

Цифровой протонный магнитометр для измерения геомагнитного поля

В.К. Игнатъев, А.А. Невзоров, А.А. Орлов

Волгоградский государственный университет

Протонные магнитометры свободной прецессии широко применяются для высокоточной магнитной разведки [1, 2], геологических исследований [3], также в качестве сверхчувствительных металлоискателей [2]. Частота спиновой прецессии линейно зависит от измеряемого магнитного поля ($f = \gamma B$, где $\gamma = 42,57$ МГц/Тл – гиромагнитное отношение протона), поэтому, определяя частоту индуцируемой в датчике свободной прецессии, можно измерить величину магнитной индукции с высокой точностью [4].

Однако существует ряд проблем, ограничивающих применение протонных магнитометров. Малая величина напряжения сигнала свободной прецессии протонов требует создавать датчики как можно большего объёма, но чем больше размер датчика, тем больше неоднородность магнитного поля в его объёме и тем меньше время затухания и амплитуда сигнала [4]. Поэтому все современные протонные магнитометры используются вдали от искажающих геомагнитное поле объектов (металлоконструкций, линий электропередач и др.). Также для проведения измерений необходимо заранее знать направление магнитной индукции, так как датчики большинства современных протонных магнитометров чувствительны к нему. В литературе часто можно встретить утверждение, что сигнал свободной ядерной прецессии практически не удаётся наблюдать в обычной лаборатории из-за высокой неоднородности поля вблизи ферромагнитных объектов. Однако использование помехоустойчивого тороидального датчика [5], сверхчувствительной приёмной аппаратуры и цифровых методов обработки позволяет преодолеть эти проблемы.

Структурная схема цифрового протонного магнитометра приведена на рис. 1.



Рис. 1 – Структурная схема магнитометра

Датчик представляет собой пластмассовый тороидальный каркас внешним диаметром 80 мм и диаметром сечения 15 мм, содержащий активное вещество (дистиллированную воду), на который проводом ПЭЛ - 0,6 мм равномерно намотана катушка из 1700 витков, её сопротивление 10 Ом. Для того чтобы в датчике возникла свободная спиновая прецессия, необходимо поляризовать активное вещество сильным магнитным полем в течение нескольких секунд, а потом быстро выключить это поле. Для этого системой силовых ключей, выполненной на твердотельных оптических реле LCA710 [6] к катушке подключается источник поляризации – батарея из двух аккумуляторов по 3,7 В. При этом ток в катушке определяется её сопротивлением и составляет 0,74 А, что соответствует поляризующему полю 2 мТл. Управление режимами работы ключей осуществляется микроконтроллером STM32F100C4T6 [7].

Пока катушка датчика подключена к источнику поляризации, коммутатор, выполненный на ключе ADG884 [8], замыкает вход усилителя, чтобы он не входил в режим насыщения. Сразу после выключения поляризации можно детектировать сигнал свободной прецессии. Для этого через несколько миллисекунд после окончания импульса поляризации коммутатор подключает усилитель к датчику. Схема усилителя состоит из

двух неинвертирующих каскадов, собранных на сдвоенном малошумящем операционном усилителе ОРА2211 [9], общий коэффициент усиления составляет 5000.

Амплитуда сигнала свободной прецессии на входе усилителя составляет несколько доли микровольта, поэтому для точного измерения частоты сигнала необходимо увеличить отношение сигнал-шум. Для этого используется полосовой активный фильтр второго порядка, выполненный на операционном усилителе ОРА2211, с коэффициентом усиления 7 на центральной частоте 2100 Гц и с полосой пропускания 500 Гц. В качестве устройства приёма и обработки данных используется звуковая карта персонального компьютера VIA Tremor 7.1 [10]. Питается магнитометр от двух аккумуляторов напряжением 3,7 В, для питания контроллера и ключа ADG884 используется линейный стабилизатор напряжения на 3,3 В ADP3330 [11].

Эксперименты по наблюдению сигнала свободной прецессии протонов в лабораторных условиях проводились в здании с железобетонным каркасом. Неоднородность геомагнитного поля в лаборатории, измеренная холловским магнитометром, составляла 8 мкТл/м [12]. Приведенный к входу усилителя сигнал свободной прецессии, полученный в ходе измерений, показан на рис. 2.

