

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 512.942 + 539.12; 539.21; 530.15 (043.5)

© В. И. Тарханов

ПРИНЦИП РАБОТЫ СПИНОВОГО ЭХО-ПРОЦЕССОРА

Представлена модель обработки информации в одном цикле работы спинного эхо-процессора. Она является обобщением матричных, диаграммных и алгебраических методов расчета зависимости параметров эхо-сигналов от параметров информационных и управляющих радиоимпульсов возбуждающей последовательности. Показана структура цикла работы. Вводится понятие регистровой структуры эхо-процессора и операторов ввода информации. Показаны принципы формирования потоков информации по различным траекториям переноса когерентности. Модель позволяет проследить за прохождением информации через многоканальную регистровую структуру спинного эхо-процессора и определить условия оптимального отображения полезных результатов на его выходе.

ВВЕДЕНИЕ

Спиновый эхо-процессор — это вычислительное устройство, работающее на голографическом принципе ввода, хранения, преобразования и вывода информации. Он состоит из образца рабочего вещества, помещенного в пространственно неоднородное статическое магнитное поле и в пучность магнитного поля электродинамической системы, а также вспомогательных радиотехнических цепей, обеспечивающих оптимальное возбуждение образца и регистрацию генерируемых им когерентных откликов, называемых эхо-сигналами. Эхо-процессор прост и технологичен в изготовлении, обладает малыми габаритами, массой и энергопотреблением. В то же время ему присущ ряд качеств, свойственных лишь цифровым процессорам, а именно: наличие памяти и регистровой структуры [1], гибкость управления и многообразие функциональных возможностей [2], способность хранить в пределах активного интервала цикла работы результаты математических операций и возможность их поочередного селективного отображения на выходе устройства. Эффективность применения спинных процессоров в сложных измерительных, радиолокационных, навигационных и связанных системах зависит от степени совершенства, наглядности и удобства практического использования модели процессов, лежащих в основе ввода, хранения, преобразования и вывода информации в устройствах этого типа.

На первых этапах для расчета операций обработки использовалось в основном спектральное представление [2, 3], справедливое лишь в слабосигнальном приближении, при линеаризации законов эволюции спинной системы. Оно хорошо описывало обработку слабых одиночных сигналов и позволяло сопоставить возможности спинного эхо-процессора с возможностями других линей-

ных аналоговых устройств. Однако этот подход оказался несостоятельным в наиболее интересных с практической точки зрения случаях, когда амплитуда эхо-сигналов достигала своего максимального значения. Причиной тому является нарушение принципа суперпозиции для неколлинеарных составляющих вектора результирующего магнитного поля при возбуждении изохромат с расстройкой.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Поэтому была разработана более совершенная модель [4], свободная от каких-либо предварительных ограничений. Она является обобщением матричных [5, 6], диаграммных [7–9] и алгебраических [11–13] методов расчета эхо-сигналов и основывается на независимых трехмерных вращениях векторов намагниченности отдельных изохромат под действием всей совокупности информационных и управляющих радиоимпульсов, а также на прослеживании эволюции соотношений когерентности между их продольными и поперечными составляющими.

Рассмотрим ее на простом примере спинного эхо-процессора, который представляет собой образец парамагнитного рабочего вещества заданной формы с объемом V , помещенный в пространственно неоднородное статическое магнитное поле $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ и в область пучности магнитного поля электродинамической системы. В образце содержится ансамбль невзаимодействующих между собой малоподвижных частиц со спином $1/2$, обладающих магнитным моментом. Пусть частицы распределены в образце с постоянной плотностью ρ и характеризуются в магнитном поле равновесным значением намагниченности M_0 , гиромангнитным отношением γ , временами продольной T_1 и попереч-

ной T_2 релаксации. Зададим однородную ориентацию статического магнитного поля ортом $\mathbf{e}_3$ лабораторной системы координат $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$, а пространственную неоднородность его величины — линейным градиентом $G_y = \partial B / \partial y$ вдоль орта $\mathbf{e}_2$. Через $[B_1, B_2]$ обозначим интервал значений величины этого поля в объеме образца, а через $B_0 = (B_1 + B_2) / 2$ — значение поля в центре образца с координатами (x_0, y_0, z_0) .

