

УДК 517

к.т.н. Крельштейн П.Д.,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
Маліна І.А., к.т.н., професор Юрковський Р.Г.,
Одеська державна академія будівництва і архітектури,
д.т.н., доцент Шульц Р.В.,
Київський національний університет будівництва і архітектури,

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМУВАННЯ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ТОПОГРАФІЧНИХ КАРТ

Виконано дослідження та аналіз різних математичних моделей, що використовуються для трансформування топографічних карт. Запропоновано методику та критерії для вибору оптимальної математичної моделі трансформування.

Постановка проблеми. Вирішення задачі моніторингу стану природніх об'єктів вимагає використання різних типів даних. При дослідженні змін положення об'єктів, що мають значні розміри до таких даних належать: картографічні матеріали, геологічні дані, метеорологічні дані та ін. Вихідним матеріалом є картографічний, оскільки саме картографічні дані дозволяють аналізувати зміни положення об'єктів за значний проміжок часу. Сучасні засоби моніторингу передбачають використання матеріалів тільки у цифровому вигляді. В такому випадку постає задача сканування топографічних карт з подальшою прив'язкою їх до обраної системи координат. Отже постає завдання вибору відповідної математичної моделі для трансформування топографічних карт, яка б враховувала можливі деформації вихідного картографічного матеріалу, що викликані старінням топографічних карт та похибками при скануванні.

Огляд попередніх публікацій. Основою для наших досліджень є роботи, що присвячені вирішенню задач з перетворення різних систем координат. Детальний огляд різних методів трансформування координат приведено в роботах [2,3]. Задача трансформування растрових зображень найчастіше виникає при вирішенні фотограмметричних задач, пов'язаних із перетворенням фотографічних зображень [1,4-6]. Нажаль до теперішнього часу відсутні чіткі рекомендації по використанню різних математичних моделей трансформування саме для перетворення растрових топографічних карт.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження та аналіз різних математичних моделей, що використовуються для трансформування топографічних карт.

Основний зміст роботи. Для виконання дослідження використаємо найбільш відомі математичні моделі для трансформування растрових зображень. Розглянемо лінійні та нелінійні моделі трансформування. При можливості доцільно використовувати трансформування лінійного типу, які не спотворюють координати та прямі лінії на растрах. Для будь-якого з типів трансформування ми будемо використовувати надлишкові вимірювання для того, щоб виконати оцінювання коефіцієнтів трансформування за методом найменших квадратів з подальшою оцінкою точності якості трансформування.

Найпростішим типом трансформування, що відноситься до лінійних є зсув. Для обчислення параметрів трансформування необхідно мати мінімум одну точку. В аналітичному вигляді це перетворення записується, як:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + \hat{x} \\y &= y_0 + \hat{y}.\end{aligned}\quad (1)$$

Наступним, більш складним типом лінійного перетворення є зсув-розворот. Для обчислення параметрів трансформування необхідно мати мінімум дві точки. В аналітичному вигляді це перетворення записується, як:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + \hat{x} \cos \alpha - \hat{y} \sin \alpha \\y &= y_0 + \hat{y} \cos \alpha + \hat{x} \sin \alpha.\end{aligned}\quad (2)$$

Серед розглянутих вище моделей найбільш досконалим є перетворення зсув-розворот-масштабування. Серед геодезистів це перетворення відоме, як перетворення Гельмерта на площині. Для обчислення параметрів трансформування необхідно мати мінімум дві точки. В аналітичному вигляді це перетворення записується, як:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + m(\hat{x} \cos \alpha - \hat{y} \sin \alpha) \\y &= y_0 + m(\hat{y} \cos \alpha + \hat{x} \sin \alpha).\end{aligned}\quad (3)$$

Остання модель лінійного трансформування, яку ми дослідимо є афінне трансформування. Для обчислення параметрів трансформування необхідно мати мінімум три точки. В аналітичному вигляді це перетворення записується, як:

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1 \hat{x} + a_2 \hat{y} \\y &= b_0 + b_2 \hat{y} + b_1 \hat{x}.\end{aligned}\quad (4)$$

Серед відомих моделей нелінійного трансформування дослідимо поліноміальні перетворення. Для обчислення параметрів трансформування необхідно мати кількість точок рівну кількості коефіцієнтів поліному. В аналітичному вигляді це перетворення записується, як:

$$\begin{aligned}x &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} \hat{x}^i \hat{y}^j \\y &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} \hat{x}^i \hat{y}^j.\end{aligned}\quad (5)$$

де n – степінь полінома.

Оскільки трансформування можна виконувати різними методами достатньо важко визначитися, який варіант перетворення використати. В загальному випадку для прийняття рішень про вибір моделі трансформування необхідно знати характер деформацій вихідного матеріалу. Щоб дослідити величини деформацій необхідно виконати надлишкові вимірювання координат точок, що рівномірно розташовані на растровому зображенні.

