

УДК 537.635

## ЭФФЕКТ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА РАБОЧЕЕ ВЕЩЕСТВО СПИНОВОГО ЭХО-ПРОЦЕССОРА ИМПУЛЬСАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*И. В. Плешаков*<sup>1,2</sup> \*, *П. С. Попов*<sup>2</sup>, *Ю. И. Кузьмин*<sup>1,2</sup>, *В. И. Дудкин*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрен спиновый эхо-процессор с магнитоупорядоченным материалом (ферритом) в качестве рабочего вещества. Показано, что при воздействии на него достаточно длинными импульсами магнитного поля можно добиться подавления перекрёстных откликов, которые возбуждаются радиочастотными импульсами из разных посылок, поступающих в систему, и представляют собой паразитные сигналы. Таким образом, в устройстве удаётся осуществить мультиплексирование — временное уплотнение обрабатываемой процессором информации.

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на чрезвычайно быстрое развитие цифровых средств обработки информации, в настоящее время возрастает интерес к аналоговым методам преобразования импульсных радиотехнических сигналов. В основе большинства этих методов лежат физические явления, происходящие в среде с определёнными свойствами. Примером области, в которой реализуются такие явления, может служить функциональная магнитоэлектроника, ориентированная на создание соответствующих устройств на базе магнетиков [1]. Операции, выполняемые в системах такого рода, могут быть как простыми (задержка сигнала без изменения его формы), так и достаточно сложными (сжатие, оптимальная фильтрация, разложение в спектр и тому подобное). Для решения подобных задач было, в частности, предложено применять эффект поляризованного эха — отклика рабочего вещества на поступающую последовательность импульсов, обусловленного их взаимодействием в этом веществе [2]. Рассматривалась также возможность выполнения на основе этого явления квантовых вычислений [3]. С точки зрения использования в устройствах обработки информации изучались эхо-сигналы различной природы: спиновые, фононные, фотонные и другие. Подробный анализ их достоинств и недостатков приведён в работе [4].

В настоящей работе нас будет интересовать ядерное спиновое эхо, возбуждаемое в магнитоупорядоченных материалах [5], поскольку ранее было показано, что они наилучшим образом подходят для указанных устройств [4, 6]. Это связано, прежде всего, с тем, что к таким веществам не требуется приложения внешнего постоянного магнитного поля, т. к. наблюдение ядерного магнитного резонанса в них обусловлено внутренним полем. Кроме того, в соединениях с магнитным порядком существует так называемый эффект усиления, позволяющий возбуждать ядерную спиновую систему магнетика радиочастотными (РЧ) импульсами с малой амплитудой. Следует отметить и то, что несущая частота импульсов при этом обычно лежит в удобной части радиодиапазона, составляя по порядку величины десятки мегагерц.

Функциональная гибкость и компактность систем обработки информации на основе явления ядерного спинового эха в магнитоупорядоченных материалах (далее согласно работе [7] мы будем

---

\* ivanple@yandex.ru

называть их спиновыми эхо-процессорами) до сегодняшнего дня привлекает внимание исследователей [8, 9]. Однако широкое внедрение в практику этих систем сдерживается рядом присущих им недостатков. К основным из них следует отнести значительное количество внутренних помех в этих устройствах в виде паразитных откликов спиновой системы на многоимпульсные последовательности, затрудняющих работу с высокой тактовой частотой. В данной работе изучена возможность подавления перекрёстных эхо-сигналов, возникающих из-за взаимодействия нескольких импульсных посылок, поступающих на рабочее вещество процессора.

## 1. СПИНОВЫЕ ЭХО-ПРОЦЕССОРЫ В УСТРОЙСТВАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В самом общем виде схема эхо-процессора на основе магнитоупорядоченного материала представлена на рис. 1. Мы полагаем, что возбуждающие эхо РЧ импульсы (на рисунке они обозначены RF) вырабатываются генератором 1. В реальной системе в блоке 1 могут быть совмещены как генераторы, создающие мощные управляющие импульсы, так и устройства входного тракта, по которому поступают информационные сигналы, подлежащие обработке. Далее посылка, состоящая не менее чем из двух импульсов, подаётся на резонансный контур, в катушку которого помещено рабочее вещество 2 (на рисунке оно изображено в виде ферритового кольца, использованного в настоящей работе). Радиочастотное поле импульсов вызывает отклик ядерной спиновой системы вещества  $S$ , т. е. эхо-сигнал, который является следствием взаимодействия возбуждающих импульсов и представляет собой интересующий нас результат их обработки. Далее, вместе с посылкой возбуждающих РЧ-импульсов, эти отклики поступают в приёмный тракт 3, который их выделяет, усиливает и после детектирования (обычного или синхронного) передаёт на систему отображения или дальнейшего преобразования информации 4. Назначение канала 5, формирующего видеоимпульс  $V$ , будет рассмотрено ниже. Специфика использования магнитоупорядоченного материала здесь проявилась в том, что система не содержит магнита, создающего постоянное поле.

