

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-06>

УДК 621.574.4

Д.О. БАТРАКОВ, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: batrakov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

ОБЕРНЕНІ ЗАВДАННЯ РОЗСІЮВАННЯ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ТЕХНІКИ

Актуальність проблеми. Практичне застосування методів підповерхневої радіолокації для вирішення завдань діагностики та оцінки стану технічних об'єктів, дефектоскопії багатопарових структурно-неоднорідних конструкцій, пошуку підповерхневих неоднорідностей природного або штучного походження ґрунтується на оцінюванні параметрів об'єктів, що досліджуються, за величиною характеристик розсіяного електромагнітного поля. Вирішення означених завдань ґрунтується на розв'язку обернених задач розсіяння. Тому розвиток та удосконалення методів розв'язку обернених задач розсіяння електромагнітного поля на підповерхневих неоднорідностях є надзвичайно актуальним завданням радіофізики.

Мета роботи – аналіз методів розв'язання обернених задач розсіювання для різних наукових та технічних додатків. Це насамперед завдання неруйнівного контролю та дистанційного зондування природних та штучних об'єктів.

Матеріали та методи. Аналіз спирається на застосування аналітичних методів, методів чисельного моделювання, статистичних методів та експериментальну перевірку одержаних результатів. Основна увага приділена аналізу підходів, які спираються на залучення схеми Ньютона-Канторовича, метод регуляризації Тихонова та принцип максимуму Понтрягіна для визначення електрофізичних параметрів плоскошаруватих середовищ – відносної діелектричної проникності та на наступному етапі – геометричних параметрів шарів конструкції.

Результати. Проведено аналіз різних підходів до розв'язання обернених задач розсіювання, а також їх комбінацій. Основну увагу приділено результатам у галузі неруйнівного контролю та дистанційного зондування за допомогою хвильових методів. Розглянуто сфери практичного застосування методів розв'язку обернених задач розсіювання та сформульовано можливі напрями їх розвитку.

Висновки. Результати проведеного аналізу створюють основу розроблення нових методів розв'язання обернених задач розсіювання та вдосконалення методів, що запропоновані раніше.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: обернені задачі розсіювання; априорна інформація; інформативний параметр; досліджувана структура; надширокопосмугові сигнали.

Як цитувати: Батраков Д.О. Обернені завдання розсіювання та їх застосування у різних галузях техніки. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023;38:56-64. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-06>

In cites: Batrakov DO. Inverse scattering problems and their applications in various field of technology. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radiophysics and Electronics". 2023;38:56-64. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-06>.

ВСТУП

Обернені задачі розсіювання застосовуються в різних областях для вирішення складних за своєю природою технічних завдань. Основна особливість обернених задач у тому, що вони належать до класу так званих некоректних за Адамаром задач [1-10]. У 1932 р. Ж. Адамар сформулював поняття добре поставлених, коректних задач. Вони характеризуються наявністю трьох основних умов:

- наявністю рішення (у певній математичній множині);
- єдністю рішення, тобто вихідні дані не суперечать один одному та їх достатньо для однозначного розв'язання задачі, це також називають математичною визначеністю задачі;
- ще однією характеристикою коректності є безперервна залежність рішення від вихідних даних. Часто цю умову пов'язують із детермінованістю задачі чи безперервністю рішення залежно від вхідних даних.

Обернені задачі називаються некоректними, або поставленими некоректно, якщо поняття «наближене рішення» в класичному розумінні втрачає сенс. Це пов'язане з тим, що «наближене рішення» передбачає існування, єдність і стійкість точного рішення. Іншими словами – математичну та фізичну визначеність поставленого завдання. У багатьох випадках, навіть якщо точне рішення існує та воно єдине, відсутня збіжність будь-яким чином отриманої послідовності наближених рішень до точного рішення. У деяких випадках такі послідовності можуть взагалі не збігатися. Наприклад, може статися, що зі збільшенням точності вимірювань величини X збільшується розкид значень результату (для

обернених завдань) або, навпаки. Іншими словами – одне умовно «наближене рішення» може дуже відрізнятися від іншого навіть при незначній зміні вихідних даних. Важливо також, що з таких завдань ця ситуація не виправна принципово. Відповідно, використання для розв'язку таких задач чисельних методів без розуміння характеру задачі становить велику небезпеку отримання невірних оцінок. Помилки даних спостережень часто складаються з похибками обчислень, що виникають, і можуть значно зростати в процесі обчислень. Це зрештою призводить до принципового спотворення результатів. Звідси виникає завдання вивчення властивостей математичних рівнянь, які б найбільш точно відповідали даній фізичній задачі. Оскільки метою статті є результати аналізу хвильових методів, які стосуються галузі електромагнетизму, на наступному етапі приділимо основну увагу саме цим методам.

