

## Магнитометрическая измерительная система параметров геомагнитного поля

А. И. ЗАЙКО, А. В. ВОРОБЬЁВ, Г. А. ИВАНОВА, Г. Р. ШАКИРОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
Уфа, Россия, e-mail: zaiko@ugatu.ac.ru

Рассмотрены основы проектирования и результаты тестирования магнитометрической системы, разработанной для мониторинга и анализа параметров геомагнитного поля и его вариаций. Реализованы беспроводной канал передачи информации и программный комплекс, обеспечивающие автоматизированную обработку регистрируемых данных в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, геомагнитные вариации, анизотропные магниторезистивные преобразователи.

Basics of design and test results of magnetometric measurement system for monitoring and analyzing geomagnetic field parameters and its variations are considered. A wireless communication channel and a software to enable automated processing of measurement data in the real time mode are implemented.

**Key words:** geomagnetic field, geomagnetic variations, anisotropic magnetoresistive transducers.

В настоящее время мониторинг параметров геомагнитного поля (ГМП) и регистрацию его вариаций проводят в магнитных обсерваториях. В среднем по планете одна обсерватория приходится на площадь более  $5,1 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>. Их плотность максимальна в Европе, при этом они отсутствуют в большинстве стран Азии, Африки и Южной Америки, население которых по численности многократно превосходит страны Западной Европы [1, 2]. Известные подходы контроля параметров геомагнитных вариаций не позволяют оценить воздействие на объект частных влияний, наблюдаемых в среде невозмущенного анизотропного ГМП при условии его ненулевой угловой или линейной скоростей. Иными словами, в данной области имеются существенные проблемы и недостатки, такие как высокая стоимость проводимых наблюдений и исследований, недостаточная информативность, адаптированность и доступность для широкого круга регистрируемых параметров, невысокая плотность распределения по поверхности Земли магнитных обсерваторий, низкий уровень автоматизации обработки информационного сигнала. В этой связи создание методического, технического, приборного и информационного обеспечения для локальных, региональных и глобальных систем мониторинга параметров ГМП и его вариаций, а также разработка, внедрение и испытание приборов, средств и систем контроля с улучшенными характеристиками по сравнению с известными аналогами, достаточно актуальны [3—6].

В настоящей статье рассмотрено построение магнитометрической системы на базе тонкоплёночных анизотропных магниторезистивных (АМР) измерительных преобразователей. Такой выбор связан с понижением на частотах 0—1 кГц порога чувствительности тонкоплёночных магниторезистивных элементов до 2,7 нТл. К тому же их отличают высокая технологичность производства, малые массогабаритные и стоимостные характеристики, устойчивые показатели надёжности и линейная функция преобразования выходного сигнала. Всё это существенно расширяет области их применения по сравне-

нию с аналогичными приборами того же типа, но используемыми несколько лет назад [7—11].

**Математическая модель и методика считывания информационного сигнала с АМР измерительного преобразователя.** Исследования модернизированной структуры АМР измерительных элементов и физики процессов, протекающих в их объёме, позволили сформулировать и записать унифицированную математическую модель. Эта модель реализована как функция вариаций сопротивления АМР-элемента, связанных с изменением параметров внешнего магнитного поля [12]. Математическая модель записывается линейной функцией, что важно при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также в ходе проведения оценочных и инженерных расчётов:

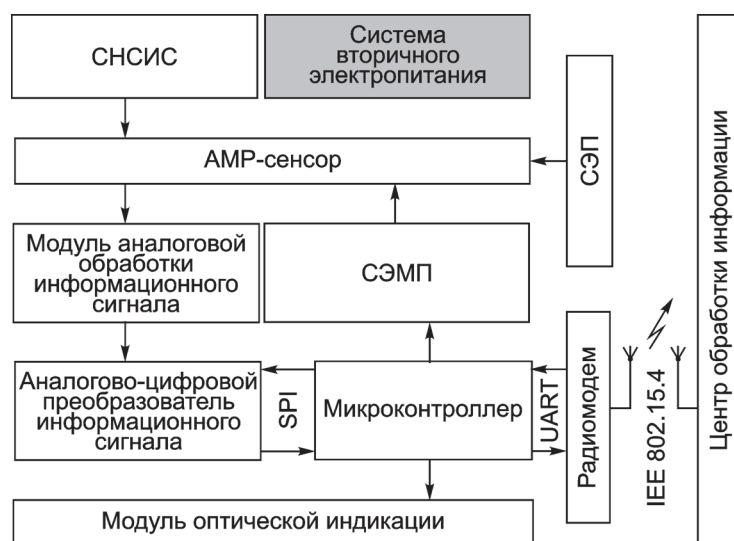


Рис. 1. Структура магнитометрической системы GIMS-1.T:

