

ПРИМЕНЕНИЕ MATLAB WEB SERVER В ГЕОФИЗИКЕ ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Одинцов В. И.,

*Институт Земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн РАН, Троицк, Московская обл.,
e-mail: vodin@izmiran.ru*

Конрадов А. А.,

*Институт биохимической физики им. Н. М. Эммануэля РАН, Москва,
e-mail: ak@sky.chph.ras.ru*

Кукса Ю. И.

*Институт геоэлектромагнитных исследований РАН, Троицк, Московская обл.,
e-mail: Kuksa@geo.igemi.troitsk.ru*

Абстракт

Рассмотрены вопросы внедрения методов адаптивной фильтрации на основе технологии MATLAB Web Server в области геофизики, Солнечно-Земной физики и смежных областях знаний для решения широкого круга задач, в том числе прикладных, возникающих при мониторинге состояния околоземного космического пространства, оценке его влияния на технологические системы, биологические объекты и здоровье людей, анализе процессов в земной коре и верхней мантии. Предложена схема организации вычислительного ресурса для специалистов, направленного на обработку больших объемов экспериментальных данных. В его основу положены функционирующие в системе MATLAB прикладные программы адаптивной обработки данных, связь с которыми обеспечивается через Интернет посредством MATLAB Web Server. Для доступа пользователей к вычислительным ресурсам и распределенным в сети Интернет базам данных используются Web-технологии на основе стандартных HTML-форм и документов. Приводятся примеры использования Web-сервиса для исследования геодинамических процессов в Земной коре и верхней мантии на основе вычисления передаточных функций между компонентами магнитотеллурического поля с высоким временным разрешением с целью изучения их временной динамики. Разработаны программы для изучения спектрально-временных и спектрально-пространственных характеристик крупных региональных магнитных аномалий по большому объему данных приземных съемок и спутниковых измерений магнитного поля Земли [1]. Имеются пакеты программ для анализа взаимосвязи между динамикой секторной структуры межпланетного магнитного поля и вариациями магнитного поля

Земли, как в высоких, так и в низких широтах [2]. Общедоступность средства интерактивного анализа данных, организация свободного доступа к ресурсам, исполнение запросов в автоматическом режиме, постоянное пополнение информационной и вычислительной баз гарантируют его развитие и профессиональную востребованность.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 03-07-90066.

Введение

Развитие исследований по солнечно-земной физике в значительной степени базируется на знаниях о магнитосфере Земли и ее поведении в периоды магнитных бурь. При этом весь земной шар рассматривается как единая лабораторная установка с системой датчиков в виде отдельных обсерваторий, на основании наблюдений которых мы судим о процессах в околоземном космическом пространстве. В наше время осуществляется широкая международная программа CAWSES «Climate and Weather of the Sun-Earth System» (по-русски «Климат и погода в системе Солнце-Земля»), рассчитанная на 2004-2008 гг. и призванная объединить все исследования по солнечно-земной физике в единый блок на основе опыта предыдущих международных программ. С другой стороны все ведущие космические агентства приняли программу ILWS «International Living With a Star», направленную на координацию спутниковых научных проектов. Целиком программа будет развернута ко времени развития следующего максимума солнечной активности в 2010-2013 гг. В свете подготовки к празднованию 50-летия Международного геофизического года (1957-1958), который фактически положил начало космической эре, учеными разных стран предложено несколько инициативных научных проектов, в том числе «Международный гелиофизический год», см. www.ihy.gsfc.nasa.gov и «Международный полярный год», см. www.ipy.gsfc.nasa.gov. К этому же времени ожидается запуск сразу 5 микроспутников по проекту THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms, сайт <http://sprg.ssl.berkeley.edu/themis/>), целью которого является исследование суббуревых нестабильностей, формирующихся при прохождении частиц солнечного ветра через магнитопаузу и приводящих к возникновению суббурь. Во всех этих проектах учтены требования наземной поддержки исследований, в первую очередь в виде мониторинга состояния магнитного поля Земли и ионосферы. В международном масштабе основой системы мониторинга состояния магнитного поля Земли служит система «Интермагнит» www.intermagnet.ru объединяющая данные более 90 магнитных обсерваторий со всего мира. В недавнем прошлом собрана база данных геомагнитных обсерваторий РОССИИ за 1984–2000 гг. на CD-ROM и издана с пояснительной брошюрой [3]. CD-ROM размещен на сайте <http://magbase.rssi.ru/index.htm>. Пополнение базы данных основано на

взаимодействии всех институтов, ведущих наблюдения на геомагнитных обсерваториях России. Создается программное обеспечение для работы с базами данных. В рамках гранта РФФИ № 03-07-90066 в ИЗМИРАН ведется отработка технологии интерактивного доступа пользователей к вычислительным ресурсам и распределенным в сети Интернет базам экспериментальных данных на основе средства MATLAB Web Server, использующего возможности Интернет для передачи данных в систему MATLAB для вычислений и отображения результатов в Web-браузерах пользователей с использованием стандартных HTML-форм.

