

УДК 621.574.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АНТЕННОГО БЛОКА ГЕОРАДАРА «ОДЯГ»

Д.О. Батраков¹, Г. П. Почанин², П.В. Холод², В.П. Рубан², А.А. Орленко²,
А.С. Кундиус¹

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, радиофизический факультет.
пл.Свободы 4, Харьков, 61077, Украина
e-mail:rff_bat5@yahoo.com

²Институт радиофизики и электроники НАН Украины.
ул. Ак. Проскуры 12, Харьков, 61085, Украина
Поступила в редакцию 21 мая 2016 г.

С помощью макетов измерительных установок определена форма импульсов дипольных антенн типа «бабочка» георадара «Одяг». Проведенные вычислительные эксперименты по моделированию работы антенных блоков георадара позволили определить реальную форму первичных импульсных сигналов, используемых при зондировании и установить особенности взаимодействия приемных антенн при реализации принципа частотнонезависимой компенсации сигнала прямого прохождения. Анализ формы синтезированных на ЭВМ сигналов позволил обосновать оптимальное расстояние между приемными антеннами в рассматриваемом случае. Полученные результаты призваны обеспечить повышение пространственной разрешающей способности георадаров и надежности результатов обработки импульсных сигналов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дипольные антенны, импульсные сигналы, плоскослоистые среды.

За допомогою макетів вимірювальних установок визначена форма імпульсів дипольних антен типу «метелик» георадара «Одяг». Проведені обчислювальні експерименти з моделювання роботи антенних блоків георадара дозволили визначити реальну форму первинних імпульсних сигналів, які використовуються при зондуванні і встановити особливості взаємодії прийомних антен при реалізації принципу частотнонезалежної компенсації сигналу прямого проходження. Аналіз форми синтезованих на ЕОМ сигналів дозволив обґрунтувати оптимальну відстань між приймальними антенами в даному випадку. Отримані результати покликані забезпечити підвищення просторової роздільної здатності георадарів та надійності результатів обробки імпульсних сигналів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дипольні антени, імпульсні сигнали, плоскошаруваті середовища

By use of designed measurement units we defined impulse of the GPR "Odyag" "butterfly" dipole antennas form. Provided numerical experiments for modeling work GPR antenna units allow us to determine the real shape of the primary pulse signals used for probing and set the features of the interaction of receiving antennas in the implementation of the principle of compensation frequency-independent direct path signal. Analysis of the shape of the synthesized signal by the computer software allowed us to justify the optimal distance between the receiving antennas in the present case. The results are intended to provide increasing the spatial resolution of ground penetrating radar and reliability of pulsed signal processing results.

KEYWORDS: dipole antenna, pulse signals, stratified medium.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение пространственной разрешающей способности средств неразрушающего контроля, в том числе и георадаров, является актуальной задачей современной радиофизики и теории обработки сигналов [1-4]. Преимущества импульсных георадаров при решении данного класса задач состоят в наличии значительного количества информации, приносимой сверхширокополосными (СШП) сигналами, отраженными от внутренних структурных границ исследуемой среды. Вместе с тем, для интерпретации данных неразрушающего контроля плоскослоистых сред характерно наличие ряда особенностей, связанных как с наличием переотражений импульсных сигналов от внутренних структурных границ раздела, так и с необходимостью разделения сигналов при условии, что задержка во времени между ними меньше, чем длительность импульса. В этой связи задачу можно условно разделить на две составляющие: математическую и техническую. С точки зрения математической обработки отраженный сигнал представляет собой результат операции свертки относительно зондирующего [1]:

$$e_s(t, \mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau, \mathbf{r}) \cdot e_i(\tau, \mathbf{r}) d\tau, \quad (1)$$

где: $e_i(\tau, \mathbf{r}), e_s(t, \mathbf{r})$ - зондирующий и отраженный сигналы, $h(t - \tau, \mathbf{r})$ - функция импульсного отклика системы (среды, объекта), t, τ, \mathbf{r} - временные и пространственная координаты соответственно. Одна из первичных задач математической обработки в случае толщинометрии плоскостойких сред – с максимальной возможной точностью определить временную задержку отраженных от внутренних неоднородностей сигналов, т.е. по сути – разделить сигналы во времени. Понятно, что чем короче зондирующий импульс, тем легче решить эту задачу. Однако, по мере сокращения длительности импульса (уширения его спектра) увеличивается и поглощение (высокочастотных компонент спектра), что приводит к искажению формы и ослаблению отраженного сигнала. В связи с этим возникает задача обработки более длительных (по сравнению с электрической толщиной слоев конструкции) импульсов, а также техническая задача – разработка антенн (антенных блоков) и генераторов, обеспечивающих необходимую (оптимальную для обработки) форму излучаемых сигналов. Кроме того, антенные блоки должны обеспечивать минимальные искажения сигналов при приеме и передаче для оцифровки. Отсюда и задача данной работы – анализ возможностей различных антенных систем и оптимизация антенного блока георадара «Одыг».

ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Основная задача, стоящая перед разработчиками георадаров – создание систем с минимальным влиянием на приемный тракт зондирующего сигнала (сигнала прямого прохождения). В качестве мер подавления такого паразитного сигнала предлагались такие операции как удаление среднего [5] и аппаратная компенсация сигнала прямого прохождения с помощью параллельной с отраженным сигналом подачи на вход приемника инвертированного излученного импульса [6]. Однако, в первом случае удаление среднего в рассматриваемых задачах подповерхностного зондирования плоскостойких сред приведет к попутному удалению полезных сигналов от внутренних границ. Во втором случае предложенная процедура применима в основном к так называемым узкополосным системам, когда сигналы имеют синусоидальную либо близкую к ней форму (т.е. достаточно узкий спектр). В случае же широкополосных и СШП сигналов такая коррекция оказывается неэффективной ввиду невозможности достижения приемлемой компенсации во всем частотном диапазоне (частотных искажений сигнала) и нестабильности генератора и приемника. Поэтому в [7] был предложен способ частотно независимой компенсации сигнала прямого прохождения. Его суть заключается во включении в конструкцию блока приемных антенн, состоящего из двух идентичных дипольных антенн типа «бабочка», расположенных симметрично относительно плоскости передающей антенны и соединенных в обратной полярности (чтобы входящие сигналы вычитались). В таком случае для дальнейшей оцифровки будет поступать разность двух сигналов, отраженных от исследуемой структуры (при условии идеальной настройки и полностью симметричной конструкции антенн). В процессе обработки необходимо, как уже говорилось выше, вычислить временную задержку между сигналами, отраженными от наружной и внутренних границ, для чего может быть использовано преобразование Гильберта [8,9] либо интегральное преобразование, предложенное в [10]. Преобразование Гильберта определяется следующими известными соотношениями – прямое преобразование Гильберта:

$$\tilde{e}(t, \mathbf{r}_o) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e(\tau, \mathbf{r}_o)}{t - \tau} d\tau, \quad (2)$$

где функция $1/(t - \tau)$ называется ядром преобразования Гильберта. Обратное преобразование Гильберта:

$$e(t, \mathbf{r}_o) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{e}(\tau, \mathbf{r}_o)}{t - \tau} d\tau, \quad \mathbf{r}_o - \text{точка наблюдения.} \quad (3)$$

Преобразование, предложенное в [10] предполагает двойное интегрирование временного профиля (по времени) с переменными верхним пределом:

$$S(t, \mathbf{r}_o) = \int_0^t \int_0^{\tau} e(\tau', \mathbf{r}_o) d\tau' d\tau. \quad (4)$$

В силу известного математического свойства интеграла с переменным верхним пределом (производная от него по верхнему пределу равна подынтегральной функции, вычисленной при этом пределе) вместо вычисления двойного интеграла с последующим определением экстремумов (по корням производной) проще сразу вычислить нули производной, как корни однократного интеграла с переменным верхним пределом:

$$S(t, \mathbf{r}_o) = \int_0^t e(\tau, \mathbf{r}_o) d\tau. \quad (5)$$

Результаты соответствующих вычислительных экспериментов и данных обработки реальных сигналов георадара «Одяг» представлены на рис.1-5. Прежде всего, была проведена регистрация излучаемого передающей антенной сигнала с помощью одной приемной антенны «бабочка», расположенной напротив передающей антенны таким образом, что оси их основного излучения (приема) совпадали. Зарегистрированный сигнал и его преобразования показаны на рис.1.

