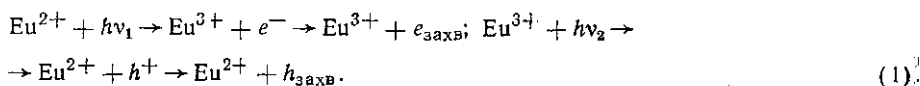


буждении европия на высокоэнергетическом краю активаторной полосы происходят последовательные процессы ухода и захвата электронов и затем дырок:



Перехода к обсуждению, заметим, что процессы разделения зарядов и эффективного заполнения дырочных ловушек могут происходить только при захвате электронов, иначе электроны возвращаются к ионизированному европию, и вторая часть процесса (1) невозможна. Так можно объяснить уменьшение светосуммы под пиком 210 К при температуре возбуждения, достаточно высокой для опустошения электронных ловушек. Переход дырок с Eu^{3+} в валентную зону, вероятно, происходит под действием возбуждающего света. В итоге концентрация Eu^{3+} почти не увеличивается, поэтому наблюдаются относительно небольшая интенсивность электронных пиков и небольшие относительные изменения концентрации Eu^{2+} при ТСЛ. Электроны, освобождаемые при ТСЛ в области температур 110—140 К, видимо, большей частью перезахватываются более глубокими центрами и затем рекомбинируют с дырками, освобождаемыми при прохождении пика 210 К. Энергия при рекомбинации эффективно передается Eu^{2+} , вызывая его сенсibilизированную люминесценцию. Возможен и другой механизм люминесценции Eu^{2+} в пике ТСЛ 210 К: при захвате дырок на Eu^{2+} энергия передается к электронным центрам захвата и происходит освобождение электронов с последующим их перезахватом образовавшимися ионами Eu^{3+} , что приводит к люминесценции в полосе Eu^{2+} . Для уточнения предложенных механизмов необходимо привлечение дополнительных данных, например, по ТСЛ CaS с другими активаторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аллсалу М.-Л. Ю., Зорина Л. Н., Социн Н. П. // XXX совещ. по люминесценции (неорган. кристаллы). Тез. докл. Ровно, 1984. С. 181. [2] Lehmann W. J., Ryan F. M. // J. Electrochem. Soc. 1971. 118, N 3. P. 477. [3] Бельский А. Н. Дис. ... канд. физ.-мат. наук (МГУ, физ. фак.). М., 1986. [4] Агапов М. Н. и др. Деп. ВИНТИ № 6120-B87. М., 1987. [5] Яэк И. В., Хютт Г. И. // Тр. ИФА АН ЭССР. 1970. 38. С. 103. [6] Keller S. P. // J. Chem. Phys. 1958. 29, N 1. P. 180. [7] Порывкина Л. В. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1977. 47. С. 121. [8] Агапов М. Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. 14, № 2. С. 114. [9] Педак Э. Ю., Аллсалу М.-Л. Ю., Кантер М. Я. // Журн. прикл. химии. 1972. 45, № 12. С. 2619. [10] Семан В. О., Лехто Т. П., Эллервез А. Ф. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1982. 53. С. 57.

Поступила в редакцию
17.06.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 30, № 2

УДК 539.143.43

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ МНОГОЧАСТОТНОЙ СПИНОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Н. В. Анисимов, Ю. С. Константинов

(кафедра радиофизики СВЧ)

Описаны эксперименты по использованию схем фазовой автоподстройки частоты для фильтрации двух отдельных частот из спектра колебаний многочастотной спиновой генерации с последующим измерением их разностной частоты с высокой точностью.

В регенеративной ЯМР-спектроскопии, где в качестве датчика сигналов ЯМР используется спиновый генератор, удается с высокой точностью (10^{-4} — 10^{-5} Гц) измерять спектральные интервалы, характеризующие спиновую систему [1, 2]. Идея измерения спектральных интервалов в регенеративной ЯМР-спектроскопии основана на том, что при определенных условиях разности между частотами спиновой генерации близки к разностям между соответствующими ларморовыми частотами [3]. Хотя величину отдельного спектрального интервала можно определить путем фурье-

обработки сигналов многочастотной спиновой генерации, обычный алгоритм такой обработки требует анализа большого объема избыточной информации, и поэтому не является в данном случае оптимальным.

