

УДК 550.380, 550.385

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПОМЕХ И ПРИМЕРЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

© 2013 г. А.Н. Зайцев, В.И. Одинцов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
г. Троицк, Московской обл., Россия*

Рассмотрен так называемый метод адаптивной компенсации помех – один из эффективных методов анализа геомагнитных данных с целью выделения заданных типов вариаций. Проанализированы свойства вычислительного алгоритма метода наименьших квадратов Уидроу–Хоффа в приложении к построению адаптивных компенсаторов помех и режекторных фильтров. Приводятся примеры применения адаптивных компенсаторов помех для разных аспектов обработки геомагнитных данных, среди которых подавление нежелательных составляющих при исследовании локальных эффектов геомагнитного поля, выделение гармонических составляющих из широкополосных сигналов, подавление отдельных периодических составляющих, исследование стационарности помехи и т.п.

Показано, что спектрально-временной анализ данных с использованием режекторных фильтров обладает высоким разрешением во временной области, которое не может быть достигнуто классическими методами спектрального анализа.

Ключевые слова: геомагнитное поле, адаптивный компенсатор помех, подавление помех, выделение заданных типов вариаций.

Введение

При обработке больших массивов геомагнитных вариационных данных часто встает задача выявления характеристик вариаций, связанных с разными источниками их генерации. Набор методов обработки, используемых для решения этой задачи, весьма разнообразен – это могут быть методы спектрального и спектрально-временного анализа, преобразования Фурье, вейвлет-преобразования и т.п. Значительная роль при этом отводится фильтрам разных типов. Фильтры, используемые для отделения сигнала от различных помех, могут либо иметь постоянные параметры, либо быть адаптивными. Первые действуют по принципу разомкнутого контура – обработка сигнала на текущем интервале проводится вне зависимости от результата обработки на предшествующем. Иначе говоря, в основе обработки фильтрами с постоянными параметрами лежит допущение стационарности и инвариантности свойств сигнала во времени. Расчет фильтров с постоянными параметрами основан на априорном знании характеристик как сигнала, так и помехи.

Параметры адаптивных фильтров [Адаптивные ..., 1988], напротив, могут автоматически перестраиваться, адаптироваться к определенным условиям, благодаря чему для их построения достаточно лишь минимальной априорной информации о характеристиках сигнала и помехи. В основу адаптивных фильтров (адаптивных компенсаторов помех) положен принцип обратной связи, для реализации которого используется схема с двумя входами – основным и опорным. На основной вход поступает смесь сигнала и помехи, на опорный подается лишь компенсируемая помеха. При этом предполагается, что сигнал не коррелирован с помехами, которые на обоих входах неизвестным образом коррелированы между собой. Действующая на опорном входе помеха пропускается через программируемый фильтр. Импульсная передаточная функция фильтра непрерывно под-

страивается за счет обратной связи так, чтобы разность (ошибка) между сигналом на основном входе и помехой на выходе адаптивного фильтра была минимальной.

Основная задача адаптивных компенсаторов помех состоит в том, чтобы пропустить без искажения заданные составляющие сигнала и, по возможности, ослабить нежелательные помехи. Эта задача решается путем оценивания статистических параметров входного сигнала и управления характеристиками фильтра по критерию минимума среднеквадратической ошибки. При этом достигается такая степень подавления помех, которую трудно или даже невозможно получить при прямой фильтрации.

Вычислительный алгоритм адаптивного компенсатора помех

Структурная схема адаптивного компенсатора помех с двумя входами (основным и опорным) и двумя выходами, один из которых – выход программируемого фильтра, а второй – выход компенсатора помех (выход ошибки), представлена на рис. 1.

На основной вход компенсатора подается смесь полезного сигнала $s(n)$ и не коррелированной с ним помехи $x_0(n)$ – $s(n) + x_0(n)$. На опорный вход подается только помеха $x_1(n)$, также не коррелированная с сигналом $s(n)$. Помехи $x_0(n)$ и $x_1(n)$ полагаются коррелированными, однако априори функция корреляции неизвестна. Являющаяся опорным сигналом компенсатора помеха $x_1(n)$, проходя через программируемый фильтр, образует на его выходе некоторый сигнал $\hat{x}(n)$, который вычитается из сигнала на основном входе компенсатора. При этом образуется сигнал ошибки $e(n)$, служащий управляющим параметром для настройки фильтра.

