

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФОРМЫ УШИРЕНИЙ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВНЕКЛАССНЫХ МОСТОВ

В. И. Наянов, Ю. В. Ноянов

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: YVN@inbox.ru

Описывается автоматизированный ультразвуковой комплекс, предназначенный для визуализации формы уширений буронабивных свай фундаментов мостовых опор.

Ключевые слова: строительство мостовых переходов федерального значения, современные технологии контроля.

Computer Visualization of the Broadening form of Bored Piles by Construction of Extracurricular Bridges

V. I. Nayanov, Yu. V. Noyanov

An automatic ultrasonic system designed to visualize the shape of the broadening of bored piles of foundation piers is described.

Key words: building bridges of federal significance, control technology.

За последние 15 лет в России завершено строительство (в отдельных случаях продолжается строительство второй и третьей очереди) протяженных мостовых переходов федерального значения через реки Волгу и Каму в районе Саратова, Волгограда, Казани, Ульяновска и Астрахани. При строительстве были использованы инновационные разработки, которые позволили сократить как сроки строительства, так и материальные затраты [1]. В 2002 г. за создание и внедрение нового конструктивно-технологического комплекса для сооружения опор мостов ряду специалистов (в том числе и одному из авторов настоящей статьи) была присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Ниже описывается применявшийся при строительстве ультразвуковой комплекс компьютерной визуализации формы уширений буронабивных свай фундаментов мостовых опор. В основе данного метода определения формы и объема уширений буросвай лежит принцип ультразвуковой эхолокации. Спускаемая в измеряемую полость (уширение) акустическая антенна по заданной программе управляется компьютером и за полный цикл измерений продолжительностью 25 минут направленным ультразвуковым лучом сканирует все точки внутренней поверхности исследуемой полости. Полученная таким образом база данных накапливается в памяти компьютера, и по определенной программе форма уширений буронабивных столбов воспроизводится на экране дисплея через несколько

минут после окончания цикла измерений. Возможности программы пользователя позволяют рассматривать исследуемую полость в различных ракурсах с фиксированием необходимых сечений и разрезов. Кроме того, производится определение объема контролируемой выработки грунта с точностью до 5%.

Функциональная схема взаимодействия основных узлов ультразвукового эхолотатора

Комплекс по определению формы и объема полостей, заполненных водой, представляет собой управляемый компьютером ультразвуковой сканирующий эхолотатор. В его состав входят антенный комплекс, блок формирования и коммутации, персональный компьютер с интерфейсной платой и программным обеспечением (рис. 1).

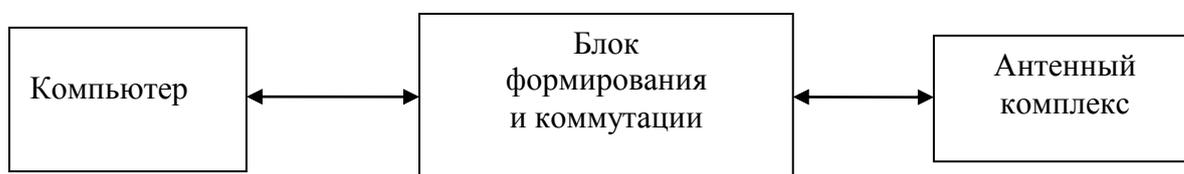


Рис. 1. Блок-схема установки

Антенный комплекс – это направленный пьезокерамический ультразвуковой преобразователь, служащий для получения сканирующего ультразвукового луча. Для получения узконаправленного луча применена система линз, диафрагм и поглотителей. Преобразователь закреплен на азимутальной установке, снабженной датчиками углов поворотов, что позволяет фиксировать его угловое положение с шагом $\pi/32$ в двух угловых координатах.

Блок формирования и коммутации включает усилитель мощности выходного зондирующего сигнала, приемный усилитель отраженного сигнала и коммутатор. На интерфейсной плате персонального компьютера имеются цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифровые выходы для управления моторами азимутальной установки и входы для датчиков углов поворотов.

По программе компьютер генерирует через ЦАП канал, зондирующий амплитудно-частотно модулируемый сигнал, который, проходя через усилитель мощности и коммутатор, подается на ультразвуковой преобразователь. Коммутатор, управляемый компьютером, переключает всю систему либо в режим передачи, либо в режим приема. Электроакустический преобразователь генерирует узконаправленный ультразвуковой пучок, после чего вся система переключается в режим приема сигнала. Рассеянный на поверхности уширения сигнал с преобразователя попадает на приемный усилитель и через АЦП-канал интерфейсной платы вводится в компьютер.