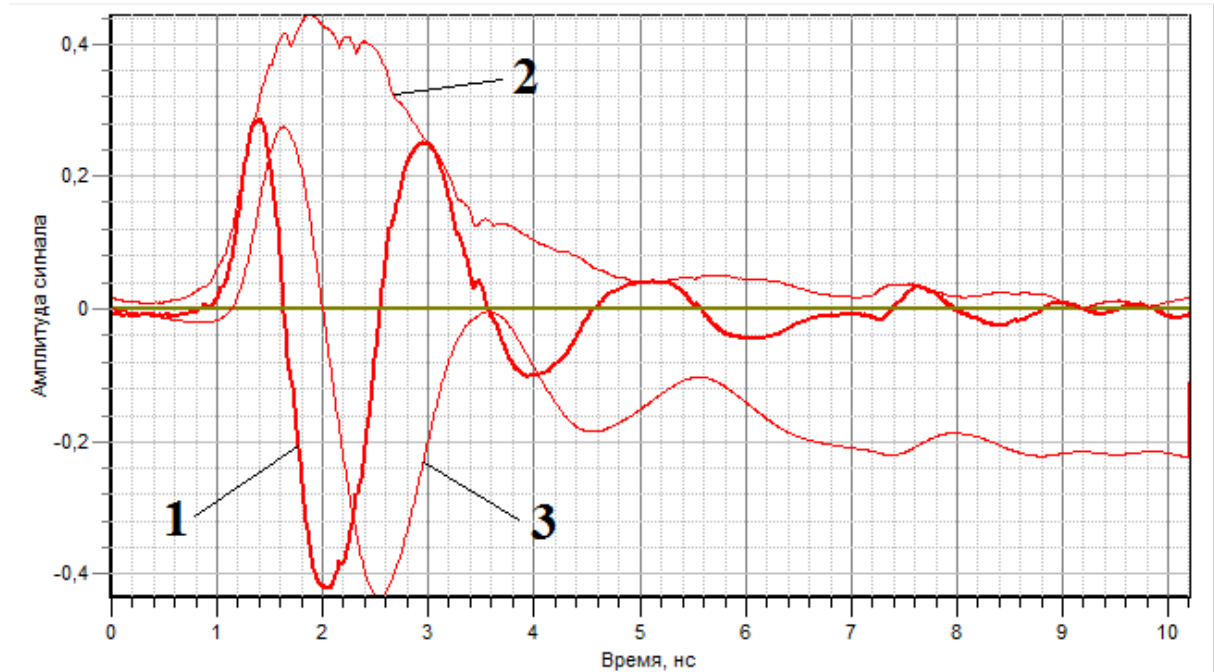


Рис. 1. Временное распределение при регистрации прямого сигнала. 1 – сигнал; 2 – преобразование Гильберта; 3 – интегральное преобразование (5).

Затем были проведены серии экспериментов по моделированию отражения листом металла сигналов, излученных и принятых моделью антенного блока георадара «Одяг» (рис.2.)



Рис.2. Общий вид экспериментального макета при исследовании отражения от листа металла.

Основная идея антенного блока АБ такого георадара заключается в частотно-независимой компенсации сигнала прямого прохождения, поступающего в приемный тракт, минуя исследуемую среду [7]. Для решения вопроса об оптимальном расстоянии между приемными антеннами были проведены серия экспериментов на лабораторной модели и численное моделирование такой компенсации в зависимости от этого расстояния с учетом установленной экспериментально формы импульсов. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3, а некоторые результаты моделирования

представлены на рис.4. Рис 3.(а) иллюстрирует влияние расстояния между антеннами на амплитуду и ширину импульса, а рис. 3.(б) – на результат его преобразования Гильберта. На рис. 4 (а) отображены смещенные импульсы разной амплитуды, а на рис 4 (б) результат (S) их вычитания. Очевидно, что при вычитании импульсов типа сомбреро итоговый сигнал всегда будет иметь не менее 4 «лепестков», что наиболее заметно при одинаковой амплитуде (рис. 4 (в)).

