РАЗДЕЛ VI. ФИЗИКА

Баруздин С.А.

Алгоритмы задержки сигналов в методе спинового эха

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ»
(Россия, Санкт-Петербург)

doi: 10.18411/lj-01-2021-40

idsp: ljourn-01-2021-40

Аннотация

Предложен новый алгоритм задержки сигналов на основе метода спинового эха, отличающийся от известного алгоритма тем, что используется изменяющийся по знаку градиент индукции поляризующего магнитного поля. В результате задерживаемый сигнал не инвертируется во времени, как это происходит в известном алгоритме. Кроме того, задержка сигнала в предложенном алгоритме уменьшается на величину длительности задерживаемого сигнала.

Ключевые слова: спиновое эхо, задержка сигнала, инверсия во времени

Abstract

A new signal delay algorithm based on the spin echo method is proposed, which differs from the known algorithm in that the sign-varying induction gradient of the polarizing magnetic field is used. As a result, the delayed signal is not inverted in time as it happens in the known algorithm. In addition, the signal delay in the proposed algorithm is reduced by the duration of the delayed signal.

Keywords: spin echo, signal delay, time inversion

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) широко используется в физических и химических исследованиях. Одной из разновидностей формирования и регистрации сигналов ЯМР является метод спинового эха, которое возбуждается резонансными импульсами магнитного поля [1]. Также метод спинового эха применяется в устройствах обработки импульсных радиосигналов для реализации операций свертки, корреляции и задержки сигналов [2, 3].

Различают двухимпульсный метод формирования спинового эха и трехимпульсный метод. В первом случае эхо возбуждается двумя импульсами радиочастотного магнитного поля на частоте ЯМР, во втором случае в формировании эха принимают участие три импульса.

Рассмотрим известный алгоритм двухимпульсной задержки сигнала. На рис. 1 представлена временная диаграмма импульсов возбуждения $R_1(t)$ и $R_2(t)$, включаемых в моменты времени $t=0$ и $t=t_2$ соответственно, а также формируемое в момент времени $t=2t_2$ двухимпульсное спиновое эхо $m(t)$. При этом первый импульс $R_1(t)$ является информационным, подлежит задержке, второй импульс $R_2(t)$ является управляющим, его параметр t_2 определяет время задержки на величину $2t_2$, которая может изменяться.

Рис. 1. Временная диаграмма двухимпульсного алгоритма задержки сигнала

Важно отметить, что в рассмотренном известном алгоритме наряду с задержкой сигнала происходит его инверсия во времени, то есть начало сигнала становится его концом, а конец соответственно началом.

Для моделирования процесса возбуждения спинового эха используются уравнения Блоха [1, 3], которые удобно представить в системе координат, вращающейся вокруг продольной оси с частотой, равной несущей частоте импульса возбуждения ω_0

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{M}}{dt} &= \left(i\Omega - \frac{1}{T_2}\right)\tilde{M} - i\tilde{R}(t)M_z; \\ \frac{d\tilde{M}^*}{dt} &= -\left(i\Omega - \frac{1}{T_2}\right)\tilde{M}^* - iR^*(t)M_z; \\ \frac{dM_z}{dt} &= -i\frac{\tilde{R}^*(t)\tilde{M}}{2} + i\frac{\tilde{R}(t)\tilde{M}^*}{2} - \frac{M_z}{T_1} + \frac{M_0}{T_1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\tilde{M}$ - комплексная поперечная, а M_z - продольная компонента вектора намагниченности, M_0 - его равновесная величина, $\tilde{R}(t) = \gamma\tilde{B}(t)$ - комплексная огибающая импульса возбуждения длительностью τ , заданного на симметричном интервале и выраженная через гироманнитное отношение γ и комплексную огибающую индукции магнитного поля $\tilde{B}(t)$; $\Omega = (\omega - \omega_0)$ - расстройка частоты, где ω - резонансная частота, ω_0 - центральная частота неоднородно уширенной линии поглощения, совпадающая с несущей частотой импульсов возбуждения, T_1, T_2 - времена продольной и поперечной релаксации. Важно отметить, что $\tilde{R}(t) = \gamma\tilde{B}(t)$, являющаяся комплексной амплитудой импульса возбуждения, имеет размерность круговой частоты рад/с.