Определение расстояния до поверхности производится по задержке отраженного сигнала. Такие измерения производятся во всех узлах угловой сетки координат антенного комплекса. В итоге в компьютере создаётся файл с массивом значений расстояний от антенны до поверхности полости в угловых координатах.

Существующее программное обеспечение для данного комплекса состоит из трёх частей: программы измерений, программы для ручного или автоматического редактирования результатов и программы для просмотра результатов.

Программа измерений управляет работой всего комплекса для получения массива данных на основе отраженного сигнала. Программа редактирования результатов служит для удаления случайных выбросов, возникающих из-за внешних шумов. Программа просмотра результатов обеспечивает визуализацию исследуемого объекта на дисплее компьютера в виде проволочной модели. Эта программа дает возможность пользователю вращать рассматриваемую модель, делать различные сечения объекта плоскостью, изменять масштаб, выводить на печать содержимое экрана.

Конструктивные особенности и принципы действия системы измерений

Антенный блок. Основой акустической антенны является пьезокерамический диск, на противоположных поверхностях которого нанесены металлические электроды. При подаче на электроды переменного электрического напряжения диск возбуждает в водной среде ультразвуковые волны.

Первая задача – выбор рабочего диапазона частот излучаемых ультразвуковых волн, что связано с учетом различных факторов. Так, снижение несущей частоты сигнала приводит к существенному уменьшению поглощения звука в водной среде, заполненной производственным илом. Это является положительным фактором, поскольку измерительный комплекс должен функционировать в жестких производственных условиях. Уменьшение же рабочего частотного диапазона приводит к увеличению габаритов акустической антенны, что делает неудобной эксплуатацию устройства. Кроме того, при увеличении длины ультразвуковых волн уменьшается доля полезного отраженного от исследуемой поверхности сигнала из-за диффузного рассеяния. Именно этот тип рассеяния – от шероховатой поверхности во все стороны (а не прямое отражение) используется в описываемом приборе. Последнее обстоятельство сказывается на чувствительности (точности) измерительного комплекса в целом.

Увеличение же рабочего диапазона частот акустических волн приводит к значительному возрастанию поглощения ультразвука в глинистом растворе

(реальной среде в уширениях основания буроскважин) и, как следствие, к потере работоспособности измерительного устройства. Таким образом, выбор размеров пьезоэлектрического излучателя основан на компромиссе между указанными выше факторами и является плодом математического и лабораторного моделирования.

Следующая проблема (не менее важная), которая возникала на пути создания акустической антенны, – это формирование ультразвукового луча с заданной диаграммой направленности. Дело в том, что применяемый способ зондирования контролируемой полости с целью повышения разрешающей способности прибора (выявление мелкомасштабных особенностей исследуемой внутренней поверхности уширений) требует сведения к минимуму диаметра поперечного сечения основного звукового луча для выбранного диапазона рабочих частот с центральной частотой порядка 230 кГц. Кроме того, необходимо, чтобы уровень излучения антенной боковых лепестков (побочных лучей) был подавлен по амплитуде по сравнению с основным сигналом, по крайней мере, на порядок. При несоблюдении последнего условия в процессе измерений может возникнуть неоднозначная ситуация, т. е. отраженный «напрямую» сигнал от побочного луча может превосходить по уровню полезное переизлучение при диффузном отражении основного луча, в результате чего возникает ложная информация, которая способна существенно исказить истинный рельеф исследуемой поверхности.

В результате многочисленных лабораторных исследований было найдено такое конструкторское решение:

- диаметр излучателя был специально выбран много больше его толщины с тем, чтобы на этой длине укладывалось несколько десятков длин акустических волн;

- с целью фокусировки излучаемых звуковых волн на расстоянии ~10 мм от диска помещена плосковогнутая сферическая фокусирующая линза;

- для подавления боковых лепестков диаграммы направленности акустической антенны на внешней плоской стороне фокусирующей линзы нанесен слой поглощающего ультразвук вещества.