Конечная цель при компенсации помех – формирование на выходе компенсатора помех сигнала $e(n) = s(n) + x_0(n) - \hat{x}(n)$, который по критерию минимума среднеквадратической ошибки наилучшим образом соответствует входному сигналу $s(n)$. Фактически это означает, что полезный сигнал на выходе компенсатора помех в значительной мере очищен от некоррелированной помехи. Импульсная передаточная функция фильтра подстраивается автоматически в итерационном процессе в зависимости от величины ошибки $e(n)$ при стремлении свести ее к минимуму. Алгоритм такой подстройки учитывает напряжение на входе программируемого фильтра в числе прочих факторов, определяющих величину сигнала ошибки.

При соответствующем выборе алгоритма адаптивный фильтр может обеспечить компенсацию помех при изменяющихся во времени характеристиках сигнала и помехи,

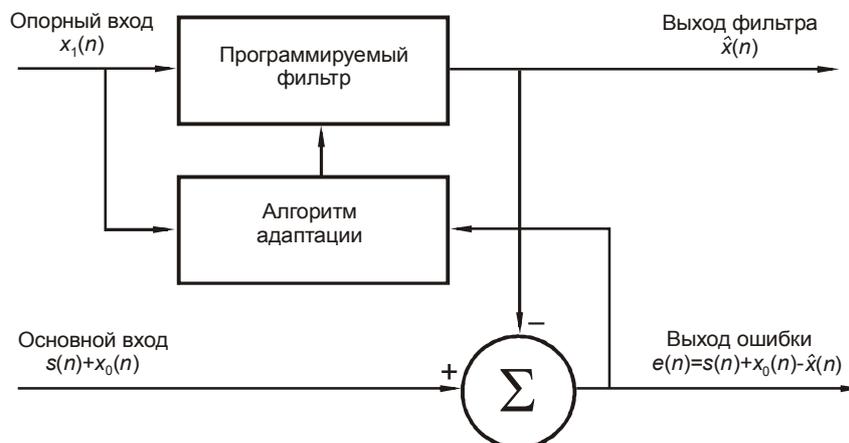


Рис. 1. Структурная схема адаптивного компенсатора помех

возникающей за счет непрерывной подстройки своих параметров по критерию минимума сигнала ошибки на выходе компенсатора.

В настоящее время самым известным является адаптивный алгоритм, аналогичный формуле метода наискорейшего спуска, описанный в работе [Уидроу и др., 1975] и получивший название алгоритма метода наименьших квадратов Уидроу–Хоффа. Он может быть представлен в виде следующего выражения:

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu\varepsilon_k X_k, \quad (1)$$

где μ – параметр, определяющий скорость и устойчивость процесса сходимости алгоритма адаптации коэффициентов фильтра; ε_k – сигнал ошибки; X_k – вектор отсчетов входного сигнала фильтра; W_k и W_{k+1} – векторы весовых коэффициентов адаптивного фильтра на текущем и следующем шаге адаптации.

Поскольку изменение весовых коэффициентов на каждой итерации осуществляется по неточным оценкам градиента, следует ожидать, что в адаптивном процессе возникнет шум, и адаптация может проходить по траектории, не вполне соответствующей наискорейшему спуску. Скорость и сходимость процесса адаптации в значительной мере определяются параметром μ , при выборе слишком большого значения которого итерационный процесс может стать расходящимся. Предельные оценочные выражения для μ получены в работе [Уидроу, Стирнз, 1989]. Для практического применения можно ограничиться выражением вида:

$$0 < \mu < \frac{1}{(L+1)P_s}, \quad (2)$$

где L – длина фильтра (число коэффициентов фильтра); P_s – мощность сигнала. Как показывает практика, наилучшим выбором для параметра сходимости является его значение, равное половине от максимальной величины (2).

Из выражения (1) следует, что метод наименьших квадратов можно реализовать в реальных условиях, не производя операций возведения в квадрат, усреднения и вычисления производных, благодаря чему этот метод прост и эффективен. Примеры его реализации в алгоритмах и программах интерактивной обработки данных геофизических наблюдений в вычислительной среде *MATLAB* приводятся в работе [Одинцов, Конрадов, Кукса, 2004]. Примеры применения адаптивных компенсаторов помех при обработке геофизических данных можно найти в работе [Hattingh, 1989].