Некоторые аспекты анализа данных в геофизике

Нередко изучаемые в геофизике процессы, происходящие в природных или природно-технических системах, недоступны для непосредственного наблюдения. В таких ситуациях исследователи вынуждены прибегать к наблюдению других, доступных процессов, порождаемых изучаемыми. Наблюдаемые и изучаемые процессы могут быть связаны достаточно сложным образом, на них могут оказывать влияние иные процессы, происходящие в других системах, они могут быть искажены шумами и т. п. Стремление полнее понять изучаемые явления и повысить достоверность заключений об их природе ведет к расширению круга наблюдений, проведению их на распределенной в пространстве сети станций, т. е. переходу к комплексному анализу. Например, мониторинг геодинамических процессов включает сейсмологические, геодезические, геохимические, гидрогеологические, электромагнитные и т. п. наблюдения. Результатом такого мониторинга, с формальной точки зрения, является совокупность временных рядов разнообразных данных.

В практике мониторинга геодинамических процессов широко используются статистические методы анализа данных. В частности, для выяснения степени взаимосвязи наблюдаемых рядов данных используется корреляционный анализ. Однако он не позволяет установить вид этой связи. Регрессионный анализ, в лучшем случае, позволяет предсказывать значения одного из рядов по синхронно принимаемым значениям других. Между тем в природных процессах, как правило, наблюдаются более сложные формы связей, когда значение одного ряда в какой-либо момент времени t определяется совокупностью значений другого ряда на некотором отрезке времени. Например, если два ряда $y(t)$ и $x(t)$ связаны между собой линейной причинно-следственной связью, то эта связь выражается соотношением свертки:

$$y(t) = \int_0^t g(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau + \Delta y(t), \quad (1)$$

где $g(\tau)$ — некоторая передаточная функция (точнее — ее импульсная пе-

реходная характеристика), а $\Delta y(t)$ — невязка, характеризующая точность выполнения сверточной связи. Такое же соотношение имеет место и в том случае, когда оба ряда порождаются (являются следствием) одного и того же основного процесса. Если же основной процесс достаточно сложен и может быть охарактеризован несколькими (N) независимо протекающими субпроцессами, то и среди наблюдаемых рядов нередко можно выделить N независимых, и любой другой ряд, порождаемый тем же основным процессом, будет описываться векторным соотношением свертки:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N g_i(t) * x_i(t) \quad (2)$$

На практике соотношения (1) или (2) выполняются с погрешностью $\Delta y(t)$, которая включает в себя шумы измерений, неучтенные субпроцессы, а так же возможные влияния на процесс измерений других процессов, сторонних по отношению к изучаемому (например, экзогенных). Их влияние можно исключить с помощью того же аппарата передаточных функций, примененного к иной группе рядов наблюдаемых данных, связанных с этим сторонним процессом. Связи вида (1) и (2) не универсальны. Они имеют место, когда наблюдаемые данные линейно связаны с основным процессом и связи между их рядами стационарны (хотя сами ряды могут и не обладать свойством стационарности). Передаточные функции зависят, как правило, от физико-геологического строения среды в окрестности пункта наблюдения. Если это строение изменяется в силу протекающих в среде процессов, то изменяются и сами передаточные функции. Их изменение несет дополнительную информацию об изучаемых процессах.

Адаптивные методы решения задач геофизики

Передаточные функции $g_i(t)$ могут быть найдены путем решения интегральных уравнений свертки (1) или (2) на отрезке времени, на котором заданы значения рядов $x_i(t)$ и $y_i(t)$. После того, как эти функции определены, соотношения (1) и (2) могут использоваться для предсказания поведения ряда $y(t)$ по известному поведению рядов $x_i(t)$ (но только, если передаточные функции неизменны во времени). Если значения остаточного ряда $\Delta y(t)$ превышают измерительные шумы и погрешности вычислений, то он может нести независимую от $x_i(t)$ информацию. Безотносительно величины $\Delta y(t)$ полезную независимую информацию могут давать также изменения во времени передаточных функций $g_i(t)$.

Решение интегральных уравнений свертки (1) или (2) может быть найдено хорошо известными методами [4], однако для целей мониторинга наиболее подходящими представляются итерационные адаптивные методы [5]. В таких методах последовательно получаемые решения уравнений достигаются при постоянно обновляющихся с течением времени значени-

ях временных рядов $y(t)$ и $x_i(t)$. Если связи между рядами не изменяются, то передаточные функции $g_i(t)$ принимают после ряда итераций значения близкие к истинным, и в дальнейшем колеблются в их малой окрестности. Если стационарность связей между рядами нарушается, то адаптивные методы позволяют отслеживать изменения передаточных функций во времени. Это, конечно, возможно лишь при более медленных их изменениях по сравнению с вариациями самих рядов.

Наиболее простым и в то же время эффективным методом решения систем алгебраических уравнений, к которым после дискретизации сводятся уравнения свертки, зарекомендовал себя метод наименьших квадратов Уидроу-Хоффа [5]. Итерационный алгоритм этого метода чрезвычайно прост:

$$g_i(k+1, l) = g_i(k, l) + \mu \cdot \Delta y(k) \cdot x_i(k-l), \quad (3)$$

где индекс k обозначает дискретизированное текущее время наблюдений, l — время задержки импульсной переходной характеристики, а μ — величину параметра сходимости. Значения $\Delta y(k)$ находятся путем вычитания из наблюдаемого значения $y(k)$ его синтезированного значения $y^S(k)$:

$$y^S(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L g_i(k, l) \cdot x_i(k-l) \cdot \Delta t \quad (4)$$

Последнее выражение представляет собой дискретизированную форму соотношения свертки (2) с определенными на k -ом отрезке времени значениями передаточных функций, Δt — интервал дискретизации.

