

УДК 621.38

Г. В. МИЛОВЗОРОВ, А. В. ВОРОБЬЕВ

О ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Предлагается подход для синтеза системы мониторинга параметров локальных геомагнитных возмущений, отличительной особенностью которого является реализация методики цифровой фильтрации информационного сигнала, предоставляющего широкие возможности в области анализа как амплитудных вариаций вектора магнитной индукции, так и его частотного спектра. *Нерекурсивный цифровой фильтр ; магнитосфера Земли ; метод наименьших квадратов*

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение геомагнитной обстановки Земли и ее вариаций является актуальной задачей. Это обусловлено рядом установленных факторов непосредственного влияния магнитных полей на биосферу и жизнедеятельность человека в частности. К таким факторам относятся природные, физические и физико-биологические явления, а именно:

- ориентация по магнитному полю Земли мигрирующих птиц [2];
- ориентация по магнитному полю Земли микроорганизмов с целью поиска оптимальных условий для существования (Магнетотаксические бактерии, встречающиеся в морской глине, используют магнетосомы внутри своих клеток и выстраиваются в цепочки, чтобы различить «верх» и «низ» в земном магнитном поле. Это помогает бактериям передвигаться через водную толщу в поисках подходящих условий для развития. Вышеуказанные магнетосомы состоят из нанокристаллов магнитного минерала – магнетита (Fe_3O_4), и имеют размеры порядка 50 нм) [2];
- ориентация некоторых видов млекопитающих по магнитному полю;
- сильные электромагнитные бури могут спровоцировать в некоторых местностях выход из грунта радиоактивного газа радона, при этом несколько возрастает радиоактивность атмосферы, со всеми вытекающими последствиями [2];

- наличие в составе тканей головного мозга человека железа, находящегося в составе ферритинов (белков с железом в виде наночастиц). (Еще один компонент, находящийся в тканях головного мозга человека – это магнетит, оксид железа, либо очень похожий на него по составу маггемит (магнитная модификация окиси железа $\gamma-Fe_2O_3$), либо их смесь) [3];

- также учеными было выявлено, что в моменты воздействия на организм человека электромагнитных полей, частота которых колеблется в диапазоне 0.5-3 Гц (что совпадает с частотой биения сердца), возникает опасная высокая вероятность спровоцировать фибрилляцию, то есть хаотичное, беспорядочное сокращение сердечной мышцы [1].

Эти и многие другие факты определяют задачу, связанную не только с постоянным контролем параметров магнитосферы Земли, но и выявлением амплитудного и частотного диапазона уязвимости человека к электромагнитным полям и их вариациям.

Таким образом, при контроле и регистрации параметров геомагнитных возмущений следует обратить особое внимание на спектр анализируемых частот.

1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

На рис. 1 приведена структурная схема системы мониторинга параметров состояния магнитосферы Земли, содержащая:

- трехосевой датчик вектора магнитной индукции;

- предварительный фильтр нижних частот (ФНЧ);
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- цифровой программно настраиваемый не-рекурсивный фильтр (НЦФ);
- систему графического отображения и регистрации информации в реальном времени.

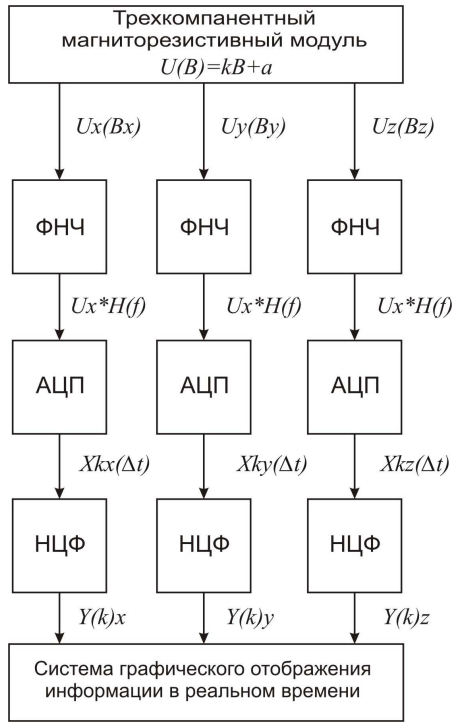


Рис. 1

В представленной структуре приняты следующие обозначения:

