

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДБОРУ НАЙБІЛЬШ ІНФОРМАТИВНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

*Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Київ, Україна

Анотація. У даній статті розглянуто деякі методи вибору найбільш ефективних та інформативних спектральних каналів. У роботі також представлено метод *Band Selection* для аналізу гіперспектральних даних та автоматичну кластеризацію. Запропонований новий підхід для вибору спектральних каналів, заснований на використанні критеріальної функції інформативності спектральних каналів. У статті розглянуто та проаналізовано приклади, де використовується критеріальна функція інформативності.

Ключові слова: багатоспектральні дані, статистична класифікація, метод *Band Selection*, критеріальна функція інформативності.

Аннотация. В данной статье рассмотрены некоторые методы выбора наиболее эффективных и информативных спектральных каналов. В работе также представлены метод *Band Selection* для анализа гиперспектральных данных и автоматическая кластеризация. Предложен новый подход для выбора спектральных каналов, основанный на использовании критериальной функции информативности спектральных каналов. В статье рассмотрены и проанализированы некоторые примеры, где используется критериальная функция информативности.

Ключевые слова: многоспектральные данные, статистическая классификация, метод *Band Selection*, критериальная функция информативности.

Abstract. *Multispectral data provide capability for discrimination between many land cover types. But the great number of spectral bands is problematic for statistical classification techniques. In this article we considered some methods for selection of the most effective and most informative spectral bands. In this work we considered Band Selection method for Hyperspectral Data Analysis and Automatic Clusterization. It was also proposed a new approach to select spectral bands, which is based on the concept of criterion function of information capability of spectral bands. In this article we also considered and analyzed some examples using criterion function of information capability.*

Keywords: *multispectral data, statistical classification, Band Selection method, criterion function of information capability.*

1. Вступ

За останній час при розв'язанні природоресурсних задач все частіше використовуються багатоспектральні системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з космосу [1]. Одним із найбільш ефективних методів дослідження та класифікації земель є метод, заснований на використанні матеріалів багатоспектральної зйомки поверхні Землі з космосу.

Використання багатоспектральних знімків для вивчення та класифікації рослинності базується на аналізі варіацій параметрів відбитого сонячного випромінювання в різних діапазонах спектра електромагнітних хвиль у результаті його взаємодії з рослинами [1, 2]. Але при розв'язанні задач класифікації треба враховувати, що спектри відбиття в різних спектральних діапазонах надають різну інформацію щодо рослинного покриву. Тому перед нами постає задача оптимального вибору спектральних каналів, які є найбільш корисними, інформативними та надають спектральні знімки, які відображають повну картину [3, 4].

У даній статті буде розглянуто використання методу оптимізації числа спектральних каналів у задачах обробки й аналізу гіперспектральних зображень, заснованого на виборі такої комбінації спектральних зображень, які в сукупності будуть найбільш ефективні в сенсі вибраного критерію (наприклад, у випадку, коли деякий функціонал досягає свого максимального значення). Цей метод має назву *Band Selection*. Також буде розглянуто та

проаналізовано метод визначення найбільш інформативних спектральних каналів на основі використання результатів автоматичної кластеризації спектральних шарів гіперспектральних зображень.

У даній роботі буде розглядатися критеріальна функція інформативності, яка використовується для більш оптимального вибору спектральних каналів. Буде наведено декілька прикладів, які ілюструють використання критеріальної функції інформативності при виборі найбільш корисних та інформативних спектральних каналів.

2. Метод оптимізації числа спектральних каналів у задачах обробки та аналізу даних, пов'язаний із синтезом зображень (Band Selection)

У випадку гіперспектральних знімків найбільш цінна та важлива інформація зосереджена у невеликому числі каналів. Тому в задачах, пов'язаних з обробкою та аналізом гіперспектральних знімків, необхідно проводити оптимізацію числа спектральних каналів. Метою такої оптимізації є отримання деякої системи спектральних зображень, яка при більш низькій розмірності, ніж число каналів у гіперспектральному знімку, забезпечує розв'язок поставленої тематичної задачі. Якість розв'язку задачі зазвичай оцінюється за допомогою певним чином побудованого функціоналу. Завдяки цьому функціоналу, ми можемо вибрати таку комбінацію спектральних зображень, які у сукупності є найбільш ефективними та інформативними. Цей метод не потребує побудови нових зображень та додаткових обчислень [5, 6].

