

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ СПИНОВОГО ЭХА

Н.И.Зиневич, А.С.Медведко, Д.П.Суханов, Б.И.Щубин
Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

1. Введение

Для точных измерений постоянных магнитных полей, их стабилизации используются магнитометры, основанные на различных методах ядерного магнитного резонанса (ЯМР). В настоящее время на накопительях заряженных частиц в ИЯФ СО АН СССР эксплуатируются автодинные магнитометры и нутационные с проточной жидкостью. Прогресс, достигнутый в последние годы в цифроаналоговой и аналого-цифровой технике, открыл возможность создания автоматизированной системы магнитных измерений, основанной на нетрадиционных методах ЯМР. В описываемой системе используется метод спинового эха, который, как оказалось, придает системе магнитных измерений определенные преимущества перед другими типами магнитометров. К ее достоинствам следует отнести возможность размещения датчиков на значительном удалении от аппаратуры и легкость организации многоканальных измерений, полную автоматизацию измерений.

2. Основы метода спинового эха

Для понимания принципов, лежащих в основе измерения магнитных полей методом спинового эха, необходимо остановиться на физике эффекта спинового эха.

Движение отдельного ядерного момента $\vec{\mu}_1$ во внешнем поле \vec{H}_0 подчиняется уравнению $d\vec{\mu}_1/dt = \gamma[\vec{\mu}_1 \times \vec{H}_0]$, решение которого представляет собой свободную прецессию вокруг направления поля с угловой скоростью $\omega_0 = \gamma H_0$ (γ - ядерное гиромангнитное отношение). Добавим слабое переменное поле \vec{H}_1 частоты ω , поляризованное по кругу в плоскости, перпендикулярной направлению \vec{H}_0 . В этом случае, перейдя во вращающуюся с частотой ω систему координат, обнаружим, что ядерный момент прецессирует вокруг направления эффективного поля величины $H_{эфф} = \sqrt{(H_0 - \frac{\omega}{\gamma})^2 + H_1^2}$ с угловой скоростью $\omega_{эфф} = \gamma H_{эфф}$. При резонансе, когда $\omega = \omega_0$, движение момента в неподвижной системе координат является наложением двух вращений: прецессии вокруг \vec{H}_0 с частотой ω_0 и вокруг \vec{H}_1 с меньшей частотой $\omega_1 = \gamma H_1$. Конец вектора $\vec{\mu}_1$ будет следовать по спиральной траектории на сферической поверхности и за время Δt отклонится от направления \vec{H}_0 на угол $\Delta \theta = \omega_1 \Delta t$. Воздействуя на систему ядерных моментов, имеющую макроскопическую ядерную намагниченность \vec{M} , коротким импульсом переменного поля, можно отклонить вектор \vec{M} на заданный угол (например 90°) от направления внешнего поля, после чего он будет стремиться к своему равновесному состоянию. Затухание поперечной компоненты \vec{M} , связанное с неоднородностью поля, является обратимым явлением. Воздействуя через некоторое время на систему импульсом, поворачивающим ядерные моменты на 180° , можно восстановить поперечную намагниченность. Это явление - спиновое эхо - объясняется следующим образом [1]. Поперечные компоненты магнитных моментов отдельных частиц образца, расходящиеся по фазе из-за разности частот прецессии, под воздействием второго импульса располагаются так, что начинают сходиться. В результате фазировки через время, равное интервалу между импульсами, восстанавливается поперечная компонента макроскопической намагниченности. Форма огибающей эха имеет колоколообразную форму, а частота колебаний вектора намагниченности равна средней частоте ларморовской прецессии в поле \vec{H}_0 .

В описываемой системе измерение магнитного поля производится следующим образом. В образце вещества с нужным сортом ядер (например, протонами или ядрами лития) воздействием пары импульсов возбуждается спиновое эхо. Принимаемый с датчика эхо-сигнал частоты ЯМР переносится на низкую промежуточную частоту, где с помощью АЦП преобразуется в цифровую форму и далее производится спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье. По вычисленному спектру и известной гетеродинной частоте определяется частота эхо-сигнала и соответствующее ей значение магнитной индукции.

3. Система измерений

Автоматизированная система магнитных измерений построена по схеме рис. 1. Датчиком является ампула с рабочим веществом, помещенная в цилиндрическую катушку с осью, перпендикулярной измеряемому полю. Обмотка катушки служит как для создания переменного поля H_1 при возбуждении, так и для приема эхо-сигнала, наводимого в ней поперечной компонентой вектора намагниченности.

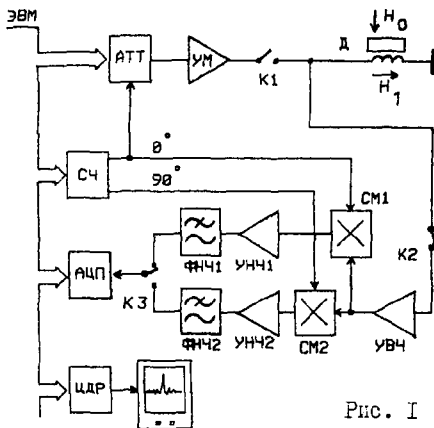


Рис. 1

Частота импульсов возбуждения задается управляемым от ЭВМ синтезатором частоты СЧ [2]. Напряжение синтезатора через аттенуатор АТТ, усилитель мощности УМ и ключ К1 подается на датчик Д. Ключ формирует пару импульсов длительностью 100 и 200 мкс с интервалом 20 мс между ними. Аттенуатором, управляемым от ЭВМ, регулируется амплитуда импульсов так, чтобы произведение амплитуды поля возбуждения на длительность сохранялось в рабочем диапазоне частот.

