

## Оценка и коррекция фазовых искажений в системах магнитотеллурического зондирования

О.Р. Кузичкин

Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Орловская 23, тел. (49234) 77-121, E-mail: [electron@mivlgu.ru](mailto:electron@mivlgu.ru)

*Проведена оценка фазовых искажений, возникающих в измерительном тракте системы мониторинга импульсных геомагнитных источников. Определена методика коррекции фазовых искажений по идентифицированному волновому пакету геомагнитных пульсаций на пространственной распределенной сети станций наблюдения.*

*The estimation of the phase distortions arising in a measuring path of geomonitoring system is carried out. The technique of correction of phase distortions on the identified wave package of geomagnetic pulsations on the spatial distributed network of stations is determined.*

### Введение

Организация современных систем мониторинга геомагнитного поля Земли требует обеспечения надежной регистрации и обработки сигналов вариаций геомагнитного поля в широком частотном диапазоне измерения от 0,005 Гц до 5 Гц [1]. Различия в физической природе и условиях распространения геомагнитных пульсаций по поверхности Земли приводят к необходимости коррекции неравномерности спектральной плотности для сигналов естественного поля Земли при их селекции. Традиционно эта задача решается введением в измерительный тракт геомагнитного измерительного комплекса сопряженных многодиапазонных фильтров, что приводит к фазовым искажениям регистрируемых сигналов. Кроме того, дополнительно фазовые искажения вносятся самими геомагнитными датчиками и измерительным трактом магнетометра. Многие алгоритмы обработки, применяемые в системах геомониторинга, предполагают использование инвариантных фазовых соотношений, которые требуют контроля и коррекции фазовых искажений.

Цель работы - оценка и коррекция фазовых искажений, возникающих из-за необходимости использования в измерительном тракте системы геомониторинга сопряженных многодиапазонных фильтров, и разработка методики определения дисперсий фазовых скоростей волнового пакета с учетом искажений.

### Сопряженные многодиапазонные фильтры

При разработке многодиапазонных фильтров ультранизких частот для геомагнитного измерительного комплекса основной проблемой является построение требуемой постоянной времени. В данном диапазоне частот для реализации соответствующих постоянных времени требуются конденсаторы и резисторы больших номиналов, низкие точность и стабильность которых значительно осложняют надежное сопряжение частотных границ поддиапазонов. В работе [2] дается теоретическое обоснование подхода к решению вопроса о сопряжении границ многодиапазонных фильтров с учетом специфики инфранизкочастотного диапазона. Отмечается, что для фильтрации широкополосного сигнала по отдельным поддиапазнам наиболее целесообразно применять структуру параллельных “узкополосных” диапазонных фильтров с сопряженными границами. Точное сопряжения границ диапазонов можно обеспечить за счет одновременного формирования границы диапазонов фильтров высоких частот (ФВЧ) и фильтров низких частот (ФНЧ). При этом за базовое звено следует принять ФВЧ, так как он имеет емкостные развязки между звеньями и полную

отрицательную связь по постоянному току в каждом звене, что обеспечивает стабильность режима и выходных нулевых уровней. Кроме того, такое построение фильтра обеспечивает стабильность режима работы сумматоров и уменьшает дрейф на выходах фильтров.

На рис.1 приведена блок-схема реализации трехдиапазонного фильтра, имеющего в качестве основной базовой ячейки звено ФВЧ второго порядка и двухвходовый сумматор. В соответствии с задачами автоматизации геомагнитных исследований [3] первое звено ФВЧ должно формировать рост усиления на нижней границе диапазона (100÷10) с. Это же звено совместно с сумматором образует первый полосовой фильтр (ПФ1) диапазона (0÷100) с. Подобным же образом формируются границы второго полосового фильтра (ПФ2) диапазона (10÷100) с. Верхняя граница третьего полосового фильтра (ПФ3) формируется ФНЧ структуры Саллена-Ки с частотой среза 0,2с. Такая реализация фильтра позволяет обеспечить надежное сопряжение частотных границ трех поддиапазонов селекции геомагнитных пульсаций и дает возможность надежно выделить тип пульсаций в реальном масштабе времени.

