

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ

УДК 004.921

¹В.А. Глива

Доктор технічних наук, доцент, професор кафедри безпеки життєдіяльності

²М.І. Дмитришак

Магістр кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

²Л.О. Левченко

Кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

²Ю.А. Тарнавський

Кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

²О.В. Филонич

Здобувач на ступінь кандидата технічних наук, спеціальність управління проектами та програмами

¹Національний авіаційний університет, Київ

²Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ГЕОЛОГІЧНИХ РОЗРІЗІВ ЗА ДАНИМИ ГЕОРАДАРА

Досліджено комп'ютерні методи обробки георадарних даних для побудови геологічних розрізів. Дано оцінку сучасному стану проблеми і засобам автоматизації з її розв'язання.

Ключові слова: георадар, радарограма, геологічний розріз

Исследованы компьютерные методы обработки георадарных данных для построения геологических разрезов. Дана оценка современному состоянию проблемы и средствам автоматизации ее разрешения.

Ключевые слова: георадар, радарограмма, геологический разрез

In this paper the computer-based processing of GPR data for the construction of geological sections. On to estimate the current status of the problem and it's automation solutions.

Keywords: ground penetrating radar, radarohrama, geologic section

Постановка проблеми

Георадар – це універсальний прилад, що призначений для реєстрації підземних неоднорідностей. Георадар успішно використовується в геології, для інспекції автомобільних доріг та залізобетонних споруд, пошуку і дослідження підземних комунікацій, таких як кабельні траси і трубопроводи.

Особливо активно георадар використовується в геології для побудови геологічних розрізів, пошуку в ґрунті порожнин штучного і природного походження, пошуку і розвідці корисних копалин. Унікальні можливості георадара використовуються для досліджень в області інженерної геології, а також в інженерно-геологічних вишукуваннях для будівництва.

Практика використання георадара підтвердила

реальність помітного скорочення вартості і термінів інженерно-геологічних вишукувань при підвищенні якості результатів вивчення території.

У процесі інженерно-геологічних вишукувань для проектування об'єктів будівництва застосування георадара забезпечує достовірні дані про інженерно-геологічну будову ділянки без додаткового буріння, що особливо важливо в складних умовах міської забудови і на ділянках, де неможливо проводити буріння. При зіставленні даних, отриманих за допомогою георадара, з даними буріння, з'ясовується будова міжскважинного простору, виявляються структурно-речові неоднорідності, можливе визначення просторового положення порожнеч. Дані про будову інженерно-геологічного розрізу, що отримані за допомогою георадара,

дозволяють детальніше охарактеризувати територію досліджень. І при цьому забезпечується скорочення кількості пробурених свердловин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемам інтерпретації радарограм і розробці підходів до побудови геологічних перерізів присвячені роботи численних іноземних і вітчизняних науковців. Серед вітчизняних слід назвати В.О. Ковтуна, В.Р. Любчика, О.М. Килимник, В.К. Хмелевського, В.М. Бондаренка, А.В. Старовойтова, Р.Р. Денисова, В.В. Капустина, М.Л. Владимірова. Аналіз наукових робіт зазначених авторів свідчить про актуальність проблематики і необхідність використання сучасних підходів до її розв'язання.

Невирішені раніше частини загальної проблеми

Сучасні підходи до проблеми інтерпретації георадарних даних ґрунтуються на використанні комп'ютерних технологій. На сьогодні розроблене програмне забезпечення для реалізації окремих методів, проте комплексна задача автоматизації процесу побудови геологічних перерізів залишається не розв'язаною.

Мета статті

Метою статті є дослідження сучасного стану проблеми автоматизованої обробки радіолокаційних даних і побудови геологічних перерізів у вигляді конструктивних креслень.

Виклад основного матеріалу дослідження

Принцип дії георадара заснований на випромінюванні наносекундних імпульсів, прийомі сигналів, відбитих від границь розділу порід, стробоскопічній обробці прийнятих сигналів і подальшому вимірюванні часових інтервалів між відбитими імпульсами [5].

