

Стабилизация решения обратной задачи разделения сигналов на основе параметров, определяющих устойчивость решения

В.А. Засов¹, Е.Н. Никоноров¹

¹Самарский государственный университет путей сообщения, ул. Свободы, 2-В, Самара, Россия, 443066

Аннотация. Предложен алгоритм регуляризации позволяющий обеспечить устойчивость решения обратной задачи разделения источников сигналов - извлечение отдельных сигналов из аддитивной смеси нескольких сигналов. Эти сигналы поступают в точки измерения от различных источников сигналов, недоступных для непосредственных измерений. Особенностью предложенного алгоритма, позволяющей уменьшить его вычислительную сложность, является использование результатов анализа устойчивости. Анализ устойчивости производится путем определения сингулярных интервалов для абсолютных, относительных и критических видов вариаций параметров модели образования сигналов. В статье также представлены результаты компьютерного моделирования предложенного алгоритма.

1. Введение

Разделение сигналов - это решение задачи выделения отдельных сигналов из аддитивной смеси нескольких сигналов, поступающих в точки измерения от различных источников сигналов, недоступных для непосредственных измерений. Решение этой задачи необходимо во многих областях практической деятельности: мониторинге и диагностике технических объектов (например, виброакустической диагностике), связи, в медицинской диагностике, обработке речевых сигналов и т.д.

Задача разделения сигналов относится к классу обратных задач, которые в общем случае могут быть некорректными. Из свойства некорректности задачи разделения сигналов следует, что её решение может быть неустойчивым, т.е. малые изменения параметров смешивающей матрицы \mathbf{H} модели образования сигналов или характеристик сигналов источников приводят к недопустимо большим изменениям решения, т.е. неустойчивости вычисления сигналов источников [1]. Для существования устойчивого решения задачи необходимо, чтобы параметры объекта, описываемого моделью образования сигналов, удовлетворяли ряду априорных ограничений [2], например, смешивающая матрица должна быть обратимой, полиномы, описывающие передаточные функции каналов не должны иметь общих корней, число приемников и источников должно быть равным и др.

В реальных условиях априорные ограничения могут быть нарушены, т.к. параметры объекта могут изменяться из-за эволюции объекта во времени, погрешности измерения параметров, неточности изготовления и других причин, которые зачастую невозможно предсказать. Таким

образом, параметры смешивающей матрицы \mathbf{H} и характеристики сигналов источников могут быть такими, при которых решение задачи разделения сигналов является неустойчивым и поэтому непригодным для практического применения.

В настоящее время для обеспечения устойчивого решения некорректных задач применяются различные методы, среди которых широкой распространенностью и большим опытом использования выделяются методы регуляризации решений (детерминированная регуляризация [3,4], статистическая регуляризация [5,6] и др). Эти методы целесообразно применять, если априори известно, что поставленная задача некорректна и получаемое решение неустойчиво. Если же параметры объекта изменяются таким образом, что задача переходит в область корректных, приближенное регуляризованное решение стремится к точному за счет уменьшения параметра регуляризации в стабилизирующем функционале.

Методы регуляризации применяются для получения устойчивых решений задачи разделения источников сигналов. Методы регуляризации отработаны, универсальны, но отличаются большой вычислительной сложностью, что затрудняет и ограничивает их использование для потоковой обработки данных (например, в задачах цифровой обработки сигналов).

