

09;11;15

Корреляция сигналов в тандеме спиновый генератор и СВЧ-дискриминатор на щелочных атомах с лазерной накачкой

© А.А. Баранов, С.В. Ермак, Э.А. Сагитов, Р.В. Смолин,
В.В. Семенов

Санкт-Петербургский политехнический университет
E-mail: vladimir_semenov@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 сентября 2015 г.

Представлены результаты исследования влияния низкочастотных шумов на стабильность резонансной частоты самогенерирующего магнитометра на парах ^{87}Rb при одновременной регистрации сигнала радиооптического резонанса на магнитоинвариантном СВЧ-переходе в условиях лазерной накачки D_2 линией головного дублета. Разность синхронных записей детектируемых сигналов, приведенных к одному масштабу в единицах магнитного поля, обрабатывалась для определения дисперсии Аллана в функции времени усреднения. При обработке данных вычислялся коэффициент корреляции, характеризующий связь детектируемых сигналов, определяемую как темпом накачки, так и интенсивностью радиополей, создаваемых в зоне размещения рабочей камеры поглощения. Отмечена работоспособность самогенерирующего магнитометра лишь при настройке лазера на длинноволновую компоненту электродипольного перехода.

Долговременная стабильность частоты парощелочных квантовых дискриминаторов с оптической накачкой, используемых при создании магнитометров и образцовых мер частоты, определяется, как известно, техническими (фликкерными) шумами, связанными с медленными изменениями параметров устройств подобного вида (например, температуры рабочей камеры поглощения, давления щелочных паров, вариаций интенсивности и спектрального состава источника накачки и т.п.). Анализ влияния подобных процессов на стабильность частоты самогенерирующих устройств, проведенный в работе [1], показывает, что нестационарная техническая ширина линии самогенерирующего устройства определяется интенсивностью фликкерных шумов различной природы и обратно пропорциональна частоте автоколебаний. Ин-

тегральное влияние таких шумов на динамику частоты автоколебаний самогенерирующего устройства не позволяет определить дестабилизирующую роль различных фликкер-компонент, что в свою очередь затрудняет поиск путей улучшения метрологических характеристик измерительного модуля. Тем не менее накопленный опыт при создании квантовых самогенерирующих устройств с оптической накачкой позволяет констатировать, что их основным дестабилизирующим фактором являются так называемые световые сдвиги частоты, вызванные действием нерезонансных компонент в спектре источника накачки. Применительно к парам щелочных металлов в условиях их оптической ориентации циркулярно поляризованным излучением световой сдвиг содержит три составляющих [2]: 1) скалярный сдвиг $\Delta\nu_0$, одинаковый для всех магнитных подуровней сверхтонкой структуры F либо F^* ; 2) векторный сдвиг $\Delta\nu_V$, вызванный эффективным магнитным полем, наводимым в среде циркулярно поляризованным излучением накачки (явление, известное как обратный эффект Фарадея); 3) тензорный сдвиг $\Delta\nu_T$, связанный с эффектом выстраивания атомов основного состояния и зависящий от магнитного квантового числа m_F .

В зависимости от знака круговой поляризации света накачки (направления эффективного магнитного поля) скалярная и векторная компоненты светового сдвига будут либо складываться, либо вычитаться, что предопределяет возможность их взаимной компенсации и позволяет в свою очередь резко снизить влияние источника накачки на стабильность частоты квантового дискриминатора.

В данном сообщении представлены результаты исследования влияния низкочастотных шумов на стабильность резонансной частоты самогенерирующего магнитометра при одновременной регистрации сигнала радиооптического резонанса на магнитозависимом СВЧ-переходе. В подобном тандеме оказывается возможным определить вклад источников частотных вариаций наблюдаемого сигнала, связанных, с одной стороны, с вариациями рабочего магнитного поля, с другой — со световыми сдвигами резонансных частот магнитометра и сигнала СВЧ.

