

УДК 621.574.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

А.Г. Батракова*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
ул. Ярослава Мудрого 25, Харьков, 61001, Украина*

Поступила в редакцию 25 мая 2016 г.

В работе рассмотрены результаты экспериментальной проверки предложенных ранее алгоритмов обработки данных георадарного обследования автомобильных дорог и дана оценка воспроизводимости результатов измерений. На основании предварительных экспериментальных исследований подтверждена воспроизводимость измерений временной задержки сигнала при прохождении зондирующего импульса через исследуемую конструкцию дорожной одежды по критерию Кохрена для уровня значимости 0,95. Экспериментально подтверждена работоспособность и адекватность разработанных моделей и алгоритмов, основанных на получении и обработке калибровочных сигналов георадара, при решении задачи определения диэлектрической проницаемости и толщины конструктивных слоев дорожных одежд нежесткого типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эксперимент, испытание, воспроизводимость, сходимість.

В роботі розглянуті результати експериментальної перевірки запропонованих раніше алгоритмів обробки даних георадарного обстеження автомобільних доріг і дана оцінка відтворюваності результатів вимірювань. На підставі попередніх експериментальних досліджень підтверджено відтворюваність вимірювань часової затримки сигналу при проходженні зондуєчого імпульсу через досліджувану конструкцію дорожнього одягу за критерієм Кохрена для рівня значущості 0,95. Експериментально підтверджена працездатність і адекватність розроблених моделей і алгоритмів, які засновані на отриманні та обробці калібрувальних сигналів георадара, при вирішенні задачі визначення діелектричної проникності та товщини конструктивних шарів дорожнього одягу нежорсткого типу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: експеримент, випробування, відтворюваність, збіжність.

The paper discusses the results of experimental verification of the previously proposed data processing algorithms for GPR survey of roads and the evaluation of the reproducibility of the measurement results. On the basis of preliminary experimental studies confirmed the reproducibility of the temporal delay measurement signal during the passage of the probe pulse through the test construction of pavement on Cochran's criterion for significance level of 0,95. Experimentally confirmed availability and adequacy of the developed models and algorithms based on the receipt and processing of the calibration signals of GPR in solving the problem of determining the dielectric constant and thickness of the structural layers of road pavements of non-rigid type.

KEYWORDS: experiment, testing, reproducibility, convergence.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи современных методов и средств неразрушающего контроля состоят в увеличении производительности измерений и повышении их качества. Для решения этих задач развиваются в первую очередь волновые методы. Среди волновых методов в последнее время получают все большее распространение методы, использующие электромагнитные волны (георадары и термографы инфракрасного (ИК) диапазона) и акустические (ультразвуковые импульсы) волны. Чтобы глубже понять достоинства и недостатки этих методов необходимо учесть физические явления, лежащие в их основе. В отличие от других волновых методов, георадарные технологии обладают следующими преимуществами:

а) позволяют в отличие от ультразвуковых и FWD (дефлектометры падающего груза) технологий проводить обследования при движении лабораторий со скоростью транспортного потока;

б) допускают (в отличие от пассивных технологий – тепловизоров) изменение параметров зондирующего импульса (амплитуда, частота повторения, накопление, поляризация) с целью повышения чувствительности прибора и достоверности получаемых результатов;

в) опираются на физически более богатые явления, связанные с возможностью использования поляризационных свойств электромагнитных волн.

Как показывает анализ данных [1-7], наибольшим потенциалом для оценки текущего состояния дорожных одежд обладают георадары, применяемые как самостоятельно, так и в комбинации с другими техническими средствами обследования дорог. Для успешной реализации преимуществ георадарных технологий необходимо решить ряд технических и математических задач, связанных как с разработкой и усовершенствованием самого георадарного оборудования (более совершенные антенные блоки и генераторы), так и с разработкой моделей дорожных одежд и принципиально новых алгоритмов обработки получаемых данных. Как и во всех задачах, связанных с экспериментальными

исследованиями, в данном случае важную роль играет оценка влияния внутрилабораторных дисперсий на результаты экспериментов.

Отсюда следует и цель данной работы – оценка воспроизводимости результатов экспериментов в процессе мониторинга дорожных одежд с применением георадара «ОДЯГ-1».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проведении мониторинга дорожных одежд согласно нормативным документам [8] основу оценки состояния составляют результаты лабораторных и полевых экспериментов с применением георадаров. При проведении обследований с использованием георадара «ОДЯГ-1» (рис.1.) необходимо, чтобы результаты были воспроизводимы, то есть, чтобы результаты экспериментальных исследований, проведенных в одинаковых условиях, не имели существенных различий.

