

ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ, ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА РАДІОТЕХНІКА

УДК 528.8:528.7:528.4:528.06

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-2-70.40>

Альперт С. І., кандидат технічних наук,
доцент кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою
факультету архітектури, будівництва та дизайну
Державного університету «Київського авіаційного інституту»
ORCID: 0000-0002-7284-6502

ОБРОБКА СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТУ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Теорія нечітких множин – це розділ прикладної математики, присвячений методам аналізу та обробки невизначених та неточних даних. Основним поняттям даної теорії є функція приналежності. Функція приналежності визначає ступінь приналежності деякого елемента чи об'єкта до нечіткої множини. Теорія нечітких множин може точно описувати математичні моделі складних природних об'єктів і процесів та широко застосовується у різних сферах, таких як: інформатика, штучний інтелект, розпізнавання образів та інші. Ця теорія використовується для моделювання, аналізу, вивчення різних складних систем із невизначеними даними. Теорія нечітких множин є важливим математичним інструментом у дистанційному зондуванні Землі. Поняття «нечіткої множини» застосовуються у таких задачах класифікування, де звичайні методи класифікування дають неточні результати. Дана теорія описує класи земного покриття зі ступенями приналежності об'єкта кожному із цих класів. Цей математичний підхід застосовується при роботі із неточними та невизначеними границями між класами. Застосування нечітких множин надає можливість будувати більш реалістичні моделі для вирішення задач дистанційного зондування. Зазначено, що запропонована теорія відіграє важливу роль у задачах обробки супутникових знімків при вирішенні задач дистанційного зондування Землі, оскільки дана методика дає змогу точно охопити структуру супутникового зображення. Описано деякі логічні операції з нечіткими числами із застосуванням методу альфа-зрізів. Розглянуто на числових прикладах логічні операції з нечіткими числами. Детально проаналізовано нечітку кластеризацію методом С-середніх. Зазначено, що даний підхід широко застосовується для проведення неконтрольованого класифікування супутникових зображень. Він дозволяє пікселям належати до декількох класів із різним ступенем приналежності, на відміну від інших відомих методів кластеризації. Нечітка кластеризація методом С-середніх використовується для обробки, аналізу та класифікування змішаних пікселів. Апарат теорії нечітких множин може бути застосований для вирішення таких актуальних та важливих задач дистанційного зондування Землі, як: сільськогосподарські задачі, моніторинг водних ресурсів, класифікування рослинності, розв'язок екологічних та геологічних задач.

Ключові слова: обробка даних ДЗЗ, класифікування зображень, теорія нечітких множин, нечітке число, нечітка кластеризація, задачі ДЗЗ.

Alpert S. I. Processing of satellite images using the apparatus of fuzzy set theory

Fuzzy set theory is a branch of applied mathematics devoted to methods of analysis and processing of vague and inaccurate data. Main concept of this theory is membership function. Membership function defines the degree to which a certain element or object belongs to a fuzzy set. Fuzzy set theory accurately describes mathematical models of complex natural objects and processes, it is widely applied in various fields, such as: computer science, artificial intelligence, pattern recognition, and others. This theory is used to model, analyze and study various complex systems with uncertain data. Fuzzy Set Theory is a considerable mathematical tool in remote sensing. The concept of «fuzzy set» is used in classification tasks when common classification methods give inaccurate results. This theory describes the classes of land cover with the degrees of belonging of object to each of these classes. This mathematical approach is useful when dealing with imprecise and ambiguous boundaries between classes. The use of fuzzy sets makes it possible to build more realistic models for solving remote sensing problems. It was noted that the proposed theory plays a serious role in the processing of satellite images for solution of remote sensing tasks, because this technique allows to accurately describe the structure of the satellite image. Some logical operations with fuzzy numbers applying the alpha-cut method were described. These logical operations with fuzzy numbers were considered using numerical

© С. І. Альперт, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

examples. Fuzzy clustering using the C-means method was analyzed in detail. It was noted that this approach is widely applied for unsupervised classification of satellite images. It allows, that pixels belong to multiple classes with different degrees of membership, unlike other known clustering methods. Fuzzy C-Means clustering is useful for processing, analyzing and classification mixed pixels. Apparatus of Fuzzy Set Theory can be applied for solution of such actual and important remote sensing tasks, such as: agricultural tasks, water resources monitoring, vegetation classification, various ecological and geological problems.

