



УДК 528.8

Практичні аспекти вивчення субпіксельних методів аерокосмічного знімання

В.Г. Бурачек^{1*}, В.І. Зацерковний², В.Ю. Беленок³, С.В. Кривоберець⁴, Т.М. Малік¹¹ПВНЗ Університет новітніх технологій, Київ²Київський національний університет імені Тараса Шевченка³Національний авіаційний університет⁴Чернігівський національний технологічний університет

У статті розглянуто практичні аспекти вивчення субпіксельної технології, які можуть бути використані в навчальному процесі. Суть методики полягає в отриманні цифрового знімка і наступній обробці матриці значень пікселів у градаціях сірого кольору з визначенням рівносигнальних зон субпікселів. Після обробки всіх рівносигнальних зон отримують цифровий знімок підвищеної розрізненності.

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ, Бурачек В.Г., Зацерковный В.И., Беленок В.Ю., Кривоберець С.В., Малік Т.М. — В статье рассматриваются практические аспекты изучения субпиксельной технологии, которые могут быть использованы в учебном процессе. Суть методики состоит в получении цифрового снимка и последующей обработке матрицы значений пикселей в градациях серого с определением равносигнальных зон субпикселей. После обработки всех равносигнальных зон получают цифровой снимок повышенной разрешающей способности.

THE PRACTICAL ASPECTS OF THE STUDY OF SUBPIXEL METHODS OF AEROSPACE SURVEY, by Burachek V.H., Zatserkovnyi V.I., Belenok V.Yu., Kryvoberets S.V., Malik T.M. — The practical basics of the study of subpixel techniques of remote sensing which can be used in the educational process are considered in this article. The technique is in obtaining a digital image and further processing of the matrix of pixel values in grayscale with the determination of the beams areas of subpixels. After processing of all beams areas one receives a digital image of increased resolution.

Ключевые слова: дистанционные аэрокосмические методы; виртуальная матрица; суппиксельные методы.

Key words: remote sensing methods; virtual matrix; subpixel methods.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Однією з найважливіших задач аерокосмічного моніторингу є підвищення точності (зокрема, розрізненності) картографування місцевості. На сьогодні застосовують цифрові камери з фотоприймальними матрицями, при цьому розрізненність аерокосмічного знімка залежить від розміру пікселя матриці. У табл. 1 показані розміри деяких цифрових камер, що застосовуються в аерокосмічному моніторингу [1, 2].

Таблиця 1. Розміри пікселів аерокосмічних знімальних цифрових камер

Фірма-виробник	Intergraph	ДНВП «Геосистема»	Microsoft / Vexcel	Microsoft / Vexcel	Z/I Imaging
Модель камери	DMC	4-DAS-1	UltraCamD	UltraCamX	DMC-II140
Розмір пікселя, мкм	12	9	9	7,2	7,2
Фірма-виробник	DLR	Leica Geosystems	Microsoft / Vexcel	Z/I Imaging	Z/I Imaging
Модель камери	HRSC	ADS 40	UltraCamXp	DMC-II230	DMC-II250
Розмір пікселя, мкм	7	6,5	6	5,6	5,6

Як видно з таблиці, розміри пікселів матриць знімальних камер досить малі, при цьому існують матриці з розміром пікселів до 1,5 мкм.

Відмітимо, що зменшення розміру площі пікселя дискретного матричного фотоприймача пропорційно підвищує значення інструментальної розрізненності цифрової знімальної камери, але в той же час погіршує чутливість пікселя за рахунок збільшення знаменника у відношенні сигналу до шуму (P/Φ). Якщо маємо вихідний сигнал $u_1 = P_1/\Phi$, то при зменшенні площі пікселя $P_2 = kP_1$ ($0 < k < 1$) отримаємо значення $u_2 = P_2/\Phi = kP_1/\Phi$ і зміна вихідного сигналу буде складатиме $u_2/u_1 = k$, тобто його значення знижується в k разів.

Таким чином, з одного боку, необхідно збільшувати розрізненність камери, а з іншого — не можна знижувати чутливість фотоелектричного каналу, отже, потрібно знайти якийсь оптимальне рішення.

