

УДК 621.391.8: 550

А.А. Бомбизов

Критерий выбора оконной функции для задач частотно-временного анализа электромагнитного излучения горных пород

Работа посвящена частотно-временному анализу электромагнитного излучения горных пород для определения параметров электромагнитных сигналов, генерируемых при развитии деструктивных процессов в шахтных сооружениях. В статье описывается критерий выбора оконной функции для задач преобразования сигналов в частотно-временное представление, который определяет эффективность подавления побочных гармоник, возникающих в местах разрыва в процессе спектрального преобразования сопутствующей сигналу помехи. Согласно предложенному критерию для различных оконных функций составлена сравнительная таблица по эффективности сохранения признаков сигнала на фоне возникающих побочных гармоник.

Ключевые слова: спектральный анализ, идентификация события, стационарные процессы, частотно-временное преобразование, оконные функции, эффект Гиббса.

В работе [1] описан подход к обработке регистрируемого потока электромагнитного излучения горных пород для выделения импульсных сигналов в условиях электромагнитных помех. Приведен анализ электромагнитных сигналов, аналогичных сигналам горных пород при изменении напряженно-деформированного состояния, с наложением стационарного внешнего воздействия, имитирующего электромагнитную обстановку в реальных шахтных условиях. Описанный способ основан на преобразовании исходного сигнала в частотно-временное представление с последующей статистической обработкой каждой отдельной зависимости амплитуды спектральной составляющей сигнала от времени. Преобразование сигнала в частотно-временное представление выполнялось при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ). Известно [2], что в местах разрыва сигнала при выполнении БПФ появляются ложные гармоники, т.е. возникает эффект Гиббса. Данное явление может маскировать полезный сигнал, обладающий более широким спектром, чем сопутствующая помеха. Для устранения ложных гармоник, возникающих в местах разрыва сигнала, применялось оконное взвешивание. Как правило, рассматриваются разные типы окон с позиции наилучшего разрешения по частоте, подавления боковых лепестков и потерь, вызванных оконным взвешиванием. Для оценки эффективности того или иного окна в настоящей работе предложен критерий спектрального контраста, который заключается в сохранении большего количества признаков присутствия полезного сигнала на фоне стационарной помехи после выполнения БПФ.

Для наглядности демонстрации критерия сформирован тестовый фрагмент электромагнитного излучения, который содержит модель, имитирующую стационарную помеху, и модель импульсного сигнала от рудного тела [3], обладающую синусоидальной формой с экспоненциальным нарастанием и спадом амплитуды. Для имитации стационарной помехи выбран амплитудно-модулированный сигнал с частотой модуляции 3 кГц и несущей частотой 50 кГц. Глубина модуляции 100%. Особенностью данной тестовой модели электромагнитного излучения является совпадение центральной частоты тестового сигнала с несущей частотой помехи. На рис. 1 сплошной линией изображен фрагмент смоделированного электромагнитного излучения.

Известно [4], что при применении оконных функций низкий уровень боковых лепестков способствует лучшей фильтрации от побочных спектральных составляющих, порожденных эффектом Гиббса. Но в то же время низкий уровень боковых лепестков приводит к большим потерям на краях анализируемой дискретной выборки сигнала во временной области (см. рис. 1). Соответственно, при обработке каждой выборки часть сигнала будет необратимо потеряна. Выходом из данной ситуации может быть выполнение обработки с использованием наложения окон. То есть каждая последующая выборка захватывает часть предыдущей (см. рис. 1, окна 1–3). Таким образом, наиболее искаженная часть выборки при следующей обработке будет вблизи максимума главного лепестка

окна. Исходя из этого частотно-временное преобразование в данной работе выполнялось по алгоритму, который заключается в последовательной обработке с частотой дискретизации 1 МГц оцифрованного сигнала выборками по 1024 отсчета с наложением 512 отсчетов. Каждая выборка взвешивается целевым окном и преобразуется в частотное представление при помощи БПФ. Для сокращения избыточных объемов выходных данных, вызванных оконным наложением, амплитуды спектральных составляющих смежных пар оконных выборок усредняются.