$B(t)$ – внешнее воздействие магнитного поля на датчик;

$U_x(B_x)$ – выходное напряжение датчика, пропорциональное значению вектора магнитной индукции вдоль оси X ;

$U_y(B_y)$ – выходное напряжение датчика, пропорциональное значению вектора магнитной индукции вдоль оси Y ;

$U_z(B_z)$ – выходное напряжение датчика, пропорциональное значению вектора магнитной индукции вдоль оси Z ;

$U * H(f)$ – результат первичной фильтрации сигнала $U(B)$, где $H(f)$ -передаточная функция предварительного аналогового фильтра низких частот (ФНЧ);

$X_k(\Delta t)$ – последовательность дискретных цифровых сигналов, соответствующих результату оцифровки сигнала $U(B) * H(f)$ аналого-цифровым преобразователем (АЦП);

$Y(k)$ – последовательность дискретных цифровых сигналов, соответствующая результа-

ту фильтрации $X_k(\Delta t)$ нерекурсивным цифровым фильтром (НЦФ).

Учитывая тот факт, что собственное электромагнитное поле человека наиболее активно в области низких и сверхнизких частот (0,01-100 Гц) [2], определим как верхнюю границу пропускания спектра частоту, равную 100 Гц.

Таким образом, задаваясь целью «отсеять» гармонические составляющие, превышающие определенное выше значение, рассмотрим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) вида $(\sin(x)/x)^3$ [4]. Передаточная функция фильтров, обладающих данной АЧХ в z -области, определяется выражением:

$$W(z) = \left[\frac{1 - z^{-M}}{M(1 - z^{-1})} \right]^3, \quad (1)$$

где M – целое число, которое задается программно и равно отношению тактовой частоты модулятора к частоте отсчетов фильтра.

В частотной области модуль передаточной функции фильтра имеет вид:

$$H(f) = \left[\frac{\sin(M\pi f / f_{\text{такт.}})}{M \sin(\pi f / f_{\text{такт.}})} \right]^3. \quad (2)$$

Таким образом, варьируя переменную M , можно изменять верхнюю границу частоты пропускания предварительного ФНЧ. В рассматриваемом случае при $M=102$ имеем верхнюю границу пропускания равную 100 Гц.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА

В результате оцифровки сигнала АЦП имеем ряд числовых значений $X(\Delta t)$ с равным шагом дискретизации Δt . На этом этапе обработки сигнала предоставляется возможность реализации «гибкого» модуля цифровой фильтрации.

Рассмотрим квадратный многочлен вида $y(t)=A+B \cdot t+C \cdot t^2$. Для упрощения анализа ограничимся симметричным сглаживающим не-рекурсивным цифровым фильтром (что вполне удовлетворяет условию поставленной задачи) с интервалом дискретизации данных $\Delta t=1$.

Минимум суммы квадратов остаточных ошибок определяется следующим образом:

$$\sigma(A, B, C) = \sum_{n=-N}^N [s_n - (A + Bn + Cn^2)]^2. \quad (3)$$

Система уравнений после дифференцирования выражения (3) по A, B, C и приравнивания полученных выражений нулю примет вид:

$$\begin{cases} A \sum_{n=-N}^N + B \sum_{n=-N}^N n + C \sum_{n=-N}^N n^2 = \sum_{n=-N}^N s_k \\ A \sum_{n=-N}^N n + B \sum_{n=-N}^N n^2 + C \sum_{n=-N}^N n^3 = \sum_{n=-N}^N ns_k \\ A \sum_{n=-N}^N n^2 + B \sum_{n=-N}^N n^3 + C \sum_{n=-N}^N n^4 = \sum_{n=-N}^N n^2 s_k \end{cases}$$

