

К ВОПРОСУ О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ В РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

Шматов А. А.

В релаксационной спектроскопии глубоких уровней сложилась некоторая неопределенность в вопросах выбора корреляционных функций. В работе проведен анализ корреляционных функций с точки зрения требований к разрешающей способности и чувствительности. Представлены результаты расчетов основных переходных характеристик дискриминатора с использованием различных весовых функций. Рассмотрены функции, которые применимы для дискриминаторов, работающих в ключевом режиме. Данный способ выделения релаксационного сигнала с заданной постоянной времени представляет особый интерес, который обусловлен его высокой линейностью и большим отношением сигнал—шум. Сделаны выводы, которые, в частности, могут служить критерием применимости той или иной функции.

В литературе обсуждался вопрос об использовании в дискриминаторах установок релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) различных корреляционных функций [1]. Оказалось, что традиционное устройство «boxcar», в котором применены узкие стробирующие импульсы [2], не является оптимальным с точки зрения максимального отношения сигнал—шум. Анализ показал, что отношение сигнал—шум пропорционально квадратному корню из ширины стробирующих импульсов [3]. Например, РСГУ метод с использованием биполярной прямоугольной весовой функции [4] имеет фактор сигнал—шум приблизительно в 3 раза лучше, чем в традиционном методе узких стробирующих импульсов [5]. Вторым важным параметр в РСГУ — это разрешающая способность. Известны попытки оптимизации корреляционной функции с целью повышения разрешающей способности в рамках традиционных «узких стробов» [6]. Однако повышение разрешающей способности за счет увеличения отношения t_1/t_2 (t_1 , t_2 — времена задержки соответственно первого и второго стробирующих импульсов относительно начала релаксации) неизбежно приводит к уменьшению коэффициента передачи дискриминатора и, как следствие, к уменьшению чувствительности установки. Увеличение разрешающей способности также за счет уменьшения чувствительности характерно и для знакопеременных корреляционных функций сложной формы [7].

Далее, в уже упомянутой работе [1] сравнение проведено только для экспоненциальной, синусоидальной функций и функции в виде меандра. Кроме этого, для характеристики качества функций использовался параметр M , определяемый формулой

$$M = \frac{N}{L},$$

где N — отношение сигнал—шум на вершине пика; L — ширина пика, определяемая на уровне, равном половине его высоты. Использование для сравнения параметра M неудобно хотя бы потому, что по нему нельзя судить о разрешающей способности.

Существующая неопределенность в вопросах выбора корреляционных функций усугубляется в настоящее время обстоятельством, связанным с новыми методами обработки РСГУ спектров. Эти методы основаны на извлечении информации со всей РСГУ кривой и имеют несомненные преимущества по сравнению

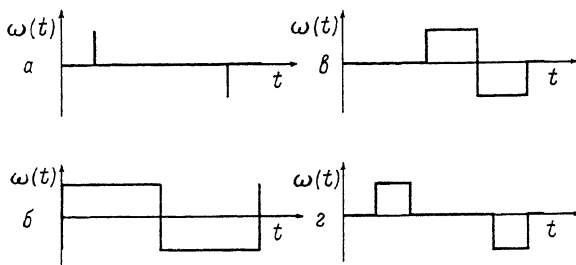


Рис. 1. Типы корреляционных функций.

a — узкие строб-импульсы, *б* — «синхронное детектирование», *в* — биполярная прямоугольная весовая функция, *г* — широкие строб-импульсы.

с традиционным методом, использующим точки максимума пиков РСГУ спектра [8–11]. Новый качественный этап в развитии методов обработки результатов РСГУ измерений открывает использование моделирования [12]. Вычисление параметров глубоких центров при этом сводится к сопоставлению по форме кривой теоретической с кривой экспериментальной. Вычисления проводятся на ЭВМ, так как связаны с обработкой больших массивов данных. Параметры теоретической кривой последовательно циклически корректируются. Таким образом, осуществляется автоматическая подгонка теоретической кривой под экспериментальную. При неудовлетворительном совпадении этих кривых можно изменить предполагаемое количество пиков, составляющих теоретическую РСГУ кривую. При удовлетворительном совпадении параметры теоретической кривой полагают равными истинным значениям. Методу обработки РСГУ спектров, основанному на моделировании, свойственны высокая точность и широкие возможности: для обработки может использоваться практически любой участок РСГУ кривой; нет необходимости использовать несколько «окон эмиссии»: метод применим для обработки сложного спектра, состоящего из перекрывающихся пиков; возможно получение непосредственно из формы РСГУ кривой, например температурной зависимости сечения захвата. Метод моделирования является мощным методом обработки РСГУ спектров, но и использование его требует достаточно хорошей предварительной аналоговой обработки сигнала. Спектр должен быть без искажений. Для этого необходима высококачественная аппаратура с широким динамическим диапазоном и высокой линейностью. В случаях, когда перекрываются отдельные пики, принципиальными становятся селективные свойства дискриминатора, зависящие от типа корреляционной функции. От типа используемой в дискриминаторе корреляционной функции зависят также отношение сигнал—шум, чувствительность.