Методи розв'язку обернених задач, що спираються на теорію електромагнетизму. Основою розв'язку є система рівнянь Максвелла і відповідний набір додаткових умов [11-21]. Нижче буде детально розглянуто підходи до розв'язку таких задач. Зараз основну увагу приділимо їх специфічним особливостям і можливостям різних методів. Для розв'язку обернених задач традиційно використовують кілька основних підходів. Крім запропонованого О.М. Тихоновим методу регуляризації та методів, що є його розвитком [1-3, 11, 14, 16], також отримали розвиток методи, що використовують принцип максимуму Понтрягіна [22] та деякі інші підходи до розв'язку обернених задач [23, 24]. Слід зазначити, що з розв'язанням обернених задач пов'язані й багато технічних задач, зокрема і оптимізації [25-27]. Як додатки отриманих рішень обернених завдань необхідно відзначити завдання неруйнівного контролю різних технічних конструкцій [28] та різноманітні завдання оптимального синтезу [29, 30]. Таким чином, метою цієї статті є:

- аналіз методів розв'язку обернених задач розсіювання для різних наукових та технічних додатків, орієнтованих, насамперед, на застосування теорії електромагнетизму;
- порівняльний аналіз різних підходів та їх ефективності з точки зору практичної реалізації;
- створення основи для розробки нових методів розв'язку обернених задач розсіювання та удосконалення існуючих.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Насамперед, розглянемо коротко основні ідеї, покладені в основу методів розв'язку обернених задач. Почнемо із схеми Ньютона-Канторовича. Зважаючи на обмеження обсягу статті, принцип максимуму Понтрягіна, і деякі інші методи будуть детально розглянуті в наступних роботах.

При вирішенні багатьох складних наукових завдань велику роль відіграє існуюча апіорна інформація. Ця інформація може бути як у явному, так і неявному вигляді. У цьому випадку у явному вигляді передбачається відомою область простору, зайнята досліджуваним об'єктом. У неявному вигляді може бути подана інформація про властивості об'єкта. У завданнях контролю з виробництва, зазвичай, як початкове наближення зручно вибрати проектні характеристики. Тоді вихідна задача може бути зведена до перебору можливих варіантів. Зрозуміло, що такий шлях не є найефективнішим. І справа тут не тільки у витратах машинних ресурсів, але й в наявності помилок чи похибок вимірювань.

У результаті накопичення таких похибок може бути отриманий зовсім невірний результат. У багатьох випадках рішення може бути не єдиним. І тоді необхідно зробити вибір з існуючих рішень. Для цього використовують поняття нев'язки, чи інакше – середнього відхилення. Теорія ймовірностей та математичної статистики під терміном середньоквадратичне відхилення розуміє ступінь розсіювання (розкиду) деякої випадкової величини відносно її математичного очікування. Математичне очікування характеризує розподіл значень (імовірностей випадкової величини), і може бути представлено як середньозважене значення всіх можливих параметрів цієї величини за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

де x_j , \bar{x} , N – значення випадкової величини в j -му експерименті, середнє арифметичне вибірки; N – обсяг вибірки (генеральної сукупності).

Далі стисло розглянемо основні ідеї методу регуляризації. Цей метод спирається на залучення кількох відомих раніше підходів. Це, насамперед, Борнівське наближення [12]. Воно спирається на використання розв'язок задачі функції Гріна вільного простору, яка обчислюється досить просто. Платою за це є складніша функція джерел. Скориставшись другою формулою Гріна і припустивши, що профілі розрізняються незначно, отримаємо наступне співвідношення:

$$U_1(R) = U_P(R) + \int_{V=\infty} G_P(R, R') (k_P^2(R') - k_S^2(R')) U(R') dV'. \quad (2)$$

В останній формулі ми замінили точне значення $U(R)$ на «перше наближення» до точного рішення $U_1(R)$. В результаті перепишемо останнє рівняння в операторній формі:

$$U_1(R) = U_P(R) + \hat{G} \hat{\eta} U_P(R'), \quad (3)$$

Ще однією основою цього методу є формування функціоналу, що згладжує. Легко помітити, що величина S у формулі (1) може приймати нульове значення тільки в тому випадку, коли немає відхилень від середнього, а в інших випадках S буде позитивною величиною. Цей факт дозволяє контролювати процес відхилень $F[\eta]$. Тоді як згладжуючий функціонал стосовно до завдань електромагнітного зондування можна записати у вигляді [12, 18, 21]:

$$F[\eta] \equiv \sum_{j=1}^N w_j \left| S^{(j)}(\mathbf{r}_H) - \int_{V_P} L^{(j)}(\mathbf{r}_H, \mathbf{r}') \eta(\mathbf{r}') dV' \right|^2 + \alpha \int_{V_P} w(\mathbf{r}) |\eta(\mathbf{r})|^2 dV. \quad (4)$$