Геологічна інтерпретація георадіолокаційних даних відбувається за чотири етапи [6]:

1. Виділення корисного сигналу;
2. Виділення георадарних комплексів;
3. Виділення георадарних фацій;
4. Побудова геологічного розрізу.

Перший етап полягає у виокремленні корисного сигналу на фоні перешкод і шуму і виявленню хвиль-перешкод. Розрізняють два типи таких хвиль.

До першого типу хвиль-перешкод належать хвилі, відбиті від об'єктів, що перебувають під поверхнею землі. Залежно від форми об'єкта, вісі синфазності таких хвиль-перешкод можуть мати вид

дифрагованої, прямолінійної хвилі або бути їх комбінацією. На радарограмі вони відображаються у вигляді осей синфазності, що перетинають вісі синфазності корисних хвиль, і відрізняються від них значно більшою інтенсивністю.

Хвилі-перешкоди другого типу найчастіше спостерігаються при дослідженні річок і озер і являють собою, так звані, кратні і неповнократні відбиття. На радарограмах вони спостерігаються у вигляді кількарязового «повторення» картини осей синфазності.

Для виокремлення корисних сигналів використовують відмінність їх характеристик від відповідних характеристик шуму і хвиль-перешкод. Використовуючи на ці відмінності, за допомогою різноманітних прийомів перетворення сигналів, хвилі-перешкоди намагаються послабити і видалити із запису. До таких прийомів належать процедури корекції амплітуд, лінійної обробки (фільтрації), підвищення роздільної здатності (деконволюції), введення статичних поправок для врахування рель'єфу поверхні.

На другому етапі відбувається виокремлення основних елементів розрізу, що отримали назву георадарних комплексів. Виділення границь таких комплексів відбувається на основі аналізу поведінки осей синфазності корисних хвиль: у разі припинення їх прослідковуваності (кутове непогодження) і різкої зміни інтенсивності (стратиграфічне або паралельне непогодження).

Третій етап пов'язаний з детальною інтерпретацією хвильової картини в межах георадарних комплексів – на цьому етапі виокремлюють, так звані, георадарні фації. Виділення фацій всередині георадарного комплексу ґрунтується на детальному аналізі хвильової картини: конфігурація осей синфазності відбитих хвиль (наприклад, паралельні, хвилясті, хаотичні і т.д.); амплітуда відбиття; частотний склад запису; протяжність осей синфазності; швидкість поширення хвилі.

В окремих випадках до кожної траси на радарограмі може бути застосоване перетворення Гільберта. Амплітуди Гільберт-перетворення можуть допомогти виділити на радарограмі області, що не мають чітких кордонів, де важко простежити вісі синфазності. Частота Гільберт-перетворення вказує на ділянки з різним частотним складом, що не завжди можна побачити на вихідній радарограмі. Фаза Гільберт-перетворення може допомогти виділити на радарограмі області, що не відрізняються ні амплітудою, ні частотним складом, але мають істотні фазові зрушення.

З метою підвищення роздільної здатності розроблена методика обробки радарограм із застосуванням вейвлет-аналізу [9]. Неперервні

вейвлет-перетворення широко застосовуються для обробки сигналів і дають унікальні можливості для виявлення «тонких» особливостей сигналів.

На *четвертому етапі* здійснюється побудова глибинного геологічного розрізу: отримані на попередніх етапах дані «прив'язуються» до шарів, виділених за даними буріння. Прив'язка здійснюється зверху до низу. Спочатку, маючи глибину першого шару (потужність шару) і час поширення електромагнітної хвилі, розраховується швидкість і відповідно діелектрична проникненість шару. Якщо отримані реальні дані, то швидкість і діелектрична проникненість далі розраховуються для наступного за глибиною шару. В іншому випадку до потужності верхнього шару додається потужність нижчого і процедура повторюється.

На сьогодні в галузі підповерхневого радіолокаційного зондування найчастіше використовуються традиційні підходи, що передбачають напівавтоматичну обробку первинних георадіолокаційних даних засобами програмного забезпечення самого георадара. Короткі відомості про такі програми наведені нижче.

