

Научная статья

УДК 621.391.8

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188277>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LTSAPV>

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСХОДНОГО ПОТОКА ЗНАЧЕНИЙ АМПЛИТУД ПОСЛЕ ЕГО СТРУКТУРИЗАЦИИ ПРИ УСЛОВИИ РАЗЛИЧИМОСТИ ИСХОДНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

В.С. Родионов[✉], Н.Е. Балакирев, М.М. Фадеев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия

✉ tuukvadim@live.com

Цитирование: Родионов В.С., Балакирев Н.Е., Фадеев М.М. Методы восстановления исходного потока значений амплитуд после его структуризации при условии различимости исходного информационного содержания // Труды МАИ: электрон. журнал. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188277>

Аннотация. В аэрокосмических системах множество измерительных систем и систем контроля, ориентированных на сбор информации в реальном времени, предполагают фиксацию (и обработку) больших потоков данных, представляющих волновые процессы, в виде дискретных значений амплитуд, по которым можно вскрыть сущность проявления (реализации) тех или иных физических процессов в соответствующих метриках в виде функций (моделей) их поведения и, в тоже время, существует тенденция выделения некоторого набора характеристик, по которым можно судить об информационной сущности тех или иных фрагментов потока. Аналитически важна информационная сущность, которая строится из элементов, рассматриваемых через понятие «информационное содержание», реализуемое в рамках структуризации и, в то же время, это информационное содержание реализуется и проявляется через конкретный участок значений амплитуд в рамках общего потока. Структуризация предполагает определенную потерю некоторых значений амплитуд, разделяя весь поток на существенные и в определенных рамках несущественные значения амплитуд. При обработке потока данных существенные значения, на которых

основывается структуризация, фиксируются, а также добавляется значение отсчетов до следующего существенного значения. Промежуточные теряемые значения являются как раз несущественными переменными их возможно восстановить. В этом случае возникает вопрос каким способом можно восстановить эти значения, которые будут отличаться от исходных, и как это может повлиять на информационное содержание. При сохранении информационного содержания для потока в структурном виде в условиях ограниченной пропускной способности телеметрических каналов, а также жёстких требований к вычислительным ресурсам бортовых систем структурное представление позволяет использовать его при передаче потока данных при значительном сокращении объема трафика, что является весьма актуальным решением при передаче данных. Сравнение проводилось по критериям среднеквадратичного отклонения восстановленных амплитуд и сохранения воспринимаемого информационного содержания.

Целью работы является разработка методов восстановления несущественных значений амплитудных сигналов после структуризации и проверке сохранения информационного содержания на примере восстановления звукового сигнала.

В работе предложены критерии определения допустимых значений, которые ограничивают круг применяемых методов восстановления несущественных значений, и предложены несколько таких методов восстановления, сохраняющих информационное содержание.

Ключевые слова: звуковой поток; структуризация; синтез амплитуд; восстановление промежуточных значений; характерные точки; аппроксимация; табличные методы; топологическая структура; информационное содержание; восприятие речи.

METHODS FOR RECONSTRUCTING AMPLITUDE SEQUENCES AFTER STRUCTURALIZATION WHILE PRESERVING INFORMATION CONTENT

V.S. Rodionov✉, N.E. Balakirev, M.M. Fadeev

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ tuukvadim@live.com

Abstract. In the processing of measurement signals in aerospace systems, structuralization methods are widely used to represent wave processes through characteristic points and temporal intervals while significantly reducing data volume. Under constraints of limited telemetry channel bandwidth and restricted onboard computational resources, the problem of reconstructing amplitude samples without degrading information content becomes particularly relevant.

The objective of this study is to develop a method for reconstructing intermediate amplitude values after structuralization, focusing on preserving distinguishable information content rather than exact recovery of the original signal function.

A table-based scaling method for synthesizing intermediate values is proposed, relying on sinusoidal tables and a system of structural admissibility constraints defined by allowable amplitude regions.

The comparison was carried out according to the criteria of the standard deviation of the restored amplitudes and the preservation of the perceived information content. The proposed approach is evaluated through numerical experiments using acoustic signals that model measurement data and is compared with the classical Bradis sine table method.

The results demonstrate a reduction in average normalized amplitude deviations while maintaining preserved information content, indicating the applicability of the proposed method to signal processing, transmission, and reconstruction tasks in aerospace measurement and telemetry systems.

Keywords: audio stream; structuralization; amplitude synthesis; intermediate value reconstruction; characteristic points; approximation; table-based methods; topological structure; information content; speech perception.

Введение

В рамках анализа и синтеза волновых процессов на примере звуковых колебаний был введен термин «информационное содержание», которое отражает то, что в общем потоке данных есть полезная «слышимая» и распознаваемая

субъектом информация и имеются достаточно объемные фрагменты, которые не несут смысловой нагрузки [1]. Таким образом, поток данных рассматривается состоящим из существенных и несущественных данных. В силу предлагаемого автоматического разделения потока данных на эти две категории не обсуждается вариант несущественного фрагмента данных для конкретного субъекта информационного содержания, так как в потоке не всегда присутствует, то, что может быть опознано или «расшифровано» субъектом. Кроме этого, в потоке данных, которое потенциально может быть «расшифровано» субъектом, в каждый конкретный момент времени его интересуют только то, что определяет его интерес. В связи с выше сказанным будем исходить из того, поток данных содержит различимую и распознаваемую информацию и несущественные данные являются естественным фоном информационного содержания.

