

УДК 621.574.4

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОРАДАРА ДЛЯ  
КОНТРОЛЯ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД****Д. О. Батраков<sup>1</sup>, К.С. Белошенко<sup>1</sup>, А.Г. Батракова<sup>2</sup>, М.С. Антюфеева<sup>1</sup>***1- Харьковський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедицинської  
електроніки і комп'ютерних систем  
пл. Свободи 4, Харків, 61022, Україна**2 - Харьковський національний автомобільно-дорожній університет,  
ул. Ярослава Мудрого 25, Харків, 61001, Україна*

Поступила в редакцію 19 апреля 2017 г.

Рассмотрены возможности совместного применения сверхширокополосных импульсов георадара и алгоритма обработки поляризационного состояния отраженных плоскостойкой средой электромагнитных волн для решения задачи толщинометрии плоскостойких сред. Такой метод отличается от ранее известных подходов в первую очередь применением сверхширокополосных импульсных сигналов совместно со специализированными антенными блоками современного георадара. Проведены как вычислительные эксперименты по проверке адекватности используемых моделей, так и экспериментальные измерения влияния ориентации антенного блока георадара относительно границ зондируемой среды. Полученные результаты могут найти применение при оптимизации характеристик и конструкции георадаров, а также для интерпретации данных обследования автомобильных дорог.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СШП импульсы, дистанционное зондирование, плоскостойкие среды

Розглянуто можливості спільного застосування надширокополосних імпульсів георадара і алгоритму обробки поляризаційного стану відбитих плоскошаруватим середовищем електромагнітних хвиль для вирішення завдання товщинометрії плоскошаруватих середовищ. Такий метод відрізняється від раніше відомих підходів в першу чергу застосуванням надширокополосних імпульсних сигналів спільно зі спеціалізованими антенними блоками сучасного георадара. Проведено як обчислювальні експерименти з перевірки адекватності використовуваних моделей, так і лабораторні вимірювання впливу орієнтації антенного блоку георадара щодо границь середовища, що зондується. Отримані результати можуть знайти застосування при оптимізації характеристик і конструкції георадарів, а також для інтерпретації даних обстеження автомобільних доріг.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** НШС імпульси, дистанційне зондування, плоскошаруваті середовища

The possibilities of joint application of ultra-wideband GPR pulses and an algorithm for processing the polarization state of electromagnetic waves reflected by a plane-layered medium for solving the problem of the thickness measure of plane layered media are considered. This method differs from previously known approaches primarily by using ultra-wideband pulse signals in conjunction with specialized antenna units of modern GPR. Computational experiments of verification of the used models and experimental measurements of the influence of the orientation of the antenna units of the GPR relative to the boundaries of the sensed medium are carried out. The obtained results can be applied in optimizing the characteristics and design of GPR, as well as for interpreting road survey data.

**KEY WORDS:** UWB pulses, remote sensing, plane-layered media**ВВЕДЕНИЕ**

Ранее были предложены схемы привлечения различных информативных параметров для решения так называемых обратных задач рассеяния [1-7]. В качестве информативных параметров предлагалось использовать как поляризационные [1,2,7], так и частотные либо азимутальные характеристики рассеянных полей [3-6]. Также предлагались различные методы (алгоритмы) обработки данных как на основе прямых методов теории параметрической оптимизации [8], так и на основе схемы Ньютона-Канторовича [2,4], а также принципа максимума Понтрягина [7]. При этом в рамках существовавшего на тот период уровня развития техники в большинстве случаев предполагалось отдельное проведение каждого эксперимента. Например, в случае частотного зондирования (информативный параметр – частота) предполагалось, что на каждой частоте из выбранного множества проводился отдельный эксперимент по измерению парциального (соответствующего данной частоте) коэффициента отражения от исследуемого объекта. Разумеется, для проведения этого измерения требовалось определенное время, что с учетом специфики таких измерений существенно увеличивало общее время, даже при проведении измерений с помощью панорамных измерителей КСВН (например, P2-64). К тому же, в рамках такого подхода был затруднен автоматический выбор «рабочих» частот. В дальнейшем появление импульсных георадаров и средств компьютерной обработки данных позволили решить задачу толщинометрии при