Известно [3,4], что вычислительная сложность методов регуляризации решений может быть существенно снижена за счет использования дополнительной априорной информации параметрах задачи. В нашем случае, эта дополнительная информация отражает особенности задачи разделения сигналов, например, в задачах диагностики по динамическим параметрам (виброакустическая диагностика), задачах связи (разделения источников речевых сигналов, компенсация помех) и т.п. Системы обработки данных для таких задач проектируются таким образом, что задача разделения сигналов в исходном виде корректна и решение устойчиво. Лишь аномальные, нештатные изменения параметров смешивающей матрицы \mathbf{H} и характеристик сигналов источников могут привести к миграции устойчивого решения к неустойчивому [7]. Также возможен и обратный процесс – переход задачи из некорректных в область корректных. Таким образом, регуляризация решения необходима только в том случае, если анализ устойчивости показывает, что система переходит в область неустойчивых решений. Так как основной режим работы систем разделения сигналов в прикладных задачах соответствует устойчивому решению задачи, то вычислительные затраты на стабилизацию решений существенно сокращаются. Кроме того, переход задач в область неустойчивых решений происходит из области устойчивых, что дает возможность в качестве дополнительной информации для вычислений параметров регуляризации стабилизирующего функционала использовать историю изменения параметров смешивающей матрицы \mathbf{H} и характеристик сигналов источников, что упрощает вычисления.

Таким образом, можно сделать вывод об актуальности разработки и исследования алгоритмов стабилизации решения задачи разделения сигналов использующих при расчетах параметры определяющие устойчивость решения.

2. Объект исследования

Для формализованной постановки задачи рассмотрим модель образования сигналов в объектах, которую представим в виде линейной многомерной системы, имеющей N входов и M выходов. Входными сигналами модели являются сигналы $s_n(k)$, $n = 1, 2, \dots, N$, выходными сигналами $x_m(k)$, $m = 1, 2, \dots, M$. Входные сигналы – это сигналы, генерируемые различными источниками сигналов, а выходными сигналами этой системы могут являться сигналы различных приемных устройств, например, датчиков, измерительных преобразователей, антенн и т.п. Положим, что каждый из M выходов такой многомерной системы связан со всеми N входами линейными каналами передачи сигналов.

В любой дискретный момент времени k M - мерный вектор измеряемых датчиками дискретных сигналов $\mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$ получается из N - мерного вектора

сигналов источников $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$. Математическая модель образования сигналов описывается системой уравнений типа дискретной свертки (1), где m -ый наблюдаемый сигнал представляет собой аддитивную смесь искаженных каналами сигналов источников и шума [1], т.е.

$$x_m(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{g=0}^{G-1} (h_{mn}(g, \mathbf{I})) s_n(k-g) + y_m(k),$$

где $h_{mn}(g)$ - элемент $M \times N$ матрицы $\mathbf{h}(g)$ импульсных характеристик каналов, $\mathbf{y}(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_M(k)]^T$ - вектор шума. В дальнейшем положим, что импульсные характеристики $h_{mn}(g)$ конечны и представляются числом отсчетов G . Динамические характеристики каналов $h_{mn}(g, \mathbf{I})$ являются квазистационарными, т.е. изменяются в зависимости от некоторого вектора параметров \mathbf{I} (времени, температуры, местоположения и т.д.).

В частотной области модель (1) описывается как

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \cdot \mathbf{S}(\omega) + \mathbf{Y}(\omega),$$

где $\mathbf{X}(\omega) = [X_1(\omega), \dots, X_M(\omega)]^T$ - вектор наблюдаемых сигналов, состоящий из фурье-образов сигналов приемников; $\mathbf{S}(\omega) = [S_1(\omega), \dots, S_N(\omega)]^T$ - вектор сигналов источников, состоящий из фурье-образов сигналов источников; $\mathbf{Y}(\omega) = [Y_1(\omega), \dots, Y_M(\omega)]^T$ - вектор шума, состоящий из

фурье-образов сигналов шума; $\mathbf{H}(\omega) = \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & \dots & H_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1}(\omega) & \dots & H_{MN}(\omega) \end{pmatrix}$ - $M \times N$ смешивающая

матрица, элементами которой являются фурье-образы каналов. Сигналы источников $\mathbf{S}(\omega)$ и шума $\mathbf{Y}(\omega)$ считаются независимыми, каналы могут моделироваться спектральными преобразователями, например, различными фильтрами.

