

6. Мурцовкин В. А. Электропроводность пористых сред с двухфазным насыщением // Коллоидный журнал. 2013. Т. 75. № 1. С. 109–117.
7. Мурцовкин В. А., Зеленов А. С. Расчет электропроводности и проницаемости горных пород по данным ядерно-магнитного каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2006. Вып. 2–4 (143–145). С. 108–120.
8. Тиаб Д., Доналдсон Э. Ч. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М.: ООО “Премиум Инжиниринг”, 2009.
9. Dunn K.-J., Bergman D. J., LaTorraca G. A. Nuclear Magnetic Resonance. Petrophysical and Logging Applications. Pergamon, 2002.

УДК 550.832

В. Ю. Барляев

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СПИНОВОГО ЭХА В ПРИБОРЕ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА СИЛЬНОГО ПОЛЯ

Рассмотрены вопросы повышения отношения сигнал/шум при регистрации сигналов спинового эха в приборе ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) сильного поля как аппаратными (аналоговые входные цепи), так и математическими (цифровая обработка сигналов) методами. Сравняются различные схемы входных цепей приемника сигналов спинового эха и делается вывод о предпочтительности двухконтурной входной цепи. Сравняются различные цифровые фильтры, применяемые для выделения сигналов спинового эха, и делается вывод о предпочтительности применения треугольного окна.

Ключевые слова: прибор ЯМК сильного поля, сигнал спинового эха, отношение сигнал / шум, цифровая обработка сигнала.

Приемник сигналов прибора ЯМК сильного поля можно разделить на две основные части: аналоговую и цифровую.

Аналоговая часть осуществляет электрическое согласование цепей зонда с входными цепями приемника и усиливает входные сигналы до уровня, необходимого для нормальной работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). При этом стабильность коэффициента передачи усилителя не является критичной, так как общий комплексный

коэффициент передачи приемника контролируется перед каждым измерением.

Все преобразования принимаемых сигналов осуществляются цифровой частью. Оцифровке подвергается недетектированный сигнал, имеющий несущую частоту порядка сотен килогерц. Объем данных оцифровки получается очень большим и непригодным для передачи по каналу связи в регистрирующее устройство. Так, при оцифровке сигнала одного спинового эха получается около 15 *кбайт* информации. При обычном измерении релаксационной кривой, имеющей 400 сигналов спинового эха, общий объем информации одного измерения составляет около 6 *Мбайт*. Поэтому в приборе производится предварительная обработка данных, призванная уменьшить объем информации, а также произвести унификацию передаваемых данных, чтобы свести к минимуму влияние особенностей конкретной реализации аппаратуры на результат измерения.

Предварительная обработка включает в себя детектирование сигналов и выделение комплексной амплитудной огибающей спинового эха, фильтрацию детектированных сигналов и определение комплексной амплитуды спинового эха, коррекцию полученных результатов измерения на изменение коэффициента передачи и сдвига фазы приемника. В результате предварительной обработки определяется амплитуда спинового эха и формируется массив данных, где амплитуда каждого спинового эха определяет соответствующую точку измеряемой релаксационной кривой.

Объем данных одного измерения, передаваемых по каналу связи в регистрирующее устройство, после предварительной обработки составляет около 2 *кбайт*. Кроме амплитуд спинового эха туда входит информация о форме четырех первых сигналов спинового эха, коэффициенте передачи приемника, об амплитудах радиоимпульсов, о напряжении питания прибора и температуре как внутри прибора, так и в скважине.

Одной из наиболее важных качественных характеристик прибора ЯМК является чувствительность приемника сигналов спинового эха. Отношение сигнал/шум на выходе приемника зависит от уровня полезного сигнала, действующего на входе приемника, уровня шумов зонда и собственных шумов приемника:

$$SNR = \frac{E^2}{N_S^2 + N_A^2},$$

где SNR – общее отношение сигнал/шум приемника; E – электродвижущая сила (ЭДС) полезного сигнала, приведенная ко входу приемника; N_S – ЭДС шумов зонда; N_A – ЭДС шумов усилителя приемника, приведенная ко входу приемника.