GeoWaves – програма призначена для обробки хвильових форм, отриманих георадарами ГРОТ. Вона дає змогу будувати очікувані границі поділу середовищ, а потім розраховувати форму відбитих хвиль і час їх поширення до границі (тобто розв'язувати пряму задачу розсіяння). Передбачена можливість виконання вейвлет-перетворення отриманого профілю.

GRES Basic – програма призначена для обробки радіолокаційних профілів, отриманих в польових умовах за допомогою георадарів сімейства RIS. Вона дає змогу застосовувати до радіолокаційних даних різні фільтри, алгоритм міграції, функції посилення сигналу і т.д.

GeoScan – програма управління і візуалізації даних, отриманих георадаром «Око». Базова версія забезпечує управління георадаром у всіх режимах і обробку інформації з використанням найбільш універсальних методів обробки без використання тривимірної графіки. Професійна версія забезпечує управління георадаром і надає можливість проведення практично всіх відомих методів обробки георадарної інформації, включаючи тривимірну візуалізацію.

RadExplorer – спеціалізована програма призначена для інтерактивної обробки та інтерпретації даних георадіолокації. Містить такі процедури обробки, як видалення постійної складової, зміщення нуля часу, редакції трас, просторової інтерполяції, двовимірної фільтрації, корекції амплітуд, прогнозування деконволюції, смугової фільтрації, F-K міграції Столта, перетворення Гільберта та інші.

RADAN – програма має модульну структуру. Майстер автоматичної обробки даних забезпечує використання різних способів коригування і покращення даних. Забезпечується виведення інтерпретованих даних в AutoCAD.

Підвищення достовірності інтерпретації результатів радіозондування можливе на основі реконструкції їх геометричних і електрофізичних параметрів, що приводить до необхідності розв'язання обернених задач розсіяння [6]. В цьому випадку задача розпізнавання об'єктів x зводиться до визначення їх геометричних і електрофізичних параметрів (ϵ , μ , σ) за вимірними характеристиками розсіяного поля u , які пов'язані між собою операторним рівнянням $Ax=u$. Визначення u за відомим x є прямою задачею; визначення x за спостереженням u є оберненою задачею. Найчастіше розв'язання оберненої задачі здійснюється методом підбору: на основі апріорної інформації будується сімейство моделей будови об'єкта $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, для кожної з яких розв'язується пряма задача.

Подібний підхід до розв'язання оберненої задачі розсіяння запропонований в [1]. В ній інтерпретація георадіолокаційних даних, а також відновлення точних геометричних характеристик точкових і розподілених об'єктів, виконане на основі математичної моделі «оригінал-образ». В рамках моделі розглянуті пряма і обернена задачі. Пряма задача зводиться до побудови аналога відбитої хвилі при георадарному скануванні довільної поверхні. Розв'язок прямої задачі дозволяє отримати необхідну математичну модель для розв'язання оберненої задачі – відновленню вихідної поверхні за образом відбитої хвилі. Для обробки отриманих даних і представлення їх у вигляді картини геологічних шарів розроблено також відповідне програмне забезпечення – GeoRoadSystem.

Використання поля оберненого розсіяння електромагнітних хвиль для визначення електрофізичної будови середовища виявляється особливо ефективним у випадку діелектрично-неконтрастних шарів, тобто, коли характеристики шарів змінюються плавно (наприклад, внаслідок дифузійних процесів) і виділити вісі синфазності на радарограмі важко або взагалі неможливо [3].

В цьому випадку поле оберненого розсіяння одержується в результаті обробки радарограми засобами просторової і частотної фільтрації. Для кожної точки розраховуються значення динамічних параметрів – частоти, затухання, амплітуди і т.п. Далі використовуються апріорні або статистичні залежності діелектричної проникненості від динамічних параметрів. Заключний етап побудови розрізу – інтерполяція значень діелектричної

проникненості в опорних точках відомими математичними методами. Таким чином, на вхід програми автоматичної обробки подається числова матриця амплітуд відбитих сигналів, отриманих при георадіолокаційному профілюванні, на виході формується матриця того ж розміру, але вже зі значеннями діелектричної проникненості для кожної точки двовимірного простору розрізу.