Припустимо, що площина гіперспектрального зображення містить N пікселей. Якщо довільний піксель гіперспектрального зображення, який має у своєму складі d окремих спектральних зображень, представити у вигляді відповідного вектора x у просторі з розмірністю d , то гіперспектральне зображення в цілому можна описати матрицею X розмірності $d \times N$. При даних позначеннях задачу оптимізації можна розглядати як пошук деякої матриці Y розмірності $m \times N$, $m < d$. Така матриця може бути записана у вигляді: $Y = A^T X$, де A – матриця розмірності $d \times m$; T – позначення операції транспонування. Наголосимо на тому, що матриця A задовольняє умові $A^T A = I$, де I – діагональна одинична матриця.

Даний метод проективної оптимізації полягає в тому, що гіперспектральні дані, які на початку представлені у просторі високої розмірності d , проектуються в деякий новий простір меншої розмірності m . Оптимальним вважається таке проектування, яке максимізує деякий проекційний індекс J ; цей індекс в загальному вигляді записується як $J = J(A^T X)$.

Як проекційний індекс ми можемо використовувати дивергенцію інформації. Дивергенція визначається таким чином: якщо записати умовну ентропію між двома пікселями гіперспектрального зображення, які представлені векторами $x_1^T = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1i}, \dots, x_{1d})$ та

$x_2^T = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2i}, \dots, x_{2d})$, як $D(x_1 / x_2) = \sum_{i=1}^d x_{1i} \log \frac{x_{1i}}{x_{2i}}$, то величина дивергенції інформації між цими пікселями розраховується через їх умовні ентропії як

$$J(x_1, x_2) = D(x_1 / x_2) + D(x_2 / x_1). \quad (1)$$

3. Метод визначення спектральних каналів на основі використання результатів автоматичної кластеризації спектральних шарів гіперспектрального зображення

Даний метод полягає у визначенні спектральних каналів на основі використання результатів автоматичної кластеризації спектральних шарів гіперспектрального зображення. Спектральний шар гіперспектрального зображення – це матриця цифрових значень спектральної яскравості в елементах на певній довжині хвилі випромінювання для кожного спектрального каналу.

Використання гіперспектральних зображень розширює можливості щодо отримання інформації про об'єкти за рахунок відмінностей у структурі спектральних ознак об'єктів та фонів. Тому алгоритм кластеризації повинен виявляти навіть незначні відмінності. Для цього були розроблені алгоритм і програма автоматичної кластеризації, яка використовує спеціальну міру близькості:

$$\forall x \in R_+^n, \forall y \in R_+^n, \rho(x, y) = \log_2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i} \right), \quad (2)$$

де x та y – масиви даних, що порівнюються, $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)^T$, $x \in R_+^n$;

$\left\{ y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n)^T \mid y_i > 0 \ \forall i = 1, \dots, n \right\}$, x_i, y_i – елементи масивів x та y (в нашо-

му випадку, це значення спектральних ознак у спектральних шарах, що порівнюються).

Оскільки у кластерах групуються близькі за формою спектральні шари гіперспектрального зображення, то виникає можливість використання для проведення аналізу гіперспектрального зображення не всіх спектральних шарів, а типових представників кластерів. Це дозволить суттєво знизити об'єм даних, які можна буде передавати з мінімальними часовими затратами.

Для оцінки можливостей використання типових елементів кластерів гіперспектрального зображення для проведення аналізу із кожного кластера можна вибрати по декілька елементів. Потім проводиться усереднення вибраних елементів кожного кластера. Отримані результати усереднення нічим не відрізняються від початкових зображень і тому їх можна використовувати при виділенні цільових об'єктів.

Таким чином, наведений метод забезпечує швидку обробку гіперспектральних даних для виявлення цільових об'єктів та вибір спектральних каналів. В основі даного методу лежить кластеризація гіперспектрального зображення за яскравістю пікселів зображень, вибір типових елементів кожного кластера, побудова зображень усереднених вибраних елементів кожного кластера. Цей метод дозволяє суттєво знизити об'єм даних та зменшити затрати часу на передачу даних [7, 8].

