

СПЕКТРОСКОПИЯ
АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

УДК 539.18

УСТРАНЕНИЕ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ M_x -МАГНИТОМЕТРА
И КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ЛИНИИ РЕЗОНАНСА
В НЕСТАБИЛЬНОМ ПОЛЕ МЕТОДОМ ИНВАРИАНТНОГО
ОТОБРАЖЕНИЯ СИГНАЛА СПИНОВОЙ ПРЕЦЕССИИ

© 2006 г. А. К. Вершовский*,**, Е. Б. Александров*,**

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

** Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 24.05.2005 г.

Предложена методика двумерного отображения сигнала магнитного резонанса, позволяющая исключить влияние вариаций поля в процессах контроля спектра магнитного резонанса и коррекции фазы в петле обратной связи M_x -магнитометра.

В основе работы всех квантовых магнитометрических устройств лежит измерение частоты магнитного резонанса. В протонных магнитометрах – это частота свободной прецессии момента протона, в магнитометрах с оптической накачкой – частота магнитного резонанса полного атомного момента [1]. По способу детектирования резонанса квантовые магнитометры можно делить по нескольким критериям, но нас будет интересовать деление на устройства, сигналом в которых является величина, пропорциональная продольной компоненте магнитного момента – M_z -сигналу (к этому типу устройств относятся относительно медленные, но более точные M_z -магнитометры), и устройства, отслеживающие фазу осциллирующей поперечной компоненты магнитного момента – быстродействующие M_x -магнитометры. Погрешности обоих типов устройств обусловлены как параметрическими сдвигами самого магнитного резонанса, так и ошибками измерения положения центра резонансной линии. Последние наиболее характерны для M_x -магнитометров, нуждающихся в точном выставлении фазового сдвига сигнала прецессии магнитного момента в петле обратной связи устройства. Далее под M_x -сигналом будет подразумеваться результат синхронного детектирования (на частоте ω переменного поля H_1) первичного сигнала прецессии спина. M_x -сигнал характеризуется амплитудой осцилляций, их фазой относительно фазы индуцирующего резонанс переменного магнитного поля и шириной резонанса, которая зависит как от релаксационных процессов, так и от насыщения резонанса. Определение фазы магнитного резонанса для M_x -магнитометров имеет первостепенную важность, так как неточность компенсации фазового сдвига приводит к ошибке определения центра резонанса, и как следствие – к появлению систематичес-

кой ошибки измерения магнитного поля. Наиболее прямой способ коррекции фазы сводится к симметризации линии магнитного резонанса, т.е. зависимости M_x -сигнала от частоты ω поля H_1 . Однако запись линии магнитного резонанса требует времени, много большего обратной ширины резонанса, и в условиях реального, т.е. не стабилизированного, магнитного поля точность такой процедуры оказывается ограниченной вариациями поля – либо такое измерение оказывается вообще невозможным. Ниже предлагается методика представления сигнала магнитного резонанса, позволяющая в условиях значительных случайных вариаций магнитного поля осуществлять надежную коррекцию фазы, измерять амплитуду и фактор насыщения M_x -резонанса, а также определять наличие в магнитном спектре близлежащих спектральных составляющих.

M_x -сигнал S , связанный с переходом между двумя магнитными подуровнями в магнитном поле H_0 в присутствии переменного радиополя H_1 на частоте ω , описывается известными уравнениями Блоха [2], стационарное решение которых в комплексной форме имеет следующий вид:

$$S = \frac{A\omega_1 i + \delta Z}{Z^2 1 + \delta^2} e^{i\varphi}, \quad (1)$$

где $\delta = (\omega - \omega_0)/\Gamma Z$ – приведенная расстройка частоты радиополя ω от частоты резонанса ω_0 , φ – дополнительный поворот фазы резонанса, обусловленный как набегом фазы в измерительном тракте, так и геометрией эксперимента, A – амплитуда сигнала резонанса, $\Gamma = 1/T_2$ – ширина резонанса, $Z = 1 + \omega_1^2 T_1 T_2$ – фактор насыщения резонанса, ω_1 – частота нутации Раби, T_1, T_2 – времена продольной и поперечной релаксаций магнитно-