Электродинамическая система формирует в объеме образца информационные и управляющие импульсы радиочастотного магнитного поля с линейной поляризацией вдоль орта $\mathbf{e}_1$ и регистрирует отклики спиновой системы по эдс индукции, наводимой в катушке индуктивности приемного контура. Ось этой катушки также ориентируем вдоль орта $\mathbf{e}_1$. Амплитуду радиочастотного магнитного поля и чувствительность приемной катушки в объеме образца будем считать однородными.

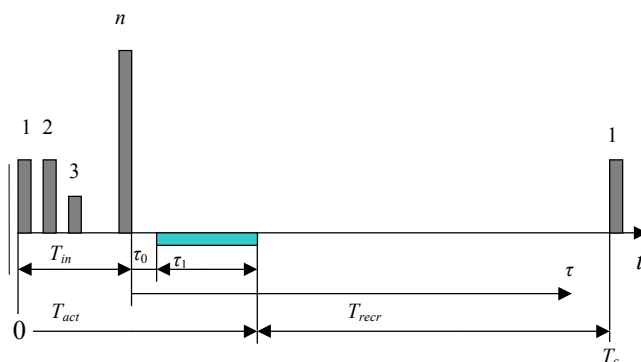
ОПИСАНИЕ ЦИКЛА РАБОТЫ ЭХО-ПРОЦЕССОРА

Структура одного цикла работы эхо-процессора схематически изображена на рисунке.

Цикл состоит из двух неравных интервалов времени $T_c = T_{act} + T_{recr}$: малого активного T_{act} , в течение которого к образцу рабочего вещества прикладываются информационные и управляющие воздействия и регистрируются генерируемые им когерентные отклики в виде эхо-сигналов, и большого пассивного T_{recr} , в течение которого спиновая система образца восстанавливает исходное равновесное состояние под действием естественных процессов релаксации.

В режимах работы с одним управляющим воздействием (двухимпульсная система) длительность активного интервала T_{act} обычно не превышает значения $3T_2$. Это значение выбирается из расчета, чтобы под действием релаксационных процессов выходные сигналы ослаблялись не более чем в 20 раз относительно их максимально возможной величины. В режимах с двумя управляющими воздействиями (трехимпульсная система) этому же критерию соответствует значение $T_1 + 2T_2$.

Время восстановления T_{recr} обычно выбирают из расчета полного восстановления равновесной намагниченности. Восстановлению с точностью до 95 % соответствует $T_{recr} = 3T_1$. Дальнейшее увеличение времени восстановления уменьшает эффективность работы устройства, в то время как его



Цикл работы спинового эхо-процессора

сокращение приводит к уменьшению амплитуды выходных сигналов и к появлению дополнительных эхо-сигналов за счет интерференции следов от возбуждений в различных циклах работы. Последнее ухудшает отношение "сигнал/шум" и поэтому является нежелательным.

Активный интервал состоит из интервала ввода входной информации T_{in} , технологического интервала τ_0 и интервала регистрации полезных выходных сигналов τ_1 . В интервале T_{in} к образцу прикладывается вся последовательность информационных и управляющих радиоимпульсов. Интервал τ_0 определяет задержку включения приемника с целью предотвращения его насыщения мощными управляющими воздействиями и отсекация ненужных сигналов стимулированного эха. Интервал τ_1 определяет время, на которое включается приемник для регистрации полезных выходных сигналов.