Таким образом, эхо-процессор действует подобно линии задержки, управляемой вспомогательными импульсами. Показано, что при наличии внутриимпульсной модуляции можно осуществлять разнообразные действия с входной информацией, например сжимать импульсы, причём параметр сжатия оказывается весьма высоким [6]. Здесь, однако, мы не будем уделять внимания конкретным преобразованиям эхо-сигнала, полагая, что все они уже выполнены, а сосредоточимся на том, каким образом можно устранить помехи, появляющиеся в ходе работы процессора с многоимпульсными последовательностями.

Проиллюстрируем работу устройства и возникновение в нём мешающих откликов временными диаграммами, показанными на рис. 2. Рассмотрим в качестве примера действие на рабочее вещество последовательности, состоящей из двух двухимпульсных посылок РЧ импульсов (рис. 2а). Первая посылка  $RF_1$  (импульсы  $A$  и  $B$ ) возбуждает отклик  $S_1$  — двухимпульсное ядерное спино-

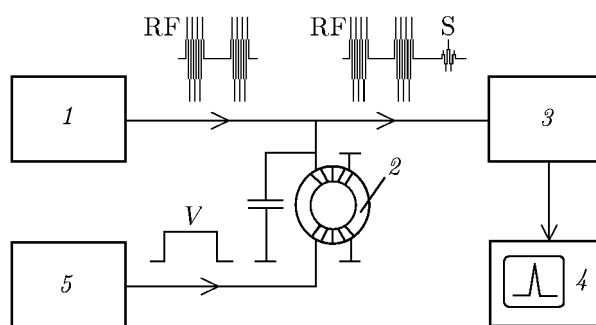


Рис. 1. Блок-схема спинового эхо-процессора: 1 — генератор, 2 — рабочее вещество, 3 — приёмный тракт, 4 — система отображения или преобразования информации, 5 — канал, формирующий видеоимпульс  $V$ . Обозначения RF и S соответствуют радиоимпульсу и отклику ядерной спиновой системы вещества