При моделировании и анализе эхо-откликов целесообразно использовать формализм переходной матрицы состояния системы (вектора намагниченности). В этом случае определяют явный вид переходных матриц на свободных интервалах и формальный вид на интервалах действия импульсов возбуждения. Такой подход позволяет выделять в общем отклике системы, содержащем сигналы свободной индукции, первичные, стимулированные и другие эхо, нужный тип отклика, что в ряде случаев существенно облегчает решение задачи.

Будем считать, что длительность импульсов возбуждения удовлетворяет условию $\tau \ll T_1, T_2$, при этом можно не учитывать релаксационные члены в (1). Формальное решение (1) в момент окончания импульса, заданного на симметричном интервале $-\tau/2, \tau/2$, можно представить в виде произведения переходной матрицы $\mathbf{A}$ размерности 3×3 на вектор начальных условий

$$\mathbf{M}(\tau/2, \Omega) = \mathbf{A}(\tau/2, -\tau/2, \Omega)\mathbf{M}(-\tau/2, \Omega), \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \tilde{M} \\ \tilde{M}^* \\ M_z \end{bmatrix}.$$

Уравнение (1) представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений в общем случае с переменными коэффициентами $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{R}^*(t)$. Точное аналитическое решение (1) удастся получить только при $\tilde{R}(t) = \text{const}$, то есть для простых импульсов с прямоугольной огибающей. Также точное аналитическое решение можно найти в случае кусочно-постоянных коэффициентов, например, при возбуждении фазоманипулированными импульсами [4].

Комплексная огибающая сигнала спинового эха определяется интегрированием всех изохромат с весом, определяемым функцией низкочастотного эквивалента неоднородно уширенной линии поглощения $g(\Omega) = g(\omega - \omega_0)$:

$$\tilde{M}_e(t) = M_0 \int_{-\infty}^{\infty} g(\Omega) a_{12}^{(2)}(\Omega) a_{23}^{(1)}(\Omega) \exp \left[i\Omega \left(t - 2t_2 + \frac{\tau_1}{2} \right) \right] d\Omega, \quad (3)$$

где τ_1, τ_2 – длительности первого и второго импульсов возбуждения, $\Omega = \omega - \omega_0$ – расстройка частоты ω относительно несущей частоты радиоимпульса ω_0 , t_2 – задержка, M_0 – равновесное значение вектора намагниченности, $a_{12}^{(2)}(\Omega)$ и $a_{23}^{(1)}(\Omega)$ – элементы переходных матриц состояния (2) для второго и первого импульсов соответственно, которые находятся из решения уравнений Блоха. В дальнейших расчетах принято $M_0 = 1$.

Для наблюдения спинового эха рабочую среду помещают в продольное магнитное поле с индукцией $B_0 \mathbf{e}_z$ [1]. К этому полю добавляют неоднородную компоненту магнитного поля, создаваемую с помощью линейного градиента G вдоль оси x и имеющую также продольную ориентацию: $Gx \mathbf{e}_z$. Таким образом, на рабочую среду действует постоянное продольное магнитное поле с индукцией $B_z(x) = B_0 + Gx$. Частота ядерного магнитного резонанса (ЯМР) меняется вдоль оси x по закону $\omega(x) = \gamma B_z(x) = \gamma B_0 + \gamma Gx = \omega_0 + \Omega(x)$, где γ – гиромагнитное отношение атома среды, ω_0 – центральная частота ЯМР, $\Omega(x) = \gamma Gx$ – отклонение частоты ЯМР $\omega(x)$ от центральной ω_0 . При этом в известных алгоритмах обработки сигналов методом спинового эха градиент G является постоянным во времени (рис. 1).

Распределение частиц вдоль оси x описывается функцией плотности вероятностей $g(x)$. Удобнее, однако, перейти к функции низкочастотного эквивалента неоднородно уширенной линии поглощения $g(\Omega)$. Она описывает распределение частиц по частоте.

Пусть $g(\Omega)$ описывается гауссовским законом со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 2\pi \cdot 10^6$ рад/с. В качестве информационного сигнала взято фазоманипулированное 13-элементным кодом Баркера колебание [4]. Длительность элементарного импульса кода Баркера равна 1 мкс, следовательно, длительность информационного сигнала $\tau_1 = 13$ мкс. Амплитуда импульса $R_1 = 10^5$ рад/с. Управляющий импульс R_2 включается в момент времени $t_2 = 20$ мкс и имеет параметры $R_2 \tau_2 = \pi/2$, обеспечивающие поворот всех векторов намагниченности изохромат на угол $\pi/2$, и начальную фазу второго импульса $\varphi_2 = -\pi/4$.