импульсном зондировании. Суть решения сводилась к проведению предварительной калибровки прибора и последующему определению задержки сигналов, отраженных внешней и внутренними границами слоев с одновременным вычислением значений относительной диэлектрической проницаемости слоев конструкции [10,11]. Кроме того, интенсивные исследования проводятся для решения задачи обнаружения и позиционирования внутренних неоднородностей, в том числе и подповерхностных трещин с помощью анализа поляризационного состояния отраженных структурой (в частности, дорожной одеждой) импульсных сигналов [12-14]. Однако исследования по определению профиля диэлектрической проницаемости плоскостойких сред с помощью анализа поляризационного состояния отраженных импульсных сигналов до сих пор не проводились. Поэтому целью настоящей работы является обоснование возможности решения такого класса задач и проведение экспериментальных исследований для последующего использования их результатов в виде практических алгоритмов обработки георадарных данных.

### ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ В ОБЛАСТИ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В рамках данной статьи будем рассматривать базовую обратную задачу рассеяния с помощью ранее введенного формализма [1,2]. Для решения обратных задач первостепенное значение имеет наличие нелинейности изменения измеряемых величин от информативного параметра. Поэтому, прежде всего, необходимо провести применительно к данной задаче анализ зависимости коэффициентов отражения от поляризационного состояния зондирующего поля при различных углах падения. Как известно [15], эти коэффициенты определяются формулами Френеля, которые мы запишем в следующем виде:

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_i}{(\cos \theta_i \cdot n_2 + n_1 \cdot \cos \theta_t)} A_{\parallel}; \quad T_{\perp} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_i}{(n_1 \cdot \cos \theta_i + n_2 \cdot \cos \theta_t)} \cdot A_{\perp}. \quad (1)$$

$$R_{\parallel} = \frac{(\cos \theta_t \cdot n_1 - n_2 \cdot \cos \theta_i)}{(n_2 \cdot \cos \theta_i + \cos \theta_t \cdot n_1)} \cdot A_{\parallel}; \quad R_{\perp} = \frac{(n_1 \cdot \cos \theta_i - n_2 \cdot \cos \theta_t)}{(n_2 \cdot \cos \theta_i + n_1 \cdot \cos \theta_t)} \cdot A_{\perp}. \quad (2)$$

Если использовать лишь угловые переменные (закон преломления), то получим другую форму этих соотношений ( $n_{12} = n_2 / n_1$ ):

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\left( \cos \theta_i \cdot n_{12} + \sqrt{1 - \left( \sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} A_{\parallel}; \quad T_{\perp} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\left( \cos \theta_i + n_{12} \sqrt{1 - \left( \sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} \cdot A_{\perp}. \quad (1a)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\left( \sqrt{1 - \left( \sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} - n_{12} \cdot \cos \theta_i \right)}{\left( n_{12} \cdot \cos \theta_i + \sqrt{1 - \left( \sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} A_{\parallel}; \quad R_{\perp} = \frac{\left( \cos \theta_i - \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left( \sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)}{\left( \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left( \sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} + \cos \theta_i \right)} A_{\perp}. \quad (2a)$$

Таким образом, в общем виде при наклонном падении зависимость коэффициентов отражения (и преломления) от угла падения и от соотношения между ортогональными компонентами (отмечены знаками  $\parallel$  и  $\perp$ ) является нелинейной. Как следует из вида этих формул при нормальном падении:

$$T_{\parallel} = \frac{2}{(n_{12} + 1)} A_{\parallel}; \quad T_{\perp} = \frac{2}{(1 + n_{12})} \cdot A_{\perp}; \quad (16)$$

$$R_{\parallel} = \frac{(1 - n_{12})}{(n_{12} + 1)} \cdot A_{\parallel}; \quad R_{\perp} = \frac{(1 - n_{12})}{(n_{12} + 1)} \cdot A_{\perp}; \quad (n_{12} = n_2 / n_1). \quad (26)$$

интересующая нас зависимость является линейной и, как следствие, постановка обратной задачи в таком виде невозможна.