В результате уровень боковых лепестков диаграммы направленности действительно был подавлен по напряжению почти на порядок по сравнению с основным сигналом, а диаметр акустического луча в месте наибольшей его фокусировки (область Эйри) составил не более 70–80 мм. Такой размер поперечного сечения акустического луча позволяет с достаточной достоверностью контролировать форму поверхности уширений, характерный размер которых варьируется в пределах 1–5 м.

Корпус антенны способен вращаться вокруг осей, проходящих через центр излучающего диска в двух перпендикулярных направлениях. Вращение осуществляется с помощью электродвигателей через понижающие редукторы. На осях вращения корпуса акустической антенны размещены оптические датчики положения углов поворота акустического луча как в

меридиональном, так и в азимутальном направлениях. С помощью этих датчиков осуществляется компьютерное управление последовательностью вращений акустической антенны в процессе зондирования исследуемой поверхности. Поскольку антенный блок предназначен для работы на глубинах порядка 50–100 м, то с целью предотвращения попадания влаги внутрь электродвигателей и оптических датчиков они заполняются прозрачным трансформаторным маслом. Подобное конструктивное решение полностью себя оправдало и в процессе эксплуатации прибора избавило от попадания влаги на все токоведущие элементы конструкции.

Блок формирования и коммутации. Из-за высокой степени затухания ультразвука в водной среде, заполняющей измеряемую полость (уширение заполнено насыщенным глинистым раствором), необходимо было увеличивать мощность зондирующего сигнала и максимально повышать чувствительность приемно-усилительного тракта. Эти требования не позволили установить все части радиотехнического тракта на интерфейсной плате внутри компьютера из-за ограничения мощности блока его питания, а также высокой степени цифровых шумов. Усилители и устройство коммутации, выполненное по диодной схеме, были реализованы в отдельном корпусе с независимым источником питания.

Программное обеспечение и интерфейсная плата. Как указывалось выше, программное обеспечение разделено на три части. Рассмотрим подробнее работу программы проведения измерения. При запуске программы считываются параметры работы из файла инициализации. К этим параметрам относятся временная длительность, начальная и конечная частота зондирующего сигнала, время приема отраженного сигнала, количество повторений зондирования для каждой точки измерения.

Размер исследуемой полости влияет на выбор значения параметра «время приёма отражённого сигнала», которое устанавливается с коэффициентом $\sim 1,5$ от максимально ожидаемого времени прохождения зондирующего сигнала (слишком большое «время приема отраженного сигнала» увеличивает вероятность ошибочной регистрации второго отражения зондирующего сигнала от стенок поверхности), а также на значение параметра «временная длительность зондирующего сигнала» (от данного параметра напрямую зависит минимальное расстояние от антенны до поверхности, которое может быть измерено). В то же время установка слишком малой «временной длительности зондирующего сигнала» приводит к плохому приему сигнала, отраженного от удаленных участков поверхности.

По уровню затухания акустического сигнала в среде, заполняющей исследуемую полость (раствор разбуриваемой породы в воде), устанавливается параметр «количество повторений зондирования». Увеличение этого параметра позволяет улучшить прием при высоком затухании сигнала, но слишком большое значение параметра ухудшает результаты при слабом затухании в среде.

Первоначальный выбор параметров для каждого конкретного случая производился по данным проектных размеров исследуемой полости (уширения основания буросваи) и виду вынимаемой породы, который

позволяет оценить степень затухания. Правильность выбора параметров контролируется при проведении измерения. В случае неудовлетворительного результата измерение прерывается и возобновляется после необходимой корректировки. После инициализации проводится установка антенны в стартовую позицию.

Для управления моторами поворота антенны и получения информации с датчиков угла поворота на интерфейсной плате реализованы четыре выходных и четыре входных цифровых канала с программным обменом через порт «ввода-вывода». Далее программа начинает движение антенны в режиме сканирования. Алгоритм просмотра поверхности следующий: из низшего положения антенна поднимается на 135° , при этом каждые $5,625^\circ$ (угол выбран, как полный оборот 360° , деленный на 64) производится измерение расстояния до поверхности. По достижении 135° (24 точки измерения) останавливается движение антенны вокруг горизонтальной оси, запускается мотор для поворота вокруг вертикальной оси установки и производится поворот на $5,625^\circ$. Далее, остановив движение вокруг вертикальной оси, антенна опускается до низшего положения, также производя 24 измерения. В этом «нижнем» положении осуществляется вновь поворот вокруг вертикальной оси на $5,625^\circ$. Цикл подъемов и опусканий с поворотом в верхней и нижней точках полости продолжается, пока не произойдет полный поворот антенны вокруг вертикальной оси. Алгоритм, при котором происходят «быстрое» движение вдоль меридианов и «медленный» поворот вокруг вертикальной оси, был выбран с целью предотвращения поворота всей установки внутри исследуемой полости.