В качестве источника накачки использовался лазер с внешним резонатором DL-100-L (Toptica), настроенным на линию D_2 головного дублета атомов рубидия-87. Обоснованием такого выбора послужил пренебрежимо малый вклад тензорной компоненты в интегральный световой сдвиг частоты по сравнению с подобным вкладом при накачке линией D_1 . При этом на резонансную частоту магнитометра оказывает

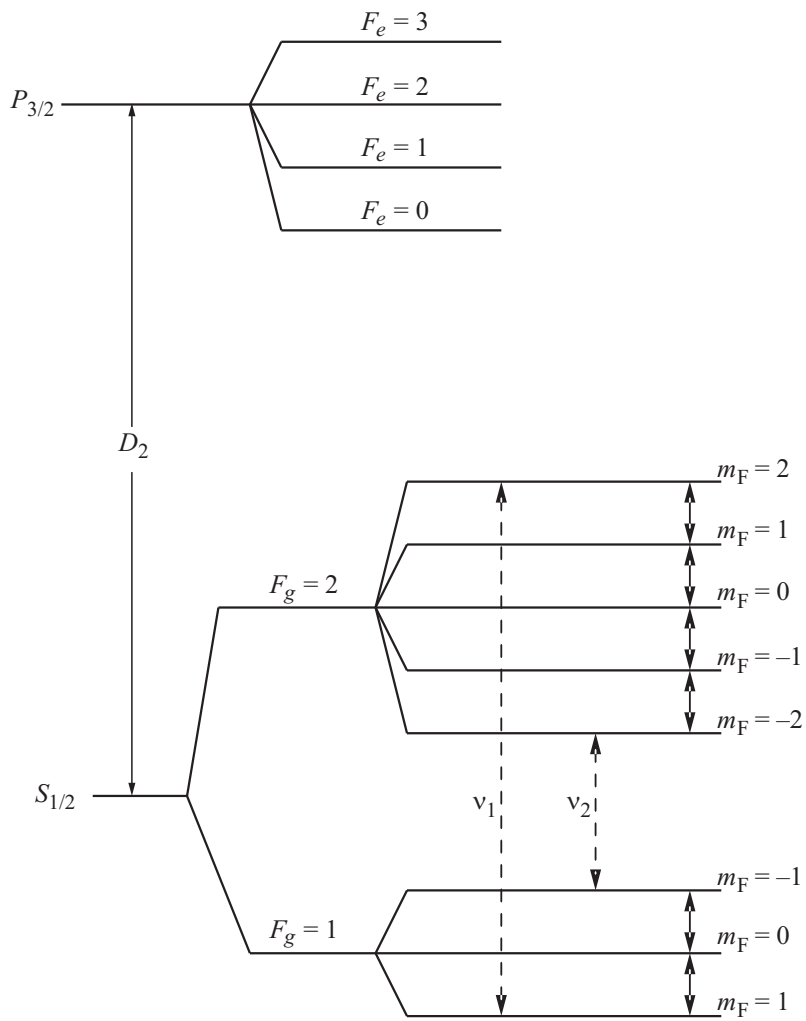


Рис. 1. Энергетический спектр атомов щелочного металла для электродипольного перехода D_2 линии головного дублета.

влияние только векторная составляющая светового сдвига, что позволяет определить его величину, инвертировав знак круговой поляризации света накачки. На рис. 1 показана часть энергетического спектра атомов рубидия-87, соответствующая линии D_2 головного дублета; сплошными стрелками в основном состоянии $S_{1/2}$ обозначены магнитодипольные переходы, соответствующие частоте самогенерирующего магнитометра, пунктирными — магнитозависимые переходы, соответствующие сигналу СВЧ радиооптического резонанса на частотах ν_1 и ν_2 . Канал СВЧ-тандема настраивался на частоту ν_1 либо ν_2 в зависимости от знака круговой поляризации света накачки (σ^- либо σ^+).

