

техн. конф. «Проблемы физической и биомедицинской электроники», г. Киев, 27–30 мая 1996. – С. 279–283. **8.** Жовнір, М. Ф. Оцінка потенційних роздільної здатності і точності вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на базі використання фазових набіганів поверхневих акустичних хвиль [Текст] / М. Ф. Жовнір, О. В. Шостак // Електроніка і зв'язь. – 2015. – Том 20, № 3(86). – С. 101–106. **9.** Морозов, А. И. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств [Текст] / А. И. Морозов, В. В. Проклов, Б. А. Станковский. – М.: Радио и связь, 1981. – 184 с. **10.** Шермегор, Т. Д. Пленочные пьезоэлектрики [Текст] / Т. Д. Шермегор, Н. Н. Стрельцова. – М.: Радио и связь, 1986. – 136 с. **11.** Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с. **12.** Перекрестов, І. С. Застосування методу компенсації фазового зсуву при синхронному детектуванні сигналів цифрових видів модуляції [Текст] / І. С. Перекрестов, П. В. Іващенко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 2. – С. 54–62. **13.** Матяш, І. Є. Детектування індукованим тепловим потоком напружень в твердому тілі за допомогою фотопружного мікроскопу [Текст] / І. Є. Матяш, І. А. Мінайлова, О. М. Мишук, О. О. Олійник, Б. К. Сердега, Б. А. Циганок // Електроніка та зв'язок. – 2014. – №2(79). – С. 9–22.

Bibliography (transliterated): 1. Polyakov, P., Xorunzhyj, V., Polyakov, V. (2007). Akustoelektronika. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy i primeneniye: Sprav. posoby (2nd ed., Vol. 1, 552). Xarkiv: Kompaniya SMYT. 2. Zhovnir, M., Chernyak, M., Didkivskiy, A., Naushenko, S., Dejnego, V. (2004). Fizyko-tekhnichni osnovy pobudovy vymiryuvalnogo peretvoryuvacha mikroperemishhen na poverknevnyh akustychnykh hvylyakh. Electronics and Communications, 23, 5–8. 3. Zhovnir, M., Chernyak, M., Chernenko, D., Sheremet, L. (2011). Vymiryuvalni

peretvoryuvachi fizychnykh velychyn na poverknevnyh akustychnykh hvylyakh. Electronics and Communications, 1(60), 153–157. 4. Chernenko, D., Zhovnir, M., Tsyganok, B., Oliinyk, O. (2012). Wireless passive pressure sensor using frequency coded SAW structures. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics”, 424–428. doi:10.1109/ISSE.2012.6273174 5. Chernenko, D., Kuzmenko, O., Zhovnir, M. (2013). Vymiryuvalni peretvoryuvachi tysku na osnovi zburennya elektrychnogo polya poverknevnyh akustychnykh hvyly. Visnyk Kremenchuk'skogo Nacionalnogo Universytetu Imeni Mykhajla Ostrogradskogo, 62–66. 6. Zhovnir, M., Kuzmenko, O., Pokutnyi, C. (2015). Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement. Journal of Applied Chemistry, 3(1), 7–13. 7. Zhovnir, M. (1996). Proceedings from Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauch.-texn.konf.: Problemy fizicheskoy biyomedycynskoj elektroniki. Kyiv: Ukraine, 279–283. 8. Zhovnir, M., Shostak, O. (2015). Ocinka potencijnykh rozdilnoyi zdutnosti i tochnosti vymiryuvalnykh peretvoryuvachiv linijnykh ta kutovykh peremishchen na bazi vykorystannya fazovykh nabigan poverknevnyh akustychnykh hvyly. Electronics and Communications, 101–106. 9. Morozov, A., Proklov, V., Stankovsky, B. (1981). Pezoelektrycheskye preobrazovateli dlya radioelektronnykh ustrojstv. Moscow: Radio i svyaz, 184 10. Shermegor, T., Strelczova, N. (1986). Plenochnye pezoelektriiki. Moscow: Radio i svyaz, 136. 11. Gonorovsky, Y. (1986). Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: Uchebnik dlya vuzov (4th ed.). Moscow: Radio i svyaz, 512. 12. Perekrstov, I., Ivashchenko, P. (2009). Zastosuvannya metodu kompensacii fazovogo zsuvu pry synhronnomu detektuvanni signaliv cyfrovyyh vydiv modulyciyi. Naukovi Praci ONAZ Im. O.S. Popova, 2, 54–62. 13. Matyash, I., Minailova, I., Mishhuk, O., Oliinyk, O., Serdega, B., Tsyganok, B. (2014). Detektuvannya indukovanym teplovym potokom napruzhen v tverdomu tili za dopomogoyu fotoprzhnogo mikroskopu. Electronics and Communications, 2(79), 9–22.