Для досліджень було використано топографічні карти масштабу 1:25000 в системі координат СК-42 на територію узбережжя Чорного моря. Загальна кількість растрових зображень складає 139. При цьому для виявлення характеру деформацій та вибору необхідною моделі трансформування було зроблено припущення, що характер деформацій пов'язаний з датою створення та виготовлення топографічної карти. В такому випадку всі растрові зображення було розділено на приблизно рівномірні за кількістю чотири групи: карти видані до 1975 р., до 1980 р., до 1985 р., до 1990 р. На кожному растровому зображенні вимірювались координати 25 вузлів координатної сітки за схемою, що наведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема розташування опорних точок

Результати вимірювань дозволили обчислити параметри трансформування для різних груп растрів та різних моделей трансформування. В табл. 1-4 приведено усереднені значення параметрів трансформування та СКП трансформування.

Таблиця 1

Результати трансформування растрів, що видані до 1975 р.

Вид перетворення	Кількість точок	СКП мх/му, м	
Гельмерта	9	30,55	30,73
	13	28,1	27,9
	25	28,79	30,17
Афінне	9	14,26	11,02
	13	15,13	12,66
	25	13,43	12,73
Поліном 2	9	6,56	3,15
	13	9,9	6,29
	25	8,18	8
Поліном 3	13	2,97	4,49
	25	4,31	7,46
Поліном 4	25	3,08	5,73

Таблиця 2

Результати трансформування растрів, що видані до 1980 р.

Вид перетворення	Кількість точок	СКП мх/му, м	
Гельмерта	9	11,25	13,45
	13	10,74	15,06
	25	11,44	14,6
Афінне	9	7,9	10,56
	13	6,97	12,61
	25	7,19	11,3
Поліном 2	9	6,68	8,66
	13	6,21	11,25
	25	6,26	11,03
Поліном 3	13	2,62	5,35
	25	4,1	8,12
Поліном 4	25	2,7	4,82

Таблиця 3

Результати трансформування растрів, що видані до 1985 р.

Вид перетворення	Кількість точок	СКП мх/му, м	
Гельмерта	9	33,08	30,51
	13	30,31	29,33
	25	33,46	31,08
Афінне	9	9,2	6,35
	13	9,24	10,86
	25	10,02	9,61
Поліном 2	9	4,43	5,15
	13	5,83	9,02
	25	8,57	8,11
Поліном 3	13	4,29	5,3
	25	5,61	5,21
	25	3,2	3,17

Таблиця 4

Результати трансформування растрів, що видані до 1990 р.

Вид перетворення	Кількість точок	СКП мх/му, м	
Гельмерта	9	14,92	18,74
	13	13,27	17,01
	25	14,47	17,03
Афінне	9	7,04	14,1
	13	8,1	13,94
	25	10,04	14,05
Поліном 2	9	5,13	9,85
	13	7,44	11,23
	25	9,26	12,52
Поліном 3	13	3,84	3,48
	25	6,09	6,87
	25	3,98	4,95

Аналізуючи дані табл. 1-4 можна зробити висновок про те, що дійсно існує зв'язок між характером деформацій та роком видання топографічної карти. Порівнюючи результати трансформування з використанням лінійних перетворень та поліноміальних можна зробити висновок про наявність у

досліджуваних растрів нелінійних деформацій. Отже перевагу слід віддати поліноміальним методам трансформування. Незважаючи на той факт, що поліноми 3-го, 4-го степеня дозволяють отримати високу точність трансформування растрових зображень необхідно пам'ятати, що поліноми високого степеня призводять до небажаних спотворень координат на растрі і можуть навіть призвести до викривлення вихідного зображення. Встановимо необхідну точність трансформування растрів на основі вимоги інструкції зі створення топографічних карт. Згідно з цими вимогами СКП визначення координат точок на карті не повинна перевищувати:

$$m_p \leq 0.4M .$$

Для топографічної карти масштабу 1:25000 СКП вимірювання координат контурних точок складе 10 м. Отже, щоб залишкова похибка трансформування не впливала на точність подальших вимірювань достатньо щоб СКП трансформування дорівнювала:

$$m_t \leq \frac{1}{3} m_p = 0.12M ,$$

або по кожній з координатних осей:

$$m_{t_x} \leq 0.1M; \quad m_{t_y} \leq 0.1M . \quad (6)$$

Якщо тепер проаналізувати табл. 1-4 з урахуванням критерію (6), то стає зрозумілим, що найкращим чином встановленим критерієм відповідає модель трансформування з використанням поліномів 2-го або 3-го степеня з кількістю точок до 13. Збільшення кількості точок призводить до значного проявлення ефекту не лінійності і спотворення вихідних растрів. Якщо залишкові відхилення незначні достатнім є використання афінного трансформування.

