

Д.В. Спірінцев, А.В. Найдиш

МЕТОДИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ

Анотація. Виконано огляд основних напрямків, в яких ведуться роботи по оптимізації розв'язання задач моделювання та візуалізації складних тривимірних об'єктів цифрової моделі рельєфу.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу (ЦМР), геометричне моделювання, візуалізація, ГІС-аналіз, ВДГМ, БН-числення.

Постановка проблеми. На відміну від цифрових уявлень точкових, лінійних і двовимірних об'єктів, тривимірні об'єкти вимагають особливих форм уявлення. Одним з поширених типів тривимірних об'єктів є топографічний рельєф земної поверхні. За допомогою тривимірних об'єктів можуть бути також змодельовані карти щільності населення, атмосферного тиску, вологості і т.ін. Тривимірні моделі такого типу традиційно пов'язують з цифровими моделями рельєфу. ЦМР дозволяють за кінцевим набором вибірковок точок визначати піднесення, крутизну схилу, напрямок скату в довільній точці на місцевості. Можливо виявлення особливостей місцевості - басейнів річок, дренажних мереж, піків, западин і т.ін. Такі моделі широко застосовуються в багатьох процедурах ГІС-аналізу: при виборі місця будівництва будівель та комунікацій, в аналізі дренажних мереж, в аналізі видимості, при виборі маршруту руху по пересіченій місцевості. Особливо широко цифрові моделі рельєфу застосовуються в гідрології. Одним з основних етапів побудови ЦМР є візуалізація проміжних і кінцевих результатів моделювання. Не дивлячись на те, що ця проблема вивчається досить давно, останнім часом їй приділяється досить багато уваги. Це обумовлено тим, що проблема високої швидкості обробки графічної інформації є завжди актуальною. У зв'язку з різко збільшеними можливостями обчислювальної техніки складається тенденція до побудови все більш адекватних і складних геологогеофізичних моделей. Звідси впливає актуальність проблеми моделювання та візуалізації тривимірних об'єктів ЦМР.

Аналіз публікацій по темі дослідження. До класичних способів візуалізації двовимірних полів параметрів (поверхонь) можна віднести [1]: карти, карти в ізолініях і тривимірні поверхні. Сучасні алгоритми побудови ліній рівня вирішують ряд проблем: підвищення швидкості відображення [2-4], боротьба з шумами і згладжування ізоліній [3, 4], облік обмежень, що накладаються [5, 6]. При відображенні карти у вигляді тривимірної поверхні ситуація набагато складніше, ніж при відображенні ізоліній. Основною проблемою тут є швидкість візуалізації. Відображення високо детальної моделі (наприклад, побудованої на рівномірній сітці з кількістю вузлів порядку 10 000 000) прямими методами виявляється скрутним [1]. Це обумовлено декількома причинами: нестача пам'яті комп'ютера, низька швидкість відображення великого обсягу інформації, використання нерациональних алгоритмів. Якщо перші дві причини вирішуються завдяки нарощуванню потужності обчислювальної техніки, то третя причина вимагає розробки відповідних алгоритмів і методів моделювання, що свідчить про актуальність даної проблеми.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є розгляд основних напрямків з оптимізації розв'язання задачі візуалізації складних геофізичних об'єктів та основних напрямів геометричного моделювання для побудови ЦМР.

Основна частина. Виділимо основні напрямками, в яких ведуться роботи по оптимізації рішення задач візуалізації складних об'єктів:

– *багатомасштабне подання інформації* [2,7,8]. Поверхня, задана з високою роздільною здатністю, розкладається на версію з низьким розширенням і набір уточнюючих коефіцієнтів. Даний підхід дозволяє швидко переходити від грубого представлення поверхні до більш детального поданням. Таким чином прискорення виходить за рахунок скорочення обсягу інформації, що відображається (відсікання несуттєвих деталей).

– *Побудова адаптованих сіток* [2,7]. Будуються сітка, отримана в результаті аналізу характерної структури досліджуваного об'єкта. Така сітка повинна з одного боку містити якомога менше вершин, з іншого - забезпечувати найбільш повне уявлення поверхні. Зменшення кількості вузлів дозволяє прискорити процес візуалізації поверхні - відтворення її зображення, обертання і т.ін.