де $S^{(j)}(\mathbf{r}_H) = U^{(j)}(\mathbf{r}_H) - U_{in}^{(j)}(\mathbf{r}_H)$, $U^{(j)}(\mathbf{r}_H)$, $U_{in}^{(j)}(\mathbf{r}_H)$ – набори значень вимірюваних або інформативних параметрів, що зареєстровані експериментально або отримані за результатами чисельного моделювання; w_j – вагові коефіцієнти; $w(\bar{R})$ – вагова функція; α – параметр регуляризації (всі позитивно визначені величини); $L^{(j)}(\mathbf{r}_H, \mathbf{r}')$ – ядро інтегрального оператора у так званому борнівському наближенні; $\eta(\mathbf{r}') \equiv \varepsilon(\mathbf{r}') - \varepsilon_{aux}(\mathbf{r}')$ – шукана поправка до деякого початкового наближення для параметра, що підлягає визначенню. Для електродинамічних завдань це функція розподілу діелектричної проникності.

Очевидно, що функціонал (4) може набувати нульових значень лише за умови, що початкове наближення $\varepsilon_{aux}(\mathbf{r}')$ збігається з розподілом діелектричної проникності досліджуваної структури, тобто тільки в тому випадку, якщо $\varepsilon(\mathbf{r}') = \varepsilon_{aux}(\mathbf{r}')$.

Визначим далі $\int_{V_P} L^{(j)}(\bar{R}_H, \bar{R}') \eta(\bar{R}) dV' \equiv L^{\wedge(j)} \eta$, а знак оператора (\wedge) будемо опускати, де це

не викликає непорозумінь.

Тоді перебір усіх можливих значень початкового наближення повинен, хоч й за тривалими розрахунками, дати правильне значення. Але в процесі вимірювань мають бути присутні погрішності. Крім того, якщо мова йде про відновлення безперервної величини (функції), то вона визначається, взагалі кажучи, нескінченим набором даних чисел (позначених у точках осі абсцис). Провести вимірювання при всіх значеннях вимірюваного параметра навіть в одновимірній задачі неможливо. Вимірювання ж при кінцевій кількості експериментів призводить як мінімум до втрати даних. Тому в деяких публікаціях обернені задачі називають задачами з істотно неповними даними. Цим підтверджується факт, що через кінцеву кількість точок можна провести нескінчену множину кривих, але не поліномів. Це означає, що в разі відновлення безперервної функції необхідно мати аналогічний обсяг інформації про зареєстровані дані. У деяких випадках явно використовується додаткова апріорна інформація і може виникнути ілюзія універсального методу. Тому перед практичним використанням методів вирішення обернених завдань необхідно провести детальний аналіз їх можливостей і обмежень.

Після перетворень, викладених раніше в [12, 18], надходимо до рівня Ейлера відносно комплексної функції:

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) [U_{in}^{(j)}(\vec{R}_H) - U^{(j)}(\vec{R}_H)] + \\
& + \int_{V_P} dV' \left[\sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \right] \eta(\vec{R}') + \\
& + \alpha w(\vec{R}) \cdot \eta(\vec{R}) = 0; \quad (\vec{R} \in V_P).
\end{aligned} \tag{5}$$

Перепишемо рівняння Ейлера у формі:

$$- \int_{V_P} K(\vec{R}, \vec{R}') \eta(\vec{R}') dV' + \alpha w(\vec{R}) \eta(\vec{R}) = q(\vec{R}), (\vec{R} \in V_P) \tag{6}$$

Це – інтегральне рівняння Фредгольма II роду з виродженим ядром:

$$K(\vec{R}, \vec{R}') = \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}'), \tag{7}$$

та правою частиною:

$$q(\vec{R}) = \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) [U_{in}^{(j)}(\vec{R}) - U^{(j)}(\vec{R}_H)]. \tag{8}$$

Схема розв'язання цього рівняння полягає у зведенні його до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Через вхідну операцію з урахуванням виродженості ядра слідує, що рішення може бути представлено так:

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

де

$$x_j = const = \int_{V_P} dV L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}) \eta(\vec{R}), j = 1, 2, \dots, N. \tag{10}$$

У результаті приходимо до системи N лінійних алгебраїчних рівнянь щодо набору невідомих $\{x_j\}$:

$$\begin{aligned}
& x_j + \sum_{n=1}^N a_{jn} x_n = \psi_j; (j = 1, 2, \dots, N); \\
& a_{jn} = - w_n \int_{V_P} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}) L^{(n)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) \frac{dV}{\alpha w(\vec{R})}; \\
& \psi_j = \int_{V_P} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}) \frac{q(\vec{R})}{\alpha w(\vec{R})} dV.
\end{aligned} \tag{11}$$

Розв'язуючи отриману систему (11) відносно $\{x_j\}$, можемо за прямою формулою (9) визначити із $\eta(\vec{R})$ співвідношення шуканий профіль:

$$\varepsilon(\vec{R}) = \varepsilon_s(\vec{R}) - \eta(\vec{R}). \tag{12}$$

Використання таких залежностей пов'язано, насамперед, із можливостями доступних технічних засобів вимірювання та обробки даних.

