

УДК 525.622

И. ПАЭСАЛУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ЗЕМНО-ПРИЛИВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Довольно высокая точность определения параметров земных приливов, достигнутая в настоящее время благодаря появлению новой аппаратуры, совершенствованию методики и наличию длинных рядов наблюдений, открыла возможность подробного изучения глубинного строения Земли, в частности горизонтальных неоднородностей верхней мантии, а также детального определения резонанса жидкого ядра Земли.

Но в результате повышения точности измерений увеличивается и значение различных возмущающих земно-приливную запись факторов, которые систематически искажают наблюдаемые приливные параметры и тем самым осложняют интерпретацию результатов гармонического анализа. Возмущения, однако, и сами могут быть источником геофизической информации. Отсюда вытекает необходимость в разработке методов учета внешних возмущающих воздействий на приливорегистрирующие приборы в целях введения реальных поправок в результаты наблюдения земных приливов и тем самым повышения их надежности.

Проблеме введения барометрических поправок в наблюдаемые вариации силы тяжести посвящено немало работ (Гудс, Двулит, 1972; Урманцев, 1975; Парийский и др., 1982; Warburton, Goodkind, 1977). В основном это работы теоретического характера, учитывающие только геофизический эффект атмосферного воздействия. Прибор при этом считается не подверженным атмосферному воздействию. Цель настоящей работы, как и ранее написанной (Паэсалу, 1985) — внесение небольшого вклада в разработку методики определения общего барометрического коэффициента приливоизмеряющего прибора. Эта методика может применяться и при определении других возмущающих воздействий на измеряемый земно-приливной сигнал.

Ниже излагаются теоретические основы (Солодовников, Усков, 1960) использованного нами статистического метода.

Исследуемый объект — приливной гравиметр, подвергаемый внешним возмущающим воздействиям. Предполагаем, что внутренние помехи в приборе отсутствуют и что он является линейным объектом. Тогда уравнение, описывающее входное воздействие $x(t)$ и ответную реакцию гравиметра $y(t)$, имеет вид

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t - \tau) k(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $k(\tau)$ — импульсная переходная функция гравиметра.

$$\text{ВХОД} \quad \frac{x(t)}{R_x(\tau)} \quad \boxed{k(\tau)} \quad \frac{y(t)}{R_{yx}(\tau)} \quad \text{ВЫХОД}$$

Схема воздействия возмущения на гравиметр.

В случае стационарных случайных возмущений уравнение (1) примет вид

$$R_{yx}(\tau) = \int_0^{\infty} R_x(\tau - \theta) k(\theta) d\theta, \quad (2)$$

где $R_{yx}(\tau)$ — взаимная корреляционная функция между входным и выходным сигналами, а $R_x(\tau)$ — автокорреляционная функция процесса $x(t)$ на входе объекта. Здесь R_x можно рассматривать в качестве входного воздействия, а R_{yx} — в качестве реакции объекта.

Корреляционные функции R_x и R_{yx} определяются следующим образом:

$$R_x(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t+\tau) x(t) dt, \quad (3)$$

$$R_{yx}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T y(t+\tau) x(t) dt. \quad (4)$$

Нас интересует передаточная функция гравиметра по отношению к возмущающим воздействиям. Она определяется через импульсную переходную функцию $k(\theta)$ в уравнении (2). Найдем такое решение этого уравнения, которое удовлетворяет условию физической реализуемости объекта, т. е. возьмем

$$k(t) = 0 \text{ при } t < 0.$$

Будем решать уравнение (2) в частотной области. Сначала умножим обе его части $e^{-i\omega\tau}$ и проинтегрируем по τ от $-\infty$ до $+\infty$. Имеем

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} R_{yx}(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} k(\lambda) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} R_x(\tau - \lambda) d\tau.$$

Произведем в последнем интеграле замену переменной $\theta = \tau - \lambda$. Получим

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} R_{yx}(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} e^{-i\omega\lambda} k(\lambda) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\theta} R_x(\theta) d\theta.$$

Вводя спектральные плотности

$$S_{yx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} R_{yx}(\tau) d\tau, \quad (5)$$

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} R_x(\tau) d\tau \quad (6)$$

и учитывая, что передаточная функция связана с импульсной переходной через преобразование Лапласа

$$\Phi(i\omega) = \int_0^{\infty} k(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (7)$$

получим

$$\Phi(i\omega) = \frac{S_{yx}(\omega)}{S_x(\omega)}.$$

Это и есть искомая передаточная функция гравиметра или, по терминологии радиотехники, частотная характеристика системы.

Зная автоспектральную плотность сигнала на выходе объекта, определяемую как

$$S_y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} R_y(\tau) d\tau, \quad (8)$$

можно найти спектр когерентности (Дженкинс, Ваттс, 1972)

$$\gamma^2(\omega) = \frac{S_{yx}^2(\omega)}{S_x(\omega) \cdot S_y(\omega)} \quad (9)$$

Эта величина представляет собой квадрат коэффициента корреляции для различных частот, характеризуя силу связи между спектральным компонентом реакции прибора и спектральным компонентом входного воздействия.

Практическое определение частотной характеристики гравиметра относительно возмущений и спектра когерентности между реакцией и возмущением заключается в следующем.

1. Вычисление автокорреляционных функций входного и выходного процессов, а также взаимокорреляционной функции между этими процессами.