Использование адаптивного компенсатора помех в качестве режекторного фильтра

Рассмотрим алгоритм метода наименьших квадратов Уидроу–Хоффа для случая, когда входной сигнал представляет собой сумму самого сигнала и некоторой аддитивной гармонической составляющей, которую будем рассматривать как помеху. Обычно для подавления такой помехи используется режекторный фильтр, однако при определенных условиях его роль может исполнять адаптивное устройство подавления помех. Преимущества такого фильтра заключаются в том, что он позволяет регулировать полосу частот и осуществлять адаптивное слежение за точным значением частоты и фазы помехи.

Рассмотрим схему адаптивного компенсатора помех, используемого в качестве режекторного фильтра для подавления одночастотной помехи. Допустим, что на основной вход поступает сигнал S_i любого вида – случайный, детерминированный, периодический, импульсный и т.п. – или же некоторая комбинация этих сигналов.

В качестве опорного используется моногармонический синусоидальный сигнал $C \cos(\varpi_0 t + \varphi)$ с частотой ϖ_0 . Этот сигнал поступает на входы программируемых фильтров в виде двух квадратурных составляющих x_{1i} и x_{2i} , отсчеты которых формируются в процессе вычислений в каждой i -й точке анализируемого временного ряда в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} x_{1i} &= C \cos(\varpi_0 \Delta t i + \varphi), \\ x_{2i} &= C \sin(\varpi_0 \Delta t i + \varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

где C – амплитуда колебания; Δt – шаг дискретизации. Из этих значений и весовых коэффициентов адаптивных фильтров W_{1i} и W_{2i} формируется сигнал на выходе фильтра – $\hat{x}(n) = x_{1i}W_{1i} + x_{2i}W_{2i}$. В рассматриваемом случае достаточно всего двух весовых коэффициентов W_{1i} и W_{2i} , т.е. длина фильтра $L=1$. Разность ε_i между исходным сигналом S_i и сигналом на выходе фильтра $\hat{x}_i(n)$, равная $\varepsilon_i = S_i - \hat{x}_i(n)$, используется в качестве параметра, управляющего обновлением весовых коэффициентов фильтра на каждом шаге вычислений в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} W_{1i+1} &= W_{1i} + 2\mu\varepsilon_i x_{1i}, \\ W_{2i+1} &= W_{2i} + 2\mu\varepsilon_i x_{2i}, \end{aligned} \quad (4)$$

Добротность такого режекторного фильтра определяется выражением:

$$Q = \frac{v_0 \Delta t}{2\mu C^2}. \quad (5)$$

Сигнал на выходе фильтра $\hat{x}(n)$ является выделенной из исходного сигнала S_i гармонической составляющей на частоте ϖ_0 , которую можно использовать для последующего анализа. По формуле

$$A_i = C \sqrt{W_{2i}^2 + W_{1i}^2} \quad (6)$$

можно также найти огибающую выделяемой гармонической составляющей $\hat{x}(n)$ и использовать ее для графического отображения динамики выделяемой гармоники во временной области или для спектрально-временного анализа исходного сигнала S_i .

Необходимо отметить, что результат работы адаптивного фильтра не зависит от фазы опорных сигналов. Амплитуда опорных сигналов влияет только на добротность режекторного фильтра в соответствии с выражением (5) и должна учитываться при выборе его технологических (вычислительных) параметров.

Применение адаптивного компенсатора помех для выделения коррелированных сигналов

При обработке геомагнитных данных часто возникает необходимость разделения вариаций, связанных с разными источниками их генерации, например, требуется отделить вариации, связанные с глобальными источниками, от тех, что имеют локальный характер. Такое разделение можно осуществить, применяя адаптивный компенсатор помех, подав на его основной вход смесь сигнала и помехи, не коррелированной с сигналом, а на опорный вход – только помеху, коррелированную неизвестным образом с помехой на основном входе. В данном случае мы рассматриваем связанные с глобальными источниками вариации как коррелированную помеху и основную цель видим в выделении некоррелированных локальных эффектов вариаций, наложенных на глобальные.