Надійшла (received) 20.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жовнір Микола Федорович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра Електронних приладів та пристроїв, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; вул. Політехнічна, 16, корпус №12. Київ, Україна, 03056.

Олійник Остап Олегович – аспірант, кафедра Електронних приладів та пристроїв, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; вул. Політехнічна, 16, корпус №12. Київ, Україна, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: ostap.oliinyk@gmail.com.

Жовнір Николай Федорович – кандидат технических наук, доцент, кафедра Электронных приборов и устройств, факультет электроники, Национальный технический университет Украины «КПИ»; ул. Политехническая, 16, корпус №12. Киев, Украина, 03056.

Олейник Остап Олегович – аспирант, кафедра Электронных приборов и устройств, факультет электроники, Национальный технический университет Украины «КПИ»; ул. Политехническая, 16, корпус №12. Киев, Украина, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: ostap.oliinyk@gmail.com.

Zhovnir Nikolai – candidate of technical sciences, associate professor, Department of Electronic Devices and Equipment, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"; 16 Polytechnique str, Kyiv, Ukraine, 03056.

Oliinyk Ostap – PhD student, Department of Electronic Devices and Equipment, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "KPI"; 16 Polytechnique str, Kyiv, Ukraine, 03056; tel.: 066-310-36-20; e-mail: ostap.oliinyk@gmail.com.

УДК 004.93'11

О. В. ПРОХОРЧУК, І. О. КУЧЕРЯВЕНКО

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДУ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ НАВІГАЦІЙНИХ КАРТ ГЕОФІЗИЧНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Розглядається порівняння існуючих методів інтерполяції для побудови еталонних навігаційних карт геофізичних полів Землі з метою знаходження оптимального. Для порівняння методів використовуються їх математичні моделі, моделювання відбувається за допомогою середовища MathLab, на основі якого формуються висновки оптимальності методу, спираючись на критерії оптимальності. Також розглядається модифікація отриманого оптимального методу з метою покращення його кількісних характеристик. Результати можуть бути використані для побудови кореляційно – екстремальних навігаційних систем, які працюють за геофізичними полями Землі.

Ключові слова: навігаційні системи, геофізичне поле Землі, побудова еталонних карт, методи інтерполяції.

© О. В. Прохорчук, І. О. Кучерявенко. 2015

Вступ. Питання інформаційного та алгоритмічного забезпечення геофізичних навігаційних систем є визначальним у розвитку даних систем. Якщо розробка теорії даних систем знаходиться на досить високому рівні і дозволяє синтезувати широкий клас практичних алгоритмів, то інформаційне забезпечення систем даного класу слід визнати недостатнім, а отже і основним стримуючим фактором на шляху широкого впровадження принципів геофізичної навігації в бортових комплексах літальних апаратів. Серед основних проблем розробки таких систем є проблема вирішення задачі створення еталонних карт, необхідних для роботи систем даного класу, на основі вимірних дискретних значень геофізичного поля. Одним із шляхів для вирішення цієї задачі є застосування різних методів інтерполяцій [1, 5, 9, 10]. Вибір методу інтерполяції безпосередньо впливає на точності характеристики усієї геофізичної системи.

Розглянемо задачу вибору оптимального методу інтерполяції для побудови еталонних карт геофізичного поля та можливого шляху покращення вже існуючих методів.

Існуючі методи інтерполяції. Для забезпечення безперервного постачання даних для геофізичної навігаційної системи необхідно забезпечити заповнення відсутніх, проміжних значень величини за наявним дискретному набору відомих значень геофізичного поля. Перехід від вихідних дискретних даних до інтерпольованих, особливо, у разі нерегулярних рідких мереж, призводить до серйозних помилок в інтерпретації [1].

В останнє десятиліття багато вітчизняних та іноземних дослідників в своїх роботах пропонують різні методи інтерполяції для творення різних видів карт з дискретного масиву чисел [1, 4, 5, 9]. Так в роботі [5] для аналізу великих масивів даних рекомендують метод зворотних відстаней, для аналізу невеликих масивів - методи крікінга і радіальних базисних функцій. В роботі [2], присвяченій дослідженню питання про побудову карт висотного поля найбільш задовільним вважають метод природного сусіда. В роботі [4] застосовували методи інтерполяції аналізувалися при вивченні рельєфу, але однозначно, жоден з них не був обраний в якості рекомендованого.

