

УДК 621.574.4

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОГО КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

**Д.О. Батраков**

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,  
факультет радиофизики, биомедицинской электроники и компьютерных систем.  
пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина  
Поступила в редакцию 19 апреля 2017 г.*

Получено решение обратной задачи для зондирования радиально слоистого кругового цилиндра с помощью комбинации метода Гольдфарба, относящегося к прямым методам теории параметрической оптимизации, и генетического алгоритма. Используются преимущества первого метода, связанные с изменяемой метрикой. С физической точки зрения проведено моделирование различных состояний поляризации падающего монохроматического поля. Также рассмотрена возможность облучения исследуемого объекта полем нити электрического либо магнитного тока. Разработан вычислительный алгоритм и программа на языке ФОРТРАН для проведения вычислительных экспериментов. В итоге на основании полученных результатов расчетов установлена не только работоспособность, но и высокая эффективность предложенного подхода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метод Гольдфарба, медицинская диагностика, параметрическая оптимизация.

Отримано рішення оберненої задачі для зондування радіально шаруватого кругового циліндра за допомогою сполучення методу Гольдфарба, що відноситься до прямих методів теорії параметричної оптимізації, та генетичного алгоритму. Використано переваги першого методу, що пов'язані зі змінною метрикою. З фізичної точки зору проведено моделювання різних станів поляризації падаючого монохроматичного поля. Також розглянута можливість опромінення досліджуваного об'єкта полем нитки електричного або магнітного струму. Розроблено обчислювальний алгоритм і програму на мові ФОРТРАН для проведення обчислювальних експериментів. У підсумку на підставі отриманих результатів розрахунків встановлена не тільки працездатність, але і висока ефективність запропонованого підходу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** метод Гольдфарба, медична діагностика, параметрична оптимізація.

The solution of the inverse problem for probing a radially layered circular cylinder with the use of the combination of Goldfarb method relating to the direct methods of the theory of parametric optimization and genetic algorithm is obtained. The advantages of the Goldfarb method relating to the variable metric are used. From the physical point of view, the simulation of various polarization states of the incident monochromatic field is carried out. Also the possibility of irradiating the investigated object with a source in the form of a string of electric current is considered. A computational algorithm and a FORTRAN software for computational experiments are developed. Based on the obtained calculation results, the working capacity and the high efficiency of the proposed approach is established.

**KEY WORDS:** Goldfarb's method, medical diagnostics, parametric optimization.

### ВВЕДЕНИЕ

При решении обратных задач теории рассеяния в основном использовалась модель плоскостлой среды [1-3]. Также рассматривались обратные задачи для случаев, когда конфигурация среды позволяла воспользоваться методом разделения переменных для построения функции Грина исследуемого объема и свести в итоге обратную задачу к одномерному случаю [4]. В случае плоскостлой среды важными прикладными приложениями были алгоритмы интерпретации данных контроля покрытий автомобильных дорог и строительных конструкций [5-10]. В то же время, существует класс задач, которые могут быть сведены к одномерным обратным задачам при наличии методов построения соответствующих функций Грина. К таким задачам относятся радиально неоднородный круговой цилиндр и радиально неоднородный шар. Неоднородный в радиальном направлении круговой цилиндр может быть использован в качестве модели кровеносных сосудов в биомедицинских исследованиях. Фундаментом для построения эффективного вычислительного алгоритма при использовании интегральных уравнений является процедура построения функции Грина и объединение этой процедуры с каким либо из методов решения собственно обратной задачи. В качестве метода решения обратной задачи ранее было предложено использовать вариационный подход [1-3] и принцип максимума Понтрягина [11]. Однако в тех случаях, когда цилиндр состоит из нескольких однородных слоев, могут быть использованы генетические алгоритмы [12,13] и прямые методы теории оптимизации. Среди таких методов следует выделить метод Гольдфарба, часто называемый также методом гармонического баланса [14]. Метод Гольдфарба относится к классу методов с изменяющейся метрикой. Это означает, что выбор направления убывания анализируемой функции на каждом шаге реализуется с учетом полученной ранее

информации. В соответствии с общей логикой решения разделим в данном случае процесс на два этапа: решение базовой прямой задачи и затем собственно обратной задачи.