– *Застосування високопродуктивних алгоритмів.* Використання високоефективних алгоритмів є основою для побудови високопродуктивних програм візуалізації великих обсягів інформації за умови оптимального використання технічного та програмного забезпечення.

Континуальний характер природних оболонок географічного середовища має на увазі безперервний розподіл, в тому числі, параметрів підстилаючої поверхні, що при сучасних особливостях отримання інформації у вигляді дискретних спостережень в точках, приводить нас до необхідності використовувати методи просторової інтерполяції для заповнення досліджуваного об'єкта необхідними даними. Незважаючи на десятки робіт, немає однозначної думки щодо кращого інтерполяційного методу. Від якості обробки вихідного числового матеріалу істотно залежить довіра до отримуваних висновків. Тому, розглянемо основні методи 3D інтерполяції, що застосовуються в геоінформаційних системах (ГІС).

Метод найближчої точки [9,10]. Даний метод є найпростішим інтерполяційним методом, що дозволяє інтерполювати будь-які типи даних для будь-яких типів решіток шляхом присвоєння атрибутів найближчої точки поточного вузла решітки GRID або сітки MESH. Основним і головним недоліком цього методу є його точність.

Білінійна інтерполяція [11,12]. Білінійна інтерполяція є розширенням лінійної інтерполяції для функції двох змінних. В якості вхідних даних приймаються 4 координати, проекції яких на площину xOy знаходяться в вершинах деякого прямокутника. Також, даний метод можна застосувати до будь-якої регулярної сітки, послідовно застосувавши його до кожної «комірочки». Переваги даного методу - простота і велика швидкість обчислення, при розпаралелюванні на GPU. Однак, реальні дані часто представлені у вигляді нерегулярної сітки, в якій частота вузлів не є постійною, і може сильно змінюватися від однієї області до іншої.

Метод обернено зважених відстаней (ОЗВ) [9,10,12]. В даному методі обчислюються вагові коефіцієнти, необхідні для побудови інтерполяційної функції. При цьому вага, присвоєна окремій точці даних при обчисленні вузла сітки, пропорційна степені зворотної відстані від вихідної точки до розрахункового вузла сітки. При обчисленні інтерполяційної функції в будь-якому вузлі сітки сума

всіх призначених ваг дорівнює одиниці. Якщо точка спостереження збігається з вузлом сітки, то даний метод працює як точний інтерполятор. Вагова функція залежить від відстані і радіально симетрична щодо кожної розсіяної точки. Недоліки методу - генерація структур типу "биче око" навколо точок спостережень з екстремумними значеннями функції [10], крім того довго працює при великій кількості вихідних даних [12].

Метод мінімальної кривини (метод сплайну) [10]. Використовується метод інтерполяції, який оцінює значення за допомогою математичних функцій, які мінімізують загальну кривину поверхні, що призводить до згладженої поверхні, яка проходить через вхідні точки. Метод мінімальної кривизни, однак, не є точним методом. Він генерує найбільш гладку поверхню, яка проходить настільки близько до експериментальних точок, наскільки це можливо, але ці експериментальні точки не обов'язково належать інтерполяційній поверхні [13].

Метод Кріге (крігінг) [10]. Даний метод є одним з найпоширеніших. При крігінгу передбачається, що відстань або напрямок між опорними точками відображає просторову кореляцію, яка може використовуватися для пояснення зміни на поверхні [14]. Крігінг використовує математичну функцію для певної кількості точок або всіх точок в межах заданого радіусу, щоб визначити вихідне значення для всіх напрямків. Крігінг аналогічний ОЗВ, проте, тут вага залежить від встановленої моделі для вимірюваних точок, від відстані до місця розташування прогнозу і від просторових відносин між вимірюваними значеннями навколо місця розташування прогнозу. Варіації методу Кріге визначаються, головним чином, трьома складовими - моделлю варіограми (призначена для знаходження локальної околиці точки і визначення ваг спостережених точок, використовуваних при інтерполяції функції у вузлі мережі), типом тренда (визначає тенденцію в характерній просторовій зміні даних) і «ефектом самородку» (дозволяє врахувати похибку визначення параметрів у вузлових точках).

Метод радіальних базисних функцій (РБФ) [10,15]. Даний метод є методом жорсткої інтерполяції, тобто інтерполяційна поверхня повинна проходити через кожне виміряне опорне значення. На противагу методу ОЗВ, РБФ можуть інтерполювати значення вище мак-

симального або нижче мінімального виміряного значення. Радіальні базисні функції аналогічні варіограммам, використовуваним в методі Кріге. Ці функції визначають оптимальну мережу ваг, за допомогою яких зважуються значення функції в точках спостережень при побудові інтерполяційної функції.