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ЭХО-ПРОЦЕССОРА

Рабочими элементами спинового эхо-процессора являются изохроматы — мезоскопические ансамбли частиц, обладающих одинаковым значением собственной частоты прецессии $\omega = \gamma B$, на которые спиновая система образца расслаивается в пространственно неоднородном статическом магнитном поле. В качестве параметра расслоения удобно использовать расстройку $\delta = \omega - \omega_0$ собственной частоты ω относительно значения $\omega_0 = \gamma B_0$ в центре распределения. Этот параметр, играющий центральную роль в процес-

сах обработки информации, принимает значения в интервале $[-\Gamma, \Gamma]$, где

$$\Gamma = \frac{1}{2}\gamma(B_2 - B_1). \quad (1)$$

Число независимых изохромат в образце определяется шириной интервала $[-\Gamma, \Gamma]$ и разрешающей способностью частиц по значениям локального магнитного поля. Если последняя ограничена шириной лоренцевой линии магнитного резонанса отдельной изохроматы, то максимальное число неперекрывающихся изохромат оценивается величиной $N = \Gamma T_2$. Для достаточно хороших образцов рабочего вещества это число имеет порядок 10^4 и более.

Каждая изохромата характеризуется скалярной величиной M^δ и единичным вектором ориентации $\mathbf{m}^\delta$ мезоскопического вектора намагниченности $\mathbf{M}^\delta = M^\delta \mathbf{m}^\delta$. Рассматривая идеализированную схему процесса обработки информации, пренебрежем действием процессов релаксации в активном интервале цикла работы T_{act} . Тогда скаляр M^δ становится в нем интегралом движения, и все операции обработки оказываются связанными главным образом с динамикой изменения ориентаций единичных векторов $\mathbf{m}^\delta$. Распределение значений величины M^δ , определяющее форму неоднородно уширенной линии магнитного резонанса образца, проявляет себя в качестве одного из весовых множителей лишь на этапе вывода информации из спиновой системы.

Множество различных ориентаций вектора $\mathbf{m}^\delta$ относительно ортов $\mathbf{e}_1$, $\mathbf{e}_2$ и $\mathbf{e}_3$ лабораторной системы координат определяет пространство состояний соответствующего рабочего элемента. Наличие статического магнитного поля вносит в это пространство анизотропию и делает удобным использование ненормированного сферического базиса

$$\{(\mathbf{e}_1 P)^\delta, (\mathbf{e}_3)^\delta, (\mathbf{e}_1 N)^\delta\}, \quad (2)$$

связанного с его ориентацией. Здесь $P = \frac{1}{2}(1 + \mathbf{e}_3)$

и $N = \frac{1}{2}(1 - \mathbf{e}_3)$ есть базисные паравекторы [14], обладающие рядом полезных свойств: $P^2 = P$, $N^2 = N$, $P + N = 1$, $P - N = \mathbf{e}_3$, $PN = NP = 0$. В матричном представлении алгебры G_3

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

и этот базис принимает вид

$$(\mathbf{e}_1 P)^\delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^\delta, \quad (\mathbf{e}_3)^\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}^\delta, \quad (4)$$

$$(\mathbf{e}_1 N)^\delta = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^\delta,$$

что соответствует структуре уровней когерентности для ансамбля частиц со спином $1/2$ [7–9]. Пространства состояний независимых рабочих элементов не пересекаются. Поэтому множество состояний каждого вектора $\mathbf{m}^\delta$ в базисе (2)

$$\mathbf{m}^\delta = m_+^\delta (\mathbf{e}_1 P)^\delta + m_3^\delta (\mathbf{e}_3)^\delta + m_-^\delta (\mathbf{e}_1 N)^\delta =$$

$$= \begin{bmatrix} m_3 & m_+ \\ m_- & -m_- \end{bmatrix} \quad (5)$$

образует независимый канал обработки, состоящий из трех регистров.