Стоит заметить, что наличие теряемых «несущественных» данных проявляется уже на этапе физической фиксации значения амплитуд только с точностью интервала оцифровки. Количественные значения данных, которые находятся между двумя значениями отсчётов, уже на первом этапе оцифровки фактически игнорируются. При этом прогнозирование данных значений невозможно, однако, это не сказывается при синтезировании оцифрованных данных и генерации выходного сигнала. Это, ни в коей мере, не искажает воспроизводимое информационное содержание. Но этот вопрос физического восстановления при физическом синтезировании не является целью данной работы.

Похожее игнорирование происходит при автоматическом формировании структур, формируемых по правилам системы отношений [2]. При структуризации звукового потока с учётом фиксации характерных точек и расстояния между ними в виде количества отсчётов происходит игнорирование зафиксированных при оцифровке конкретных значений амплитуд между этими точками [2]. Такие значения можно отнести к разряду несущественных данных при фиксации содержания звукового потока. Таким образом, в реальном представлении данных происходит уплотнение информации с потерями, но при операции синтезирования потока данных требуется наличие «утерянных» данных, которые

восстанавливаются в соответствии с правилом ненарушения исходной структуры звукового потока.

Восстановленные данные, полученные в результате данного правила, независимо от различных способов такого восстановления, как будет показано далее, не искажают информационного содержания, что было подтверждено на множестве экспериментов с потоком звуковых волн [3]. Таким образом, на эти двух этапах происходит потеря некоторой исходной информации, но с соблюдением определённых правил становится возможным восстановление и воспроизведение звукового потока без нарушения информационного содержания. Актуальным становится вопрос, связанный с эффективностью восстановления потока, какой способ восстановления является в большей степени приемлемым при таком восстановлении.

Таким образом, формулируются следующие задачи:

1. Проверить и подтвердить на практике возможность восстановления несущественных значений амплитуд при условии различимости исходного информационного содержания.
2. Определить наиболее оптимальный способ восстановления «потерянных» значений амплитуд на примере волновых процессов, связанных с анализом и синтезом речи, как наиболее доступных при проверке различных способов восстановления данных.
3. Оценить объем данных, относящийся как существенным, так и несущественным значениям при оформлении потока в структурном представлении.

Задачи синтеза речевых сигналов на основе синусоидальных моделей исследуются с середины 1980-х годов. В работах McAulay и Quatieri предложено представление речи как суммы синусоид с интерполяцией параметров между кадрами [4][5]. Однако задача синтеза промежуточных значений при сохранении структурной формы и информационного содержания в указанных работах не рассматривалась.

Теоретические вопросы аппроксимации значений амплитуд после структуризации на примере синтеза речи

При непрерывной фиксации колебательные процессы характеризуются повторяемостью и сменой знака приращения от положительного до отрицательного значения. Возможно и нулевое значение приращения. Повторяемость и смена знака, отражающие общий характер колебательного процесса, определяют общую формальную модель, выражаемую в виде функции, с помощью которой можно аппроксимировать, в то числе и восстанавливать потерянные значения. Вид такой функции может быть уточнен с учетом уже конкретного физического типа самого процесса через конкретные характерные особенности по отношению к общим характеристикам. Это также обуславливает функциональную модель и метод аппроксимации, в котором учитываются такие характеристики.

При структуризации потока значений амплитуд на основе системы отношений поток делится на существенные и несущественные значения амплитуд [6]. Последние значения игнорируются при формировании потока структур данных, но могут быть восстановлены либо при знании конкретной функции поведения, либо множеством других способов, которые учитывают общие особенности колебательного процесса. Но в этом случае важна не точность физического воспроизводства утраченных значений, а сохранение сущности того содержания, которое заключено в рассматриваемом участке потока данных. Обработка данных производится на основе дискретных значений, что также вносит свои особенности в методы и модели анализа.

Пусть это будет последовательность дискретных значений амплитуд $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, s_i, s_{i+1}, \dots, s_{j-1}, s_j, s_{j+1}, \dots, s_{n-1}, s_n\}$. После установления характерных элементов, нумеруемых верхним индексом s_j^k , имеем последовательность $S^{\sim} = \{s_1^1, s_2, \dots, s_{i-1}, s_i^2, s_{i+1}, \dots, s_{j-1}, s_j^j, s_{j+1}, \dots, s_{n-1}, s_n^m\}$.