4. Новий підхід до відбору спектральних каналів, заснований на застосуванні критеріальної функції інформативності

При оцінці інформативності спектральних каналів будемо вважати, що нам відома навчальна вибірка для кожного з K_m класів, $m = 1, 2, \dots, M$. Кожна кількісна ознака π_n ($n = 1, 2, \dots, N$) у відповідному спектральному каналі має певний діапазон значень, позначимо його d_{π_n} . У межах загальної навчальної вибірки I діапазон значень n -ї ознаки розраховується як

$$d_{\pi_n} = \max_I \pi_n - \min_I \pi_n, \quad (3)$$

де $\max_I \pi_n$ та $\min_I \pi_n$ – відповідно найбільше та найменше значення цієї ознаки.

Для дослідження кореляції значень ознаки π_n з класами K_1, K_2, \dots, K_M розподілимо діапазон значень ознаки на однакові за шириною інтервали. Ширина інтервалу визначається як

$$\Delta d_{\pi_n} = \frac{d_{\pi_n}}{|\bar{I}|}, \quad (4)$$

де $|\bar{I}|$ – потужність загальної навчальної вибірки у теоретико-множинному розумінні.

Клас K_M будемо називати зіставленим певному інтервалу ознаки π_n , яка розглядається, якщо в навчальній вибірці I_m позитивних прикладів по класу K_M матимемо приклад об'єкта, значення ознаки якого потрапляє до цього інтервалу. Якщо кількісна ознака для об'єктів різних класів у кожній з N спектральних зон розподілена на відповідні інтервали, то, використовуючи загальну навчальну вибірку, для будь-якої спектральної зони можна визначити, в який інтервал потрапили конкретні представники різних класів з цієї вибірки, а потім підрахувати кількість попадань класів у відповідні інтервали. Зрозуміло, розподіл попадань класів по інтервалах буде відрізнятися для різних спектральних каналів, а це означає, що різні спектральні канали неоднаково ефективні при класифікації об'єктів. Ефективність класифікації об'єктів може бути платформою для визначення й порівняння інформативних властивостей різних спектральних каналів [9–11].

Впровадимо функцію F , яку будемо далі називати критеріальною функцією інформативності спектрального каналу:

$$F = 1 - \frac{1}{M(M-1)} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{j=1}^{nz} \left(l_{mj} \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^M l_{kj} \right)}{\sum_{j=1}^{nz} l_{mj}}, \quad (5)$$

де M – кількість класів, nz – число інтервалів для ознаки спектрального каналу, що розглядається, l_{mj} – індикатор зіставлення.

$$l_{mj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо клас } K_m \text{ зіставлений з інтервалом } j, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Можна показати, що функція інформативності (5) має значення в діапазоні від 0 до 1, а її конкретна величина залежить від того, як зіставлені між собою класи та ознаки. Серед спектральних каналів той буде мати найбільше значення функції F , для ознаки якого число класів, одночасно зіставлених кожному інтервалу, буде мінімальним. Далі будемо користуватися гіпотезою, що саме той спектральний канал і є найбільш інформативним. Тоді формула (5) надає можливість кількісно порівнювати інформативності спектральних каналів та відбирати серед них найбільш ефективні для класифікації об'єкти [12, 13].

5. Приклади застосування критеріальної функції інформативності до розв'язання задач дистанційного зондування Землі

Приклад 1

Проілюструємо існування такої можливості на прикладі, коли навчальна вибірка складається з двох об'єктів, причому кожен об'єкт відноситься до свого окремого класу. Тобто ми маємо 2 класи ($M = 2$). Інтервал значень ознак у кожному спектральному каналі буде

розбитий на 2 інтервали. Нехай для першого спектрального каналу маємо такі індикатори зіставлення:

$$l_{11} = 1, l_{12} = 0, l_{21} = 0, l_{22} = 1.$$

Для другого спектрального каналу маємо такі індикатори зіставлення:

$$l_{11} = 1, l_{12} = 0, l_{21} = 1, l_{22} = 0.$$

Для третього спектрального каналу:

$$l_{11} = 0, l_{12} = 1, l_{21} = 0, l_{22} = 1.$$

Для даного випадку формула (5) буде мати такий вигляд:

$$F = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{l_{11} \cdot l_{21} + l_{12} \cdot l_{22}}{l_{11} + l_{12}} + \frac{l_{21} \cdot l_{11} + l_{22} \cdot l_{12}}{l_{21} + l_{22}} \right]. \quad (6)$$