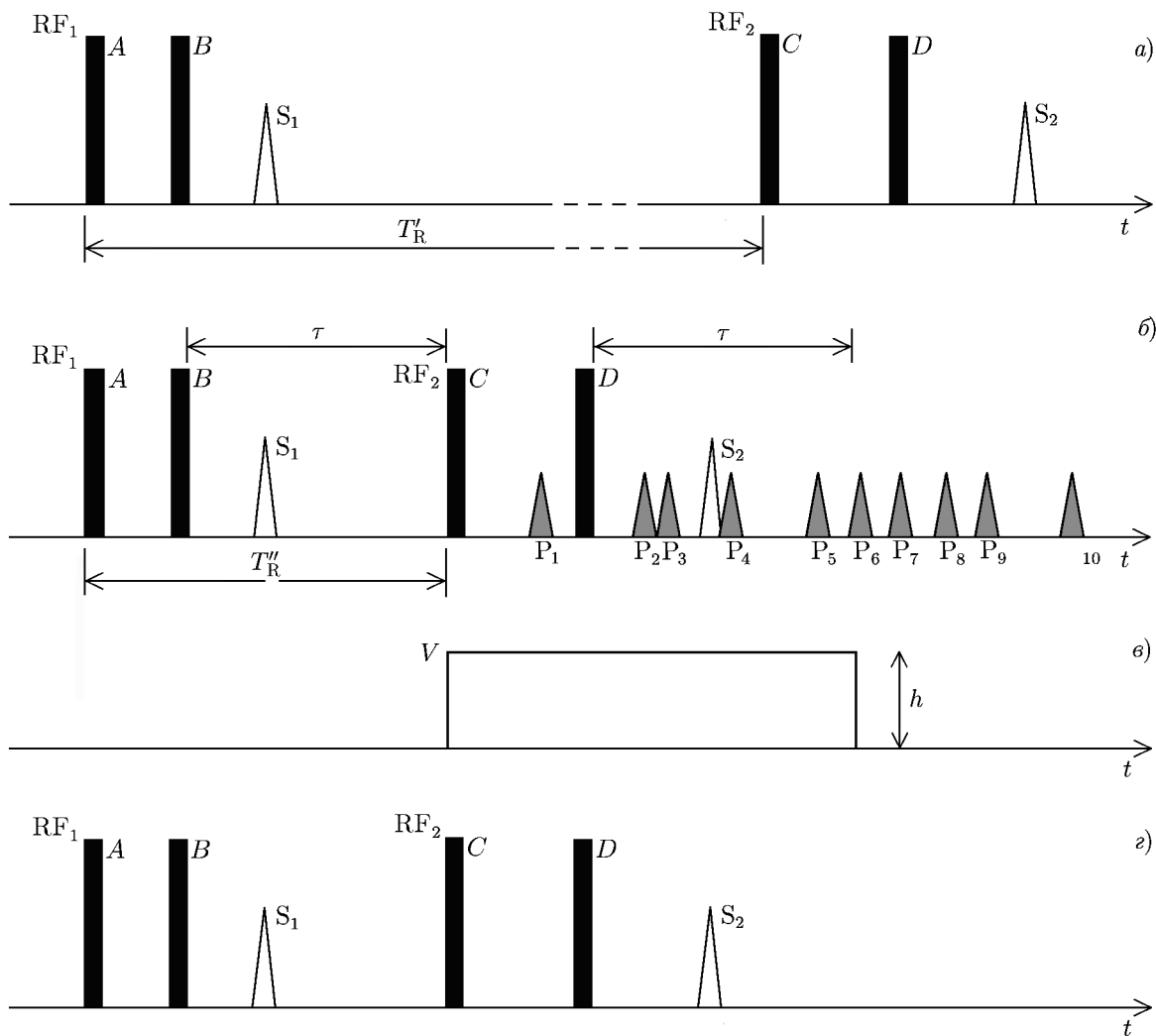


Рис. 2. Временные диаграммы импульсных последовательностей, поступающих в рабочее вещество эхо-процессора: действие двух импульсных посылок, разделённых длительным временным интервалом (а), сближенные импульсные посылки (б), импульс магнитного поля (в), результат подавления перекрёстных откликов спиновой системы (г)

вое эхо, представляющее собой полезный сигнал. Вторая посылка RF<sub>2</sub>, состоящая из импульсов C и D, приходит спустя время T<sub>R</sub>', т. е. через период повторения посылок, определяющий тактовую частоту работы устройства. Если время T<sub>R</sub>' достаточно велико (сопоставимо с временем спин-решёточной релаксации рабочего вещества T<sub>1</sub>), спиновая система к моменту прихода посылки RF<sub>2</sub> успевает прийти в состояние равновесия, т. е. влияние посылки RF<sub>1</sub> ослабевает и после импульса D возникает только эхо S<sub>2</sub> от импульсов C и D. В этом случае в качестве выходного сигнала эхо-процессора регистрируются полезные отклики типа S. При уменьшении периода повторения T<sub>R</sub>, начиная с T<sub>R</sub> < T<sub>1</sub>, пренебречь действием импульсов из разных посылок уже нельзя. Это демонстрирует рис. 2б, где T<sub>R</sub>'' ≪ T<sub>R</sub>'. Здесь посылки сближены настолько, что пары и тройки импульсов из посылок RF<sub>1</sub> и RF<sub>2</sub> создают комбинационные отклики в результате действия механизмов двухимпульсного и стимулированного эха [10]. После импульса C возникает множество перекрестных сигналов P<sub>1</sub>, ..., P<sub>10</sub>, маскирующих полезный сигнал. Классификация откликов, возникающих при воздействии на рабочее вещество двух двухимпульсных посылок, приведена в

Таблица 1. Характеристика откликов, содержащихся в полном выходном сигнале эхо-процессора при возбуждении его рабочего вещества двумя посылками РЧ импульсов