Застосування автоматизованого аналізу поля зворотного розсіювання для обробки результатів георадіолокаційного профілювання реалізовано в програмі «Георадар-експерт» (свідоцтво про державну реєстрацію № 2011616392, Росія). На сьогодні це єдина програма, в якій реалізована можливість автоматизованого виділення і аналізу поля зворотного розсіювання та побудови розрізу з цілого ряду атрибутів хвильового поля і параметрів досліджуваного середовища, обчислених на основі даних атрибутів. Крім цього, як і в інших програмах перегляду й обробки георадіолокаційних даних, в ній також передбачений стандартний набір прийомів цифрової обробки сигналів (частотна фільтрація, віднімання середнього, згладжування, загострення, виділення обвідної сигналів, налаштування параметрів візуалізації і т.п.), режим нанесення границь на георадіолокаційний профіль і режим 3D-візуалізації.

Найсучасніші методи обробки георадарних даних ґрунтуються на точних розв'язках інтегральних рівнянь, що враховують розсіювання хвиль на діелектрично контрастних підповерхневих об'єктах [7]. Такі підходи пов'язані з великим обсягом обчислень і є придатними лише для розв'язання окремих модельних задач. На практиці ж зазвичай використовуються уявлення теорії монохроматичних хвиль, що веде до часткової втрати інформації, що міститься в хвильовій формі відбитих георадарних імпульсів. У зв'язку з цим цікавими є модельні розрахунки, які дають розв'язки хвильового рівняння в аналітичному вигляді і прояснюють фізичні механізми формування імпульсного хвильового поля. Одна з таких модельних задач про випромінення нескінченного лінійно-протяжного джерела розглянута в роботах [4; 8]. Запропонований в роботі метод розрахунку просторово-часової картини випромінення ґрунтується на точному розв'язанні нестационарної задачі дифракції. У результаті виявлена залежність форми зондуючого імпульсу від напрямку випромінювання. Особливу поведінку виявив сигнал, що поширюється вздовж границі поділу середовищ: він складається з двох імпульсів протилежної полярності, які поширюються з різними швидкостями. По цьому сигналу вдається відновити зондуючий імпульс. Отриманий розв'язок оберненої задачі дозволяє

покращити виявлення підповерхневих об'єктів і границь розділу шляхом деконволюції первинних георадарних даних і відновлення форми імпульсу струму.

Висновки

Підсумовуючи, слід зазначити, що задача автоматизації процесу інтерпретації георадарних даних залишається актуальною. Первинна обробка радарограм найчастіше здійснюється засобами програмного забезпечення георадара, яке може включати і такі «тонкі» інструменти, як перетворення Гільберта і вейвлет-аналіз. Проте така обробка, як правило, виконується інтерпретатором в напівавтоматичному режимі. Повна автоматизація процесу інтерпретації георадарних даних можлива на основі розв'язання оберненої задачі розсіяння.

Список літератури

1. Замотайлов О.В. Разработка метода восстановления изображения со специализированных приборов: Автореф. дис. канд. тех. наук. – Москва, 2012, 18 с.
2. Старовойтов А.В. Интерпретация радиолокационных данных. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 190 с.
3. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. – 2010. – №4. – С. 76–80.
4. Едемский Ф.Д. Модельные задачи и практические методики импульсного подповерхностного зондирования: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Троицк, 2011. – 17 с.
5. Владимиров М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. – М.: МГУ, 2004. – 153 с.
6. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю.Гринёва. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
7. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризация в геофизике. – М.: Научный мир, 2007. – 712 с.
8. Едемский Ф.Д., Попов А.В., Запунди С.А., Павловский Б.Р. Точное решение модельной задачи подповерхностного зондирования: сб. докл. // 4-ая всероссийская научная школа и конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» (2009). Россия, Муром. – С. 272 – 276.
9. Федорова Л.Л., Соколов К.О. Решение задач обработки и интерпретации георадиолокационных данных на основе вейвлет-анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №8. – С. 153 – 158.

Стаття надійшла до редколегії 20.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.О. Лук'яненко, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.