Key words: remote sensing data processing, image classification, Fuzzy Set Theory, fuzzy number, fuzzy clustering, remote sensing tasks.

Вступ. Як відомо, теорія нечітких множин була заснована у 1965 р. відомим американським математиком та логіком Заде Л. для розробки та вдосконалення математичних методів, які здатні обробляти невизначену і неточну інформацію. Поняття нечіткої множини є певним узагальненням відомого поняття класичної множини, але, на відміну від поняття класичної множини, воно дає можливість елементам належати до множини частково, тобто вводиться певний ступінь належності елемента до множини, який, в свою чергу, приймає значення від «0» до «1».

Основними складовими апарату теорії нечітких множин є функції приналежності, нечіткі правила та алгоритми для виведення нечіткого висновку.

У роботах Заде Л. зазначалося, що складні системи в умовах неточності та невизначеності не можуть бути описані класичними математичними теоріями. Теорія нечітких множин знайшла широке застосування у різноманітних сферах, таких як: штучний інтелект, задачі розпізнавання образів, нейронні мережі, задачі управління ресурсами, керування безпілотними літальними апаратами, автоматика, системи керування, тощо.

Слід зазначити, що класифікування невизначених, неповних та неточних супутникових даних є однією із найскладніших процедур при розв'язанні задач у сфері дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Як правило спектральні характеристики різних об'єктів часто мають розмиті та нечіткі межі. Більшість природних об'єктів, а саме, ліси, водойми, ґрунтовий покрив не можна однозначно класифікувати, оскільки їх спектральні ознаки не мають чітких меж. У таких випадках традиційне бінарне класифікування дає не досить точні результати, оскільки воно не здатне враховувати усі особливості спектральних характеристик природних об'єктів.

Тому у наш час актуальною постає задача саме розробки нових методів обробки та класифікування супутникових зображень за умов наявності неточних та невизначених вхідних даних. Саме у такому випадку рекомендується застосовувати методи обробки аерокосмічних даних, що ґрунтуються на теорії нечітких множин, оскільки бінарне класифікування може давати не досить точні результати.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності розробки рекомендацій щодо застосування теорії нечітких множин, її основних понять та методик для підвищення точності процедури класифікування супутникових знімків.

Аналіз останніх джерел та публікацій. У даній статті було розглянуто основні можливості застосування математичного апарату теорії нечітких множин для підвищення точності класифікування аерокосмічних знімків в умовах неточних та невизначених вхідних даних.

У наукових роботах Кауфмана А., Гупта М., Дюбуа Д., Праде Х. були наведені та проаналізовані фундаментальні поняття та означення теорії нечітких множин, логічні (арифметичні) операції з нечіткими числами та основні сфери застосування [7, 11].

У статтях Бінагі Е. та Вана Е. були описані різні методики класифікування мультиспектральних зображень із використанням апарату теорії нечітких множин для вирішення численних задач ДЗЗ [2, 14]. Наголошувалося на тому, що методи обробки та класифікування супутникових знімків із застосуванням теорії нечітких множин дають більш точні результати ніж методи класифікування, що ґрунтуються на класичній теорії ймовірностей.

У роботах Канона Р., Гопала С. та Вудкока К. було проаналізовано методи сегментації супутникових знімків з метою створення тематичних карт та методи оцінки точності тематичних карт із використанням методик теорії нечітких множин [4, 10].

Отже, **метою дослідження** є аналіз фундаментальних понять теорії нечітких множин та сучасної методики кластеризації супутникових зображень на основі нечіткої логіки для вирішення актуальних задач ДЗЗ, таких як: класифікування лісів та урбанізованих територій, вирішення сільськогосподарських та геологічних задач, проведення екологічного моніторингу.

Виклад основного матеріалу. Застосування нечітких множин дає можливість описувати, обробляти, аналізувати та відображати взаємозв'язки між неточними даними.

У даному пункті розглянемо фундаментальні поняття та базові означення теорії нечітких множин [8, 12, 13].

Розглянемо універсальну множину X .