Рассмотрим подробнее процедуру измерения расстояния до стенки исследуемой полости. Программа через ЦАП-канал интерфейсной платы генерирует зондирующий сигнал согласно таблице, сформированной после инициализации по введенным параметрам. Обмен по ЦАП- и АЦП-каналам интерфейсной платы реализован через *DMA*-контроллер и проводится в 16-битном режиме. Цифроаналоговый преобразователь имеет разрядность 8 бит, а один бит старшего байта обмена используется для формирования сигнала «прием-передача». Во время прохождения зондирующего импульса, закодированного в младшем байте, этот бит установлен в «1» и сигнализирует устройству коммутации о режиме передачи. После окончания зондирующего импульса бит направления установлен в «0» и система переходит в режим приема.

Одновременно с выходным ЦАП-каналом начинает работать входной АЦП-канал (разрядность 12 бит). Общая длительность обмена определяется параметрами инициализации и равно произведению времени приема отраженного сигнала на количество повторений зондирования. В случае нескольких повторений зондирующий сигнал и бит передачи присутствуют в таблице нужное количество раз. Так как запрос по *DMA*-каналу инициализируется интерфейсной платой и синхронизирован установленным на ней кварцевым генератором 2 МГц, полученный в результате измерения

массив значений рассматривается как функция отраженного сигнала от времени. Для повышения соотношения сигнал/шум и точности измерения производится операция свертки функции отраженного сигнала с зондирующим. Полученная функция огибающего фильтра анализируется на предмет максимального пика, и определяется время задержки отраженного сигнала. Это позволяет определить расстояние до исследуемой поверхности. Таким образом, в результате сканирования накапливается массив расстояний от антенны до поверхности уширения в угловых координатах. Во время измерений на экране отображаются форма зондирующего импульса, отраженный сигнал, функция огибающей согласованного фильтра с указанием выбранного пика, а также расстояние до поверхности для каждого измерения.

Общее количество точек измерения достигает 1500, при этом не все измеренные расстояния являются истинными. Возможны ошибки, вызванные помехами, слишком большим затуханием в среде, прямым отражением зондирующего луча в сторону от антенны. Тем не менее большое количество точек измерения позволяет уверенно восстановить форму поверхности при 50% истинных показаний.

Для редактирования полученных результатов (удаления ошибочных точек, сглаживания поверхности) применяется программа из пакета программного обеспечения. В состав пакета также входит программа визуализации результатов измерения, которая позволяет пользователю просматривать поверхность с возможностью поворота последней, производить сечение ее плоскостью под различными углами.

Характер визуализации поверхности зависит от мощности применяемой графической системы: простая прорисовка, полутоновое изображение, трехмерная анимация (файлы в формате пакета *Autodesk 3D Studio* или библиотеки *OpenGL*).

Основное достоинство ультразвукового контроля обусловлено способностью звуковых волн распространяться в водной среде, заполненной производственным илом (шламом), без существенного поглощения, что делает этот метод наиболее предпочтительным по сравнению с другими способами контроля. В методе применяется компьютерная корреляционная обработка сигнала с целью существенного повышения соотношения сигнал/шум отраженного сигнала и точности производимых измерений.

Рассматриваемый измерительный комплекс был апробирован ОАО «Волгомост» на строительстве внеклассных мостов в городах Саратове, Ульяновске, Волгограде, Казани, Астрахани и показал отличные результаты [2].

В настоящее время планируется строительство внеклассных мостовых сооружений в других регионах России, что потребует совершенствования технических средств и технологий при их строительстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Харебава Ж. А., Фанин С. П., Овчинников И. Г., Раткин В. В.* Внеклассные автодорожные мосты Нижневолжского региона. Саратов : Наука, 2008. 360 с.
2. *Наянов В. И., Ноянов Ю. В.* Современные технологии контроля в строительстве внеклассных мостов // Транспортное строительство. 2007. № 1. С. 86–87.