Оптимизировать процедуру измерения спектрального интервала можно, если сначала выделить из незатухающего сигнала многочастотной спиновой генерации только две частоты, спектральный интервал между которыми необходимо измерить, а затем путем нелинейного преобразования получить из них разностную частоту (частоту биений). Измерение спектрального интервала в этом случае можно свести к измерению периода биений и, таким образом, представить для цифровой обработки только полезную информацию. Следует отметить, что нестабильность резонансных условий мало влияет на величину разностной частоты, что очень важно при точном измерении спектрального интервала [4].

Для реализации указанной процедуры измерения спектральных интервалов необходимы фильтры с полосой пропускания 0,1—1 Гц со средними частотами порядка нескольких кГц, т. е. с эквивалентной добротностью 10^4 — 10^5 . Это трудно сделать с помощью обычных пассивных или активных фильтров. Мы использовали в качестве узкополосных фильтров две схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), а с помощью смесителя выделялась разностная частота (рисунком, а). С помощью схем ФАПЧ осуществлялась подстройка частот генераторов, управляемых напряжением, к тем частотам в спектре многочастотной спиновой генерации, спектральный интервал между которыми требовалось измерить (см. рисунок, б).

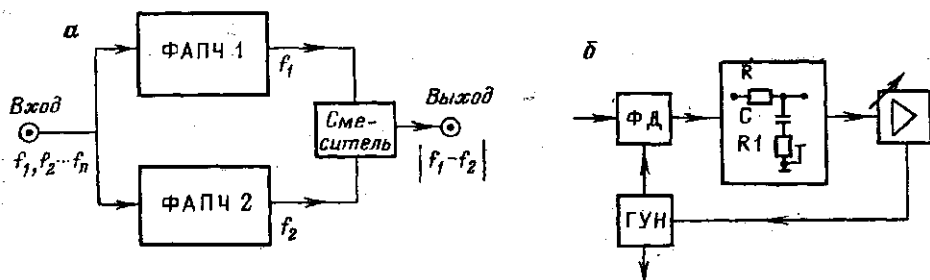


Схема выделения двух частот из спектра многочастотной спиновой генерации с использованием двух схем фазовой автоподстройки частоты — ФАПЧ1 и ФАПЧ2

В качестве генератора, управляемого напряжением, использовался синтезатор частот Ч6-31. Фазовый детектор (ФД) собран по обычной балансной схеме. Фильтром нижних частот является пропорционально интегрирующий фильтр с параметрами: $R = 130$ кОм, $R_1 = 33$ кОм, $C = 10$ мкФ. Усилитель собран на микросхеме К140УД8А. Кроме сигнала управления на вход усилителя поступает постоянное напряжение, задающее начальный режим генератора, при котором возможно схватывание ФАПЧ. Подбором параметров фильтра нижних частот и усиления устанавливался режим работы ФАПЧ, обеспечивающий наилучшую фильтрацию управляемого сигнала при достаточном запасе устойчивости. Под устойчивостью здесь понимается способность схемы ФАПЧ работать без самовозбуждения в режиме удержания [5]. Экспериментально измеренная избирательность нашей схемы ФАПЧ оказалась не хуже $\pm 0,1$ Гц при рабочей частоте 40 кГц. Избирательность определяется здесь как диапазон расстройек между частотами полезного сигнала и сигнала помехи, в пределах которых возможен срыв работы ФАПЧ, т. е. переход ФАПЧ на работу по сигналу помехи из режима удержания частоты полезного сигнала. Амплитуды полезного сигнала и сигнала помехи в этом эксперименте были выбраны равными. Для предотвращения взаимной синхронизации управляемых генераторов обе схемы ФАПЧ выполнены в виде отдельных экранированных блоков с тщательной развязкой цепей питания.

