

УДК 550.834

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ КОЛОННОГО ТИПА В РЕЖИМЕ МОНИТОРИНГА**

*д.ф-м.н., Мостовой В.С. *, д.ф-м.н., проф. Мостовой С.В. **,
Яворская О.И. ***

** - Институт геофизики С.И. Субботина НАН Украины, Киев*

*** - Национальный авиационный университет, Киев*

Накопленный авторами опыт в процессе мониторинга ряда промышленных сооружений, позволяет утверждать, что процесс старения может быть отражён в пространстве признаков, которое может быть сведено к множеству параметров, характеризующих упругие свойства материалов, которые формируют исследуемые объекты. Поскольку скорости распространения и форма продольных и поперечных волн в материале зависят от упругих параметров этих материалов (коэффициента Пуассона и модуля Юнга), то изменение этих параметров приводит к изменениям и спектральных характеристик сигналов эмиссии, которые возникают в стареющем материале.

Собственные частоты исследованных объектов лежали в сейсмическом диапазоне частот. В стационарном состоянии объекта наблюдалась устойчивая миграция вектора, характеризующего состояние объекта, в пространстве признаков в рамках эллипсоида вращения сравнительно малого объема в режиме пассивного мониторинга. Это обстоятельство связано со стохастическим характером самого процесса мониторинга. Такое состояние наблюдается до появления усталости. С точки зрения материаловедения, усталость – это развивающиеся локальные структурные повреждения, возникающие при циклических нагрузках на материал. Максимальные значения напряжения в цикле меньше чем наивысший предел напряжения, и ниже предела напряжения для данного материала.

Структурный отказ материала заключается в потере несущей способности элемента или непосредственно всей структуры. Он начинается, когда напряжения в материале подходят к предельным, вызывая чрезмерные деформации, когда материал в процессе полного цикла не возвращается в исходное состояние, т.е. проявляется явление гистерезиса. Всякое перераспределение энергии в материале сопровождается возникновением эмитируемых сигналов. Эмиссия сигналов – это волны напряжения, порожденные внезапным внутренним перераспределением напряжения в материале, вызванным изменениями во внутренней структуре.

Возможные причины изменений внутренней структуры: возникновение и рост трещин, фазовые переходы в монолитных материалах, и разрыхление составляющих.

Динамика параметров эмиссионных сигналов отражает изменения упругих свойств исследуемого объекта. Это значит, изменения динамических параметров эмиссионных сигналов связаны с динамическими характеристиками этого объекта. Принимая во внимание наличие

стохастического фонового шума при мониторинге, следует принять в модели лишь статистический характер этой зависимости. Ключевой вопрос есть выбор информативных параметров, для пространства признаков, в котором необходимо осуществить динамический анализ их поведения, на основании которого построить решающее правило для прогноза состояния объекта [1]. Встаёт проблема выбора пространства признаков старения и усталости. Поскольку мы имеем только косвенную информацию о состоянии объекта в виде характеристик эмитируемых сигналов, то сможем осуществлять только косвенные измерения, связанные с распространением волн эмиссии. Динамические изменения этих волн отражаются в динамике их спектральных характеристик. Пространство спектральных характеристик основывается на параметрах статистически связанных с характеристиками объекта. Стохастические характеристики такого составного случайного процесса и отражают процесс изменения упругих характеристик материала. Задача оценки параметров рассматриваемого случайного процесса сводится к оценке их апостериорной вероятности, динамика которых отражает усталость и процесс старения объекта.

Под пассивным сейсмоакустическим мониторингом строительных объектов понимаются режимные наблюдения за параметрами естественного фона исследуемого объекта. Естественный фон объекта представляет собой суперпозицию сигналов эмиссии, вызванной естественными изменениями исследуемого объекта (возникновение микротрещин и т.д.) и реакции объекта на внешнее возмущение (ветровые нагрузки, влияние транспорта, сейсмические события, колебание грунтов вызванные колебаниями объектов различной природы, связанных с реакцией этих объектов на внешние воздействия и т.д.). Математическая модель старения объекта должна учитывать природу внешних воздействий на объект и природу его реакции на внешние возмущения. В основе предложенной математической модели лежит гипотеза о том, что внешнее возмущение вызывают собой реакцию объекта как суперпозицию осцилляторов, начало которых лежит как в области наших наблюдений, так и до начала наблюдений. Режимные наблюдения за динамикой параметров суперпозиции этих осцилляторов и будет пассивный сейсмоакустический мониторинг с целью оценки состояния старения исследуемого объекта.