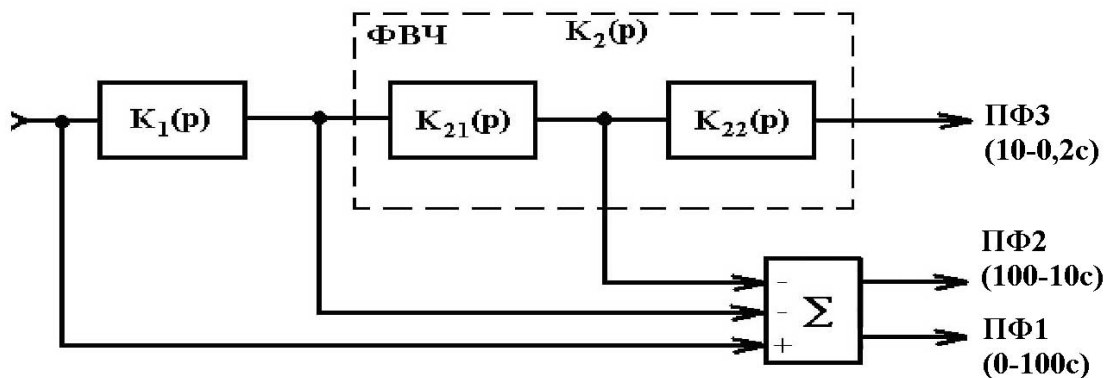


Рис. 1. Блок-схема трехдиапазонного активного фильтра

При необходимости формирования нижней границы диапазона средних частот фильтр можно дополнить включением базовой ячейки (или звеном ФВЧ) на входе фильтра. Эта же структура позволяет реализовать квадратичные фильтры с передаточной функцией вида

$$K(p) = \frac{1 + pa_1 + p^2 a_2}{1 + pb_1 + p^2}, \quad (1)$$

которая хорошо известна в измерительной геофизической аппаратуре. Для этого нужно соединить выход ФВЧ структуры Кундерта с неинвертирующим входом сумматора.

Передаточная функция фильтра структуры Кундерта имеет вид

$$K_1(p) = \frac{p^2 \tau_1 \tau_2}{1 + p\tau_1 + p^2 \tau_1 \tau_2}, \quad (2)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  - постоянные времени фильтра.

Коэффициент полинома, определяющий форму АЧХ, равен

$$b = \sqrt{\tau_1 / \tau_2}. \quad (3)$$

Нормированная частота среза по уровню 0,707 определяется из выражения

$$X_c^2 = \frac{(-d + \sqrt{d^2 + 4})}{2}, \quad (4)$$

где  $d = 2 - b^2$ .

Фильтр нижних частот, имеющий частоту среза, сопряженную с частотой среза фильтра структуры Кундерта, реализуется с помощью сумматора. Его передаточная функция

$$K_2(p) = \frac{k_0 Q(p) - k_1 p \tau_1 - k_1 p^2 \tau_1 \tau_2 - k_2 p^2 \tau_1 \tau_2}{Q(p)}, \quad (5)$$

где  $Q(p)$  - полином фильтра;  $k_0, k_1, k_2$  - весовые коэффициенты суммирования.

При  $k_0 = k_1 = 1, k_2 = 0$  сумматор реализует передаточную функцию ФВЧ

$$K_2(p) = \frac{1}{1 + p\tau_1 + p^2\tau_1\tau_2}, \quad (6)$$

частота среза которого равна частоте среза исходной структуры Кундерта.

При  $k_2 \neq 0$  сумматор реализует биквадратную характеристику. На рис.2 приведены теоретические фазочастотные зависимости трехдиапазонного фильтра с Баттервортовской аппроксимацией (ПФ1, ПФ2, ПФ3) и график фазовых искажений. Как видно из ФЧХ фильтра Баттерворта фазовый сдвиг достигает  $\varphi = -90^\circ$  на частоте среза и  $\varphi = 45^\circ$  на частоте

$$x = 0,5B \left( \sqrt{1 - \frac{4}{B^2} - 1} \right). \quad (7)$$

Суммарные фазовые искажения  $\Phi_c$  в полосе частот геомагнитных пульсаций определяются независимо во всех частотных диапазонах с учетом фазочастотной характеристики магнетометра  $\Phi_m$ . Как видно из рисунка во всей полосе частот при измерении вносятся фазовые искажения со скоростью изменения фазы по каждому частотному диапазону

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = \frac{B(1+x^2)}{1 - (2-B^2)x^2 + x^3}. \quad (8)$$