Характерным примером является обработка данных наблюдений естественных электромагнитных полей Земли с применением описанного выше аппарата передаточных функций. Как известно, эти вариации, в основном, порождаются вариациями токов в ионосфере Земли. В силу удаленности этих токов от точек наблюдения поля на поверхности Земли, их можно рассматривать в первом приближении как токи на плоскости, случайным образом изменяющие свою интенсивность и направление. В соответствии с выбранным представлением систему таких токов можно охарактеризовать двумя независимыми субпроцессами — изменениями составляющих этих токов по двум координатным направлениям на плоскости. Эти токи порождают электромагнитное поле в форме вертикально падающей на Землю плоской волны. Если целью мониторинга является слежение за ионосферными токами, то в наблюдаемом на поверхности Земли поле следует выбрать также две независимо изменяющиеся во времени компоненты электромагнитного поля [6]. В качестве таких компонент естественно выбрать две горизонтальные компоненты геомагнитного поля (H_x, H_y), на которые электрическое строение Земли оказывает наименьшее воздействие — ввиду большой контрастности по сопротивлению атмосферы и литосферы эти компоненты просто удваиваются по сравнению с падающим полем. Остальные компоненты электромагнитного поля тесно

связаны с геоэлектрическим разрезом (электрическое поле E_x , E_y) или появляются в силу его горизонтальной неоднородности (вертикальная компонента магнитного поля H_z). В рамках сформулированной модели вариации этих компонент в соответствии с выражением (2) могут быть описаны соотношением:

$$H_z(t) = H_x(t) * I_{zx}(t) + H_y(t) * I_{zy}(t) + \Delta H_z(t), \quad (5)$$

где $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$ — компоненты индукционного вектора или, в более общей трактовке, — импульсные переходные характеристики соответствующих передаточных функций, отражающие электрическое строение Земли в окрестности точки наблюдения. В вариациях остаточного поля (ΔH_z) в значительной степени ослаблена зависимость от ионосферных токов. Существенный вклад в них вносят поля внутреннего, геодинамического происхождения, возникающие в недрах Земли в результате разнообразных механоэлектрических преобразований. Если в результате каких-либо геодинамических процессов не только генерируются электромагнитные поля, но и изменяется геоэлектрическое строение среды, то соответственно изменяются и передаточные функции I_{ij} . Их изменения несут независимую по сравнению с остаточными полями информацию о протекающих внутри Земли процессах, которая может быть эффективно использована для целей геодинамического мониторинга.

Примеры реализации вычислительного алгоритма

Блок-схема вычислительного алгоритма метода наименьших квадратов Уидроу-Хоффа представлена на рис. 1.

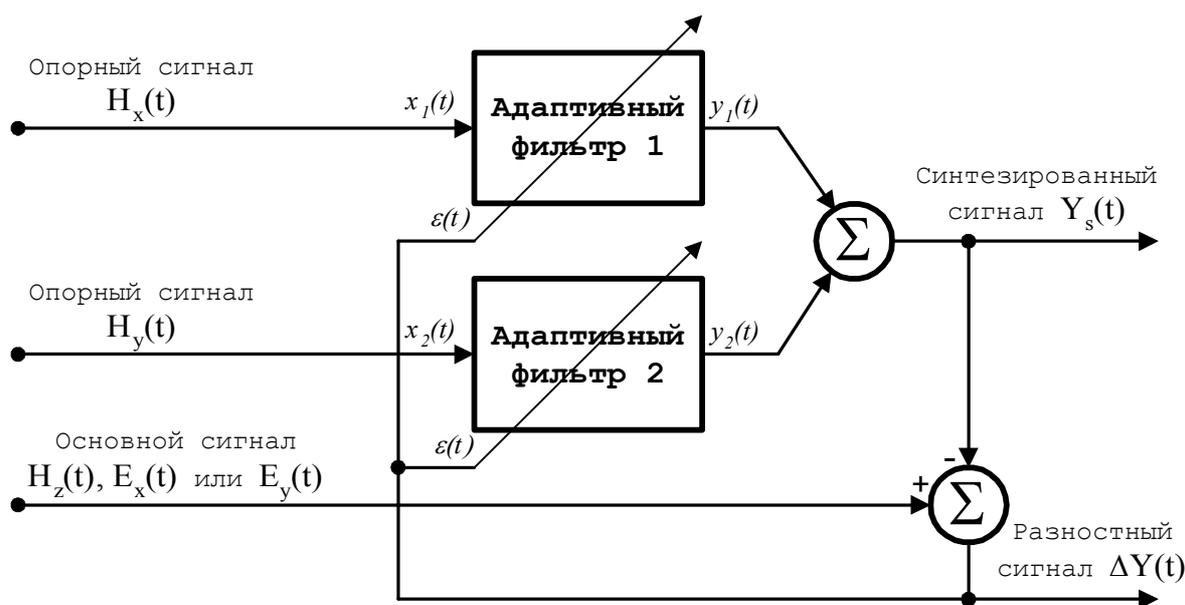


Рис. 1. Блок-схема вычислительного алгоритма.

На этой схеме блоки «Адаптивный фильтр» 1 и 2 реализуют итерационный алгоритм (3). В соответствии с выражением (5) в качестве опорных сигналов на входах блоков используются две горизонтальные компоненты геомагнитного поля (H_x , H_y), а в качестве основного — вертикальная компонента H_z . Разностный сигнал на выходе находится путем вычитания из наблюдаемого значения H_z его синтезированного значения в соответствии с выражением (4).