* Бурачек Всеволод Германович; ✉ vbur2008@ukr.net

Одним із таких рішень може бути застосування субпіксельної інтерпретації фотоприймальної матриці без зниження якості вихідного сигналу на основі диференціювання сигналів освітленості пікселів.

Питання практичної реалізації субпіксельних технологій є досить актуальними при вивченні таких дисциплін, як фотограмметрія, цифрова обробка зображень, аерокосмічний моніторинг тощо.

2. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ПУБЛІКАЦІЙ

В [2–6] розглядаються різні субпіксельні технології аерокосмічного знімання і обробки даних, наприклад, візування на об'єкт, визначення ширини лінійних об'єктів, контурів об'єктів великої площі. На наш погляд, такий матеріал необхідно викладати студентам не лише в лекційній формі, але й у вигляді лабораторних робіт.

Метод віртуальної матриці характеризується тим, що при аерокосмічному зніманні виконують кутове зміщення оптичної осі знімального приладу за напрямками рядків і стовпців фотоприймача матриці на кількість позицій n з інтервалом $\frac{P\rho}{fn}$, де P — лінійний розмір сторони квадрата пікселя матриці; f — фокусна відстань об'єктива цифрової камери; $\rho = 206\,265''$ — кутова константа.

При цьому при дешифруванні визначають рівень електричних сигналів від засвічування прямокутних ділянок $P\frac{P}{n}$ пікселів, де $\frac{P}{n}$ — короткий бік прямокутної ділянки відповідно за напрямками рядків і стовпців, потім, базуючись на групи пікселів з рівним рівнем сигналів від їх засвічування (переважно мінімального рівня): по даних сигналах від прямокутних ділянок визначають рівень електричного сигналу для кожної ділянки пікселя площиною $\frac{P^2}{n^2}$, що відповідає його засвічуванню, і таким чином математично поділяють кожний піксель ПЗЗ-матриці на n^2 субпікселів [3].

3. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є розробка методики практичного вивчення методу віртуальної матриці.

4. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Сформуємо основні етапи методики практичного вивчення субпіксельного перетворення зображення.

1. Необхідні прилади та обладнання для виконання лабораторних робіт:

- цифровий фотоапарат;
- штатив до цифрового апарату;
- точний теодоліт (тахеометр);
- аерокосмічний знімок місцевості в центральній проекції топографічної розрізненності;
- комп'ютер;
- лінійка з міліметровими поділками і накреслений на листі паперу штрих або шкала.

2. Лабораторна робота — субпіксельне положення простого зображення (штриха) на знімку, отримання градацій сірого тону.

Розглянемо технологію отримання градації сірого на простому прикладі — виконанні знімання чистого аркуша і цього ж аркуша, але з нанесеною за допомогою кулькової ручки лінією. Для знімання використано цифровий фотоапарат (ЦФ) Sony DSC-S600.

Це попередня підготовка до освоєння субпіксельної технології.

Хід виконання лабораторної роботи:

- 1) закріплюємо ЦФ на штативі;
- 2) закріплюємо аркуш паперу навпроти об'єктиву;
- 3) виконуємо знімання чистого аркуша;
- 4) виконуємо знімання цього ж аркушу, але з нанесеною за допомогою кулькової ручки лінією.

Результатами знімання є цифровий знімок чистого аркуша та аркуша з нанесеною лінією (рис. 1 і рис. 2). Зображення виконують в одних і тих же умовах і при рівних фокусних відстанях.

Відкриваємо обидва зображення у Adobe Photoshop CS6. Збільшуємо деяку область зображення аркуша з лінією та за допомогою інструмента «Рамка» вирізаємо частину зображення з лінією розміром 10×10 пікселів (рис. 3). Також вирізаємо відповідну частину зображення чистого аркуша.

Після виконаних дій матимемо два відповідних зображення розмірами 10×10 пікселів (рис. 4).

Отримаємо градації сірого. Спочатку конвертуємо зображення в чорно-білі кольори за допомогою пункту, виконавши по чергово меню «Зображення» → «Корекція» → «Чорно-біле». Значення в градаціях сірого для кожного зі 100 пікселів фрагментів зображення зведено в таблиці 2 і 3.