Якщо ж при дослідженнях виявлено значні локальні деформації, які неможливо усунути рекомендованими раніше методами трансформування, то найбільш доцільним є застосування методу «гумового листа». Цей метод передбачає, на відміну від розглянутих раніше, що трансформоване растрове зображення буде точно суміщене в опорних точках. Цей метод належить до нелінійних типів перетворення з мінімально необхідною кількістю точок рівною 3. Якщо кількість точок більше 3 трансформування виконується за параметрами, що визначаються для кожного трикутника Делоне. Для лінійного «гумового листа» - це коефіцієнти афінного перетворення, для нелінійного – коефіцієнти поліноміального перетворення. «Гумовий лист» є найбільш оптимальним методом трансформування при суттєвих локальних деформаціях растрового зображення. Нажаль оскільки цей метод є інтерполяційним, то він не дозволяє виконати оцінку точності визначених параметрів перетворення, тому доцільність використання «гумового листа» необхідно встановлювати в кожному випадку окремо. Одним з методів вибору моделі трансформування є

графічний аналіз залишкових відхилень за матрицями залишкових відхилень. Для прикладу наведемо результати побудови матриць залишкових відхилень при трансформуванні поліномами 2-го степеня.

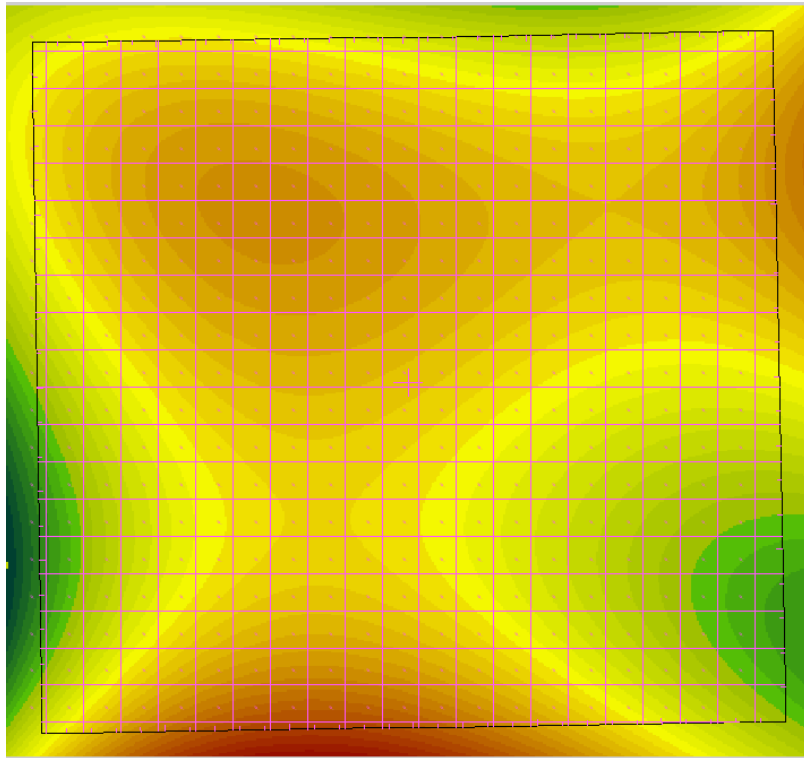


Рис. 2. Матриця залишкових відхилень вісь X

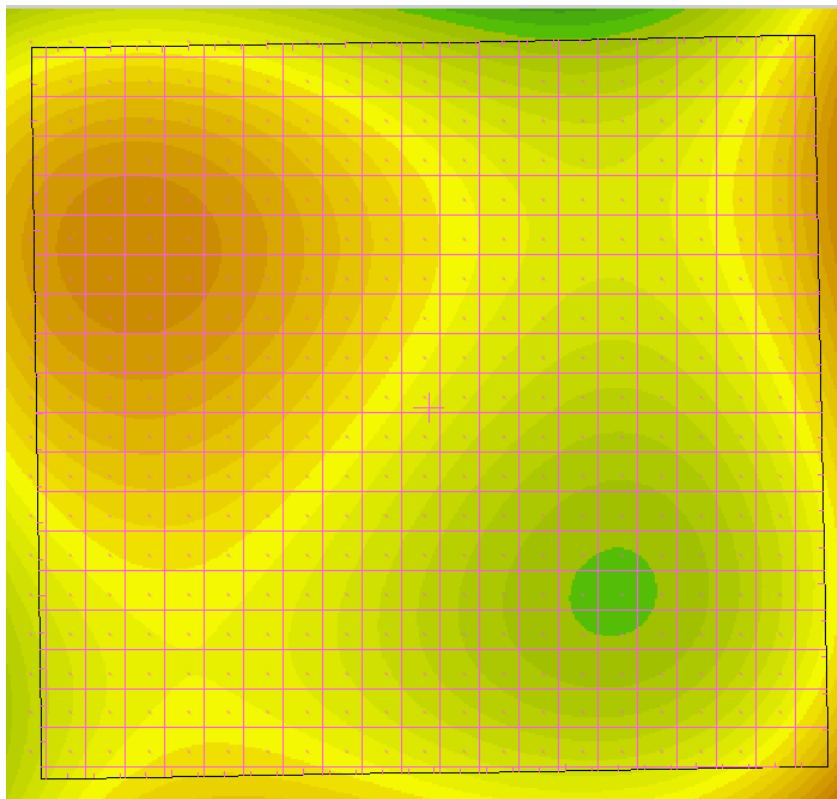


Рис. 3. Матриця залишкових відхилень вісь Y

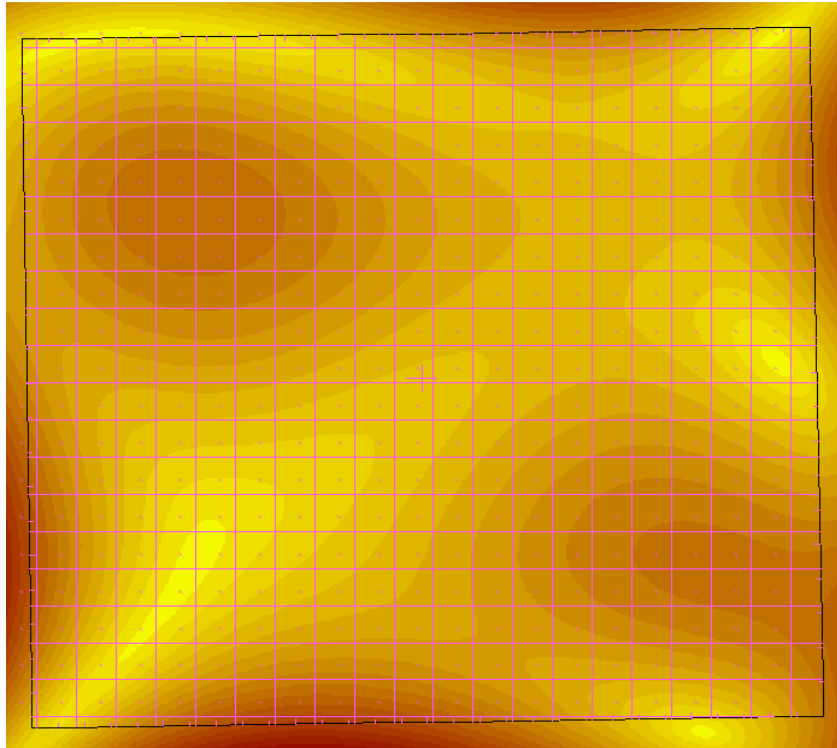


Рис. 4. Матриця планових залишкових відхилень

Матриці на рис. 2-4 дозволяють встановити характер деформацій та остаточно прийняти рішення про вибір моделі трансформування растрових зображень.