Пошук оптимального методу інтерполяції для побудови еталонної навігаційної карти геофізичного поля. Для пошуку оптимального методу побудови навігаційних карт були використані дані магнітної зйомки, отримані в липні 2012 р в природничому парку "Великий Луг" (Запорізька область) [10]. Для візуалізації масив даних був співвіднесений з координатами зняття показань і нанесений на ділянку, на якій проводилися дослідження (рис. 1)

Для вибору оптимального методу були обрані три критерії: візуальна стійкість на модельних прикладах при зменшенні; апіорної інформації; швидкодії методів; оцінка середньої квадратичної помилки методів.

Для перевірки візуальної стійкості даних алгоритмів використовувалася квадратна регулярна сітка ізометричного поля.

Результати моделювання демонструють, що при значному обсязі даних карти, побудовані різними методами, візуально не відрізняються одна від одної (рис. 1). При зменшенні апіорної інформації при використанні методу зворотних відстаней, виникають псевдоаномалії; в методі мінімальної кривизни в кутах мережі виникають градієнтні зони, а методи природного сусіда і триангуляції будують спотворені зображення (рис. 2, 3). Найбільш стійкими у всіх трьох моделях візуально є карти, побудовані методами крікінга, Шепарда і радіальних базисних функцій.

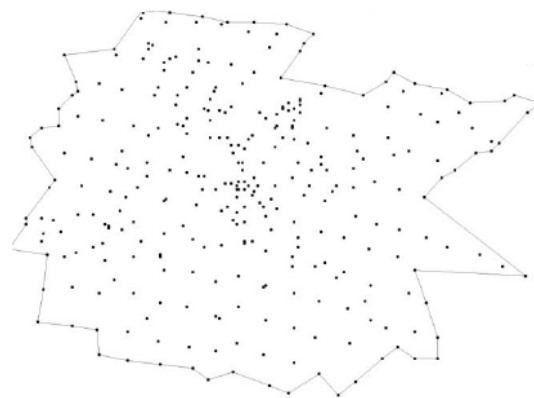


Рис. 1 – Точки вимірювань магнітної індукції на території природного парку "Великий Луг"

Для оцінки швидкодії вищевказаних методів інтерполяції були побудовані карти на основі показів індукції магнітного поля на території парку "Великий Луг". Результати моделювання показані на рис. 4. Проведений аналіз швидкодії різних методів інтерполяції показав, що метод триангуляції є самим швидким. Результати показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Час побудови інтерполяційних карт

Використаний метод	Час роботи
Метод зворотних відстаней	0,31 с
Метод крікінга	1,6 с
Метод мінімальної кривизни	0,07 с
Метод Шепарда	0,03 с
Метод природного сусіда	0,15 с
Метод радіальних базисних функцій	1,83 с
Метод триангуляції	0,01 с

Наступними за швидкодією є метод Шепарда і метод мінімальної кривизни.

Таким чином, з методів, обраних за першим критерієм, найбільш оптимальними за швидкодією є метод Шепарда.

На кінцевому етапі методи порівнювалися за величиною середньої квадратичної помилки. Для цього використовувалися дані, отримані на опорному профілі вимірювань (рис. 5). Отримані на них значення індукції магнітного поля порівнювалися зі значеннями в тих же точках знятих з карт, отриманих різними способами інтерполяції.