Отримані дані (табл. 2, 3) дозволяють студенту набути навичок виділення і нумерації пікселів знімку з вказанням рівнем сигналів від засвітки в кожному пікселі і провести порівняльний аналіз двох знімків. Ці навички можуть бути використані при знаходженні рівносигнальних зон пікселів і обчисленні рівня сигналів в основній лабораторній роботі.



Рис. 1. Фотографія чистого аркуша

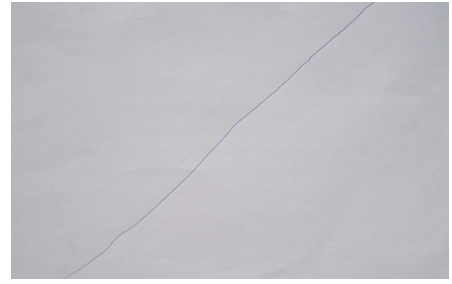


Рис. 2. Фотографія аркуша з нанесеною лінією

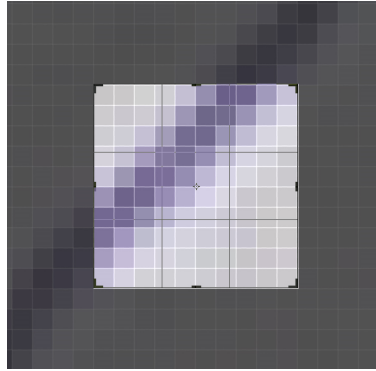


Рис. 3. Вирізання фрагменту зображення

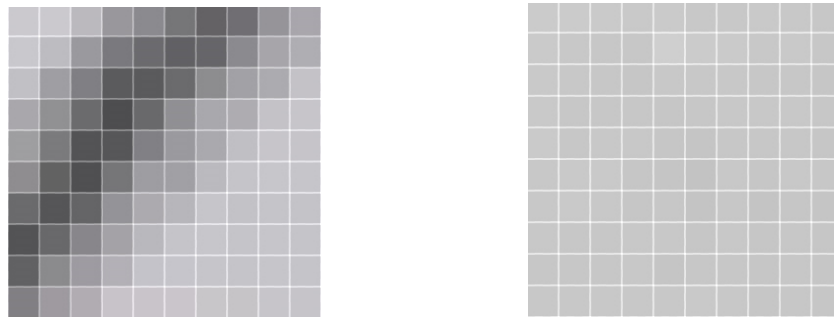


Рис. 4. Фрагменти зображень розміром 10 × 10 пікселів

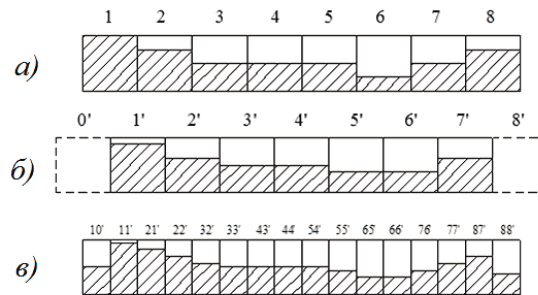


Рис. 5. Обробка субпікселів: рівносигнальні зони

Таблиця 2. Градації сірого першого зображення

203	203	202	201	202	200	200	201	200	199
202	200	199	199	202	203	202	200	201	199
201	200	199	198	200	200	200	199	199	198
201	199	199	199	198	199	200	200	200	199
202	199	200	200	198	197	199	199	199	198
200	201	201	198	197	195	200	198	200	199
200	201	200	198	199	196	199	196	198	197
200	199	199	200	200	198	200	198	199	198
199	199	199	200	197	199	199	198	199	198
200	200	200	200	200	201	200	198	199	198

Таблиця 3. Градації сірого другого зображення

203	203	202	191	173	147	123	138	187	213
202	201	197	157	133	123	130	178	212	209
202	200	165	118	116	137	180	208	211	198
208	186	138	100	136	186	216	216	201	199
201	158	107	111	167	201	215	201	199	198
182	125	101	152	205	211	201	198	200	199
136	109	129	191	220	203	199	196	198	197
107	134	174	209	211	198	200	198	199	198
125	178	202	210	197	199	199	198	199	198
165	201	213	200	200	201	200	198	199	198

3. Лабораторна робота «Побудова знімку по методу «віртуальної матриці».

