

АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ШУМА ПРИЕМНОГО ТРАКТА РЕЛАКСОМЕТРА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Е.В. Раннев, В.И. Мясников

Кафедра информационно-вычислительных систем,
Поволжский государственный технологический университет
Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия

E-mail: evgeny.rannev@gmail.com, v.mjasnikov@mail.ru

В данной статье проводится анализ природы шума приемного тракта релаксометра ядерного магнитного резонанса и оцениваются его характеристики, предлагается замена аналоговой части приемного тракта на цифровой квадратурный детектор и теоретически рассчитывается выгода от исключения нескольких источников шума.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно, в импульсной ЯМР-спектроскопии сигналы регистрируются путем вычитания из них опорной частоты, близкой к ларморовой частоте ядра, оцифровки и дальнейшей числовой обработки.

В современной ЯМР-аппаратуре тракт приемника состоит из преселектора, квадратурного детектора, нормирующего усилителя, фильтра низких частот и аналого-цифрового преобразователя (рис.1).

Недостатком такого приемника является длина аналогового тракта, поскольку при прохождении сигнала через каждый модуль, на него накладываются дополнительные шумы [1-6].

АНАЛИЗ ШУМА ПРИЕМНОГО ТРАКТА

Как известно, на входе любой системы всегда присутствует связанный с сигналом шум. Основным источником помех в электронных системах является тепловой шум, энергия которого возрастает с увеличением температуры. Тепловой шум возникает при флуктуациях электронов в проводниках, имеющих определенную температуру. Такие флуктуации имеют спектральные составляющие, находящиеся в той же полосе частот, что и полезные сигналы, тем самым затрудняя их обработку.

Спектр такого шума однороден на всех частотах. Также существуют и другие явления, генерирующие случайный шум, например, дробовый шум, шум генерации и рекомбинации. Несмотря на их многообразие, они имеют одно свойство, общее с тепловым шумом – однородный спектр, равномерно распределенный в широкой полосе частот (до 5000 ГГц). Поэтому, будем рассматривать сумму шумовых составляющих как тепловой шум.

Сигнал и шум вместе проходят через систему и поэтому синхронно ослабляются или усиливаются каждым из каскадов. В большинстве случаев по значению абсолютного уровня мощности шума сложно оценить качество системы. Для этой цели удобнее пользоваться отношением

мощностей сигнала и шума. Отношение сигнал/шум (S/N – signal to noise ratio) на выходе системы является параметром первостепенной важности для оценки качества системы.

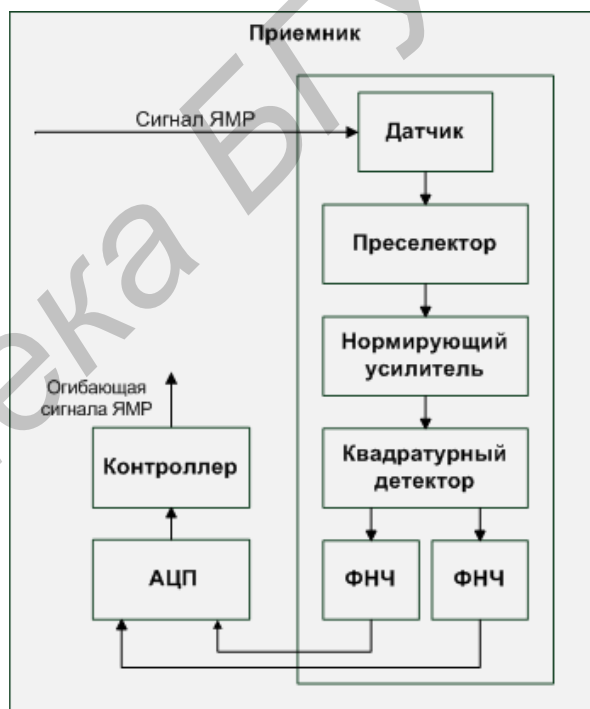


Рис. 1 – Структурная схема приемника промышленного ЯМР-анализатора

Отличие между соотношением сигнал/шум на выходе и на входе заключается в том, что каждый каскад системы вносит свои собственные шумы, поэтому отношение сигнал/шум постепенно ухудшается при прохождении сигнала от входа до выхода системы. Вклад в шум, вносимый системой, количественно характеризуется коэффициентом шума (1):

$$F = \frac{(S/N)_{ex}}{(S/N)_{вх}} \quad (1)$$

где $(S/N)_{ex}$ – отношение сигнал/шум на выходе системы; $(S/N)_{вх}$ – отношение сигнал/шум на входе системы.

