

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА СВОБОДНОЙ СПИНОВОЙ ПРЕЦЕССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А. А. Невзоров, А. А. Орлов

В данной работе рассматриваются проблемы измерений неоднородных геомагнитных полей с помощью протонного магнитометра, а также трудности исследования сигнала свободной прецессии в таких полях. Приведена конструкция и алгоритм обработки сигнала свободной прецессии созданного протонного магнитометра, с помощью которого были проведены измерения неоднородных геомагнитных полей, получены формы и динамики частот сигналов свободной прецессии в этих полях.

**Ключевые слова:** свободная прецессия, магнитометрия, протонный магнитометр, параметрический анализ.

### Введение

Метод свободной спиновой прецессии позволяет измерять модуль вектора магнитной индукции в пространстве рабочего вещества датчика. В настоящее время этот метод широко применяется для измерения геомагнитного поля [1].

Сигнал свободной спиновой прецессии в неоднородном поле затухает гораздо быстрее, чем в однородном, где для протонов воды его время затухания примерно 3 сек. Из-за неоднородности также сильно уменьшается амплитуда сигнала ЯМР. Поэтому долгое время считалось, что проводить измерения магнитного поля методом вычисления частоты свободной спиновой прецессии невозможно в условиях сильной неоднородности геомагнитного поля [2].

### Тороидальный датчик в неоднородном поле

Рассмотрим случай использования в качестве датчика тороидального каркаса с дистиллированной водой внутри, на который намотан провод (рисунок 1).

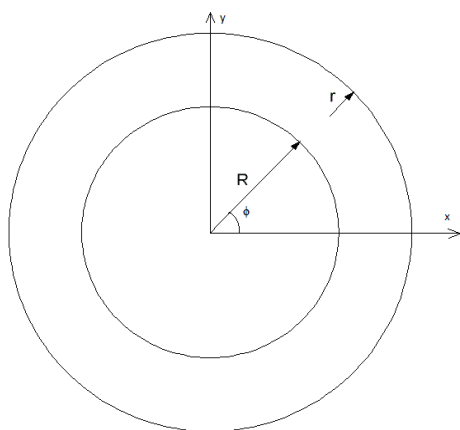


Рисунок 1 - тороидальный датчик

Выделим в торе цилиндр радиуса  $r$  малой высоты. Тогда, зная, что сигнал свободной прецессии гармонический и затухающий получим:

$$dU(t, \phi) = AR^3 \exp(-t/\tau) \cos(\gamma B(\phi)t) d\phi. \quad (1)$$

Считая, что поле  $B(\phi)$  перпендикулярно плоскости тора и разлагая  $B$  по малым  $\phi$ , получим:

$$B(\phi) = B_0 + R|\nabla B| \cos(\phi + \psi), \quad (2)$$

где  $\operatorname{tg}(\psi) = \frac{\partial B/\partial x}{\partial B/\partial y}$ .

Подставив (2) в (1) и проинтегрировав, получим:

$$U(t) = AR^3 \exp(-t/\tau) J_0(\omega_1 t) \cos(\omega_0 t).$$

Здесь  $J_0(\omega_1 t)$  - функция Бесселя.

### Метод оценивания мгновенной частоты сигналов свободной прецессии

При реальных экспериментах для определения магнитного поля в образце необходимо работать с короткими выборками очень малой амплитуды, которые к тому же модулируются функцией Бесселя, что затрудняет возможность использовать электронно-счётные частотомеры для измерения частоты сигнала спиновой прецессии. Эти проблемы могут быть преодолены путём оцифровки сигнала и последующего использования цифровой фильтрации и параметрических методов оценки [3].

Наиболее подходящий для такой задачи оперативный метод должен работать с очень короткими выборками [4]. Рассмотрим его подробнее. Для сигнала свободной прецессии поперечных проекций магнитного момента можно записать уравнение вида

$$\ddot{x}(t) + p(t)\dot{x}(t) + q(t)x(t) = 0.$$

## РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Его асимптотическое решение (ВКБ-приближение) имеет вид

$$x(t) = \frac{A_0}{\sqrt{\Omega(t)}} \exp\left[-\frac{1}{2} \int_0^t p(t') dt'\right]^* ,$$

$$* \cos\left[\int_0^t \Omega(t') dt' + \varphi_0\right] = a(t) \cos[\theta(t)]$$

где

$$a(t) = \frac{A_0}{\sqrt{\Omega(t)}} \exp\left[-\frac{1}{2} \int_0^t p(t') dt'\right] ,$$

$$\theta(t) = \int_0^t \Omega(t') dt' + \varphi_0 ,$$

$$\Omega^2(t) = q(t) - \frac{1}{2} \frac{dp(t)}{dt} - \frac{1}{4} p^2(t) ,$$

огibaющая  $a(t)$  и мгновенная частота которого однозначно образом связаны с параметрами нестационарной системы и являются медленно меняющимися функциями.