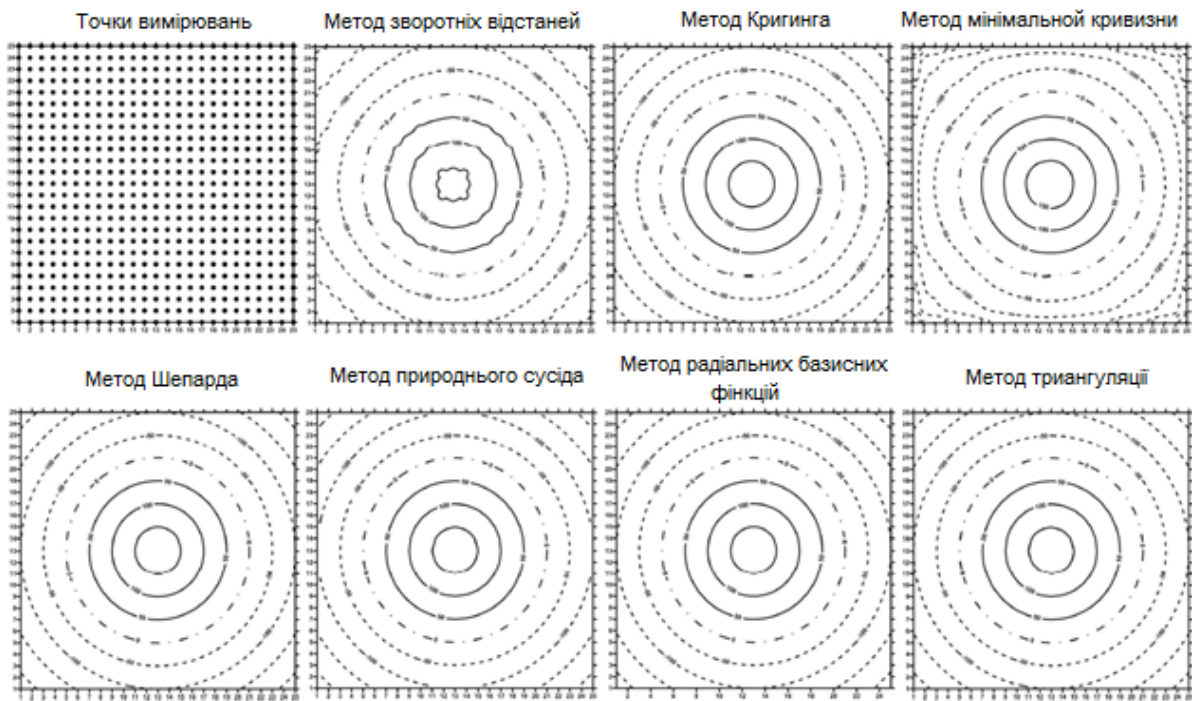


Рис. 2 – Карти ізометричного поля, 625 точок вимірювань

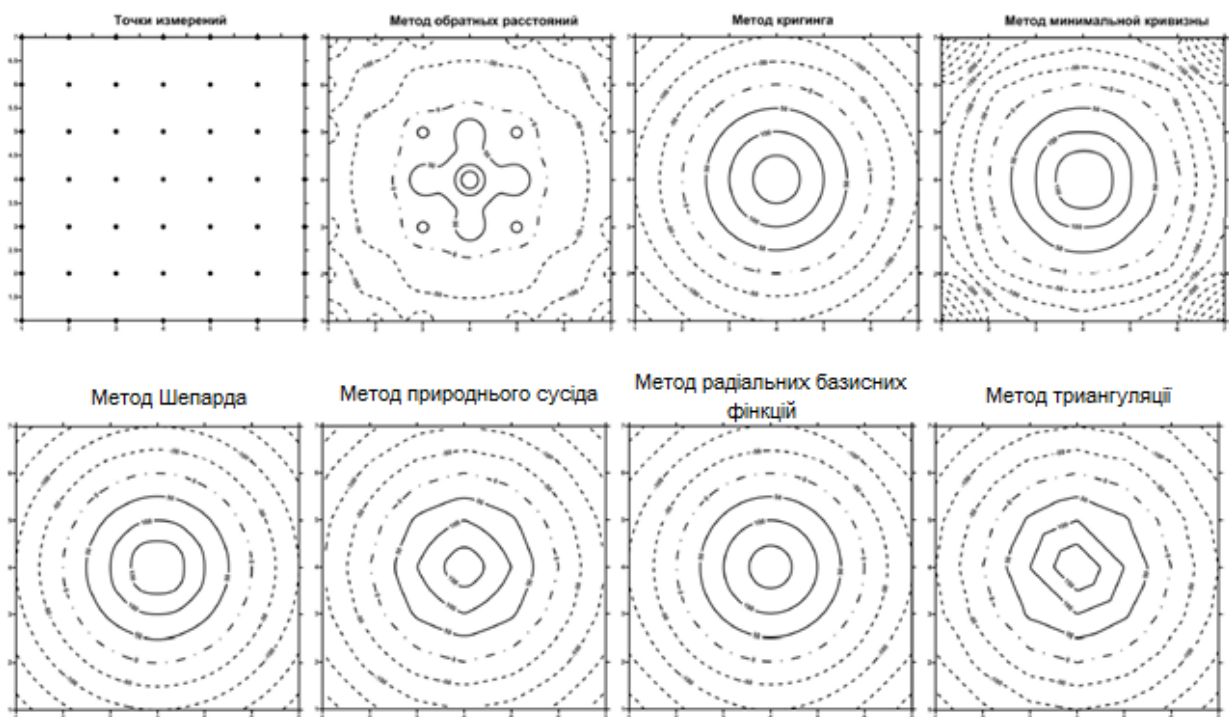


Рис. 3 – Карти ізометричного поля, 49 точок вимірювань