При вычислении значения квадратного многочлена только для центральной точки ($t=0$) необходимости в значениях коэффициентов B и C не имеется. Решая систему уравнений относительно A , получаем [5]:

$$A = \left\{ \frac{\sum_{n=-N}^N n^4 \sum_{n=-N}^N s_n - \sum_{n=-N}^N n^2 \sum_{n=-N}^N n^2 s_n}{\sum_{n=-N}^N 1 \sum_{n=-N}^N n^4 - \left[\sum_{n=-N}^N n^2 \right]^2} \right\} \quad (4)$$

При разворачивании выражения (4) для 5-точечного НЦФ получим:

$$y_0 = \left(17 \sum_{n=-2}^2 s_n - 5 \sum_{n=-2}^2 n^2 s_n \right) / 35 = (-3s_{-2} + 12s_{-1} + 17s_0 + 12s_1 - 3s_2) / 35. \quad (5)$$

При этом:

- импульсная реакция: $h_n = \{(-3, 12, 17, 12, -3) / 35\}$;
- передаточная функция фильтра:

$$H(z) = (-3z^{-2} + 12z^{-1} + 17 + 12z^1 - 3z^2) / 35. \quad (6)$$

Аналогичным образом выражение (4) позволяет получить импульсную реакцию для 7, 9, 11 и т. д. точек фильтра:

$$\begin{aligned} {}^3h_n &= \{(-2, 3, 6, 7, 6, 3, -2) / 21\}. \\ {}^4h_n &= \{(-21, 14, 39, 54, 59, 54, 39, 14, -21) / 231\}. \\ {}^5h_n &= \{(-36, 9, 44, 69, 84, 89, 84, 69, 44, 9, -36) / 459\}. \end{aligned}$$

В целях улучшения частотных характеристик рассматриваемого НЦФ, организуем так называемый «модифицированный фильтр МНК 2-го порядка» [6]. Передаточная функция такого НЦФ соответствует выражению:

$$H(z) = (-3z^{-2} + 12z^{-1} + 17 + 12z^1 - 3z^2) / 35.$$

Частотная характеристика НЦФ (без учета нормировки) соответствует выражению:

$$H(\omega) = -3\exp(2j\omega) + 12\exp(j\omega) + 17 + 12\exp(-j\omega) - 3\exp(-2j\omega).$$

Замена конечных коэффициентов на параметр b и упрощение позволяют частотную характеристику НЦФ представить следующим образом:

$$H(\omega) = 17 + 24 \cos(\omega) + 2b \cos(2\omega).$$

При $\omega = \pi$: $H(\pi) = 17 - 24 + 2b = 0$.

Отсюда: $b = 3,5$.

Частотная характеристика «модифицированного» НЦФ (с приведением коэффициентов к целым числам) будет иметь вид:

$$H(\omega) = 68 + 96 \cos(\omega) + 14 \cos(2\omega).$$

Сумма коэффициентов при $\omega = 0$:

$$H(0) = 68 + 96 + 14 = 178.$$

Нормированная частотная характеристика:

$$H(\omega) = (68 + 96 \cos(\omega) + 14 \cos(2\omega)) / 178.$$

Коэффициенты фильтра: $h_n = \{(7, 48, 68, 48, 7) / 178\}$.

Таким образом, коэффициенты 7, 9 и 11 точечных модифицированных фильтров МНК 2-го порядка будут иметь вид:

$$\begin{aligned} {}^7h_n &= \{(1, 6, 12, 14, 12, 6, 1) / 52\}. \\ {}^9h_n &= \{(-1, 28, 78, 108, 118, 108, 78, 28, -1) / 548\}. \\ {}^{11}h_n &= \{(-11, 18, 88, 138, 168, 178, 168, 138, 88, 18, -11) / 980\} [7]. \end{aligned}$$

На рис. 2 показана зависимость результата оцифровки сигнала от окна фильтра $2N + 1$.

