УДК 550.34.038.3

СПОСОБ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ СИГНАЛОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

© 2014

А.В. Смагличенко, ведущий инженер
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва (Россия)

Ключевые слова: ошибка измерения; частота колебаний; спектральный анализ; статистические оценки.

Аннотация: В работе предложен оригинальный способ оценки погрешности измерительных каналов программно-измерительного комплекса, разработанного автором с целью регистрации высокочастотных колебаний упругих волн.

При изучении внутреннего неоднородного строения Земли геофизические методы базируются, как правило, на наблюдениях, полученных путем непосредственных инструментальных измерений. Качество измерений влияет на достоверность определения изучаемого параметра (см, например, С. Дембицкий [1]). Повышение требований к точности получаемой измерительной информации приобретает растущую актуальность (МИ 3290-2010 [2]).

За последнее десятилетие современный геофизик (А. Горбатиков [3]) разработал метод микросейсмического зондирования, который позволяет определять месторасположение неоднородности по данным низких частот поверхностных волн Рэлея. Метод успешно применялся для определения глубинной структуры различных геологических объектов, включающих вулканические зоны, газовые месторождения (А. Горбатиков [4] и др.), но не исследовался для поиска форменных проявлений неоднородностей грунта, которыми могут быть, например, карстовые обводненные пустоты, ведущие к провалам земляного покрова. Для получения реальных наблюдений, отвечающих распространению волн Рэлея в неглубоких слоях Земли, автором данной статьи было разработано комплексное оборудование, позволяющее регистрировать высокочастотные упругие колебания. Цель настоящей статьи – дать краткое описание комплекса и продемонстрировать предложенный способ тестирования его измерительной части. В работе приводятся характеристики точности измерения частоты упругих колебаний, регистрируемых комплексом, и в заключении даются технические рекомендации по ее повышению.

ПРОГРАММНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Разработанный программно-измерительный комплекс содержит измерительную систему, собранную автором статьи из отдельных комплектующих деталей, и персональный компьютер, содержащий программное обеспечение таких известных фирм как «L-Card», «Component Software», «National Instruments» (США), а также программы по выделению сейсмического сигнала, написанные автором на языке программирования Matlab. На рисунке 1 представлено измерительное оборудование, позволяющее регистрировать высокочастотные упругие волны посредством четырёх пьезодатчиков, имеющих универсальную конструкцию для наибольшего устранения помех при измерениях и для соединения с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Оборудование также включает отладочно-стабилизационную плату; аккумулятор, предназначенный для питания стабилизационной платы; стекло-текстолитовую основу с гнездами для каждого датчика. Верхняя граница полосы пропускания датчиков равна 20000 Гц.

Рис. 1. *Программно-аппаратная часть кейса имеет в своем составе: АЦП (справа), стабилизационную плату (слева), основа с гнёздами для подключения датчиков (вверху). В нижней части кейса размещены пьезодатчики и соединительные провода*

При работе с АЦП использовано программное обеспечение фирмы «L-Card», позволяющее создавать неограниченный размер записи, многомодульный режим работы, любую частоту опроса при записи. Все детали комплекса являются разъемными, что обеспечивает его малогабаритность и многофункциональность при работе в полевых условиях.

МЕТРОЛОГИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ КОМПЛЕКСА

Любой измерительный процесс зависит не только от рабочих характеристик отдельно взятых частей оборудования, например, датчиков с определённой полосой пропускания или же технических характеристик аналогово-цифрового преобразователя, но и от работы измерительного комплекса в целом. Отсюда и возникает необходимость проверки каждого измерительного канала.

При распространении поверхностных волн Рэлея в грунте частоты регистрируемого сейсмического сигнала находятся в диапазоне 0–300 Гц. Таким образом, теоретическая частота, на которую настроен комплекс, превышает реальную в несколько раз. Согласно первому следствию из теоремы Котельникова (Котельников [5])

любой аналоговый сигнал можно восстановить с какой угодно точностью по его дискретным отсчётам, взятым с частотой, большей в 2 раза максимальной частоты, которой ограничен спектр реального сигнала. Отсюда можно утверждать, что сейсмический сигнал, соответствующий поверхностной волне Рэлея должен восстановиться, если его регистрировать созданным в работе программно-измерительным комплексом при определенной частоте дискретизации. Вторым следствием теоремы является утверждение, которое заключается в следующем: если максимальная частота сигнала f_{max} выше половины частоты дискретизации f, «то способа восстановления сигнала из дискретного в аналоговый без искажений не существует». Это следствие понадобится ниже при построении спектров, использующих быстрое преобразование Фурье при достаточно малой частоте дискретизации. Формально его можно записать в следующем виде:

$$f_{max} < f / 2$$

где f_{max} максимальная частота, которой ограничен спектр реального сигнала.