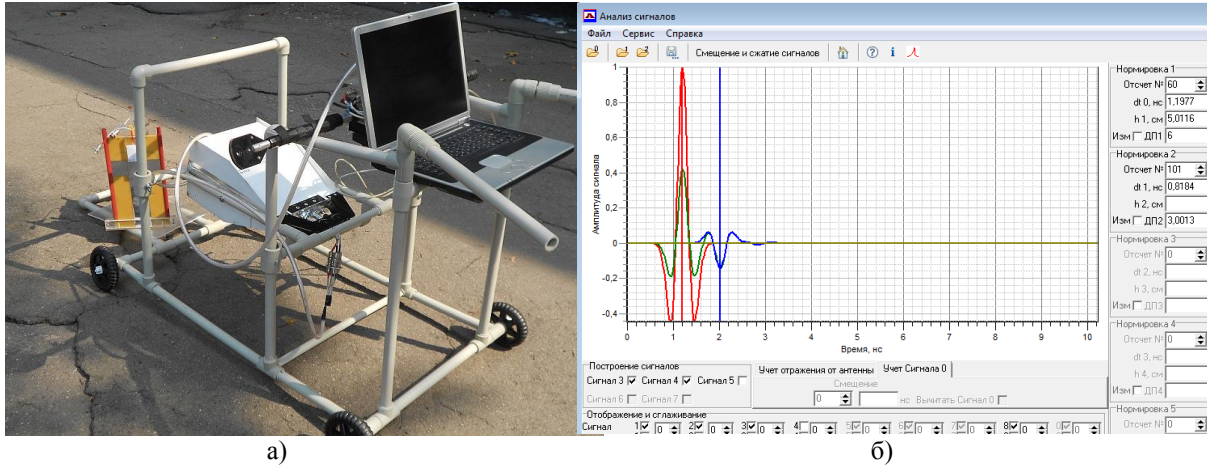


Рис. 1. Георадар «Одыг 1» (а) и окно программы «GeoVizu» (б) при обработке результатов измерений.

Поэтому в процессе экспериментов измерялось время прохождения зондирующего импульса через исследуемую конструкцию дорожной одежды – задержка сигнала. По величине задержки сигнала восстанавливалась толщина исследуемого конструктивного слоя:

$$h = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon}}, \tag{1}$$

где h – толщина исследуемого слоя, см; c – скорость света в вакууме, $c = 30$ см/нс; t – задержка сигнала, нс; ϵ – диэлектрическая проницаемость исследуемого слоя.

Всего выполнено четыре серии экспериментов ($n=4$) по пять параллельных экспериментов в каждой серии ($m = 5$), таблица 1. Параллельными являются эксперименты, проводимые в одинаковых условиях, то есть при одних и тех же значениях входных переменных. Для обработки результатов экспериментов вычислим математическое ожидание и дисперсию в каждой серии:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_{ij}, \tag{2}$$

где \bar{Y}_i – оценка математического ожидания результатов эксперимента в i -й серии; m – число параллельных экспериментов; Y_{ij} – результат j -го эксперимента в i -ой серии;

Таблица 1. Исходные данные и результаты экспериментов

Номер серии	Входные параметры		Восстановленная толщина пакета асфальтобетонных слоев, см, при повторности				
	толщина слоя асфальтобетона, см	диэлектрическая проницаемость материала слоя	1	2	3	4	5
1	7	6	7,4	7,1	7,5	7,3	6,9
2	6,5	6	6,8	7,1	6,7	6,5	6,7
3	12	6	12,2	11,4	12,5	11,9	11,7
4	17,5	6	17,3	17,2	17,3	17,5	17,6

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2, \quad (3)$$

где S_i^2 – оценка дисперсии результатов эксперимента в i -ой серии.

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Обработка результатов эксперимента

Номер серии	Номер параллельного эксперимента					\bar{Y}_i	S_i^2
	1	2	3	4	5		
1	7,4	7,1	7,5	7,3	6,9	7,24	0,0567
2	6,8	7,1	6,7	6,5	6,7	6,76	0,0480
3	12,2	11,4	12,5	11,9	11,7	11,94	0,1830
4	17,3	17,2	17,3	17,5	17,6	17,38	0,0270

Для проверки воспроизводимости результатов измерений рассчитываем критерий Кохрена [9]:

$$G_p = \frac{\max S_i^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4)$$

где G_p – расчетный критерий Кохрена; $\max S_i^2$ – максимальное значение дисперсии из числа рассматриваемых параллельных серий N .

$$G_p = \frac{0,183}{0,0567 + 0,048 + 0,183 + 0,027} = 0,581.$$

По таблице распределения критических точек критерия Кохрена в зависимости от уровня значимости q , числа степеней свободы $f = m - 1$ и числа серий N определяем критическую точку.

Для уровня значимости $q = 0,95$, числа степеней свободы $f = 5 - 1 = 4$ и числа серий экспериментов $N = 4$ критерий Кохрена составляет [9]:

$$G_{кр} = G(q, f, N) = 0,62.$$

Поскольку $G_p < G_{кр}$, то есть $0,581 < 0,62$, то эксперименты следует считать воспроизводимыми. Поскольку эксперименты воспроизводимы, то вычисляем ошибку эксперимента – дисперсию воспроизводимости:

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2; \quad (5)$$

$$S_0^2 = \frac{1}{4} \cdot (0,0567 + 0,048 + 0,183 + 0,027) = 0,0787.$$

Дисперсия воспроизводимости экспериментов S_0^2 является оценкой дисперсии переменной состояния σ_y^2 .