Як інші параметри було запропоновано використовувати поляризаційний стан зондуєчих і відбитих хвиль, а також відстань до точкового джерела у двовимірних задачах, які іноді називають плоскими або їх сукупністю [31, 28]. Також обернені задачі застосовуються для виявлення включень [21]. Але в рамках однієї статті неможливо відобразити всі здобутки, отримані навіть за відносно короткий проміжок часу 20 років. Тому далі докладніше зупинимось на питаннях візуалізації результатів.

Раніше було створено кілька програм, що призначені для оперативного отримання та візуалізації результатів. Одна з таких програм містить виконавчий (розрахунковий) модуль, створений мовою FORTRAN, та модуль інтерфейсу, створений мовою C++. Цей інтерфейс має досить складну структуру і тому для зручності сприйняття розбитий на окремі замкнуті компоненти, вид яких наведено на Рис. 1-3. Програма призначена для розв'язку обернених задач у частотній області. Вона дозволяє отримувати візуалізацію результатів кожної ітерації (Рис. 1). Також вона має вікно із зображенням досліджуваної структури (Рис. 2) і, крім того, дозволяє встановлювати (Рис. 3): значення параметра регуляризації; кількість ітерацій; кількість значень інформативного параметра; кількість шарів; початкове наближення; кут падіння; значення частоти, діелектричну проникність підкладки та вид поляризації (E-поляризація чи H-поляризація).

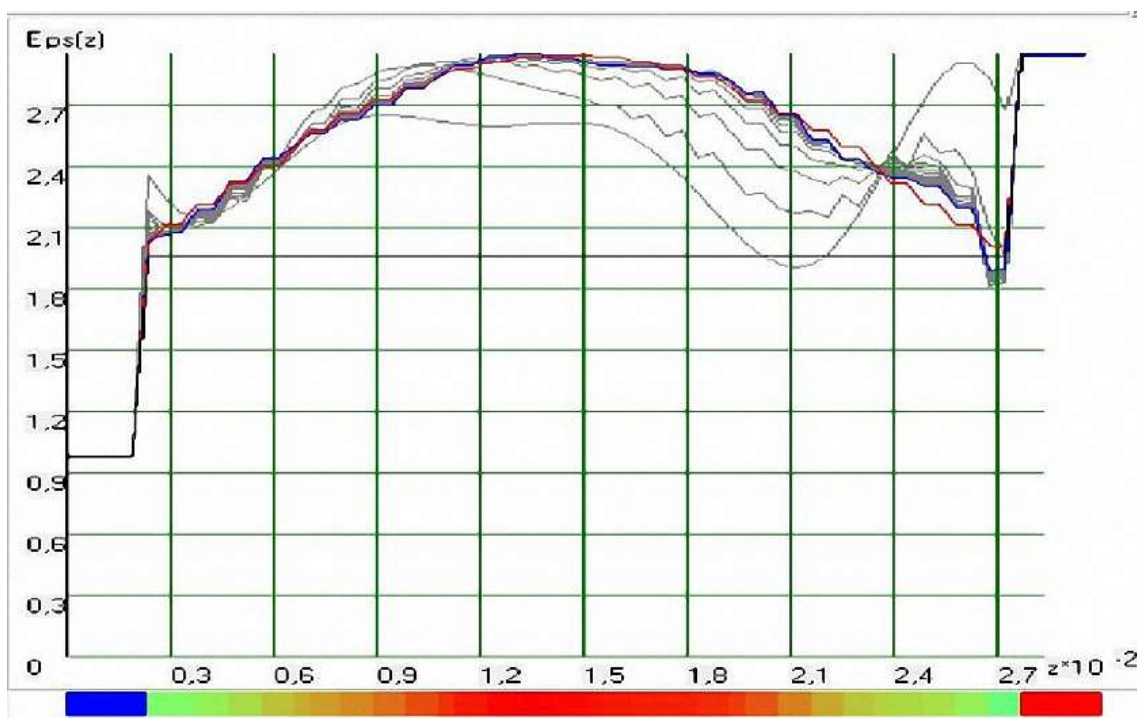


Рис. 1. Основне вікно відображення результатів.

Fig. 1. The main Window for displaying results.