### МЕТОД РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ ГРИНА

Прежде всего, рассмотрим общую постановку задачи. Предположим, что исследуемым объектом является бесконечный круговой цилиндр, состоящий из конечного числа однородных изотропных слоев (рис.1). Слои пронумерованы, начиная от внутреннего слоя, и значения их диэлектрической проницаемости также снабжены индексами, совпадающими с номерами слоев. Т.е. внутренний слой имеет радиус  $R_1$  и относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_1$ . Предполагается, что исследуемая структура расположена в свободном пространстве и облучается источником плоских монохроматических волн с частотами, принимающими определенный набор значений –  $\omega = \omega_n, n = 1, 2, 3, \dots, N$ . В направлении обратного рассеяния измеряется амплитуда отраженного

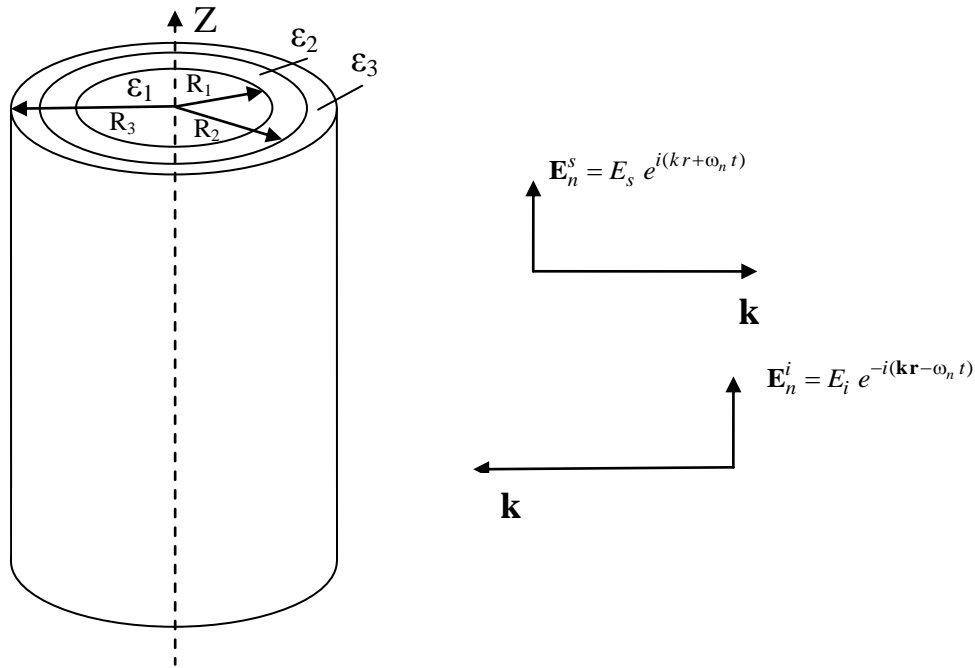


Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры.

поля и вычисляется коэффициент отражения  $R_n^{\text{refl}} = \left( \frac{E_s}{E_i} \right)_n$ , где  $n$  – номер соответствующего значения

частоты  $\omega_n$ . В итоге получаем набор числовых значений коэффициентов отражения в направлении обратного рассеяния. Эти значения будем интерпретировать как компоненты некоторой вектор-функции  $\mathbf{a}^{\text{init}} = (R_1^{\text{refl}}, R_2^{\text{refl}}, R_2^{\text{refl}}, \dots, R_N^{\text{refl}})$ . Как и подавляющее большинство методов решения обратных задач, предлагаемый алгоритм опирается на наличие решения модельной прямой задачи. Иными словами, предполагается, что существует алгоритм и программное обеспечение для эффективного расчета идентичных коэффициентов отражения для структуры с такой же внешней геометрией и известными распределениями внутренних параметров (заданные значения толщины слоев и их диэлектрической проницаемости). В результате мы имеем идентичную вектор-функцию  $\mathbf{a}^{\text{aux}} = (R_1^{(r, \text{aux})}, R_2^{(r, \text{aux})}, R_3^{(r, \text{aux})}, \dots, R_N^{(r, \text{aux})})$ . Для построения алгоритма вычисления компонент этой вектор-функции целесообразно использовать аппарат функции Грина [1,4]. В рамках рассматриваемой постановки задачи функция Грина радиально слоистого диэлектрического цилиндра строится с учетом вида оператора Лапласа для цилиндрической области [15,16]:

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}. \quad (1)$$

Далее, в соответствии с общей идеологией метода разделения переменных решение ищется в виде суперпозиции функций (частных решений дифференциальных уравнений), каждая из которых зависит только от одной из полярных координат. Поскольку рассматривается случай нормального падения на бесконечный цилиндр, то имеет смысл рассматривать так называемую плоскую задачу, т.е. задачу в плоскости поперечного сечения к оси цилиндра в системе полярных координат в этой плоскости). В таком случае для данной составляющей функции Грина (ФГ) получаем представление вида:

$$G = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im(\varphi-\varphi')} g_m(r, r'). \quad (2)$$

Затем, для радиальной части ФГ получаем уравнение:

$$\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + k^2 - \frac{n^2}{r^2} \right] g_n = \frac{\delta(r-r')}{r}, \quad (3)$$

которое преобразуется к задаче с уравнением Бесселя с помощью замены  $x \rightarrow kr$  и  $n \rightarrow m$ :

$$\left[ \frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d}{dx} + \left(1 - \frac{m^2}{x^2}\right) \right] g_n = 0;$$

$$g_m(x, x') \Big|_{x=x'+0} - g_m(x, x') \Big|_{x=x'-0} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{1}{x'} \frac{d}{dx} g_m(x, x') \Big|_{x=x+0} - \frac{1}{x'} \frac{d}{dx} g_m(x, x') \Big|_{x=x'-0} = 1.$$

После этого используется схема, детально изложенная в [17]. Смысл этой схемы состоит в том, что внутри каждого слоя решение ищется в виде суммы частных решений задачи (4) с неизвестными коэффициентами, подлежащими определению из граничных условий.

Условия непрерывности, накладываемые на парциальные функции в (2) и их производные на границе слоев приводят к системам линейных алгебраических уравнений /СЛАУ/ второго порядка относительно пар коэффициентов разложений  $A_{nl}, B_{nl}$  и  $C_{nl}, D_{nl}$ . Для построения итерационного процесса получения массивов этих коэффициентов в каком – либо из слоев необходимо задать стартовые значения. Положим их равными аналогичным коэффициентам в разложении Ф.Г. по цилиндрическим функциям безграничной однородной среды с параметрами выбранного первого слоя. Очевидно, что коэффициент  $B_{1l}$  при функции Неймана следует положить равным нулю, исходя из необходимости удовлетворения условию ограниченности поля в нуле.

Находя каждый раз из получаемой в итоге применения граничных условий СЛАУ пару коэффициентов  $A_{2l}, B_{2l} \dots A_{3l}, B_{3l}$ , доводим процесс до N+1 слоя. Аналогичным образом определяются массивы коэффициентов при втором решении (его обозначают индексом  $\infty$ ) –  $C_{nl}, D_{nl}$ . Процесс построения здесь начинается с N+1 слоя и продолжается вовнутрь, к первому слою. Мы намеренно не выписываем общие выражения для коэффициентов через определители систем, поскольку с точки зрения вычислительной реализации имеет смысл воспользоваться итерационным процессом, описанным выше. В результате его реализации мы получим четыре набора массивов коэффициентов, позволяющих построить разложение функции Грина по цилиндрическим функциям. Также подчеркнем, что после нахождения по указанной схеме коэффициентов необходимо провести их нормировку, поскольку коэффициент, равный амплитуде во внутреннем слое изначально был выбран равным единице. Эту нормировку можно выполнить на основании закона сохранения энергии, как это сделано в случае с плоскостойкой средой [17]. Но можно поступить иначе, отказавшись от итерационного процесса и объединив все СЛАУ 2 порядка в одну большую СЛАУ и решая сразу эту общую СЛАУ. В этом случае все условия будут выполнены автоматически. Таким образом, построение ФГ позволяет получить синтезированные исходные данные для последующего решения собственно обратной задачи.

### РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ МЕТОДА ГОЛЬДФАРБА И ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Теперь рассмотрим схему применения метода Гольдфарба для решения поставленной задачи. Суть предлагаемого подхода состоит в минимизации функции невязки:

$$F(A) = \left\| \mathbf{a}^{init} - \mathbf{a}^{aux} \right\| \quad (5)$$

где знак  $\|\dots\|$  обозначает норму в некотором пространстве. В наиболее распространенном случае это может быть норма в соответствующем векторном пространстве [1]. Итерационный метод Гольдфарба является одним из методов с изменяющейся метрикой, т.е. методов, в которых выбор направления убывания минимизируемой функции на каждом последующем шаге осуществляется с учетом полученной на предыдущем шаге информации о характере поведения функции. При отыскании минимума функции  $A$  из (5) методами с изменяющейся метрикой направление перемещения от точки  $A_m$  к точке  $A_{m+1}$  ( $m$  – номер итерации) выбирается исходя из соотношения:

$$\vec{p}_m = -H_m \cdot \vec{g}_m, \quad (6)$$

где:  $\vec{g}_m = \text{grad}(F(A_m))$ ;  $H_m$  – квадратная матрица размерности  $(N \times N)$ , изменяющаяся в процессе вычислений. В методе Гольдфарба изменение матрицы (т.е. метрики) по результатам предыдущего шага определяется выражением:

$$H_{m+1} = H_m + \frac{1}{\vec{g}_m \cdot \vec{\sigma}_m} \left[ -\vec{\sigma}_m \vec{y}_m^T H_m - H_m \vec{y}_m \vec{\sigma}_m^T + \left( 1 + \frac{\vec{y}_m^T H_m \vec{y}_m}{\vec{y}_m^T \vec{\sigma}_m} \right) \vec{\sigma}_m \vec{\sigma}_m^T \right]. \quad (7)$$

В (7) приняты следующие обозначения:

$\vec{y}_m = \vec{g}_{m+1} - \vec{g}_m$ ;  $\vec{\sigma}_m = \vec{A}_{m+1} - \vec{A}_m$ ;  $\vec{A}_m$  – радиус вектор точки  $A_m$ ;  $\vec{y}_m^T$ ,  $\vec{\sigma}_m^T$  – векторы, транспонированные к  $\vec{y}_m$ ,  $\vec{\sigma}_m$  соответственно. Величина перемещения  $\alpha_m$  в направлении  $\vec{p}_m$ :

$$\alpha_m \vec{p}_m = \vec{A}_{m+1} - \vec{A}_m \quad (8)$$

находится исходя из условия наибольшего убывания функции (5) в направлении  $\vec{p}_m$ .

Суть **генетических алгоритмов** [12,13] заключается в имитации механизма естественной селекции в ходе эволюции. Эти алгоритмы также могут быть использованы при решении оптимизационных задач. Стандартный генетический алгоритм (СГА) переводит оптимизационные параметры в строку двоичных кодов. Это означает, что гены в СГА являются фактически двоичными кодами. Тогда хромосомы (Chr) представляют собой «сцепку» генов, имеющую форму:

$$\text{Chr} = \overbrace{g_1^1 g_2^1 \dots g_{L_1}^1}^{x_1} \overbrace{g_1^2 g_2^2 \dots g_{L_2}^2}^{x_2} \dots \overbrace{g_1^N g_2^N \dots g_{L_N}^N}^{x_N}; \quad (12)$$

где  $g_j^i$  – ген, а  $L_i$  – длина кодовой строки для  $j$ -го параметра оптимизации. Соответствие между хромосомами и параметрами оптимизации определяется формулой:

$$x_i = x_i^{\min} + \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2^{L_i} - 1} \sum_{j=1}^{L_i} g_j^i 2^{L_i - j}; \quad i = 1, N, \quad (13)$$

где интервал  $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$  является областью поиска для  $i$ -го параметра оптимизации.