Математическая модель. В качестве динамической модели объекта выбираем суперпозицию из $I + 1$ осцилляторов, каждый из которых вступает в свой момент времени l_{0+i} , имеет амплитуду l_{1+i} , затухание колебаний с постоянной времени l_{2+i} и угловую частоту колебаний l_{3+i} , $i = \overline{0, I}$. [2].

$$M(t, \lambda) = \sum_{i=0}^I \Phi(t - l_{iS+0}) l_{iS+1} e^{-l_{iS+2}(t - l_{iS+0})} \sin[l_{iS+3}(t - l_{iS+0})] \quad (1)$$

где λ – вектор свободных параметров модели, S – количество свободных параметров подмодели, $I + 1$ – количество участвующих в суперпозиции подмоделей, $\Phi(t)$ – единичная функция Хэвисайда. Каждая из подмоделей – это физически осуществимая волна [3]. Как видно из (1) только

параметры l_i , when $\text{mod}(i,4) = 1$ входят в модель линейно. Остальные параметры – это нелинейные параметры.

Оптимальная оценка параметров сигнала заключается в определении вектора свободных параметров, минимизирующих значение критерия согласия модели с наблюдаемыми данными. Мы выбрали достаточно простой случай и в качестве критерия согласия величину квадрата отклонения модели от наблюдаемых данных $y(t)$ в метрике L_2 . В этом случае критерий $F(\lambda)$ принимает вид:

$$F(\lambda) = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)]^2 dt, \quad (2)$$

а оптимальная оценка свободных параметров λ^* – это точка, минимизирующая (2) в пространстве параметров [4]:

$$F(\lambda^*) = \min_{\lambda \in \Lambda} F(\lambda),$$

$y(t)$ – аналитическая аппроксимация вектора значений обработанных наблюдаемых данных, Λ – множество возможных значений вектора λ .

Чтобы найти минимум критерия, нам необходимо вычислить частные производные $\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$, здесь $K+1$ – количество всех свободных

параметров модели. Приравняв к нулю $\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$ получаем систему уравнений, которая имеет вид:

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k} = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)] \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_k} dt = 0, \quad k = \overline{0, K}. \quad (3)$$

Система уравнений сводится к

$$\int_T [y(t) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt = \int_T [M(t, \lambda) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt. \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{D}(M(t, \lambda))$ – вектор функция, составленный из производных модели по всем компонентам вектора λ . Для модели (1) этот вектор имеет вид:

$$\mathbf{D}(M(t, \lambda)) = \left\{ \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_{s+i}} \right\}; \quad s = \overline{0, S}; \quad i = \overline{0, I}. \quad (5)$$

i – порядковый номер подмодели в (1).

Для дальнейшего вычисления удобно представить вектор свободных параметров λ в виде матрицы, $\Lambda = \{ \lambda_{s,i} \}; s = \overline{1, S}; i = \overline{0, I}$; где i – номер подмодели, а S – номер параметра в подмодели. В нашей модели параметры $\lambda_{0,i}$ – это моменты вступления во времени подмодели с номером i , $l_{i,1}$ – это амплитуды подмодели с номером i , $l_{i,2}$ – это параметр затухания

подмодели с номером $i, l_{i,3}$ – частота подмодели с номером $i, l_{i,4}$ – фаза подмодели с номером i . В этом случае модель сигнала принимает вид:

$$M(t, \lambda) = \prod_{i=0}^I \Phi(t - l_{i,0}) l_{i,1} \prod_{j=1}^J l_{i,2}^{(t - l_{i,0})} \sin[l_{i,3}(t - l_{i,4})]_{\text{Б}}^{\text{П}} \quad (6)$$