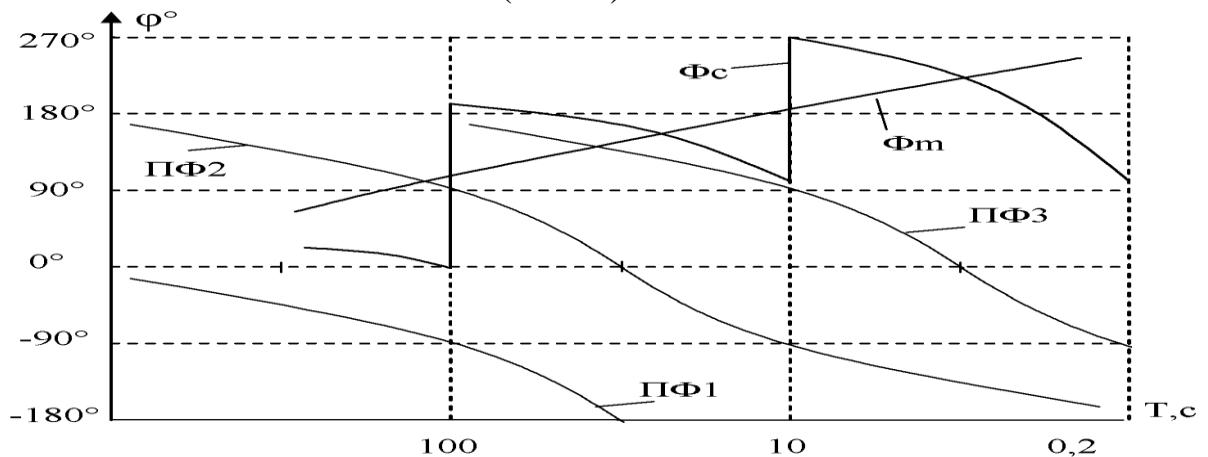


Рис.2. Структура фазовых искажений

Фазовые искажения приводят к некорректной оценке времени прихода геомагнитного цуга колебаний на станциях наблюдения и необходимости обязательной фазовой коррекции сигналов при обработке данных геомагнитных исследований.

#### **Оценка и коррекция фазовых искажений**

При обработке узкополосных цугов геомагнитных возмущений, таких как иррегулярные пульсации типа Рi-2 важным является определение момента появления сигнала на станции наблюдения. Это позволяет геометрически выстроить модель их пространственно-временного распространения по поверхности Земли. На этом основан алгоритм анализа экспериментальных данных, который использует принцип стационарной фазы [1]. Он предполагает, что максимум узкополосного волнового пакета достигается в момент, когда фазы его спектральных составляющих принимают стационарное значение. Это дает возможность оценить относительное запаздывание сигнала на распределенной сети станций по временному срезу данных, предварительно обработанных спектрально-временным анализом (СВАН). Время задержки может быть определено по следующему соотношению

$$t_{\phi} = -a(d\phi/dx), \quad (9)$$

где  $a$  – частотный коэффициент размерности.

Сложность использования уравнения (9) заключается в том, что нет возможности однозначно определить временной срез сигнала по данным СВАН. Обычно максимум сигнала по различным частотным дорожкам СВАН приходится на различные моменты времени. Поэтому необходимо анализировать все «тело» сигнала иррегулярного возмущения и соответственно проводить полную фазовую коррекцию всего волнового пакета. Предположим, что волновой пакет идентифицируется в интервале времени  $[t_1, t_2]$ . Для каждого момента времени можно определить частотный диапазон дорожек СВАН  $[\omega_{i1}, \omega_{i2}]$  в соответствии с порогом обнаружения иррегулярного возмущения. Используя уравнение (8) можно провести фазовую коррекцию статистической оценки времени запаздывания сигнала по всему волновому пакету

$$\bar{t}_{\phi} = \sum_{t_1}^{t_2} \sum_{\omega_{i1}}^{\omega_{i2}} \left( a \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{ij}}{\Delta x} - \frac{B(1+x_i^2)}{1-(2-B^2)x_i^2+x_i^3} \right) \delta_{ij}, \quad (10)$$

где  $\delta_{ij}$  - весовой коэффициент.

Аналогично, при статистической обработке волновых пакетов иррегулярных геомагнитных пульсаций, зарегистрированных на сети станций наблюдения, можно осуществлять коррекцию фазовых данных в соответствии с приведенными соотношениями (10). Если не проводить коррекцию, то это приведет к изначальному смещению фазовых данных по всему «телу» сигнала геомагнитного возмущения [4]. В этом случае при использовании регрессионного анализа невозможно осуществить привязку спектральных составляющих волнового пакета к уравнению связи и соответственно осуществить селекцию сигналов геомагнитных пульсаций, а также провести их структурный анализ.