После структуризации будем иметь последовательность структур данных, относительно исходных структур паттернов $\langle \dots s_i^1, t_{j-1}, s_j^2 \dots \rangle$, в которых зафиксированы значения амплитуд s_i^1 соседних характерных элементов,

количество отсчетов t_{j-1} между этими соседними значениями и другие производные характеристики, условно помеченные многоточием, выбранного фрагмента по отношению к его информационному содержанию

$$S^x = \left\{ \left\langle \dots s_i^1, t_{j-1}, s_j^2 \dots \right\rangle, \left\langle \dots s_k^2, t_{m-k}, s_m^3 \dots \right\rangle \right\}.$$

Если исходить из того, что одно и то же информационное содержание может быть представлено другим исходным потоком $\dots, S_i, W_i, C_i$ и структурировано другим потоком структур данных, тогда становится возможным получение последовательности структур данных, таких как $\dots, W^x, \dots, C^x$.

В общем виде, с учетом одного и того же информационного содержания, имеется некоторое качественное и количественное подобие этих последовательностей. То есть, множество таких представлений будем именовать структурным фактор множеством. И тогда определенное количество структурных фактор множеств будет соответствовать конкретному i – элементу информационного содержания.

Вопрос остается открытым на предмет влияния методов аппроксимации на восстановленные потоков данных из получаемых структурных $\dots, S^x, \dots, W^x, \dots, C^x$ представления каждого из этих потоков в виде последовательностей $\dots, S_k, \dots, W_k, \dots, C_k$. Общая схема появления оцифрованного потока данных и его преобразования представлена в формуле 1.

$$i \Rightarrow \begin{pmatrix} S_i \\ \dots \\ W_i \\ \dots \\ C_i \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} S^x \\ \dots \\ W^x \\ \dots \\ C^x \end{pmatrix} \Leftrightarrow i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} S_k \\ \dots \\ W_k \\ \dots \\ C_k \end{pmatrix} \quad (1)$$

Исходя из характеристик повторяемости, смены знака и при отсутствии других ограничений, накладываемых на поведение колебательного процесса, он в рамках общих исследований может быть смоделирован произвольной периодической функцией $y = f(x)$. К таковым можно отнести любую линейную функцию, аппроксимирующую в промежутке между характерными точками, и меняющую знак, а также значение в определенных пределах

$$y_k^m = f(x) = k \times (s_m^{w+1} - s_k^w) \times t_i \quad (2)$$

где k – коэффициент наклона при линейной аппроксимации легко определяется для любых двух зафиксированных значений амплитуд характерных элементов s_m^w, s_k^{w+1} , далее именуемые для дискретного представления характерными точками и количества отсчетов n между m и k ними (формула 3), а t_i номер шага в промежутке между этими характерными элементами. Если $s_m^{w+1} > s_k^w$, то знак k будет положительным, а в противном случае отрицательным.

$$k = \frac{s_m^{w+1} - s_k^w}{n} \quad (3)$$

Весь поток можно выразить в форме подобной ряду Фурье, в котором вместо $\sin$ и $\cos$ будут фигурировать линейные функции

$$f(x) = \sum_{i=1}^{j=s_1+1} k_1 \times (s_m^{w+1} - s_k^w) \times t_i - k_2 \times (s_m^{w+2} - s_k^{w+1}) \times t_i.$$

Подобная аппроксимация производилась на звуковом потоке. И результаты восстановления из структурного представления дали положительный результат по сохранению информационного содержания.

Исходя из теоретических наработок был сделан упор на функциональное представление модели в виде ряда Фурье, который разворачивался в промежутках между характерными точками [7].

Для такого представления для потока значений были выделены характеристики, которыми отражают:

- периодичность (в соответствии с определенным периодом) повторяемости значений амплитуд;
- вертикальная и горизонтальная симметричность значений амплитуд с точностью до преобразований сдвига и отображения.

Стоит отметить, что данные свойства имеют проявление на практике в усредненном значении. И аппроксимация по полученным значениям показывает, что они очень далеки от предлагаемых теоретических эталонных аналитических функций, в которых эти свойства являются их сущностью. При практической оцифровке и исследованиях звуковых колебательных процессов необходимо было уточнить особенности дискретного представления непрерывных функций.

Непрерывный звуковой волновой процесс при $n \rightarrow \infty$ традиционно может быть описан следующей функцией

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \times \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \times \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (4)$$

где x соответствует моменту t фиксации значения амплитуды, и такое соотношение верно на бесконечном временном интервале.

Обратная процедура, связанная с восстановлением без потерь и обеспечивающая максимальную точность, может быть реализована только при бесконечно высокой частоте дискретизации.

На практике, имея фиксированный интервал между отсчетами при дискретизации можно не зафиксировать значимые для волнового процесса значения амплитуды, которые могут быть потеряны после аналого-цифрового преобразования [9]. Безусловно, предполагается, что частоты, образуемые такими значениями, либо не являются определяющими при вскрытии информационного содержания, либо, при работе со звуком, лежат за пределами человеческого восприятия. Поэтому, преобразование, связанное с восстановлением после дискретизации сигналов с возможностью потери значимых данных, предполагает, линейное заполнение непрерывных значений колебаний между двумя соседними значениями амплитуд s_i и s_{i+1} относительно двух соседних отсчетов t_i и t_{i+1} представленных на рис. 1. Таким образом, процесс дискретизации предполагает как потерю некоторых частотных характеристик, так и высокую степень огрубления точности значения амплитуд, что не мешает воспринимать информационное содержание. Теперь посмотрим на ограничения, которые диктуются структуризацией потока данных. При структуризации участки значений амплитуд подразделяются на возрастающие, убывающие и постоянные отрезки приращений амплитуд. Это определяет в промежутке от одной характерной точки до другой некоторый коридор значений амплитуд. Выход за пределы означает нарушение структуры потока, что невозможно с учетом применяемых правил системы отношений. В рамках коридора значений, отмеченного светлым фоном, допустимы любые значения восстанавливаемых амплитуд, но опять же не нарушающие правил системы отношений.