Висновок. В результаті дослідження встановлено залежність між характером деформацій топографічних карт та роком їх видання. Досліджено лінійні та нелінійні математичні моделі трансформування растрових зображень. За запропонованими критеріями вибору моделей трансформування встановлено, що найкращих результатів дозволяє досягти поліноміальне трансформування 2-го степеня.

Список літератури

1. Савиных В.П., Бугаевский Л.М., Малинников В.А. Преобразование космических снимков в заданную картографическую проекцию // Геодезия и картография. - 2004. - №. - С. 30-32.
2. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. – М: КДУ, 2010. – 424 с.
3. Геоинформатика: в 2 кн. Кн. 1 / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарёв, В.С. Тикунов и др. под ред. В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.

4. Агапов СВ. Фотограмметрия сканерных снимков. - М.: Картгеоцентр - Геодезиздат, 1996. - 176 с: ил.
5. Дорожинський О.Л. Основи фотограмметрії. - Львів: Видавництво Національного Університету "Львівська політехніка", 2003 - 214 с.
6. Новаковский Б.А. Фотограмметрия и дистанционные методы изучения Земли: картографо-фотограмметрическое моделирование. - М.: Изд-во МГУ, 1997.-208 с.

АННОТАЦИЯ

Выполнено исследование и анализ различных математических моделей, которые используются для трансформирования топографических карт. предложена методика и критерии для выбора оптимальной математической модели трансформирования.

SUMMARY

The research and analysis of various mathematical models that are used to transform the topographic maps are carried out. The technique and the criteria for selecting the optimal mathematical model of transformation is proposed.