Теперь рассмотрим постановку собственно обратной задачи рассеяния в области значений поляризационных параметров. Пусть  $\vec{p}(\vec{R})$  – вектор, определяющий поляризацию, на которой

регистрируется поле в точке наблюдения, а  $\vec{R}_H$  – радиус-вектор точки наблюдения вне исследуемого тела. Тогда согласно результатам, подробно изложенным в [2,4,5] получим:

$$\vec{U}(\vec{R}_H) = U_{in}(\vec{R}_H) + \frac{ik_0c}{4\pi} \int_{V_p} dV' \left[ \vec{p}(\vec{R}_H) \widehat{G}_{ee}(\vec{R}, \vec{R}') \widehat{\eta}(\vec{R}') \vec{E}_{in}(\vec{R}') \right]. \quad (3)$$

Если диэлектрические проницаемости исследуемого  $\varepsilon_p(\vec{R})$  и эталонного тела  $\varepsilon_{aux}(\vec{R})$ , – скалярные величины, приходим к соотношению:

$$U(\vec{R}_H) = U_{in}(\vec{R}_H) + (L\eta)(\vec{R}_H) \equiv U_{in}(\vec{R}_H) + \int_{V_p} dV L(\vec{R}_H, \vec{R}') \eta(\vec{R}') \quad (4)$$

где:  $\eta(\vec{R}) = \varepsilon_p(\vec{R}) - \varepsilon_{aux}(\vec{R})$ ,

$$L(R_H, R') = p(R_H) G_{ee}(R_H, R') E_{in}(R') \left[ \frac{ik_0c}{4\pi} \right].$$

Пусть для каждого из  $N$  значений информативного параметра  $j$  известны соответствующие значения:

$$U^{(j)}(\vec{R}_H), U_{in}^{(j)}(\vec{R}_H), L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}'), \quad j = 1, 2, \dots, N.$$

В качестве  $\lambda$  могут выступать частота, радиус-вектор точки наблюдения, величины, характеризующие поляризацию или направление распространения волны, испускаемой, сторонними источниками и т. д. Согласно (4) получаем:

$$U^{(j)}(\vec{R}_H) = U_{in}^{(j)}(\vec{R}_H) + \int_{V_p} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \eta(\vec{R}') dV'; \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

Это система  $N$  интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода относительно  $\eta(\vec{R})$ , ( $R \in V_p$ ). Ищем  $\eta(\vec{R})$  как функцию, реализующую минимум сглаживающего функционала [1-5]

$$F[\eta] \equiv \sum_{j=1}^N w_j \left| U^{(j)}(\vec{R}_H) - U_{in}^{(j)}(\vec{R}_H) - \int_{V_p} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \eta(\vec{R}') dV' \right|^2 + \alpha \int_{V_p} w(\vec{R}) |\eta(\vec{R})|^2 dV. \quad (6)$$

Здесь  $w_j$  – весовые коэффициенты,  $w(\vec{R})$  – весовая функция,  $\alpha$  – параметр регуляризации (все – положительно определенные величины). Условием экстремума функционала, как известно, является требование обращения в нуль его первой вариации  $\delta F$ . Иными словами, для произвольной комплекснозначной пробной функции  $\gamma(\vec{R})$  главный (линейный по  $\gamma$ ) член разности (приращения функционала  $\Delta F$ )  $\Delta F \equiv F[\eta + \gamma] - F[\eta]$  должен тождественно относительно  $\gamma$  обращаться в нуль. После достаточно громоздких преобразований получаем уравнение Эйлера относительно комплекснозначной функции  $\eta(\vec{R})$ :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) [U_{in}^{(j)}(\vec{R}_H) - U^{(j)}(\vec{R}_H)] + \\ & + \int_{V_p} dV' \left[ \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \right] \eta(\vec{R}') + \alpha w(\vec{R}) \eta(\vec{R}) = 0; \quad (\vec{R} \in V_p). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение Эйлера (5) можно записать в более компактном виде:

$$-\int_{V_p} K(\vec{R}, \vec{R}') \eta(\vec{R}) dV' + \alpha w(\vec{R}) \eta(\vec{R}) = q(\vec{R}), (\vec{R} \in V_p). \quad (8)$$

Это – интегральное уравнение Фредгольма II рода с вырожденным ядром:

$$K(\vec{R}, \vec{R}') = \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R})$$

и правой частью:  $q(\vec{R}) = \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') [U_{in}^{(j)}(\vec{R}) - U^{(j)}(\vec{R}_H)]$

Из уравнения Эйлера с учетом вырожденности его ядра следует, что его решение может быть представлено как:

$$\eta(\vec{R}) = \frac{1}{\alpha w(\vec{R})} [q(\vec{R}) + \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') x_j], \quad (9)$$

где  $x_j = const = \int_{V_p} dV' L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \eta(\vec{R}')$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ .