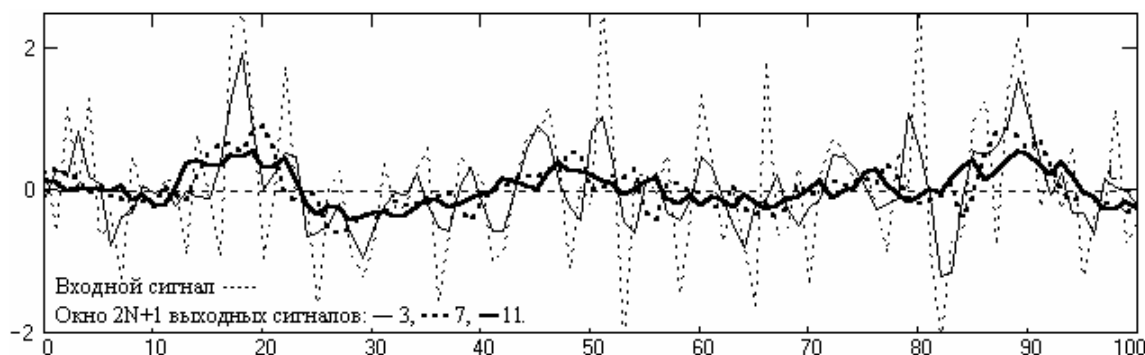


Рис. 2

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленная математическая модель реализована в виде программного обеспечения, что позволяет осуществлять фильтрацию и последующий анализ сигналов актуального спектра частот. Заметим, что фильтрация осуществляется при минимальных затратах времени и прочих ресурсов, что предоставляет широкий ряд возможностей для спектрального анализа сигнала при проведении научных исследований. Кроме того, возможна реализация рассмотренного математического аппарата в виде ПО микроконтроллера, что значительно расширяет область возможного применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализировав математический аппарат, принятый за основу методики синтеза цифрового фильтра, сформулируем следующие выводы:

- повышение порядка фильтра увеличивает степень касания частотной характеристикой уровня коэффициента передачи $H=1$ на частоте $\omega=0$ и расширяет полосу пропускания фильтра;
- увеличение количества членов фильтра приводит к сужению полосы пропускания и увеличивает крутизну ее среза;
- модификация фильтров уменьшает осцилляции передаточной функции в полосе подавления сигналов.

Совместное изменение этих параметров позволяет подбирать для сглаживания данных такой фильтр МНК, частотная характеристика которого наилучшим образом удовлетворяет частотному спектру сигналов при минимальном количестве коэффициентов фильтра.

Из этого следует, что по средствам цифровой фильтрации, организованной в виде утилитарного программного обеспечения, предоставляется возможность задавать различные параметры конечной фильтрации сигнала. И в частности, применительно к рассмотренной проблематике позволит наблюдать локальную геомагнитную обстановку Земли в различных частот-

ных спектрах, основываясь на измерительных сигналах магнитометрической аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **НГ-Наука.** [Электронный ресурс] (<http://science.ng.ru>)
2. **New scientist.** [Электронный ресурс] (<http://www.newscientist.com>).
3. **Physics world.** [Электронный ресурс] (<http://physicsweb.org>).
4. **Analog Devices.** [Электронный ресурс] (<http://www.analog.com.ru/>).
5. **Давыдов, А. В.** Цифровая обработка сигналов: курс темат. лекций / А. В. Давыдов. Екатеринбург, 2007. С. 1–7.
6. **Хемминг, Р. В.** Цифровые фильтры / Р. В. Хемминг. М. : Недра, 1987. 221.
7. **Гольденберг, Л. М.** Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / Л. М. Гольденберг [и др.]. М. : Радио и связь, 1990. 256 с.

ОБ АВТОРАХ



Миловзоров Георгий Владимирович, проф. Дипл. инж. по инф.-измерит. технике (УГАТУ, 1978). Д-р техн. наук по инф.-измерит. технике (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. инф.-измерит. и управляющих систем.



Воробьев Андрей Владимирович, аспирант. Дипл. магистра. (электронные системы управления УГАТУ, 2006) Иссл. в обл. инф.-измерит. и управляющих систем.