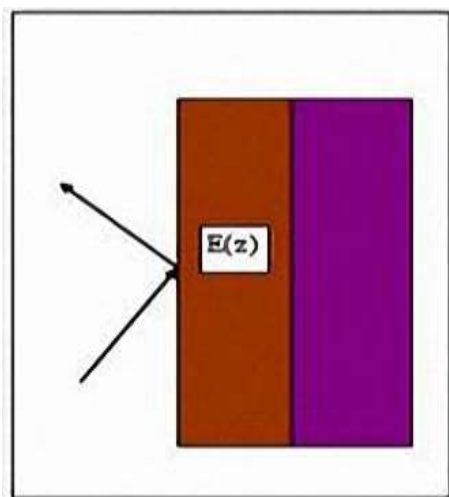


Рис. 2. Допоміжне вікно із зображенням досліджуваної структури.
Fig. 2. The auxiliary window with the image of the studied structure.

Alpha	Teta
2	50
Number of iterations	Fmin
15	1
Number of iterative parameter values	Fmax
40	5
Number of layers	Nvar
30	1
Eps initial	Eps Substrate
2	3
	Index Polarization
	H

Рис. 3. Допоміжне вікно із зображенням параметрів розрахунку.
Fig. 3. The auxiliary window showing calculation parameters.

Це не єдина програма для візуалізації результатів розв'язку обернених задач, однак обмежений обсяг цієї статті не дозволяє детально розглянути всі можливості розробленого програмного забезпечення, тому ми коротко зупинимося на ще одному напрямку. Він спирається на постановку та методи розв'язку обернених задач за допомогою використання надширокосмугових радарів підповерхневого зондування (георадарів).

Фізичну основу використання такого підходу для вирішення завдань дистанційного зондування та неруйнівного контролю становлять відповідні методи реєстрації та обробки імпульсних сигналів [28]. Для вирішення таких завдань крім класичного підходу, використовується метод, що спирається на використання основного рівняння радіолокації і пов'язує товщину шарів h з часом затримки сигналу Δt і значеннями діелектричної проникності ε матеріалу шару (C – швидкість світла у вільному просторі):

$$h = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon}} \Delta t. \quad (13)$$

У цьому напрямку також було запропоновано підходи, що передбачають залучення методів спектральної обробки надширокосмугових (НШС) сигналів, де кінцевою метою робіт у цьому напрямку є створення обчислювальних алгоритмів, які б дозволили не лише отримувати та обробляти дані георадарів, але й надавали можливість вирішення комбінованих завдань, вирішення яких дозволяє також отримати дані про безперервний розподіл необхідного фізичного параметра. Як приклад можна навести таке практично важливе завдання як контроль поточного стану багат шарових будівельних конструкцій, наприклад дорожнього одягу на автомобільних дорогах. Ми сподіваємося згодом надати читачам нові результати у цій галузі.

ВИСНОВКИ

Проведений у цій роботі аналіз різних підходів та існуючих методів розв'язку обернених задач розсіяння спирається на глибоке розуміння основ фізико-математичних моделей і алгоритмів обробки одержуваних даних. Таке розуміння переваг та обмежень методів, які використовують різні інформативні параметри, дозволило запропонувати нові підходи та відповідні алгоритми обробки даних. Проведені численні обчислювальні експерименти продемонстрували ефективність розроблених методів та алгоритмів інтерпретації результатів. Крім того, вони дозволили запропонувати шляхи подальшого вдосконалення не тільки суто математичного апарату, але також і відповідних методів та алгоритмів обробки даних. У результаті це дозволило намітити деякі шляхи подальшого розвитку та вдосконалення засобів зондування - георадарів. Це відноситься, насамперед, до вимог, які пред'являються до антен георадарів і, як результат, – до форми та параметрів зондувальних імпульсів. Зрештою, отримані результати мають забезпечити вирішення важливих практичних завдань. Крім того, вони сприятимуть подальшому розвитку основ обробки та інтерпретації одержуваних даних. Це, насамперед, стосується