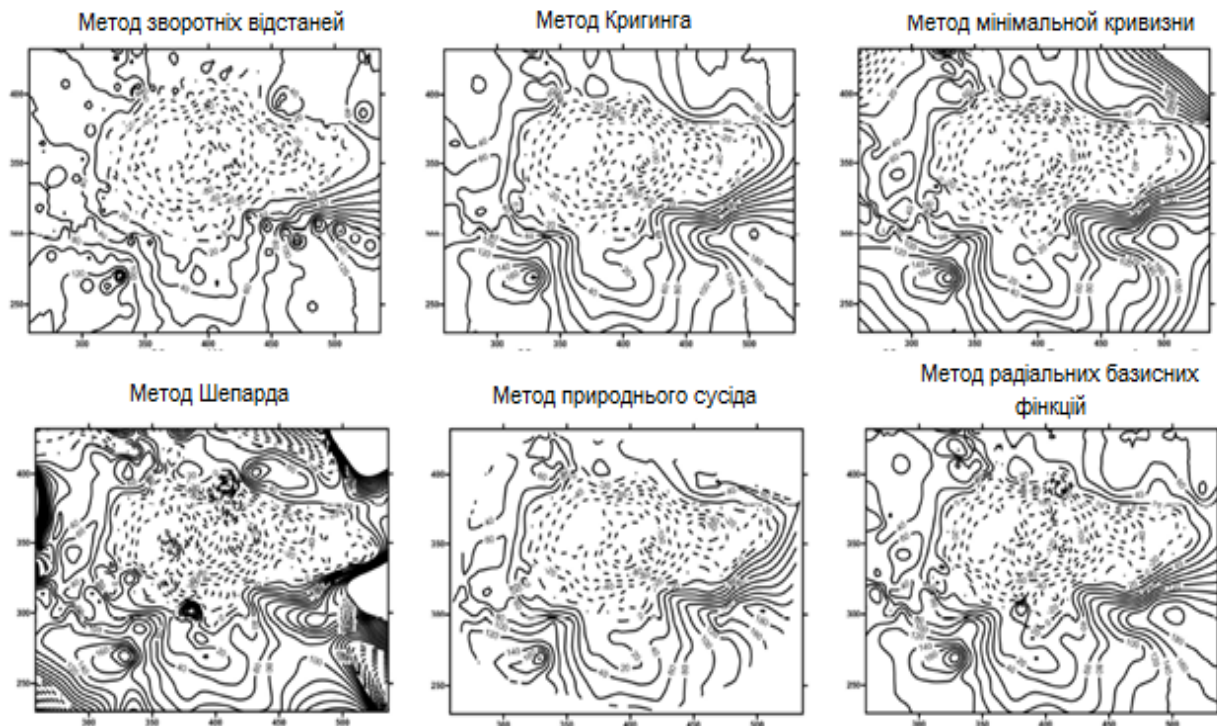


Рис. 4 – Карти магнітного поля національного парку "Великий Луг", побудовані різними способами інтерполяції