Заметим, что при тестировании частоту опроса надо задавать с некоторым запасом в связи с различными свойствами геофизических сред. Это необходимо для измерения прохождения поверхностных волн Рэлея при проведении экспериментов в реальных условиях, так как в зависимости от свойств среды меняется скорость прохождения волны и, соответственно, ее частотная характеристика, которая может варьироваться в некотором диапазоне. Так, например, для песчаной среды средние частоты пиковых значений спектра составляют около 300–350 Гц, что превышает предполагаемый во многих исследованиях предел частоты для поверхностной волны Рэлея при ее распространении в грунте.

Тестирование и анализ показаний измерительных каналов проводились с применением контролируемого источника колебаний, предложенного автором. Одним из таких источников является музыкальный камертон. Камертон был изобретён в 1711 г. английским музыкантом Дж. Шором и применялся для настройки музыкальных инструментов. Он представляет собой изогнутый металлический стержень в виде двух ветвей с держателем посередине. Ветви камертона начинают вибрировать от щелчка или удара молоточком по одной из них, создавая вокруг себя попеременные сжатия и разрежения воздуха, образуя упругую звуковую волну. Известно, что стандартный музыкальный камертон точно издаёт звук Ля 1-й октавы частотой 440 Гц. Вибрируя на этой частоте, он излучает колебания, характер которых проявляется в виде обычной синусоиды.

Для тестирования оборудования был взят камертон из никелированной стали, имеющий отметку сертификата на одной из ветвей «А 440». Это означает, что физическая характеристика данного прибора точно соответствует частоте 440 Гц. Для более надёжной регистрации звуковых колебаний в подставке для датчика было проделано дополнительное технологическое отверстие, позволяющее надежно монтировать камертон (рисунок 2).

В статье приводятся данные анализа записей каждого из четырех каналов при осуществлении 5-ти ударов по ветви камертона.

Рис. 2. *Камертон вмонтирован в подставку для датчика, регистрирующего воспроизводимые им колебания. Справа - отметка сертификата на одной из ветвей камертона*

Одна из таких записей представлена на рисунке 3, который показывает, что стартовая часть импульса представлена хаотическим нестационарным колебательным процессом, который соответствует моменту удара по камертону, т.е. вступлению звуковой волны и ее модификации со временем. Последующее выравнивание колебательного процесса камертона соответствует синусоиде с постоянной частотой, что типично для колебательного процесса, созданного камертоном. Сегмент полученного колебательного процесса камертона в течение 0,1 сек. показан на рисунке 4. Анализируя изображение, можно видеть, что за данный промежуток времени совершено 44 колебания. Это означает, что за 1 секунду происходит 440 колебаний. Следовательно, уже сейчас можно предположить, что записанная частота упругой волны составляет около 440 Гц. Отметим, что именно эта частота характеризует камертон, который был взят для тестирования.