завдань дистанційного зондування складних з погляду електродинаміки структур – багат шарових структурно-неоднорідних середовищ. З практичної точки зору, це можуть бути ділянки порушення цілісності конструкцій, підповерхневі штучні об'єкти, наприклад, кабелі, або інші комунікації. Результати у цій галузі ми сподіваємося опублікувати у наступних статтях.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор повідомляє про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tikhonov AN. On the stability of inverse problems. Doklady Acad. Sci. USSR39 (1943),176–179.
2. Tikhonov AN, Arsenin VYa, Solutions of Ill-Posed Problems. Wiley, New York, 1977.
3. Tikhonov AN. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization. Dokl. Akad.Nauk SSSR151, 3 (1963), 501–504.
4. Tikhonov AN. On the regularization of ill-posed problems. Dokl. Akad. Nauk SSSR 153, 1, 1963, 49–52.
5. N. Yashina, A. Brovenko, N. Melezhhik, P. Melezhhik, A. Poyedinchuk, O. Troshchylo. 1D inverse problems of electromagnetic theory of layered inhomogeneous anisotropic media. 2017 Sep 1; <https://doi.org/10.1109/DIPED.2017.8100576>
6. Tikhonov AN, Goncharkii AV, Stepanov VV, Yagola AG. Regularizing Algorithms and A Priori Information. Nauka, Moscow, 1983.
7. Romanov VG, Kabanikhin SI. Inverse Problems for Maxwell's Equations. VSP, Utrecht, 1994.
8. Samarskii AA, Vabishchevich PN. Numerical Methods for Solving Inverse Problems of Mathematical Physics. VSP, Utrecht, 2007.
9. Sylvester J, Uhlmann G. A uniqueness theorem for an inverse boundary value problem in electrical prospecting. Comm. Pure and Appl. Math.39, 1986, 92–112.
10. Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography. New York, Wiley & Sons, 1986.
11. Uno T, Adachi S. Inverse scattering method for one-dimensional inhomogeneous layered media. IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-35, N 12, 1987, 1456-1466.
12. Batrakov DO, Zhuck NP. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique. Inverse Problems. - Feb., 1994. - vol.10, № 1. - P.39-54.
13. Tijhuis, AG, Van der Worm C. Iterative approach to the frequency-domain solution of the inverse scattering problem for an inhomogeneous lossless dielectric slab, IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol. AP-32, N 7, 1984, 711-716.
14. Batrakov, DO. Quality and efficiency of information monitoring at radio wave testing of inhomogeneous dielectric layers by using a multifrequency method. Defektoskopiya., N8, 1998, 68-76.
15. Habashy, TM, Chew WC, Chow EY. Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity profiles in a radially inhomogeneous slab. Radio Sci., Vol.21, 1986, 635-645.
16. He S, Frequency and time-domain Green function technique for nonuniform LCRG transmission lines with frequency-dependent parameters. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 7, No. 1, 1993, 31-48.
17. Batrakov DO, Zhuk NP. Method for testing of layer-non-homogeneous dielectrics using numerical solution of reverse problem dialing with dissipation in polarization parameters domain. Defektoskopiya (Russian Journal of Nondestructive Testing), No 6, 1994, 82-87.
18. Zhuck NP, Batrakov DO. 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. <https://dokumen.tips/documents/determination-of-electrophysical-properties-of-a-layered-structure-with-a-statistically.html>
19. Denisov AM. Elements of the Theory of Inverse Problems. VSP, 1999, PP. 272. https://books.google.com.ua/books?id=Xe6TQ0NRVC8C&hl=ru&source=gbs_book_similarbooks
20. Romanov VG, Kabanikhin SI. Inverse Problems for Maxwell's Equations. VSP, 1994, P. 249. https://books.google.com.ua/books?id=EIMLXfuT_jgC&hl=ru&source=gbs_book_similarbooks
21. Batrakov DO, Golovin DV. Application of tikhonov regularization technique to investigation of the electromagnetic field scattered by inclusion in multilayered media. 2010 Jun 1; DOI: [10.1109/MSMW.2010.5546204](https://doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546204)
22. Batrakov DO, Tarasov MM. Algorithm of solving inverse scattering problems using the ponyryagin maximum principle. Radiotekhnika i Elektronika, 1999, 44(2), стр. 137–142. <https://www.scopus.com/authorid/detail.uri?authorId=8299693500>
23. Batrakov D, Golovin D. Null-Field Method Enhancement Technique for the Investigation of Scattering from Inclusions in Plane-Layered Media. 2006 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. <https://doi.org/10.1109/MMET.2006.1689837>
24. Batrakov DO. Quality and efficiency of data analysis in multifrequency radio-wave testing of laminated dielectrics. Russian Journal of Nondestructive Testing, 1998, 34(8), P. 612–618. <https://www.scopus.com/sourceid/17903?origin=resultslist>
25. Zakharov A, Sergii Rozenko, Pinchuk L, Sergii Litvintsev. Microstrip Quasi-Elliptic Bandpass Filter With Two Pairs of Antiparallel Mixed-Coupled SIRs. IEEE microwave and wireless components letters. 2021 May 1;31(5):433–6. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2021.3065394>