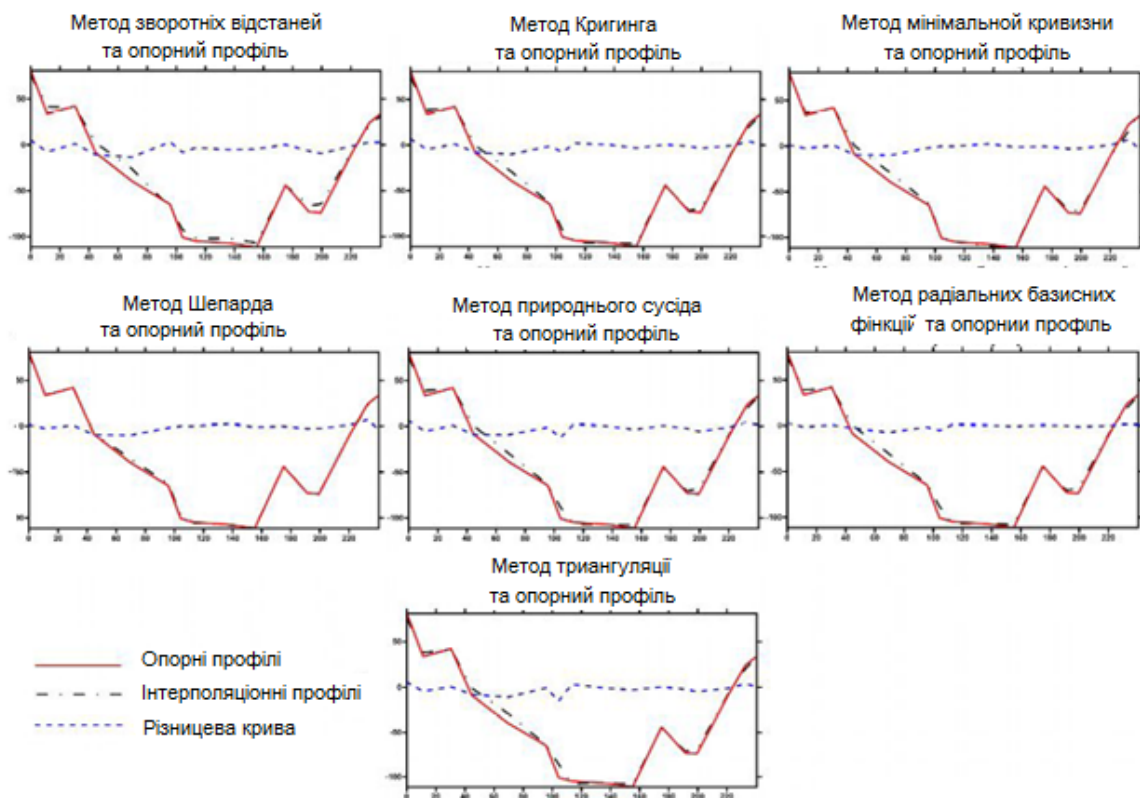


Рис. 5 – Графіки значень магнітного поля, побудовані за вихідними даними і за значеннями знятим з карт, побудованих різними методами інтерполяції

Аналіз показав, що найменша середня квадратична помилка досягається при використанні карт, побудованих методами Шепарда і радіальних базисних функцій. Найбільш помітно відхилення в екстремаль-

них точках, і, відповідно, чим більше інтенсивність аномалії, тим більше стає і це відхилення. Значення отриманої середньоквадратичної помилки представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Середньоквадратичні помилки методів інтерполяції

Метод інтерполяції	Середньоквадратична помилка
Метод зворотних відстаней	4,57
Метод Кригинга	3,28
Метод мінімальної кривизни	3,01
Метод Шепарда	1,27
Метод природнього сусіда	3,81
Метод радіальних базисних функцій	1,87
Метод триангуляції	4,02

У результаті дослідження можна зробити висновок про те, що найбільш оптимальним за трьома обраними критеріями є метод Шепарда.

Модифікований метод Шепарда. Для роботи геофізичної навігаційної системи потрібний якомога кращі показники швидкодії, стійкості та точності інтерполяційного методу. Далі пропонується один із можливих шляхів покращення методу Шепарда, який був розроблений в процесі дослідження.

При роботі алгоритму Шепарда в якості оцінки змінної Z в деякій точці досліджуваної області цей метод використовує середнє зважене значень змінної Z у вибіркових точках:

$$\hat{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^n w_{i0}} \quad (1)$$

Метод працює в припущенні, що експериментальні значення, виміряні близько від інтерпольованої місця розташування, надають більший вплив на результат оцінки, ніж віддалені від нього на значну відстань. Отже, точки вибірки, розташовані ближче всього до точки, де робиться оцінка, повинні мати більшу вагу; вага вибіркових точок повинен зменшуватися зі збільшенням відстані від інтерпольованої розташування. Такі ваги для даного методу задаються наступним чином:

$$w_{i0} = \frac{1}{(\sqrt{d_{i0}} + \delta^2)^\beta}, \quad (2)$$

де d_{i0} – відстань між точкою (X_0, Y_0) , де підраховується оцінка (наприклад, вузлом регулярної сітки), і i -ою точкою виміру; δ – параметр згладжування; β – степений параметр.