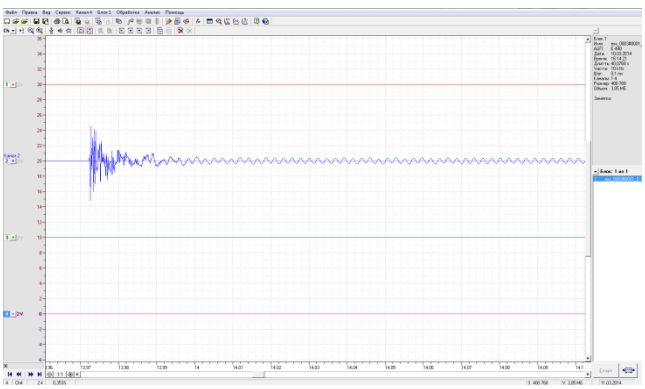

Рис. 3. *Изображение колебательного процесса, записанного каналом 2*

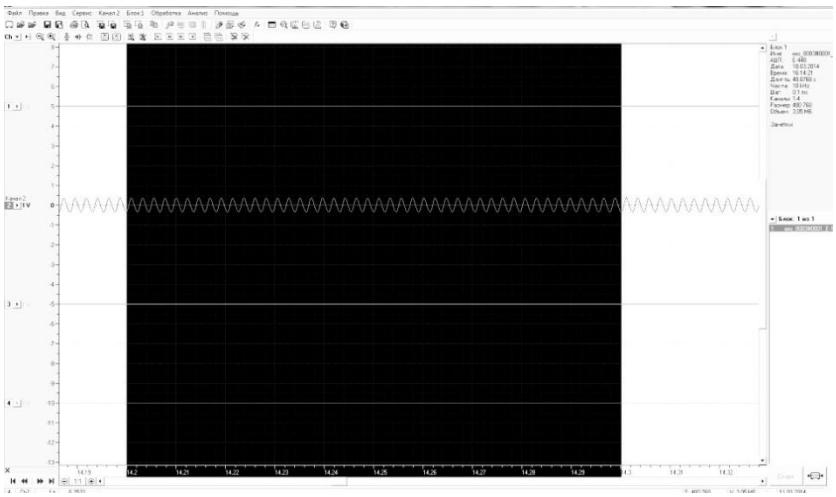

Рис. 4. *Сегмент колебаний, отвечающих продолжительному звучанию камертона*

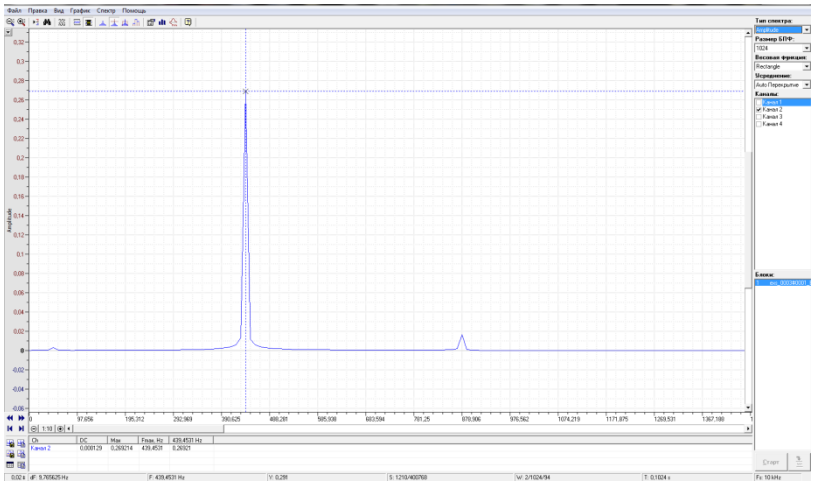

Рис. 5. *Амплитудный спектр, построенный по данным опыта с камертоном*

Для точного вычисления частоты полученных колебаний применяется быстрое преобразование Фурье, позволяющее построить амплитудный спектр, пиковое значение которого характеризует данный физический параметр-частоту. Сбор данных осуществлялся с помощью программы LGraph2 обеспечения «LCard» , разработанной для аналогово-цифрового преобразователя E14-440, входящего в состав оборудования (см предыдущую секцию). Обработка данных, полученных в результате тестирования каналов с использованием камертона, осуществлялась программой Powergraph 3 из программного обеспечения «Component Software». Она способна работать с данными, полученными от нескольких типов АЦП, включая E14-440. Особенностью этой программы – способность импортировать записи данных в чистом виде, то есть без конвертирования в другие форматы, что упрощает процесс обработки. С помощью этой программы возможно построение различных спектров, в том числе амплитудных и спектров мощности, с различным размером быстрого преобразования Фурье (БПФ). Как правило, наиболее часто используются размеры БПФ, равные 1024 и 2048, которые соответствуют шагам дискретизации частоты *dF*, равным 9,7656 Гц и 4,8828 Гц. В зависимости от шага частоты определяется значение пиковой составляющей спектра, которая «привязывается» к наиболее близкому значению, определяемому шагом. На рисунке 5 изображён один из амплитудных спектров, построенный при использовании размера БПФ, равного 1024.

Частотные значения пика составляют 439,4531 Гц, что примерно равно частоте колебаний, излучаемой камертоном. При последующем анализе частотных значений спектров использовался размер БПФ 1048576, имеющий шаг dF=0,009537 Гц, что позволило наиболее точно определить частоты записанных сигналов.

Исследование полученных измерений по каждому каналу (метрология каналов) проводилось путем прямого сопоставления измеренной величины с известной мерой q=440 Гц, которая соответствовала камертону. Погрешность измерений по каждому каналу оценивалась как разность между значением q и, полученными при измерении, значениями x_i. В таблице 1 приведены значения погрешностей измерений для 4-х каналов, каждый из которых имеет четыре записи. Результаты