где $I+1$ – количество неразрешенных (пересекающихся) сигналов в группе, т.е. группа, состоит из $I+1$ неразрешенных сигналов. В общем случае I – случайная величина. В матрице свободных параметров модели Λ строка с номером i является вектором параметров i -го сигнала. Оптимальная оценка матрицы свободных параметров Λ , получена как оценка, дающая минимальное значение критерию на множестве локальных минимумов этого критерия. Каждый локальный минимум вычисляется как ближайший к случайному значению критерию в точке пространства значений свободных параметров модели, которая получается как псевдослучайный вектор соответствующей размерности. Процедура получения оптимальной оценки заключается в том, что для множества из M псевдослучайных матриц Λ определяются точки локальных экстремумов, ближайшие к каждой из них, и далее на множестве локальных минимумов выбирается глобальный. Точка, которая дает этот минимум критерию в $S \times I$ мерном пространстве, и выбирается как оптимальная для свободных параметров модели сигнала. В такой процедуре нам обеспечена сходимость к оптимальному решению по вероятности с ростом количества испытаний M псевдослучайных матриц Λ [5].

При проведении исследования в качестве чувствительных элементов системы регистрации и обработки данных были использован трёхкомпонентный велосиметр СК-ПП, который представляет собой 3 взаимно перпендикулярно ориентированных сенсора с узкой диаграммой направленности. Одно из направлений выбрано вертикальным. Предварительный анализ измерений показал, что в этом направлении уровень колебаний на порядок ниже колебаний в горизонтальной плоскости и в расчётах не учитывались. Спектральная характеристика горизонтально ориентированных датчиков прибора – это двумодальная кривая с модами в точках 1 Гц и 13 Гц.

Аппаратное обеспечение системы наблюдений представляет собой последовательно соединённые блоки датчиков, канала связи, аналогово-цифрового преобразователя и компьютера.

Исследуемый объект являет собой сооружение, связанное с множеством устройств, работающих на промышленной частоте. Фоновая помеха на этой и связанных с ней частотах существенно превышают наблюдения на собственных частотах объекта. Поэтому данные измерений потребовали существенной предварительной обработки.

В нашем случае процесс измерения до ввода в компьютер можно представить в виде системы, которая представляет собой суперпозицию свертки сигнала $S(t)$, $h_1(t)$ – передаточной функции прибора (следует отметить, что для каждого из приборов она индивидуальна), $h_2(t)$ –

передаточной функции каналов связи, $h_3(t)$ – передаточной функции аналогово-цифрового преобразователя [6]. В этой системе $S(t)$ – сигнал, поступающий в систему $\hat{S}(t)$ – преобразованный системой сигнал. В линейном приближении математическая модель измерения представима в виде:

$$\tilde{S}(t) = S(t) * h_1(t) * h_2(t) * h_3(t) + n(t) = S(t) * H(t) + n(t),$$

где $n(t)$ – случайная суммарная погрешность от возникающих в каждом элементе системы возмущений, а $H(t)$ – передаточная функция системы измерения в целом. Символ $*$ – это оператор свертки. Статистический анализ помех позволяет, предположить, что $n(t)$ можно моделировать белым шумом. Математическая обработка сводится к построению оператора $H^{-1}(t)$ обратного к оператору системы $H(t)$ и коррекции сигналов их сверткой с оператором $H^{-1}(t)$.

$$H(t) * H^{-1}(t) = \delta(t).$$

В этом случае модель системы измерений, принимает вид:

$$\tilde{S}(t) = [S(t) * H(t) + n(t)] * H^{-1}(t) = S(t) + n(t) * H^{-1}(t).$$

Из последнего выражения видно, что действие корректирующего оператора наряду с восстановлением сигнала может ухудшить соотношение сигнал – помеха.

Предлагаемый подход использовался при мониторинге дымовой трубы котельной в г. Переслав. Мониторинг заключался в серии из 2 исследований, проведенных 24.01.2013 и 04.06.2013. Задачей исследований было проследить за динамикой вектора свободных параметров модели объекта в выбранном пространстве признаков, которые характеризуют состояние исследуемого объекта. В случае существенного изменения рассматриваемых параметров можно делать вывод о структурном изменении объекта. Под существенным изменением нужно понимать выход вектора свободных параметров из области стационарности, очерченной некоторой оболочкой, например эллипсоидом вращения фиксированного объема ε в пространстве признаков старения в модели объекта. Область стационарности индивидуальна для каждого исследуемого объекта, и она выбирается исследователем из условий проводимых исследований и специфики самого объекта. В качестве параметрического пространства признаков старения исследуемого объекта выберем пространство свободных параметров предложенной выше модели объекта как суперпозиции осцилляторов.