Для исследуемого сигнала  $x(t)$  можно построить функции следующего вида:

$$c(t) = x^2(t - 2\Delta) - x(t - 3\Delta)x(t - \Delta) ,$$

$$d(t) = x^2(t - 2\Delta) - x(t - 4\Delta)x(t) ,$$

$$e(t) = \frac{d(t)}{c(t)} .$$

Здесь  $\Delta$  – некоторый временной интервал, такой, что

$$\omega(t)\Delta \ll 1 .$$

Тогда можно получить выражения для мгновенной частоты и огibaющей, учитывая приближение порядка  $O(\mu)$ :

$$\omega[n - 2Q] \approx \frac{1}{Q\Delta t} \arccos\left(\frac{\sqrt{e[n]}}{n}\right) ,$$

$$a[n - 2Q] \approx \frac{\sqrt{c[n]}}{|\sin\{\omega[n - 2Q]Q\Delta t\}} . \quad (3)$$

Перейдем к последовательности  $x[n]$  ( $n=0, \dots, N-1$ ), подвергнув сигнал  $x(t)$  дискретизации с шагом  $\Delta t$  и полагая, что интервал  $\Delta$  может содержать несколько интервалов  $\Delta t$ , то есть  $\Delta = Q\Delta t$ ,  $T = N\Delta t$ . Тогда выражения (3) для большой выборки отсчетов примут вид

$$\varepsilon[i] = \frac{\sum_{n=i-\frac{K-1}{2}}^{i+\frac{K-1}{2}} d[n]c[n]}{\sum_{n=i-\frac{K-1}{2}}^{i+\frac{K-1}{2}} c^2[n]} , \quad \gamma[i] = \frac{1}{M} \sum_{n=i-\frac{K-1}{2}}^{i+\frac{K-1}{2}} c[n] ,$$

$$i = \frac{K-1}{2}, \dots, N - \frac{K+1}{2} .$$

И, соответственно, выражения для частоты и амплитуды:

$$\omega[i] \approx \frac{1}{Q\Delta t} \arccos\left\{\frac{\sqrt{\varepsilon[i]}}{2}\right\} ,$$

$$a[i] \approx \frac{\sqrt{\gamma[i]}}{|\sin\{\omega[i]Q\Delta t\}} , \quad i = \frac{K-1}{2}, \dots, N - \frac{K+1}{2}$$

### Экспериментальная техника

Для проверки применимости описанного метода к сигналу свободной прецессии была собрана регистрирующая аппаратура.

Сигнал ядерного магнитного резонанса поступает на маломощный усилитель ОРА2211 [5] с сверхмалым уровнем спектральной плотностью мощности собственного шума, которая не превышает  $1,3 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$  в полосе рабочих частот  $2 \dots 2,2 \text{ кГц}$ . Затем после аналоговой фильтрации он подвергается дискретизации при помощи 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя AD7683 [6] с частотой  $16,627 \text{ кГц}$ . и микроконтроллера STM32F407 [7] с частотой работы  $168 \text{ МГц}$ , команды ядра которого позволяют осуществить перемножение 32 разрядных чисел за один такт.

Поляризация рабочего вещества осуществляется путем пропускания тока через датчик, в ходе которой в нем создается магнитная индукция порядка  $7 \dots 10 \text{ мТл}$ . Переключение режимов измерения и поляризации осуществляется при помощи твердотельных ключей. Это позволяет эффективно использовать усреднение, благодаря возможности синхронизировать выборки сигналов при измерениях.

Аналоговая фильтрация не может обеспечить необходимое для измерений соотношение сигнал-шум для спиновой прецессии, поэтому для вычисления частоты свободной прецессии необходимо подать последовательность дискретизированных отсчетов исследуемого сигнала на узкополосный цифровой фильтр и применить параметрический метод оценки частоты.

В приведённых экспериментах использовался специальный алгоритм фильтрации. Сначала грубо оценивается частота спиновой прецессии, затем для обработки используется фильтр с полосой несколько десятков герц и вычисляется предполагаемая частота ЯМР параметрическим методом. Далее полоса фильтра уменьшается на несколько герц, а в качестве центральной частоты выставляется,

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2014

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА СВОБОДНОЙ СПИНОВОЙ ПРЕЦЕССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

вычисленное параметрическим методом значение в предыдущем шаге.