Чем меньше численное значение коэффициента шума, тем меньший вклад вносит система в снижение отношения сигнал/шум. Коэффициент шума всегда $F \geq 1$. Идеальному нешумящему тракту соответствует $F = 1$ (0 дБ). Коэффициент шума может быть выражен как в безразмерных величинах, так и в децибелах, в зависимости от того, в чем выражены отношения сигнал/шум. Эффективной шумовой температурой называется температура внутреннего сопротивления эквивалентного источника шума, которая приводит к появлению на нем такой же мощности шума, как и создаваемой промежуточным звеном системы [7]. Коэффициент шума и эффективная шумовая температура T_e связаны следующим выражением [7](2):

$$T_e = T_0(F + 1) \quad (2)$$

где T_0 – нормальная температура, выраженная в градусах Кельвина. Преобразовав выражение (2), получим формулу для определения коэффициента шума через известную эффективную шумовую температуру (3):

$$F = \frac{T_e}{T_0} + 1 \quad (3)$$

Для оценки качества дальнейших преобразований, рассчитаем мак-симальный коэффициент шума, вносимого в общий шум приемного тракта ЯМР блоком, состоящим из нормирующего усилителя, квадратурного детектора и ФНЧ (рис. 1). Коэффициент усиления всего каскада принимаем равным 1, поскольку функциональные изменения для шума и полезного сигнала одинаковы. Нормальная температура является постоянной величиной и принимается равной 290°К. Максимальная эффективная шумовая температура приемника была определена исходя из максимальной температуры эксплуатации: $T_e = 330^\circ\text{К}$. Подставив данные значения в формулу (3), получаем (4):

$$F_{max} = \frac{330}{290} + 1 = 2,1379$$

$$F_{max}(\text{дБ}) = 20 \log(2,1379) = 6,6 \text{ дБ} \quad (4)$$

По результатам фактических измерений соотношений сигнала к шуму различных образцов двухфазных систем было определено среднее значение соотношения сигнал/шум классического приемника равно ~ 200 ед., цифрового приемника – ~ 300 ед (5).

$$S/N_{аналог}(\text{дБ}) = 20 \log(200) = 46 \text{ дБ}$$

$$S/N_{цифр}(\text{дБ}) = 20 \log(300) = 49,5 \text{ дБ} \quad (5)$$

Рассчитаем коэффициент шума цифрового приемника, исходя из полученных данных (6):

$$F_{аналог} = \frac{(S/N)_{вх}}{(S/N)_{аналог}} \\ F_{цифр} = \frac{(S/N)_{вх}}{(S/N)_{цифр}} \quad (6)$$

Поскольку, считаем, что сигнал/шум на входе приемника в обоих случаях одинаков, то (7):

$$F_{аналог} * S/N_{аналог} = F_{цифр} * S/N_{цифр} \quad (7)$$

Следовательно (8):

$$F_{цифр} = \frac{F_{аналог} * S/N_{аналог}}{S/N_{цифр}} \quad (8)$$

Подставив экспериментально полученные значения в формулу, получим (9):

$$F_{цифр} = \frac{6,6 * 46}{49,5} = 6,13 \text{ дБ} \quad (9)$$

1. Дероум, Э. Современные методы ЯМР для химических исследований. Пер. с англ. / Э. Дероум – М.: Мир. – 1992. – 40 с.
2. Рудой, Э. Н. Выделение огибающей звуковых сигналов / Э. Н. Рудой // Материалы Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA». – 2003. – 250 с.
3. Раннев, Е. В. Анализ методов обработки данных ЯМР-анализаторов низкого разрешения / Е.В. Раннев // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сборник материалов конференции: в 2 ч. – Ч.2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. – с. 210-213.
4. Раннев, Е. В. Модель системы полного анализа сигналов ЯМР низкого разрешения / Е.В. Раннев // Сборник статей XI Международной научно-технической конференции МНИЦ ПГСХА «Информационно-вычислительные технологии и их приложения». – Пенза: РИО ПГСХА, 2009. – с. 226-228.
5. Мясников, В. И. Синтез акустической модели затрубного пространства нефтедобывающей скважины / В. И. Мясников, А. В. Смирнов // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2007. – № 1(1). – с. 86-89.
6. Раннев, Е. В., Мясников, В. И. Система регистрации сигналов ядерного магнитного резонанса низкого разрешения / Е. В. Раннев, В. И. Мясников: полезная модель Рос. Федерация №100292: заявл. 12.07.2010; опубл. 10.12.2010.
7. Read, R. The essence of communications theory / R. Read. – Prentice Hall Europe. – 1998. – pp. 57-59.