2. Подвержение найденных корреляционных функций преобразованию Фурье с привлечением временных «окон», т. е. нахождение автоспектральных и взаимоспектральной плотностей.

3. Нахождение частотной характеристики гравиметра путем разделения взаимоспектральной плотности на автоспектральную.

4. Разделение взаимоспектральной плотности на произведение автоспектральных плотностей и тем самым вычисление спектра когерентности.

Передаточная функция состоит из двух частей: амплитудной и фазовой. Первая показывает насколько изменяется амплитуда «гармоники» входного воздействия при прохождении через объект (гравиметр), а вторая — насколько при этом сдвигается ее фаза.

Исходя из вышеприведенного, мы можем полностью определить частотную характеристику нашего объекта (гравиметра) по отношению к возмущающим воздействиям, а также оценить силу связи между спектральными компонентами на входе и выходе прибора. При этом должно быть выполнено условие стационарности и некоррелируемости различных воздействующих на гравиметр возмущений.

Мы применили предложенный метод для определения общего барометрического коэффициента гравиметра Gs-11 № 147, используемого в Таллине на гравиметрической станции Института геологии АН ЭССР с 1965 г. Анализу подлежало 3600 ординат наблюдений в 1976—1977 гг. (Паэсалу, 1985). Для амплитудной передаточной функции были получены приемлемые результаты, для фазовой — несколько худшие. По-видимому, исследуемый ряд наблюдений не был достаточно представительным. Барометрический коэффициент гравиметра Gs-11 № 147 определяли для периодов от 75 до 500 ч при помощи движения нуля-пункта гравиметра, приведенного к стационарному виду фильтром скользящего среднего. Этот фильтр, естественно, применялся и при обработке атмосферного давления. Барометрический коэффициент, соответствующий главному пику в спектре давления при периоде 250 ч составлял 2,6 мкГал/мбар. Из фазового спектра при периоде 308 ч найдено временное запаздывание воздействия атмосферного давления на гравиметр, составляющее 7 ч.

Нахождение частотной характеристики гравиметра по отношению к возмущающим воздействиям необходимо для введения соответствующих поправок (например, за атмосферу, температуру) в определяемые земно-приливные параметры. Для достижения этой цели при помощи разработанной методики следует определить частотную характеристику гравиметра на смежных с приливыми волнами неприливых частотах. Во избежание влияния утечки энергии приливых компонентов на неприливые, запись перед определением необходимо отчистить от приливых

составляющих. Последнее можно сделать путем погашения приливных волн полосовыми цифровыми фильтрами или вычитанием модельного прилива из наблюдаемого. Зная передаточную функцию гравиметра (относительно возмущений) на смежных с приливными частотами, можно при помощи интерполяции определить ее и на приливных частотах. На основе этого, видимо, можно ввести поправки в наблюдаемые амплитуды и фазы приливных волн. Такие поправки можно считать реальными, поскольку основываются на наблюдательном материале и учитывают не только влияние возмущений на конкретный прибор и на силу тяжести, но и возможную частотную зависимость этого влияния.

Итак, описанной нами математической моделью вполне можно пользоваться при разработке методики введения реальных поправок за внешние возмущающие воздействия в наблюдаемые земно-приливные параметры.

ЛИТЕРАТУРА

- Гудз И. Н., Дзулит П. Д. О влиянии атмосферы на силу тяжести и ее потенциал в точках физической поверхности Земли. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1972, вып. 16, 35—38.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. 2. М., 1972, 112.
- Парийский Н. Н., Перцев Б. П., Крамер М. В. Влияние изменений в распределении атмосферных масс на значение ускорения силы тяжести. — В кн.: Повторные гравиметрические наблюдения. М., 1982, 12—26.
- Паэсалу И. Результаты взаимоспектрального анализа смещения нуля-пункта гравиметра Gs-11 № 147 и атмосферного давления. — Изв. АН ЭССР. Геол., 1985, 34, № 3, 115—120.
- Солодовников В. В., Усков А. С. Статистический анализ объектов регулирования. М., 1960.
- Урманцев Ф. М. Оценка влияния суточных изменений атмосферного давления на показания гравиметров, наклономеров и на нивелирные работы. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1975, № 3, 79—82.
- Warburton, R. J., Goodkind, J. M. The influence of barometric-pressure variations on gravity. — Geophys. J. R. astron. Soc. 1977, 48, N 3, 281—292.

Институт геологии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
28/X 1986

J. PAESALU

MAA LOODETE GRAVIMEETRILISI MÖÖTMISI HÄIRIVATE TOIMETE MÄÄRAMINE

Artiklis on esitatud autori poolt varem kasutatud vastastikuse spektraalanalüüsi meetodi teoreetilised alused. Meetodit võib kasutada häirivatest faktoritest põhjustatud paranduste arvutamise meetoodika väljatöötamisel.

J. PAESALU

DETERMINATION OF PERTURBATING INFLUENCES ON GRAVIMETRIC EARTH-TIDE MEASUREMENTS

The author presents theoretical basic elements of the cross-spectrum method used by us earlier for the analysis of atmospheric pressure effect on an Askania gravity meter zero-point drift. It is opined that this technique should be quite suitable for the estimation of perturbing influences on the observed earth-tide parameters.