Метод Шепарда [10,16]. Даний метод подібний до методу ОЗВ. Він також використовує зворотні відстані при обчисленні вагових коефіцієнтів, за допомогою яких зважуються значення експериментальних Z-значень в точках спостережень. Відмінність полягає в тому, що при побудові інтерполяційної функції в локальних областях використовується метод найменших квадратів. Це зменшує ймовірність появи на згенерованій поверхні структур типу "биче око".

Метод триангуляції з лінійною інтерполяцією [10]. В даному методі вихідні точки даних з'єднуються таким чином, що результуюча поверхня покривається поверхнею з граней трикутників, формування яких відбувається за допомогою методу триангуляції Делоне. При цьому жодна зі сторін трикутника не перетинається зі сторонами інших трикутників. Значення функції в вузлах регулярної сітки, що потрапляють всередину цього трикутника, належать площині, що проходить через вершини трикутника. Оболонка триангуляційної поверхні формується одним або кількома полігонами. Усередині або на ребрі полігонів оболонки можна інтерполювати Z-значення поверхні, виконувати аналіз і генерувати відображення поверхні.

Метод природної околиці (природних сусідів) [9,10]. Даний метод інтерполяції був введений в роботі [17], а детально описаний в роботі [18]. Як і ОЗВ, даний метод заснований на зваженому усередненню значень. Однак, замість обчислення значення на підставі значень всіх точок, зворотньо зважених по відстані до них, тут за вхідними точкам будується триангуляція Делоне, вибираються найближчі вузли, які формують опуклу оболонку навколо інтерпольованої точки, а потім їх значенням присвоюється вага, пропорційна площі. Метод ПО також не може екстраполювати данні за межі опуклої оболонки полігонів Делоне. Найголовніший плюс даного методу - відсутність потреби обробляти всі відомі точки, а тільки ті, які є найближчими до деяких растрів, при поточному рівні деталізації [12], крім того, даний метод може ефективно працювати з

великими наборами вхідних даних.

Методи точкового числення *Балюби-Найдиша* (БН-числення) [19]. Один з прикладів є спосіб «Лупа». Розроблені алгоритми дозволяють позбутися від шумових складових цифрової моделі земельної поверхні (під шумовими складовими маються на увазі точки, які не належать до рельєфу місцевості - рослинність і архітектурні споруди). Серед переваг БН-числення можна зазначити: можливість попереднього завдання необхідної точності даних що моделюються; в основі апроксимації можуть лежати криві високого порядку гладкості; виконується формалізація моделюємої ділянки земної поверхні; відсутні операції проектування на площині поверхні (розрахунки виконуються одночасно для всіх координат точок поверхні, що, в свою чергу, дозволяє значно підвищити швидкість розрахунків); розрахунок може виконуватися як для регулярних, так і нерегулярних сегментів земельної поверхні. Для більшої наочності можна провести триангуляцію отриманої точкової моделі.

Методи *варіативного дискретного геометричного моделювання* (ВДГМ) [20]. У цьому напрямку поверхня може розглядатись або як однопараметрична множина кривих ліній, або як двопараметрична точкова множина. Відповідно до кожного з цих напрямків розроблені відповідні алгоритмічні та програмні реалізації [20]. У результаті застосування даних алгоритмів формується нова дискретна множина точок і значень похідних у них. При цьому відбувається як завгодно щільне згущення точкового масиву, як локальне так і глобальне, після чого на множині отриманих точок будується багатогранна поверхня, що представляє шукану поверхню в наступному розв'язанні прикладної задачі. Крім того методи ВДГМ можуть задовольняти декільком умовам моделювання одночасно.

Висновки. Отже, основним напрямком оптимізації розв'язання задач візуалізації складних об'єктів, є використання високоефективних, економічних і простих у реалізації алгоритмів для побудови багатомасштабного подання інформації і побудови адаптивних сіток, що є основою для побудови високопродуктивних програм візуалізації великого обсягу інформації.

З метою зменшення кількості вхідних даних (усунення їх надлишковості) необхідно виконати процедуру попередньої підготовки даних. Тобто виключити з вихідних даних аномалії і шу-

ми, використовуючи для цього спеціальні алгоритми, наприклад, спосіб «лупа» [19].