Подставив под интеграл выражения для  $\eta(\vec{R}')$ , приходим к системе N линейных алгебраических уравнений относительно  $\{x_j\}$

$$\begin{aligned} x_j + \sum_{n=1}^N a_{jn} x_n &= \psi_j; \quad (j = 1, 2, \dots, N); \\ a_{jn} &= w_n \int_{V_p} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \cdot L^{(n)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') \frac{dV}{\alpha w(\vec{R}')}; \\ \psi_j &= \int_{V_p} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \frac{q(\vec{R}')}{\alpha w(\vec{R}')} dV' \end{aligned} \quad (10)$$

Решая (10) относительно  $\{x_j\}$ , мы можем по прямой формуле (9) определить  $\eta(\vec{R})$  и из соотношения

$$\varepsilon_p(\vec{R}) = \varepsilon_{aux}(\vec{R}) - \eta(\vec{R}) \quad (11)$$

найти искомый профиль.

Далее для уточнения  $\varepsilon_p(\vec{R})$  можно опять повторить процедуру восстановления, подставив  $\varepsilon_p(\vec{R})$  из (11) в (10) вместо  $\varepsilon_{aux}(\vec{R})$  и так вплоть до достижения требуемой точности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки адекватности предложенного подхода вначале было проведено численное моделирование с целью выяснения степени влияния деполаризации при различных углах падения и значениях относительной диэлектрической проницаемости. В ходе численных экспериментов основным параметром выступали коэффициенты отражения для двух ортогональных компонент ( $R_{\parallel}, R_{\perp}$ ) в соответствии с (1,2). Результаты приведены на рис. 1. Они отражают факт зависимости значений этих коэффициентов как от угла падения  $\theta_j$ , так и от относительной диэлектрической проницаемости второй среды  $n_t = \sqrt{\varepsilon_t}$ . Эти данные послужили основанием для проведения лабораторных экспериментов с георадаром «Одыг-1» (рис. 2). В процессе экспериментов изменялась угловая ориентация антенного блока для выяснения характера изменения амплитуд отраженных импульсов.

Полученные результаты представлены на рис.3, 4. Общая цель проведенных экспериментов заключалась в выяснении влияния как направления падения волны, так и особенностей, связанных с конструкцией антенного блока георадара «Одыг 1». Конструкция антенного блока детально описана в [16]. Антенный блок состоит из одной передающей антенны (типа «бабочка») и двух приемных антенн

(также типа «бабочка»). Поэтому на амплитуду сигнала будет влиять как угол наклона оси антенн (угол падения  $\theta_i$ , так и угол ориентации антенн в перпендикулярном направлении  $\phi$ . При изменении этого угла изменялось расстояние от поверхности конструкции до приемных антенн. Важность данного эксперимента обусловлена тем, что большинство теоретических (аналитических) результатов получено для падения плоской волны, которая, как известно, является идеализацией. На практике все антенны имеют конечные размеры и, более того, в случае неразрушающего контроля с помощью импульсных георадаров, поверхность конструкции может находиться в ближней зоне антенны. Рассчитать аналитически влияние этой особенности практически нереально и именно поэтому были проведены соответствующие эксперименты. Полученные результаты показали, что нарушение ориентации антенной системы (изменение угла  $\phi$ ) оказывает значительное влияние на амплитуду импульсного сигнала, отраженного от плоской границы. Это влияние вполне сопоставимо с влиянием угла падения. Таким образом, подтверждена необходимость тщательного контроля за ориентацией антенн в процессе измерений. С другой стороны, экспериментально подтверждена возможность получения данных для решения обратных задач рассеяния плоскостойких сред в области значений поляризационных параметров. Также следует отметить, что небольшое расхождение в амплитудах импульсных сигналов при нормальном падении на рис. 3,4 связано с настройками георадара.