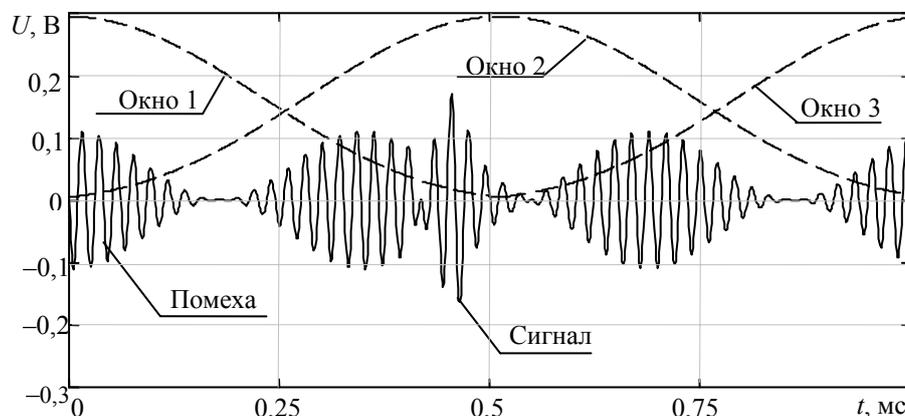


Рис. 1. Тестовый фрагмент суммарного сигнала с помехой

Оценка эффективности оконных функций проводилась в частотной области. Для этого были получены амплитудные спектры выборки фрагмента сигнала с помехой ($S_{С+П}$) и следующей выборки фрагмента ($S_{П}$), в котором присутствует только помеха (см. рис. 2). Базовым для анализа выбрано окно Кайзера с коэффициентом $\beta = 9$.

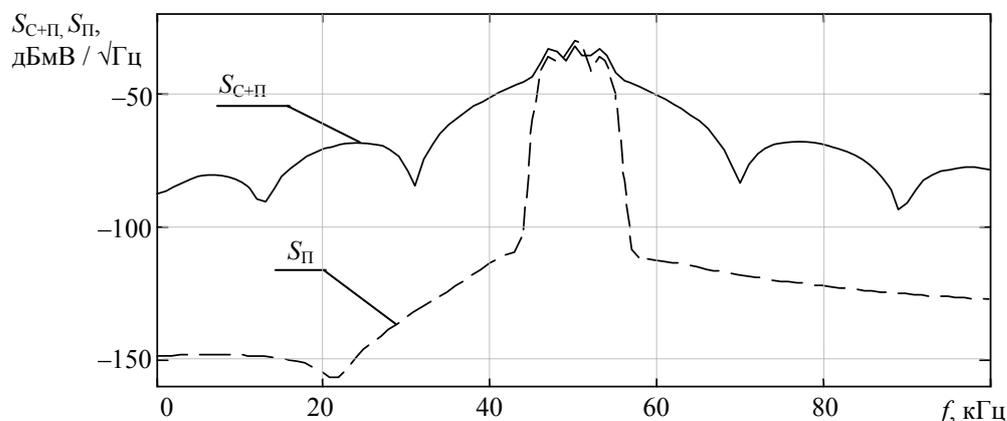


Рис. 2. Амплитудные спектры сигнала с помехой ($S_{С+П}$) и помехи ($S_{П}$), обработанные окном Кайзера

Из приведенной на рис. 2 зависимости сделан вывод, что наиболее высокие значения спектральных амплитуд в характеристике $S_{С+П}$ по сравнению с $S_{П}$ соответствуют признакам сигнала, которые сохраняются на фоне помехи после обработки оконной функцией, что может являться критерием по выбору оптимальной оконной функции для выделения сигнала на фоне стационарной помехи. Для явного выявления признаков сигнала может быть выполнено отношение амплитуд спектральных составляющих сигнала с помехой только к помехе ($S_{С+П} / S_{П}$), полученных с использованием выбранной оконной функции. Далее проведена сравнительная оценка с использованием отношения спектральных амплитуд для окон: Кайзера ($\beta = 9$), Блэкмена и косинусоидальной трапеции (20%). Графики полученных отношений представлены на рис. 3.

В связи с тем, что амплитудный спектр сигнала при отдалении от центральной частоты затухает, то наибольший интерес представляет рассмотрение влияния побочных гармоник в окрестностях центральной частоты. Из полученных на рис. 3 зависимостей можно сделать вывод, что в диапазоне частот 40–60 кГц наиболее эффективным является окно Кайзера.

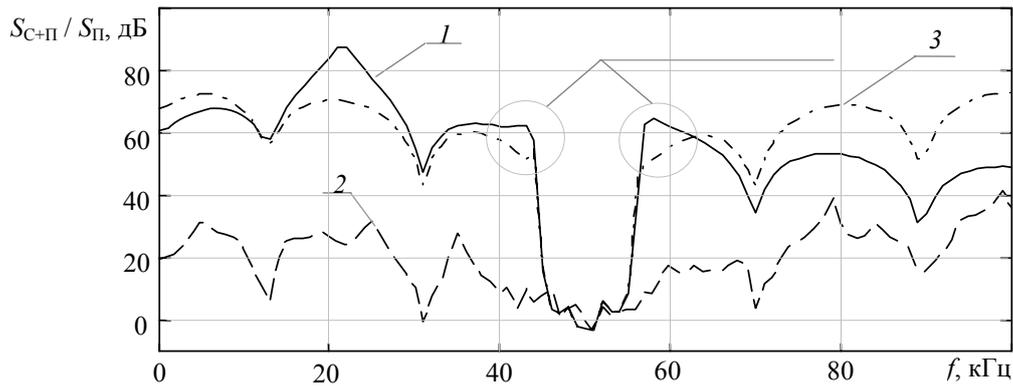


Рис. 3. Отношения амплитуд спектральных составляющих сигнала с помехой ($S_{C+П}$) к помехе ($S_{П}$), обработанные окнами Кайзера (1), косинусоидальной трапеции (2) и Блэкмена (3)