26. Zakharov A, Rozenko S, Litvintsev S, Ilchenko M. Trisection Bandpass Filter With Mixed Cross-Coupling and Different Paths for Signal Propagation. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2020 Jan;30(1):12–5. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2957207>
27. Sergii Litvintsev, Sergii Rozenko. Synthesis of Dual-band Filter with Improved Functionality Based on Dual-mode Resonator. 2021 Sep 8; <https://doi.org/10.1109/DIPED53165.2021.9552281>
28. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG. Comparative Analysis of Spectral Characteristics of Pulse GPR Signals for Road Pavement Assessment. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2021 May;64(5):238–46. <https://doi.org/10.3103/S0735272721050022>
29. Dubrovka FF, Bulashenko AV. Analytical Method of Constructive Synthesis of Compact Polarizers with Maximally Flat Phase-Frequency Characteristic Based on Two Reactive Elements in Square Waveguide. *Radioelectronics and communications systems*. 2022 Dec 1;65(12):621–40. <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272722090035>
<http://radio.kpi.ua/article/view/s002134702104004x>
30. Zakharov A, Litvintsev S, Ilchenko M. Transmission Line Tunable Resonators With Intersecting Resonance Regions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2020 Apr;67(4):660–4. <https://doi.org/10.20535/S0021347021030018>
31. Batrakov DO, Zhuk NP. Iterative solution of inverse problem of nonuniform medium sounding in the range of polarization parameters. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1993, 38(6), PP. 1106–1114. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8299693500>

REFERENCES

1. Tikhonov AN. On the stability of inverse problems. *Doklady Acad. Sci. USSR*39 (1943),176–179.
2. Tikhonov AN, Arsenin VYa, Solutions of Ill-Posed Problems. Wiley, New York, 1977.
3. Tikhonov AN. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization. *Dokl. Akad.Nauk SSSR*151, 3 (1963), 501–504. (In Russian)
4. Tikhonov AN. On the regularization of ill-posed problems. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 153, 1, 1963, 49–52.
5. N. Yashina, A. Brovenko, N. Melezhik, P. Melezhik, A. Poyedinchuk, O. Troshchylo. 1D inverse problems of electromagnetic theory of layered inhomogeneous anisotropic media. 2017 Sep 1; <https://doi.org/10.1109/DIPED.2017.8100576>
6. Tikhonov AN, Goncharkii AV, Stepanov VV, Yagola AG. Regularizing Algorithms and A Priori Information. Nauka, Moscow, 1983.
7. Romanov VG, Kabanikhin SI. Inverse Problems for Maxwell's Equations. VSP, Utrecht, 1994.
8. Samarskii AA, Vabishchevich PN. Numerical Methods for Solving Inverse Problems of Mathematical Physics. VSP, Utrecht, 2007.
9. Sylvester J, Uhlmann G. A uniqueness theorem for an inverse boundary value problem in electrical prospecting. *Comm. Pure and Appl. Math.*39, 1986, 92–112.
10. Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography. New York, Wiley & Sons, 1986.
11. Uno T, Adachi S. Inverse scattering method for one-dimensional inhomogeneous layered media. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-35, N 12, 1987, 1456-1466.
12. Batrakov DO, Zhuck NP. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique. *Inverse Problems*. - Feb., 1994. - vol.10, № 1. - P.39-54.
13. Tijhuis, AG, Van der Worm C. Iterative approach to the frequency-domain solution of the inverse scattering problem for an inhomogeneous lossless dielectric slab, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. AP-32, N 7, 1984, 711-716.
14. Batrakov, DO. Quality and efficiency of information monitoring at radio wave testing of inhomogeneous dielectric layers by using a multifrequency method. *Defektoskopiya.*, N8, 1998, 68-76.
15. Habashy, TM, Chew WC, Chow EY. Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity profiles in a radially inhomogeneous slab. *Radio Sci.*, Vol.21, 1986, 635-645.
16. He S, Frequency and time-domain Green function technique for nonuniform LCRG transmission lines with frequency-dependent parameters. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 7, No. 1, 1993, 31-48.
17. Batrakov DO, Zhuk NP. Method for testing of layer-non-homogeneous dielectrics using numerical solution of reverse problem dialing with dissipation in polarization parameters domain. *Defektoskopiya (Russian Journal of Nondestructive Testing)*, No 6, 1994, 82-87.
18. Zhuck NP, Batrakov DO. 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. <https://dokumen.tips/documents/determination-of-electrophysical-properties-of-a-layered-structure-with-a-statistically.html>
19. Denisov AM. Elements of the Theory of Inverse Problems. VSP, 1999, PP. 272. https://books.google.com.ua/books?id=Xe6TQONRVC8C&hl=ru&source=gbs_book_similarbooks
20. Romanov VG, Kabanikhin SI. Inverse Problems for Maxwell's Equations. VSP, 1994, P. 249. https://books.google.com.ua/books?id=EIMLXfuT_jgC&hl=ru&source=gbs_book_similarbooks
21. Batrakov DO, Golovin DV. Application of tikhonov regularization technique to investigation of the electromagnetic field scattered by inclusion in multilayered media. 2010 Jun 1; DOI: [10.1109/MSMW.2010.5546204](https://doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546204)
22. Batrakov DO, Tarasov MM. Algorithm of solving inverse scattering problems using the pontryagin maximum principle. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1999, 44(2), стр. 137–142. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8299693500>