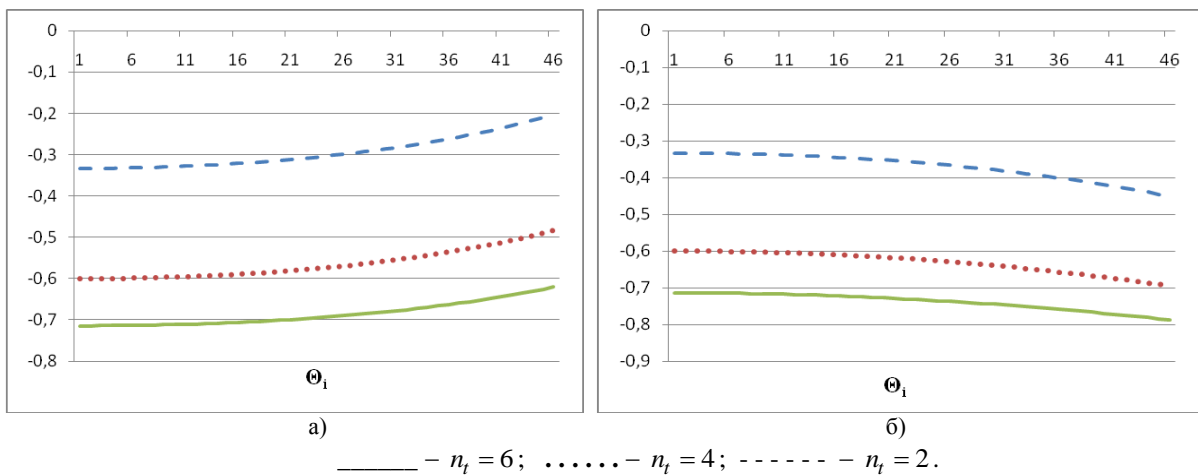


Рис. 1. Расчетные значения коэффициентов отражения ( $n_i = 1$ ): а)  $R_{\parallel}$ ; б)  $R_{\perp}$ .



Рис. 2. Георадар «Одяг 1» во время экспериментов.

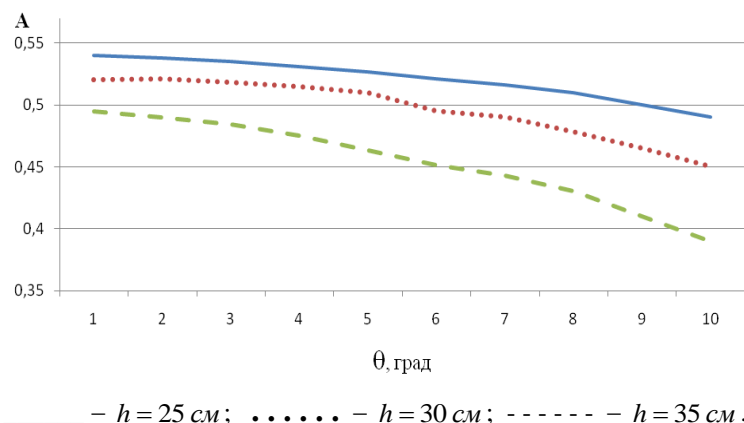


Рис. 3. Зависимость амплитуды отраженного импульса от угла наклона  $\theta_i$  антенного блока АБ георадара «Одыг 1» при различных значениях расстояния до поверхности конструкции  $h$ .

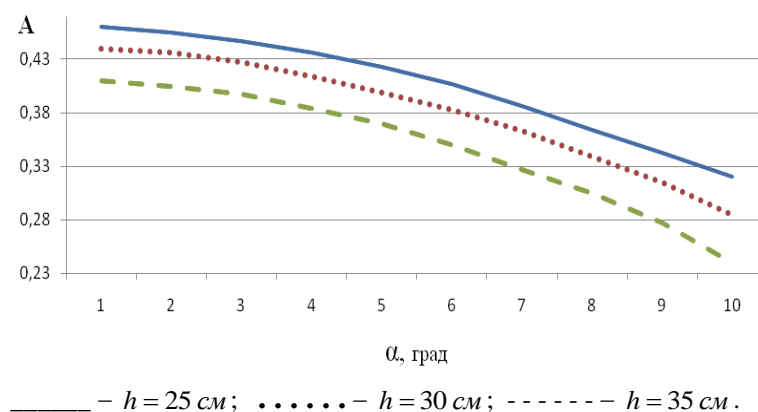


Рис. 4. Зависимость амплитуды отраженного импульса от угла наклона  $\phi$  антенного блока АБ георадара «Одыг 1» при различных значениях расстояния до поверхности конструкции  $h$ .