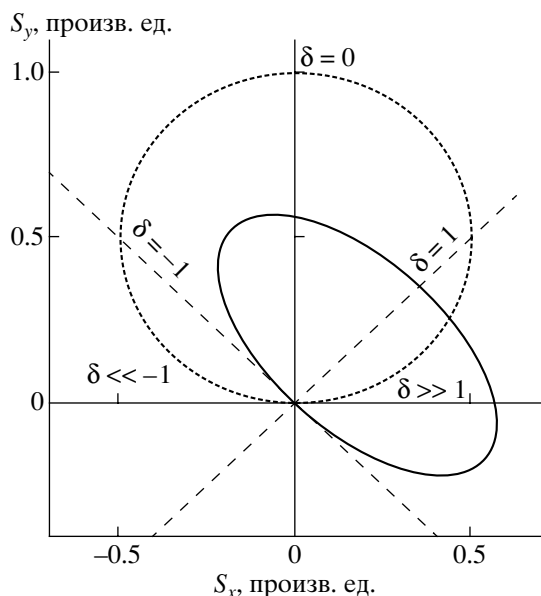


Рис. 1. Сигнал M_x -резонанса на комплексной плоскости, сплошная линия – диаграмма в лабораторной системе координат x, y , пунктир – в собственной системе координат x', y' .

го момента. При $\varphi = 0$ компоненты $S_x = \text{Re}S$ и $S_y = \text{Im}S$ представляют собой лоренцев контур поглощения (с максимумом при нулевой расстройке) и лоренцев дисперсионный контур – с нулевым значением при нулевой расстройке. Именно эта последняя компонента сигнала и используется в системах автоподстройки частоты поля H_1 к резонансному значению [3].

Представим сигнал $S = S_x + iS_y$ на комплексной плоскости. В общем случае он имеет вид эллипса с отношением осей, равным фактору насыщения Z , причем малая ось выходит из начала координат

и наклонена по отношению к оси y на угол φ . Эллипс представляет собой геометрическое место точек, описывающих M_x -сигнал при любых расстройках δ , что и делает это представление привлекательным. Его замечательная особенность состоит в инвариантности к флуктуациям магнитного поля: при хаотических изменениях расстройки, вызванных этими флуктуациями, текущая точка хаотически перемещается по контуру эллипса, форма и ориентация которого остаются стабильными при фиксированных значениях амплитуды A , фазы φ и насыщения Z . Это обстоятельство и позволяет надежно измерять эти три величины, несмотря на флуктуации внешнего поля.

Таким образом, оптимизация режима M_x -магнитометра сводится к подбору фазы φ такой, чтобы эллипс, отражающий множество сигналов S , был бы ориентирован малой осью вдоль оси y . Отношение осей зависит от амплитуды переменного поля H_1 и должно устанавливаться в окрестности значения 2, соответствующего максимальной разрешающей способности резонанса. Простой способ численной обработки получившейся диаграммы состоит в переходе к новой системе координат x', y' (назовем ее собственной), в которой эллипс преобразуется в окружность с центром, лежащим на оси y' (рис. 1),

$$|S'| = (A\omega_1/Z) \sin \psi, \quad (2)$$

где $\psi = \text{arccotg} \delta$ – угол на комплексной плоскости. Такой переход осуществляется подбором коэффициентов φ и Z при повороте системы координат x, y на угол φ и последующим изменением масштаба оси y в Z раз:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \varphi + y \sin \varphi, \\ y' &= Z(-x \sin \varphi + y \cos \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

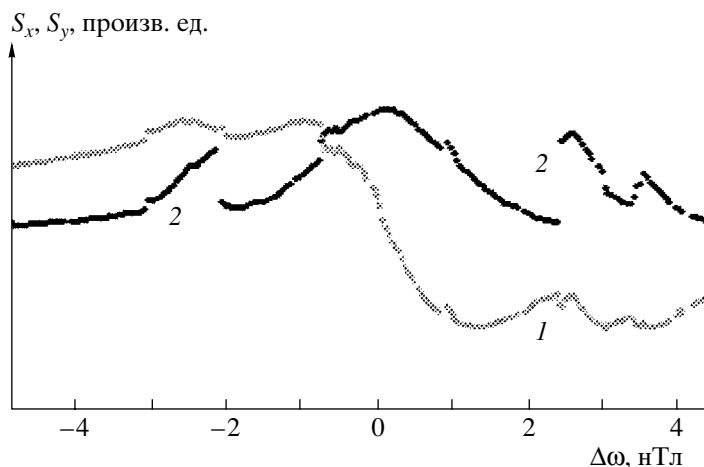


Рис. 2. Запись компонент M_x -резонанса в реальном магнитном поле, скорость сканирования – 0.3 нТл/с, 1 – S_x , 2 – S_y .