Тепер обчислюємо критеріальну функцію інформативності за формулою (6) для першого спектрального каналу:

$$F_1 = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{1 \cdot 0 + 0 \cdot 1}{1 + 0} + \frac{0 \cdot 1 + 1 \cdot 0}{0 + 1} \right] = 1.$$

Для другого спектрального каналу:

$$F_2 = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{1 \cdot 1 + 0 \cdot 0}{1 + 0} + \frac{1 \cdot 1 + 0 \cdot 0}{1 + 0} \right] = 0.$$

Для третього спектрального каналу критеріальна функція інформативності має вигляд

$$F_3 = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{0 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{0 + 1} + \frac{0 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{0 + 1} \right] = 0.$$

З отриманих результатів ми можемо зробити висновок, що найбільшу інформативність має перший спектральний канал, а інші два канали мають нульову інформативність.

Приклад 2

Тепер розглянемо приклад, коли навчальна вибірка складається з трьох об'єктів, причому кожний об'єкт відноситься до свого окремого класу. Тобто маємо три класи ($M = 3$) і, у відповідності з формулою (4), у кожному спектральному каналі інтервал значень ознак буде розбитий на три інтервали.

Припустимо, що існує два спектральних канали ($N = 2$). Оцінимо інформативність кожного з цих каналів.

Індикатори зіставлення для першого спектрального каналу будуть мати вигляд

$$l_{11} = 0, l_{12} = 1, l_{13} = 0, l_{21} = 0, l_{22} = 1, l_{23} = 0, l_{31} = 0, l_{32} = 1, l_{33} = 0.$$

Для другого спектрального каналу:

$$l_{11} = 1, l_{12} = 0, l_{13} = 0, l_{21} = 0, l_{22} = 0, l_{23} = 1, l_{31} = 1, l_{32} = 0, l_{33} = 0.$$

У даному випадку формулу (5) можемо переписати у такому вигляді:

$$F = 1 - \frac{1}{6} \left[\frac{l_{11}(l_{21} + l_{31}) + l_{12}(l_{22} + l_{32}) + l_{13}(l_{23} + l_{33})}{l_{11} + l_{12} + l_{13}} + \frac{l_{21}(l_{11} + l_{31}) + l_{22}(l_{12} + l_{32}) + l_{23}(l_{13} + l_{33})}{l_{21} + l_{22} + l_{23}} + \frac{l_{31}(l_{11} + l_{21}) + l_{32}(l_{12} + l_{22}) + l_{33}(l_{13} + l_{23})}{l_{31} + l_{32} + l_{33}} \right]. \quad (7)$$

Обчислимо критеріальну функцію інформативності за формулою (7) для першого спектрального каналу:

$$F_1 = 1 - \frac{1}{6} \left[\frac{0(0+0) + 1(1+1) + 0(0+0)}{0+1+0} + \frac{0(0+0) + 1(1+1) + 0(0+0)}{0+1+0} + \frac{0(0+0) + 1(1+1) + 0(0+0)}{0+1+0} \right] = 0.$$

Для другого спектрального каналу маємо

$$F_2 = 1 - \frac{1}{6} \left[\frac{1(0+1) + 0(0+0) + 0(1+0)}{1+0+0} + \frac{0(1+1) + 0(0+0) + 1(0+0)}{0+0+1} + \frac{1(1+0) + 0(0+0) + 0(0+1)}{1+0+0} \right] = \frac{2}{3}.$$

З даних розрахунків ми можемо зробити висновок, що більшу інформативність має другий спектральний канал.

6. Висновки

У даній статті розглядається та аналізується використання багатоспектральних систем дистанційного зондування Землі з космосу при розв'язанні різноманітних природоресурсних задач. Наголошується на тому, що різні спектральні канали мають неоднакову інформативність. Також у роботі було сформульовано задачу, яка полягає в оптимальному виборі найбільш інформативних спектральних каналів при вивченні об'єктів дистанційного зондування та розв'язанні задач класифікації.