В некоторых экспериментах повторные измерения отклика в параллельных опытах дают один и тот же результат. В этих случаях для расчета дисперсии воспроизводимости воспользуемся метрологическими характеристиками георадара. В паспортных данных георадара указывается количество отсчетов (k) в развертке (T). Это позволяет определить максимальную ошибку измерения:

$$\Delta \max = \left(\frac{T}{k} \right) m, \quad (6)$$

где $\Delta \max$ – максимальная ошибка измерений, нс; T – развертка, установленная при измерениях (для георадара «ОДЯГ-1» принимает значения 5 нс, 10 нс, 25 нс), нс; k – количество отсчетов в развертке (для георадара «ОДЯГ-1» $k = 512$); m – точность определения максимума сигнала, отсчетов ($m = 5$).

Случайная ошибка отсчетов георадара подчиняется нормальному закону распределения. В радиоэлектронной аппаратуре надежность 0,95 является допустимой. Поэтому принимаем $\Delta \max = 2\sigma_y$. Подставляя значение $\Delta \max = 2\sigma_y$ в выражение (6), получим дисперсию:

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{Tm}{2k} \right)^2. \quad (7)$$

Дисперсию воспроизводимости полагаем равной:

$$S_0^2 = \sigma_y^2 = \left(\frac{Tm}{2k} \right)^2. \quad (8)$$

Для развертки 10 нс получим $S_0^2 = 0,00238$. Таким образом, полученные статистические характеристики свидетельствуют о воспроизводимости результатов измерений.

Дальнейшую обработку результатов лабораторных и полевых экспериментов необходимо проводить в соответствии с алгоритмами, предложенными в работах [10-11].

ВЫВОДЫ

Поскольку в основе методов оценки основных параметров дорожной одежды с помощью георадарных технологий лежит определение диэлектрической проницаемости и толщины слоев, в работе рассмотрены результаты экспериментальной проверки предложенных алгоритмов обработки данных георадарного обследования автомобильных дорог и дана оценка воспроизводимости результатов измерений. На основании предварительных экспериментальных исследований подтверждена воспроизводимость измерений временной задержки сигнала при прохождении зондирующего импульса через исследуемую конструкцию дорожной одежды по критерию Кохрена для уровня значимости 0,95. Дисперсия воспроизводимости, рассчитанная на основании метрологических характеристик георадарного оборудования, составила 0,00238.

Экспериментально подтверждена работоспособность и адекватность разработанных моделей и алгоритмов, основанных на получении и обработке калибровочных сигналов георадара, при решении задачи определения диэлектрической проницаемости и толщины конструктивных слоев дорожных одежд нежесткого типа. Абсолютное отклонение расчетной толщины слоя от фактических значений, соответствующее 95 % доверительной вероятности составляет $\mu = \pm 0,158$ см, что не превышает абсолютных отклонений, допускаемых нормативными документами $\pm 0,5$ см. Полученные результаты свидетельствуют о высокой точности разработанного алгоритма восстановления диэлектрической проницаемости и последующего определения толщины слоев конструкции дорожной одежды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ground penetrating radar, theory and applications / [Jol Harry M. (Editor)]. – Amsterdam : Elsevier B.V., 2009. – 508 p.
2. Батраков Д.О. Применение электромагнитных волн для анализа гидрогеологических условий и диагностики свойств дорожных одежд / Д.О. Батраков, А.Г. Батракова // Вестник Харьковского Национального автомобильно-дорожного университета. – 2002. – Вып. 17. – С. 87–91.
3. Батракова А.Г. Определение плотности и влажности грунтов земляного полотна методами георадиолокации / А.Г. Батракова, Д.О. Батраков // Дороги і мости: зб. наук. статей – К.: ДержНДІ ім. М. П. Шульгіна – 2006. – Вип. 5. – С. 15–35.
4. Maierhofer C. Nondestructive Evaluation of Concrete Infrastructure with Ground Penetrating Radar / C. Maierhofer // Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE. – 2003. – Vol. 15. – Issue 3. – P. 287–297.
5. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие [для студ. высш. уч. завед.] / Владов М.Л., Старовойтов А.В. – М.: МГУ, 2004. – 153 с.
6. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография / [под ред. А.Ю. Гринева]. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
7. Леонович И.И. Диагностика автомобильных дорог : учеб. пособие / И.И. Леонович, С.В. Богданович, И.В. Нестерович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – 350 с.
8. Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування : М 02071168-725:2013 – [Чинний від 2014-01- 01]. – К. : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2013. – 52 с. – (Методика).
9. Грушко И.М Основы научных исследований / И.М. Грушко, В.М. Сиденко. – Х. : ХНУ, 1983. – 224 с.
10. Батракова А.Г. Оценка состояния дорожных одежд с привлечением георадарных технологий : монография / А.Г. Батракова. – Х. : ХНАДУ, 2013 – 152 с.
11. Головин Д.В. Алгоритм определения задержки импульсных сигналов, основанный на преобразовании Гильберта / Д.В. Головин, С.В. Греков, Д.О. Батраков, А.Г. Батракова // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна: Радіофізика та електроніка. – 2009. – № 853. – Вип. 14. – С. 68–73.