

УДК 537.635

Г.В.Иванов (6 курс, каф. КЭ), В.И.Тарханов, д.ф.-м.н., проф.

КОГЕРЕНТНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ЭХО-СИГНАЛОВ В ШИРОКОПОЛОСНОМ ИМПУЛЬСНОМ ЯМР СПЕКТРОМЕТРЕ

ABSTRACT: The gear for a broadband pulsed NMR investigation of magnetically ordered substances is describe. The accent is maid on three types of coherence for excitation pulses: pulsed, phase and phase-pulsed. It is shown that phase or phase-pulsed coherence is used if output signals are to be digitally sampled and stored in a computer the way of post experiment processing of an array of such stored signals is analyzed. An improvement is suggested to gain signal to noise ratio (SNR) in displayed results. The suggestion is experimentally checked on samples with wide (Lithium ferrite) and narrow (FEBO₃) NMR lines. The gain up to 10 Db is demonstrated.

Известно, что многократное повторение импульсного ЯМР эксперимента в сочетании с когерентным накоплением регистрируемых сигналов позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум на выходе спектрометра. Такая методика легко реализуется в серийно выпускаемых узкополосных ЯМР спектрометрах высокого разрешения, предназначенных для исследования парамагнитных образцов. В них передающий и приемный тракты жестко настроены на фиксированную частоту, а подстройка под резонанс осуществляется изменением величины внешнего магнитного поля.

В магнитоупорядоченных образцах частота ЯМР и форма линии определяются распределением значений внутренних локальных магнитных полей кристаллов и требует применения широкополосных импульсных спектрометров с полосой частот 30 – 250 МГц. Для упрощения настройки приемный тракт делают широкополосным. Характер возбуждения и свойства регистрируемых сигналов определяются только несущей частотой, амплитудой, длительностью и начальной фазой прикладываемых радиоимпульсов [1].

Простые радиоимпульсы обычно прикладывают на одной несущей частоте. По фазовым соотношениям между ними различают три типа когерентности: импульсную (ударное возбуждение), фазовую (вырезание из общего гармонического сигнала) и импульсно-фазовую (ударное возбуждение с синхронизацией от гармонического сигнала).

Во вращающейся системе координат (при фазочувствительном детектировании) фаза радиоимпульса определяет направление приложения импульса постоянного магнитного поля в поперечной плоскости.

При ударном возбуждении радиоимпульсы формируются с одинаковой начальной фазой, но не являются частями общего гармонического сигнала. Это приводит к нестабильности направлений приложения возбуждений и направлений формирования эхо-сигналов в поперечной плоскости во вращающейся системе координат. В результате регистрируемый сигнал при многократном повторении эксперимента равномерно распределяется в некоторой области положительных и отрицательных значений, арифметическое среднее от которых равно нулю. Несмотря на то, что такой сигнал отчетливо виден на экране осциллографа на несущей частоте, он полностью подавляется процессом фазового детектирования.

Формирование радиоимпульсов из общего гармонического сигнала позволяет стабилизировать условия возбуждения и формирования эхо-сигналов во вращающейся системе координат, что создает условия для их когерентного накопления.

В имеющемся в лаборатории широкополосном импульсном спектрометре для цифрового когерентного накопления использовалась плата быстродействующего АЦП для регистрации и ввода аналоговых сигналов в ПЭВМ. Программное обеспечение позволяет использовать компьютер как запоминающий осциллограф с функциями фильтрации и накопления сигнала.

В докладе приводится общая схема спектрометра, основные технические характеристики канала регистрации и накопления сигналов, а также экспериментальные результаты по регистрации сигналов ЯМР от образцов литиевого феррита и бората железа.

Образцы литиевого феррита обладают широкой (~ 2 МГц) линией ЯМР и при жестком возбуждении формируют короткие ($\sim 0,5$ мкс) эхо-сигналы. Когерентное накопление позволяет отчетливо различать форму и знак огибающей для различных эхо-сигналов при достаточно хорошем подавлении вкладов от попадающих в полосу приема радио- и телевизионных станций, помех и электромагнитных наводок.

Образцы бората железа обладают узкой (~ 100 кГц) линией ЯМР, что приводит к формированию очень широких во временной области (~ 10 мкс) эхо-сигналов. Большая ширина и малая амплитуда эхо-сигнала затрудняет его обнаружение и позволяет наблюдать его только по биениям на огибающей, которые являются следствием возбуждения с расстройкой. Здесь в полной мере проявляются достоинства когерентного накопления, которое позволяет вывести регистрируемый сигнал из под уровня шумов. Даже при небольшом количестве накоплений усредненный сигнал выглядит лучше, чем сигнал, регистрируемый визуально на осциллографе. Однако бесконечно увеличивать число накоплений нельзя, так как резонансная частота в борате железа сильно флуктуирует в зависимости от температуры, что сказывается на результатах когерентного усреднения. К тому же усреднение выборок занимает определенное время, которое увеличивается с числом накоплений. Поэтому чрезмерное увеличение количества накоплений далеко не всегда оправдано и эффективно.

В ходе работы были внесены изменения в программу обработки накопленных данных. В стандартной программе метод вычисления отображаемого результата основывался на простом усреднении амплитуды сигнала в данной точке. Тем самым, подавлялся белый шум, а уровень полезного сигнала практически не изменялся (не увеличивался). Алгоритм адаптировался к амплитуде наиболее сильного сигнала от просачивающихся через подавление возбуждающих радиоимпульсов, а не к амплитуде исследуемого эхо-сигнала. В результате, полезный сигнал после обработки оставался прежней амплитуды и выигрыш в отношении сигнал/шум не ощущался. В модернизированной программе сильные остаточные сигналы от радиоимпульсов искусственно обрезаются перед суммированием, а результат суммирования делится на корень квадратный из числа накоплений. Это позволяет оптимизировать отображение полезного сигнала на выходе спектрометра.

Недостатком радиоимпульсов с фазовой когерентностью является их малая амплитуда. Формирование радиоимпульсов ударным возбуждением позволяет формировать гораздо более мощные сигналы. В дальнейшем предполагается использовать для возбуждения радиоимпульсы с импульсно-фазовой когерентностью. Для этого достаточно синхронизировать моменты приложения ударного возбуждения с моментами прохождения опорного гармонического сигнала через ноль. Это внесет дискретность в величину временных интервалов между радиоимпульсами, но позволит осуществлять когерентное накопление эхо-сигналов при формировании радиоимпульсов способом ударного возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тарханов В.И. Геометрическая алгебра, ЯМР и обработка информации. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. – 214 с.