На рисунке 1 показана аналитическая кусочно-линейная аппроксимация вектора значений обработанных наблюдаемых данных одной из горизонтальных компонент, зарегистрированных на дымовой трубе.

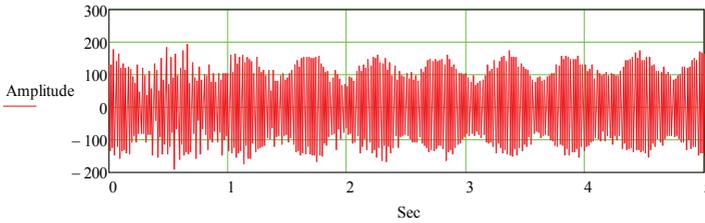


Рис. 1. Аналитическая аппроксимация фрагмента в 5 из 60 секунд вектора значений наблюдаемых данных, зарегистрированных на дымовой трубе

По оси абсцисс дано время в секундах, по оси ординат величина амплитуд скоростей записи в относительных единицах.

Представленные на рисунке 1а данные прошли предварительную обработку, а именно проводилась фильтрация регистрируемых данных с учетом характера фонового шума. [7].

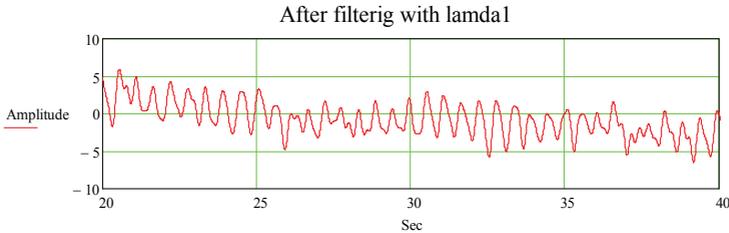


Рис. 1а. Аналитическая аппроксимация фильтрованного фрагмента в 10 из 60 секунд вектора значений наблюдаемых данных, зарегистрированных на дымовой трубе

По оси абсцисс дано время в секундах, по оси ординат величина амплитуд скоростей записи в относительных единицах.

На рисунке 2 представлен фрагмент Фурье спектра на интервале $[0,10 \text{ Hz}]$ из интервала $[0,50 \text{ Hz}]$ аналитической аппроксимации вектора значений обработанных наблюдаемых данных. По оси абсцисс отложена частота в Герцах, по оси ординат модуль в относительных единицах.

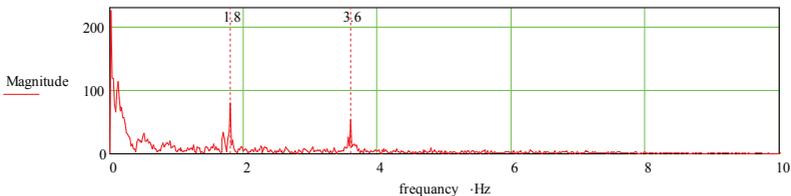


Рис. 2 Фурье спектр данных, представленных на рис. 1

По оси абсцисс дана частота в Герцах, по оси ординат величины модуля спектра в относительных единицах.

Оценки добротности собственных частот и соотношений амплитуд собственных частот по преобразованию Фурье дают возможность выбрать начальную точку в пространстве признаков для поиска минимума критерия методом Ливенберга – Марквардта [8] в серии испытаний Монте – Карло. Глобальный минимум даёт нам оптимальное решение.

В таблице 1 приведены величины основных четырёх мод спектра, представленного на рисунке 2. Величины даны по убыванию амплитуд компонент спектра. В первой колонке даны частоты компонент в Герцах, во второй колонке приведены значения величин амплитуд соответствующих компонент спектра в относительных единицах в третьей колонке - кратность частот.