Рассмотренный алгоритм адаптивного фильтра был применен нами для анализа данных магнитотеллурического мониторинга, проводимого на Бишкекском геофизическом полигоне в начале 90-х годов [7]. С помощью пакета программ, написанных на Паскале, были обработаны ряды данных непрерывной в течение нескольких лет регистрации электромагнитного поля Земли, и графики, характеризующие динамику передаточных функций во времени, были сопоставлены с данными о сейсмической активности региона. На основании полученных результатов были отработаны методики мониторинга сейсмической активности.

В пакете расширения Filter Design, начиная с версии 2.1, входящей в поставку MATLAB 6.1, содержатся функции, реализующие алгоритмы адаптивной фильтрации [8]. Однако, по целому ряду соображений, нами были использованы функции собственной разработки. Код основной MATLAB-программы, реализующей алгоритм метода наименьших квадратов Уидроу-Хоффа, приведен ниже:

```
k=1:L;  
Ys = sum(sum(W(:,k).*X(:,i-k+1)));  
E(i) = S(i)-Ys;  
for j=1:Nref  
    W(j,k)=W(j,k)+2*U(j)*E(i)*X(j,i-k+1);  
end;
```

Здесь: L — длина фильтра; N_{ref} — число опорных сигналов; E — разностный сигнал; Y_s — синтезированный сигнал; W — передаточные функции. Разработанная нами программа позволяет использовать любое число опорных сигналов и произвольное количество циклов адаптации.

Новые возможности, предоставляемые пакетом MATLAB, позволили провести дополнительную обработку данных. На Рис. 1. показан пример вычисления передаточных функций между компонентами магнитного поля Земли в соответствии с выражением (5) продолжительностью в 24 часа. В качестве основного сигнала принята вертикальная компонента вариаций геомагнитного поля, в качестве опорных — горизонтальные компоненты. На графиках представлены исходный основной временной ряд (Raw data), разностный временной ряд (Residuals), а также передаточные функции между вертикальной и горизонтальными компонентами.

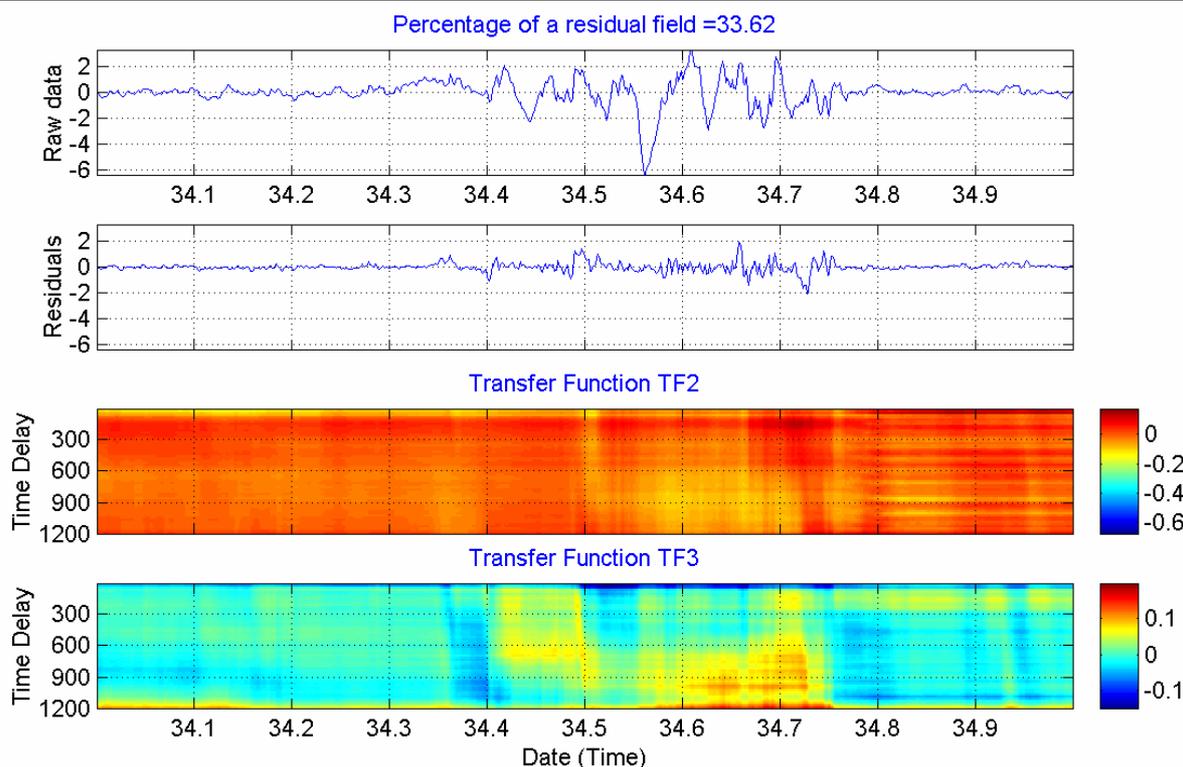


Рис. 1. Пример вычисления передаточных функций между компонентами электромагнитного поля Земли: 1 — основная компонента H_z ; 2 — остаточное поле; 3–4 — передаточные функции по компонентам H_x , H_y .

