

УДК 502:330.15

**ПІДХІД ДО КЛАСИФІКАЦІЇ СТАНУ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ ПО
БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ
НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ЗЛИТТЯ ДАНИХ ТА ВИКОРИСТАННЯ
ЕЛЕМЕНТІВ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ**

Попов М.О., Рябоконеко О.Д., Петроченко О.Ю.

Передмова

Сьогодні, як ніколи раніше, зрозуміло, що екологічна та техногенна безпека України напряму залежить від стану лісових покривів. Дійсно, ліса грають величезну роль в процесі стабілізації екологічного стану регіонів, локалізації токсикантів, зберіганні водного балансу і т.д. Про це йде мова, зокрема, у Законі України “Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру”, а також у державній “Програмі запобігання та реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру на 2000-2005 роки”. Тому моніторинг стану лісів, проведення об’єктивних та оперативних оцінок їх стану конче необхідні для контролю за сталим розвитком територій.

Як відомо, одним з найбільш ефективних методів дослідження лісів є метод, оснований на використанні матеріалів багатоспектральної зйомки поверхні Землі з космосу, причому сучасні космічні засоби дозволяють проводити контроль стану лісів в режимі моніторингу як на локальному, так й на регіональному рівнях. Особливо ефективно застосування космічних знімків в районах стихійних лих, екологічних катастроф, що охоплюють величезні площі, де присутність людини з різних причин неможлива чи небажана (наприклад, внаслідок високого радіаційного фону).

Використання багатоспектральних знімків для вивчення рослинності базується на аналізі варіацій параметрів відбитого сонячного випромінювання в різних діапазонах спектру електромагнітних хвиль в результаті його взаємодії з рослинами [1]. Спектри відбиття в різних спектральних діапазонах надають принципово різну інформацію щодо рослинності, тому доцільно їх сумісне використання для дослідження стану рослинних покривів Землі та їх класифікації. З цієї точки зору бажано збільшення кількості робочих спектральних діапазонів. І дійсно, кількість робочих спектральних діапазонів у сучасних іконічних системах космічного дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) обчислюється десятками і навіть сотнями. Але при цьому виникає низка проблем, серед яких найбільш актуальними є такі: як відібрати найбільш корисні (найбільш інформативні) спектральні канали і яким чином переробити з мінімумом помилок величезні масиви іконічної інформації.

Існує багато різноманітних підходів до оцінки інформативності спектральних каналів іконічних засобів ДЗЗ [2], але переважає прагматичний підхід, за яким канал

вважається тим інформативніше, чим більше інформація, яку він надає, сприяє вирішенню поставленої конкретної тематичної задачі.

Для оброблення величезних масивів іконічної інформації (зображень) в останні часи залучають спеціальні прикладні програми, серед яких найбільш відомі програмні системи ERDAS Imagine, PCI Geomatic, ErMapper, ArcView, MapInfo, SPANS MAP [3].

Досвід показує, що вищеназвані або інші подібні прикладні програмні системи надають унікальні можливості для роботи з даними ДЗЗ як при проведенні наукових досліджень, так і при вирішенні широкої гами практичних задач. Але разом з тим існують деякі обмеження. По-перше, кожна така прикладна програмна система є високотехнологічним продуктом, повноцінне використання якого неможливо без наявності потужної апаратної (технічної) бази і високої кваліфікації користувача. По-друге, широкому розповсюдженню таких високотехнологічних продуктів заважає їх відповідно висока ціна.

Тому актуальною залишається проблема створення спеціалізованих алгоритмів та програм, орієнтованих на вирішення тематичних задач, які можуть бути реалізовані на ПЕОМ типової конфігурації, і робота з якими потребує мінімальної комп'ютерної підготовленості користувача. Підхід до вирішення однієї з таких задач, а саме - до класифікації стану лісових ресурсів по багатоспектральним космічним зображенням розглядається в даній статті. Підхід у своїй теоретичній частині базується на синергетичній концепції злиття даних [4].