СЭМП — система экстремального подмагничивания; СНСИС — система нулевого смещения информационного сигнала; СЭП — система экстремального питания

$$U(B) = U_0 \Delta R_{\max} B / (R_{B=0} B_0), \quad (1)$$

где  $U(B)$ ,  $U_0$  — напряжения измерительной диагонали дифференциального моста Уинстона и питания (возбуждения) измерительного моста, соответственно;  $\Delta R_{\max}$  — максимально возможное изменение сопротивления;  $R_{B=0}$  — сопротивление пермаллоевой тонкой магнитной плёнки вне действия магнитного поля;  $B$ ,  $B_0$  — индукции измеряемого (внешнего) и дополнительного (подмагничивающего) полей, соответственно.

В исходном состоянии при отсутствии внешнего магнитного поля ориентация моментов доменов АМР-элемента хаотична, а его суммарный момент равен нулю. При воздействии на АМР-элемент внешнего магнитного поля домены преимущественно приобретают ориентацию в направлении индукции  $B$ . При протекании через катушку подмагничивания импульса тока  $i_1$  генерируется импульсное поле с индукцией выше измеряемой. После считывания и регистрации выходного сигнала АМР модуля формируется импульс тока  $i_2$  противоположной полярности, из-за которого магнитные домены располагаются в направлении индукции  $B$ . Далее, по аналогии с предыдущим воздействием, регистрируется выходной сигнал измерительной диагонали моста, после чего рассчитывают его среднее значение по формуле

$$U_{\text{ср}} = (U_{01} + U_{02}) / 2,$$

где  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  — выходные сигналы измерительного моста, соответствующие токам  $i_1$ ,  $i_2$ .

Напряжение, пропорциональное индукции исследуемого магнитного поля, определяют как

$$U(B) = U_{01}(B) - U_{\text{ср}}(B).$$

**Синтез структуры и построение магнитометрической системы GIMS-1.Т для регистрации параметров ГМП.** В экспериментах, проведённых с целью повышения автоматиза-

ции и достоверности процесса измерений, было выявлено, что наибольшей эффективностью, инновационным функционалом, а также выгодными массогабаритными и экономическими показателями обладает подход, реализованный на базе структуры, представленной на рис. 1 [13]. Ниже представлены технические характеристики экспериментального образца GIMS-1.Т [12—13].

#### Технические характеристики магнитометрической системы GIMS-1.Т

|                                                                                          |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Динамический диапазон . . . . .                                                          | ±200 мкТл         |
| Частотный диапазон . . . . .                                                             | 0—8 Гц            |
| Максимальная чувствительность . . . . .                                                  | 3 нТл             |
| Разрядность информационного сигнала . . . . .                                            | 22 бит            |
| Интерфейс передачи информационного сигнала . . . . .                                     | RS485/IEE802.15.4 |
| Температурный диапазон эксплуатации . . . . .                                            | –55...+150 °С     |
| Габаритные размеры сенсорного модуля . . . . .                                           | 150×25×25 мм      |
| Габаритные размеры модуля управления . . . . .                                           | 170×103×35 мм     |
| Внешние источники питания:                                                               |                   |
| переменное напряжение . . . . .                                                          | 220 В, 50 Гц      |
| постоянное напряжение . . . . .                                                          | 12 В              |
| Количество и типоразмер гальванических элементов внутреннего источника питания . . . . . | AA×4              |

Исследования и анализ возможных тепловых, токовых и дробовых шумов в совокупности с реализацией в системе экстремального подмагничивания СЭМП (см. рис. 1), т. е. генерации дополнительного магнитного поля режима последовательного двухполярного подмагничивания, позволили минимизировать помехи, связанные с гистерезисом первичного измерительного преобразователя.