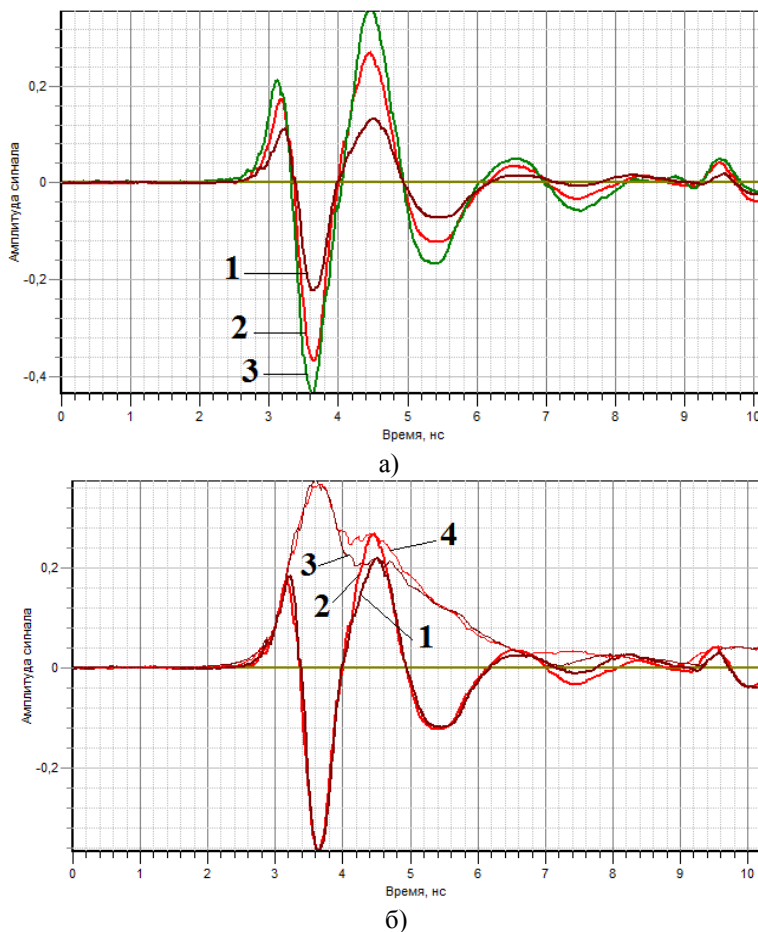


Рис. 3. Форма сигналов (а) при разных расстояниях между приемными антеннами: 1 – 4 см., 2 – 8 см., 3 – 12 см. Сигналы и их преобразование Гильберта (б): 1 – 4см. (сигнал), 2 – 8 см. (сигнал), 3 – преобразование Гильберта сигнала 1, 4 – преобразование Гильберта сигнала 2.

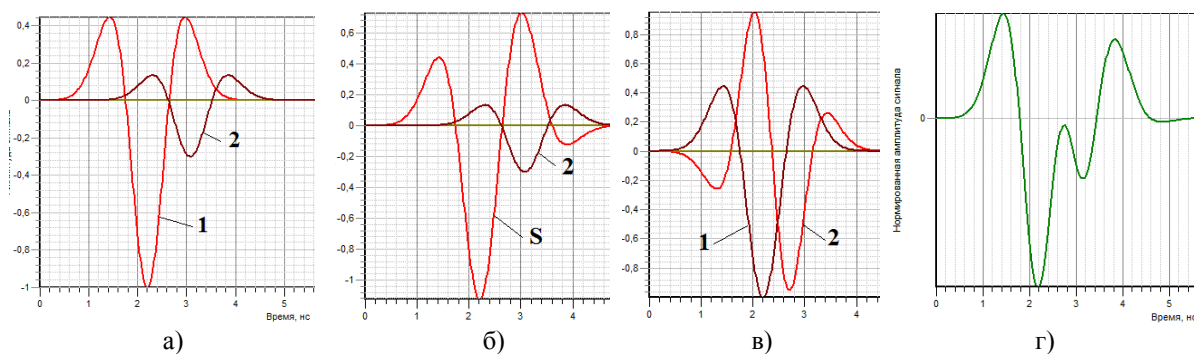


Рис. 4. Результаты вычитания различных импульсов. а) – два импульса (1,2) разной амплитуды, б) результат их вычитания (S); в) результат вычитания (2) двух импульсов (1) смещенных на 0.5 нс.; г) итог вычитания трех импульсов разной амплитуды и обладающих разной задержкой.

При условии вычитания трех импульсов (один из них является переотражением от передающей антенны импульса, отраженного от поверхности среды либо металла при калибровке в соответствии с процедурой, описанной в [11]) форма импульса усложняется и приобретает новые характерные отличительные черты (рис.4 (г)). В заключение на рис. 5 приведены импульсы реальных антенных блоков типа АБ георадара «Одяг». В одном случае импульсы соответствуют суперпозиции двух

одинаковых по форме, но разных по амплитуде сигналов, а во втором случае импульс – суперпозиция трех сигналов.