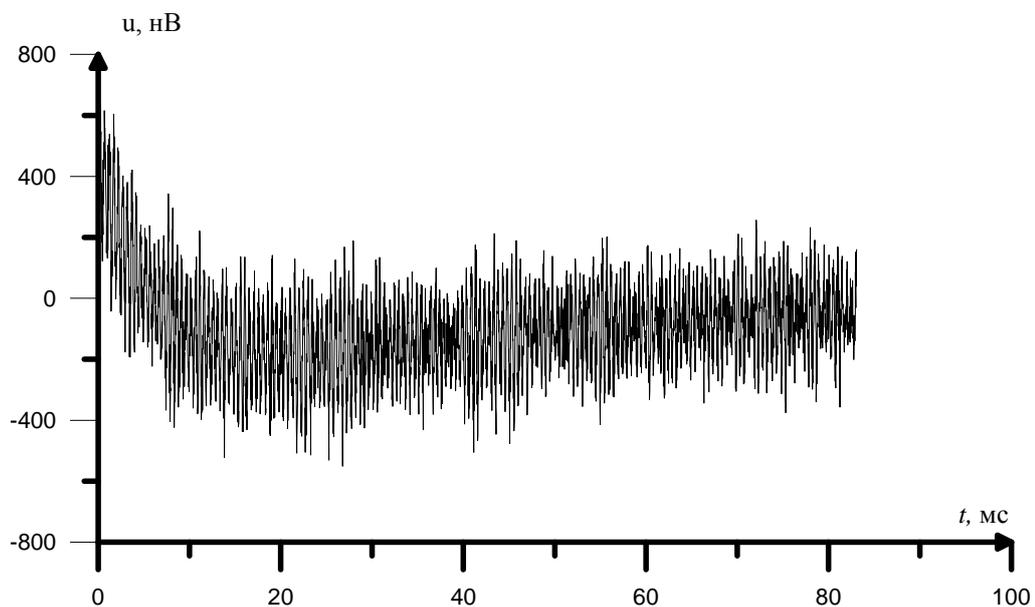


Рис. 2 – Форма сигнала свободной прецессии

На рис. 3 показана спектрограмма сигнала свободной прецессии, полученная с помощью программы audacity 2.0.3 [13] сразу после выключения поляризации при расположении датчика на расстоянии 1,5 м от всех ферромагнитных объектов, находящихся в лаборатории. Пик на частоте 2018 Гц соответствует магнитному полю 47,4 мкТл. Время затухания сигнала определялось по спектрам выборок, взятых в различное время после выключения поляризации, и составило примерно 200 мс.

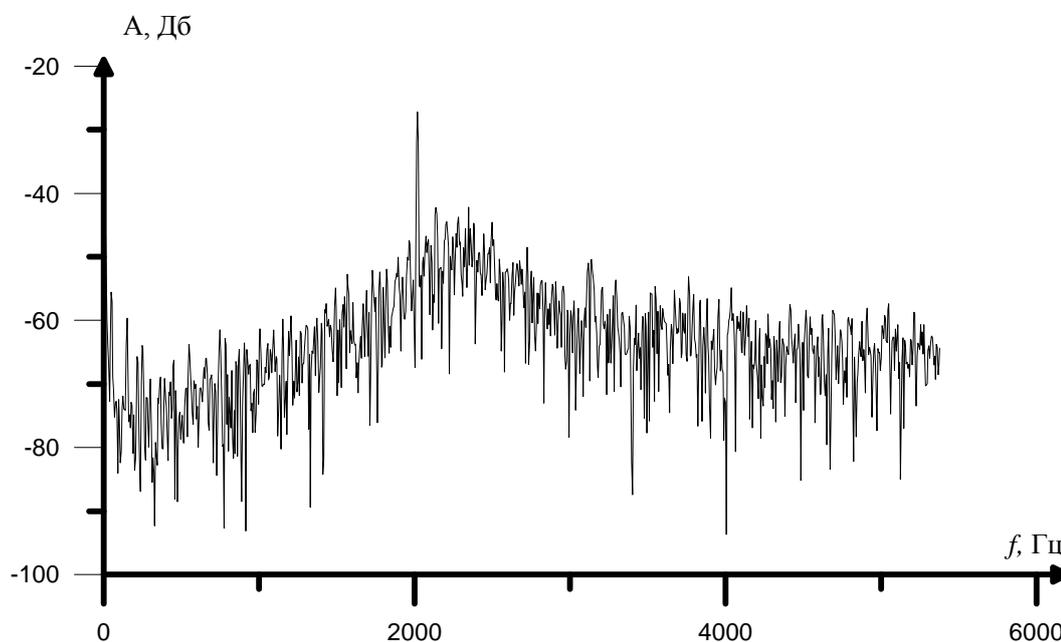


Рис. 3 — Спектрограмма сигнала при расположении датчика на расстоянии 1,5 м от всех ферромагнитных объектов

На рис. 4 приведена спектрограмма сигнала свободной прецессии при расположении датчика на расстоянии 20 см от ферромагнитного лабораторного прибора. Пик на частоте 1894 Гц соответствует полю 44,49 мкТл, время затухания сигнал свободной прецессии при этом составляет примерно 50 мс.