Измерения спектральных интервалов с помощью схемы, приведенной на рисунке, производились на регенеративном спектрометре XL-100 («Вариан») [6]. Для уменьшения неоднородного уширения линий ЯМР, способного вызвать нестабильность спиновой генерации, применяется метод уменьшения эффективного объема образца, известный в ЯМР-интроскопии как метод чувствительной точки [7]. Процедура измерения спектрального интервала состояла в следующем: после фурье-анализа сигнала многочастотной спиновой генерации для получения информации о частотах спиновой генерации генератор каждой схемы ФАПЧ настраивался на частоту, близкую к одной из интересующих частот спиновой генерации в диапазоне 40 кГц. Затем сигнал многочастотной спиновой генерации поступал на обе схемы ФАПЧ, и при схватывании ФАПЧ частота каждого генератора точно подстраивалась к одной из

частот спиновой генерации. Период разностной частоты измерялся частотомером ЧЗ-20, который выдавал усредненные за время ~ 10 с отсчеты, используемые для статистической обработки. Измерялись, в частности, разности частот спиновой генерации на линиях хлороформа и тетраметилсилана (775 Гц), а также разности частот генерации на линиях дублетного расщепления в протонном спектре гексаметилофосфортриамида (9,34 Гц). Статистическая обработка показала, что среднеквадратичное отклонение от среднего значения для серии из 30 отсчетов не превышало $\pm 11 \cdot 10^{-4}$ Гц в первом случае и $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ Гц во втором. Величина дисперсии при измерении разностных частот существенно зависела от степени однородности поля H_0 в объеме образца, поскольку от этого зависит стабильность колебаний многочастотной спиновой генерации. Степень перекрытия близких линий ЯМР также может влиять на точность измерения спектрального интервала. Поэтому вопросам обеспечения высокой однородности поля H_0 уделялось особое внимание.

Из других методов, использующих идею измерения разностных частот для измерения спектральных интервалов [4], можно отметить метод, реализованный в работе [8], где применяется двухчастотный спиновый стабилизатор с подстройкой частоты модуляции по дисперсионному сигналу ЯМР. Несмотря на внешнее сходство со схемой ФАПЧ, данная схема является схемой частотной, а не фазовой автоподстройки, поскольку спиновая система используется как пассивный контур, и на оба входа фазового детектора поступают сигналы всегда одной и той же частоты. В схеме частотной автоподстройки соответствие регулируемой частоты — в данном случае частоты модуляции — эталонной частоте, т. е. частоте, при которой сигнал дисперсии обращается в нуль, осуществляется с точностью $\Delta = \Delta f_n / K$, где Δf_n — начальная расстройка, K — коэффициент регулирования схемы частотной автоподстройки. Следовательно, при измерении спектральных интервалов с помощью такой схемы необходимо обеспечить достаточно высокий коэффициент регулирования K . В схеме ФАПЧ статическая ошибка такого рода отсутствует, так как от начальной расстройки зависит лишь разность фаз между частотой генератора, управляемого напряжением, и эталонной частотой [5].

Таким образом, схему ФАПЧ можно с успехом использовать для узкополосной фильтрации сигналов многочастотной спиновой генерации и в итоге обеспечить высокую точность измерения спектральных интервалов. Очевидно, можно не ограничиваться лишь двумя схемами ФАПЧ и одновременно измерять несколько спектральных интервалов, что представляет интерес, например, при исследовании динамических процессов с помощью регенеративной ЯМР-спектроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Константинов Ю. С., Смирнов А. М. // Приб. и техн. эксперимента. 1972. № 5. С. 134. [2] Gray K. W., Ozier J. // Phys. Rev. Lett. 1971. 26, N 4, P. 161. [3] Константинов Ю. С., Смирнов А. М. // Радиотехн. и электроника. 1972. 17, № 11. С. 2456. [4] Ernst R. R. // J. Magn. Res. 1971. 4. P. 280. [5] Кап-ланов М. Р., Левин В. А. Автоматическая подстройка частоты. М.; Л., 1962. [6] Анисимов Н. В., Варламов С. Д., Константинов Ю. С. // Тез. докл. IX летн. шк. АМПЕРЕ. Новосибирск, 1987. С. 55. [7] Hinshaw W. S. // J. Appl. Phys. 1976. 47. P. 3709. [8] Качурин А. М., Фомичев В. Н. // ЖЭТФ. 1981. 80, № 1. С. 199.

Поступила в редакцию
04.07.88