Вариант возможного синусоидальной волнового процесса показан на рисунке 1 и выделен оранжевым цветом.

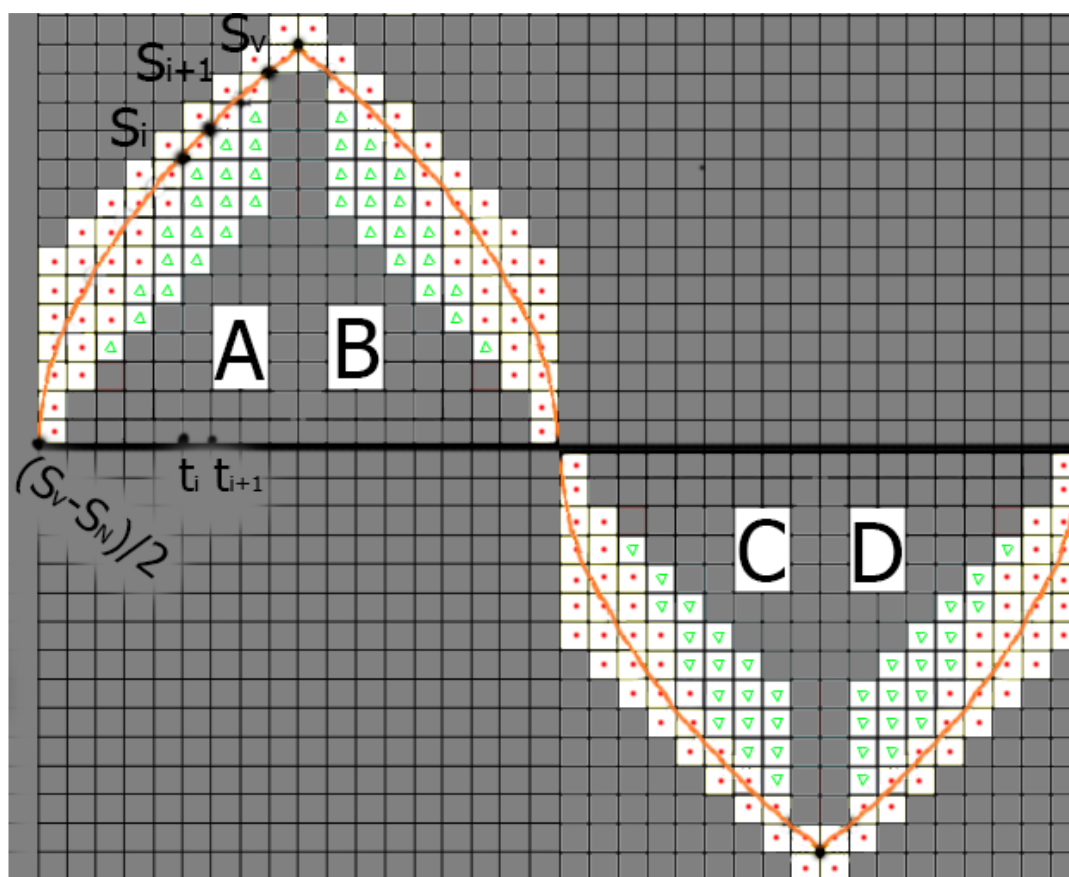


Рисунок 1 – график непрерывного колебательного процесса с фиксацией структур характерных участков

Учитывая выпуклый характер функции синуса, красными точками отмечены допустимые значения амплитуд, которые удовлетворяют рассмотренным ограничениям. Точки отмеченные, зелёными треугольниками могут быть заполнены в случае рассмотрения других вариантов функций, но так или иначе с учетом накладываемых условий любое промежуточное значение амплитуд между характерными точками может появиться только в указанной зоне.

Введем для формального представления и конкретизации содержания предлагаемых методов, следующие обозначения.

t_i — значение отсчета (номер) в i точке, где индекс i изменяется от 1 до K .

s_i — значение амплитуды в i точке, где индекс i изменяется от 1 до K .

K — максимальное значение количества отсчетов.

S_N — значение исходной амплитуды в нижней характерной точке.

S_v — значение исходной амплитуды в верхней характерной точке.

S_i^L — значение амплитуды в i точке отсчёта на аппроксимирующей линии L

S_i^F — значение амплитуды в i точке отсчёта для аналитической функции $f(x)$.

$\Delta_{i,j} = |s_i - s_j|$ — приращение между значениями амплитуд, т.е. разница между значениями амплитуд в точках i и j . Если это соседние точки в дискретном варианте, то это $\Delta_{i,j+1}$ соответственно.