Количественная оценка по представленному критерию для сравнения двух оконных функций в определенном частотном диапазоне проводилась согласно следующему выражению:

$$K_{S1/S2} = \frac{\sum_{i=f_H}^{f_B} S1_{C+П}[i]/S1_{П}[i]}{\sum_{i=f_H}^{f_B} S2_{C+П}[i]/S2_{П}[i]}, \quad (1)$$

где f_B, f_H – верхняя и нижняя частоты выбранного частотного диапазона для сравнения эффективности оконных функций; $S1_{C+П}, S1_{П}$ – амплитуды спектральных составляющих сигнала с помехой и помехи, полученные после обработки первым окном; $S2_{C+П}, S2_{П}$ – после обработки вторым окном.

Согласно выражению (1) составлена сравнительная табл. 1 оценок некоторых оконных функций на примере обработки тестового фрагмента (см. рис. 1) электромагнитного излучения для диапазона частот 40–60 кГц.

Таблица 1

Сравнительная характеристика различных оконных функций, составленная согласно выражению (1)

$K_{S1/S2}$		S2					
		Кайзера ($\beta = 9$)	Чебышева ($A = 80$)	Блэкмена	Гаусса ($\sigma = 3$)	Ханнинга	Косинусоидальной трапеции (20%)
S1	Кайзера ($\beta = 9$)	1	1,45	2,46	4,62	9,11	233,8
	Чебышева ($A = 80$)	0,69	1	1,7	3,2	6,3	161,8
	Блэкмена	0,41	0,59	1	1,88	3,71	95,2
	Гаусса ($\sigma = 3$)	0,22	0,31	0,53	1	1,97	50,6
	Ханнинга	0,11	0,16	0,27	0,51	1	25,7
	Косинусоидальной трапеции (20%)	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,02	0,039	1

Согласно результатам в приведенной таблице наиболее эффективным по подавлению побочных гармонических составляющих и выделению сигнала на фоне помехи является окно Кайзера и превосходит по предложенному спектральному контрасту окно Чебышева в 1,45 раза. С другой стороны, согласно [5] уровень боковых лепестков для окна Кайзера ($\beta = 9$) составляет -66 дБ, а для окна Чебышева ($A = 80$) -80 дБ при ширине главного лепестка 0,108 и 0,105 соответственно. Данные параметры свидетельствуют, что при классическом подходе выбор наиболее эффективного окна должен соответствовать окну Чебышева, а по предложенному критерию выбора наиболее эффективным является окно Кайзера.

По результатам работы сделан вывод, что в задачах частотно-временного анализа электромагнитного излучения важно иметь представление о типах сигналов, которые необходимо оценивать и представлять виды побочного фонового излучения (помехи) анализируемой природной и техногенной среды. Предложенный в данной работе критерий может быть использован для выбора оконной функции, наиболее подходящей для частотно-временного анализа сигналов в присутствии маскирующих шумов и помех.

Литература

1. Бомбизов А.А. Способ спектрально-временного анализа электромагнитного излучения горных пород для обнаружения предвестников геодинамических событий // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31), ч. 1. – С. 69–74.
2. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. – М.: Физматгиз, 1960. – 391 с.
3. Rabinovitch A. Parameterization of Electromagnetic radiation pulses obtained by triaxial fracture in granite samples / A. Rabinovitch, V. Frid, D. Bahat // Philos. Mag. Lett. – 1998. – Vol. 77 (5). – P. 289–293.
4. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. / Л. Рабинер, Б. Гоулд; ред. Ю.Н. Александрова. – М.: МИР, 1978. – 846 с.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.

Бомбизов Александр Александрович

Мл. науч. сотрудник СКБ «Смена» ТУСУРа

Тел: +7-903-951-15-24

Эл. почта: unclclab@gmail.com

Bombizov A.A.

Criterion for choice of a window function for time-frequency analysis of the electromagnetic radiation from rocks

The paper describes a method of time-frequency analysis and processing of electromagnetic radiation from rocks to determine the parameters of electromagnetic signals generated by the development of destructive processes in the mine facilities. The article describes the criterion for choose of a window function for time-frequency signal conversion, which contains quotient in the amplitudes of the spectral components of a signal and the estimated amount of harmonic interference to the interference only. The resulting characteristic determines the degree of preservation of evidence of signal from noise in the processing of the selected window.

Keywords: spectral analysis, identification of the event, stationary processes, time-frequency transform, window functions, Gibbs effect.