В общем случае решение задачи разделения источников сигналов сводится к вычислению разделяющей матрицы $\mathbf{w}(g)$, которая является равной или близкой по тому или иному критерию матрице, обратной матрице $\mathbf{h}(g)$. Таким образом, в общем случае решение задачи разделения сигналов источников есть решение системы (1) и может быть представлено в виде:

$$s_n(k) = \sum_{m=1}^M \sum_{g=0}^{G-1} w_{nm}(g) x_m(k-g),$$

где $\mathbf{w}(g)$ - матрица импульсных характеристик перестраиваемых фильтров с элементами $w_{nm}(g)$. В частотной области уравнение (3) можно записать в виде

$$\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{W}(\omega) \mathbf{X}(\omega),$$

где $\mathbf{W}(\omega) = \mathbf{H}^{-1}(\omega)$.

Таким образом, решение задачи разделения источников сигналов сводится к вычислению детерминированным или статистическим методом разделяющей матрицы $\mathbf{w}(g)$, которая является равной или близкой по тому или иному критерию матрице, обратной матрице $\mathbf{h}(g)$.

В качестве параметров, определяющих устойчивость решения задачи, предлагается использовать сингулярные интервалы параметров смешивающей матрицы \mathbf{H} (модели образования сигналов), алгоритмы вычисления которых приведены в [2].

Контроль устойчивости производится путем сравнения вычисленных сингулярных интервалов с заданными интервалами устойчивого разделения.

Целью работы является разработка и исследование алгоритма стабилизации решения задачи разделения сигналов использующего при расчетах параметры определяющие устойчивость решения.

3. Алгоритм регуляризации решения задачи разделения сигналов, использующий параметры определяющие устойчивость решения

Если некоторые вычисленные сингулярные интервалы смешивающей матрицы оказываются меньше заданных интервалов устойчивого разделения, т.е. решение неустойчиво, необходимо изменить (скорректировать) параметры модели образования сигналов таким образом, чтобы решение задачи разделения сигналов, описываемое разделяющей матрицей \mathbf{W} , стало устойчивым.

Предлагаемый алгоритм стабилизации решения задачи разделения сигналов базируется на основных положениях метода регуляризации Тихонова [3,4].

Операторное уравнение, описывающее модель образования сигналов с возмущениями, имеет вид

$$\hat{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{s} = \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{s} \in L_2, \hat{\mathbf{x}} \in L_2,$$

где вместо точных \mathbf{H} и \mathbf{x} известны их приближенные значения $\hat{\mathbf{H}}$ и $\hat{\mathbf{x}}$ такие, что $\|\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{H}\|_E \leq \xi_{\mathbf{H}}$ и $\|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|_2 \leq \delta$, где δ и $\xi_{\mathbf{H}}$ – оценки сверху абсолютных погрешностей измерений сигналов \mathbf{x} и смешивающей матрицы \mathbf{H} . Регуляризованное решение \mathbf{s}_α по методу Тихонова [2], используя SVD разложение смешивающей матрицы, можно записать следующим образом

$$\mathbf{s}_\alpha = \sum_{n=1}^N f_n \cdot \frac{u_n^* \mathbf{x}}{\sigma_n} v_n,$$

где σ_n - сингулярные числа, а f_n - фильтрующие множители вида

$$f_n^{Тихонов} = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_n^2 + \alpha}, \tag{1}$$

где $\alpha > 0$ - параметр регуляризации.

В работе предлагается регуляризирующий оператор $\hat{\mathbf{W}}_\alpha(\omega) = (\hat{\mathbf{H}}(\omega) - \alpha \tilde{\mathbf{Z}}_{krum}^{svd}(\omega))^{-1}$, определяемый на основе матрицы $\tilde{\mathbf{Z}}_{krum}^{svd}$ направлений полученной в [2]. Действительно, коррекция параметров модели должна производиться в направлении, противоположном тому, которое привело к неустойчивости, т.е. в направлении противоположном направлению, задаваемому матрицей $\tilde{\mathbf{Z}}_{krum}^{svd}$ направлений [8].