В качестве примера можно привести выделение локальных флуктуаций магнитного поля, порождаемых токами авроральной зоны и характеризующихся индексом авроральной электроструи (AE), на фоне глобальных геомагнитных эффектов, связанных с симметричным кольцевым током в магнитосфере (DR).

Были обработаны магнитограммы вариаций H -компоненты геомагнитного поля за 19.06.1997 г., полученные в обсерваториях “Москва” и “Мыс Каменный” (рис. 2).

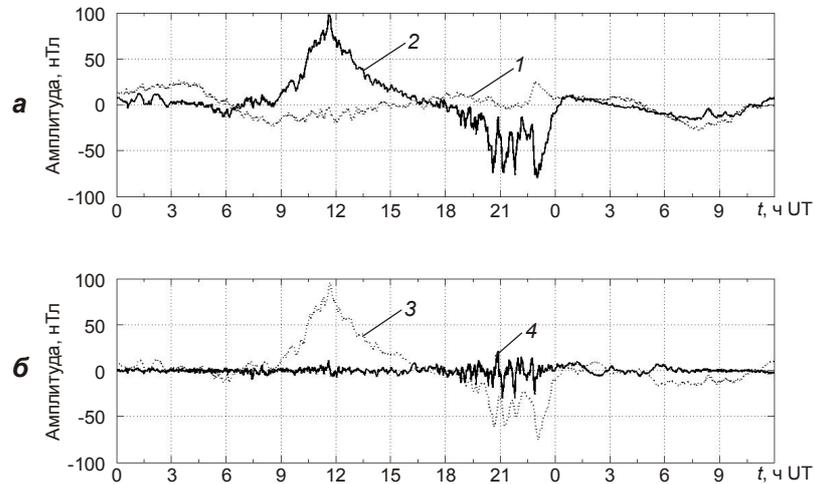


Рис. 2. Результаты обработки H -компоненты геомагнитного поля адаптивным компенсатором помех: a – магнитограммы вариаций геомагнитного поля 19.06.1997 г. в обсерваториях “Москва” и “Мыс Каменный”; b – сигнал на выходе программируемого фильтра и сигнал ошибки – разность между основным входом и выходом программируемого фильтра

1 – опорный сигнал, обсерватория “Москва”; 2 – основной сигнал, “Мыс Каменный”; 3 – коррелируемый сигнал; 4 – некоррелируемый сигнал ошибки

За опорный сигнал компенсатора помех принималась H -компонента геомагнитного поля, зафиксированная обсерваторией “Москва” (рис. 2, a , линия 1). Она рассматривалась как коррелированная помеха по отношению к основному сигналу – H -компоненте геомагнитного поля по данным обсерватории “Мыс Каменный” (рис. 2, a , линия 2). Выбор числа коэффициентов импульсной передаточной функции программируемого фильтра – задача технологическая. В зависимости от вида сигналов и решаемой задачи число этих коэффициентов может меняться в широких пределах – от единиц до десятков и сотен. В рассматриваемом случае для примера использовано 180 коэффициентов с нулевыми начальными значениями. Коэффициенты фильтра непрерывно подстраиваются в соответствии с выражением (1) за счет обратной связи таким образом, чтобы ошибка – разность между сигналом на основном входе и помехой на выходе программируемого фильтра – была минимальной.

Как видно на рис. 2, b , в интервале времени 00:00–18:00 UT 19.06.1997 г. вариации геомагнитного поля по данным обеих обсерваторий хорошо коррелированы между собой, несмотря на кажущуюся несхожесть магнитограмм на этом интервале. О высокой корреляции говорит форма сигнала на выходе программируемого фильтра, практически совпадающая с формой вариаций H -компоненты в обсерватории “Мыс Каменный”. Это подтверждается близким к нулю сигналом ошибки, который представляет собой разность между вариациями магнитного поля в обсерватории “Мыс Каменный” на основном входе и прошедшими через программируемый фильтр вариациями магнитного поля в обсерватории “Москва” (некоррелированная часть вариаций).

Некоррелированная часть вариаций отражает локальные эффекты геомагнитного поля, регистрируемые только в обсерватории “Мыс Каменный”. Магнитограммы снова

становятся хорошо коррелированными 20.06.1977 г. на интервале 00:00–12:00 UT, за исключением небольших отклонений 01:30–03:00 и 05:30–06:30 UT. Таким образом, в результате обработки магнитограмм адаптивным компенсатором помех удастся разделить вариации магнитного поля в обсерватории “Мыс Каменный” на две части, одна из которых коррелируется с вариациями в обсерватории “Москва” (линия 3 на рис. 2, б), другая не коррелируется с ними (линия 4 там же).