Эксперименты были выполнены на лабораторном макете квантового дискриминатора, функциональная схема которого содержит известный набор составных элементов, используемых в квантовой магнитометрии [3] и технике образцовых мер частоты на газовой ячейке [4]. В качестве ячейки использовалась кювета объемом 1 см^3 с антирелаксационным покрытием стенок. Единственный оптический тракт дискриминатора помещался в центр катушек, создающих рабочее магнитное поле под углом 45° к оптической оси. Для ослабления внешних магнитных помех и неоднородностей лабораторного магнитного поля вся система помещалась в двухслойный магнитный экран с коэффициентом экранирования 10^2 . Резонансное СВЧ-поле, индуцирующее переходы в сверхтонкой структуре атомов рубидия, создавалось ординарной схемой умножения частоты опорного кварцевого генератора с последующим усилением сигнала в усилителе.

При детектировании сигнала радиооптического резонанса на магнитозависимом СВЧ-переходе использовалась стандартная методика синхронного детектирования, причем основой экспериментальной схемы являлся аналог измерителя магнитной индукции, предложенный в работе [5] и представлявший тандем парощелочных магнитометров с оптической накачкой, один из которых выполнен по принципу спинового генератора, другой — в виде пассивного радиоспектрометра с автоподстройкой резонансной частоты по линии СВЧ радиооптического резонанса. Эксперимент показал ожидаемое взаимное влияние НЧ- и СВЧ-сигналов, проявляемое в динамике изменения как их интенсивности, так и спектрального состава.

Резонансная частота самогенерирующего магнитометра фиксировалась частотомером со встроенным рубидиевым стандартом частоты, подключенным к монитору компьютера, на который поступал также