Задаємо нечітку підмножину $A \subset X$ на основі характеристичної функції, а саме:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]. \quad (1)$$

Будь-якому елементу множини $x \in A$ ставиться у відповідність дійсне значення, що приймає характеристична функція $\mu_A(x)$ із інтервалу $[0,1]$.

Значення $\mu_A(x)$ характеризує вагу елемента (об'єкта) x у заданій множині A .

Розглянемо нечітку множину $A \subset X$ та довільне дійсне число $\alpha \in [0,1]$.

α – рівень чи α – зріз, який відповідає нечіткій множині A , є чіткою множиною та позначається через ${}^{\alpha}A$, а саме:

$${}^{\alpha}A = \{x \in X : \mu_A(x) \geq \alpha\}. \quad (2)$$

Центральний елемент виражається із використанням α -зрізу:

$${}^{\alpha}A_i = \{x : \mu_A(x) \geq \alpha_i\} = [{}^{\alpha}A_{i_{lower}}, {}^{\alpha}A_{i_{upper}}], \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (3)$$

де $\alpha_0 = 1 > \alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n = 0$, $\alpha \in [0,1]$.

Далі наведемо означення “трикутного числа”.

Трикутне нечітке число A будується на основі чисел $[a, b, c]$ та характеристичної функції, яка розраховується наступним чином:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \end{cases}, \quad (4)$$

де a – мінімальне (найменше) значення;

b – найвірогідніше значення;

c – максимальне (найбільше) значення.

Далі побудуємо α – зріз множини A . Для цього покладемо, що $\alpha \in [0,1]$.

Звідси маємо:

$$\alpha = \frac{x-a}{b-a}; \quad \alpha = \frac{c-x}{c-b}. \quad (5)$$

Із отриманого виразу (5) виражаємо першу та другу границі інтервалу.

Виражаємо x через α :

$$\begin{aligned} x-a &= \alpha(b-a), \\ x &= (b-a)\alpha + a; \\ c-x &= \alpha(c-b), \\ x &= c - (c-b)\alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Ми отримали першу та другу границю інтервалу.

Застосовуючи вище описані рівності, отримуємо вираз для α -зрізу множини A :

$${}^{\alpha}A = [(b-a)\alpha + a, c - (c-b)\alpha]. \quad (7)$$

Логічні операції над нечіткими числами із використанням методу α -зрізів

Додавання нечітких чисел

Припустимо, що ми маємо наступні вхідні дані:

$X = [a, b, c]$ та $Y = [p, q, r]$ – нечіткі числа, чії характеристичні функції розраховуються наступним чином:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \end{cases}, \quad \mu_Y(x) = \begin{cases} \frac{x-p}{q-p}, & p \leq x \leq q \\ \frac{r-x}{r-q}, & q \leq x \leq r \end{cases}. \quad (8)$$

Далі із формули (8) виражаємо α – зрізи нечітких чисел X та Y :

$$\begin{aligned} {}^{\alpha}X &= [(b-a)\alpha + a, c - (c-b)\alpha], \\ {}^{\alpha}Y &= [(q-p)\alpha + p, r - (r-q)\alpha]. \end{aligned} \quad (9)$$

Для знаходження суми нечітких чисел X та Y треба спочатку знайти суму α -зрізів нечітких чисел X та Y , спираючись на інтервальну арифметику, а саме:

$$\begin{aligned} {}^{\alpha}X + {}^{\alpha}Y &= [(b-a)\alpha + a, c - (c-b)\alpha] + \\ &+ [(q-p)\alpha + p, r - (r-q)\alpha] = \\ &= [a + p + (b-a+q-p)\alpha, c + r - (c-b+r-q)\alpha]. \end{aligned} \quad (10)$$

Для розрахунку характеристичної функції $\mu_{X+Y}(x)$ треба ліву та праву границі інтервалу із попереднього виразу прирівняти до x .