Тогда, используя SVD разложение матрицы направлений $\tilde{\mathbf{Z}}_{krum}^{svd}(\omega) = -u_N(\omega)v_N^*(\omega)$, регуляризованное решение задачи разделения сигналов представляется следующим образом

$$\mathbf{S}_\alpha(\omega) = \tilde{\mathbf{W}}_\alpha(\omega) \hat{\mathbf{X}}(\omega) = \sum_{n=1}^N \tilde{f}_n(\omega) \cdot \frac{u_n^*(\omega) \hat{\mathbf{X}}(\omega)}{\sigma_n(\omega)} v_n(\omega), \tag{2}$$

где фильтрующие множители равны

$$\tilde{f}_n(\omega) = \begin{cases} 1, \sigma_n(\omega) \geq \alpha \\ \frac{\sigma_n(\omega)}{\sigma_n(\omega) + \alpha}, \sigma_n(\omega) < \alpha \end{cases} \quad (3)$$

Если модель существенно неустойчива, то учитывая выполняющееся в этом случае неравенство $\sigma_N \ll \alpha$, фильтрующие множители (3) можно представить в виде

$$\tilde{f}_n^{mod}(\omega) = \begin{cases} 1, \sigma_n(\omega) \geq \alpha \\ \frac{\sigma_n(\omega)}{\alpha}, \sigma_n(\omega) < \alpha \end{cases} \quad (4)$$

Выражения (2-4) представляют регуляризованное решение многомерной задачи разделения сигналов, отличающееся использованием предложенных (3,4) фильтрующих множителей и тем, что $\mathbf{S}_\alpha(\omega)$, $\hat{\mathbf{X}}(\omega)$ - векторы, а $\hat{\mathbf{H}}(\omega)$, $\hat{\mathbf{W}}_\alpha(\omega)$ - матрицы, в отличие от классических одномерных случаев, где эти компоненты являются скалярами. Важно, что для расчета полученного фильтрующего множителя (4) требуется меньшее количество вычислительных операций по сравнению с множителем (1).

Параметр регуляризации α при известных погрешностях ξ и δ предлагается определять на основе модифицированного метода обобщенной невязки [3,9]. Применительно к задаче разделения сигналов параметр регуляризации $\alpha > 0$ находится как корень уравнения

$$\|\hat{\mathbf{H}}\mathbf{s}_\alpha - \hat{\mathbf{x}}\|_2^2 = (\delta + \xi_{\mathbf{H}} \|\mathbf{s}_\alpha\|_2)^2 / \beta(r, M, N),$$

в котором α является параметром \mathbf{s}_α , а введенный множитель $\beta(r, M, N) \geq 1$ выполняет роль масштабирующего множителя, определяемого размерностью задачи ($M \times N$) и погрешностью измерения параметров сигналов и каналов (определяемой, в частности, разрядностью r аналого-цифрового преобразователя (АЦП)). Особенностью предложенного алгоритма регуляризации, приведенного в таблице, является возможность использования дополнительной информации, которая получается в результате анализа устойчивости, что позволяет уменьшить вычислительную сложность регуляризации.

Таблица 1. Обобщенный алгоритм регуляризации решения задачи разделения сигналов.

№	Действие	Комментарий
1	Зададим начальное значение итерации $j = 1$, определим $\alpha_{min} = \min_{\omega} \ \Delta\hat{\mathbf{H}}(\omega)\ _2$, $\alpha_{max} = \max_{\omega} \sigma_{max}(\mathbf{H}(\omega))$, $\alpha_{\Pi} = \alpha_{min}$ Определяем SVD разложение $\mathbf{H}(\omega_g) = \mathbf{U}(\omega_g)\mathbf{\Sigma}(\omega_g)\mathbf{V}^*(\omega_g)$	Инициализация при $\omega_g = \omega_0, \dots, \omega_{G-1}$
2	Для каждой частоты ω_g проверяется условие: Если $\ \Delta\hat{\mathbf{H}}(\omega_g)\ _2 < \alpha_{\Pi}$, то вычисляется $\tilde{f}_n(\omega_g)$, $\mathbf{S}_\alpha(\omega_g) = \sum_{n=1}^N \tilde{f}_n(\omega_g) \cdot \frac{u_n^*(\omega_g)\hat{\mathbf{X}}(\omega_g)}{\sigma_n(\omega_g)} v_n(\omega_g)$	Корректировка спектральных матриц
3	$\rho(\alpha) = \ \hat{\mathbf{H}}\mathbf{s}_\alpha - \hat{\mathbf{x}}\ _2^2 - (\delta + \xi_{\mathbf{H}} \ \mathbf{s}_\alpha\ _2)^2 / \beta(r, M, N)$	Вспомогательная функция
4	Если $\rho(\alpha_{min}) \cdot \rho(\alpha_{max}) > 0$, то $\alpha_{\Pi} = \delta + \xi_{\mathbf{H}}$, иначе поиск корня уравнения $\rho(\alpha) = 0$, например, методом бисекций или методом Ньютона	Определение параметра регуляризации