3.1. Фотознімання виконується в учбовому (лабораторному) приміщенні, що пристосоване для кутових вимірювань. Цифровий фотоапарат жорстко встановлюється на теодоліт, при цьому центр поля зору фотоапарата орієнтується по проєкціям візирних осей теодоліту.

3.2. Визначення розміру пікселя матриці фотоапарата.

Визначити розмір пікселя можна за паспортними даними фотоапарата. Якщо ж у паспорті недостатньо даних, то для визначення розміру пікселя матриці на відстані S від теодоліта фотографують контрастне світле коло та визначають кількість засвічених пікселів в зображенні кола на матриці. Далі вираховують діаметр кола D_k в пікселях. Величина $\frac{D_k}{2S} = \operatorname{tg} \alpha$ (D_k в мм) дозволяє визначити значення кута α (це кут, під яким з фотоапарату спостерігаємо півкола).

Відношення величини кута α в кутових секундах до кількості пікселів у $D/2$ дорівнює розміру квадратного пікселя по напрямку D_k в кутових секундах.

Лінійний розмір пікселя p також можна визначити з виразу $p = \frac{\rho'' \cdot f}{p''}$, де f — фокусна відстань об'єктиву фотоапарату.

3.3. Теодоліт (тахеометр) встановлюють на стабільну основу (стовп з пристроєм для закріплення трегера або металева плита на фундаменті тощо), приводять у горизонт. На стіні навпроти теодоліту закріплюють знімок місцевості, при цьому його нижній край орієнтують горизонтально.

3.4. В якості опорного орієнтира вибирають точку, розташовану поза межами знімка, відносно якої по горизонтальному кругу встановлюють субпіксельні положення точок осі фотоапарата при експозиціях та інтервали між точками експозицій. Враховуючи кутовий розмір пікселів матриці фотоапарата, вибирають інтервали між точками експозицій в долях пікселя ($1/2, 1/4$). Виконують фотографування знімка в трьох або п'яти позиціях.

3.5. Обирають та ідентифікують центральну точку знімка. Виконуючи контроль по горизонтальному кругу теодоліта, обертають знімок на 90° навколо центральної точки і закріплюють.

3.6. Виконують фотознімання, відкладаючи кути по горизонтальному кругу аналогічно до п. 2.3, але для знімку, повернутого на кут 90° .

4. Обробка результатів фотознімання.

У результаті виконання знімання згідно до п.п.3.4–3.5 отримують матриці у вигляді таблиць (таблиці 2, 3) для кожної експозиції. Потім для кожного рядка (або для кожного стовпчика) для сусідніх експозицій розрізняють ланцюжки пікселів зі значеннями сигналів зі зсувом на $1/2$ пікселя, як показано на рис. 5,а,б і вводять додатково рядок субпікселів (рис. 5,в).

На початку обробки субпікселі нумеруються (наприклад, відповідно до положення у i -му рядку j -го стовпця, P_{ij}).

На рис. 5,а показаний фрагмент рядка з 8 пікселів (№№1...8). Базуючись на значеннях градацій сірого для пікселів зображення (як отримати ці значення, розглянуто нижче) знаходять групи рівносигнальних пікселів у рядку і обирають серед цих груп групи суміжних рівносигнальних пікселів (не менше двох або трьох).

Виконується порівняння значень градацій сірого від засвічування пікселів в рядку. На рис. 5 рівні сигналів, що заповнюють кожний піксель, показані штрихуванням. В даному випадку сигнали від пікселів 3, 4, 5 мають рівну величину сигналу, яку можна визначити по шкалі сірого тону.

В даному прикладі прийняті наступні рівні сигналів від засвічування пікселів (у відсотках від максимальних рівнів): 1 — 100%, 2 — 75%, 3 — 50%, 4 — 50%, 5 — 50%, 6 — 25%, 7 — 50%, 8 — 75%.