Обозначение эхо-сигнала	Набор РЧ импульсов, дающих вклад в данный эхо-сигнал	Механизм формирования эхо-сигнала	Характеристика сигнала
$S_1$	$AB$	двухимпульсное эхо	полезный сигнал
$S_2$	$CD$	двухимпульсное эхо	
$P_1$	$ABC$	стимулированное эхо	паразитный сигнал
$P_2$	$ABC$	вторичное двухимпульсное эхо	
$P_3$	$ABD$	стимулированное эхо	
$P_4$	$BC$	двухимпульсное эхо	
$P_5$	$AC$	двухимпульсное эхо	
$P_6$	$BCD$	стимулированное эхо	
$P_7$	$ABD$	вторичное двухимпульсное эхо	
$P_8$	$ACD$	стимулированное эхо	
$P_9$	$BD$	двухимпульсное эхо	
$P_{10}$	$AD$	двухимпульсное эхо	

табл. 1. Очевидно, что увеличение числа посылок и/или импульсов в посылках должно привести к чрезвычайно быстрому росту числа паразитных сигналов. Работа спинового эхо-процессора с многоимпульсными последовательностями на высокой тактовой частоте становится, таким образом, практически невозможной. Под мультиплексированием нами далее понимается создание условий, при которых перекрёстные отклики от разных импульсных посылок не образуются, что позволяет существенно сблизить их во времени, т. е. решить задачу временного уплотнения обрабатываемой информации.

## 2. МЕХАНИЗМ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЁСТНЫХ ОТКЛИКОВ

Принцип мультиплексирования, предлагаемый в настоящей работе, основан на том, что эхо-сигнал в магнитоупорядоченном веществе наблюдается от ядер, расположенных на доменных границах, поскольку эффект усиления откликов спиновой системы в них намного превышает соответствующий эффект в доменах [5]. Эта особенность регистрации ядерного магнитного резонанса позволяет управлять эхо-сигналами, что продемонстрировано в первой статье, посвящённой

влиянию импульсного магнитного поля на спиновое эхо [11]. В дальнейшем эффектам подавления и восстановления эхо-сигналов, которые могут наблюдаться при подаче в рабочее вещество различных последовательностей создающих магнитное поле видеоимпульсов, был посвящён целый ряд работ [12–15]. В них проанализированы сравнительно кратковременные воздействия, которые проводятся на интервалах, разделяющих РЧ импульсы, или непосредственно во время поступления этих импульсов. В данной работе, в отличие от указанных выше, будет изучено действие длинного видеоимпульса, перекрывающего как посылку  $RF_2$ , так и временной промежуток, в течение которого может возникнуть полезный отклик (см. рис. 2). Ожидаемое время появления сигнала  $S$  лежит внутри интервала  $\tau$ , определяемого задержкой между РЧ импульсами и периодом повторения  $T_R''$  (рис. 2б). Внутри разных посылок задержки РЧ импульсов друг относительно друга, разумеется, могут различаться. Интервал действия импульса магнитного поля  $V$ , изображённого на рис. 2в, содержит посылку  $RF_2$  и интервал  $\tau$ , чего при достижении определённой амплитуды  $V$  достаточно для подавления всей серии откликов  $P$  при сохранении откликов  $S$ .

Как известно, на начальном этапе процесс намагничивания вещества состоит в обратимом смещении доменных границ: после воздействия на образец небольшого магнитного поля границы возвращаются в исходное состояние. Будем далее считать, что нами используются видеоимпульсы с амплитудой, не нарушающей условие обратимости. Магнитное поле, приложенное к веществу в течение какого-то времени, сдвигает на это время существующие доменные границы. Если на протяжении данного интервала времени подаётся посылка РЧ импульсов, она возбуждает ядерную спиновую систему там, где находятся границы, т. е. в смещённом положении. При видеоимпульсе, перекрывающем по длительности интервал, на котором могут возникнуть полезные эхо-сигналы, последние успевают сформироваться и могут быть зарегистрированы. При этом, однако, происходит подавление всех перекрёстных откликов  $P_1, \dots, P_{10}$  (см. табл. 1), которые могли бы возникнуть в результате действия импульсов из разных посылок, поскольку они возбуждают спины в пространственно разделённых частях образца. Это эквивалентно тому, что процесс возбуждения и регистрации откликов от посылок  $RF_1$  и  $RF_2$  прошёл в разных рабочих веществах. Результат воздействия длинного видеоимпульса такого рода показан на рис. 2г, где проиллюстрировано решение задачи мультиплексирования для двух радиочастотных посылок. Следует обратить внимание на то, что перекрёстные эхо-сигналы не возникают даже после окончания видеоимпульса (имеются в виду отклики  $P_6, \dots, P_{10}$ , рис. 2б).