Для обеспечения максимальной чувствительности в приемнике используется малозумящий усилитель, а для увеличения уровня полезного сигнала на входе приемника приемную катушку зонда делают многовитковой и настраивают в резонанс с частотой сигнала спинного эха с помощью настроечного конденсатора. Резонансная схема зонда уменьшает также уровень шумов зонда за счет сужения полосы пропускания.

Одноконтурная цепь зонда имеет ряд недостатков. При такой схеме сложно осуществить защиту входных цепей приемника от воздействия мощных радиочастотных импульсов, подаваемых в катушку зонда и необходимых для возбуждения сигналов спинного эха. Коэффициент передачи одноконтурной схемы сильно зависит от добротности контура:

$$K = Q,$$

где K – коэффициент передачи схемы; Q – добротность контура.

Полоса пропускания, а следовательно, и уровень подавления шумов также зависят от добротности контура:

$$\Delta f = f/Q,$$

где Δf – полоса пропускания схемы; f – центральная частота контура.

Длительность переходных процессов в одноконтурной схеме определяется добротностью контура и увеличивается с ее ростом. Большая индуктивность приемной катушки требует приложения большого напряжения радиочастотных импульсов.

В приборе ЯМК применяется двухконтурная схема. Сравнительные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) одноконтурной и двухконтурной схемы при разных добротностях контура зонда показаны на рис. 1. Двухконтурная схема обладает рядом достоинств. К ним относятся: защита входных цепей приемника, осуществляемая благодаря наличию цепи связи между контуром зонда и контуром приемника; слабая зависимость коэффициента передачи двухконтурной схемы на рабочей частоте от добротностей контуров, которая определяется соотношением емкостей настроечных конденсаторов, что позволяет получить любой коэффициент передачи схемы для любой индуктивности катушки зонда.

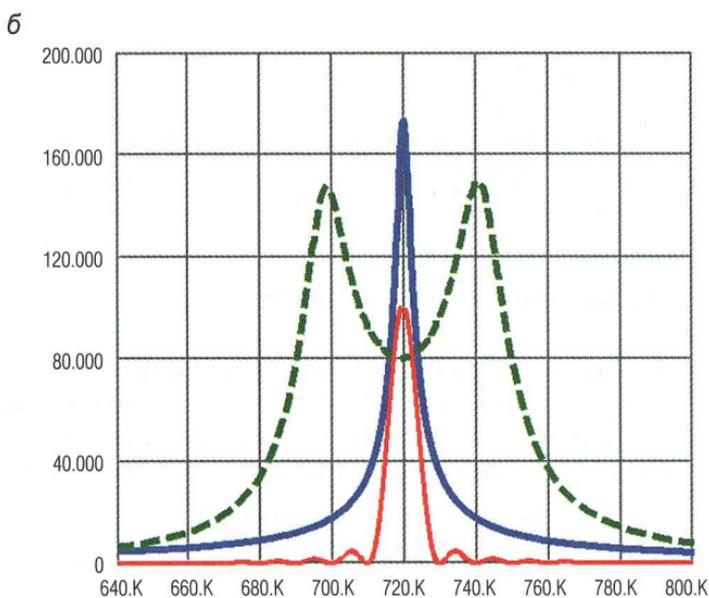
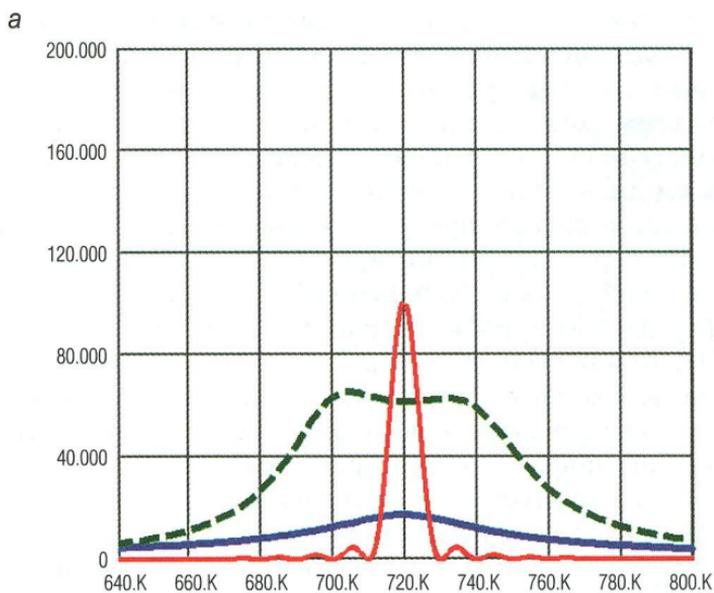