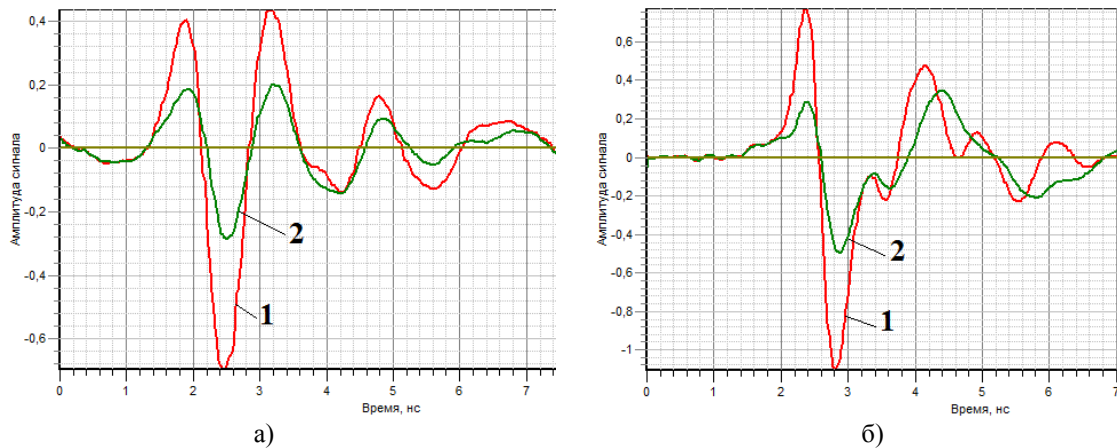


Рис. 5. Импульсы георадара «Одяг». а) Импульсы, отраженные от металла - 1 и от дорожной конструкции – 2 при измерениях 18.04. 2013г. на трассе М-18. б). Отражение от металла -1 и конструкции из кирпича -2 при отладке антенного блока 17. 03. 2016 г.

ВЫВОДЫ

Таким образом, с помощью макетов измерительных установок определена форма импульсов дипольных антенн типа «бабочка». Проведенные вычислительные эксперименты по моделированию работы антенных блоков георадара «Одяг» позволили определить реальную форму первичных импульсных сигналов, используемых при зондировании и установить особенности взаимодействия приемных антенн при реализации принципа частотнонезависимой компенсации сигнала прямого прохождения. Анализ формы синтезированных на ЭВМ сигналов и преобразования Гильберта реальных импульсов позволил обосновать оптимальное расстояние между приемными антеннами в рассматриваемом случае. При условии существующей геометрии диполей это расстояние оказалось равным 5 см. Следует также отметить, что требования максимальной чувствительности (амплитуды сигнала) и минимальной длительности результирующего сигнала (наилучшей разрешающей способности) являются противоречивыми, что требует отдельного рассмотрения задачи их согласования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Astanin L. Yu. *Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing*. / L. Yu. Astanin and A.A. Kostylev - The Institute of Electrical Engineers, London, 1997, 256p.
2. Taylor J.D *Ultrawideband radar applications and design*. / Taylor J.D - CRC Press, Boca Raton, FL, 2012, 536 p.
3. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие [для студ. высш. уч. завед.] / Владов М.Л., Старовойтов А.В. – М. : МГУ, 2004. – 153 с.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации : коллективная монография / [под ред. А.Ю. Гринева]. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с.
5. Головки М.М. Удаление тренда в георадарных данных/ Головки М.М., Сытник О.В., Почанин Г.П.// ЭМ волны и электронные системы. – 2006. – Т.11, №2-3. – С. 99-105.
6. Zhuravlev, A., Ivashov, S., Razevig, V., Vasiliev, I. and Bechtel, T. “Shallow depth subsurface imaging with microwave holography,” *Proc. of SPIE Symposium on Defense and Security. Radar Sensor Technology XVIII Conference. Baltimore, Maryland, USA May 5-7, 2014, Vol.9072*, pp. 90720X-1...9.
7. Копилов Ю.О. Спосіб розв'язки між передавальним і приймальним модулями антенної системи. Патент № 81652 України, МПК (2006) H01Q 9/00 H01Q 19/10. / Копилов Ю.О., Масалов С.О., Почанин Г.П. // (Україна); Інститут Радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова Національної академії наук України. – а2005 08109 Заявлено 17.08.2005; Опубл. 25.01.2008, Бюл.№2.
8. Крылов В.В. Определение понятия задержки сигнала по Гильберту и методы её измерения / В.В. Крылов, Д.М. Пономарев // Радиотехника и Электроника. – 1980. – Т.25, №1. – С.204-206.
9. Batrakov D. O. Hilbert transform application to the impulse signal processing / D. O. Batrakov, A. G. Batrakova, D.V. Golovin // Proceedings of UWBUSIS'2010 – Sevastopol, Ukraine. – 2010. – September 6-10, P. 113-115.
10. Astanin L. Yu. The structural features of ultrawideband signals / L. Yu. Astanin, M. V. Kipke, V. V. Kostyleva // Proceedings of UWBUSIS'2008 – Sevastopol, Ukraine. – 2008. – 15-19 September, P. 180-182.
11. Батраков Д.О. Определение толщин слоев дорожной одежды методом георадиолокационного зондирования / Д.О. Батраков, А.Г. Батракова, Д.В. Головин, О.В. Кравченко, Г.П. Почанин // Физические основы приборостроения. – 2014. – Том 3, №2. – С. 46-57.