаковым звуковым информационным содержанием (была произнесена одна и та же фраза одним и тем же человеком).

Таблица 1. Количества бит информации, которые можно нанести в качестве водяного знака

Номер файла	Длительность аудиофайла	Кол-во отсчётов	Кол-во
1	1.49 секунд	32603	90
2	1.62 секунд	35690	83
3	1.53 секунд	33706	119
4	1.65 секунд	36352	128
5	1.69 секунд	37234	100
6	1.52 секунд	33485	95
7	1.62 секунд	35690	84
8	1.40 секунд	30839	111
9	1.80 секунд	39659	99
10	1.53 секунд	33706	101

Как можно видеть из таблицы даже количество потенциальных точек в каждом варианте записи различно, и это ещё один показатель, который может быть идентификатором звуковой записи.

Таким образом, можно сделать вывод, что при каждом нанесении водяного знака может быть предоставлена последовательность потенциальных точек, которая уникальна по отношению к любой другой последовательности потенциальных точек. Это означает, что невозможно даже статистически определить вероятность появления потенциальной точки, а это значит, что водяной знак не выделяем без специальных программных средств.

#### 4. Нанесение и извлечение «водяного» знака через структуризацию звукового потока амплитуд

Нанесение и извлечение водяного знака производится двумя основными процедурами: программой структуризации потока амплитуд и программой нанесения водяного знака. Что касается содержания водяного знака, то это зависит от автономной программы, которая определяет содержание и структуру водяного знака. Данная программа в зависимости от определяемых целей может размещать информацию:

- в закодированном виде
- в виде дублируемых структур
- с кодами, восстанавливающими ошибочные коды
- с фиксированным товарным знаком и т. д.

Прежде чем нанести водяной знак, производится запрос на количество потенциальных точек. И после определения достаточности потенциальных точек для нанесения конкретного водяного знака, производится последовательность действий в соответствии со схемой, показанной на рисунке 3.

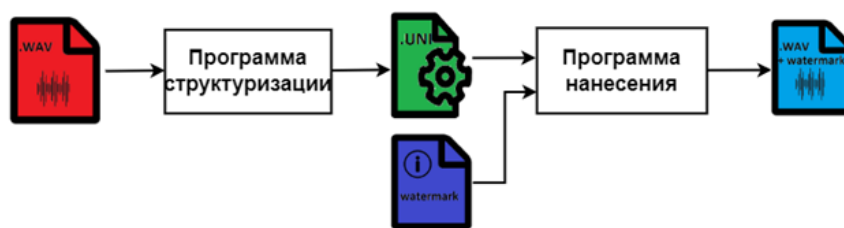


Рис. 3. Схема действий для нанесения водяного знака

Следует подчеркнуть, что содержание записываемого водяного знака никак не влияет на воспроизводимый звук, так как изменение значения амплитуды минимально. А вот объем (мощность множества маркеров) записываемой информации зависит от количества потенциальных точек.

В зависимости от целей использования водяного знака, который на схеме рисунке 3 обозначен синим цветом, создаётся соответствующая система наполнения водяного знака, включающая в себя и его извлечение.

В качестве экспериментальной системы была создана система записи речи человека, при которой накладывался водяной знак в виде пароля для воспроизведения. При потребности воспроизвести посланную речь или сообщение необходимо указать значение водяного знака, после чего воспроизводится содержимое речевого сообщения.

Извлечение водяного знака является обратной процедурой и использует входной поток для программы восстановления звукового потока и для последующего сравнения с восстановленным потоком, как это показано на рисунке 4.

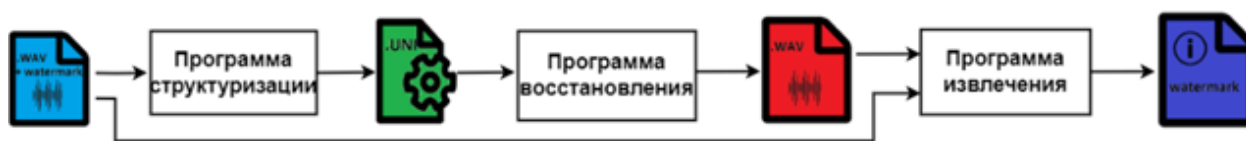


Рис. 4. Схема действий для нанесения водяного знака

Безусловно такая схема должна быть привязана к схеме нанесения водяного знака, учитывающая особенности способа маркировки, характер которой указывается в виде параметра в программе восстановления и программы извлечения водяного знака. Количество записываемой информации в качестве водяного знака может и должно отражаться в его содержимом.

Таким образом, отсутствие жёсткой связанности с процедурами нанесения и извлечения водяного знака и программой, формирующей водяной знак, обеспечивает высокую степень гибкости использования созданного инструмента.

Более того, использование специального инструмента создания указанных программ на языке максимально приближенном к Ассемблеру затрудняет вскрытие содержания алгоритмов. Кроме того, это обеспечивает максимальную скорость обработки больших потоков информации. Использование макросредств и созданного специализированного языка на их основе позволяет обеспечить переход и другие аппаратные архитектуры.

Описываемые схемы нанесения и извлечения водяного знака были апробированы на системе персонального драйвера записи звука, в которой водяной знак используется как средство доступа к воспроизведению записанной информации.

## 5. Критерии оценки и проверки качества нанесения водяного знака

При нанесении водяных знаков необходимо было придерживаться определённых критериев, которые были сформулированы по ходу обзора существующих подходов, но также включить собственные критерии, которые могут быть существенными при работе с водяными знаками.