Маємо:

$$\begin{aligned} x &= a + p + (b-a+q-p)\alpha, \\ x &= c + r - (c-b+r-q)\alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

Далі виражаємо α через x , покладаючи, що $\alpha=0$ та $\alpha=1$ у виразі (10):

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{x - (a+p)}{(b+q) - (a+p)}, \quad (a+p) \leq x \leq (b+q), \\ \alpha &= \frac{(c+r) - x}{(c+r) - (b+q)}, \quad (b+q) \leq x \leq (c+r). \end{aligned} \quad (12)$$

Із виразу (12) виражаємо характеристичну функцію для суми 2 нечітких чисел X та Y :

$$\mu_{X+Y}(x) = \begin{cases} \frac{x - (a+p)}{(b+q) - (a+p)}, & (a+p) \leq x \leq (b+q), \\ \frac{(c+r) - x}{(c+r) - (b+q)}, & (b+q) \leq x \leq (c+r). \end{cases} \quad (13)$$

Віднімання нечітких чисел

За умовою ми маємо $X=[a,b,c]$ та $Y=[p,q,r]$ – нечіткі числа, чиї характеристичні функції знаходяться, використовуючи формулу (8), а їх α -зрізи розраховуються по формулам (9).

Для обчислення різниці нечітких чисел X та Y нам слід знайти різницю α -зрізів цих нечітких чисел X та Y , застосовуючи інтервальну арифметику, так само як і при додаванні нечітких чисел:

$$\begin{aligned} {}^{\alpha}X - {}^{\alpha}Y &= [(b-a)\alpha + a, c - (c-b)\alpha] - [(q-p)\alpha + p, r - (r-q)\alpha] = \\ &= [(b-a)\alpha + a - (r - (r-q)\alpha), c - (c-b)\alpha - ((q-p)\alpha + p)] = \\ &= [(a-r) + (b-a+r-q)\alpha, (c-p) - (c-b+q-p)\alpha]. \end{aligned} \quad (14)$$

Для обчислення характеристичної функції $\mu_{X-Y}(x)$ слід прирівняти ліву та праву границі інтервалу із виразу (14) до x .

Тоді отримуємо:

$$\begin{aligned} x &= (a-r) + (b-a+r-q)\alpha, \\ x &= (c-p) - (c-b+q-p)\alpha. \end{aligned} \quad (15)$$

Виражаємо α через x , покладаючи, що $\alpha=0$ та $\alpha=1$ у виразі (14):

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{x - (a-r)}{(b-q) - (a-r)}, \quad (a-r) \leq x \leq (b-q), \\ \alpha &= \frac{(c-p) - x}{(c-p) - (b-q)}, \quad (b-q) \leq x \leq (c-p). \end{aligned} \quad (16)$$

Далі із виразу (16) виражаємо характеристичну функцію різниці 2 нечітких чисел X та Y :

$$\mu_{X-Y}(x) = \begin{cases} \frac{x - (a-r)}{(b-q) - (a-r)}, & (a-r) \leq x \leq (b-q) \\ \frac{(c-p) - x}{(c-p) - (b-q)}, & (b-q) \leq x \leq (c-p) \end{cases}. \quad (17)$$

Числові приклади логічних операцій над нечіткими числами із використанням методу α -зрізів

Нехай за умовою задачі маємо наступні вхідні дані:

$X = [2, 3, 5]$ та $Y = [4, 6, 8]$ – 2 нечітких числа, чий характеристичні функції, обчислюються за формулою (4):

$$\mu_X(x) = \begin{cases} \frac{x-2}{3-2}, & 2 \leq x \leq 3 \\ \frac{5-x}{5-3}, & 3 \leq x \leq 5 \end{cases}, \quad \mu_Y(x) = \begin{cases} \frac{x-4}{6-4}, & 4 \leq x \leq 6 \\ \frac{8-x}{8-6}, & 6 \leq x \leq 8 \end{cases},$$

$$\text{або } \mu_X(x) = \begin{cases} \frac{x-2}{1}, & 2 \leq x \leq 3 \\ \frac{5-x}{2}, & 3 \leq x \leq 5 \end{cases}, \quad \mu_Y(x) = \begin{cases} \frac{x-4}{2}, & 4 \leq x \leq 6 \\ \frac{8-x}{2}, & 6 \leq x \leq 8 \end{cases}.$$

Знаходимо α -зрізи нечітких чисел X та Y , використовуючи формулу (9):

$${}^{\alpha}X = [2 + \alpha, 5 - 2\alpha],$$

$${}^{\alpha}Y = [2\alpha + 4, 8 - 2\alpha].$$

1) Розрахунок суми двох нечітких чисел

Розраховуємо суму α -зрізів для нечітких чисел X та Y :

$${}^{\alpha}X + {}^{\alpha}Y = [2 + \alpha, 5 - 2\alpha] + [2\alpha + 4, 8 - 2\alpha] = [3\alpha + 6, 13 - 4\alpha].$$

Для обчислення характеристичної функції $\mu_{X+Y}(x)$ ми маємо прирівняти ліву та праву границі інтервалу із виразу до x .