Таблица 1
Величины основных пяти компонент спектра, представленного на рис. 2

Частота, Гц.	Амплитуда, отн. ед.	Кратность частот
0.01667	224.95	1
0.11667	113.71	7
1.8	79.616	107.998
3.6	53.03	215.996

Величины даны по убыванию амплитуд компонент спектра. В левой колонке даны частоты компонент в Герцах, в правой колонке даны значения величин амплитуд соответствующих компонент спектра в относительных единицах.

Из таблицы видно, что спектр состоит из основной и некоторых кратных ей гармоник, а именно седьмой, сто восьмой и двести шестнадцатой.

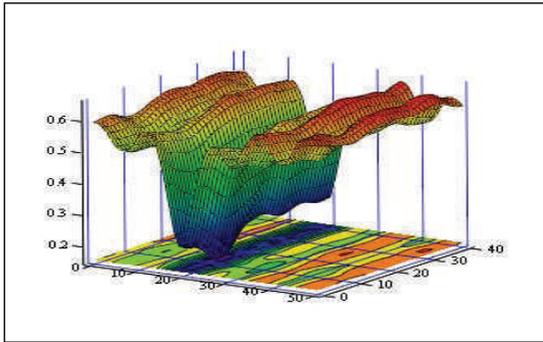
Данные, приведенные в таблице, в дальнейшем используются в алгоритме как начальные точки в пространстве признаков для поиска минимума критерия методом Ливенберга – Марквардта в серии испытаний Монте–Карло.

Мы рассматривали две модели с двенадцатью и шестнадцатью свободными параметрами, другими словами рассматриваются модели суперпозиции трех и четырех осцилляторов соответственно. Оценкой качества модели служит значение критерия в точке глобального минимума. Критерий оптимальности показал, что вторая модель даёт лучшее согласие с наблюдаемыми данными.

Для иллюстрации технологических особенностей нелинейной оптимизации приведём несколько фрагментов критерия (2) в окрестности глобального минимума, когда все параметры имеют фиксированные оптимальные значения, в то время как выбранная пара параметров изменяется

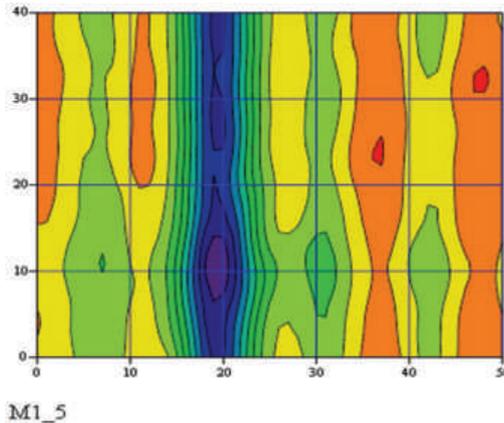
в окрестности глобального минимума. В этом случае критерий представляется как функция двух переменных.

На рисунке 3 представлен критерий как функция параметров $\lambda_{2,3}$ и $\lambda_{3,3}$ в модели (6). Эти параметры являются частоты второй и третьей мод в спектре модели сигнала. На горизонтальной плоскости рисунка можно видеть топографию критерия, которая как карта представлена на рисунке 4. Можно видеть множество локальных минимумов в окрестности глобального, что является основной проблемой нелинейной оптимизации. В то время как для линейно входящих в модель параметров, для выбранного критерия, локальные экстремумы отсутствуют, и существует лишь один глобальный. Это можно видеть на рисунках 5 и 6.



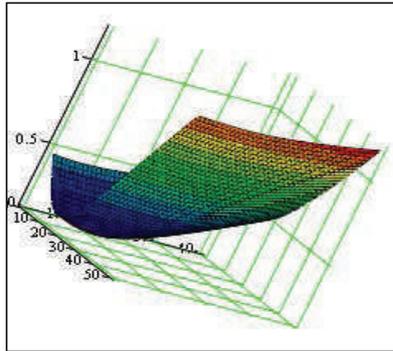
M1_5 , M1_5

Рис. 3. Критерий как функция параметров $\lambda_{2,3}$ и $\lambda_{3,3}$ в модели (6)