Под регистрами понимаются пространства, определяемые векторным $(\mathbf{e}_3)^\delta$ и двумя спинорными $(\mathbf{e}_1 P)^\delta$ и $(\mathbf{e}_1 N)^\delta$ базисными элементами. Прямая сумма спинорных регистров канала образует его векторный регистр поперечных составляющих

$$m_+^\delta (\mathbf{e}_1 P)^\delta + m_-^\delta (\mathbf{e}_1 N)^\delta =$$

$$= m_\perp^\delta (\mathbf{e}_1 e^{-ie_3 \varphi})^\delta = \begin{bmatrix} 0 & m_- \\ m_+ & 0 \end{bmatrix}^\delta, \quad (6)$$

из которого осуществляется вывод информации. Коэффициенты разложения

$$m_3^\delta, \quad m_+^\delta = m_\perp^\delta e^{-i\varphi^\delta}, \quad m_-^\delta = m_\perp^\delta e^{i\varphi^\delta} \quad (7)$$

играют роль носителей информации. Их область допустимых значений описывается неравенствами

$$-1 \leq m_3^\delta \leq 1; \quad 0 \leq m_\perp^\delta \leq 1; \quad -\infty < \varphi^\delta < \infty \quad (8)$$

и законом сохранения длины единичного вектора

$$(m^\delta)^2 =$$

$$= (m_3^\delta)^2 + m_+^\delta m_-^\delta = (m_3^\delta)^2 + (m_\perp^\delta)^2 = 1. \quad (9)$$

Выделенное направление приложения импульсов линейно поляризованного радиочастотного магнитного поля $\mathbf{e}_1$ и однородность ориентации статического магнитного поля вдоль $\mathbf{e}_3$ задают начало отсчета фазы поперечных составляющих всех векторов $\mathbf{m}^\delta$ и позволяют сравнивать их взаимные ориентации в единой системе координат параллельным переносом в ее начало. Для совместного рассмотрения динамики изменения состояний всех рабочих элементов под действием после-

довательности радиоимпульсов объединим одноименные регистры каналов в упорядоченные по δ блоки, которые будем называть "регистрами спинового процессора" [4]:

$$S = \{\mathbf{e}_1 P\}^\delta, \quad L = \{\mathbf{e}_3\}^\delta, \quad S^* = \{\mathbf{e}_1 N\}^\delta. \quad (10)$$

Упорядоченные по δ распределения значений носителей информации в каждом таком регистре будем называть "спектром носителей по параметру δ ", или короче "спектром носителей".

Информация, вводимая в спиновую систему, хранится в ней, преобразуется и выводится из нее через соотношения когерентности между пространственными ориентациями единичных векторов магнитного момента всего ансамбля независимых изохромат. Под когерентностью здесь понимается степень максимального совпадения пространственных ориентаций всех векторов $\mathbf{m}^\delta$ в некоторый исходный момент времени и наличие детерминированных соотношений, связывающих их взаимные ориентации в произвольный момент времени. При выбранном способе описания состояний рабочих элементов соотношения когерентности выражаются через комплексные спектры носителей информации, формируемые в регистрах спинового процессора под действием прикладываемой последовательности информационных и управляющих радиоимпульсов. Равновесному исходному состоянию, в котором все векторы $\mathbf{m}^\delta$ ориентированы вдоль орта $\mathbf{e}_3$, соответствует единичный амплитудный и нулевой фазовый спектры носителей в регистре продольных составляющих L и отсутствие носителей в регистрах поперечных составляющих.

Ввод информации в процессор

Ввод информации осуществляется с помощью импульсов радиочастотного магнитного поля, которые одновременно и однородно воздействуют на все рабочие элементы. Однако из-за различия в локальных значениях статического магнитного поля эта информация воспринимается рабочими элементами по-разному. Изменение состояния рабочих элементов сопровождается обменом информацией между регистрами спинового процессора. Обмен описывается девятью операторами ввода информации

$$W = F, V, D, U, R, U^*, D^*, V^*, F^*. \quad (11)$$

Их собственные значения для каждого канала обработки составляют матрицу вращения соответствующего единичного вектора

$$\begin{bmatrix} m_+^\delta(t) \\ m_3^\delta(t) \\ m_-^\delta(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^\delta & U^\delta & (F^*)^\delta \\ D^\delta & R^\delta & (D^*)^\delta \\ F^\delta & (U^*)^\delta & (V^*)^\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_+^\delta(0) \\ m_3^\delta(0) \\ m_-^\delta(0) \end{bmatrix} \quad (12)$$

