

УДК 621.396.96 : 621.391.26

ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ И ИНТЕГРИРОВАНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ В СПИНОВЫХ ЭХО-ПРОЦЕССОРАХ

М. М. Ковалевский, Э. О. Сааков, В. Б. Устинов

Показано, что выбором надлежащей формы управляющего радиопульса в спиновом эхо-процессоре возможно осуществить n -кратное дифференцирование или интегрирование финитных радиосигналов. Простая модификация метода позволяет осуществить измерение моментов линии поглощения вещества.

В [1,2] показана возможность создания на основе эффекта спинового эха многофункционального устройства обработки финитных радиосигналов с достаточно произвольной структурой — эхо-процессора. В [1-4] найдено, что в эхо-процессоре может быть осуществлена как авто- и взаимокорреляционная обработка финитных сигналов, так и сложение, перемножение и комплекс других операций над сигналами. В эхо-процессорах возможен спектральный анализ сигналов [2,4] и проведение ряда алгебраических операций над спектрами сигналов [2]. Можно показать, что при воздействии на спиновую систему трех импульсных сигналов при некоторых условиях возможно дифференцирование и интегрирование сигналов.

Из [1,2,4] известно, что спектр сигнала стимулированного эха в малосигнальном приближении связан со спектрами сигналов соотношением (рис. 1)

$$S_{\text{эхо}}(\omega) \cong K g(\omega) S_1^*(\omega) S_2(\omega) S_3(\omega), \tag{1}$$

где $K = \text{const}$, $S_i(\omega)$ — спектры сигналов, действующих на спиновую систему, $g(\omega)$ — функция, описывающая форму неоднородно-уширенной линии поглощения рабочего вещества. Выражение (1) согласуется при малых ($\gamma H_i \tau_{ni} < \pi/6$) сигналах с соотношениями [5,6], полученными для случая, когда на вещество действуют импульсы с прямоугольной огибающей. Здесь H_i и τ_{ni} — амплитуда и длительность i -го импульса соответственно, $i = 1, 2, 3$, γ — гиромагнитное отношение.

Рассмотрим идеализированный случай. Пусть первый («стартовый») сигнал является δ -импульсом, а спектры второго и третьего сигналов существенно уже линии поглощения.

Тогда (1) преобразуется к виду

$$S_{\text{эхо}}(\omega) \cong K_1 S_2(\omega) S_3(\omega),$$

где $K_1 = K g_{\text{max}} S_\delta$ — постоянный коэффициент, S_δ — спектр δ -импульса.

Поскольку спектр эхо-сигнала выражен через произведение спектров, эхо-сигнал является сверткой второго и третьего сигналов:

$$m_{\text{эхо}}(t) \cong K_1 \int_{-\infty}^{\infty} R_2(\tau) R_3(t - \tau) d\tau, \tag{2}$$

где $R_{2,3}(t)$ — функции, описывающие временную форму сигналов. Пусть

$$R_3(t) \cong (d^n/dt^n) \delta(t), \tag{3}$$

где n — произвольное целое число, тогда из (2) сразу следует

$$m_{\text{эхо}}(t) \cong K_1(d^n/dt^n)R_2(t). \quad (4)$$

Если $R_3(t) = \theta(t)$ — функция Хевисайда, то

$$m_{\text{эхо}}(t) \cong K_1 \int_{-\infty}^t R_2(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Повторение процедуры эквивалентно повторному интегрированию и т. д.

Таким образом, из (4) и (5) можно заключить, что эхо-процессор может быть использован как в качестве идеального интегратора [7], так и для вычисления производных сигнала произвольного порядка. Вид операции над сигналом определяется формой третьего, управляющего импульса. Смена типа управляющего импульса автоматически влечет изменение вида операции.

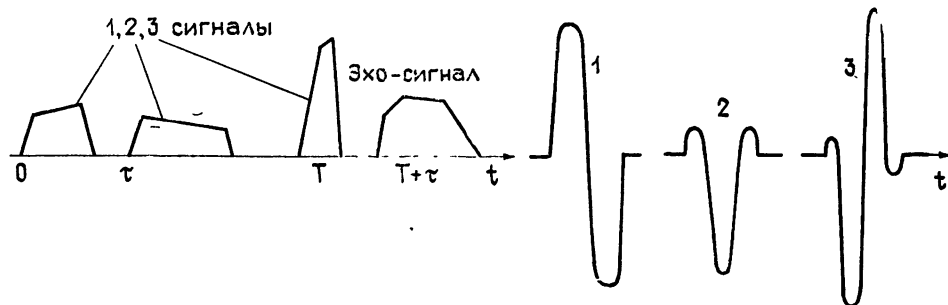


Рис. 1. Временная диаграмма работы эхо-процессора при воздействии трех сигналов.

Рис. 2.