Рассмотрим основные типы корреляционных функций ключевых умножителей (рис. 1). Они предназначены для использования в дискриминаторах, коэффициент передачи которых может принимать только значения $-1, 0, +1$.

Традиционный метод «узких строб-импульсов» [2] состоит в получении разности величин сигнала, измеренных за бесконечно малые отрезки времени. Реально выборка сигнала осуществляется за время Δt , меньшее или порядка $T/100$ (T — период измерений). Тип такой корреляционной функции изображен на рис. 1, *a*. В методе «синхронного детектирования» [1] весь отрезок от начала релаксации до окончания ее измерения делится на две равные части (рис. 1, *б*). Величины средних значений сигнала этих частей вычитаются друг из друга, затем разность сигналов пропускается через фильтр нижних частот. В методе биполярной прямоугольной весовой функции [4] в отличие от метода синхронного детектирования вводится задержка начала измерения, т. е. существует начальный участок, где корреляционная функция равна нулю (рис. 1, *в*). Наконец при наличии зазора между биполярными импульсами мы имеем дело просто с широкими стробирующими импульсами (рис. 1, *г*).

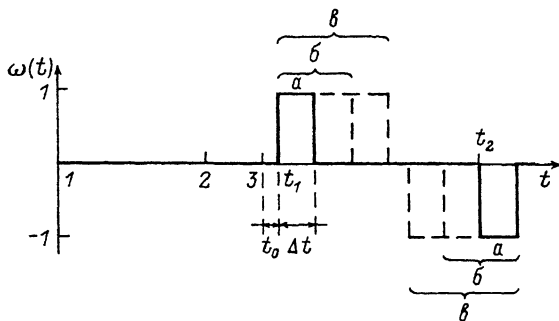


Рис. 2. Варианты корреляционных функций.

Буквы характеризуют ширину стробирующих импульсов, цифры — время начальной задержки.

Для сравнения используем общий случай, который будет охватывать и достаточно близко соответствовать вышеупомянутым функциям. В целях удобства сравнения рассмотрим плавный переход функций из одной в другую. На рис. 2 изображены девять вариантов функций с различными относительными шириной стробирующих импульсов, зазором между импульсами (обозначено буквами $a-\theta$) и временем начальной задержки (обозначено цифрами 1—3). Можно заметить, что функции, изображенной на рис. 1, a , близко соответствует вариант $1a$ ($2a$, $3a$), рис. 1, b — вариант 3θ , рис. 1, θ — вариант 1θ , рис. 1, z — вариант 2θ (3θ , 2θ).

Для одиннадцати различных вариантов корреляционных функций (кроме вариантов, изображенных на рис. 2, также два варианта для традиционного метода узких строб-импульсов) были проведены расчеты коэффициента передачи K ($K = S_{\max}/C$, где S_{\max} — значение величины РСГУ сигнала в максимуме пика; C — амплитуда релаксирующей части сигнала), относительного окна эмиссии x_0 ($x_0 = \tau_0/t_0$, где τ_0 — постоянная времени, выделяемая дискриминатором, т. е. окно эмиссии; t_0 — время дискретности в соответствии с рис. 2), ширины пика на уровне, равном половине его высоты L , и параметра, характеризующего относительную чувствительность E ($E = K \sqrt{\Delta t/\Delta t_a}$, где Δt_a — ширина стробирующих импульсов варианта a). Результаты расчетов приведены в таблице. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

Целесообразность применения той или иной функции зависит от требований к разрешающей способности и чувствительности.