Ранее [Зайцев, Одинцов, 2003] было отмечено, что на магнитограммах среднеширотных обсерваторий прослеживается зависимость степени корреляции между вертикальной и горизонтальными компонентами геомагнитного поля от знака секторной структуры межпланетного магнитного поля (СС ММП). Это наблюдение было положено в основу методики применения адаптивного компенсатора помех для определения знака СС ММП [Одинцов, Конрадов, 2005], общий смысл которой сводится к следующему. По двум горизонтальным компонентам H_x и H_y , принимаемым за опорные, производится разделение вертикальной компоненты геомагнитного поля H_z на две части – коррелируемую с горизонтальными компонентами и не коррелируемую с ними. Определяется среднеквадратическое отклонение отношения некоррелированной части H_z к ее полному значению. Моменты резкого изменения величины среднеквадратического отклонения в ряде случаев совпадают с изменениями знака СС ММП.

Применение адаптивного компенсатора помех для анализа стационарности связей в вариациях магнитного поля разных обсерваторий

В рассмотренном примере обработки H -компоненты геомагнитного поля адаптивным компенсатором помех использован достаточно длинный программируемый фильтр, состоящий из 180 коэффициентов. Вид импульсной передаточной функции фильтра в произвольный момент времени показан на рис. 3, а. Можно видеть, что значения коэффициентов фильтра достаточно сильно меняются в зависимости от их порядкового номера, но нас больше интересуют изменения значений коэффициентов адаптивного фильтра в зависимости от времени.

На рис. 3, б для рассматриваемого случая показаны временные вариации коэффициентов фильтра, которые отражают изменения корреляционных связей между сигналами во времени, характеризуя стационарность этих связей. Иными словами, если статистические свойства сигналов не меняются, то значения коэффициентов фильтра сходятся к неким средним значениям и колеблются в некоторых пределах около них; противоположная ситуация – когда нарушается стационарность связей между сигналами.

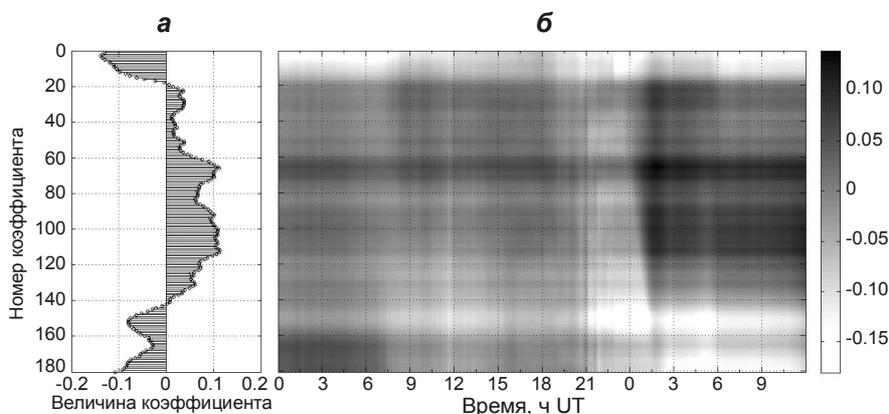


Рис. 3. Значения коэффициентов адаптивного фильтра в зависимости от их порядкового номера (а) и временные вариации коэффициентов фильтра (б) при сравнении H -компонент магнитного поля в обсерваториях “Москва” и “Мыс Каменный” 19.06.1997 г.

В этом случае происходит резкое изменение значений коэффициентов, иногда со сменной знака. Так произошло, например, около 21:00 UT 19.06.1997 г. и 01:30 UT следующего дня. Способность фильтра отслеживать моменты нарушения стационарности связей между сигналами в сопряженных точках позволяет использовать значения коэффициентов фильтра как дополнительный параметр для мониторинга состояния геомагнитного поля.