Постановка задачі

Нехай S – область земної поверхні з лісами, стан яких підлягає вивченню. Область S розкладається на сукупність (множину) елементарних однакових за формою та розміром ділянок місцевості $\{S_i / S_i \in S; i = 1, 2, \dots\}$; при цьому

$$S_i \cap S_k = \emptyset, \quad (i \neq k); \quad \bigcup_{i=1,2,\dots} S_i = S.$$

Передбачається, що кожна ділянка місцевості s_i

може належати до того чи іншого класу K_m , $m = 1, 2, \dots, M$, де M – загальна кількість класів. Метою вивчення кожної окремої ділянки є її класифікація, тобто визначення, до якого класу вона належить.

При використанні аерокосмічної іконічної системи ДЗЗ, що має N спектральних каналів, для кожної ділянки s_i земної поверхні може бути отримано до N зональних зображень. Якщо прийняти, що елементарній ділянці місцевості s_i відповідає один піксел на зображенні, то задача вивчення ділянок зводиться до класифікації пікселів, або піксельних об'єктів (їх також будемо позначати як s_i)

При заданій геометричній формі піксела повний опис складається з набору таких даних, як ім'я багатоспектрального зображення, місцеположення у площини зображення, амплітуда (або інтенсивність чи оптична щільність). Кожному багатоспектральному зображенню відповідає сукупність його складових спектральних зображень, кожне зі своїм номером. Місцеположення піксела визначається в прямокутній системі координат з початком координат у головній

точці знімку. Амплітуда є тою кількісною ознакою, яка саме використовується при класифікації піксельних об'єктів.

Таким чином, на багатоспектральному зображенні кожний піксел буде мати повний опис у вигляді кортежу $\langle \#, x, y, \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N \rangle$, (1)

де $\#$ - номер багатоспектрального зображення; x, y - координати піксела; $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N$ - амплітуди ідентичних (за координатами) пікселів на відповідних спектральних зображеннях загальною кількістю N , що разом складають багатоспектральне зображення з номером $\#$.

Задача класифікації піксельних об'єктів ставиться таким чином. Кожний піксел s_i належить одному з K_m класів, $m=1,2,\dots,M$. Для кожного класу K_m ($m=1,2,\dots,M$) надана інформація I_m у вигляді навчальної вибірки $\langle v_m^+ \rangle$ множини позитивних прикладів $\langle v_m^+ \rangle \subseteq K_m$, загалом утворюючих загальну навчальну вибірку \hat{I} таку, що

$$\hat{I} = I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_M, \quad (2)$$

Необхідно:

- 1) сформулювати критерій інформативності спектральних каналів;
- 2) розробити класифікаційне правило, яке дозволить алгоритмічно визначати для будь-якого об'єкта $s_i \in S$ ($i=1,2,\dots$) достовірність μ_m його належності до класу K_m , тобто отримувати пару $\langle K_m, \mu_m \rangle$;
- 3) застосувати сформоване класифікаційне правило до конкретних об'єктів.

Критеріальна функція інформативності спектральних каналів

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 ($n=1,2,\dots,N$) в відповідному спектральному каналі має певний діапазон значень; позначимо його d_{π_n} . У межах загальної навчальної вибірки \hat{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

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

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

Клас K_m будемо називати зіставленим певному інтервалу ознаки π_m , 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 в кожній з N спектральних зон розподілена на відповідні інтервали, то, використовуючи загальну навчальну вибірку, для будь-якої спектральної зони можна визначитися, в якій інтервал попали 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.

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,

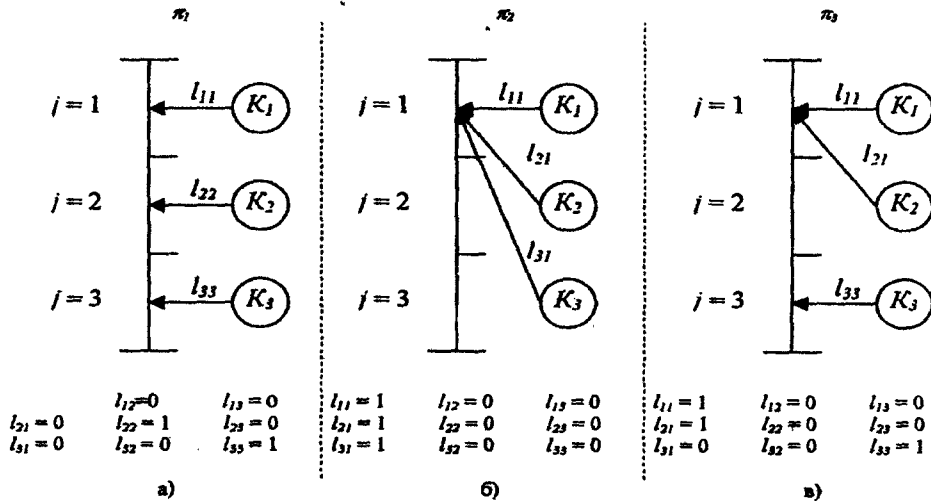
$$l_{mj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо клас } K_m \text{ зіставлений з інтервалом } j, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