В реальной ситуации соотношения (4) и (5) могут быть получены только приближенно. Точность дифференцирования будет определяться точностью формирования стартового δ -импульса и точностью формирования управляющего импульса $(d^n/dt^n)\delta(t)$, определяющей и максимальный порядок дифференцирования n . Поскольку невозможно в экспериментах использовать управляющий импульс в виде функции $\theta(t)$, необходимо для интегрирования сигналов использовать в качестве управляющих импульсы с прямоугольной огибающей, длительность которых $\tau_n \gg 1/\Delta\omega_H$, где $\Delta\omega_H$ — ширина линии поглощения. С другой стороны, чтобы релаксационные процессы в веществе не искажали форму сигнала эха [8], необходимо выполнение условия $\tau_n \ll T_2$, где T_2 — время спин-спиновой релаксации вещества. Длительность δ -импульса τ_δ должна быть настолько короткой, чтобы его спектр в пределах линии поглощения был примерно постоянным ($\tau_\delta \ll 1/\Delta\omega_H$). Если линия поглощения настолько широка, что формирование δ -импульса является затруднительным, для управления эхо-процессором вместо δ -импульса можно использовать сложные широкополосные импульсные сигналы, например импульсы с линейной частотной модуляцией, имеющие спектр, близкий к прямоугольному в заданной полосе частот. На рис. 2 изображены огибающие управляющих радиоимпульсов для получения эха в виде первой, второй и третьей производных сигнала (изменение знака огибающей эквивалентно изменению фазы высокочастотного заполнения на π).

Дифференцирование и интегрирование сигналов можно осуществить и при двухимпульсной схеме работы эхо-процессора [4], но форма управляющего сигнала при этом оказывается более сложной.

Аналогично может быть показана возможность использования эхо-процессора для измерения моментов линии поглощения, знание которых позволяет уточнить природу внутренних взаимодействий в веществе. Если первые два сигнала являются δ -импульсами, а третий — управляющим, то спектр эхо-сигнала примет вид

$$S_{\text{эхо}}(\omega) = K_2 g(\omega) S_3(\omega), \quad (6)$$

$K_2 = KS_3^2$. Следовательно, эхо-сигнал может быть записан в форме свертки (2):

$$m_{\text{эхо}}(t) = K_2 \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\tau) R_3(t - \tau) d\tau,$$

$$\text{где } \Gamma(\tau) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega.$$

Если управляющий сигнал выбрать в виде (3), то сигнал эха можно представить аналогично (4):

$$m_{\text{эхо}}(t) = K_2 (d^n/dt^n) \Gamma(t). \quad (7)$$

Определяя момент n -го порядка линии поглощения (см., например, [9])

$$M_n = [(-1)^{n/2} / \Gamma(0)] (d^n/dt^n) \Gamma(t) |_{t=0},$$

можно заключить, что значение эхо-сигнала (7), взятое в момент времени $t = T + \tau$ (рис. 1), пропорционально значению n -го момента линии поглощения.

Таким образом, с помощью спиновых эхо-процессоров можно осуществить операции многократного дифференцирования и интегрирования финитных радиосигналов, что может оказаться полезным при разработке специализированных аналоговых вычислительных устройств. Возможно также упрощение [9] методики измерения моментов линий поглощения веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устинов В. Б., Рассветалов Л. А., Ковалевский М. М. — Изв. Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина), 1974, вып. 135, с. 10.
2. Касаткин А. В., Протодьяконов А. М., Рассветалов Л. А., Сааков Э. О., Устинов В. Б. — Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи, 1977, вып. 3, с. 110.
3. Mims W. B. — Proc. IEEE, 1963, 51, p. 1127.
4. Соколов С. Л., Иванов Ю. В. — Радиотехника и электроника, 1979, 24, с. 99.
5. Fernbach S., Proctor W. G. — J. Appl. Phys., 1955, 26, p. 170.
6. Померанцев Н. М. — УФН, 1958, 65, с. 87.
7. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. — М.: ИЛ, 1963.
8. Евстигнеев Ю. Ф., Ковалевский М. М. — Вопросы обработки сигналов. Межвузовский сб., 1978, вып. 2, с. 140.
9. Лундин А. Г., Федин Э. И. Ядерный магнитный резонанс. — Новосибирск: Наука, 1980.

Новгородский политехнический институт

Поступила в редакцию
23 июня 1981 г.

DIFFERENTIATION AND INTEGRATION OF RADIO SIGNALS IN SPIN ECHO PROCESSORS

M. M. Kovalevskij, Eh. O. Saakov, V. B. Ustinov

It is shown that by choosing the proper form of the controlled radio pulse in a spin echo processor one may perform n -multiple differentiation or integration of finite radio signals. A simple modification of the method permits to measure moments of the matter absorption line.