Примером возможного применения аппарата передаточных функций в геофизике является обработка данных наблюдений вариаций естественных электромагнитных полей, порождаемых вариациями токов в ионосфере Земли [Светов, Кукса, Одинцов, 2009]. В силу удаленности этих токов от точек наблюдения поля на поверхности Земли, в первом приближении их можно представить токами на плоскости, которые случайным образом изменяют свою интенсивность и направление, и рассматривать как коррелированную помеху. Влияние этих токов в основном проявляется в двух горизонтальных компонентах геомагнитного поля – H_x и H_y , на которые электрическое строение Земли оказывает наименьшее воздействие. Остальные компоненты электромагнитного поля несут информацию о геоэлектрическом разрезе (E_x - и E_y -компоненты электрического поля) или его горизонтальной неоднородности (вертикальная компонента магнитного поля H_z).

Применение адаптивного компенсатора помех для анализа геомагнитных пульсаций

Способность адаптивного компенсатора помех действовать как узкополосный режекторный фильтр при подаче на его вход моногармонического сигнала может быть использована при анализе геомагнитных пульсаций, например, для оценки периода их колебаний. Применение адаптивного компенсатора помех для решения этой задачи иллюстрирует рис. 4; анализируются пульсации, зафиксированные обсерваторией “Мыс Каменный” в интервале 18:00 UT 19.06.1997 г. – 00:00 UT 20.06.1997 г.

В качестве основного сигнала использовались вариации H -компоненты магнитного поля, магнитограмма которых приведена на рис. 4, а (линия 2); в качестве опорного – синусоида с периодом 36 мин (линия 1). На рис. 4, б представлены сигнал на выходе программируемого фильтра (линия 4) и сигнал ошибки – разность между

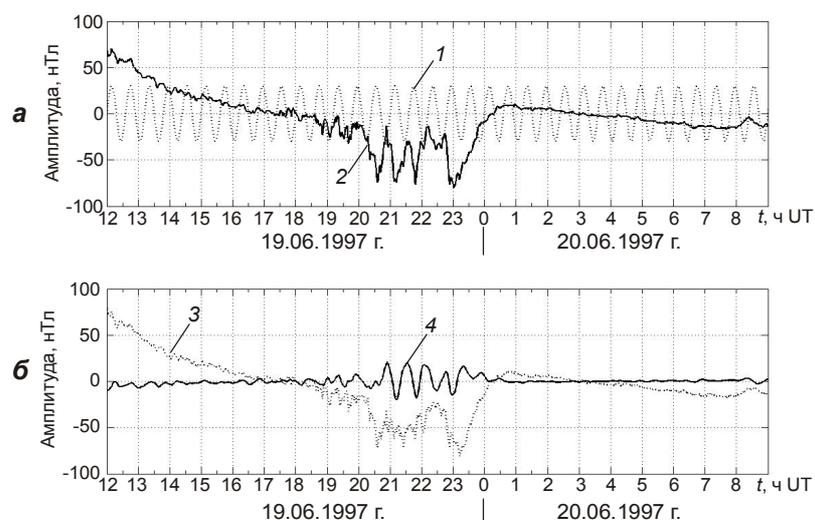


Рис. 4. Применение адаптивного компенсатора помех для анализа пульсаций магнитного поля в интервале 18:00 UT 19.06.1997 г. – 00:00 UT 20.06.1997 г. по данным обсерватории “Мыс Каменный” (пояснения см. в тексте)

основным входом и выходом программируемого фильтра (линия 3). Сигнал на выходе программируемого фильтра представляет собой гармоническую составляющую с периодом 36 мин, присутствующую в вариациях H -компоненты. Легко заметить, что в разностном сигнале эта гармоника практически полностью “вырезана”. Меняя период опорного сигнала в некоторых пределах (например, 32–40 мин) с малым шагом (например, 10 с) и оценивая амплитуду выделяемой гармоники, можно по ее максимуму достаточно точно определить период колебаний, преобладающий в анализируемом процессе.

Применение режекторных фильтров для анализа временных изменений спектра геомагнитных вариаций

Определенный интерес представляет анализ временных изменений спектра геомагнитных вариаций. Учитывая специфику обработки геомагнитных данных, а именно, интерес к долговременным изменениям процессов в низкочастотной части спектра в диапазоне периодов от единиц минут до многих часов, пришлось отказаться от традиционных методов спектрального анализа и перейти к выделению гармонических составляющих с помощью гребенки узкополосных адаптивных режекторных фильтров. Преимущества такого метода по сравнению с традиционными методами спектрально-временного анализа заключаются в простоте перестройки полосы пропускания, практически неограниченном подавлении соседних гармоник и в точном слежении за периодом выделяемой гармоники. Результаты обработки магнитограмм H -компоненты магнитного поля в обсерваториях “Москва” и “Мыс Каменный” предложенным методом на основе одномоментных данных представлены на рис. 5, где в логарифмическом масштабе приведены динамические спектры вариаций H -компоненты в полосе периодов гармонических составляющих 4–128 мин.