M1_5

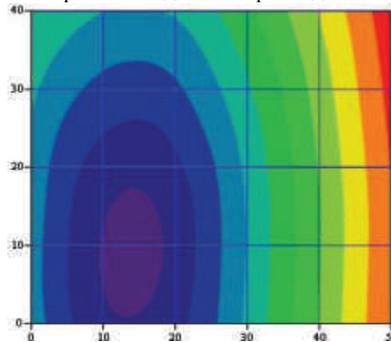
Рис. 4. Топография критерия рисунка 3



M2_6

Рис. 5. Поведение критерия в окрестности двух линейно входящих в модель параметров $\lambda_{2,2}$ и $\lambda_{3,2}$

Рисунок 6 позволяет увидеть поведение критерия в окрестности двух линейно входящих в модель параметров: $\lambda_{2,2}$ и $\lambda_{3,2}$. Эти параметры являются амплитуды второй и третьей мод в спектре модели сигнала.



M2_6

Рис. 6. Топография критерия рисунка 5

Выше приведенные расчеты даны с целью показать всю цепочку в компьютеризированной методологии оценки свободных параметров в моделях с помощью нелинейной оптимизации. Они приведены только для одной из компонент записи осциллирующих скоростей. Расчеты для другой составляющей имеют такой же технологический цикл.

Физически содержательную ценность имеют, прежде всего, выбранные значения свободных параметров модели для идентификации состояния объекта исследования – это зафиксированные в (6) свободные параметры.

Особенно важны демпфирующие характеристики, поскольку дают

представление о добротности системы, ее способности накапливать и удерживать на время энергию внешних возмущений. Высокая добротность (малый декремент) на некоторых частотах в модели характеризует особую чувствительность объекта к внешним возмущениям на этих частотах. Например, динамические изменения декремента в сторону уменьшения – это признак готовности объекта к разрушению от слабого внешнего воздействия. Количество циклов вычислений должно быть достаточно большим для уверенности в правильности результата, что становится затруднительным при большой размерности модели. Однако при хороших априорных представлениях об ожидаемом результате можно уменьшить количество циклов вычислений.

Сравнение расчётов для измерений, отстоящих во времени одно от другого на расстоянии в полгода, позволяют утверждать, что для объектов выбранного типа назначенные для идентификации его состояния параметры достаточно устойчивы и могут служить опорной базой для долгосрочного мониторинга. Для какого-либо тренда точки, характеризующей состояние этого объекта, в пространстве параметров такого срока как полгода явно недостаточно. Но в то же время такой квант во времени в режимных наблюдениях позволит не пропустить «цель», т.е. начало существенных изменений в структуре объекта. В настоящий момент объект находится в устойчивом стационарном состоянии.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Питмен С. Основы теории статистических выводов // Москва «Мир» 1988 С. 104.
2. Мостовой С.В., Мостовой В.С., Панченко М.В. Сейсмический сигнал и микросейсмический фон (математические модели и оценки) // Геоинформатика, №1. – 2008. – С. 28-38
3. Мостовой В.С. Модели систем мониторинга геофизических полей. // Дис. доктора физ.-мат. наук: 04.00.22; Утверждена решением Аттестационной коллегии МПНМС Украины от 01.03.2013 – 263 с., 119 ил, 4 табл., 6 доп. - Библиогр. с. 250-263.
4. Plessix R.-E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications // Geophys. J. Int. (2006) 167, 495.
5. Мостовой В.С. Оптимальное обнаружение сигналов на фоне микросейсмического шума. // Док. НАН Украины. – 2008. – № 1. – С. 106-110.
6. Мостовой В.С. Модели обнаружения и идентификации сигналов в системах мониторинга геофизических полей. Дис. кандидата физ.-мат. наук: 01.04.12; - Защищена 02.10.1996. - К., 1996. - 116 с.; 30 ил. - Библиогр. с. 101-116.
7. Мостовой С.В., Мостовой В.С., Проблемы фильтрации при обработке геофизической информации. // Геоинформатика, – № 2. – 2011. С 48-52.
8. J. Pujol. The solution of nonlinear inverse problems and the levenberg-marquardt method. Geophysics, 72(4):W1-W16, 2007.