Действительно, регуляризация решений при комплексном использовании алгоритмов контроля и обеспечения устойчивости производится только в случае неустойчивости. Использование предложенных (3,4) фильтрующих множителей также позволяет уменьшить вычислительную сложность регуляризации за счет:

- а) уменьшения диапазона $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ поиска параметра регуляризации (см. шаг 1, таблицы) или итерационного уточнения диапазона $[\alpha_{min}^j, \alpha_{max}^j]$, величина которого может определяться как $\alpha_{min}^j = \alpha_{opt}^{j-1} - \varphi \cdot \alpha_{opt}^{j-1}$, $\alpha_{max}^j = \alpha_{opt}^{j-1} + \varphi \cdot \alpha_{opt}^{j-1}$, где величина $0 < \varphi < 1$ определяется динамикой изменения параметров модели;
- б) вычисления не всех N фильтрующих множителей, а только их некоторой части $n \leq N$ для сингулярных чисел, удовлетворяющих условию $\sigma_n < \alpha$, что позволяет использовать результаты вычислений на предыдущих шагах регуляризации;
- с) уменьшения диапазона частот $[\omega_{min}^j, \omega_{max}^j]$, в котором параметры смешивающей матрицы $\mathbf{H}(\omega)$ должны регуляризоваться.

Представление предложенного алгоритма регуляризации в частотной области и с учетом SVD разложения позволяет осуществлять регуляризацию в каждом частотном диапазоне параллельно во времени, что сокращает время регуляризации.

Вычислительную сложность процесса регуляризации можно также уменьшить за счет осуществления одношаговой регуляризации, при которой параметр регуляризации $\alpha(\omega)$ в фильтрующем множителе (4) рассчитывается так: $\alpha(\omega) = \sigma_{max}(\mathbf{H}(\omega)) / Cond_{II}$.

4. Результаты моделирования

Проверка классического и предложенного регуляризованных решений проведена методами компьютерного моделирования. Моделирование производилось на тестовых задачах с известными источниками сигналов и параметрами смешивающей матрицы $\mathbf{H}(\omega)$. При моделировании для каждой из задач предварительно осуществлялось решение задачи с регуляризацией при известных сигналах источников $s_n(k)$ и измеренных заданной погрешностью сигналов приемников $\hat{x}_m(k)$. Использование априорной информации о параметрах смешивающей матрицы и источниках сигналов позволяет рассматривать такое тестовое решение как эталонное, предназначенное для сравнительной оценки результатов моделирования предлагаемых в работе алгоритмов регуляризации.

Качество разделения сигналов измеряется вектором $\Psi = [\psi_{1p}, \dots, \psi_{Np}]$, каждый из элементов которого определяется как приведенная к мощности сигнала источника величина мощности сигнала ошибки разделения $\sum_{k=0}^{K-1} (s_n(k) - s_{n,\alpha}(k))^2$:

$$\psi_{np} = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} (s_n(k) - s_{n,\alpha}(k))^2}{\sum_{k=0}^{K-1} s_n^2(k)} \cdot 100\%$$

где $s_n(k)$, $s_{n,\alpha}(k) = \sum_{\omega=0}^{K-1} S_{n,\alpha}(\omega) \cdot e^{\frac{i2\pi\omega k}{K}}$ – точное и регуляризованное решение соответственно.