$\Delta v_{i,j+2} = \Delta_{i+1,j+2} - \Delta_{i,j+1}$ — степень изменения приращений – это разница между двумя значениями соседних приращений. (скорость изменения приращения).

$\Delta P^L = S_V^L - S_N^L$ — дельта приращение аппроксимирующей линии — это разница между значениями амплитуд в верхней и нижней экстремальной точке для аппроксимирующей линии.

$\Delta P^F = S_V^F - S_N^F$ — дельта приращение функции колебательного процесса — это разница между значениями амплитуд в верхней и нижней экстремальной точке для функции, описывающей колебательный процесс.

С учетом свойств непрерывных периодических функций, участок функции, соответствующий длине волны (рисунок 1), можно разбить на 4 сектора (А, В, С, D) для которых в идеальном варианте значения амплитуд для секторов (А, В) либо (С, D) будут совпадать с точностью до сдвига, равного полупериоду. Значения амплитуд сектора В повторится в секторе С с обратным знаком с точностью до поворота на 180 градусов. С учетом алгоритма структуризации, начинающего структуризацию с минимального значения характерной точки, восстановление будет производиться сначала относительно секторов (D, А), а затем для секторов (В, С). Если предположить такой идеальный вариант симметрии, достаточно восстановить сектор А, после чего можно и в остальных секторах повторить эти значения. В предлагаемых вариантах восстановления, будут предполагаться и использоваться симметрия между последовательными секторами относительно оси ОХ, например для В, С. Но в этом случае, в отсутствии реальной симметрии, реальное распределение значений амплитуд между характерными точками

реализуется относительно среднего значения $S_{mid}^L = \frac{S_V^L + S_N^L}{2}$. Такой компромисс делается в предположении незначительного влияния на результат восстановления, но получаемые значения обязательно попадают в допустимый коридор значений.

При структуризации звукового потока также теряются промежуточные значения амплитуд, но уже между несколькими отсчётами, которые фиксируются как расстояние в количестве отсчетов между экстремальными значениями амплитуд. В этом случае можно предположить, что восстанавливаемые значения могут иметь более сложную функцию восстановления, отличную от линейной аппроксимации. Эта функция в наибольшей степени отражает волновые колебания звуковых волн, если наблюдается колебания с одной стационарной волной. Наложение волн в целом сохраняет свойство поведения одиночной волны за исключением экстремальных совпадений – резонанс, полный диссонанс и др.

В связи с этим стоит опереться на приведенную функцию и посмотреть на характер её поведения.

Формулировка основных условий, определяющих характер поведения аналитической функции, в терминах дискретного представления

Исходя из введенных обозначений, свойства аналитической функции трансформируются в их дискретные аналоги, таким образом, определяя следующие условия, накладываемые на амплитуды, приращения и степени изменения приращений для дискретного представления этой функции:

1. Возрастание функции $S_i < S_{i+1} < \dots < S_n$, либо убывание $S_i > S_{i+1} > \dots > S_n$;
2. Условие расположения относительно хорды $\forall i (S_i^F > S_i^L)$, то есть все значения реальной функции лежат выше точек прямой линии соединяющий локальные экстремальные значения (рисунок.1).

3. Убывание(возрастание) приращений от начальной точки структурной линии до конечной точки $\Delta_i \geq \Delta_{i+1} \geq \dots \geq \Delta_{i+n}$. Разница в росте (убывании) приращений в начале и в конце: вначале функция возрастает быстрее, чем в конце. Если рассмотреть последовательность приращений Δ_i , то $\Delta_{i,i+1} \geq \Delta_{i+1,i+2} \geq \dots \geq \Delta_{n-1,n}$, т.е. последовательность приращений является убывающей;

4. Гладкость аппроксимирующего покрытия: $\forall i(\Delta v_{i+1} - \Delta v_i \leq 1) \forall$. То есть разница соседних степеней изменения приращений не должна превышать единичного значения.

Если же предполагать, произвольную аппроксимирующую линию, то с учетом правил структуризации каждый сектор можно разбить на области, для которых возможно попадание значений аппроксимирующих функций и области, в которые невозможны проявление значения амплитуд. Таким образом, на представленном рисунке 2 в секторе А имеются:

- недопустимая область значений амплитуд (серая зона);
- допустимая область значений амплитуд (светлая зона).

Для допустимой области значения амплитуд имеем две зоны последовательностей:

- выпуклой функции
- вогнутой функции область возможных значений вогнутых функций (отмечены треугольниками)

Для выпуклой функции указаны:

- верхняя граница зоны (две зелёных точки);
- нижняя граница зоны (три зелёных точки);
- внутренние значения между верхней границей зоны и нижней границей зоны (одионочная красная точка).

Образец выпуклой функции представлен чёрной линией, а образец вогнутой функции представлен чёрной пунктирной линией.