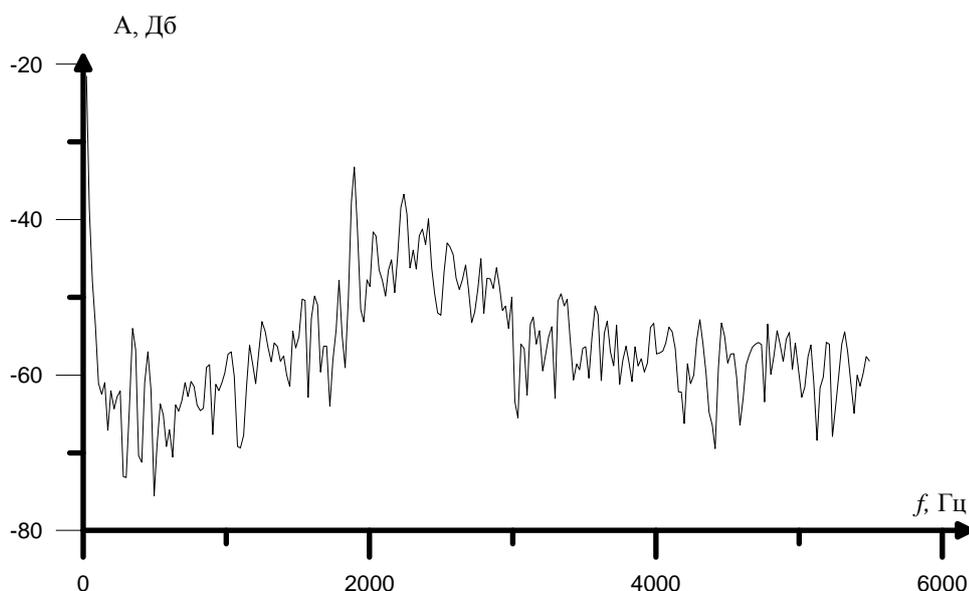


Рис. 4 — Спектрограмма сигнала при расположении датчика на расстоянии 20 см от ферромагнитного лабораторного оборудования

Анализ приведенного на рис. 1 сигнала свободной прецессии, показывает, что в сигнале, полученном в лабораторных условиях, периодическая составляющая не выделяется на уровне шума. Поэтому не возможно измерить частоту свободной прецессии протонов в геомагнитном поле электронно-счетным частотомером. Именно это обстоятельство обычно принимается за причину невозможности наблюдения ЯМР в геомагнитном поле в лабораторных условиях [4]. На спектрограммах рис. 3 и рис. 4 пик, соответствующий свободной ядерной прецессии, может быть выделен методами теории распознавания образов, однако при этом велика вероятность ошибки из-за соседних пиков, обусловленных шумовой составляющей сигнала. Отметим, что время затухания сигнала свободной прецессии в лабораторных условиях очень мало (десятки миллисекунд вместо нескольких секунд в однородном поле [5]).

Повысить точность измерения частоты сигнала свободной прецессии позволяет цифровая фильтрация и параметрическое спектральное оценивание [14]. На рис. 5 приведена небольшая выборка сигнала свободной прецессии после фильтрации рекурсивным цифровым фильтром с полосой 100 Гц.