Рассмотрим модель образования сигналов, описываемую смешивающей матрицей $M = N = 2$ с частотно-зависимыми каналами при известных погрешностях ξ_H и δ . Эти

погрешности определяются разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для вычисления параметра регуляризации использовался метод обобщенной невязки (3,9), а стабилизация решения производилась с применением классического и предложенного регуляризирующих операторов. Результаты моделирования приведены на рисунке 1, где (а) – эталонное (тестовое) решение, (б) - классическое (Тихонова), (в) - предложенное в работе.

Результаты моделирования показывают, что при выбранных регуляризирующих операторах процесс регуляризации в рассматриваемой многомерной задаче является сходящимся, т.е. предложенный в работе алгоритм регуляризации можно использовать в практических приложениях.

Проведем оценку вычислительной сложности предложенного алгоритма.

В качестве примера рассмотрим модель со смешивающей матрицей с $M = N = 2$, где сигналы и каналы задаются с погрешностью, соответствующей 8 двоичным разрядам АЦП. Зависимости числа обусловленности исходного и регуляризованного решения от частоты, полученные в результате моделирования, приведены на рисунке 2.

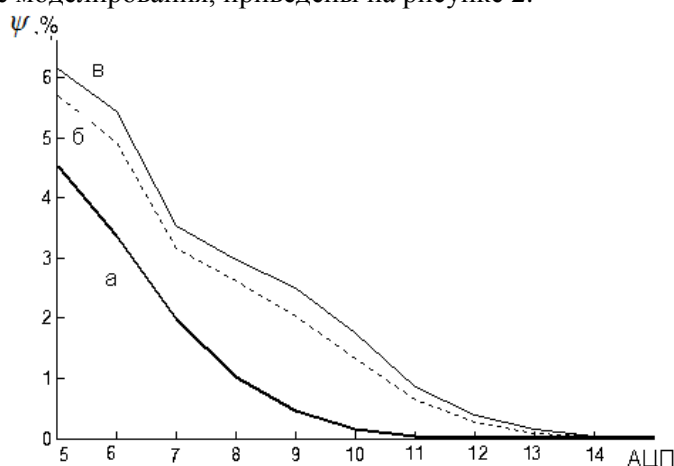


Рисунок 1. Зависимость погрешности разделения от разрядности АЦП.

Из графика на рисунке 2 следует, что регуляризация решения задачи производилась в диапазоне частот с 100Гц по 375Гц, а параметры смешивающих спектральные матриц модели образования сигналов в диапазоне с 0 Гц по 100Гц оставались неизменными, т.е. регуляризация решения не осуществлялась, что сокращает объем вычислений.

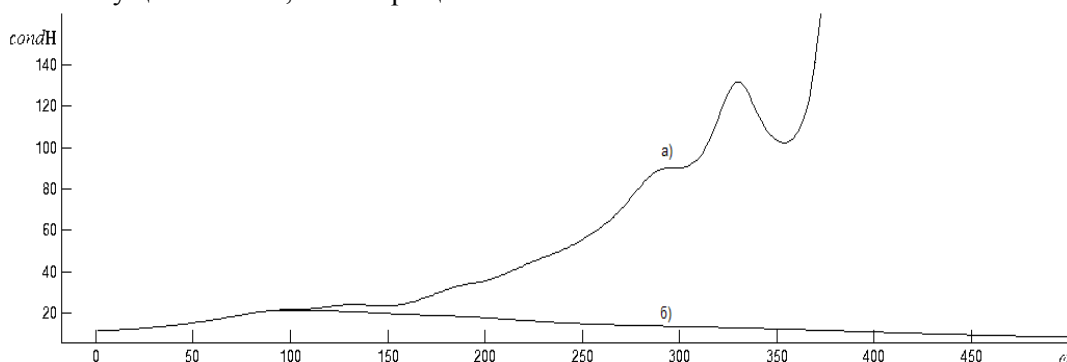


Рисунок 2. Зависимость числа обусловленности от частоты: а) нерегуляризованное решение и б) регуляризованное решение.