Из графика видно, как в течение суток меняется характер вариаций электромагнитного поля, а также характер связи между компонентами, что отражается в изменениях передаточных функций. Детальный анализ физического смысла этих изменений выходит за рамки данной работы.

Спектрально-временной анализ узкополосным адаптивным фильтром

Определенный интерес представляет анализ изменений спектра колебаний в разностном (остаточном) поле. Учитывая специфику геофизических исследований, а именно, интерес к низкочастотной части спектра в диапазоне периодов от единиц минут до часа, пришлось отказаться от традиционных методов спектрального анализа. Для спектрально-временного анализа рядов данных нами был использован метод выделения гармонических составляющих с помощью узкополосных адаптивных режекторных фильтров [9]. Их преимущества заключаются в простоте перестройки полосы пропускания, практически неограниченном подавлении соседних гармоник и точном слежении за частотой. Принцип их действия может быть описан той же блок-схемой рис.1. Отличие заключается лишь в том, что на входы адаптивных фильтров 1 и 2 в качестве опорных сигналов подаются две квадратурные составляющие моногармонического сигнала с

частотой ω_0 , равной частоте выделяемой гармоники. Анализируемый временной ряд S_i поступает на вход основного сигнала. Формируемые в процессе вычислений квадратурные составляющие x_{1i} и x_{2i} в каждой точке анализируемого временного ряда принимают значения:

$$\begin{aligned}x_{1i} &= C \cdot \cos(\omega_0 i \Delta t + \varphi) \\x_{2i} &= C \cdot \sin(\omega_0 i \Delta t + \varphi)\end{aligned}\quad (6)$$

где C — амплитуда колебания, Δt — шаг дискретизации. Из этих значений и весовых коэффициентов адаптивного фильтра W_{1i} и W_{2i} формируется синтезированный сигнал $S_{si} = x_{1i}W_{1i} + x_{2i}W_{2i}$. Разность между исходным и синтезированным сигналами $\varepsilon_i = S_i - S_{si}$ используется в качестве параметров, управляющего обновлением весовых коэффициентов фильтра на каждом шаге вычисления в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned}W_{1,i+1} &= W_{1,i} + 2\mu\varepsilon_i x_{1i} \\W_{2,i+1} &= W_{2,i} + 2\mu\varepsilon_i x_{2i}\end{aligned}\quad (7)$$

где μ — параметр, характеризующий скорость сходимости алгоритма адаптации коэффициентов фильтра. Добротность такого фильтра определяется выражением $Q = \omega_0 \Delta t / (2\mu C^2)$. Синтезированный сигнал S_{si} является выделяемой гармоникой с частотой ω_0 , огибающая которой находится по формуле:

$$A_i = C \sqrt{W_{1i}^2 + W_{2i}^2}\quad (8)$$

Код MATLAB-программы узкополосного адаптивного режекторного фильтра в соответствии с выражениями (6) и (7), приведен ниже:

```
Xs1 = Amax.*sin(pii.*step);
Xs2 = Amax.*cos(pii.*step);
step = step+1;
Ys = Ws1.*Xs1+Ws2.*Xs2;
Eps = AvErr(i)-Ys;
Ws1 = Ws1 + (2*Eps).*Xs1;
Ws2 = Ws2 + (2*Eps).*Xs2;
```

При помощи такого фильтра были обработаны данные временного ряда остаточного поля из предыдущего примера. Результат их обработки в виде динамического спектра показан на рис. 2. Динамические спектры вариаций позволяют детально исследовать наличие и амплитуды гармонических составляющих временного ряда в диапазоне периодов от 2 мин. до 1 часа с высоким разрешением. При этом не имеет значения, какой шаг будет установлен между соседними гармониками, а также характер шкалы — линейный, логарифмический, либо произвольный переменный.