Система нулевого смещения информационного сигнала СНСИС, система экстремального питания СЭП, обеспечивающая импульсное питание мостовой схемы с целью повышения чувствительности измерительного модуля, и СЭМП воздействуют на первичный измерительный преобразова-

тель, сигнал с которого поступает в модуль аналоговой обработки, оцифровывается и через микроконтроллер транслируется по беспроводному радиоканалу стандарта IEE 802.15.4 в центр обработки информации (ПЭВМ) и жидкокристаллический оптический индикатор.

Обзор современных технических средств показал, что ближайшим аналогом GIMS-1.Т является малогабаритный магнитометр МТМ-01 (в Госреестре средств измерений № 35950-07). Из сравнения двух приборов следует, что массогабаритные параметры экспериментального образца GIMS-1.Т меньше, чем у его аналога: блок управления — на 18,25 %, сенсорный модуль — на 62,63 %, а относительная погрешность (как будет показано далее) снижена в 1,9 раза. Предложенная в [13] система не требует многозвенных аналоговых фильтров и калибровочных резисторов, что минимизирует помехи.

В разработанном программно-инструментальном комплексе (ПИК) использован беспроводной канал передачи данных [12]. Функциональная схема ПИК представлена на рис. 2. Комплекс позволяет регистрировать и проводить комплексную оценку оцифрованного информационного сигнала



Рис. 2. Функциональная схема программно-инструментального комплекса: ПЭВМ — персональная электронно-вычислительная машина; ГИМС — геоинформационная магнитометрическая система

ла в амплитудной, частотной и фазовой областях в режимах реального, контрольного и свободного времени. Анализируемые (первичные) и синтезируемые (вторичные) данные представлены в нём в виде файлов CSV/JSON-формы, что обеспечивает их аппаратную нейтральность и возможность оперативной конвертации в табличный (\*.xls), текстовый (\*.txt, \*.doc) или иной удобный файловый формат.

На рис. 3 приведены формы реального информационного сигнала, зарегистрированного GIMS-1.Т и имеющего частоту дискретизации 30 Гц, а также сигнала, обработанного подсистемой цифровой фильтрации, входящей в ПИК [13]. Сигнал получен с помощью фильтра нижних частот, реализованного на базе функции Гаусса, однако в ПИК предусмотрены также фильтры верхних частот, полосовые и заградительные фильтры на базе функций Ланцоша, Хемминга, Блэкмана и других, что позволяет расширить настройки измерительной системы.

Для автоматического сравнительного анализа и визуализации параметров гармонических составляющих информационного сигнала (энергетического спектра, начальной фазы, разности фаз гармонических составляющих и др.) в ПИК создан инновационный инструмент Prism. Таким образом, приборное обеспечение GIMS-1.Т реализует регистрацию и автоматизированный полигармонический анализ информационного сигнала в режимах реального, контрольного и свободного времени.

**Эксперимент по исследованию технико-метрологических характеристик.** Исследования магнитометрической системы GIMS-1.Т проводили на базе Государственного регионального центра стандартизации, метрологии и испытаний в Республике Башкортостан (ЦСМ РБ) в экранированной камере ЭК-40. На вход установки поверочной магнитной индукции УМИП-02 № 01, собранной на базе колец Гельмгольца ПАЭМ.2.820.002, включённой в поверочную установку П1-14 № 004, ток возбуждения подавали с выхода программируемого источника постоянного тока АКП-1129. При этом генерируемое магнитное поле УМИП-02 № 01, ожидаемое в соответствии с (1), регистрировали одновременно с помощью магнитометра МТМ-01 и экспериментального образца GIMS-1.Т с предварительно установленными коэффициентами калибровки  $k = 0,305$ ;  $b = 1$  мкТл. В результате индукцию искомого магнитного поля вычисляли в соответствии с выражением

$$B = 13,466 I \mu_0 + \Delta B_0,$$

где  $I$  — ток возбуждения;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\Delta B_0$  — индукция нулевого смещения, определяемая окружающей магнитной обстановкой.