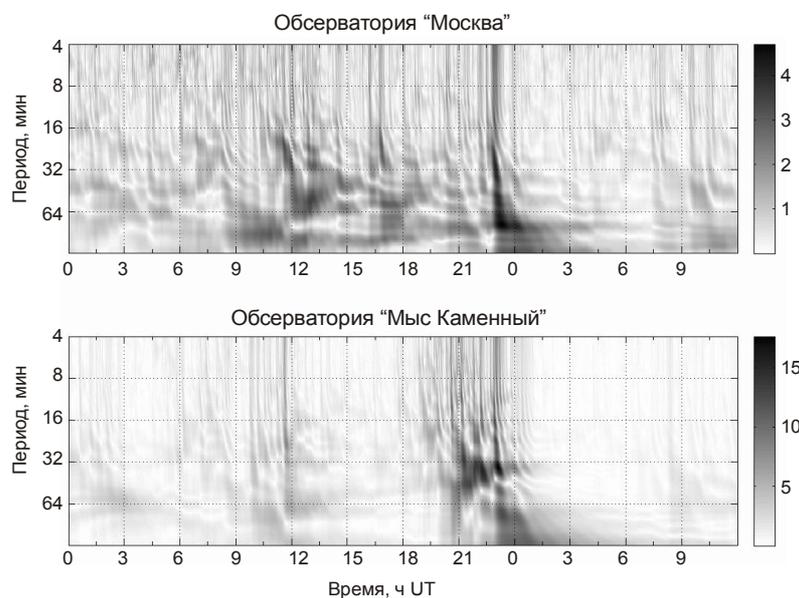


Рис. 5. Пример спектрально-временного анализа вариаций H -компоненты геомагнитного поля 19.06.1997 г. на основе одномоментных данных обсерваторий “Москва” и “Мыс Каменный”

Амплитудные характеристики выделяемых гармонических составляющих геомагнитных вариаций представлены серым цветом различной интенсивности, а их масштабы показаны на шкалах справа. Из приведенного выше примера (см. рис. 4) следует, что для выделения гармонических составляющих сигнала узкополосным адаптивным

режекторным фильтром не требуется предварительной подготовки сигнала в виде удаления трендов и длиннопериодных составляющих.

Адаптивный компенсатор помех хорошо справляется с широкополосными сигналами, в которых присутствуют длиннопериодные составляющие. Следует отметить, что шаг изменения и периоды гармонических составляющих, на которые настраиваются режекторные фильтры, могут иметь любое произвольное значение. Это их свойство позволило использовать предложенный нами метод для исследования пространственно-временной динамики аномального магнитного поля Земли при анализе крупных региональных магнитных аномалий [Одинцов и др., 2000].

Важная особенность метода спектрально-временного анализа с помощью режекторных фильтров – возможность расчета спектра сразу после получения очередного отсчета наблюдаемого процесса. Это делает представляемый метод незаменимым инструментом для проведения спектрально-временного анализа геомагнитных вариаций в реальном масштабе времени.

Заключение

Отработаны алгоритмы и созданы пакеты программ, пригодные для практического применения адаптивного компенсатора помех при анализе геомагнитных вариаций в целях решения следующих задач:

1. Вырезание коррелируемых частей двух независимых процессов, позволяющее выделить полезный сигнал на фоне превышающего его шума.

2. Получение информации о функциях связи между исследуемыми сигналами в виде импульсных передаточных характеристик как с задержкой, так и в реальном масштабе времени.

3. Мониторинг состояния электромагнитных полей Земли и их долговременных изменений на основе анализа временной динамики импульсных передаточных характеристик между компонентами поля.

4. Подавление мешающих гармонических составляющих сигнала с целью очистки полезного сигнала от влияния помех гармонического характера.