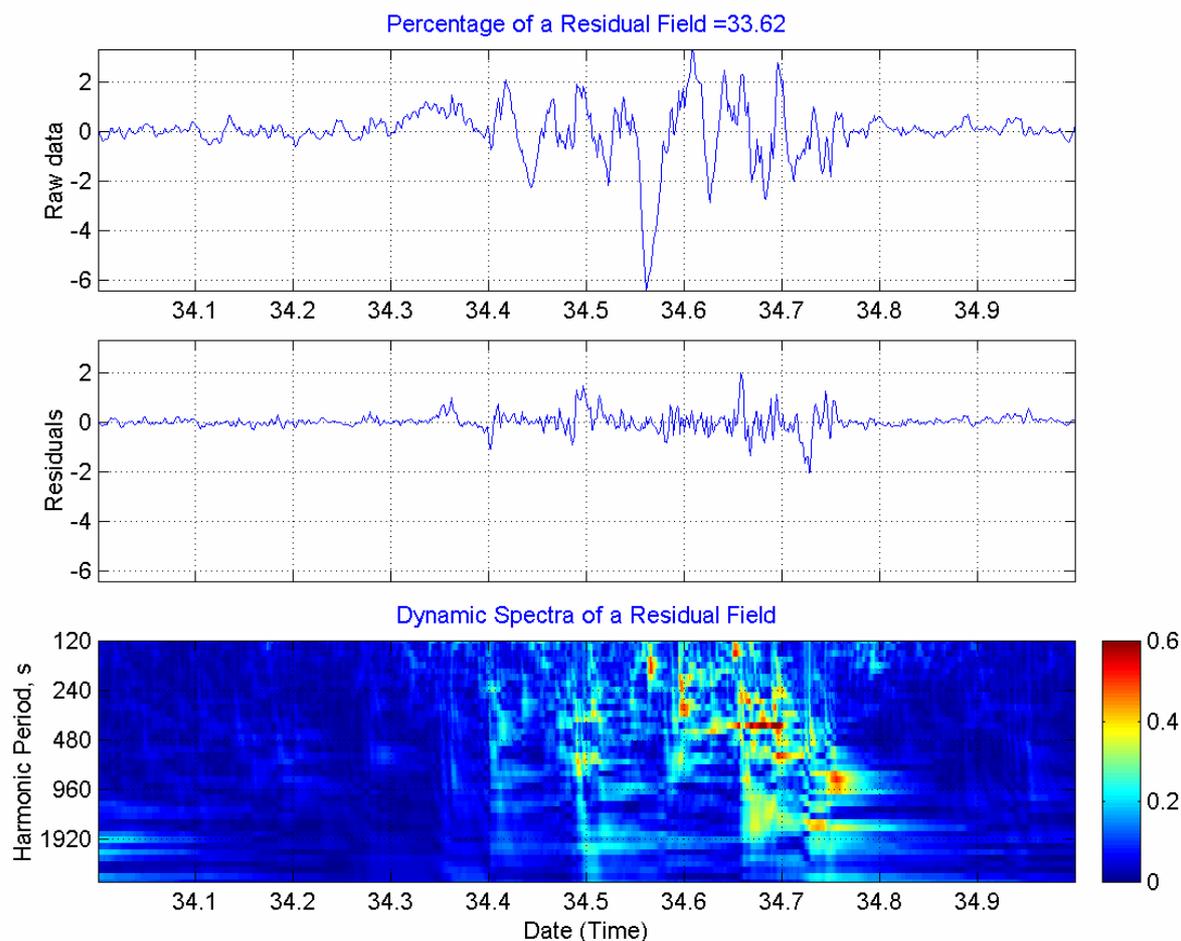


Рис. 2. Динамический спектр вариаций остаточного поля после вычисления передаточных функций между компонентами электромагнитного поля Земли.

Инструментальное средство MATLAB Web Server

Особый интерес в геофизике представляет сетевой доступ к данным, распределенным в Интернет, и интерактивный анализ экспериментальных данных по запросам пользователей. Процедура должна быть максимально упрощена, с тем, чтобы обеспечить эффективное обращение к данным и вычислительными ресурсам даже для той категории пользователей, которые не имеют достаточного опыта создания и эксплуатации программ обработки данных, получаемых в процессе геофизических экспериментов.

Одним из вариантов обеспечения интерактивного взаимодействия может быть применение Web Server из пакета MATLAB для передачи данных на главный компьютер с установленной системой MATLAB, проведения на нем вычислений и отображения результатов на Web-браузере пользователя путем стандартной Web-технологии в виде HTML-форм и документов. Форма дает пользователю возможность проверить наличие данных, выбрать требуемую обсерваторию, интервал времени, компоненту магнитного поля, воздействовать на параметры рисунка (цветной либо мо-

Труды II научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB»
нохромный) и т. п. На Рис. 3. показана HTML-форма для отправки запроса на обработку заданного отрезка временного ряда.

