

ОЦЕНКА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ И ГЕООБЪЕКТОВ

Бодякин Е. В.

Научный руководитель проф. Симонов К. В.

Сибирский федеральный университет

В колебательных замкнутых системах формируются многократные отражения, и их интерференция приводит к формированию стоячих волн. Распространение волны в замкнутом объёме подчиняется волновому уравнению.

Для изучения особенностей стоячих волн в инженерном сооружении или земной поверхности не играет роли, какой источник колебаний используется и, где он расположен. Между двумя жёсткими отражающими поверхностями всегда формируется набор стоячих волн, частоты которых кратны отношению расстояния между отражающими поверхностями к длине волны.

Одной из основных задач инженерной сейсмологии в настоящее время является оценка сейсмической опасности и сейсмостойкости строительных конструкций. Это необходимо для принятия своевременных мер по устранению их сейсмдефицита и, как следствие, снижения рисков и ущерба.

Проведение систематических обследований зданий и сооружений с момента ввода их в эксплуатацию позволяет получить инструментальные данные и определить, в зависимости от продолжительности и условий эксплуатации, уровень их физического состояния, степень износа, возможность и целесообразность реконструкции или необходимость сноса. Одним из таких методов является метод исследования инженерных сооружений на базе изучения микросейсмических колебаний.

В земной поверхности также формируются многократные отражения внутри слоев, и их интерференция приводит к формированию стоячих волн. Это дает возможность выделить общие частотные составляющие, собственные частоты тектонических блоков и изменение характеристик стоячих волн.

В работе рассматривается алгоритмическое и информационное обеспечение для оценки собственных колебаний сооружений и геообъектов.

Отметим, что в замкнутых объёмах, ограниченных жёсткими отражающими поверхностями, поле стоячих волн возникает всегда. Частоты стоячих волн называются собственными частотами, а сами колебания на каждой из собственных частот называются нормальными модами колебаний. Колебания для каждой из нормальных мод описываются выражением (Еманов, Селезнев, 2002):

$$\Psi(x, y, z, t) = A(x, y, z) \cos(\omega_m t + \varphi_{x,y,z}), \quad (1)$$

где $A(x, y, z)$ – называется геометрической формой стоячей волны, $\varphi_{x,y,z}$ – фаза колебаний в заданной точке для конкретной нормальной моды, а ω_m – частота собственных колебаний.

Рассмотрим следующую систему наблюдений и её возможности. Одновременная регистрация колебаний здания под воздействием микросейсм ведётся в опорной точке и i -той точке (группе точек), затем i -тая точка (группа точек) меняет свое положение и вновь проводится регистрация сейсмических колебаний одновременно с опорной точкой. Такими наблюдениями можно детально покрыть исследуемый объект с малокаанальной аппаратурой.

В основу модели сейсмических колебаний инженерных сооружений (земной поверхности) выступают следующие предположения:

- при воздействии микросейсмических колебаний на инженерное сооружение (геологический блок) отличия формирующихся в нём стоячих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, описываются линейной системой, характеристика которой не зависит от времени;
- при воздействии микросейсмических колебаний на здание (геологический блок) отличия бегущих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, не могут быть описаны линейной системой, характеристика которой не зависит от времени;
- линейные связи в изменениях стоячих волн, регистрируемых в двух точках, существуют для каждой пары одноимённых компонент регистрируемых колебаний.

Модель связи колебаний, регистрируемых в двух разных точках имеет вид:

$$\overline{F}_0(t) = F_0(t) + W_0(t), \quad \overline{F}_i(t) = F_0(t) * h_{oi}(t) + W_i(t), \quad (2)$$

где $h_{oi}(t)$ – импульсная характеристика линейной системы, описывающей связь между одновременными записями стоячих волн в точках 0 и i на обследуемом объекте, $W(t)$ – бегущие волны, $F_0(t)$ – запись стоячей волны в опорной точке.

Рассмотрим алгоритм расчёта одновременных записей стоячих волн с опорной точкой. Для модели процесса колебаний в здании (земной поверхности) есть возможность получить одновременные записи стоячих волн из разновременных, последовательных наблюдений с опорной точкой. Процедура обработки в таком случае сводится к

- нахождение частотных характеристик линейных систем $h_{oi}(\omega)$ (спектральный эквивалент);
- запись или формирование независимой реализации процесса колебаний опорной точки при сейсмическом воздействии на исследуемый объект;
- пересчёт стоячих волн из опорной точки с использованием $h_{oi}(\omega)$ во все точки обследуемого объекта.