Чтобы добиться подавления перекрёстных эхо-сигналов, необходимо сдвигать доменные границы на всю их толщину, т. е. так, чтобы области возбуждения спиновой системы разными посылками оказались полностью разнесены. Разумеется, это верно только для рассмотренной выше идеализированной модели, которая отличается от реальной ситуации уже тем, что сдвиги границ, по-разному ориентированных относительно внешнего поля, должны различаться. Но и при смещениях, меньших толщины доменных границ, паразитные отклики уменьшаются, т. к. их интенсивность пропорциональна перекрытию областей возбуждения. Зная приемлемый для конкретной ситуации уровень внутренних помех эхо-процессора, можно обеспечить его достижение выбором амплитуды импульса поля.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Возможность мультиплексирования, основанного на указанном выше подходе, была проверена экспериментально. Макет спинового эхо-процессора был изготовлен на базе импульсного радиорелаксометра, специально приспособленного для наблюдения сигналов ядерного спинового эха в магнитоупорядоченных материалах [16]. Блок-схема установки соответствует приведённой на

рис. 1. Система была дополнена каналом воздействия на образец импульсами магнитного поля 5 (рис. 1). В качестве этого канала использовался стандартный импульсный генератор, который нагружен на катушку, намотанную на кольцеобразный феррит, и создаёт импульс магнитного поля в рабочем веществе. Эхо-сигналы возбуждались в литий-цинковом феррите  $\text{Li}_{0,425}\text{Fe}_{2,425}\text{Zn}_{0,15}\text{O}_4$  на ядрах изотопа  $^{57}\text{Fe}$ , которым образец был обогащён до 85%. Длительности РЧ импульсов составляли несколько микросекунд, а их несущая частота была равна 68 МГц, т. е. совпадала с частотой ядерного магнитного резонанса материала при комнатной температуре. Видеоимпульс имел длительность порядка нескольких сотен микросекунд и перекрывал необходимый интервал, определяющийся задержками в последовательности РЧ импульсов. Видеоимпульс мог создавать магнитное поле с амплитудой  $h$ , регулируемой от 0 до значения  $h_{\text{max}}$ , приблизительно равного 15 Э. Известно, что в этих пределах намагничивание выбранного нами материала остаётся обратимым [17].

Качественные результаты эксперимента показаны на рис. 3, где приведены осциллограммы выходного сигнала процессора для трёх случаев: без воздействия импульсного магнитного поля (рис. 3а), при использовании импульсного поля с промежуточной величиной, когда полного подавления паразитных эхо-сигналов не происходит (рис. 3б), и при воздействии стирающего поля (рис. 3в). Второй луч осциллографа отображает видеоимпульсы. Обозначения на рис. 3 соответствуют рис. 2, причём вся группа перекрестных эхо-сигналов отмечена единым символом Р. Видно, что в исходном случае (при отсутствии подавления) последовательность, состоящая из двух посылок РЧ импульсов, возбуждает множественные паразитные отклики, которые маскируют полезный сигнал  $S_2$ . Рассуждения, проведённые в разделе 2, подтверждаются экспериментом: рис. 2б и в показывают, что приложение импульсного поля приводит к уменьшению сигналов, обязанных своим происхождением взаимодействию РЧ импульсов из разных посылок, оставляя полезный отклик неизменным. При достижении некоторой величины  $h$  наблюдается практически полное (до уровня шумов) подавление внутренних помех процессора.