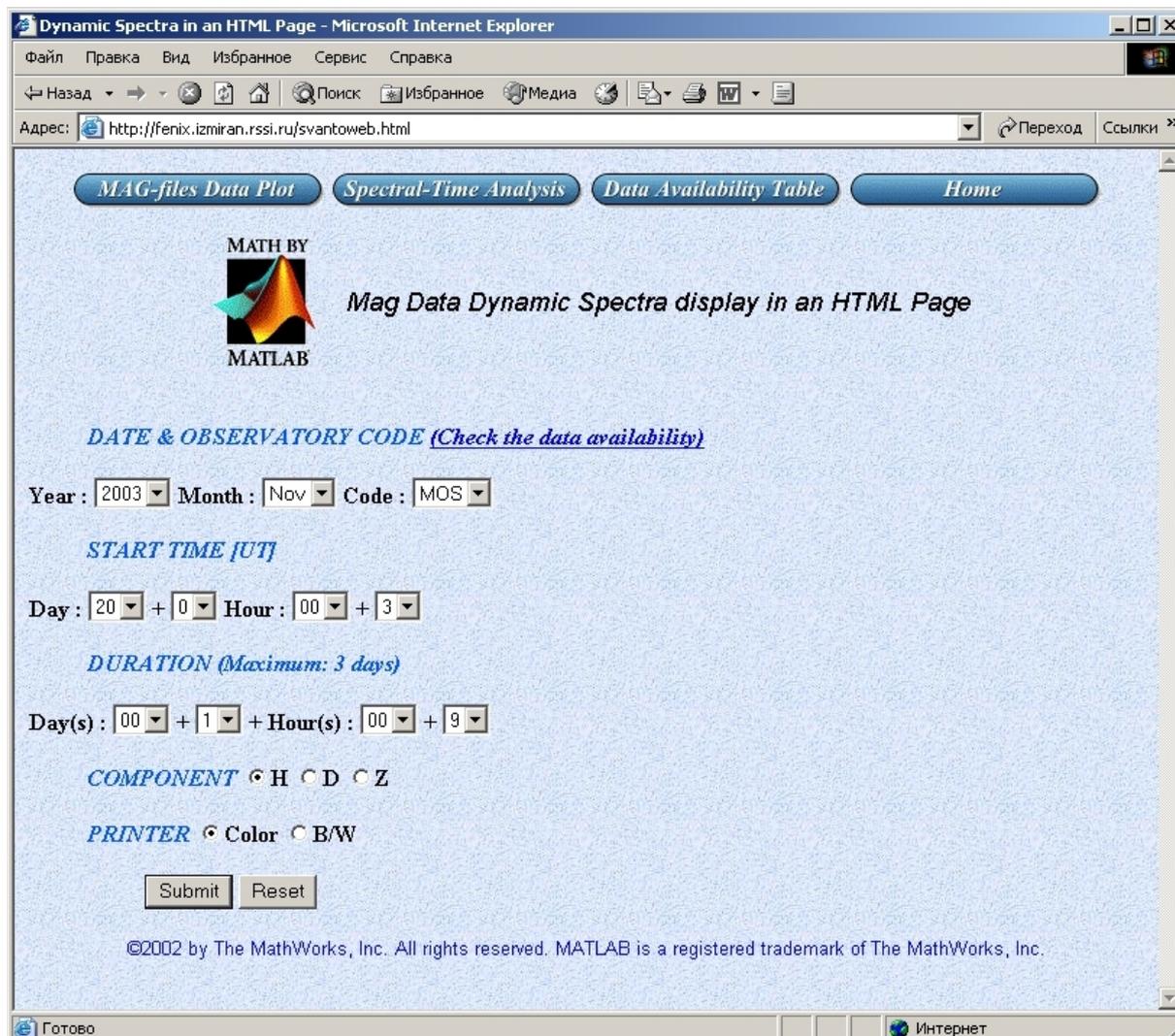


Рис. 3. Пример HTML-формы для отправки запроса на обработку данных.

В ответ на запрос пользователь получает результат обработки конкретного временного ряда в виде графического представления или сформированного нового файла, содержащего как результаты обработки, так и подготовленный новый ряд данных для последующей обработки средствами пользователя.

На этом примере показана возможность организации интерактивного доступа к базе данных геомагнитных обсерваторий РОССИИ за 1984 — 2000 гг., размещенной на сайте <http://magbase.rssi.ru/index.htm>, а также данным непрерывной регистрации вариаций геомагнитного поля в обсерватории Москва http://www.izmiran.rssi.ru/magnetism/mos_data.htm. На Рис. 4 приведен график вариаций одной из компонент геомагнитного поля во время большой магнитной бури 20 ноября 2003 г., сформированный по за-

просу пользователя, а также результат спектрально-временного анализа этих вариаций (динамические спектры).