Формула для расчёта фильтра Винера, обеспечивающего пересчёт колебаний из опорной точки в i -ю, имеет вид:

$$h_{oi}(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n \overline{F}_i(\omega) \overline{F}_0^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n |\overline{F}_0(\omega)|^2}. \quad (3)$$

Данная формула позволяет вести расчёт характеристики фильтра с погрешностью, которая зависит от параметров зарегистрированной реализации естественных колебаний обследуемого объекта. Такими параметрами являются: шаг дискретизации по времени – Δt , длина единичного блока – T , количество блоков в записи – n .

Для оценки количества блоков – n , необходимых для обеспечения заданной погрешности фильтра, применяется спектр когерентности $\gamma(\omega)$, который можно рассчитать по записям микросейсмических колебаний в двух точках обследуемого объекта по формуле:

$$\gamma^2(\omega) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \overline{F}_i(\omega) \overline{F}_0^*(\omega) \right|^2}{\sum_{j=1}^n |\overline{F}_0(\omega)|^2 \sum_{j=1}^n |\overline{F}_i(\omega)|^2}. \quad (4)$$

Спектр когерентности является мерой связи колебаний между двумя точками объекта. Он может быть рассчитан по одновременным записям в любой паре точек обследуемого объекта. Значения $\gamma(\omega)$ лежат в диапазоне 0–1. Единица соответствует случаю, когда в двух точках регистрируются только стоячие волны. При $\gamma(\omega) = 0$ в двух точках площадки регистрируются только бегущие волны.

Полученный алгоритм расчета характеристики фильтров является симбиозом фильтра Винера, свойства когерентности стоячих волн и методов математической статистики.

Далее приведем описание двух натуральных экспериментов. Целью первого эксперимента явилась отработка технологии выделения собственных частот зданий и сооружений на основе пересчета стоячих волн. Работа проводилась в рамках сотрудничества со специалистами отдела геодинамических и экологических рисков СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН. В результате регистрации на четырех этажах исследуемого здания получены трехкомпонентные записи микросейсмических шумов в 53 точках.

Обработка информации проводилась в программе Mathcad. Полученные по формуле (4) спектры когерентности позволили выявить ансамбль собственных частот здания для каждой из трех компонент - вертикальной, горизонтальной, поперечной. Данные спектры были рассчитаны для каждой пары точка - опорная точка (318 спектров).

Из рисунка 1 видно, что когерентность колебаний на собственных частотах на разных компонентах не совпадает (за исключением самых низкочастотных). То есть собственные колебания на таких частотах имеют выраженную направленность – это становится наглядно видно после пересчета наибольшего участка записи в единое поле колебаний на конкретной частоте.

Таким образом, методика пересчета собственных колебаний адаптирована и автоматизирована в части обработки и визуализации экспериментальных данных.

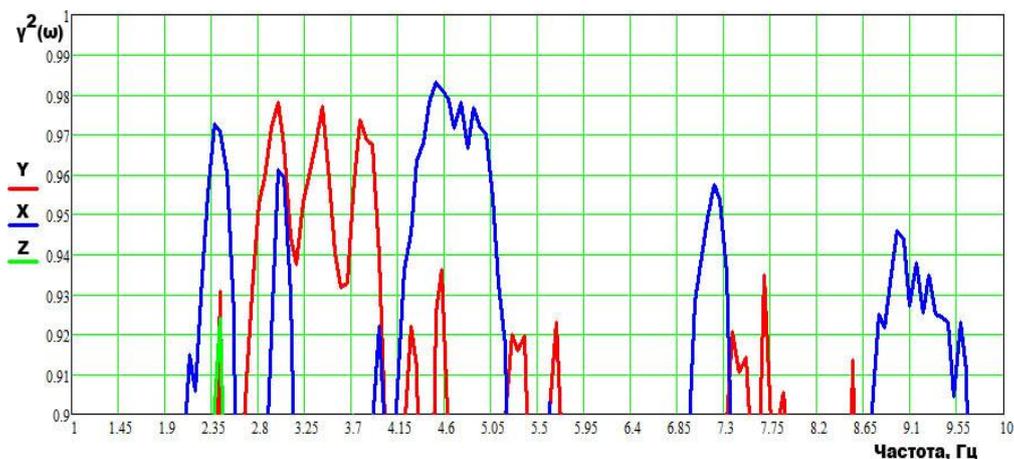


Рис. 1. Спектр когерентности колебаний опорной точки №1 и точки №6.