Рис. 1. Спектр спинового эха и АЧХ одноконтурной и двухконтурной схемы при низкой (а) и высокой (б) добротности контура зонда

На длительность переходных процессов в двухконтурной схеме влияют не только добротность контура зонда, но и добротность контура приемника и коэффициент связи между контурами. Подбирая параметры схемы, можно добиться минимальной длительности переходных процессов при сохранении высокого коэффициента передачи схемы во всем диапазоне изменения добротности контура зонда.

По отношению сигнал/шум обе схемы не имеют заметных преимуществ друг перед другом, но двухконтурная схема является более предпочтительной из-за ее большей гибкости и управляемости.

Поскольку двухконтурная входная цепь имеет широкую полосу пропускания, то для выделения полезного сигнала спинового эха на фоне шумов необходимо применение специального узкополосного фильтра. Эта задача решается методами цифровой обработки сигналов. Применение цифровых фильтров позволяет применить любой фильтр (даже нереализуемый в аналоговом виде), который выделял бы полезный сигнал наилучшим образом.

Форма первых пяти сигналов спинового эха показана на рис. 2.

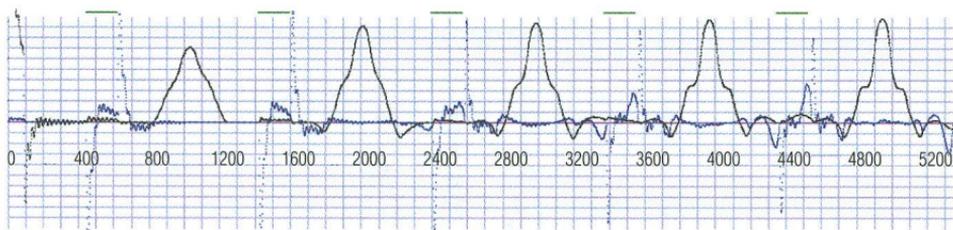


Рис. 2. Форма первых пяти сигналов спинового эха

Идеальным или согласованным является фильтр, передаточная функция которого с точностью до амплитудного множителя и постоянной временной задержки является комплексно сопряженной со спектром сигнала [1]. Если спектр сигнала определяется формулой

$$S(j\omega) = \int x(t)\exp(-j\omega t)dt,$$

то передаточная функция согласованного фильтра будет

$$K(j\omega) = k\exp(-j\omega t_0)S^0(j\omega),$$

где k – амплитудный множитель; $\exp(-j\omega t_0)$ – член, характеризующий постоянную временную задержку t_0 ; S^0 – величина, комплексно сопряженная со спектром сигнала.

При синтезе цифрового фильтра проводился сравнительный анализ эффективности различных аппроксимаций идеального фильтра применительно к сигналам спинового эха. При этом параметрами качества фильтра принимались отношение сигнал/шум и длительность переходного процесса фильтра (далее длительность фильтра) по шкале времени. Чем меньше длительность фильтра, тем меньше минимально достижимое время между сигналами спинового эха. Сравнительные характеристики применения различных фильтров (прямоугольного окна, треугольного окна, окна Гаусса и идеального фильтра) для первого и пятого спинового эха приведены на рис. 3.

