

СГЛАЖИВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РАДИОСПЕКТРОМЕТРЕ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Применение алгоритмов сглаживания, как правило, приводит не только к изменению спектра шума, но также к искажению сигнала, что увеличивает погрешность результатов его последующей обработки [1]. Поэтому в информационно-измерительных системах, содержащих микро-э. в. м., сглаживание чаще всего используется лишь для подготовки данных к представлению в виде графиков. Однако в ряде случаев сглаживание, приведя к сужению полосы сигнала, может ускорить его последующую обработку, например, за счет увеличения шага дискретизации при поиске сигнальных экстремумов на фоне высокочастотного шума.

Описываемый алгоритм относится к трансверсальным цифровым фильтрам [2] и, по сути дела, моделирует воздействие интегрирующей RC -цепи на меняющееся электрическое напряжение.

Если экспериментальные данные образуют в памяти э. в. м. массив D из N элементов, то алгоритм сглаживания можно описать выражением:

$$D(I) = \frac{D(I) + D(I-1)(T-1)}{T},$$

где T — характерный интервал сглаживания, а $I = \overline{1, N}$. Величина T соответствует выраженной в единицах индексов массива данных постоянной времени интегрирующей RC -цепи, оказывающей на входной сигнал $D(I)$ воздействие, аналогичное воздействию сглаживания. На рис. 1 иллюстрируется воздействие сглаживания на сигнал прямоугольной формы и на сигнал, являющийся первой производной спектральной линии магнитного резонанса. Как видно из рис. 1, сглаживание привело к искажению формы сигналов, которое выразилось в их уширении и смещении в направлении сглаживания, определяемом порядком переборки элементов массива экспериментальных данных. Применительно к спектральной линии магнитного резонанса это искажение означает увеличение ее ширины и смещение резонансного значения магнитного поля. Искажения указанных параметров спектральной линии влияют на результаты их определения из экспериментальных данных после сглаживания и поэтому должны быть учтены или скомпенсированы.

Покажем, что при сглаживании одного и того же симметричного относительно точки t_0 сигнала сначала в одном, а затем в другом направлении с равными интервалами сглаживания сигнал остается симметричным относительно той же точки t_0 (центры симметричных сигналов не смещаются). Сглаживание в одном направлении описывается выражением:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \int_{-\infty}^t U_{\text{вх}}(t_1) e^{\frac{t_1}{T}} dt_1,$$

где T — интервал сглаживания. Сглаживание в двух направлениях, как легко показать, описывается выражением:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2T} \left[e^{-\frac{t}{T}} \int_{-\infty}^t U_{\text{вх}}(t_1) e^{\frac{t_1}{T}} dt_1 + e^{\frac{t}{T}} \int_t^{\infty} U_{\text{вх}}(t_1) e^{-\frac{t_1}{T}} dt_1 \right].$$

Запишем это выражение для значения сигнала в точке $t_0 - t$:

$$U_{\text{вых}}(t_0 - t) = \frac{1}{2T} \left[e^{-\frac{t_0 - t}{T}} \int_{-\infty}^{t_0 - t} U_{\text{вх}}(t_1) e^{\frac{t_1}{T}} dt_1 + e^{\frac{t_0 - t}{T}} \int_{t_0 - t}^{\infty} U_{\text{вх}}(t_1) e^{-\frac{t_1}{T}} dt_1 \right].$$