Если геомагнитное поле не изменяется в точке в коротком интервале времени (до 5 минут), можно применить дополнительный алгоритм обработки данных, который заключается в том, что каждая последующая выборка сигнала спиновой прецессии усредняется с предыдущими, что обеспечивает лучшее КСШ и как следствие увеличивает точность измерений. Заметим, что использование такого метода было бы невозможно без синхронизации временных диаграмм переключения ключей поляризации и режимов работы.

Результаты долговременных измерений проводимых с помощью такого метода приведены на рисунке 2. Время одного измерения составляет около 15 сек.

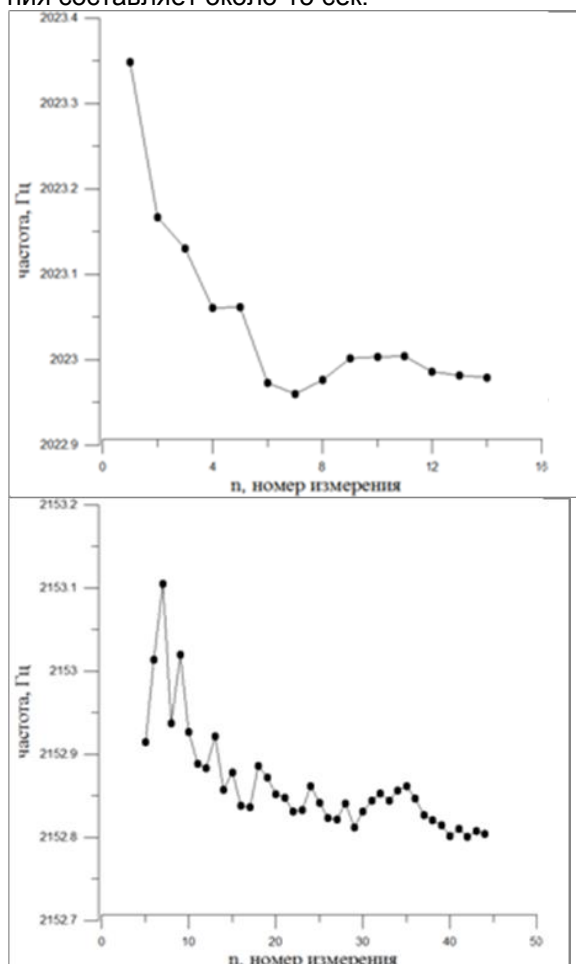


Рисунок 2 - Результаты долговременных измерений

Для проверки способности электроники и алгоритма работать в полях повышенной неоднородности вблизи датчика располагался магнит. На рисунке 3 приведена форма сигнала свободной прецессии в эксперименте с

магнитом, расположенном в 40 см от датчика. Точность измерения магнитного поля при этом составляла 1 нТл.

На рисунке 4 представлены формы сигналов в случае магнита, расположенного в 30 см и 20 см от датчика. Точности измерений в этих экспериментах также составили около 1 нТл.

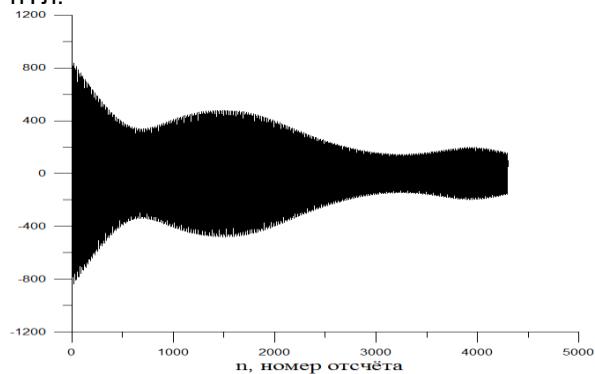


Рисунок 3 – Форма сигнала свободной прецессии при магните, расположенном в 40 см от датчика