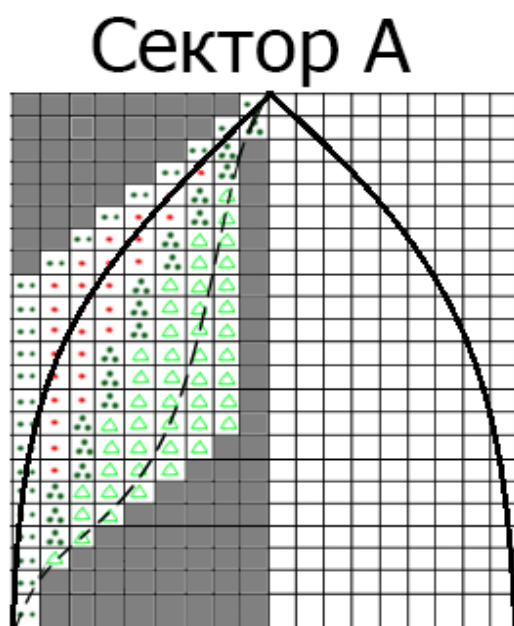


Рисунок 2 – визуализация области допустимых значений

В рамках предлагаемого по синтезу значений амплитуд между характерными точками, в которых значение амплитуд имеет локальное экстремальное значения (либо минимум, либо максимум) введем понятие аппроксимирующие линии [9].

Аппроксимирующие линии — это линия, образуемая соединением синтезируемых амплитудных значений, которые не нарушают автоматически фиксируемый структурный характер звукового потока [10]. В зависимости от соотношения значения разницы экстремальных значений и количества отсчетов, таких линий может быть различное количество, определяемое соотношением между разностью экстремальных значений амплитуды и количеством отсчётов между ними, что задаёт допустимое множество аппроксимирующих траекторий.

Таким образом, звуковой поток может быть восстановлен ограниченным набором аппроксимирующих линий, количество которых зависит от начального экстремального значения амплитуд, от конечного экстремального значения амплитуд и количества отсчётов между ними.

Таким образом, предлагается рассматривать обратную задачу по отношению к структуризации, а именно задачу восстановления промежуточных значений амплитуд с привлечением аппроксимирующих линий (АЛ). Для этого необходимо определить области существования аппроксимирующих линий (ОСАЛ) и рассмотреть вопрос их влияния на характер восприятия информационного содержания [3].

Следствием этого является возможность существования множества вариантов реализации одного и того же исходного звука: различные непрерывные реализации при фиксированной структуре восприятия оказываются эквивалентными.

В общем случае можно выделить следующие классы методов синтеза:

- 1) простейший метод, основанный на линейном соединении соседних характерных точек;
- 2) операционный метод с использованием операции вычисления $\sin$;
- 3) табличный метод, использующий фиксированную таблицу синусоидальных значений (таблицу Брадиса);

4) итерационный метод на основе перебора приращений, основанный на поиске путей в области допустимости значений амплитуды;

5) распределенный табличный метод, основанный на формировании таблиц для каждого диапазона промежуточных отсчетов.

Данные методы были реализованы и апробировались на предмет прежде всего эффективности вычисления, но подвергались и проверке сохранения информационного содержания. Краткое резюме по каждому из методов рассматривается далее.

Простейший метод восстановления амплитуд

Используя линейную функцию, аппроксимирующую участок в промежутке между характерными точками, при восстановлении «потерянных» значений, получен оптимальный и простой по времени алгоритм. На больших по количеству отсчетов восстановленных участках значение амплитуд существенно отличалась от исходных значений исходного потока данных. Но, как не странно при воспроизведении исходного и восстановленного участка респонденты практически не могли отличить разницу между эти потоками, воспринимая на слух информационное содержание.

Для восстановления требовалась операция вычитания и деления для определения коэффициента наклона, а далее оставалось произвести две операции умножения для получения значения амплитуды для конкретного отсчета. Соответственно общее количество операций зависело от количества потерянных промежуточных значений. Оптимизация была возможна при однократном вычислении $k \times (s_m^{w+1} - s_k^w)$, а далее идет умножение на номер отсчета в промежутке между характерными точками.

Стоит отметить, что разработчики всё же отмечали разницу в воспроизведении двух потоков, но любая речевая запись ими полностью распознавалась.

Операционный метод восстановления амплитуд

В современных архитектурах процессоров одной из общих команд присутствует команда вычисления. Поэтому для вычисления $\sin$ в формуле не требуется специального алгоритма аппроксимации функции. Таким образом не

требуется наличие дополнительных операций и по количеству операций в этом случае общие вычисления выигрывают по отношению простейшему методу. Но следует заметить, что операция вычисления $\sin$ в реальном временном интервале длится больше, чем операция деления. Отсюда по времени получения результата простейший метод всё же предпочтительней.

Что касается восприятия информационного содержания, то качество воспроизведения в этом случае оказалось более качественным.

Табличный метод восстановления амплитуд

Забывая для расчетов таблица Брадиса была использована для получения восстанавливаемых значений амплитуд. В этой таблице пространство возможных углов зафиксировано с точностью до секунды и само значение $\sin$ имеет достаточную степень точности. В это случае вычисление функции заменяется на определение указателя на элемент в таблице Брадиса. Указанный метод использовался как основной метод восстановления и при сравнении значений амплитуд с операционным методом показало почти полное совпадение. Понятно, что такое действие более оптимально и соответственно этот метод более оптимален, чем операционный метод. Единственным недостатком является то, что требуется хранить всю таблицу Брадиса. Но наличие большой современной оперативной памяти делает эту проблему не критичной.