Степений параметр β визначає, як швидко буде зменшуватися вага зі збільшенням відстані. Якщо значення β надто велике, то на інтерполяцію вплинуть тільки вибрані точки, розташовані в безпосередній близькості. Для менших β вагові коефіцієнти будуть розподілені більш рівномірно між сусідніми точками даних.

Для підвищення швидкодії роботи алгоритму і зменшення середньої квадратичної помилки алгоритм

Шепарда був інтегрований з алгоритмом найближчого сусіда, який в ході досліджень також показав високу швидкість роботи.

Інтерполяційна функція модифікованого алгоритму має вигляд:

$$\hat{Z} = \frac{\sum_{i \in K} w_{i0} \cdot Q_i(x)}{\sum_{i \in K} w_{i0}}, K < N \quad (3)$$

$$w_i(x) = \left(\frac{R_x - |x - x_i|}{R_x} \right)^2, \quad (4)$$

$$R_x = \max |x - x_i| \in K$$

$$Q_i(x) = x^T A x + b^T x + c, \quad (5)$$

$$A \in R^{D \times D}, b \in R^D, c \in R$$

Модифікований метод Шепарда відрізняється від оригінального алгоритму тим, що:

1) для інтерполяції використовується підмножина точок K – множина найближчих сусідів точки x ;

2) замість константних значень у зваженій сумі тепер беруть участь вузлові функції $Q_i(x)$. Ці функції можуть бути квадратичними, лінійними або константними (за вибором користувача). Функція $Q_i(x)$ виходить в результаті виваженої апроксимації по МНК безлічі K найближчих сусідів точки x_i з обмеженням $Q_i(x_i)$. Вагові коефіцієнти завдання МНК вибираються за формулою (7).

3) Для пошуку найближчих сусідів використовуються kd -дерева, що дозволяють знаходити найближчого сусіда за час $O(\log N)$.

Таблиця 3 – Результати роботи модифікованого методу Шепарда

Назва методу	Швидкодія	Середньоквадратична помилка
Модифікований метод Шепарда	0,283с	1,19

Висновок. У статті вперше виконано моделювання роботи найбільш поширених інтерполяційних методів для визначення серед них оптимального, виходячи з критеріїв швидкодії, стійкості в умовах нестачі вихідних даних та середньоквадратичної помилки інтерполяції дискретних значень геофізичного поля. За вказаними критеріями, оптимальним методом інтерполяції був обраний метод Шепарда. Модифікація методу Шепарда, яка була розроблена шляхом накладання обмежень на вибір найближчих точок та їх структурування в kd -дерево, дозволяє отримати верхню межу швидкості пошуку $O(n \log n)$, що є край необхідним для вирішення завдання побудови карти геофізичного поля на борту ЛА.

Список літератури: 1. Блох, Ю. И. Геофизические исследования магнитных залежей (Курильская островная дуга) [Текст] / Ю. И. Блох, В. И. Бондаренко, А. С. Долгаль, П. Н. Новикова, В. А. Рашидов, А. А. Трусев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38-й сессии Международного научного семинара имени Д.Г. Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – С. 32–35. 2. Долгаль, А. С. Повышение точности

определения поправок за влияние рельефа при гравиметрической съемке [Текст] / А. С. Долгал, С. Г. Бычков, В. В. Антипин // Геофизика, 2003. – №6. – С. 44–50. 3. Зеливянская, О. Е. Влияние объема информации на качество графического представления материалов [Текст] / О. Е. Зеливянская, О. В. Чуприна // Сборник научных трудов. Серия «Нефть и газ», Ставрополь: Изд-во Северо-Кавказского технического университета, 2002. – Вып 2. – С. 45–49. 4. Логачев, А. А. Магниторазведка, навигация по магнитным ориентирам [Текст] / А. А. Логачев, В. П. Захаров. – Л.: Недра, 1979. – 351 с. 5. Масуренков, Ю. П. Геодинамика [Текст] / Ю. П. Масуренков, Л. А. Комкова. – М.: Наука, 1978. – 274 с. 6. Kowalczyk, K. Analysis of vertical movements modeling through various interpolation techniques [Text] / K. Kowalczyk, J. Rapinski, M. Mroz // Acta Geodyn. Geomater. – 2010. – Vol. 7, No. 4 (160). – P. 399–409. 7. Nikolova, N. Mapping precipitation variability using different interpolation methods [Text] / N. Nikolova, S. Vassilev // Conferens on Water Observation System and Decision Support. 2006. (http://balwois.mpl.ird.fr/balwois/administration/full_paper/ffp-631.pdf). 8. Ren, H. “Research on geomagnetic matching localization algorithm for unmanned underwater vehicles,” [Text] / H. Ren, K. Zhuang, et al. // Proceeding of IEEE International Conference on Information and Automation. – 2008. – P. 1025–1029. 9. Yang, C.-S. Twelve different interpolation methods: [Text] / C.-S. Yang, S.-P. Kao, F.-B. Lee, P.-S. Hung // A case study of Surfer 8.0. XXth ISPRS Congress 1. 10. Yang, G. “Data fusing algorithm in geomagnetic aided INS,” [Text] / G. Yang // Journal of Chinese Inertial Technology. – 2007. – Vol. 15. – P. 47–51.