Если необходимо получить высокую чувствительность, следует применять корреляционную функцию, которая близка к варианту 3θ . Общая ширина выборки по времени при этом составляет меньше половины от всей длительности сигнала релаксации. Несмотря на это, выигрыш получается за счет более высокого коэффициента передачи, который компенсирует незначительное уменьшение отношения сигнал—шум. По сравнению с вариантом 3θ , который можно рассматривать как значительно разнесенные строб-импульсы [6], вариант 3θ обес-

Тип функции	$\Delta t/t_0$	t_1/t_0	t_2/t_0	K	x_0	L	E
$1a$	2	12	23	0.22	17.9	12.0	0.22
$2a$	2	4	15	0.41	9.4	13.4	0.41
$3a$	2	1	12	0.61	5.8	17.6	0.61
1θ	4	12	21	0.18	18.1	11.9	0.26
2θ	4	4	13	0.33	9.7	12.9	0.46
3θ	4	1	10	0.48	6.3	15.5	0.68
1θ	6	12	19	0.14	18.1	11.9	0.24
2θ	6	4	11	0.25	9.8	12.7	0.44
3θ	6	1	8	0.37	6.4	14.9	0.64
4	$\Delta t \rightarrow 0$	$t_1/t_2 = 0.5$		0.25	—	12.1	—
5	$\Delta t \rightarrow 0$	$t_1/t_2 = 0.1$		0.70	—	20.8	—

печивает также и более высокую разрешающую способность: величина L равна 17.6 и 15.5 для $3a$ и $3b$ соответственно.

Для получения высокой разрешающей способности следует пользоваться функциями типа $1b$, $1в$ или $1a$. При этом преимущество опять принадлежит варианту со средней шириной импульсов, так как по чувствительности он лучше.

Что касается функции универсального применения, т. е. обеспечивающей компромиссное сочетание большой чувствительности и высокой разрешающей способности, то она должна быть близка к варианту $2b$.

Можно заметить, что приведенные в таблице данные расчетов имеют небольшие различия. Это связано с узким диапазоном параметров функций, которые сравниваются. Однако диапазон параметров, в котором проведены расчеты, является достаточным. Действительно, в крайних случаях, например для $t_1/t_2 \rightarrow 1$ (речь идет об узких строб-импульсах), уже при $t_1/t_2 \rightarrow 0.9$ величина L принимает значение около 11.5 и выходит в насыщение. Если еще учесть, что при этом значение K становится меньше, чем 0.04, то становится очевидным — дальнейшее увеличение отношения t_1/t_2 не имеет смысла. Также не имеет смысла рассматривать большое разнесение стробирующих импульсов. При $t_1/t_2 < 0.1$ величина L почти в 2 раза больше, чем при $t_1/t_2 = 0.5$. Выигрыша в чувствительности при этом нет.

В данной работе обсуждаются те корреляционные функции, которые пригодны для умножителей, работающих в ключевых режимах. Принято считать [1], что идеальной корреляционной функцией является экспонента. Однако аналоговые линейные перемножители, в которых можно использовать экспоненциальную, синусоидальную или еще какую-нибудь плавно изменяющуюся функцию, широко не используются. Это связано с проблемой компенсации нерелаксирующей части сигнала, низкой линейностью (что принципиально при использовании для обработки всей кривой) и сложностью схемы. Отличие в разрешающей способности при использовании экспоненциальной функции по сравнению, например, с вариантом функции $1b$ весьма мало. Кроме того, получение чувствительности такой же, как в случае применения ключевых умножителей, требует усложнения установки, так как дискриминаторы на основе аналоговых линейных перемножителей имеют значительно более узкий динамический диапазон (обычно на 2 порядка ниже) и высокий уровень шумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Miller G. L., Ramirez J. V., Robinson D. A. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 6. P. 2638—2644.
- [2] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [3] Day D. S., Tsai M. J., Streetman B. G., Lang D. V. // Appl. Phys. 1979. V. 50. N 8. P. 5093—5098.
- [4] Tokuda Y., Shimizu N., Usami A. // Japan. J. Appl. Phys. 1979. V. 18. N 2. P. 309—315.
- [5] Tokuda Y., Hayashi M., Usami A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1981. V. 14. N 5. P. 895—898.
- [6] Thuber W. R., Forman R. A., Phillips W. E. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 11. P. 7397—7400.
- [7] Crowell C. R., Alipanahi S. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. N 1. P. 25—36.
- [8] Bloa A. Le., Favennec P. N., Colin Y. // Phys. St. Sol. (a). 1981. V. 64. N 1. P. 85—91.
- [9] Васильев А. В., Смагулова С. А., Шаймеев С. С. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 1. С. 162—164.
- [10] Shapiro F. R., Senturia S. D., Adler D. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. N 10. P. 3453—3459.
- [11] Hjalmarson H. P., Samara G. A., Farmer J. W. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 5. P. 1801—1804.
- [12] Белокурова И. Н., Третьяк О. В., Шаховцова С. И., Шварц М. М., Шматов А. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 10. С. 1869—1873.