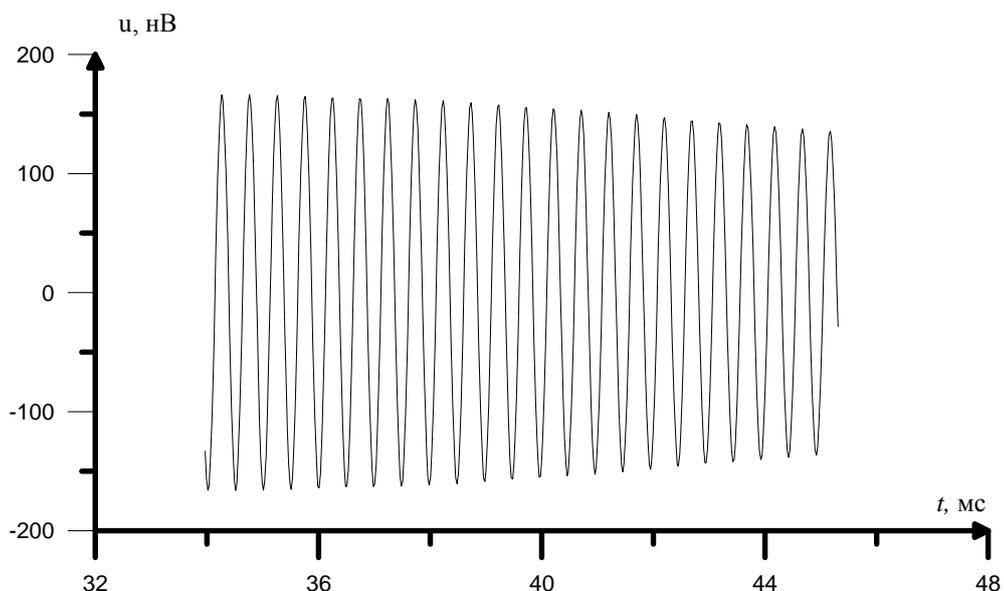


Рис. 5 – Сигнал свободной прецессии

График огибающей сигнала приведен на рис. 6. Как видно из графика, сигнал свободной прецессии имеет амплитудную модуляцию с частотой 50 Гц, которая вызвана магнитной наводкой, создаваемого бытовой сетью на измеряемое геомагнитное поле.

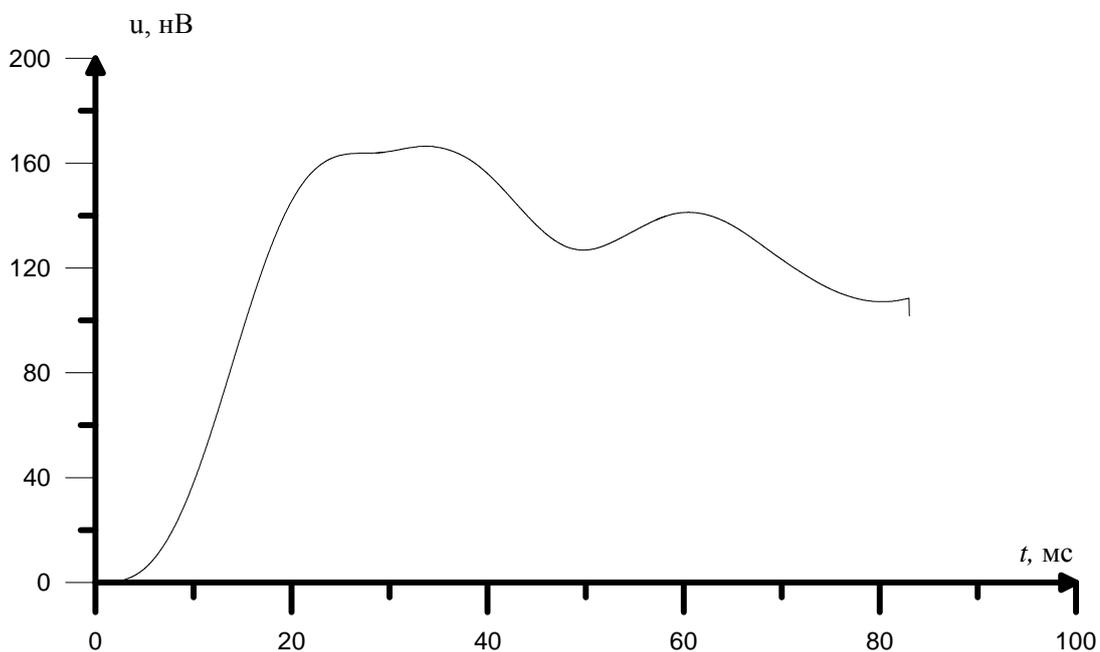


Рис. 6 – Форма огибающей сигнала, приведенного к входу

Вычисление частоты квазигармонического сигнала после цифровой фильтрации проводилось методом Прони [15], который позволяет по выборке 100 мс вычислять частоту сигнала с точностью 10^{-3} Гц, что соответствует погрешности измерения магнитной индукции в 0,5 нТ.