Сравнение диаграммы в новом графическом представлении с идеальной окружностью позволяет легко обнаружить искажения контура линии, связанные с наличием в магнитном спектре дополнительных спектральных составляющих. Практическая реализация двумерного отображения сигнала осуществляется одновременным фазовым детектированием первичного M_x -сигнала прецессии двумя фазовыми детекторами, фазы опорных напряжений которых сдвинуты на 0° и 90° относительно фазы радиополя. Выходы детекторов отображаются соответственно по осям x и y на дисплее.

На рис. 2 приведен пример традиционной записи формы узкого магнитного резонанса в спектре ^{41}K (переход $F = 2, m_F = 1 \longleftrightarrow F = 2, m_F = 2$) в реальном поле. Видно, что из-за флуктуаций поля зависимости $S_x(\delta)$, $S_y(\delta)$ сильно отличаются от идеальных лоренцевых дисперсионной кривой и кривой поглощения. На рис. 3 та же запись представлена на комплексной плоскости (1) и показан результат (2) преобразования лабораторной системы координат xu в собственную $x'y'$ с коэффициентами преобразования $Z = 1.55 \pm 0.02$, $\varphi = -1.5^\circ \pm 0.5^\circ$ (при собственной ширине резонанса $\Gamma = 1$ нТл ошибка измерения фазы в 0.5° соответствует ошибке определения центра резонанса в 9 пТл). Искажения формы сигнала в правой части диаграммы свидетельствуют о наличии в магнитном спектре дополнительных компонент – как правило, обусловленных наличием переменной составляющей поля на частоте 50 Гц. Расширение диапазона сканирования позволило бы выявить искажения, связанные с присутствием соседней линии $F = 2, m_F = 0 \longleftrightarrow F = 2, m_F = 1$.

Таким образом, преимущество предлагаемого метода представления сигнала магнитного резонанса над стандартным заключается не только в том, что поворот диаграммы вокруг начала координат, эксцентриситет эллипса и искажение его формы могут быть легко замечены и измерены с высокой точностью (рис. 3), но прежде всего в том, что такое измерение не требует стабилизации магнитного поля и может быть осуществлено в полевых условиях, т.е. в нормальных условиях применения квантовых магнитометров. Действительно, как бы велики ни были флуктуации маг-

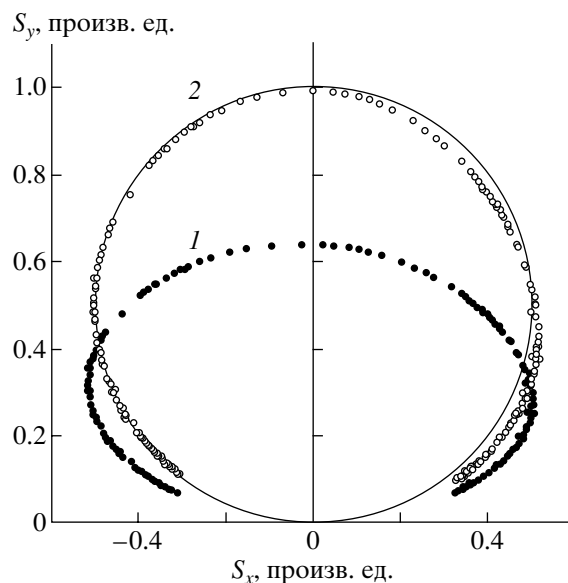


Рис. 3. Та же, что на рис. 2, запись компонент M_x -резонанса в реальном магнитном поле. 1 – в лабораторной системе координат, 2 – в собственной системе координат.

нитного поля во время сканирования частоты радиополя через резонанс, они приведут только к флуктуациям плотности измерений на диаграмме, но не к искажению ее формы. Повторяя процедуру сканирования, можно набрать достаточное количество точек для определения фазового сдвига и других параметров резонанса с любой заданной точностью, тогда как при записи линии резонанса в дрейфующем поле обычным методом накопление сигнала не приводит к увеличению точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скоцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972.
2. Bloch F. // Phys. Rev. 1946. V. 70. P. 460.
3. Alexandrov E.B., Balabas M.V., Pasgalev A.S., Ver-shovskii A.K., Yakobson N.N. // Las. Phys. 1996. V. 6. P. 244.