Данные, регистрируемые прибором МТМ-01, обрабатывали вручную, а записанные с помощью GIMS-1.Т — в автоматическом режиме посредством ПИК, входящего в состав экспериментального образца GIMS-1.Т. Действительная средняя относительная погрешность GIMS-1.Т составила 1,29 %, а его аналога — магнитометра МТМ-01 — 2,50 %.

**Заключение.** Для комплексного полигармонического анализа параметров ГМП и его вариаций различного происхождения разработаны новые методы и средства моделирования и контроля в автоматическом режиме, в режимах реального, контрольного и свободного времени. Испытания показали, что магнитометрическая система GIMS-1.Т на базе анизотропных магниторезистивных преобразователей

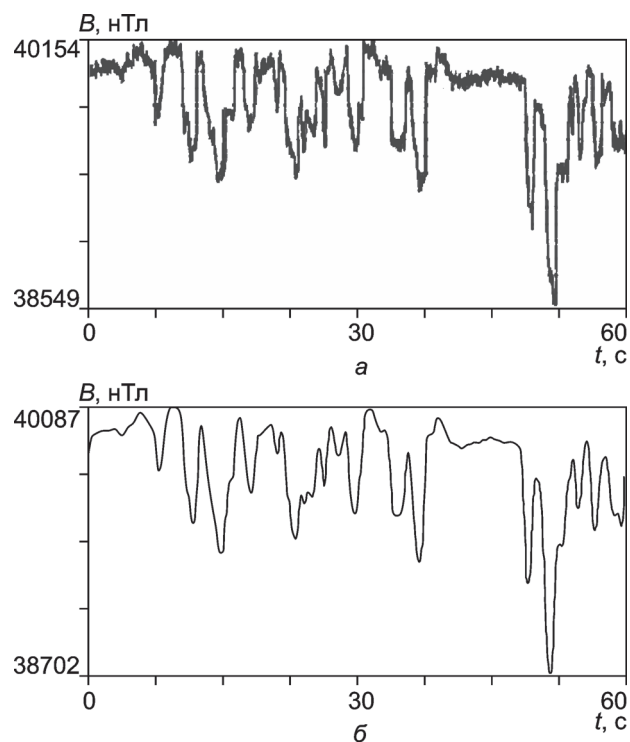


Рис. 3. Цифровая фильтрация информационных сигналов: а — зарегистрированного; б — обработанного

превосходит аналоги по точностным показателям в 1,94 раза, имеет улучшенные массогабаритные, эргономические характеристики, а также обладает расширенной функциональностью. Общая достоверность регистрации параметров локальных ГМВ и аномалий увеличена на 1,9—2,5 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 14-07-00260-а, 14-07-31344-мол\_а, 15-17-20002-Д\_С, 15-07-02731-а, МК-5340.2015.9).

#### Литература

1. Гвишиани А. Д. Геомагнитные обсерватории России: система сбора и обработки данных по магнитному полю Земли. [Электрон. ресурс] [http://onznnews.wdcb.ru/news14/info\\_140116.html](http://onznnews.wdcb.ru/news14/info_140116.html) (Дата обращения 07.05.2015 г.).
2. Vorobev A. V., Shakirova G. R. Pseudostorm effect: computer modelling, calculation and experiment analyzes // Proc. 14<sup>th</sup> SGEM GeoConf. on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. Albena (Bulgaria). 2014. V. 1. P. 745—751.
3. Пудовкин М. И. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. I / Под ред. М. И. Пудовкина, О. М. Распопова, Н. Г. Клейменов. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975.
4. Понаморёв Е. А. Генерация электрического поля в магнитосфере Земли, обусловленная процессами в головной ударной волне / Под ред. Е. А. Понаморёва, П. А. Седых // Исследовано в России. 2004. № 3. С. 3—13.
5. Эгеланд А., Хольтер О., Лимхольт А. Космическая геофизика. М.: Мир, 1976.
6. Воробьёв А. В. Исследование и анализ амплитудно-частотных характеристик геомагнитной псевдобури, возникающей в процессе авиаперелёта воздушных судов различного целевого назначения // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18. № 3(64). С. 132—141.

7. Smith C., Schneider R., Wang D. Spin-Dependent Tunneling: A New Magnetic Sensing Technology. [Электронный ресурс] <http://archives.sensormag.com/articles/0304/28>. (Дата обращения 30.04.2015 г.).