23. Batrakov D, Golovin D. Null-Field Method Enhancement Technique for the Investigation of Scattering from Inclusions in Plane-Layered Media. 2006 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. doi: <https://doi.org/10.1109/MMET.2006.1689837>
24. Batrakov DO. Quality and efficiency of data analysis in multifrequency radio-wave testing of laminated dielectrics. Russian Journal of Nondestructive Testing, 1998, 34(8), P. 612–618. <https://www.scopus.com/sourceid/17903?origin=resultslist>
25. Zakharov A, Sergii Rozenko, Pinchuk L, Sergii Litvintsev. Microstrip Quasi-Elliptic Bandpass Filter With Two Pairs of Antiparallel Mixed-Coupled SIRs. IEEE microwave and wireless components letters. 2021 May 1;31(5):433–6. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2021.3065394>
26. Zakharov A, Rozenko S, Litvintsev S, Ilchenko M. Trisection Bandpass Filter With Mixed Cross-Coupling and Different Paths for Signal Propagation. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2020 Jan;30(1):12–5. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2957207>
27. Sergii Litvintsev, Sergii Rozenko. Synthesis of Dual-band Filter with Improved Functionality Based on Dual-mode Resonator. 2021 Sep 8; <https://doi.org/10.1109/DIPED53165.2021.9552281>
28. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG. Comparative Analysis of Spectral Characteristics of Pulse GPR Signals for Road Pavement Assessment. Radioelectronics and Communications Systems. 2021 May;64(5):238–46. <https://doi.org/10.3103/S0735272721050022>
29. Dubrovka FF, Bulashenko AV. Analytical Method of Constructive Synthesis of Compact Polarizers with Maximally Flat Phase-Frequency Characteristic Based on Two Reactive Elements in Square Waveguide. Radioelectronics and communications systems. 2022 Dec 1;65(12):621–40. <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272722090035> <http://radio.kpi.ua/article/view/s002134702104004x>
30. Zakharov A, Litvintsev S, Ilchenko M. Transmission Line Tunable Resonators With Intersecting Resonance Regions. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2020 Apr;67(4):660–4. <https://doi.org/10.20535/S0021347021030018>
31. Batrakov DO, Zhuk NP. Iterative solution of inverse problem of nonuniform medium sounding in the range of polarization parameters. Radiotekhnika i Elektronika, 1993, 38(6), PP. 1106–1114. <https://www.scopus.com/authorid/detail.uri?authorId=8299693500>

Стаття надійшла до редакції: 14 лютого 2023 р.

Рекомендовано до друку: 3 квітня 2023

INVERSE SCATTERING PROBLEMS AND THEIR APPLICATIONS IN VARIOUS FIELD OF TECHNOLOGY

D.O. Batrakov

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance. The practical application of subsurface radar methods for solving the problems of diagnostics and assessing the state of technical objects, flaw detection of multilayer structurally inhomogeneous structures, searching for subsurface inhomogeneities of natural or artificial origin is based on estimating the parameters of the objects under study by the magnitude of the scattered characteristics. The solution of these problems is based on the solution of inverse scattering problems. Therefore, the development and improvement of methods for solving inverse problems of electromagnetic field scattering by subsurface inhomogeneities is an extremely urgent task of radiophysics.

The purpose of work analysis of methods for solving inverse scattering problems for various scientific and technical applications. This is primarily the task of non-destructive testing and remote sensing of natural and artificial objects.

Materials and methods. The analysis is based on the application of analytical methods, numerical simulation methods, statistical methods and experimental verification of the results obtained. The main attention is paid to the analysis of approaches based on the use of the Newton-Kantorovich scheme, the Tikhonov regularization method and the Pontryagin maximum principle for determining the electrical parameters of flat-layered media - the relative permittivity and, at the next stage, the geometric parameters of the structural layers.

The results. Various approaches to solving inverse scattering problems, as well as their combinations, are analyzed. The main attention is paid to the results in the field of non-destructive testing and remote sensing using wave methods. The spheres of practical application of methods for solving inverse scattering problems are considered and possible directions for their development are formulated.

Conclusions. The results of the analysis performed form the basis for the development of new methods for solving inverse scattering problems and for improving the previously proposed methods.

KEYWORDS: inverse scattering problems; a priori information; informative parameter; investigated structure; ultra-wideband signals.

The article was received by the editors: 14 February 2023

The article is recommended for printing: 3 April 2023