и выражаются через параметры Кэли—Клейна [5, 6, 10, 13, 14] с помощью соотношений

$$\begin{cases} R^\delta = (\alpha\alpha^* - \beta\beta^*)^\delta; \\ U^\delta = (2\alpha^*\beta)^\delta; \\ D^\delta = (-\alpha^*\beta^*)^\delta; \\ V^\delta = ((\alpha^*)^2)^\delta; \\ F^\delta = (-\beta^*)^2)^\delta. \end{cases} \quad (13)$$

Комплексные числа, являющиеся элементами матрицы вращения (12), представляют собой функционалы от параметров радиоимпульса и параметра δ по длительности взаимодействия. Упорядоченные по δ распределения значений этих функционалов можно рассматривать как спектры собственных значений операторов ввода информации (11). Эти спектры представляют собой девять разновидностей прямого интегрального преобразования от параметров радиоимпульса по времени взаимодействия, одновременно выполняемых спиновой системой. Характерным отличием их от прямого преобразования Фурье является нелинейная зависимость от амплитуды радиоимпульса. Для расчета спектров операторов (11) удобно использовать формализм параметров Кэли—Клейна. Способ вычисления этих параметров для простых радиоимпульсов с прямоугольной огибающей и методика его обобщения на случай сложных сигналов рассмотрены в работах [13–15].

Принцип работы процессора

Принцип работы спинового эхо-процессора заключается в следующем. Последовательность информационных и управляющих радиоимпульсов, разделенных интервалами свободной прецессии, завершающаяся в момент времени T_{in} , переводит единичный вектор $\mathbf{m}^\delta$ каждой изохроматы из исходного равновесного состояния $\mathbf{m}^\delta(0) = \mathbf{e}_3$ в некоторое неравновесное состояние

$$\begin{aligned} \mathbf{m}(\delta, t) = \\ = l(\delta, t)\mathbf{e}_3 + s(\delta, t)(\mathbf{e}_1 P) + s^*(\delta, t)(\mathbf{e}_1 N). \end{aligned} \quad (14)$$

В следующем далее интервале свободной прецессии его продольная составляющая $l(\delta, t)$ сохраняется, а поперечная свободно прецессирует в плоскости $\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2$, наводя в электродинамической регистрирующей системе эдс индукции на частоте $\omega_0 + \delta$. Это — обычный сигнал спада свободной индукции. Если интервал наблюдения выбрать малым по сравнению со временем поперечной релаксации, то затуханием сигнала ССИ можно пренебречь.

Электродинамическая система (катушка индуктивности) суммирует вклады в эдс индукции

от всех изохромат, осуществляя интегральное преобразование сигналов спада свободной индукции по параметру δ . В приближении непрерывного распределения значений δ в интервале $[-\Gamma, \Gamma]$ получаем

$$u(\tau) = K \exp(i\omega_0 \tau) \int_{-\Gamma}^{\Gamma} g(\delta) s(\delta, \tau) \exp(i\delta \tau) d\delta. \quad (15)$$

Выражение

$$u'(\tau) = K \int_{-\Gamma}^{\Gamma} g(\delta) s(\delta, \tau) \exp(i\delta \tau) d\delta \quad (16)$$