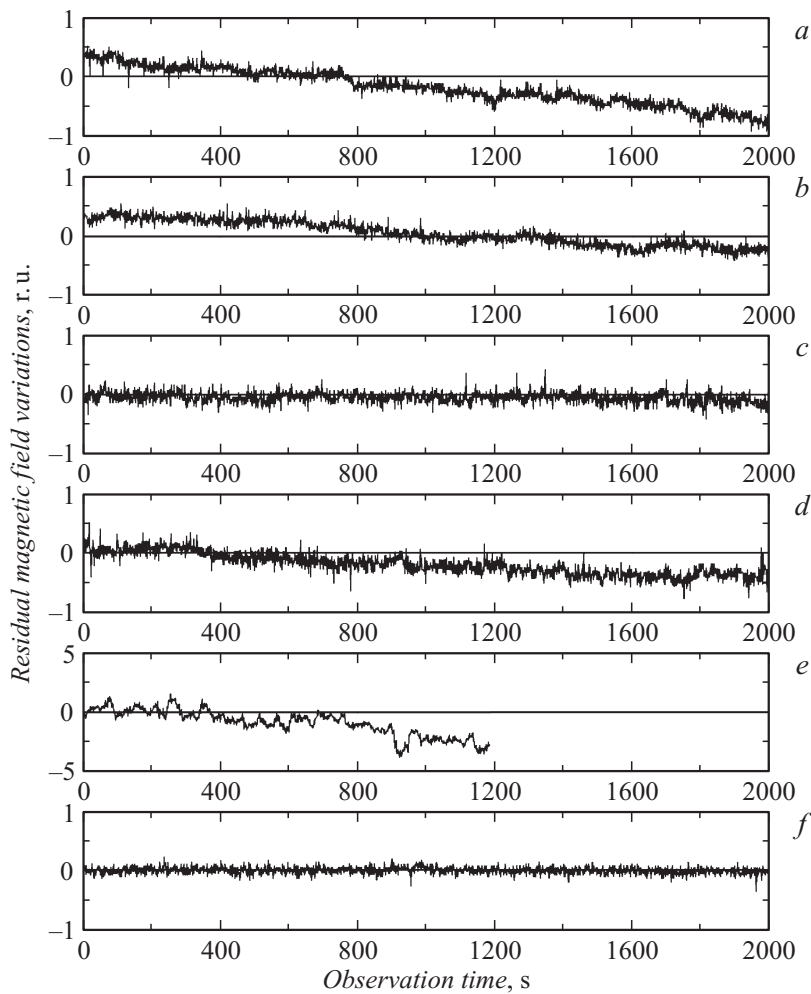


Рис. 2. Временные зависимости разности магнитных вариаций, детектируемых на магнитоинвариантном СВЧ-переходе самогенерирующим магнитометром при различных значениях коэффициента корреляции K детектируемых сигналов: $a - \sigma^+$ ($K = 0.88$), $b - \sigma^+$ ($K = 0.94$), $c - \sigma^-$ ($K = 0.99$), $d - \sigma^-$ ($K = 0.93$), $e - \sigma^-$ ($K = 0.65$), $f - \sigma^+$ ($K = 0.99$).

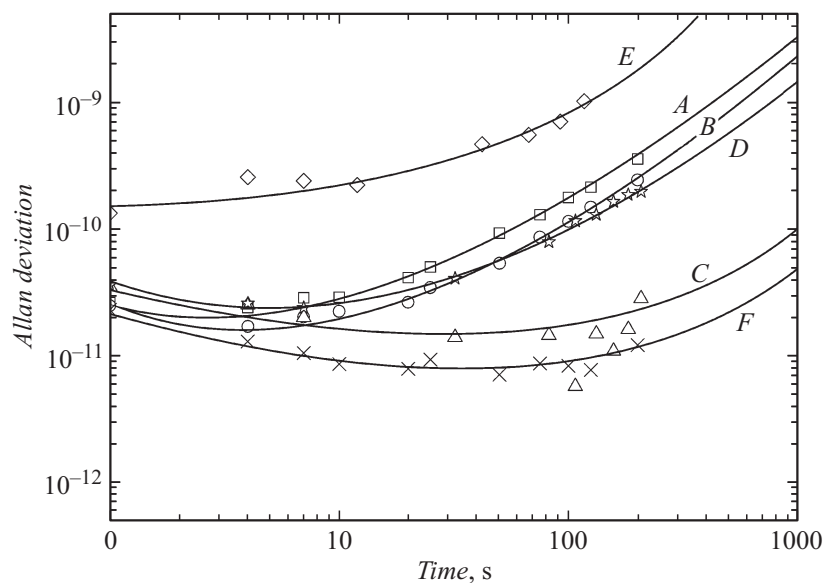


Рис. 3. Временные зависимости дисперсии Аллана для разности магнитных вариаций, фиксируемые квантовыми магнитометрами тандема при различных коэффициентах корреляции наблюдаемых СВЧ- и НЧ-сигналов. Графики A–F соответствуют графикам разности магнитных вариаций, представленных на рис. 2.

сигнал ошибки СВЧ-канала, пропорциональный остаточным вариациям магнитного поля в экране. Разность синхронных записей этих вариаций (рис. 2), приведенных к одному масштабу в единицах магнитного поля, обрабатывалась для определения дисперсии Аллана.

При обработке данных вычислялся коэффициент корреляции (с точностью до второго знака после запятой), характеризующий связь детектируемых в тандеме СВЧ- и НЧ-сигналов, определяемую как темпом накачки, так и интенсивностью радиополей, создаваемых в зоне размещения рабочей камеры поглощения. Величина коэффициента корреляции варьировалась в диапазоне 0.3–0.99 в зависимости от интенсивности приложенных полей и уровня мощности автоколебаний спинового генератора. На рис. 3 представлены соответствующие

временные зависимости дисперсии Алана для разности магнитных вариаций, фиксируемые магнитометрами тандема.