Таким образом, в рамках данного варианта генетического алгоритма неявно предполагается наличие простой связи между генами (хромосомами) с одной стороны и параметрами оптимизации с другой. Иначе, предполагается существование критериев отбора результатов мутации. Однако в обратных задачах рассеяния, например, при работе с данными в частотной области, такая зависимость имеет сложный характер, и установить априори эффективность отдельной мутации в большинстве случаев невозможно. Поэтому наиболее эффективным является совместное использование данных алгоритмов. Такая схема предполагает применение на начальном этапе генетических алгоритмов с целью отыскания начального приближения, обеспечивающего быструю сходимость итерационного метода Гольдфарба. Далее с помощью итерационного метода Гольдфарба производится, по сути, уточнение искомого распределения диэлектрической проницаемости.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для выяснения возможностей практического использования предложенного подхода был разработан адаптивный вычислительный алгоритм, автоматически выбирающий метод, наиболее соответствующий данному шагу итерационного процесса. Алгоритм был реализован в виде программы для ПЭВМ на языке ФОРТРАН. Некоторые результаты вычислений представлены на рис. 2, 3. При расчетах моделировались случаи зондирования с помощью плоских волн Е и Н- поляризации и источника в виде нити электрического либо магнитного тока, расположенной на конечном расстоянии от поверхности цилиндра. Регистрируемой величиной служили значения комплексных амплитуд либо значения мощности рассеянного поля. Подлежащими определению величинами являлись радиусы слоев и значения диэлектрической проницаемости либо только значения диэлектрической проницаемости

слоев. Например, на рис. 2.а) показаны результаты восстановления радиусов слоев и значений диэлектрической проницаемости по наблюдаемой мощности, рассеянного в обратном направлении поля на E- поляризации (вектор E параллелен образующим цилиндра). На рис. 2.б) показаны аналогичные результаты для трехслойного цилиндра. Как видим, во втором случае процесс восстановления не обладает достаточной точностью во внутренней области цилиндра при ограниченном времени расчетов и количестве данных по частоте (10 с. и 20 отсчетов соответственно). При этом, если только с применением метода Гольдфарба на H-поляризации сходимость за 10 итераций была достаточно медленной (рис. 2.б – двойная штриховая линия), то при использовании предлагаемого комбинированного подхода уже за 5 итераций было получено визуальное совпадение восстановленного и истинного профилей (чтобы не усложнять восприятие результатов в этом случае итоговый график восстановленного профиля не показан).

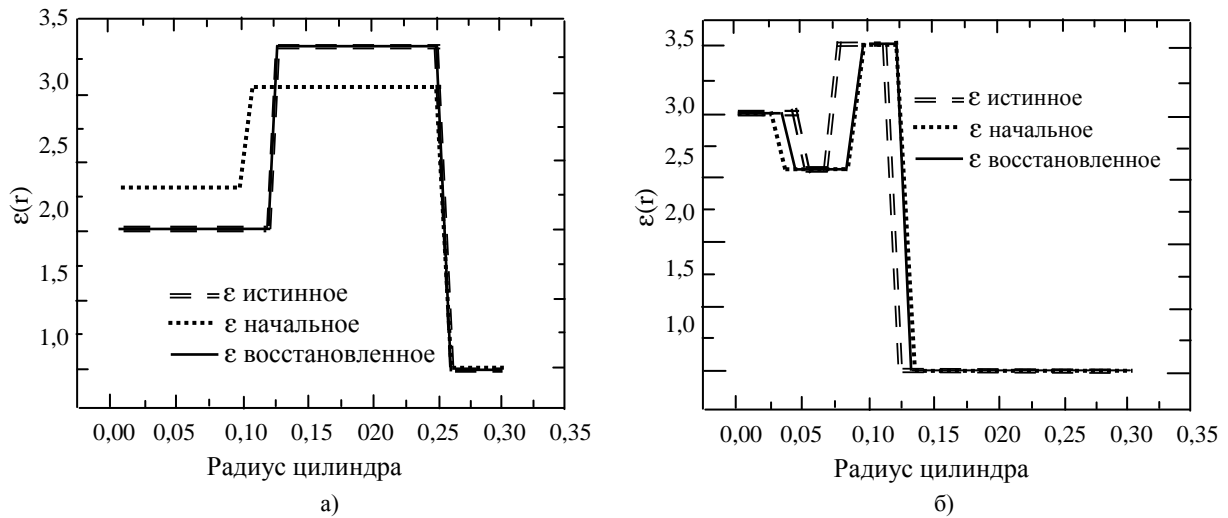


Рис. 2. Восстановление профиля диэлектрической проницаемости и значений радиусов слоев по наблюдаемой мощности отраженного поля: результаты для E-поляризации (а); результаты для зондирования на H- поляризации(б).