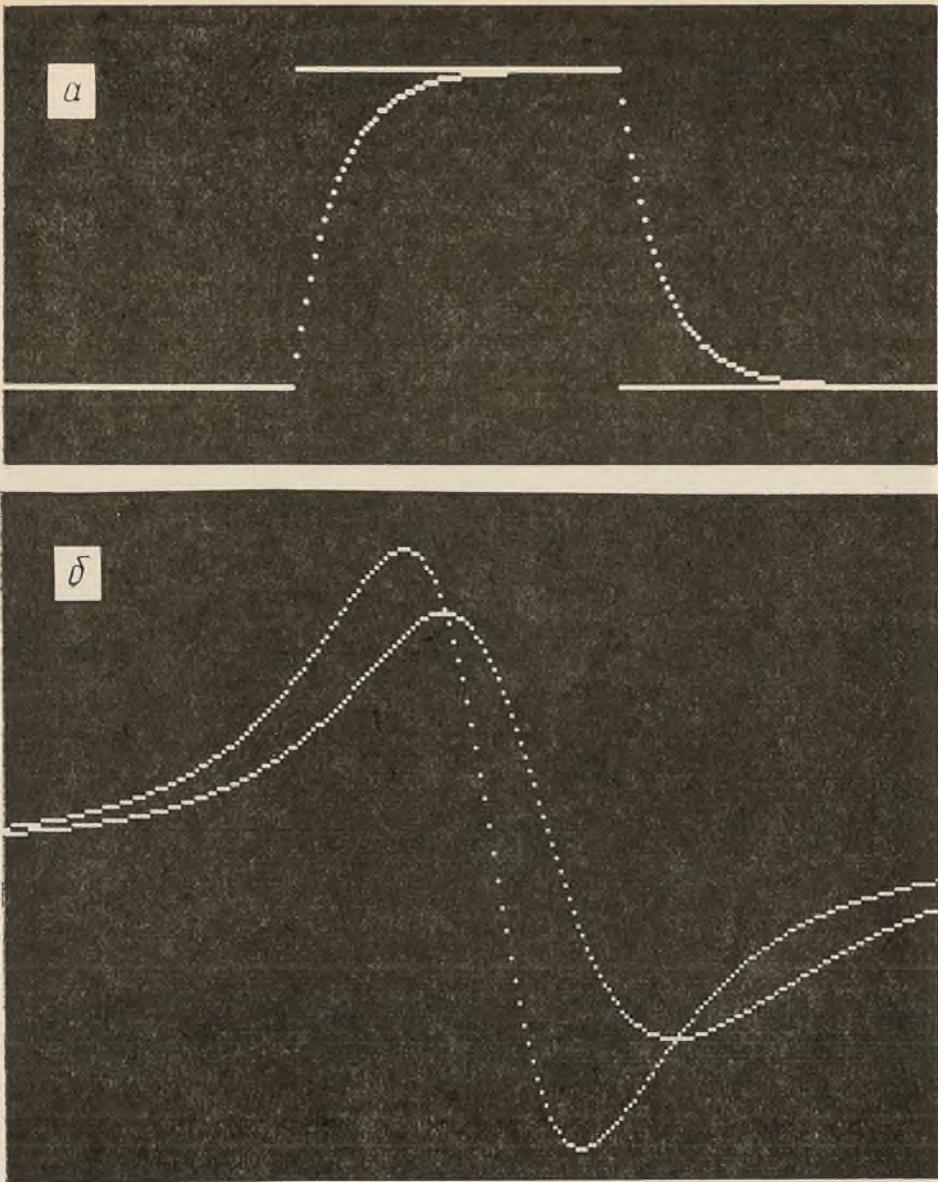


Рис. 1. Искажение сигнала прямоугольной формы (а) и сигнала, являющегося первой производной спектральной линии магнитного резонанса (б), после сглаживания в направлении слева направо

Сделаем замену переменных в подынтегральных выражениях $t'_1 = t_0 - t_1$:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t_0 - t) = \frac{i}{2T} \left[e^{\frac{t+t_0}{T}} \int_{t+t_0}^{\infty} U_{\text{ВХ}}(2t_0 - t'_1) e^{-\frac{t'_1}{T}} dt'_1 + \right. \\ \left. + e^{-\frac{t+t_0}{T}} \int_{-\infty}^{t_0+t} U_{\text{ВХ}}(2t_0 - t'_1) e^{\frac{t'_1}{T}} dt'_1 \right].$$

Учитывая, что $U_{\text{ВХ}}(t_0+t) = U_{\text{ВХ}}(t_0-t)$ ($U_{\text{ВХ}}(2t_0-t) = U_{\text{ВХ}}(t)$), для симметричного относительно t_0 сигнала имеем $U_{\text{ВЫХ}}(t_0-t) = U_{\text{ВЫХ}}(t_0+t)$. Если сигнал антисимметричный ($U_{\text{ВХ}}(t_0+t) = -U_{\text{ВХ}}(t_0-t)$ и $U_{\text{ВХ}}(2t_0-t) = -U_{\text{ВХ}}(t)$), имеем $U_{\text{ВЫХ}}(t_0-t) = -U_{\text{ВЫХ}}(t_0+t)$. Таким образом, смещение резонансного значения магнитного поля полностью компенсируется, если вместо сглаживания в одном направлении с интервалом, равным T ,

произвести сглаживание в прямом и обратном направлениях с интервалами, равными, например, $T/\sqrt{2}$ (указанное соотношение между интервалами «одностороннего» и «двухстороннего» сглаживания обеспечивает одинаковое воздействие на шум). На рис. 2 иллюстрируется воздействие двухстороннего сглаживания на сигнал прямоугольной формы и на производную спектральной линии магнитного резонанса.

Для учета уширения спектральной линии лоренцевой формы методом наименьших квадратов можно с любой необходимой точностью получить функциональную зависимость ширины W_0 измеренной линии от ширины W этой же линии после двухстороннего сглаживания, в которую в качестве параметра входит интервал сглаживания T . При погрешности, равной 2 %, эта зависимость имеет вид:

$$W_0 = W \left[0,225 \left(\frac{T-1}{W} \right)^2 - 1,222 \frac{T-1}{W} + 1,010 \right].$$