Після виконання фотографування з субпіксельним зсувом оптичної осі знімальної камери (забезпечується поворотом алідадної частини теодоліта, жорстко з'єданого з камерою, на величину P/n , де $n=2, 4, \dots$), маємо зсув зображення в долях пікселя (ряд субпікселей на рис.5,б). Наприклад, при $n=2$ отримують сигнали від засвічування тих же пікселів, але тепер вже зсунутих у напрямку лінії рядків на величину $P/2$.

Представимо рівні цих сигналів як заповнені штрихуванням квадрати $0', 1', 2', \dots, 7'$ (рис.5,б) з приблизними значеннями рівнів, відповідних двом суміжним пікселям у ряді 1, ..., 8. Отримаємо у відсотках: $1' - 88\%$; $2' - 62\%$; $3' - 50\%$; $4' - 50\%$; $5' - 38\%$; $6' - 38\%$; $7' - 62\%$.

За даними сигналів в квадратах пікселів на рис.5,а і б можна сформувані рівні сигналів в прямокутниках з короткою стороною $P/2$, позначені як $10', 11', 21', 22', 32', 33', 43', 44', 54', 55', 65', 66', 76', 77', 87', 88'$ (рис.5,в).

Зауважимо, що на рис.5,а рівносигнальну границю утворюють сигнали в квадратах 3, 4, 5, на рис.5,б — у квадратах $3', 4'$ і на рис.5,в — у прямокутниках $33', 43', 44', 54'$, кожний з яких дорівнює 50% максимального рівня.

Таким же чином обчислюють всі інші субпіксельні рядки і стовпчики сфотографованої ділянки знімку і отримують новий знімок з підвищеною роздільною здатністю.

Об'єм лабораторної роботи буде залежати від розмірів обраної знімальної ділянки і числа n ділення пікселя.

5. ВИСНОВКИ

1. Субпіксельні технології обробки аерокосмічних знімків — один з важливих напрямків підвищення якості дистанційного зондування Землі, тому вивчення цих технологій в складі дисципліни, пов'язаної з аерокосмічним моніторингом, є своєчасним і актуальним.

2. Практичне вивчення методу віртуальної матриці дозволяє студенту закріпити і поглибити теоретичні знання про точність і роздільну здатність аерокосмічної зйомки.

1. *Буришинська Х.В., Станкевич С.А.* Аерокосмічні знімальні системи. — Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013. — 316 с.
2. *Хмелевской С.И.* Тенденции в развитии цифровых аэросъемочных систем. критерии сравнения и оценки // Гео-профи. — 2011. — № 1. — С.11–16.
3. Пат. України на винахід № 95697, МПК (2011.01) G01C 11/00. Пристрій для дистанційної зйомки / Бурачек В.Г., Зацерковний В.І., Попов М.О., Станкевич С.А.; заявник та патентовласник ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАНУ». — № а2009 13449; заявл. 23.12.2009; опубл. 25.08.2011, бюл. №16.
4. *Belenok V.Yu., Burachek V.G., Zatserkovny V.I., Popov M.A., Stankevich S.A.* Subpixel image acquisition for detailed aerospace // Proceedings of the Eighth International Conference on Digital Technologies (DT'2011). — Slovak Republic, Zilina: University of Zilina, 2011. — P.190–193.
5. Науково-дослідна робота «Застосування технологій дистанційного зондування Землі для вирішення задач кадастру та моніторингу земель» (ініціатива); Беленок В.Ю., Бурачек В.Г., Хомушко Д.В. та ін., науковий керівник д.т.н., проф. Бурачек В.Г., Чернігів–Київ, 2010 р. (державний реєстраційний номер 0111U003659).
6. Пат. України на винахід № 107047, МПК (2006.01) G01C 11/02. Спосіб підвищення розрізненості кольорового зображення цифрового аерокосмічного знімка / Бурачек В.Г., Донець В.В., Станкевич С.А.; заявник та патентовласник Бурачек В.Г., Донець В.В., Зацерковний В.І., Попов М.О., Станкевич С.А. — № а2013 08651; заявл. 09.07.2013; опубл. 10.11.2014, бюл. №21.

Надійшла до редакції 16.09.2015

Прийнята до друку 30.10.2015