Эхо-сигнал частоты ЯМР снимается с датчика через ключ К2, работающий в противофазе с К1, усиливается

маломощным усилителем УВЧ и поступает на два ортогональных канала переноса частоты. Каждый канал содержит смеситель СМ, усилитель УНЧ и фильтр нижних частот ФНЧ. Гетеродинные напряжения на смесители поступают с ортогональных выходов синтезатора. На выходах каналов, таким образом, формируются два ортогональных эхо-сигнала низкой (единицы кГц) промежуточной частоты, которые через коммутатор КЗ подаются на вход АЦП и далее в ЭВМ. Коммутатор работает с частотой 10 кГц, являющейся частотой дискретизации, и служит для временного разделения сигналов. Полоса пропускания измерительного тракта составляет 5 кГц. Наличие двух ортогональных каналов необходимо для устранения зависимости параметров выходного сигнала от неопределенности фазы принимаемого с датчика эхо-сигнала.

Система магнитных измерений имеет два основных режима работы: режим поиска эхо-сигнала и режим измерения. В режиме поиска осуществляется сканирование по частоте с шагом, не превышающем полосу пропускания. Временной интервал между шагами составляет около 0,3 с. Поскольку отношение сигнал/шум может быть малым, например, в слабых полях, на каждом шаге измерения сигнал подвергается численной корреляционной обработке. Как известно из теории оптимальной фильтрации [3], корреляционный метод измерений дает наиболее достоверное обнаружение на фоне шумов сигнала с априорно известными параметрами. Эхо-сигнал характеризуется тремя параметрами: частотой ЯМР, моментом появления и формой огибающей; два последних параметра считаются априорно известными. В резуль-

тате поиска получается функция корреляции по частоте между эхо-сигналом и его копией (рис. 2а). Частота, на которой модуль функции корреляции принимает максимальное значение, является наиболее достоверным значением частоты ЯМР с погрешностью, не превышающей шага сканирования.

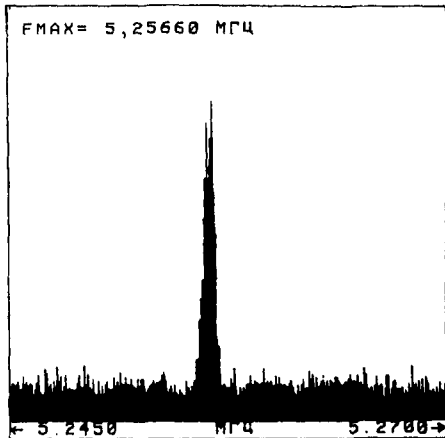


Рис.2 а

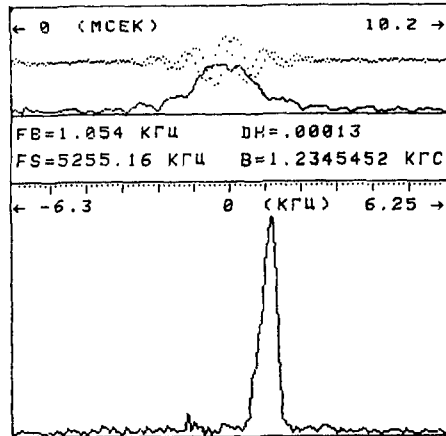


Рис.2 б

В режиме измерения частота синтезатора устанавливается вблизи частоты ЯМР. Измеренный эхо-сигнал промежуточной частоты подвергается в ЭВМ спектральному анализу с помощью быстрого преобразования Фурье, при этом определяется центр тяжести его спектра. По измеренной частоте центра тяжести спектра и известной частоте синтезатора вычисляются частота ЯМР эхо-сигнала и соответствующее ей магнитное поле. После каждого цикла измерения, занимающего 1-3 с, частота синтезатора устанавливается так, чтобы расстройка оставалась постоянной (около 1 кГц), осуществляя тем самым слежение за измеряемым полем. Эхо-сигнал, его спектр и вычисленное значение поля выводятся на дисплей (рис.2б).

Система позволяет измерять поля в диапазоне 0,05-1 Тл с помощью двух протонных датчиков (диапазон частот 2,1-42 МГц). Относительная погрешность измерений не превышает 3×10^{-6} . Ампулы датчиков имеют диаметр 5 мм с длиной обмотки 10 мм и заключены в медный экран. Датчик соединяется с измерительной системой 50-омным кабелем, согласованным с одного конца, что позволяет размещать его на значительном (десятки метров) удалении от системы. Широкополосность датчика дает возможность получить большое перекрытие по полю одним датчиком (3-5 раз).

В настоящее время работает автоматизированная система магнитных измерений с полями до 1 Тл. Расширение диапазона в области более сильных полей будет осуществляться применением датчиков с ядрами лития, имеющими меньшее гиромагнитное отношение. Это даст возможность при том же частотном диапазоне измерять поля до 2,6 Тл. Планируется реализовать также многоканальный режим работы системы.

Литература

1. Леше А. Ядерная индукция . М.: Иностранная литература, 1963.
2. Зиневич Н.И., Шубин Е.И. Синтезатор частоты в стандарте КАМАК . Препринт ИИФ СО АН СССР, 84-14, Новосибирск, 1964.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиофизика . М.: Советское радио, 1966.