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 характеризуватися найбільшим значенням функції F , для ознаки якого число класів, одночасно зіставлених кожному інтервалу, мінімально. Будемо далі 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'єктів.

Проілюструємо існування такої можливості на прикладі, 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 (мал.1).

Припустимо, що існує три спектральних канали ($N=3$), в яких відомі значення ознак $\langle \pi_1, \pi_2, \pi_3 \rangle$ об'єктів навчальної вибірки. Оцінимо інформативність кожного з цих каналів. У даному випадку формулу (5) можна переписати як

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



Мал. 1. Визначення інформативності спектральних каналів

Результати обчислень за цією формулою з використанням значень індикаторів зіставлення l_{mj} для кожного спектрального каналу наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розподіл інформативності спектральних каналів

Номер спектрального каналу	1-й (π_1)	2-й (π_2)	3-й (π_3)
F	1	0	2/3

Звідси видно, що найбільшу інформативність має 1-й канал, найменшу – 2-й канал.

Правила розрахунків достовірностей належності об'єкта класу

З вищевикладеного ясно, що не виключаються ситуації, коли по кожній ознаці π_n ($n=1,2,\dots,N$) одному інтервалу буде зіставлено декілька класів. Для кількісної характеристики подібних ситуацій введемо оцінку μ , яку далі будемо називати достовірністю належності об'єкта класу.

Оцінки μ обчислюються для кожного інтервалу кожної ознаки по усіх класах за таким правилом:

Крок 1. Для кожного класу K_m , зіставленого інтервалу (поточної ознаки), береться відношення числа прикладів з відповідної підмножини I_m загальної навчальної вибірки, для яких значення даної ознаки потрапляє до цієї зони, до числа всіх прикладів зі складу підмножини, для яких значення даної ознаки взагалі відомо (визначено). Це відношення помножується на 100 і виражається відсотковими значеннями (в %).

Крок 2. Отримані відсоткові значення для усіх класів, які зіставляються даному інтервалові, підсумовуються.

Крок 3. Для кожного зіставленого інтервалу класу K_m значення, яке отримане на першому кроці, ділиться на сумарне значення, яке отримане на другому кроці. Результат ділення є величина достовірності μ .

За такою трьохкроковою процедурою для кожного об'єкта, що класифікується, отримується до M достовірностей $\langle \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M \rangle$ його вірогідної належності відповідному класу K_m ($m=1, 2, \dots, M$).

Структура класифікаційного правила

Класифікаційне правило R містить по-інтервальне подання кожної зі спектральних ознак $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N$, при цьому для кожної ознаки вказуються номер n спектрального каналу ($n=1, 2, \dots, N$) та інформація про розподіл класів по усіх інтервалах ознаки.

Для кожного інтервалу вказуються:

- 1) його верхня та нижня границі;
- 2) кількість прикладів із загальної навчальної вибірки, які потрапили до даного інтервалу по кожному класу K_m ($m=1, 2, \dots, M$);
- 3) достовірності належності об'єкта кожному з класів.

Вся перелічені дані формуються шляхом обробки навчальної вибірки і розміщуються в спеціальній інформаційній базі.

Розглянемо, використовуючи цю базу, механізм застосування класифікаційного правила R до конкретного піксельного об'єкту s_i . Об'єкт на багатоспектральному зображенні за номером $\#$ може бути заданий деякими значеннями ознак по спектральних каналах, які заносяться до окремої таблиці.