Bibliography (transliterated): 1. Blox, Yu. I., Bondarenko, V. I., Dolgal, A. S., Novikova, P. N., Rashidov, V. A., Trusov, A. A. (2011).

Geofizicheskie issledovaniya magnitnykh zalezhej (Kuril'skaya ostrovnaya duga). Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh polej: materialy 38-j sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar imeni D. G. Uspenskogo. Perm: GI UrO RAN, 32–35. 2. Dolgal, A. S., Bychkov, S. G., Antipin, V. V. (2003). Povyshenie tochnosti opredeleniya popravok za vliyanie relefa pri gravimetricheskoy semke. Geofizika, No6, 44–50. 3. Zelyvanskaya, O. E., Chuprina, O. V. (2002). Vliyanie obema informatsii na kachestvo graficheskogo predstavleniya materialov. Sbornik nauchnykh trudov. Seriya «Nef't i gaz», Stavropol: Izd-vo Severo-Kavkazskogo tekhnicheskogo universiteta, Vol. 2, 45–49. 4. Logachev, A. A., Zaxarov, V. P. (1979). Magnitorazvedka, navigatsiya po magnitnym orientiram. Leningrad: Nedra, 351. 5. Masurenkov, Yu. P., Komkova, L. A. (1978). Geodinamika. Moscow: Nauka, 274. 6. Kowalczyk, K., Rapinski, J., Mroz, M. (2010). Analysis of vertical movements modeling through various interpolation techniques. Acta Geodyn. Geomater., Vol. 7, No. 4 (160), 399–409. 7. Nikolova, N., Vassilev, S. (2006). Mapping precipitation variability using different interpolation methods. Conferens on Water Observation System and Decision Support. (http://balwois.mpl.ird.fr/balwois/administration/full_paper/ffp-631.pdf). 8. Ren, H., Zhuang, K., et al. (2008). “Research on geomagnetic matching localization algorithm for unmanned underwater vehicles,” Proceeding of IEEE International Conference on Information and Automation, 1025–1029. 9. Yang, C.-S., Kao, S.-P., Lee, F.-B., Hung, P.-S. Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0. XXth ISPRS Congress 1. 10. Yang, G. (2007). “Data fusing algorithm in geomagnetic aided INS,” Journal of Chinese Inertial Technology, Vol. 15, 47–51.

Надійшла (received) 12.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Прохорчук Олександр Віталійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет»; кафедра приладів та систем керування літальними апаратами, пр. Перемоги, 7, м. Київ, Україна, 03056.

Прохорчук Александр Витальевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический университет»; кафедра приборов и систем управления летательными аппаратами факультет авиационных и космических систем, пр. Победы, 7, г. Киев, Украина, 03056.

Prohorchuk Aleksandr Vitalyevich – Ph.D., National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic University"; Department of aircraft control Devices and Systems, Department of Aviation and Space Systems, Victory str. 7, Kyiv, Ukraine, 03056.

Кучерявенко Іван Олегович – магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет»; кафедра приладів та систем керування літальними апаратами, факультет авіаційних та космічних систем, пр. Перемоги, 7, м. Київ, Україна, 03056.

Кучерявенко Иван Олегович – магистр, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический университет»; кафедра приборов и систем управления летательными аппаратами, факультет авиационных и космических систем, пр. Победы, 7, г. Киев, Украина, 03056.

Kucheryavenko Ivan Olegovich – MPH, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic University"; Department of aircraft control Devices and Systems, Department of Aviation and Space Systems, Victory str. 7, Kyiv, Ukraine, 03056.