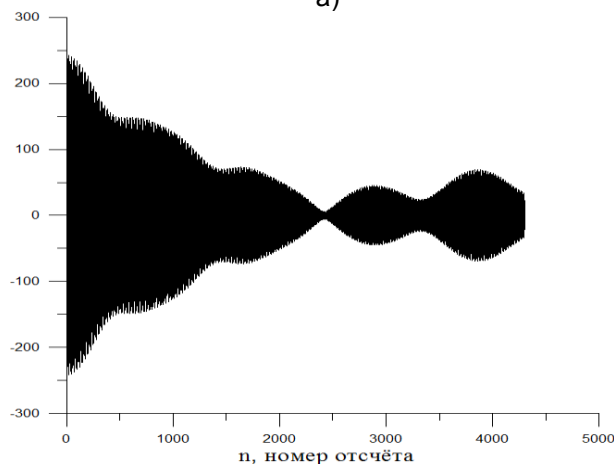
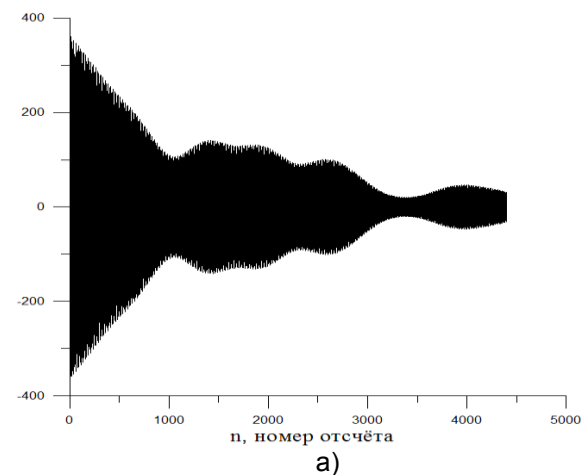


Рисунок 4 – Формы сигналов свободной прецессии при разных неоднородностях магнитного поля.

Расстояние от магнита до датчика:  
а) 30 см, б) 20 см

## РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

### Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм цифровой обработки сигналов свободной прецессии с использованием параметрического анализа не только позволяет проводить измерения в очень неоднородных магнитных полях, но и позволяет значительно сэкономить, отказавшись от сложной и дорогой прецизионной электроники.

Получившаяся точность измерений (порядка 1 нТл) соответствует современному уровню протонных магнитометров в однородных геомагнитных полях, и превосходит существующие в неоднородных. Кроме того используемая элементная база в созданном приборе намного проще и в несколько десятков раз дешевле, чем во всех существующих аналогах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин, П. М. Ядерный магнитный резонанс в земном поле [Текст] / П. М. Бородин, А. В. Мельников. – Москва, Наука, 1972. – 449 с.
2. Бородин, П. М. Физические основы квантовой радиофизики [Текст] / П. М. Бородин [и др.], под ред. П. М. Бородин — Ленинград : Издательство Ленинградского университета, 1985. – 319 с
3. Мелентьев, В.С. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов [Текст] / В.С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, А. А.

Миронов // Ползуновский вестник. - 2013 - №. 2 - С. 198-201.

4. Игнатьев, В. К. Параметрический анализ колебаний медленно меняющейся частоты. [Текст] / В. К. Игнатьев, А. В. Никитин, С. В. Юшанов // Известия ВУЗов. Радиофизика 2010. Т. 53. № 2. С. 145 – 159.
5. 1.1nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  Noise, Low Power, Precision Operational Amplifier in Small DFN-8 Package [Электронный ресурс] – <http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=opa211&fileType=pdf> – (Дата обращения 19.04.2014)
6. 16-Bit, 100 kSPS, Single-Ended PulSAR ADC in MSOP/QFN AD7683 [Электронный ресурс] – [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7683.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7683.pdf) – (Дата обращения 19.04.2014)
7. STM32F405xx STM32F407xx ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 210DMIPS, up to 1MB Flash/192+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 comm. interfaces & camera [Электронный ресурс] <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf> – (Дата обращения 19.04.2014)

*Магистрант Невзоров А.А. – terrapevt@mail.ru - каф. Радиофизики Волгоградского государственного университета, аспирант Орлов А.А, orlwork@inbox.ru - каф. Радиофизики Волгоградского государственного университета*

УДК 004.9

## ВИРТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ MATHCAD

А.С. Бессонов

Рассматривается возможность использования средств MathCAD при создании LabVIEW виртуальных приборов, предназначенных для моделирования средств измерений и обработки данных. Описываются технология создания таких программ и два конкретных примера ее применения. Обсуждаются результаты их тестирования.

**Ключевые слова:** моделирование средств измерений, обработка данных, среда графического программирования Lab-VIEW, виртуальные приборы, средства MathCAD

### Введение

При создании новых средств измерений (СИ) широко применяется математическое моделирование и программирование, проводимое на основе технологии виртуальных приборов (ВП) и среды графического программирования LabVIEW [1]. При интеграции в среду LabVIEW специализированных библиотек ВП, ряда утилит и средств информационного обеспечения она может рассматри-

ваться как система автоматизированного проектирования СИ заданных классов [2].

Одним из преимуществ технологии ВП является гетерогенность составных частей виртуальных моделей и прикладных программ. Это означает, что построение моделей СИ и создание прикладного программного обеспечения можно проводить с применением различных программных средств, использовать функции сбора и обработки данных, входящие как в саму среду LabVIEW и

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2014