Этот же вывод подтверждает график зависимости максимального $\sigma_1(\omega_g)$ и минимального $\sigma_2(\omega_g)$ сингулярных чисел спектральных матриц $\mathbf{H}(\omega_g)$ от частоты при заданном параметре регуляризации α (рис. 5).

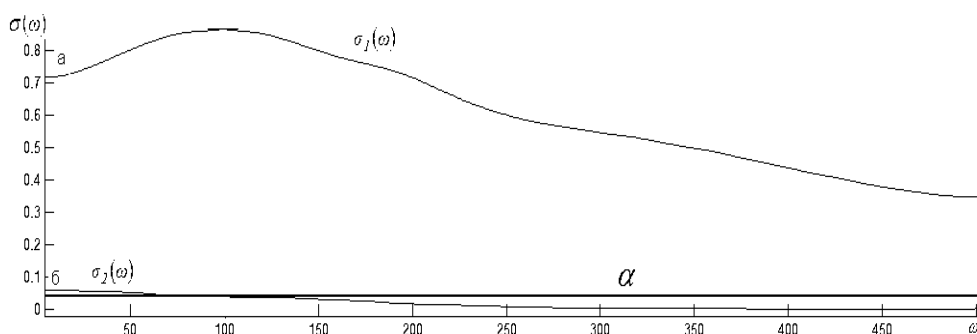


Рисунок 3. Зависимость а) минимального и б) максимального сингулярных чисел от частоты.

Точка пересечения зависимости $\sigma_2(\omega_g)$ и линии a находится в районе 100Гц, т.е. регуляризации подвергались только минимальные сингулярные числа спектральных матриц с частотой выше 100 Гц.

Рассмотренный пример позволяет провести оценку вычислительной сложности предлагаемого алгоритма регуляризации следующим образом. Вычислительную сложность расчета n -ого слагаемого в регуляризованном решении $\tilde{f}_n(\omega) \cdot \frac{u_n^*(\omega) \hat{X}(\omega)}{\sigma_n(\omega)} v_n(\omega)$

обозначим за SL , тогда вычислительная сложность расчета регуляризованного решения для метода Тихонова равна $SL \cdot 375 \cdot 2$, т.к. используются 2 сингулярных числа, а вычислительная сложность расчета регуляризованного решения по предлагаемому алгоритму составит $SL \cdot (375 - 100) = SL \cdot 275$, т.к. использовалось только одно сингулярное число и диапазон частот, в котором производилась регуляризация в почти в 4 раза меньше.

Из приведенного примера следует, что вычислительная сложность уменьшилась почти в 3 раза. При выполнении условия $\sigma_N(\omega) \ll \sigma_{N-1}(\omega)$ справедлив вывод о том, что с ростом M и N выигрыш по вычислительной сложности будет возрастать.

На рисунке 4 приведен пример моделирования предложенного алгоритма регуляризации в задаче разделения тестовых треугольных сигналов.