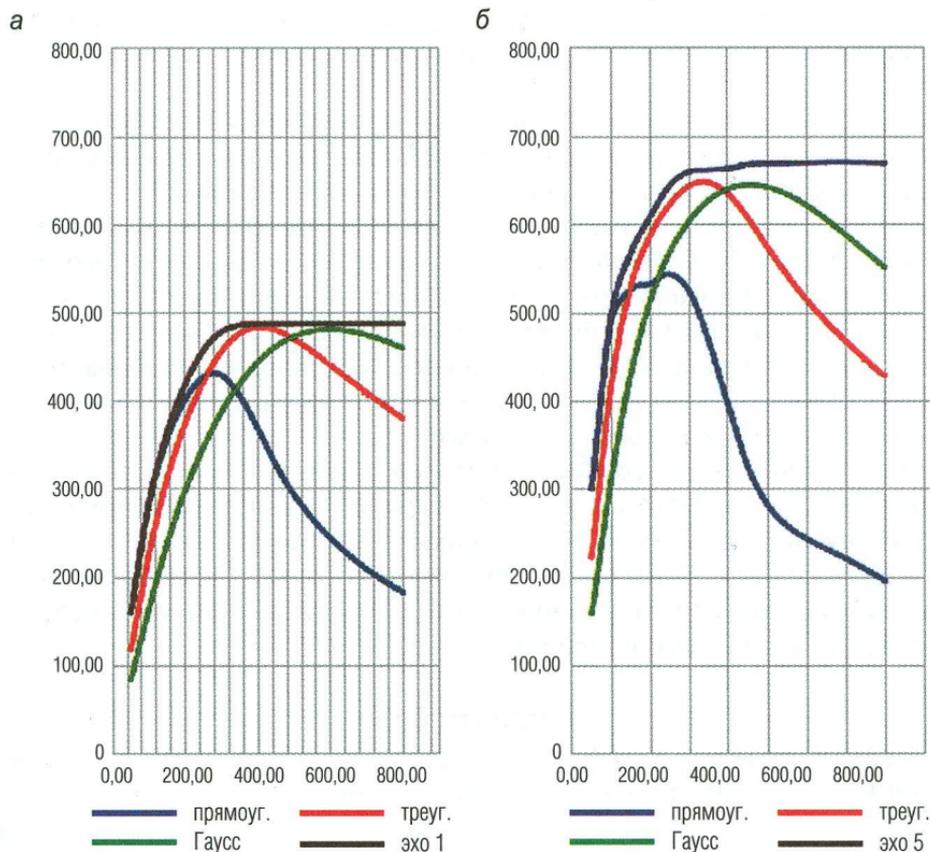


Рис. 3. Отношение сигнал/шум в зависимости от типа и длительности фильтра для первого (а) и пятого (б) спинового эха

Прямоугольное окно дает хорошие результаты только при малых длительностях фильтра, когда обработке подвергается только верхушка спинового эха. Увеличение длительности прямоугольного окна резко снижает его эффективность.

Треугольное окно дает наилучшее приближение к идеальному фильтру.

Окно Гаусса обеспечивает наибольшее подавление помехи вне полосы пропускания, но для выделения сигналов спинового эха его эффективность является недостаточной из-за большой длительности фильтра по времени.

Идеальные фильтры имеют наибольшую эффективность, но только при использовании индивидуального фильтра для каждого спинового эха. Применение “не своего” фильтра заметно снижает эффективность фильтрации.

В результате исследований выяснилось, что сочетанию максимального отношения сигнал/шум и длительности фильтра соответствует аппроксимация идеального фильтра треугольным окном.

Применение аппроксимации идеального фильтра вместо идеального фильтра обусловлено тем, что спектр сигнала спинового эха зависит от многих факторов и меняется даже в одной последовательности. В случае применения идеального фильтра необходимо иметь для каждого сигнала спинового эха свой отдельный согласованный фильтр. Процедура обработки сигнала усложняется, а практический выигрыш получается незначительным.

Треугольное окно является универсальным для всех сигналов спинового эха в одной последовательности. Ухудшение отношения сигнал/шум по сравнению с идеальным фильтром составляет менее 3% и является незначительным. Расчет треугольного окна не требует сложных математических вычислений и может выполняться непосредственно в процессе измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Васин В. В., Степанов Б. М.* Выходные сигналы радиотехнических устройств при оптимальной фильтрации. М.: Изд-во “Энергия”, 1967.