8. Никитин С. А. Гигантское магнитосопротивление // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 2. С. 92—98.

9. Гужин С. Г., Жулев В. И., Никитин С. В. Датчики на основе новых магниторезистивных эффектов // Датчики и системы. 2008. № 9. С. 54—59.

10. Лукашевич М. Г. Введение в магнитоэлектронику. Минск: БГУ, 2003.

11. Ripka P., Tipek A. Modern Sensors. London: ISTE Ltd, 2007.

12. Воробьев А. В. Синтез и верификация математической модели анизотропного магниторезистивного мостового сенсора // Датчики и системы. 2012. № 5. С. 40—45.

13. Воробьев А. В. Математическая модель анизотропного магниторезистивного датчика для инженерных расчетов // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 1(46). С. 161—166.

Дата принятия 01.07.2015 г.

## РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.518.2.519.216

### Исследование оперативного метода измерения частоты и амплитуды сигналов с медленно меняющимися параметрами

А. В. НИКИТИН, А. О. НИКИТИН, А. А. ОРЛОВ

Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия, e-mail: orlwork@inbox.ru

*Исследован нелинейный параметрический метод оценивания мгновенной частоты и амплитуды квазигармонического сигнала. Получены аналитические выражения дисперсии оценок и их смещения, подтвержденные численным моделированием. Экспериментальная проверка работы метода на реальном сигнале показала возможность определения его частоты с относительной погрешностью не более  $10^{-5}$  на временном интервале около 30 периодов исследуемого сигнала.*

**Ключевые слова:** квазигармонический сигнал, мгновенная частота, аналого-цифровой преобразователь.

*A study on the nonlinear parametric method of estimating the instantaneous frequency and amplitude of a quasi-harmonic signal is presented. Analytical expressions for dispersion and bias of estimates confirmed by numerical simulation are obtained. Method performance tests with real signals showed the possibility to determine frequency with a relative error not exceeding  $10^{-5}$ .*

**Key words:** quasiharmonic signal, estimate, instantaneous frequency, analog-to-digital converter.

В ряде радиофизических и радиотехнических задач измерение параметров нестационарных систем сводится к анализу квазигармонических колебаний вида

$$x(t) = u(t) \cos \theta(t), \quad (1)$$

т. е. к определению законов изменения амплитуды и мгновенной частоты, которая является производной полной фазы

$\omega(t) = \dot{\theta}(t)$  [1]. Большинство существующих цифровых методов не позволяет с достаточной точностью получить оценку мгновенной частоты на коротком (порядка двух периодов сигнала) интервале наблюдения либо требуют существенных вычислительных затрат. К ним относятся методы, основанные на минимизации некоторого функционала, отвечающего за погрешность оценивания параметров колебаний, или на максимизации функции правдоподобия. Методы, в которых используется фильтрация исследуемого сигнала и формирование среднеинтегральной оценки результата, не позволяют получить подробные законы изменения  $\omega(t)$  и  $u(t)$  в режиме реального времени.

В [2] описан параметрический метод измерения мгновенной частоты зашумленного гармонического сигнала, ос-

нованный на использовании узкополосных режекторных цифровых фильтров. В [3] тот же метод получен на базе модели Прони второго порядка без затухания, а также приведены рекуррентные соотношения, позволяющие осуществить его минимальным количеством вычислительных операций. В [2, 3] предполагается постоянство частоты и амплитуды в рамках скользящего интервала наблюдения, а статистические характеристики метода исследованы только для простейших вариантов его реализации. Кроме того, метод позволяет измерять только мгновенную частоту, что требует точного и оперативного алгоритма измерения амплитуды. В [4] предложен метод оценки амплитуды, позволяющий рассчитывать её в рамках скользящего окна произвольной длины с использованием небольшого фиксированного количества операций вне зависимости от размера окна.

Цель данной работы — совместное применение указанных оперативных методов оценивания частоты и амплитуды на коротком интервале наблюдения, а также анализ их точности и устойчивости в зависимости от длительности этого интервала и частоты. При увеличении длины скользящего окна уменьшаются дисперсии оценок частоты и амплитуды,