К таким критериям были отнесены:

- По отсутствию слышимой разницы информационного содержания исходного потока
- По используемой части в структуре файла записи
- По распределённости относительно выбранной части
- По функциям и алгоритмам выделяемости содержания
- По необходимости хранения исходного потока
- По устойчивости в сохранении содержания водяного знака при переносе в другие форматы

Первый критерий, безусловно является, пожалуй, основным и легко проверяется обычным прослушиванием. Данная проверка проводилась нами неоднократно, но, к сожалению, не была оформлена в виде протокола опроса множества респондентов. Маркер, изменяющий значение амплитуды в пределах 1–2 единиц, который использовали при экспериментах, не оставляет сомнений в сто процентной положительности такого опроса. Для других размерностей маркеров, по-видимому, такая проверка потребуется.

Второй критерий очень важен в случае попытки избавления от водяного знака. При фиксированном местоположении водяной знак можно немного видоизменить, и тогда исчезнет доказательная база, что в данном потоке ваш заявленный водяной знак. В некоторых случаях можно воспользоваться служебной частью структуры файла, но тогда сразу невозможно транслировать водяные в другие форматы звуковых файлов. В нашем случае, как было указано выше, до момента записи и нанесения водяного знака неизвестно местоположение потенциальных точек нанесения и если его продублировать или защитить избыточным кодом, восстанавливающим сбойные разряды, то шансов затереть его очень мало.

Третий критерий, который характеризует сложность повторения всей последовательности действий по нанесению водяного знака и по его извлечению в условиях случайного характера выявляемых потенциальных точек, также является условием нескрываемости водяного знака. Самый верный путь — это попытаться разобраться в алгоритмах, предварительно раздобыв хотя бы код существующих модулей, что вполне возможно. В ответ на это нами разработана система

индивидуализации программного кода главных компонент системы нанесения водяного знака, которая позволяет привязать её к конкретному пользователю и отразить номер релиза в каждом звуковом потоке в виде компоненты водяного знака. По предлагаемой схеме легко вычислить злоумышленника. Более надёжным решением могло быть аппаратное решение предлагаемых алгоритмов в каждый выпускаемый компьютер.

К настоящему моменту для того, чтобы разобраться в экспериментальном комплексе записи звука и его воспроизведения чрез указание водяного знака необходимо проанализировать процедуры структуризации (56 Кб), маркирования (7 Кб), восстановления (7 Кб), нанесения в сборке (1.59 Мб), выделения в сборке (1.59 Мб) и обеспечения доступа в сборке (1.59 Мб).

Более того, процедуры написаны на языке Ассемблера, в которых нет опорных меток и известных процедур, которые могли бы облегчить их разбор.

Пятый критерий, легко просматривается из схем нанесения водяного знака и его извлечения. Если наносится переменный водяной знак множеству клиентов, то в реестре необходимо хранить лишь сам водяной знак и персональные данные владельца такого водяного знака. Здесь как продолжение может быть сформирована целая система выдачи водяных знаков, так и их мониторинг, что весьма актуально в современных условиях.

Что касается шестого критерия, то были проведены опыты по конвертации записанного звукового потока с водяным знаком в форматы «.flac» и «.ogg» и обратно. Такая конвертация не исказила водяной знак и видимо, те форматы, которые записывают звук без потерь, будут давать тот же результат. Проводились опыты с форматом МР3. Но для данного формата даже без водяного знака файл, конвертируемый в МР3, и файл, восстановленный из этого формата, существенно отличались друг от друга. Имеются определённые идеи решить и эту проблему.

## 6. Заключение

В данной работе была предложена формальная схема нанесения водяного знака с использованием структуризации звукового потока. Данная схема и алгоритмы структуризации обеспечивают:

- Случайный характер выявляемых потенциальных точек для нанесения водяного знака вследствие случайного характера распределения значения амплитуд при каждой записи звукового потока, что обеспечивает невозможность априорного установления местоположения водяных знаков
- Случайное распределение записи водяного знака по звуковому потоку и алгоритмически сложная процедура его нанесения и изъятия гарантирует максимальную степень защищённости от вскрытия водяного знака при отсутствии специальных средств выделения
- Внешнее распределение мест нанесения водяного знака с учётом количества потенциальных точек даёт возможность многократного нанесения одного и того же знака на разных участках потока амплитуд
- Относительно большое количество потенциальных точек на единицу записи не препятствует возможности использования помехоустойчивого кодирования для предотвращения искажения водяного знака наряду с возможным дублированием
- Возможность использования структуризации звукового потока при нанесении и вскрытии водяного знака исключает необходимость хранения звукового потока без водяных знаков для их выделения
- Использование только информационной части аудиофайла при нанесении знака при однозначном отображении даёт возможность перенесения в другие форматы записи звукового файла с водяными знаками
- Независимость содержания наносимых кодов водяных знаков от содержания звуковой информации обеспечивает возможность нанесения любого типа информации

## Литература

1. *Aree M., Diman M.* Modified Phase Coding Audio Watermarking Resistant to Signal Attacks // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 92. – P. 1-6.
2. *Балакирев Н.Е.* Логико-лингвистический подход при обработке колебательных сигналов (базовая концепция) // Н. Е. Балакирев // Информатика: проблемы, методология, технологии: матер. XIV Междунар. конф. Воронеж: 2014. Т. 1. С. 331–335.
3. *Балакирев Н.Е., Неген Х.З., Малков М.А., Фадеев М.М.* Структуризация и качественное рассмотрение звукового потока в системе синтеза и анализа речи // Программные продукты и системы. – 2018. – № 4. – С. 768–776.