### ВЫВОДЫ

Получено решение задачи по определению профиля диэлектрической проницаемости плоскослойных сред с помощью анализа поляризационного состояния отраженных импульсных сигналов. В итоге обоснованы возможности решения такого класса задач на базе ранее разработанных методов теории параметрической оптимизации. Для выяснения особенностей применения данного подхода, прежде всего, проведено численное моделирование поляризационных характеристик, отраженных плоских монохроматических волн. Также проведены экспериментальные исследования с применением антенного блока АБ георадара «Одыг 1» для изучения особенностей пространственной ориентации блока во время измерений. Полученные результаты показали, что нарушение ориентации антенной системы оказывает значительное влияние на амплитуду импульсного сигнала, отраженного от плоской границы. Результаты работы могут быть использованы при разработке практических алгоритмов обработки георадарных данных, а также для усовершенствования конструкции георадаров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батраков Д.О. Итерационное решение обратной задачи зондирования неоднородных сред в области значений поляризационных параметров. / Д.О. Батраков, Н.П. Жук // Радиотехника и электроника. - Москва. - 1993. - Т.38, №6. - С.1106-1114.
2. Zhuck N.P. Inverse scattering problem in the polarization parameters domain for isotropic layered media: solution via Newton-Kantorovich iterative technique / N.P Zhuck and D. O. Batrakov // Journal of Electromagnetic Waves and Applications -1994, Vol. 8, No. 6. - P.759-779.
3. Zhuck N.P., Batrakov D.O. Determination of electrophysical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method. Physical Review B. - 1995. - Vol.51, №23, June 15. - P.P. 17073-17080.

4. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique. *Inverse Problems*. – 1994, Feb.– Vol.10, № 1. – P.39-54.
5. Батраков Д.О. Качество и эффективность обработки информации при радиоволновом контроле слоистонеоднородных диэлектриков многочастотным методом. *Дефектоскопия РАН*. – 1998, – №8. – С.68-76.
6. Батраков Д.О. Будко Н.В., Жук Н.П. Интерпретация данных зондирования слоистых структур на основе решения обратной задачи рассеяния электромагнитных волн. *Журнал технической физики*. – 1994. – Т.64, № 1. – С. 152-161.
7. Батраков Д.О., Тарасов М.М. Алгоритм решения обратных задач рассеяния на основе принципа максимума Понтрягина. *Радиотехника и электроника РАН*. – 1999. – Т.44, №2. – С.137-142.
8. Батраков Д.О. Использование прямых методов теории оптимизации при радиоволновом контроле неоднородных диэлектриков. / Д.О. Батраков, М.М. Тарасов// *Дефектоскопия РАН*. – 1997. – №11. – С.83-89.
9. Батраков Д.О. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и неразрушающем контроле / Д.О. Батраков // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»* – X. : ХНУ, 2016, вип. 25. – С. 48-52.
10. 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.
11. Batrakov D.O. Hilbert transform application to the impulse signal processing / D.O. Batrakov, A.G. Batrakova, D.V. Golovin, A.A. Simachev // «UWBUSIS'2010»: 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6-10 September, 2010, Sevastopol, Ukraine : Proceedings. – Sevastopol, 2010. – P. 113–115.
12. Пат. 81296 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення та визначення місць знаходження у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті / Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П.; заявник та патентоутримувач Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П.. – u201300256; заявл. 08.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12/2013.
13. Cao Y. Pavement Evaluation using Ground Penetrating Radar : Final Report, March, 2008 / Y. Cao, B.V. Guzina, J.F. Labuz. – Minnesota : Department of Civil Engineering, University of Minnesota. – 2010.–102 p.
14. Пат. 113916 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці / Батраков Д.О., Урдзік С.М., Почанін Г.П., Батракова А. Г.; заявник та патентоутримувач Батраков Д.О., Урдзік С.М., Почанін Г.П., Батракова А. Г. – a201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017.
15. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. // М. : Наука. – 1973. – 720 с.
16. Pochanin, G. P.; Masalov, S. A.; Ruban, V. P.; Kholod, P. V.; Batrakov, D. O.; Batrakova, A. G.; Urdzik, S. N.; Pochanin, O. G., *Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying*, in: *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications*. CRC Press - Taylor & Francis Group, London, 2016. 20-65. ISBN 9781466586574.