На рис. 3.а) приведены результаты восстановления толщины слоев и диэлектрической проницаемости для зондирования источником в виде нити электрического тока, расположенной на расстоянии  $R=3\lambda_0$  от поверхности цилиндра. Для практически точного восстановления понадобилось менее 1 сек. для процессора Intel Core I7 с частотой 3.33 ГГц., т.е. практически в режиме реального времени.

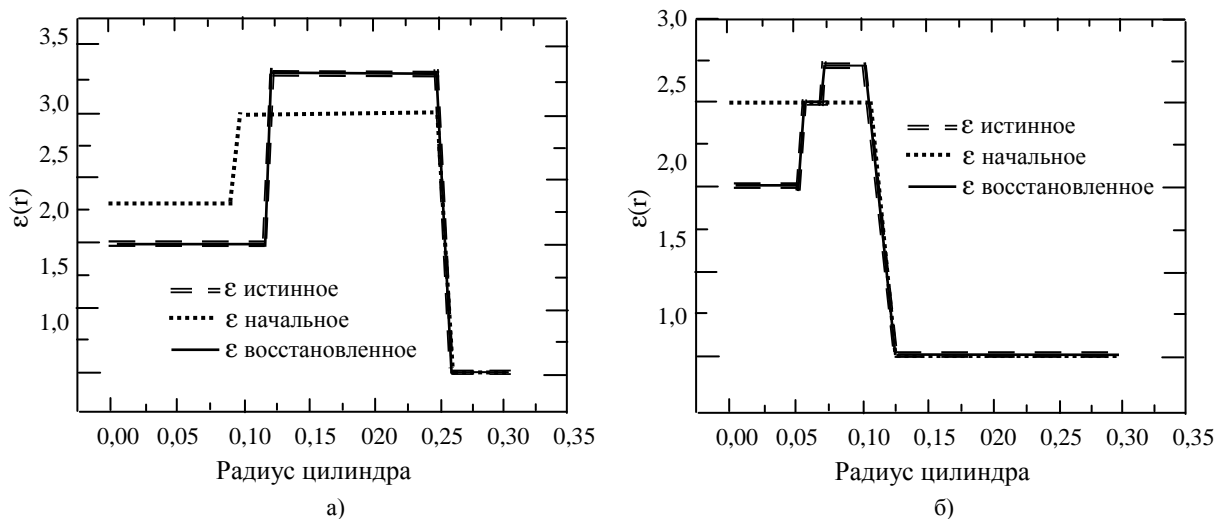


Рис. 3. Восстановление профиля диэлектрической проницаемости и значений радиусов слоев по наблюдаемой комплексной амплитуде отраженного поля: результаты для E-поляризации (а); Результаты для зондирования на H-поляризации (б).

Рис. 3. б) демонстрирует восстановление только значений диэлектрической проницаемости трехслойного цилиндра на H – поляризации по значениям комплексной амплитуды. Как видно, алгоритм

позволил осуществить практически точное восстановление значений диэлектрической проницаемости всех слоев исследуемого объекта.

### ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ работы алгоритмов, основанных на привлечении необходимых условий экстремума минимизируемого функционала (схема Ньютона-Канторовича либо принципа максимума Понтрягина [1,2,11]) и прямых методов теории параметрической оптимизации (метод Гольдфарба и генетический алгоритм) показал, что:

а) для сравнительно простых структур (состоящих из небольшого числа слоев (до 4) комбинации прямых методов обладают более высокой эффективностью и позволяют непосредственно восстанавливать помимо диэлектрической проницаемости слоев также и их радиусы как на основе измерений зависимостей комплексной амплитуды от информативного параметра (частоты), так и измерений аналогичных зависимостей мощности рассеянного поля на различных поляризациях (Е – и Н – поляризации и при облучении полем нити электрического либо магнитного тока);

б) в случае более сложных структур, состоящих из большого числа слоев либо имеющих непрерывный профиль диэлектрической проницаемости, использование прямых методов теории параметрической оптимизации становится малоэффективным либо даже вообще нецелесообразным вследствие увеличения времени расчетов;

в) в последнем случае необходимо привлечение алгоритмов, использующих необходимые условия экстремума [1,2,11] или их комбинаций с алгоритмами, основанными на прямых методах.