Моделирование рассмотренного алгоритма задержки проведено с помощью пакета Mathcad. Для определения комплексной огибающей спинового эха (3) необходимо определить элементы переходных матриц возбуждения, соответствующих двум импульсам возбуждения. Методика ее определения изложена в [3, 5] и основана на ступенчатой аппроксимации комплексных огибающих импульсов возбуждения, при которой уравнения Блоха (1) имеют аналитическое решение.

На рис. 2 представлена комплексная огибающая (в данном случае вещественная функция за счет условия $\varphi_2 = -\pi/4$) двухимпульсного эха.

Рис. 2. Двухимпульсное эхо в режиме задержки с инверсией во времени

Центр эхо формируется в момент времени $2t_2 = 40$ мкс. Сигнал при этом инвертирован во времени.

Отличительной особенностью нового, не описанного ранее в литературе, алгоритма двухимпульсной задержки сигнала является переменный во времени градиент индукции магнитного поля $G(t)$. На рис. 3 представлена временная диаграмма предлагаемого алгоритма задержки. Из диаграммы видно, что во время первого импульса градиент G имеет отрицательную полярность, а затем становится положительным. Это приводит к изменению знака расстройки частоты Ω во время первого импульса. Матричный коэффициент $a_{23}^{(1)}(\Omega)$ в (3) меняется на $a_{23}^{(1)}(-\Omega)$.

Рис. 3. Временная диаграмма двухимпульсного алгоритма задержки без инверсии времени

Проведено компьютерное моделирование данного алгоритма, результаты которого представлены на рис. 4. Эхо повторяет форму первого импульса $R_1(t)$, инверсия во времени отсутствует. При этом центр эха сформирован не в момент времени $2t_2 = 40$ мкс, как в предыдущем случае, а смещен в сторону меньшей задержки в момент времени $2t_2 - \tau_1 = 40 - 13 = 27$ мкс.

Рис. 4. Двухимпульсное эхо в режиме задержки без инверсии во времени

Реализация предложенного алгоритма осуществима только в парамагнитных средах, в которых возможно закономерное изменение поляризующего магнитного поля. В магнитоупорядоченных средах предложенный алгоритм нереализуем.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе трехимпульсных алгоритмов обработки сигналов в присутствии изменяющегося во времени градиента магнитного поля.

1. Блюмх Б. Основы ЯМР. М.: Техносфера, 2011. 256 с.
2. Нестеров М. М., Плешаков И. В., Фофанов Я. А. Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов// Научное приборостроение. 2006. Т. 16. № 2. С. 3-21.
3. Баруздин С.А. Нелинейное эхо и обработка сигналов. СПб. Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2011. 187 с.
4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 С.
5. Баруздин С. А. Моделирование возбуждения спинового эха импульсами с произвольным законом модуляции. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. № 1. С. 39-43.

Саврасова Н.А, Бирюкова И.П.

Междисциплинарный подход в воспитании военных инженеров

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
(Россия, Воронеж)*

doi: 10.18411/lj-01-2021-41

idsp: ljjournal-01-2021-41

Аннотация

В статье рассматривается междисциплинарный подход повышения качества подготовки военных инженеров. Внимание акцентируется на получении системных знаний по изучаемым дисциплинам, что возможно лишь при комплексном подходе, сочетающему обучение и научно-исследовательскую деятельность при условии установления междисциплинарных связей.

Ключевые слова: междисциплинарные связи, компетенция, комплексный подход, обучающийся.

Abstract

The article discusses an interdisciplinary approach to improving the quality of training of military engineers. Attention is paid to gaining system knowledge. This is possible with an integrated approach. It combines teaching, research and interdisciplinary communication.

Keywords: interdisciplinary connections, competence, a complex approach, student.

В последнее время при разработке рабочих программ изучения дисциплин в рамках Федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) нового поколения внимание акцентировано на компетентностном подходе. В системе высшего военного образования этот подход проявляется в ориентировании обучающихся на получение систематизированных знаний, которые в дальнейшей профессиональной деятельности позволят качественно выполнять поставленные задачи [1, с. 18].

Современная интенсификация технического прогресса диктует необходимость в квалифицированных специалистах с хорошим техническим мышлением. Поэтому за последние годы растет интерес к таким школьным предметам как математика, физика и информатика. Выпускник школы выбирает профессию, которой он сможет обучаться в лучших вузах страны, а в дальнейшем реализовать свой потенциал. Об этом свидетельствует увеличение количества школьников, выбирающих кроме обязательных