Зависимости амплитуд эхо-сигналов  $I$  от величины поля показаны на рис. 4. Для примера выбраны некоторые характерные отклики. Согласно рис. 4 интенсивность эхо-сигнала  $S_2$  ( $CD$ ) постоянна при всех полях, в то время как остальные эхо-сигналы быстро спадают с ростом величины

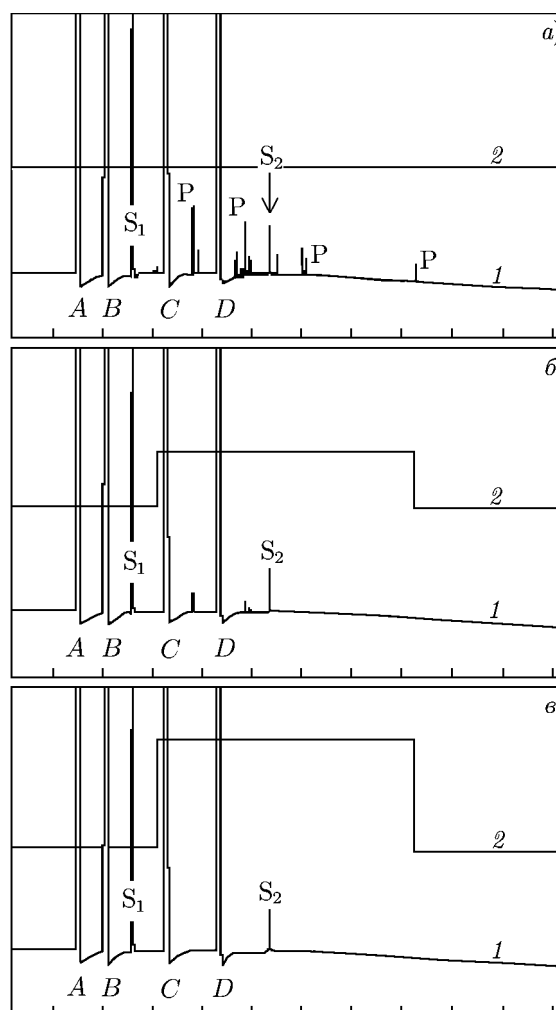


Рис. 3. Осциллограммы откликов литий-цинкового феррита, возбуждённых двумя посылками РЧ импульсов, и наблюдаемых без подавления паразитных эхо-сигналов (а), при их частичном (б) и полном (в) подавлении: 1 — луч осциллографа, отображающий выходной сигнал процессора, 2 — луч, отображающий импульс магнитного поля. Цена деления по горизонтальной оси равна 250 мкс