З наведеного огляду найбільш перспективними можна вважати методи крігінгу, природної околиці, методи ВДГМ та методи БН-числення. Однак, при більш детальному розгляді даних методів їм також притаманні деякі недоліки. Тому подальші наші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення існуючих та розробку нових методів просторової інтерполяції тривимірних об'єктів.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский М. В. Оптимизация некоторых алгоритмов восстановления полей геологических и геофизических параметров: дис....канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 / Дмитриевский Михаил Владимирович – Тюменский гос. ун-т, 2003. – 145 с.
2. Переберин А.В. Многомасштабные методы синтеза и анализа изображений : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.11 / Переберин Антон Валерьевич – Ин-т прикладной математики им. М.В. Келдыша. Москва, 2002. – 138 с.
3. Переберин А.Б. Построение изолиний с автоматическим масштабированием / А.Б. Переберин // Вычислительные методы и программирование. – 2001. Т.2. – С. 22-32.
4. Кутрунов В. Н. Каскадные алгоритмы обработки геофизической информации / В. Н. Кутрунов, В. Н. Пьянков, М. В. Дмитриевский// Вестник Тюменского университета. – Тюмень: ТГУ, 2001. – №2. – С. 190–197.
5. Костюк Ю. Л. Эффективные алгоритмы обработки и отображения графических данных и их реализация в программных комплексах: дис. ... доктора тех. наук : 05.13.18 / Костюк Юрий Леонидович - Томск, 2002. – 264с.
6. Фукс А. В. Разработка и исследование алгоритмов интерполяции однозначных поверхностей и их использование при построении цифровых моделей рельефа : дис.... канд. тех. наук : 05.13.18 / Фукс Александр Львович – Томский гос. ун-т, 2001. – 173 с.
7. Столниц Э. Вейвлеты в компьютерной графике. Теория и приложения / Э. Столниц, Т. ДеРоуз, Д. Салезин – Ижевск: Изд-во R&C Dynamics., 2002. – 272 с.
8. Шитов А. Б. Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для моделирования и обработки экспериментальных данных : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 / Шитов Андрей Борисович – Иваново, 2001. – 125с.
9. Петин А.Н. Геоинформатика а рациональном недропользовании / А.Н. Петин, П.В. Васильев – Белгород: Изд-во БелГу, 2011. – 268 с.
10. Айзель Г.В. Расчеты речного стока на основе модели SWAP для водосборов с недостаточным информационным обеспечением : дис. ... канд. техн. наук :

- 25.00.27 / Айзель Георгий Владимирович – Институт водных проблем РАН. Москва, 2014. – 156 с.
11. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учеб. пособие. - Спб.: БХВ-Петербург, 2011. – 608с.
12. Шусанов А.В. Исследование методов интерполяции поверхностей для задачи создания карты глубин водоемов/ А.В. Шустанов, П.Ю. Якимов// Журнал «Информационные технологии и нанотехнологии», 2016, С.971-976.
13. Franke R. Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines / R. Franke // Computer and Mathematics with Applications. – 1982. № 8. – С. 273–281.
14. Oliver M.A. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems / M.A. Oliver // International Journal of Geographic Information Systems. – 1990. № 4. – С. 313–332.
15. Hardy R.L. Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method / R.L. Hardy // Computers & Mathematics with applications. – 1990. Т. 19, № 8/9. – С. 163-208.
16. Franke R. Smooth interpolation of large sets of scattered data / R. Franke, G. Nielson // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1980. № 15. – С. 1691-1704.
17. Sibson R. A brief description of natural neighbour interpolation / R. Sibson // Interpreting Multivariate Data. – Wiley, 1981. – С. 21-36.
18. Watson, D. Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data. London: Pergamon Press, 1992.–321p.
19. Кучеренко В. В. Формалізовані геометричні моделі нерегулярної поверхні для гіперкілкісної дискретної скінченої множини точок: дис... канд. техн. наук : 05.01.01 / В. В. Кучеренко . – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – 208 с.
20. Найдиш В.М. Основи прикладної дискретної геометрії [навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації] / В.М. Найдиш, В.М. Верещага, А.В. Найдиш, В.М. Малкіна. – Мелітополь: ТДАТУ, 2007. – 194с.