описывает комплексную амплитуду результирующего сигнала, получаемого в результате преобразования. Здесь $g(\delta) = g'(\delta)g''(\delta)$ — скалярный весовой множитель, характеризующий форму линии магнитного резонанса образца $g'(\delta)$ и резонансные свойства регистрирующей системы $g''(\delta)$. Выбирая характер пространственной неоднородности статического магнитного поля, форму образца, его ориентацию и форму резонансной характеристики регистрирующей системы, можно в широких пределах изменять вид весовой функции $g(\delta)$, задавая требуемый закон аподизации в процессе обработки. В частности, весовая функция $g(\delta)$ в интервале $[-\Gamma, \Gamma]$ может быть выбрана постоянной. Тогда интегральное преобразование, реализуемое в процессе вывода информации, с точностью до постоянного множителя совпадает с операцией обратного преобразования Фурье. Результат его определяется видом функции $g(\delta, T_{in})$, которая является суперпозицией результатов всех математических преобразований, хранящихся в регистре поперечных составляющих S . Для последовательности из n неперекрывающихся радиоимпульсов имеем

$$s(\delta, T_{in}) = \sum_{k=1}^{n-1} s_k(\delta, T_{in}). \quad (17)$$

В этом разложении каждое слагаемое соответствует некоторой траектории переноса когерентности и выражается через произведение действующих на ней операторов ввода информации (общее обозначение W_{kj}) и операторов фазового сдвига (общее обозначение E_{kj}):

$$s_k(\delta, T_{in}) = W_{kn}(\delta, t_n) \prod_{j=1}^{n-1} W_{kj}(\delta, t_j) E_{kj}(\delta, \tau_j). \quad (18)$$

Эти операторы можно объединить в "результатирующий оператор математического преобразования"

$$W_k(\delta, T_{in}) = \prod_{j=1}^n W_{kj}(\delta, t_j) \quad (19)$$

и "результатирующий оператор линейной деформации фазового спектра"

$$E_k(\delta, T_{in}) = \prod_{j=1}^{n-1} E_{kj}(\delta, \tau_j) = \exp[-i(\omega_0 + \delta)\tau_k], \quad (20)$$

где τ_k — эффективное время пребывания носителей в регистре S^* .

Амплитудный спектр носителей на k -й траектории в момент времени T_{in} описывается выражением

$$|s_k(\delta, T_{in})| = |W_k(\delta, T_{in})| = \prod_{j=1}^n |W_{kj}(\delta, t_j)| \quad (21)$$

и не изменяется в выделяемом стробированием интервале регистрации. Фазовый спектр этих носителей состоит из двух слагаемых и изменяется в интервале регистрации по линейному закону

$$\Phi[s_k(\delta, T_{in})] = \Phi[W_k(\delta, T_{in})] + (\omega_0 + \delta)(\tau - \tau_k), \quad (22)$$

где τ — текущее время регистрации.

Первое слагаемое справа выражается через сумму фазовых спектров отдельных операторов вывода информации

$$\Phi[W_k(\delta, T_{in})] = \sum_{j=1}^n \Phi[W_{kj}(\delta, t_j)], \quad (23)$$

где j — порядковый номер радиоимпульса. Этот спектр нелинеен по параметру δ и может иметь произвольную ширину. Второе слагаемое линейно зависит от δ и связано с действием оператора фазового сдвига.

Вывод информации

Особенность механизма вывода (детектирования) информации заключается в способности регистрирующей системы (катушки регистрации) различать фазы носителей только по модулю 2π . При малой по сравнению с π ширине фазового спектра носителей их синфазное движение в плоскости $e_1 e_2$ приводит к конструктивной интерференции регистрируемых от них сигналов ССИ, и на выходе эхо-процессора появляется информация

об амплитудном спектре носителей. Эта информация выводится без потерь, если общая ширина их фазового спектра не превышает π . В случае превышения среди носителей появляются пары с противоположной ориентацией, для которых сигналы эдс индукции наводятся в противофазе. Это приводит к частичной или полной потере информации в процессе вывода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная модель процесса обработки информации в спиновом эхо-процессоре позволяет:

- проследить за прохождением информации через многоканальную регистровую структуру спинового эхо-процессора и выявить все множество получаемых результатов;
- определить условия отображения полезных результатов на выходе эхо-процессора;
- оценить искажения полезных результатов, происходящие на этапах ввода и вывода информации, и определить пути их минимизации;
- объяснить появление на выходе лишних эхо-сигналов и найти их связь с параметрами информационными и управляющих радиоимпульсов;
- рассмотреть возможные способы подавления нежелательных эхо-сигналов на выходе эхо-процессора;
- выявить способы управления порядком вывода информации;
- оценить возможность неискаженного вывода информации о результатах обработки конкретной разновидности сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудкин В.И., Страхолис А.А., Тарханов В.И. Особенности обработки импульсных радиосигналов в спиновом процессоре // Труды ЛПИ. 1987. Вып. 422 "Квантовая электроника". С. 50–54.
2. Касаткин А.В., Протодьяконов А.М. и др. Спиновый процессор в системах связи // Техника средств связи. Сер. ТСР. 1977. № 3. С. 110–124.
3. Петров М.П., Степанов С.И. Обработка информации в радиотехнических системах методом спинового эха // Обзоры по электронной технике. Сер. 1 "Электроника СВЧ". М.: ЦНИИ "Электроника", 1976. Вып. 10. С. 385.
4. Дудкин В.И., Петрунькин В.Ю., Тарханов В.И. Механизм обработки информации в спиновом процессоре // ЖТФ. 1988. Т. 58, вып. 9. С. 1738–1745.
5. Jaynes E.T. Matrix Treatment of Nuclear Induction // Phys. Rev. 1955. V. 98, N 4. P. 1099–1105.
6. Bloom A.L. Nuclear Induction in Inhomogeneous Fields // Phys. Rev. 1955. V. 98, N 4. P. 1105–1111.
7. Jensen E. General Theory on Spin-Echoes for Any Combination of Any Number of Pulses. Introduction of a Simple "Spin-Echo Diagram" // Acta Polytechnica Scandinavica, Physics Including Nucleonics Series. 1960. V. 263 (Appl. Phys.), N 7. P. 1–20.
8. Bodenhausen G., Kogler H., Ernst R.R. Selection of Coherence-Transfer Pathways in NMR Pulse Experiments // J. Magn. Reson. 1984. V. 58, N 3. P. 370–388.
9. Bain A.D. Coherence Levels and Coherence Pathways in NMR. A Simple Way to Design Phase Cycling Procedures // J. Magn. Reson. 1984. V. 56, N 3. P. 410–428.
10. Дудкин В.И., Тарханов В.И. Применение алгебры Клиффорда для описания импульсных методов магнитного резонанса // Труды ЛПИ. 1982. Вып. 387 "Квантовая электроника". С. 67–72.
11. Цифринович В.И. Расчет сигналов эха. Новосибирск: Наука, 1986. 112 с.
12. Яшин А.Н. Графический метод расчета параметров эхо-сигналов в условиях многоимпульсного возбуждения квантовых систем // ЖПС. 1985. Т. 42, № 2. С. 309–315.
13. Дудкин В.И., Петрунькин В.Ю., Тарханов В.И. Анализ сигналов спинового эха в многоимпульсном эксперименте // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29, № 4. С. 732–740.
14. Тарханов В.И. Геометрическая алгебра, ЯМР и обработка информации // СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 214 с.
15. Дроздецкий С.Е., Дудкин В.И., Кривцов И.Ю., Тарханов В.И. Метод учета искажений сигналов при обработке в спиновом процессоре // Судостроительная промышленность. 1987. № 8. С. 10–23.

Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

Материал поступил в редакцию 15.10.2002.

OPERATING PRINCIPLE OF A SPIN-ECHO PROCESSOR**V. I. Tarkhanov***Saint-Petersburg State Polytechnic University*

Basic principles of operation are shown for a single cycle of information processing in a spin-echo processor. The approach is a generalization of matrix, diagram, and algebraic ways to calculate the dependence of echo-signal parameters on the parameters of data and control pulses in an excitation sequence. The single cycle operation structure is shown. Notions of data registers and input data operators are introduced. The approach permits one to trace information transformations in a multi-channel register structure of the spin-echo processor and to find optimal conditions for reading the results at its output.