При класифікації здійснюється накладання значень ознак об'єкта, що наведені в окремій таблиці на інтервальне подання ознак в інформаційній базі. Аналіз починається з розгляду найбільш суттєвої, з точки зору визначення належності об'єкта класу, ознаки, тобто з аналізу значень об'єкта у найбільш інформативному за формулою (5) спектральному каналі. У середині області значень цієї ознаки розшукується інтервал, до якого потрапляє значення ознаки об'єкта, що розглядається. З отриманого таким чином інтервалу береться інформація щодо достовірності зіставлених класів. Ця інформація заноситься до списку L_1 . Це - первинний список класів, до яких може належати об'єкт, та їх достовірностей. Інформація по наступному за своєю інформативністю спектральному каналу заноситься до списку L_2 .

З тих двох списків формується новий список L_3 за спеціальним правилом, яке надається нижче. В основу правила покладено відомий в синергетиці принцип злиття даних [4, 5] Далі список L_3 розглядається в ролі списку L_1 і т.д.

Процес продовжується із залученням чергового спектрального каналу до тих пір, поки в остаточному списку не залишиться один клас або не буде проаналізована інформація про ознаки даного об'єкта по всіх спектральних каналах.

Таким чином, у ході послідовного аналізу спектральних ознак об'єкта має місце злиття даних з відсічкою зайвих класів і корегуванням величин достовірності для класів, що залишаються у списку.

Розглянемо тепер правило, за яким з двох попередніх списків L_1 та L_2 формується новий список L_3 . Це правило передбачає виконання наступної послідовності умовно-логічних операцій.

1. Якщо у списку L_2 є зіставлені класи, номери яких не співпадають з номерами зіставлених класів списку L_1 , тоді:

1.1. Ці класи до списку L_3 не залучати, але підсумувати їх достовірності;

1.2. Отриману величину достовірності розподілити між зіставленими класами списку L_2 пропорційно їх достовірностям.

2. Якщо до списку L_2 не потрапили деякі із зіставлених класів списку L_1 , тоді:

2.1. Ці класи до списку L_3 не залучати, однак їх достовірності розподілити між зіставленими класами списку L_1 , тими, що залишилися, пропорційно їх достовірностям.;

2.2. Зіставлені класи списку L_1 , які одночасно зіставлені до списку L_2 , залучити до списку L_3 з усередненими (по списках L_1 та L_2) величинами достовірностей.

Таким чином в результаті отримується новий список L_3 . Відмітимо, що урахування синергізму спектральних каналів дає можливість підвищити достовірність результатів.

Алгоритм оцінки інформативності спектральних каналів та класифікації об'єктів на спектральних зображеннях

Для практичного застосування сформованого класифікаційного правила до конкретних об'єктів з використанням запропонованого вище критерію інформативності спектральних каналів і інформаційної бази розроблено алгоритм, який складається з наступної послідовності операцій-кроків.

1. По даним навчальної вибірки створити інформаційну базу.

2. По даним навчальної вибірки встановити інформативність кожного спектрального каналу, для чого розрахувати по формулі (5) значення функції інформативності F кожного n -го спектрального каналу, $n=1,2,\dots, N$, а також проранжувати значення функції інформативності F різних спектральних каналів.

3. $n=0$.

4. Перейти до поточного об'єкту та його спектральних ознак.

5. Перейти до найбільш інформативного спектрального каналу (ознаки).

6. $n=n+1$.

7. В інформаційній базі, де міститься вирішальне правило, розшукати інтервал, до якої потрапляє значення спектральної ознаки, яка аналізується.
8. Якщо $n=1$, тоді перехід до п. 12.
9. Сформувати список L_1 , для чого виписати з розшукуваного інтервалу зіставлені класи з відповідними ним величинами достовірностей.
10. Переписати до списку L_3 інформацію зі списку L_1 .
11. Перехід до п. 16.
12. Сформувати список L_2 аналогічно списку L_1 .
13. Зі списків L_1 та L_2 сформувати список L_3 (за правилом, викладеним вище).
14. $n = n - 1$.
15. Переписати до списку L_1 інформацію зі списку L_3 .
16. Якщо в списку L_3 міститься один клас з ненульовим значенням достовірності, тоді перехід до п. 18.
17. Якщо проаналізовані ознаки не по всіх спектральних каналах, то перехід до п. 5. Інакше – перехід до п. 18 (Стоп).