Предложенный подход и полученные результаты могут найти применение в задачах неразрушающего контроля промышленных объектов (например, трубопроводов), а также медицинской диагностики при проведении обследований кровеносных сосудов.

В качестве направления дальнейшего развития предложенного подхода можно предложить получение исходной информации о коэффициентах отражения из результатов обработки сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов, а также совмещение алгоритмов, реализующих прямые методы оптимизации с алгоритмами, которые опираются на необходимые условия экстремума сглаживающего функционала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batrakov D.O. Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique./ D.O. Batrakov, N.P. Zhuck // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. - June 1994. - Vol. 8, № 6. - P. 759-779.
2. Zhuck N.P. Determination of electrophysical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method / N.P. Zhuck, D.O. Batrakov // *Physical Review B*. - 1995. - Vol.51, №23, June 15. - P.P. 17073-17080.
3. Батраков Д.О. Спектральный анализ импульсных электромагнитных полей в дистанционном зондировании и биомедицине / Д.О. Батраков, М.С. Антюфеева, А.В. Антюфеев // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія: «Радіофізика та електроніка»– Х.: ХНУ, 2016, вип. 25. – С. 21-25.
4. Batrakov D.O. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique./ D.O. Batrakov, N.P. Zhuck // *Inverse Problems*. - Feb., 1994. - vol.10, № 1. - P.39-54.
5. Батраков Д.О. Влияние формы зондирующих импульсов на эффективность восстановления параметров технических и биомедицинских объектов. / Д. О. Батраков, Д. В. Головин, Г. П. Почанин. // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія: «Радіофізика та електроніка» – 2013, № 1067, вып. 22. – С. 93-98.
6. 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.
7. *Ground penetrating radar, theory and applications* / [Jol Harry M. (Editor)]. - Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. - 508 p.
8. Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar / T. Saarenketo, T. Scullion // *Journal of Applied Geophysics*. - 2000. - Vol. 43. - P. 119–138.
9. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие [для студ. высш. уч. завед.] / Владов М.Л., Старовойтов А.В. - М. : МГУ, 2004. - 153 с.
10. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография / [под ред. А.Ю. Гринева]. - М.: Радиотехника, 2005. - 416 с.

11. Батраков Д.О. Алгоритм решения обратных задач рассеяния на основе принципа максимума Понтрягина. / Д.О.Батраков, М.М. Тарасов // Радиотехника и электроника РАН. – 1999. – Т.44, №2–. С.137-142.
12. Батраков Д.О. Сравнительный анализ итерационного и генетического алгоритмов решения обратных задач рассеяния / Д.О. Батраков, Д.В. Головин, О.Д. Батраков // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: «Радіофізика та електроніка» – 2013, № 1067, вып. 22. – С. 82-85.
13. Meng, Z. Q. "Image reconstruction of two-dimensional impenetrable objects using genetic algorithm," / Z. Q. Meng, T. Takenaka, and T. Tanaka, /J. Electromagn. Waves Applicat, – Jan. 1999, vol. 13, pp. 95-118.
14. Метод Гольдфарба в теории регулирования / [под ред. Пастернак Е.Б.]. – М.: Госэнергоиздат, 1962г, 224 с.
15. Корн Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров./ Г. А. Корн, Т. М. Корн – М.: Наука, 1974. – 832 с.
16. Морс Ф.М. Методы теоретической физики. / Ф.М. Морс, Г. Фешбах // т.1. М., ил, 1958. – 931 с.
17. Батраков Д. О. Разработка радиофизических моделей применительно к проблеме зондирования неоднородных сред: дис. доктора физ.-мат. наук: 01.04.03 /Батраков Дмитрий Олегович. – Харьков, 1995. – 293 с.