У статті було розглянуто та проаналізовано декілька методів відбору найбільш корисних спектральних каналів, розглянуто метод Band Selection, заснований на виборі такої комбінації спектральних зображень, які у сукупності є найбільш ефективні в сенсі вибраного критерію (наприклад, у випадку досягнення максимального значення деяким функціоналом). Також був проаналізований метод визначення найбільш інформативних спектральних каналів на основі використання результатів автоматичної кластеризації спектральних шарів гіперспектральних зображень.

У роботі запропоновано нову критеріальну функцію інформативності спектральних каналів, яка надає можливість кількісно порівнювати інформативність каналів та надає можливість вибирати серед них найбільш інформативні та ефективні для класифікації об'єкти. Застосування даної критеріальної функції було проілюстровано на двох прикладах. Враховуючи результати обчислень з використанням формули критеріальної функції інформативності та значень індикаторів зіставлення l_{mj} для кожного спектрального каналу, ми отримали розподіл інформативності спектральних каналів [14–16].

Таким чином, експериментальна перевірка запропонованої методики, заснована на використанні критеріальної функції інформативності спектральних каналів, свідчить про її ефективність при класифікації земель з використанням багатоспектральних зображень.

В подальшому дана методика відбору найбільш інформативних спектральних каналів може бути застосована при розв'язанні задач пошуку корисних копалин та при проведенні класифікації урбанізованих територій та сільськогосподарських земель.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Еремеев В. Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных / В. Еремеев, И. Мордвинцев, Н. Платонов // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 6. – С. 80 – 90.
2. Альперт С. Оцінка точності класифікації космічних зображень на основі теорії Демпстера-Шафера / С. Альперт // Збірник праць XI Міжнародної молодіжної наук.-практ. конф. “Історія розвитку науки, техніки та освіти” за темою “Розбудова дослідницького університету”. – Київ, 2013. – С. 242 – 245.
3. Попов М. Сучасні погляди на інтерпретацію даних аерокосмічного дистанційного зондування Землі / М. Попов // Космічна наука і технологія. – 2002. – № 2/3. – С. 110 – 115.
4. Эбелинг В. Физика процессов эволюции / Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 328 с.
5. Гарбук С. Космические системы дистанционного зондирования Земли / С. Гарбук, В. Гершензон. – М.: Изд-во А и Б, 1997. – 296 с.
6. Кононов В. Сравнительная оценка информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения / В. Кононов, С. Станкевич // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, 2004. – Т. 17, № 2. – С. 88 – 95.
7. Попов М. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли / М. Попов, С. Станкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – М.: ИКИ РАН.-2006. – Т. 2, № 1. – С. 61 – 63.
8. Претт У. Цифровая обработка изображений / Претт У. – Кн. 1. – М.: Мир, 1982. – 382 с.
9. Козлов В. Избранные труды по теории планирования эксперимента и обратным задачам оптического зондирования / Козлов В. – СПб., 2000. – 500 с.
10. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии / Кронберг П. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
11. Бугаевский Л. Геоинформационные системы / Л. Бугаевский, В. Цветков. – М.: Златоуст, 2000. – 214 с.
12. Попов М. Підхід до класифікації стану лісових ресурсів по багатоспектральних космічних зображеннях на основі принципу злиття даних та використання елементів ГІС-технологій / М. Попов, О. Рябоконтенко, О. Петроченко // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. – (Серия «География»). – 2003. – Т. 16 (55), № 2. – С. 142 – 150.
13. Попов М. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях / М. Попов // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 1. – С. 97 – 103.
14. Попов М. Шляхи отримання космічної інформації в інтересах національної безпеки та оборони / М. Попов // Наука і оборона. – 2002. – № 2. – С. 38 – 50.
15. Альперт С. Сучасні критерії оцінки точності класифікації аерокосмічних зображень / С. Альперт // Математичні машини і системи. – 2013. – № 4. – С. 187 – 197.
16. Альперт С. Оцінка якості класифікації аерокосмічних зображень на основі матриці помилок та коефіцієнтів точності / С. Альперт // Математичні машини і системи. – 2014. – № 1. – С. 101 – 107.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2013