Таким чином класифікується кожний піксельний об'єкт, причому одному об'єкту за результатами класифікації можуть бути зіставлені декілька класів з різними величинами достовірності.

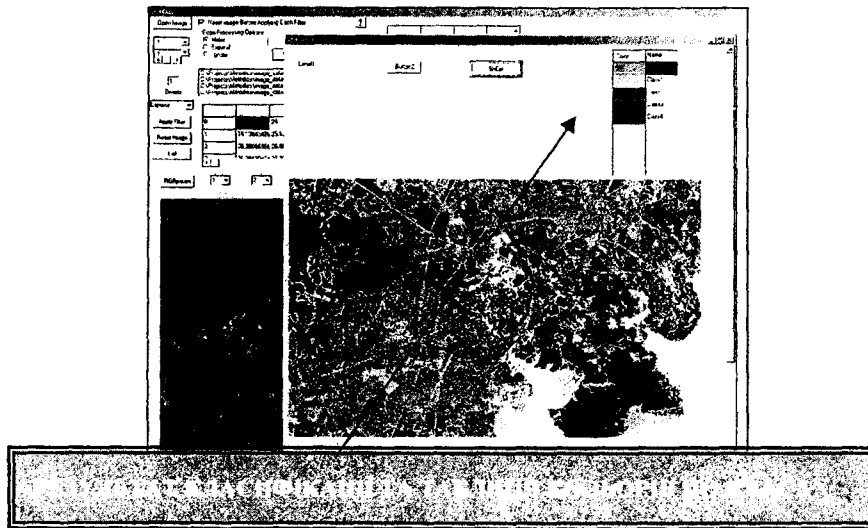
На базі запропонованого алгоритму було розроблено програмний модуль для класифікації багатоспектральних космічних зображень в програмному середовищі Delphi Enterprise, версія 6.0.

Розроблений інтерфейс використовує елементи ГІС-технологій і дозволяє:

- 1) Обирати канали багатоспектрального зображення, з якими планується працювати;
- 2) Відобразити багатоспектральне зображення у RGB форматі по обраних каналах;
- 3) Вводити за допомогою маніпулятора "mouse" навчальну інформацію по пікселям тестових ділянок;
- 4) Проводити оцінювання величини інформативності для кожного спектрального каналу, базуючись на даних навчальної вибірки;
- 5) Керувати кількістю каналів при проведенні класифікації;
- 6) Проводити класифікацію на базі створеної інформаційної бази.

Програмний модуль підтримує формат зображень BMP, далі планується підтримка формату TIFF та інших форматів.

На мал. 2 показаний розроблений інтерфейс для візуального відображення вихідних даних та результатів обчислювань, а також результатів класифікації об'єктів чотирьох класів при використанні двох спектральних каналів.



Мал. 2. Інтерфейс для візуального відображення вихідних даних та результатів обчислювань та результатів класифікації

ВИСНОВКИ

Таким чином, у статті запропоновано новий підхід до класифікації стану лісових ресурсів по багатоспектральним космічним зображенням. Підхід базується на синергетичній концепції злиття даних.

Розроблено алгоритм класифікації, який базується на запропонованих критеріях інформативності спектральних каналів і класифікаційному правилі визначення належності об'єкта до класу.

На базі описаного алгоритму розроблено з використанням елементів ГІС-технологій програмний модуль для класифікації багатоспектральних космічних зображень. Для програмної реалізації обрано середовище програмування Delphi Enterprise, версія 6.0.

Література

1. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. М.: Мир, 1988. 343 с.
2. Многозональные аэрокосмические съемки Земли. М.: Наука, 1981. 303 с.
3. Бугаевский Л.М., Цветков В.Я. Геоинформационные системы. М.: Златоуст, 2000. 214 с.
4. Попов М.О. Сучасні погляди на інтерпретацію даних аерокосмічного дистанційного зондування Землі // Космічна наука і технологія, 2002, т. 8, №2/3, с. 110-115.
5. Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 328 с.

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2003 г.