Таблица 1. *Значения погрешностей для всех каналов*

Канал 1	запись 1	Запись 2	Запись 3	запись 4
импульс 1 (Гц)	1,0619	1,0905	1,0619	1,1095
импульс 2 (Гц)	1,0046	1,0905	1,0619	1,0714
импульс 3 (Гц)	1,0428	1,0714	1,0809	1,0905
импульс 4 (Гц)	1,0619	1,0513	1,0809	1,0142
импульс 5 (Гц)	1,0714	1,0809	1,1286	1,0809
Канал 2	запись 1	Запись 2	Запись 3	запись 4
импульс 1 (Гц)	0,9665	1,0142	0,9757	1,0809
импульс 2 (Гц)	0,9951	1,0046	0,9856	1,0332
импульс 3 (Гц)	1,0428	1,0142	0,9743	1,0619
импульс 4 (Гц)	0,9951	1,0523	0,9951	1,0332
импульс 5 (Гц)	1,0237	1,0619	0,9379	1,0714
Канал 3	запись 1	Запись 2	Запись 3	запись 4
импульс 1 (Гц)	1,0523	1,0809	1,1191	1,0905
импульс 2 (Гц)	1,0714	1,0714	1,0809	1,1191
импульс 3 (Гц)	1,0332	1,0809	1,1095	1,1191
импульс 4 (Гц)	1,0332	1,1095	1,1191	1,1095
импульс 5 (Гц)	1,0714	1,0714	1,0809	1,1191
Канал 4	запись 1	Запись 2	Запись 3	запись 4
импульс 1 (Гц)	1,1095	1,1286	1,1095	1,1382
импульс 2 (Гц)	1,1286	1,1477	1,1668	1,1572
импульс 3 (Гц)	1,1191	1,1382	1,1572	1,1191
импульс 4 (Гц)	1,1095	1,1286	1,1286	1,1763
импульс 5 (Гц)	1,1286	1,1095	1,1572	1,1477

обработки экспериментальных данных записей представлены для 5-ти импульсных ударов, совершенных по камертону.

Оценим математическое ожидание (*mean*) погрешности как случайной величины *X* по следующей формуле (А. Ширяев [6]):

$$M(X) = \frac{\sum_i (q - x_i)}{N}$$

Стандартное отклонение случайной величины *X* или дисперсия (*std*) определяется по следующей формуле:

$$D(X) = M(X - MX)^2$$

Для 1 канала были получены следующие значения *mean*=1,0703; *std*=0,02853; для 2 канала эти значения равны *mean*=1,01598; *std*=0,0387; для третьего канала – *mean*=1,0871; *std*=0,0279; для четвертого канала – *mean*=1,1352; *std*=0,0203. Таким образом, абсолютная погрешность измерений для всех каналов не превышает значение 1,2, а среднеквадратичные ошибки оценивания для каналов не превышают значение 0,04.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерительные каналы комплекса были протестированы посредством измерения частоты упругой волны, излучаемой музыкальным камертоном, который точно издаёт звук Ля 1-ой октавы частотой 440 Гц. Отклонение измеренной частоты от данной характеристики в среднем составило 1,2 Гц. Заметим, что отклонение измеренной частоты от истинной меры может возникнуть из-за стабилизационной платы, которая, возможно, немного искажает сигнал. Для увеличения точности измерительных каналов рекомендуется улучшение показателей электронной схемы стабилизационной платы. А именно, увеличению точности может способствовать добавление керамических конденсаторов на выходы напряжения выпрямителей ad820, добавление фильтров в последовательное соединение конденсаторов и резисторов определённых ёмкостей на выход измерительных каналов. Так же, возможным способом более точной передачи сигнала является монтирование электролитов на выходы напряжения *Dc/Dc* преобразователя.

Разработанный программно-измерительный комплекс и описанный способ метрологии измерительных каналов могут быть использованы не только для проведения научных исследований в условиях реального полевого геофизического эксперимента, но и для проведения лабораторных работ в ВУЗах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дембицкий С.И. Оценка и контроль качества геофизических измерений в скважинах. М.: Недра, 1991. 204 с.
2. МИ 3290-2010. Рекомендация по подготовке, оформлению и рассмотрению материалов испытаний средств измерений в целях утверждения типа / разработано ФГУП «ВНИИМС». М.: Изд-во стандартов, 2010. 34 с.
3. Пат. РФ на изобретение № 2271 554, МПК G01V 1/00. Способ сейсморазведки / А. В. Горбатиков; заявл. 25.03.2005; опубл. 10.03.2006. Бюл. № 7. 9 с.
4. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Цуканов А.А., Тинакин О.В., Комаров А.Ю., Одинцов С.Л., Токман А.К. Новая технология микросейсмического зондирования для изучения глубинного строения месторождений нефти и газа // Нефтяное хозяйство. 2010. № 6. С. 15–17.

5. Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи в журнале «Успехи Физических Наук». 2006. 176 (7). С. 762–770.
6. Ширяев А. Н. Вероятность. М.: Наука, 1980. 574 с.

METHOD TO METROLOGICAL TESTING OF MEASURING CHANNELS FOR HIGH FREQUENCY SIGNALS

© 2014

A.V. Smaglichenko, leading engineer
Federal State Institution of Science the Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow (Russia)

Keywords: measurement error; the oscillation frequency; spectral analysis; statistical evaluation.

Annotation: In this paper the ingenious method estimating the error of measuring channels is proposed for the complex of measuring equipment and software that has been developed by author to record high-frequency vibrations of elastic waves.