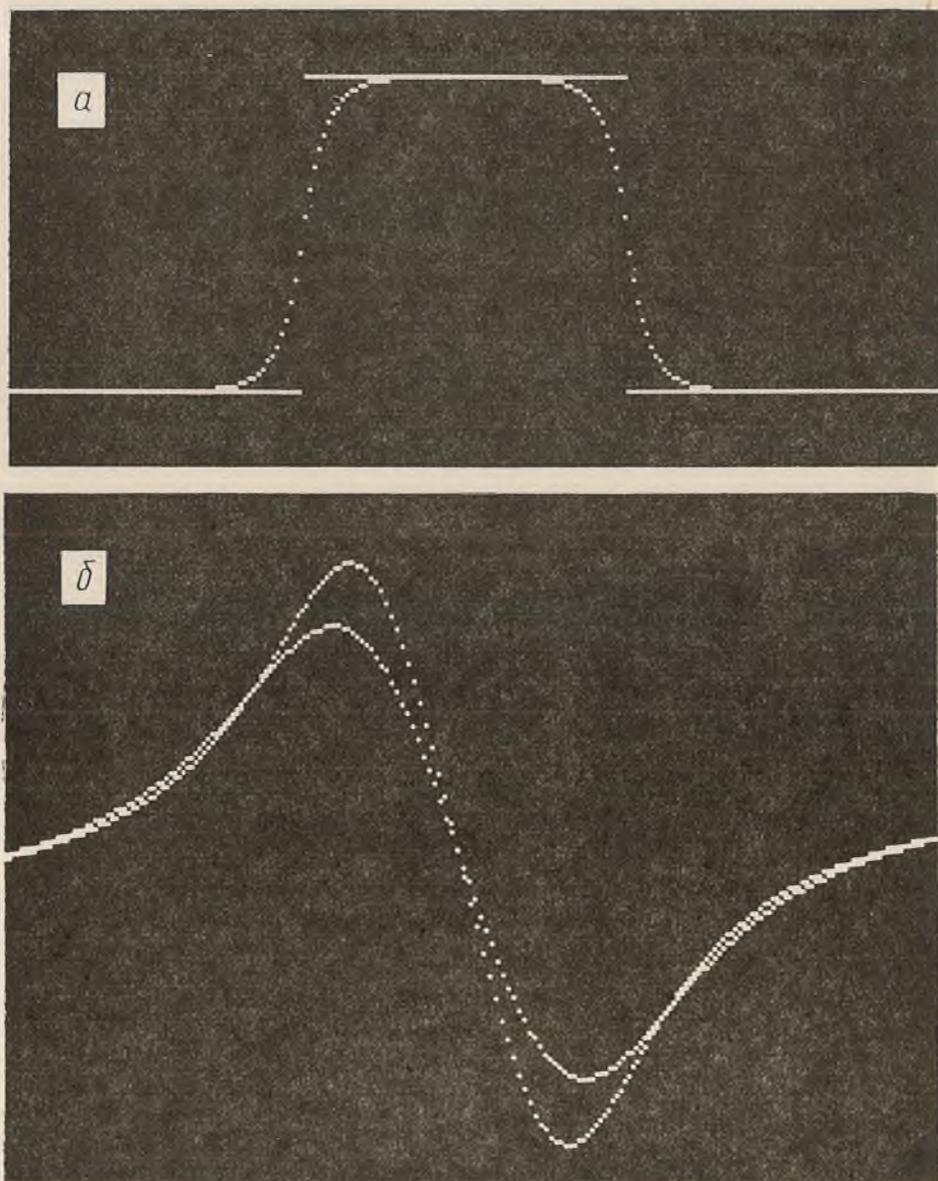


Рис. 2. Искажение сигнала прямоугольной формы (а) и сигнала, являющегося первой производной спектральной линии магнитного резонанса (б), после двухстороннего сглаживания

Данные для применения метода наименьших квадратов были получены из результатов обработки на э. в. м. модельных спектров до и после их сглаживания по описанному алгоритму.

Для использования в информационно-измерительных системах, содержащих микро-э. в. м., алгоритм двухстороннего сглаживания реализован программно на языках Бэйсик [3], Паскаль [4] и Ассемблер [5] в виде подпрограмм. Подпрограмма на Ассемблере является внешней функцией языка Бэйсик и для действий над числами, представленными в формате с плавающей запятой, использует внутренние арифметические подпрограммы этого языка. Время выполнения подпрограмм определяется размером массива экспериментальных данных и быстродействием использованной э. в. м. Если э. в. м. типа Электроника-60 и в массиве 256 элементов, то подпрограмма на языке Бэйсик выполняется 1,5 мин, а подпрограммы на языках Ассемблер и Паскаль — примерно 4 с.

Программная реализация описанного алгоритма включена в программное обеспечение автоматизированного радиоспектрометра ферромагнитного резонанса Гранат-2А, предназначенного для контроля параметров магнитных пленок, а также в программное обеспечение автоматизированного измерителя динамических характеристик цилиндрических магнитных доменов.

Список литературы

1. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Пер. с англ.— М., 1982.
2. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем / Под ред. Ю. М. Смирнова.— М., 1984.
3. Э. в. м. «Электроника-60»: Программное обеспечение, Бэйсик, 0.005.027 ПО, 1978.
4. Уокерли Дж. Архитектура и программирование микро-э.в.м. / Пер. с англ.— М., 1984.
5. Э. в. м. «Электроника-60»: Программное обеспечение, перфоленточная операционная система, 0,005.027 ПО, 1978.

Поступила в редакцию 14.05.85.