Звідси виражаємо:

$$x = 3\alpha + 6,$$

$$x = 13 - 4\alpha.$$

Потім виражаємо α через x , вважаючи, що $\alpha = 0$ та $\alpha = 1$:

$$\alpha = \frac{x-6}{3}, \quad 2+4 \leq x \leq 3+6,$$

$$\alpha = \frac{13-x}{4}, \quad 3+6 \leq x \leq 5+8.$$

Далі знаходимо характеристичну функцію суми 2 нечітких чисел X та Y :

$$\mu_{X+Y}(x) = \begin{cases} \frac{x-6}{3}, & 6 \leq x \leq 9, \\ \frac{13-x}{4}, & 9 \leq x \leq 13. \end{cases}$$

2) Розрахунок різниці двох нечітких чисел

Будуємо різницю α -зрізів нечітких чисел X та Y :

$${}^{\alpha}X - {}^{\alpha}Y = [2 + \alpha, 5 - 2\alpha] - [2\alpha + 4, 8 - 2\alpha] = [3\alpha - 6, 1 - 4\alpha].$$

Для розрахунку характеристичної функції $\mu_{X-Y}(x)$ прирівнюємо ліву та праву границі інтервалу з даного виразу до x .

Звідси маємо:

$$x = 3\alpha - 6,$$

$$x = 1 - 4\alpha.$$

Виражаємо α через x , покладаючи, що у даному виразі $\alpha = 0$ та $\alpha = 1$:

$$\alpha = \frac{x+6}{3}, \quad 2-8 \leq x \leq 3-6,$$

$$\alpha = \frac{1-x}{4}, \quad 3-6 \leq x \leq 5-4$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{x+6}{3}, & -6 \leq x \leq -3, \\ \text{чи} \\ \alpha &= \frac{1-x}{4}, & -3 \leq x \leq 1. \end{aligned}$$

Отже, отримуємо характеристичну функцію різниці 2 нечітких чисел X та Y :

$$\mu_{X-Y}(x) = \begin{cases} \frac{x+6}{3}, & -6 \leq x \leq -3; \\ \frac{1-x}{4}, & -3 \leq x \leq 1. \end{cases}$$

Застосування нечіткої кластеризації для обробки супутникових знімків. Нечітка кластеризація для класифікування супутникових зображень є ефективним методом для проведення аналізу та інтерпретації даних ДЗЗ. На відміну від традиційної або чіткої кластеризації, де кожен об'єкт відноситься тільки до одного кластера, нечітка кластеризація допускає приналежність об'єкта одночасно до декількох кластерів із різним ступенем приналежності. Це є важливим для вирішення задач ДЗЗ, оскільки пікселі супутникових зображень часто характеризуються змішаними спектральними ознаками, що відповідають різним типам земного покриття, тобто: рослинність, вода, ґрунт можуть частково змішуватися у одному пікселі на супутниковому знімку [1, 3].

Зазначимо, що для проведення найбільш ефективного аналізу та інтерпретації даних ДЗЗ слід використовувати метод нечіткої кластеризації С-середніх (Fuzzy C-Means) [4, 5].

Алгоритм методу нечіткої кластеризації С-середніх

1) Спочатку задаємо вхідні дані:

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – множина спектральних векторів пікселів,

де x_i – повний сигнал пікселя, а саме, n -вимірний вектор, компонентами якого є значення сигналу пікселя на осях спектрального простору (спектральний вектор пікселя);

c – число кластерів, що обирається попередньо користувачем на основі аналізу даних чи емпіричним шляхом;

m – коефіцієнт (параметр) нечіткості, який відповідає за ступінь розмитості кластерів. Зазвичай, $m = 2$;

v_j – центри кластерів, що випадковим чином ініціалізуються,

де $j = 1, \dots, c$.