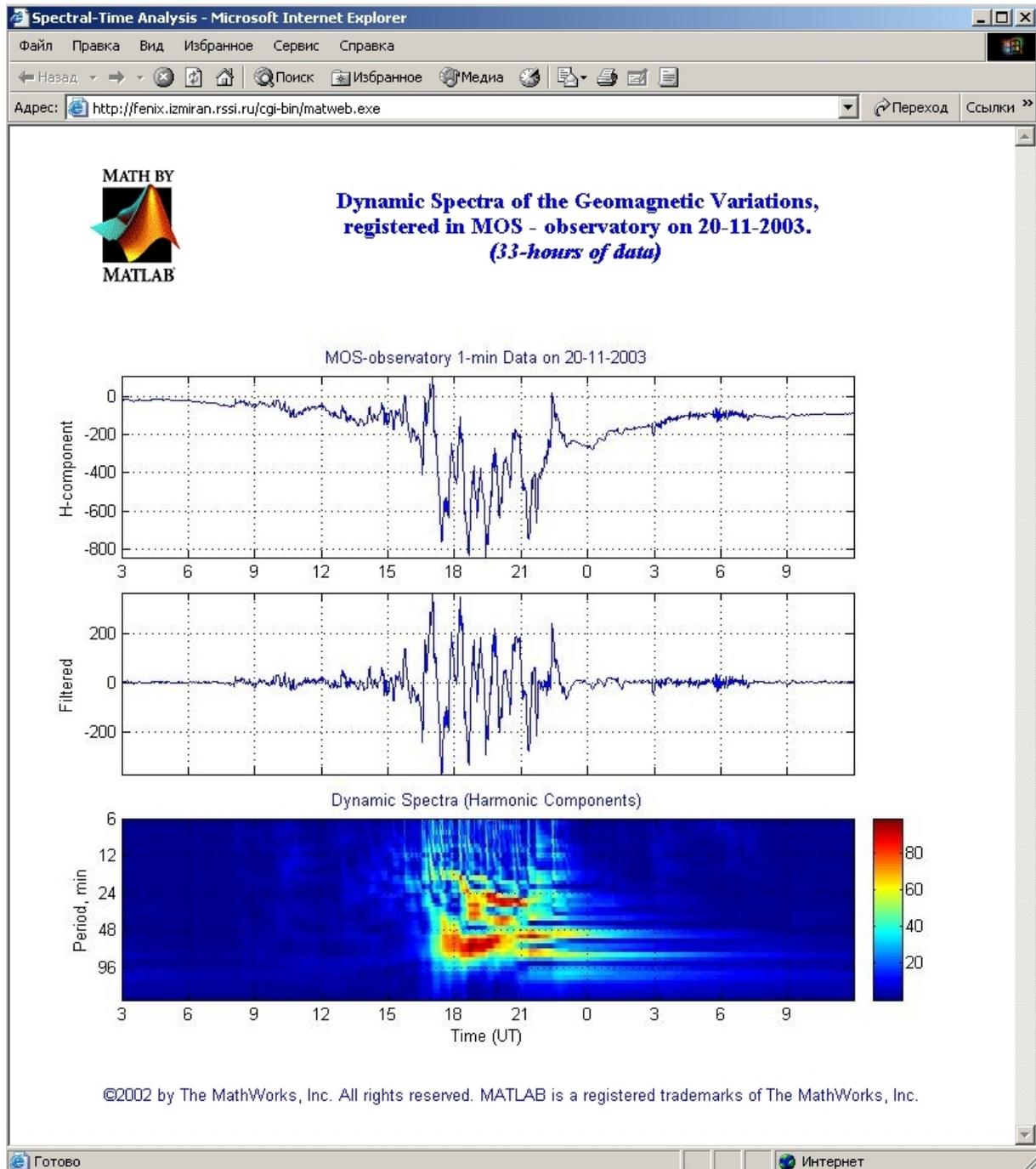


Рис. 4. Пример формы, возвращаемой в ответ на запрос пользователя.

Для пересылки данных с удаленных сайтов Интернет используются либо средства MATLAB, либо небольшие CGI-программы на языке Perl. Фрагмент кода MATLAB-программы для запроса данных с удаленного сайта приводится ниже:

```
fn = strcat('V',YeMo,','Cod);
pn = strcat('D:\CDMASTER\DATABASE\',Yea,'\','YeMo,'\');
if exist([pn,fn]) ~= 0
    fin = fopen([pn,fn],'r');
else
    if exist(fn) == 0
        pn = strcat('http://magbase.rssi.ru/database/',Yea,'\','YeMo,'\');
        URLWRITE([pn,fn],fn); end
        fin = fopen(fn,'r');
end;
```

В этой программе из данных формы запроса, полученной Web Server, формируется имя запрошенного файла и путь к нему (в соответствии с принятой структурой базы данных). Затем следует проверка на наличие данных непосредственно на той машине, где установлена MATLAB и исполняемые программы обработки. В случае отсутствия данных производится их поиск по всем известным адресам в Интернет.

Заключение

Само по себе представление геофизических данных хотя и является крайне важным шагом на пути их активного использования, но не может удовлетворить всем современным требованиям ученых-исследователей. Перспективным направлением в этом плане может быть создание обобщенных аналитических представлений — например, вариационных магнитных данных в виде моделей эквивалентных токовых систем и других параметров ионосферы в планетарном масштабе. В последние годы эти методы анализа и представления данных были развиты и реализованы в виде сервиса в реальном времени AMIE — «Assimilative Mapping of Ionospheric Electrodynamics», на сайте <http://amie.ngdc.noaa.gov/current.html>. Такое обобщенное представление большого объема данных позволяет сразу перейти от качественного описания развития возмущений магнитного поля к их количественной оценке. Применение новейших информационных технологий открывает широкому кругу специалистов доступ через Интернет к базам данных и их интерактивному анализу средствами системы MATLAB. Пример использования MATLAB Web Server для доступа к «Базе данных геомагнитных обсерваторий России» на CD-ROM и вычисления спектрально-временных характеристик геомагнитных вариаций по данным этой базы представлен в тестовой версии на сайте <http://vlod.izmiran.rssi.ru>.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 03-07-90066.

Литература

1. Ротанова Н. М., Цветков Ю. П., Одинцов В. И., Бурцева Э. А. Магнитное сканирование земной коры Сибирского региона с борта страто-

- сферного аэростата // Исследование Земли из космоса.— 2001.— №4.— С.63–73.
2. *Зайцев А. Н., Одинцов В. И.* Наблюдение эффектов секторной структуры ММП в околоземном пространстве по геомагнитным данным // Актуальные проблемы физики Солнечной и звездной активности. Конф. стран СНГ и Прибалтики (Нижний Новгород, 2–7 июня 2003): Сб. докл. в 2-х т. Т. II.— Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2003.— С.460–464.
 3. *Амиантов А. С., Зайцев А. Н., Одинцов В. И., Петров В. Г.* Вариации магнитного поля Земли: База цифровых данных магнитных обсерваторий России за период 1984–2000. (брошюра и оптический диск CD-ROM).— М.: СтройАрт, 2001.— 52 стр.
 4. *Тихонов Н. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач.— М.: Наука, 1979.— 285 с.
 5. *Уидроу Б., Стирнз С.* Адаптивная обработка сигналов.— М., Радио и связь, 1989.— 440 с.
 6. *Светов Б. С., Шимелевич М. И.* Определение линейных связей между компонентами магнитотеллурического поля — основные принципы // Физика Земли.— 1982.— №5.— С.59–67.
 7. *Светов Б. С., Каринский С. Д., Кукса Ю. И., Одинцов В. И.* Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов // Физика Земли.— 1997.— №5.— С.36–46.
 8. *Сергиенко А. Б.* Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB // Exponenta Pro. Математика в приложениях.— 2003.— №1.— С.18–28.
 9. *Уидроу Б., Гловер Д. Р., Макул Д. М. и др.* Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения // ТИИЭР.— 1975.— Т.63.— №12.— С.69–98.