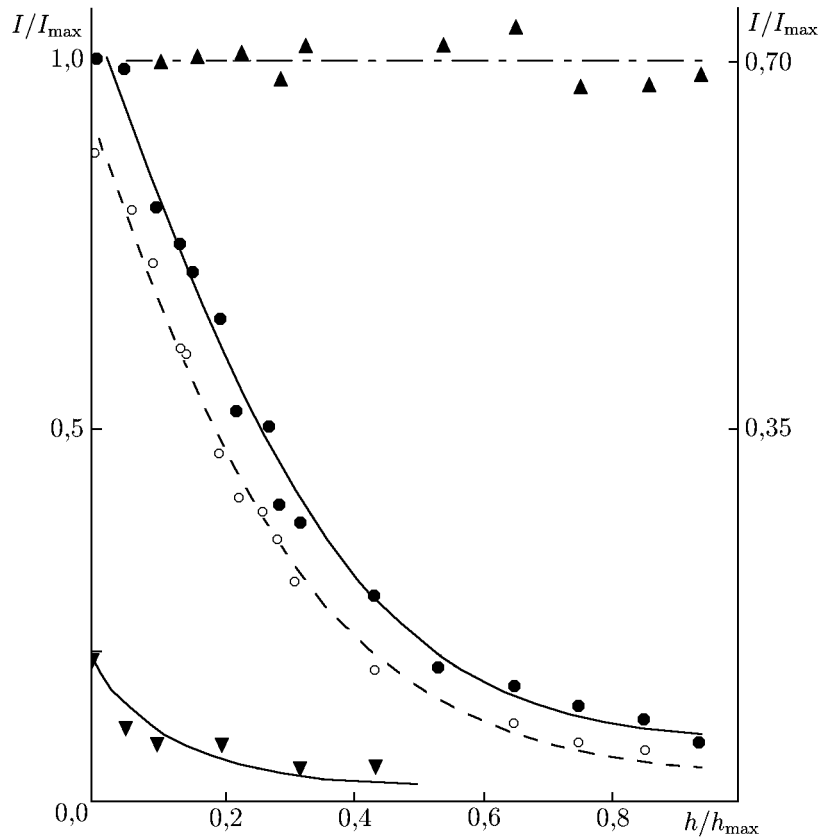


Рис. 4. Зависимости нормированных амплитуд эхо-сигналов от относительной величины импульсного магнитного поля. На правой оси ординат отложена амплитуда полезного сигнала  $S_2$  (отклик  $CD$ ), на левой — амплитуды паразитных сигналов  $P$  (отклики  $ABC$ ,  $ABD$  и  $AC$ ). Символы  $\blacktriangledown$ ,  $\circ$ ,  $\bullet$  и  $\blacktriangle$  соответствуют откликам  $AC$ ,  $ABD$ ,  $ABC$  и  $CD$ ;  $I_{\max}$  — амплитуда стимулированного эха  $ABC$

$h$ . Следует отметить сходство в поведении откликов, обусловленных одинаковыми механизмами. Отклики  $ABD$  и  $ABC$  относятся к одному и тому же типу — это стимулированные эхо-сигналы (см. табл. 1), поэтому графики зависимости  $I(h)$  у них подобны. В то же время отклик  $AC$  — это двухимпульсный сигнал, он тоже подавляется импульсным полем, но его зависимость от  $h$  оказывается иной. Эти результаты дают дополнительное обоснование нашим представлениям о природе эффекта избирательного воздействия на отклики ядерной спиновой системы.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведённые выше данные показывают, что временное уплотнение информации в эхо-процессорах может быть относительно легко достигнуто описанным методом. Схемное решение этой задачи несложно и требует включения в систему блока, вырабатывающего обычные (небольшие) для слаботочной электроники напряжения. Так, амплитуда видеоимпульсов, соответствующая полному подавлению паразитных сигналов, в наших опытах составляла несколько вольт. Очевидно, что экспериментально было достигнуто двукратное уплотнение информационного потока, но это не является пределом. Дополнительного уплотнения можно достигнуть, воспользовавшись, например, тем, что механизм подавления эхо-сигналов допускает смещение доменных границ в любую сторону от положения равновесия. Это означает, что последовательное приложение двух

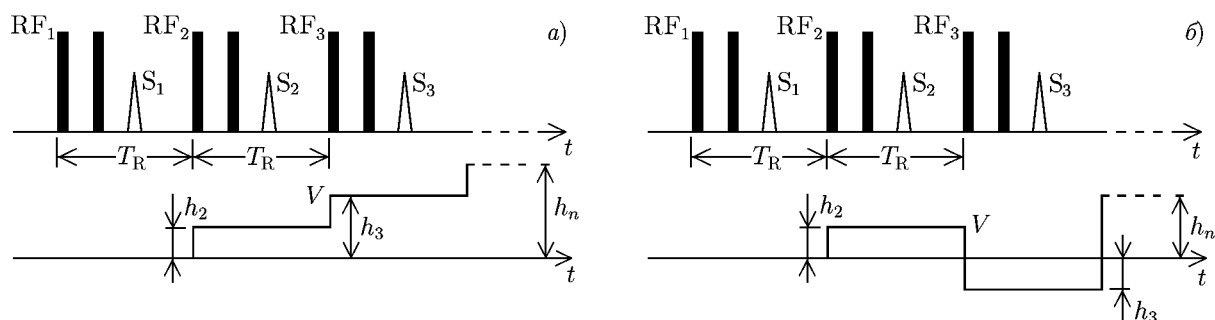


Рис. 5. Временные диаграммы, поясняющие процедуру временного уплотнения серии из нескольких двухимпульсных посылок, при которой на рабочее вещество подаётся ступенчато-нарастающее магнитное поле (а) или ступенчатое знакопеременное магнитное поле (б)

видеоимпульсов с разной полярностью позволяет обработать ещё как минимум одну посылку РЧ импульсов, поступающую на рабочее вещество с небольшой задержкой относительно второй.