Итерационный метод восстановления амплитуд

Заслуживает внимания метод, который используя приращения амплитуд и скорость их изменения выстраивает их последовательности с учетом и проверкой условий на характер функции аппроксимации. Количество таких последовательностей всегда ограничено для зафиксированного диапазона разброса значений характерных точек и расстояния между ними в количестве отсчетов. А все последовательности могут быть получены априори за приемлемое время. Тогда одна из таких последовательностей будет совпадать с исходной последовательностью входного потока данных и при упорядочении последовательностей потоков значений амплитуд и назначении номера потока становится возможным при формировании структурного представления хранить не количество отсчетов между характерными точками, а номер такой

последовательности. Тогда восстановление из структурного представления фактически превращается во вставку «потерянных» значений амплитуд. Понятно, что этот метод наиболее эффективный по скорости восстановления, но ограничивает дальнейшие методы более абстрактной структуризации, получения спектра и других исследований. В связи с этим данный метод пока не был востребован для практического воплощения. С точки зрения информационного содержания в этом случае никакого искажения его не предполагается.

Распределенный табличный метод восстановления амплитуд

При практическом использовании наиболее удачным и широко применимым оказался распределенный табличный метод. В сравнение с обычным табличным методом данный метод ориентирован на распределенные таблицы для каждого диапазона отсчетов между характерными точками. В зависимости от количества отсчетов требуется вычислить угол для каждого отсчета и для него вычислить значение $\sin$. В виду достаточно небольшого разнообразия возможных ситуаций заранее вычисляются все значения для выбранного диапазона отсчетов. И так как на восстанавливаемое значение в дальнейшем определяется только разницей между значениями амплитуд характерных точек, то эти распределенные таблицы могут быть использованы для всех возможных значений. Таким образом, имея такие таблицы для каждого диапазона отсчетов, для получения восстанавливаемого потока значений амплитуд требуется только две операции: вычитания и умножения.

Распределенный табличный метод оказался наиболее удачным и эффективным по всем параметрам и с точки зрения информационного содержания не искажает его аналогично процедурному и табличному методам. Более того древовидная форма алгоритма упрощает внесение изменения в таблицу в случае необходимости. Кроме этого, не изменяя алгоритма, через замену встроенных таблиц можно реализовывать вогнутые функции различных по содержанию поведения.

Перспективы применения

Акцент внимания на характерные данные и структуризация обеспечивает возможность представления потока данных с сокращением объема данных от 2.5

до 10 раз при ориентации на исходное представление потока данных в виде WAV-файла. При этом процесс восстановления не требует больших временных издержек. Структуризация имеет еще большой потенциал сокращения объема данных и ведутся дальнейшие работы в этом направлении. Структурное представление потенциально используется для скрытой передачи данных [8]. Уникальный результат получен для нанесения водяного знака, который практически не вскрываем даже при знании идеи его нанесения [9]. В этом случае ключом вскрытия является программа, которая в ближайшее время была зашита во флеш-устройство и указанные методы реализуются внутри этого устройства. Ведутся работы по ускорению передачи структурных и восстановленных данных через канал связи.

Но, основной линией исследований является автоматическое извлечение и назначения информационного содержания и работы в этом направлении продолжаются.

Стоит предложить использовать структурное представления и нанесения водяного знака при записи черного ящика в авиационном оборудовании.

Заключение

Полученные результаты позволяют рассматривать предложенные методы как перспективный инструмент для обработки больших потоков данных в аэрокосмических системах. Возможность восстановления промежуточных значений из структурного представления при сохранении различного информационного содержания делает методы применимыми в задачах передачи и анализа телеметрических данных, а также в бортовых системах мониторинга, функционирующих в условиях ограниченных вычислительных и коммуникационных ресурсов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение области применения метода на другие типы измерительных сигналов и на их глубокий анализ с позиций информационного содержания.

Результаты исследования подтвердили, что данные звукового потока можно разбить на два подмножества существенных и несущественных данных. При этом несущественные данные все же не должны выходить за границы, определяемые

получаемой структурой. То есть, в определенных пределах колебание значений вполне допустимы и не существенен способ восстановления их промежуточных значений. Существенные значения составляют топологический каркас, определяющий информационное содержание, а несущественные переменные могут быть реализованы множеством способов и выступают в роли заполнителя промежутков между существенными значениями. Предполагается в дальнейшем исследовать вопрос возможного диапазона изменений и существенных данных, но в предположении сохранения структуры потока данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Балакирев Н. Е., Фадеев М. М., Родионов В. С. Качественный подход в раскрытии информационного содержания волновых данных // Труды МАИ. — 2024. — № 136.
2. Балакирев Н. Е., Евсеева М. В., Фадеев М. М. Решение задачи формирования топологической первоосновы на основе матрицы отношений // Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XX Междунар. науч.-метод. конф. — Воронеж, 2020. — С. 1559–1566.
3. Родионов В. С., Балакирев Н. Е., Зеленова М. В., Рубан А. А., Фадеев М. М. Два метода восстановления промежуточных значений между характерными точками и их сравнение // Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XXI Междунар. науч.-метод. конф. — Воронеж, 2021. — С. 575–585.
4. McAulay R. J., Quatieri T. F. Speech Analysis/Synthesis Based on a Sinusoidal Representation // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. — 1986. — Vol. 34, No. 4. — P. 744–754.