Вследствие модификации СВЧ-спектра поглощения атомов щелочных металлов, обусловленной присутствием низкочастотного радиополя автоколебаний спинового генератора, требовалось определение оптимальных параметров приложенных полей, при которых возможно достижение наибольшей долговременной стабильности тандема. Эмпирически было установлено, что для ячеек с антирелаксационным покрытием стенок наилучший результат достигается при следующих параметрах уширения линии поглощения на $0-0$ сверхтонком переходе (в относительных долях темновой ширины линии $0-0$ резонанса, порядка 200 Hz), вызванного действием радиополей и света накачки лазера: свет накачки 20%, СВЧ-радиополе 20%, радиополе автоколебаний спинового генератора 10%. Последняя рекомендация соответствовала 50%-му уровню автоколебаний от его максимального значения, соответствующего переходу генератора в режим насыщения спиновой системы. При этих параметрах коэффициент корреляции достигал предельного значения 0.99.

Взаимовлияние СВЧ- и НЧ-сигналов в исследуемом тандеме проявлялось в сдвиге частоты спинового генератора при изменении частоты СВЧ-перехода, не связанной с вариациями магнитного поля. Подобный сдвиг, обусловленный циркуляцией когерентности между подуровнями сверхтонкой структуры щелочных атомов, „одетых“ НЧ-радиополем, зависел от знака круговой поляризации света накачки (направления эффективного магнитного поля), интенсивности прикладываемых полей и номера магнитодипольного перехода в СВЧ-спектре поглощения. Так, например, было обнаружено, что абсолютная величина этого сдвига для краевого резонанса на магнитоинвариантных СВЧ-переходах более чем на порядок меньше, чем в случае индуцирования $0-0$ перехода. При этом для поляризации света накачки сдвиг σ^+ и σ^- частоты спинового генератора наблюдался с противоположным знаком при однонаправленной расстройке частоты СВЧ-поля от резонансного значения.

Отметим в заключение, что рассмотренный тандем в варианте использования линии D_2 работоспособен лишь при настройке лазера на длинноволновую компоненту электродипольного перехода, т.е. когда с полем накачки взаимодействует максимальное число атомов на подуровнях сверхтонкой структуры. Перестройка лазера на коротко-

волновую компоненту не дала положительного эффекта вследствие невыполнения условий самовозбуждения из-за низкой концентрации атомов, вызванной эффектом сверхтонкой оптической накачки.

Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности взаимной компенсации фликкер-компонент низкочастотного шума в квантовом парашелочном дискриминаторе при правильном выборе направления круговой поляризации света накачки. Этот вывод позволяет рассматривать тандем СВЧ-дискриминатора и НЧ-автогенератора как альтернативный вариант атомных часов с низким уровнем долговременного дрейфа дисперсии Аллана. При этом существенную роль играет выбор частоты спинового генератора, определяемой рабочим магнитным полем. Предложенный тандем может представлять определенный интерес в условиях лазерной накачки линией D_1 , где весомое значение приобретает тензорная компонента светового сдвига, зависящая от ориентации магнитного поля относительно оптической оси [6]. Высокая степень корреляции тензорного сдвига на СВЧ- и НЧ-переходах, реализуемая в тандеме на атомном уровне, дает возможность соответственно уменьшить ориентационную погрешность квантового СВЧ-дискриминатора.

Список литературы

- [1] Ермак С.В., Зимницкий П.В., Смолин Р.В., Семенов В.В. // Письма в ЖТФ. 2014. В. 6. С. 82–88.
- [2] Harper W., Mathur B.S. // Phys. Rev. 1967. V. 163. N 1. P. 12–25.
- [3] Александров Е.Б., Вершовский А.К. // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 605–637.
- [4] Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. М.: Физматлит, 2009. 512 с.
- [5] Александров Е.Б., Балабас М.В., Вершовский А.К., Пазгалев А.С. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 7. С. 118–124.
- [6] Семенов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1999. № 2. С. 86–90.