5. Выделение ответных реакций на искусственные воздействия известного вида на фоне естественных электромагнитных полей, значительно превышающих их по мощности.

6. Получение характеристик геомагнитных вариаций на основе спектрально-временного анализа рядов измерений с высоким разрешением во временной области, которое не может быть получено классическими методами спектрального анализа.

Возможности адаптивного компенсатора помех позволяют решать широкий круг задач геофизики, в частности, осуществлять разделение двух независимых процессов на коррелируемую и некоррелируемую части, подавление нежелательных глобальных составляющих при исследовании локальных эффектов, выделение гармонических составляющих из широкополосных сигналов, подавление нежелательных периодических составляющих, исследование стационарности помехи и т.п.

По своей эффективности адаптивный компенсатор помех сопоставим с вейвлет-анализом данных, от которого он отличается возможностью масштабирования результатов обработки непосредственно в единицах измерения изучаемых процессов.

Литература

Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф.Н. Коуена, П.М. Гранта. М.: Мир, 1988. 392 с.
Зайцев А.Н., Одинцов В.И. Наблюдение эффектов секторной структуры ММП в околоземном пространстве по геомагнитным данным // Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности: Сб. докладов конференции. Н. Новгород: НИРФИ, 2003. С.460–464.

- Одинцов В.И., Конрадов А.А. Роль секторной структуры ММП в геомагнитных, физико-химических и биофизических процессах // Геофизические процессы и биосфера. 2005. Т. 4, № 1/2. С.5–17.
- Одинцов В.И., Конрадов А.А., Кукса Ю.И. Применение MATLAB Web Server в геофизике для интерактивной адаптивной обработки данных, распределенных в сети Интернет // Труды Второй Всероссийской научной конференции “Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB”. М.: ИПУ РАН, 2004. С.1917–1930.
- Одинцов В.И., Ротанова Н.М., Цветков Ю.П., Ан Ченчанг. Спектральный анализ аномального магнитного поля Земли для разновысотных съемок // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40, № 2. С.59–66.
- Светов Б.С., Кукса Ю.И., Одинцов В.И. Алгоритм и результаты обработки данных магнитотеллурического мониторинга на Бишкекском прогностическом полигоне // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 3. С.5–15.
- Уидроу Б., Гловер Д., Маккул Д. мл., Кауниц Д., Уильямс С., Хирн Р., Зайдлер Д., Донг Е. мл., Гудлин Р. Адаптивные компенсаторы помех. Принцип построения и применения // ТИИЭР. 1975. Т. 63, № 12. С.69–98.
- Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
- Hattingh M. The use of data-adaptive filtering for noise removal on magnetotelluric data // Phys. Earth Planet. Inter. 1989. V. 53. P.239–254.

Сведения об авторах

ЗАЙЦЕВ Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, заведующий сектором, Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. А.Н. Пушкова РАН. 142190, Москва, г. Троицк, Калужское ш., д. 4. Тел.: +7 (495) 851-02-93. E-mail: zaitsev@izmiran.ru

ОДИНЦОВ Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. А.Н. Пушкова РАН. 142190, Москва, г. Троицк, Калужское ш., д. 4. Тел.: +7 (495) 851-60-44. E-mail: vodin@izmiran.ru

ALGORITHMS AND EXAMPLES OF APPLICATION OF ADAPTIVE NOISE CANCELLERS FOR THE PROCESSING OF GEOMAGNETIC DATA

A.N. Zaitsev, V.I. Odintsov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN),
Troitsk, Moscow Region, Russia*

Abstract. It is shown that one of the effective methods of analysis of a geomagnetic data for the purpose of allocation of the variations pattern is the so-called method of adaptive noise cancelling. Properties of computing algorithm of the least squares Widrow–Hoff method in application to adaptive noise cancellers and rejection filters making are analyzed. Examples of application of adaptive noise cancellers in various aspects of processing the geomagnetic data are demonstrated. It is possible to refer to them such applications as suppression of undesirable components, including periodic, at research of local effects of a geomagnetic field, investigation of noise permanence, allocation of a harmonic components of broadband signals, etc. It is noticed that the spectral-temporal analysis of the data with the help of rejection filters, possesses such high permission in time area which can't be received classical methods of the spectral analysis.

Keywords: geomagnetic field, adaptive noise canceller, suppression of noise, allocation of the variations pattern.