5. Quatieri T. F., McAulay R. J. Speech Transformations Based on a Sinusoidal Representation // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. — 1986. — Vol. 34, No. 6. — P. 1449–1464.
6. Фадеев М. М., Балакирев Н. Е. Формализация понятия отношения для качественного анализа данных // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сб. тр. Междунар. науч. конф. — Воронеж, 2022. — С. 1685–1690.
7. Фадеев М. М., Балакирев Н. Е., Нгуен Х. З., Малков М. А. Структуризация и качественное рассмотрение звукового потока в системе синтеза и анализа речи // Программные продукты и системы. — 2018. — Т. 31, № 4. — С. 768–776.
8. Балакирев Н. Е. Количественная и качественная оценка исследуемых объектов на примере простейших отношений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2016. — № 2. — С. 65–72.
9. Балакирев Н. Е., Фадеев М. М. Нестандартное решение задачи нанесения водяного знака звукового потока на основе структуризации // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024) : тр. XVII Междунар. конф. — М., 2024. — С. 1075–1080.

References

1. Balakirev N. E., Fadeev M. M., Rodionov V. S. Kachestvennyi podkhod v raskrytii informatsionnogo sodержaniya volnovykh dannyykh [Qualitative approach to revealing the information content of wave data]. Trudy MAI, 2024, no. 136. (In Russian).
2. Balakirev N. E., Evseeva M. V., Fadeev M. M. Reshenie zadachi formirovaniya topologicheskoi pervoosnovy na osnove matritsy otnoshenii [Solving the problem of forming a topological basis using a relation matrix]. In: Informatika: problemy, metody, tekhnologii. Voronezh, 2020, pp. 1559–1566. (In Russian).
3. Rodionov V. S., Balakirev N. E., Zelenova M. V., Ruban A. A., Fadeev M. M. Dva metoda vosstanovleniya promezhutochnykh znachenii mezhdu kharakternymi tochkami i ikh sravnenie [Two methods for restoring intermediate values between characteristic

points and their comparison]. In: Informatika: problemy, metody, tekhnologii. Voronezh, 2021, pp. 575–585. (In Russian).

4. McAulay R. J., Quatieri T. F. Speech Analysis/Synthesis Based on a Sinusoidal Representation. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., 1986, vol. 34, no. 4, pp. 744–754.

5. Quatieri T. F., McAulay R. J. Speech Transformations Based on a Sinusoidal Representation. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., 1986, vol. 34, no. 6, pp. 1449–1464.

6. Fadeev M. M., Balakirev N. E. Formalizatsiya ponyatiya otnosheniya dlya kachestvennogo analiza dannykh [Formalization of the relation concept for qualitative data analysis]. In: Aktual'nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki. Voronezh, 2022, pp. 1685–1690. (In Russian).

7. Fadeev M. M., Balakirev N. E., Nguyen H. Z., Malkov M. A. Strukturizatsiya i kachestvennoe rassmotrenie zvukovogo potoka v sisteme sinteza i analiza rechi [Structuring and qualitative analysis of audio stream in speech synthesis and analysis system]. Programmnye produkty i sistemy, 2018, vol. 31, no. 4, pp. 768–776. (In Russian).

8. Balakirev N. E. Kolichestvennaya i kachestvennaya otsenka issleduemykh ob"ektov na primere prosteishikh otnoshenii [Quantitative and qualitative evaluation of objects using simple relations]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii, 2016, no. 2, pp. 65–72. (In Russian).

9. Balakirev N. E., Fadeev M. M. Nestandartnoe reshenie zadachi naneseniya vodyanogo znaka zvukovogo potoka na osnove strukturizatsii [A non-standard solution to audio stream watermarking based on structuring]. In: Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2024). Moscow, 2024, pp. 1075–1080. (In Russian).

Информация об авторах

Вадим Станиславович Родионов, аспирант, МАИ, г. Москва, Россия;

e-mail: tuukvadim@live.com

Николай Евгеньевич Балакирев, кандидат технических наук, доцент
кафедры 316, МАИ, г. Москва, Россия; e-mail: balakirev1949@yandex.ru

Михаил Михайлович Фадеев, аспирант, МАИ, г. Москва, Россия;
e-mail: fadeev_mix@bk.ru

Information about the authors

Vadim S. Rodionov, Postgraduate student, MAI, Moscow, Russia;
e-mail: tuukvadim@live.com

Nikolay E. Balakirev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of
Department 316, MAI, Moscow, Russia; e-mail: balakirev1949@yandex.ru

Mikhail M. Fadeev, Postgraduate student, MAI, Moscow, Russia;
e-mail: fadeev_mix@bk.ru

Получено 04 февраля 2026 ● Принято к публикации 11 апреля 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 04 February 2026 ● Accepted 11 April 2026 ● Published 25 June 2026