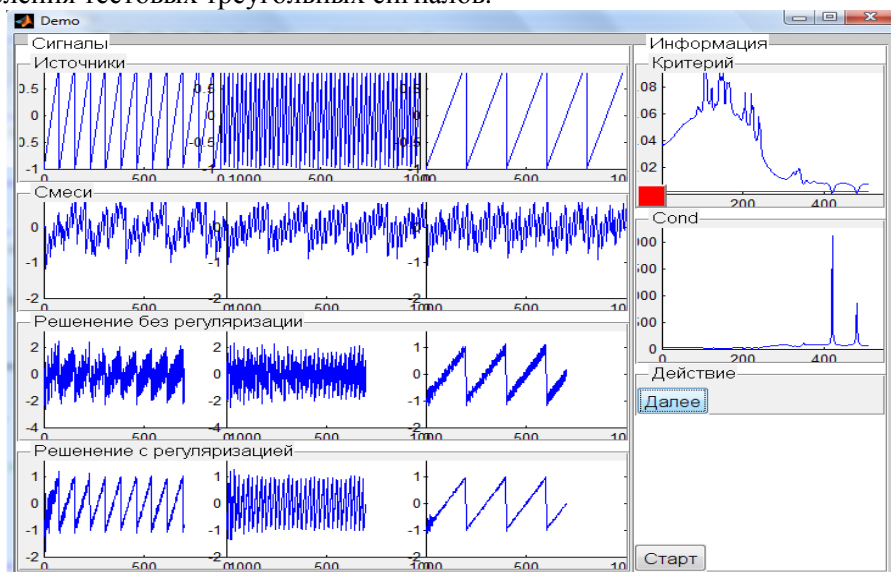


Рисунок 4. Результаты моделирования решения задачи разделения тестовых сигналов.

Приведенные результаты компьютерного моделирования и сравнительного анализа разработанного алгоритма с известными показали достоверность сделанных теоретических

выводов и подтверждают преимущества предложенного алгоритма регуляризации.

5. Основные выводы

Для стабилизации решения обратной задачи разделения сигналов разработан и исследован алгоритм регуляризации, обеспечивающие устойчивость разделения сигналов и отличающийся меньшей вычислительной сложностью за счет использования параметров определяющих устойчивость решения задачи.

6. Литература

- [1] Засов, В.А. Алгоритмы и устройства для идентификации входных сигналов в задачах контроля и диагностики динамических объектов / В.А. Засов, М.А. Тарабардин, Е.Н. Никоноров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева. – 2009. – Т. 2, №18. – С.115-122.
- [2] Засов, В.А. Алгоритмы контроля устойчивости решения задачи разделения источников сигналов в условиях априорной неопределенности / В.А. Засов, Е.Н. Никоноров // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ-10): материалы российской с международным участием конференции. – М.: Издательство учреждения Российской академии наук Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2010. – С. 482-491.
- [3] Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 385 с.
- [4] Бакушинский, А.Б. Некорректные задачи. Численные методы и приложения / А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский. – М.: Издательство Московского государственного университета, 1989. – 199 с.
- [5] Грешилов, А.А. Некорректные задачи цифровой обработки информации и сигналов / А.А. Грешилов. – М.: Университетская книга: Логос, 2009. – 360 с.
- [6] Теребиж, В.Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач / В.Ю. Теребиж. – М.: Физматлит, 2005. – 376 с.
- [7] Петров, Ю.П. Корректные, некорректные и промежуточные задачи с приложениями: учебное пособие для вузов / Ю.П. Петров, В.С. Сизиков. – СПб: Издательство Политехника, 2003. – 261 с.
- [8] Засов, В.А. Алгоритм регуляризации решения задачи разделения сигналов, использующий результаты анализа устойчивости / В.А. Засов, Е.Н. Никоноров // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO-12): труды 9-ой международн. конф. – М.: Издательство учреждения Российской академии наук Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2012. – С. 949-962.
- [9] Леонов, А.А. Решение некорректно поставлены обратных задач: Очерк теории, практические алгоритмы и демонстрация в МАТЛАБ / А.А. Леонов. – М.: Книжный дом «Либроком», 2010. – 336 с.

Stabilization of a solution to the inverse problem of signal separation on the basis of the parameters determining the stability of solution

V. A. Zasov¹, Ye. N. Nikonov¹

¹Samara State Transport University, 2B Svobody Street, Samara, Russian, 443066

Abstract. This paper proposes a regularization algorithm that makes it possible to ensure the stability of the solution to the inverse problem of separation of signal sources - the extraction of individual signals from an additive mixture of several signals. These signals are come to measurement points from various signal sources that are not available for direct measurements. A feature of the proposed algorithm, which makes it possible to reduce its computational complexity, is the use of stability analysis results. Stability analysis is performed by determining the singular intervals for absolute, relative and critical types of variations in the parameters of the signal generation model. The paper also presents the results of computer simulation of the proposed algorithm.

Keywords: multivariable dynamic, system, inverse, ill-posed, problems, models, signal, separation, stability, algorithm, modeling, singular, parameter, intervals, solution, regularization.