#### **Оценка дисперсий фазовых скоростей геомагнитных пульсаций**

Всеми исследователями был зарегистрирован факт фазовых смещений по всем точкам синхронного измерения геомагнитного поля в диапазоне геомагнитных пульсаций. Вместе с тем отмечается, что для одного волнового пакета кажущиеся фазовые скорости зависят от периода, и имеется тенденция уменьшения скорости с увеличением периода составляющей пакета. Экспериментально выделенная и теоретически обоснованная дисперсия фазовых скоростей геомагнитных пульсаций позволила исследователям более качественно проводить статистическую обработку

экспериментальных данных. В частности, в работах [5,6] был предложен и в дальнейшем опробован метод оценки эпицентральных зон геомагнитных пульсаций типа  $Pi-2$  на основе регрессионного анализа волновых пакетов. Используемое в данных работах базовое уравнение связи отдельных гармонических составляющих (теоретическая зависимость фазовых скоростей  $v_\phi$  пульсаций  $Pi-2$  от периода  $T$ ) можно дополнить регрессионным соотношением (10) для оценки времени запаздывания сигнала по сети станций. Это позволит устранить неоднозначность оценки эпицентральных зон  $Pi-2$ , приводящую к неправильной трактовке данных магнитотеллурического зондирования.

В работе [7] было обосновано общее положение для связи отдельных спектральных составляющих волновых пакетов импульсных геомагнитных источников. Для геомагнитных пульсаций типа  $Pi-2$  для уравнения связи в алгоритме регрессионного анализа может быть использовано дисперсионное уравнение, связывающее фазовую и групповую скорости волнового пакета импульсного геомагнитного источника

$$\frac{dv_\phi}{v_\phi} = (1 - \alpha) \frac{d\omega}{\omega}, \quad (11)$$

где  $\alpha$  - коэффициент связи, при  $\alpha = 1$  фазовая скорость равна групповой.

На основании (10) и (11) регрессионное уравнение спектральных составляющих волнового пакета импульсных геофизических источников

$$\varphi_{ij} = \bar{\varphi}_i - \omega_i^\alpha \bar{x} \frac{Q}{P} + \omega_i^\alpha \frac{Q}{P} x_j, \quad (12)$$

где  $j = 1 \dots n$  - номер геофизической станции наблюдения;  $i = 1 \dots n$  - номер спектральной составляющей волнового пакета;  $\bar{x}$  - математическое ожидание расстояний от станций наблюдения до предполагаемого эпицентра;  $\bar{\varphi}_i$  - математическое ожидание скорректированных фазовых данных на станциях наблюдения по  $i$ -спектральной составляющей;  $Q, P$  - функции, определяющие статистическую связь данных с весовыми коэффициентами спектральных составляющих волнового пакета [5].

Минимизационное уравнение (12) имеет решение относительно дисперсионного коэффициента  $\alpha$ , который в соответствии с ним может быть выражен следующим образом

$$\alpha = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\ln \omega_i}{\ln \omega_i} \ln \left( \frac{Q(\varphi_{ij} - \bar{\varphi}_i)}{P(x_j - \bar{x})} \right), \quad (13)$$

где  $\overline{\ln \omega_i}$  - математическое ожидание логарифма значений частот спектральных составляющих волнового пакета.

Количественная оценка фазовых скоростей согласуется с данными других авторов. В целом фазовые скорости убывают с увеличением периода как внутри одного волнового пакета, так и при общем рассмотрении дисперсионной зависимости. Заметны различия в дисперсионной структуре разных волновых пакетов, выраженные в неодинаковых наклонах дисперсионных кривых.

### Литература

1. Четаев Д.Н. Дирекционный анализ магнитотеллурических наблюдений. - М.: Наука, 1985.

2. Пикалкин Ю.В., Кулигин М.Н., Струсь А.И. Фильтрация сигнала в диапазоне геомагнитных пульсаций. В сб. Автоматизация исследований геомагнитных пульсаций. - М.: ИФЗ АН СССР, 1985.
3. Кузичкин О.Р., Кулигин М.Н., Пикалкин Ю.В. Основные критерии проектирования автоматизированной системы сбора и обработки параметров полей геомагнитных пульсаций. В сб. Математические и технические средства обработки данных и знаний. – Ташкент: НПО Кибернетика, АН РУЗ, 1999.
4. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. - Л.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Кузичкин О.Р., Кулигин М.Н. Регрессионный анализ волновых пакетов геомагнитных пульсаций типа P<sub>i</sub>-2. В сб. Методы, устройства и программы обработки данных. - Ташкент: НПО "Кибернетика", АН РУЗ, 1997.
6. Hughes W.J. Pulsations research during the IMS. Rev. Geophys. a Space Phys., 1982, 20, №3.
7. Кузичкин О.Р., Калинкина Н.Е. Оценка дисперсий фазовых скоростей геомагнитных пульсаций по данным сети станций. – В сб. Методы и устройства передачи и обработки информации. Вып.4 – СПб.: Гидрометеиздат, 2004.
8. Троицкая В.А., Баранский Л.Н., Гохберг М.Б. Предварительные результаты советско-немецкого эксперимента по синхронной регистрации геомагнитных пульсаций по глобальной сети станций. - В сб. Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. - М.: ИФЗ АН СССР, 1976.