Задача обработки нескольких посылок  $n$  может быть решена применением импульса магнитного поля с особым профилем. Этот подход поясняется на рис. 5. На рис. 5а показаны временная диаграмма импульсной последовательности  $RF_1, RF_2, \dots, RF_n$  и профиля поля  $V$  со ступенчато-нарастающей амплитудой  $h_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n; h_1 = 0$ ), соответствующая сдвигам доменных границ в одну сторону от положения равновесия. Рис. 5б иллюстрирует возможность обработки нескольких посылок при изменении полярности поля. При использовании такого варианта уплотнения число возможных сдвигов ограничено условием нахождения в области обратимого намагничивания рабочего вещества. Согласно работе [15] за соответствующий предел для литий-цинкового феррита может быть принята величина около 100 Э. Тогда, с учётом приведённого выше значения  $h_{\max}$  и того, что используется методика чередования видеоимпульсов с разной полярностью (рис. 5б), оценка возможного увеличения периода повторения  $T_R$  даёт примерно один порядок величины. Конечно, весьма вероятно, что материалы с другими характеристиками позволят достичь ещё более высокого показателя уплотнения потока обрабатываемой информации.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен эффективный метод мультиплексирования, применимый к таким устройствам функциональной электроники, как спиновые эхо-процессоры, в которых в качестве рабочего вещества используется магнитоупорядоченный материал. Экспериментально продемонстрирована работоспособность системы с каналом формирования длительного одиночного импульса магнитного поля, воздействующего на литий-цинковый феррит, и достигнуто двукратное временное уплотнение обрабатываемой информации при практически полном подавлении образующихся при этом внутренних помех процессора. С помощью простых оценок показано, что возможно дальнейшее значительное увеличение уплотнения.

Работа выполнена при частичной поддержке Президиума РАН (программа П-03).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассветалов Л. А. Функциональная электроника. Новгород: Издательство Новгородского гос. ун-та им. Я. Мудрого, 1999. 116 с.
2. Копвиллем У. Х., Пранц С. В. Поляризационное эхо. М.: Наука, 1985. 192 с.



3. Arushkinsky E., Astrov M. // Phys. B. 2002. V. 321, No. 1–4. P. 408.
4. Нестеров М. М., Плешаков И. В., Фофанов Я. А. // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 2. С. 3.
5. Kurkin M. I. // Phys. Metals Metallography. 2000. V. 89, No. 1. P. S48.
6. Петров М. П., Степанов С. И. // Обзоры по электронной технике, сер. 1. 1976. вып. 10. С. 385.
7. Тарханов В. И. // Научное приборостроение. 2003. Т. 13, № 1. С. 51.
8. Баруздин С. А. Нелинейное эхо и обработка сигналов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2011. 186 с.
9. Калиникос Б. А., Устинов А. Б., Баруздин С. А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. М.: Радиотехника, 2013. 216 с.
10. Леше А. Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963. 684 с.
11. Рассветалов Л. А., Левитский А. Б. // Физика твёрдого тела. 1981. Т. 23, № 11. С. 3353.
12. Ахалкаци А. М., Гегечкори Т. О., Мамниашвили Г. И. и др. // Физика металлов и металлостроение. 2008. Т. 105, № 4. С. 379.
13. Мамниашвили Г. И., Гегечкори Т. О., Ахалкаци А. М., Гавашели Ц. А. // Физика низких температур. 2012. Т. 38, № 6. С. 598.
14. Плешаков И. В., Клёхта Н. С., Кузьмин Ю. И. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 18. С. 60.
15. Плешаков И. В., Клёхта Н. С., Кузьмин Ю. И. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, № 14. С. 43.
16. Клёхта Н. С., Плешаков И. В., Дудкин В. И. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политех. ун-та. 2013. № 1. С. 200.
17. Плешаков И. В., Голощанов С. И., Кузьмин Ю. И. и др. // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 3. С. 61.

Поступила в редакцию 29 января 2015 г.; принята в печать 17 июня 2015 г.

## MULTIPLEXING EFFECT DUE TO EXPOSURE OF THE WORKING SUBSTANCE OF A SPIN ECHO PROCESSOR TO MAGNETIC FIELD PULSES

*I. V. Pleshakov, P. S. Popov, Yu. I. Kuzmin, and V. I. Dudkin*

We consider a spin echo processor that uses a magnetically ordered material (ferrite) as a working substance is considered. It is shown that it is possible to achieve suppression of the crosstalk (parasitic signals) excited by radio-frequency pulses from different chains arriving at the system if the working substance is affected by sufficiently long magnetic field pulses. Thus, time-division multiplexing of the information processed by the processor can be carried out.