Второй эксперимент проводился в Богучанском районе Красноярского края в пределах геофизического полигона «Бирюсинский». Полигон, в виде треугольника, охватывает три различных по «жесткости» геоблоки.

Результаты регистрации сейсмических полей представляют собой непрерывные одновременные трехкомпонентные записи на всех пунктах мониторинга. Частота дискретизации 500 Гц. Объем зарегистрированной информации более 200 Gb. В связи с таким большим объемом данных разработана программа на языке C++ для автоматизации обработки сейсмических данных.

Спектры когерентности позволили выявить ансамбль собственных частот полигона. Были пересчитаны поля собственных колебаний на различных частотах используя рассчитанные частотные характеристики фильтра (рис. 2). Так же по среднесуточному изменению значений спектра когерентности определена оценка геодинамической стабильности геологических блоков.

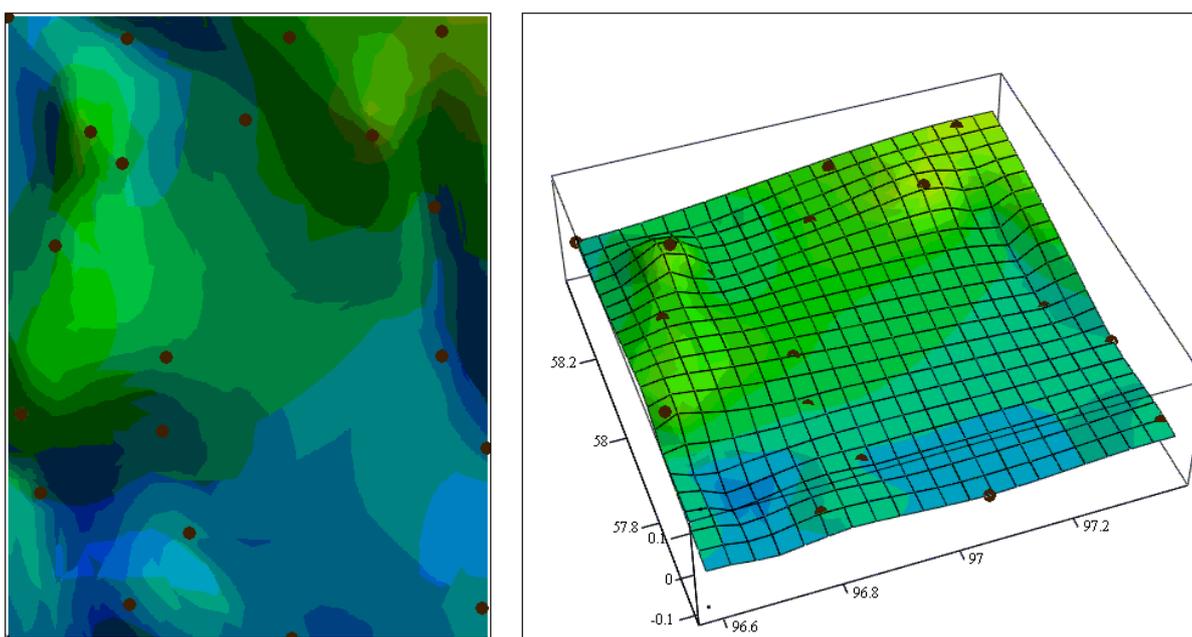


Рис. 2. Визуализация поля собственных колебаний геобъекта (частота 1.9 Гц).

Таким образом, проведен натурный эксперимент, на основе которого выполнены расчеты собственных колебаний для геобъектов и отработана технология их регистрации.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Адаптирован алгоритм и разработан расчетный модуль в среде Mathcad для обработки и визуализации данных наблюдений сейсмических колебаний в зданиях и сооружениях.

Разработаны алгоритм пересчета собственных колебаний в геобъекте и программа на языке C++ для обработки данных натурального эксперимента.

Выполнено моделирование данных натурального эксперимента, получены графики спектра когерентности и поля стоячих волн для сооружений и исследуемого геобъекта на различных частотах.