Эксперименты подтвердили, что разработанный магнитометр позволяет производить измерения геомагнитного поля с точностью до 0,5 нТ в при неоднородности до 8 мкТ/м. Уровень сигнала при этом, достаточно высок, что позволяет уменьшить размер датчика и проводить измерения в ещё более неоднородных полях, а использование метода определения мгновенной частоты [16] и применение метода динамической компенсации погрешности АЦП [17] позволит увеличить точность измерений.

Несмотря на то, что предложенный прибор не позволяет достичь принципиального предела в чувствительности измерителей магнитного поля [18], но он не требует специальных условий эксплуатации и лишён недостатков большинства современных протонных магнитометров. Он может использоваться в магнитных измерениях даже в полях высокой неоднородности, что расширяет область его применения по сравнению с его современными аналогами. Современный магнитометр GSM-19Т, имеющий самый большой допустимый градиент магнитного поля, способен работать при неоднородности до 7 мкТл/м, обладает точностью измерений до 0,01 нТ и стоит 10500 \$ [19], в то время как себестоимость разработанного магнитометра не превышает 10000 рублей.

При использовании двух параллельных каналов измерения совместно с измерителем малых перемещений [20] на основе магнитометра можно создать сверхчувствительный градиометр-металлоискатель, который может быть включен в комплексы дистанционного обследования металлоконструкций, трубопроводов и др. [21] с применением метода тензорной микротопологии [22, 23].

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, проекты №14.В37.21.07284 и № 14.В37.21.0736.

Литература:

1. Ревякин П.С., Бродовой В.В., Ревякина Э.А. Высокоточная магниторазведка. – М.: Недра, 1986. – 272 с.
2. Серкеров С.А. Гравиразведка и магниторазведка. – М.: Недра, 1999. – 437 с.
3. Цветков Ю. П. Аэростатная стратосферная градиентная магнитометрия и ее использование для решения задач внутреннего строения Земли: диссертация ... доктора физико-математических наук: 25.00.10. – М., 2001. – 257 с.
4. Бородин П.М., Мельников А.В. Ядерный магнитный резонанс в земном поле – М.: Наука, 1972. – 449 с.
5. Померанцев Н.М. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. – 448 с
6. Техническое описание микросхемы LCA710 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/clare/LCA710STR.pdf>
7. Техническое описание микросхемы STM32F100C4T6 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ic-online.cn/view_online.php?id=1428120&file=0196\stm32f100c4h6b_4530543.pdf
8. Техническое описание микросхемы ADG884 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADG884.pdf
9. Техническое описание микросхемы OPA2211 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/sbos377g/sbos377g.pdf>

10. Техническое описание звуковой карты VIA VT1802P [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.via.com.tw/en/products/audio/codecs/vt1802p/>
11. Техническое описание микросхемы ADP3330 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADP3330.pdf
12. Ignatjev V.K., Orlov A.A. Hall Effect in Inhomogeneous Magnetic Field // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Brooklyn Polytechnic University, New York, 2013, chapter 5, 450 p.
13. Описание программного продукта audacity 2.0.3 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://audacity.sourceforge.net/?lang=ru>
14. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. – М.: Вильямс, 2004г. – 992 с.
15. Белодедов М.В., Игнатьев В.К., Никитин А.В. Точность аппроксимации сигналов по алгоритму Прони. Электронное моделирование. 1992. Т. 14. № 5. С. 43 – 48
16. Игнатьев В.К., Никитин А.В., Юшанов С.В. Параметрический анализ колебаний медленно меняющейся частоты. Известия ВУЗов. Радиофизика 2010. Т. 53. № 2. С. 145 – 159.
17. Игнатьев В.К., Никитин А.В., Перченко С.В., Станкевич Д.А. Динамическая компенсация дополнительной погрешности прецизионного АЦП [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №2. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/771> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
18. Игнатьев В.К., Якимец А.Л. Криозондовый магнитометр [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4, (часть 1) – Режим доступа:

- <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1274> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
19. Техническое описание протонного магнитометра GSM-19T [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://geoget.ru/images/stories/GSM-19T.pdf>
 20. Орлов А.А., Игнатъев В.К. Цифровой емкостный дилатометр [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/462> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
 21. Жадан М.П. Разработка методики автоматизированного дистанционного обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2009, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/127> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
 22. Ignatjev V.K., Orlov A.A., Stankevich D.A. Magnetostatics of Cylindrical Ferromagnetic Samples // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Brooklyn Polytechnic University, New York, 2013, chapter 7, 450 p.
 23. Игнатъев В.К. Станкевич Д.В. Дефектоскопия стальной проволоки методом тензорной магнитной топологии [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012. № 2. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/786> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.