2) На даному кроці задається формула критерію мінімізації (функціонал):

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (\mu_{ij})^m \|x_i - v_j\|^2, \quad 1 \leq m < \infty, \quad (18)$$

де x_i – спектральний вектор i -го пікселя;

μ_{ij} – ступінь приналежності i -го пікселя до j -го кластера, що обчислюється за наступною формулою:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_j\|}{\|x_i - v_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}. \quad (19)$$

З даної формули випливає, що чим ближче піксель до центру конкретного кластера, тим його ступінь приналежності є вищим.

При цьому має виконуватися умова нормування, а саме:

$$\sum_{j=1}^c \mu_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, n.$$

m – коефіцієнт нечіткості.

v_j – центр j -го кластера;

Після перерахунку нових ступенів приналежності слід перерахувати (оновити) центри кластерів v_j за наступною формулою:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^m}. \quad (20)$$

3) Перевіряємо умови зупинки даного алгоритму, а саме продовжуємо перераховувати ступені приналежності та оновлювати центри кластерів за вище наведеними формулами, поки не буде досягнута умова зупинки (наприклад, зміна центрів кластерів стане менше заданого порогового значення ϵ , чи кількість ітерацій перевищить нами задане максимальне значення).

Метод нечіткої кластеризації широко може застосовуватися у ДЗЗ, де межі класів розмиті, а одним пікселям чи областям знімка властиві ознаки відразу кількох типів об'єктів. Даний алгоритм враховує неоднозначність приналежності пікселя до того чи іншого класу та ефективно розділяє змішані зони.

Метод Fuzzy C-Means застосовується для вирішення численних практичних завдань в ДЗЗ, таких як: виділення різних типів земного покриття (ліс, вода, сільськогосподарські угіддя, урбанізовані території) на багатоспектральних супутникових зображеннях, сегментація гіперспектральних зображень, виділення водних об'єктів (річок, озер), моніторинг водних ресурсів, резервуарів на оптичних знімках [4, 6, 9]. Також слід зазначити, що гібридні методи, що використовують у комплексі апарат теорії нечітких множин та водні індекси дають більш точні результати при розпізнаванні на супутникових знімках берегової лінії та мілководних ділянок.

Висновки. У статті було розглянуто та проаналізовано фундаментальні поняття та положення теорії нечітких множин. При цьому акцентувалося на тому, що за останні десятиліття апарат теорії нечітких множин здобув широке застосування в автоматизації, керуванні безпілотними літальними апаратами, нейронних мережах, штучному інтелекті та при вирішенні задач ДЗЗ. Так, дана теорія застосовується для обробки та розпізнавання аерокосмічних знімків в умовах неточних та неповних вхідних даних ДЗЗ. Застосування нечітких методів дає змогу підвищити точність і стійкість класифікування супутникових зображень за рахунок врахування неоднозначності спектральних ознак.

У статті були наведені основні логічні операції над нечіткими числами із використанням методу альфа-зрізів, зокрема, операції додавання та віднімання із числовими прикладами.

Було зазначено, що більшість задач ДЗЗ оперують саме нечіткими поняттями, оскільки різні класи різних природних об'єктів є нечіткими за своєю природою, тобто мають розмиті границі. Перехід від належності до неналежності об'єктів до даних класів є поступовим.

Тому при вирішенні задач класифікування доцільно застосовувати саме теорію нечітких множин, оскільки чіткі класи представляють спрощену картину, що не відповідає реальності та може призвести до невірних результатів класифікування.

Було запропоновано використовувати метод нечіткої кластеризації C-середніх для проведення обробки супутникових знімків та детально описано алгоритм даного методу.

Наголошувалося на тому, що теорія нечітких множин та нечіткі числа можуть бути застосовані при вирішенні численних задач ДЗЗ, зокрема, при вирішенні різноманітних природно-ресурсних задач, а саме: класифікування земного покриття (визначення ґрунтів та рослинності), аналіз урбанізованих територій (розпізнавання об'єктів інфраструктури), моніторинг надзвичайних ситуацій та природних катастроф, оцінка стану лісів (моніторинг деградації лісових масивів) та вирішення задач сільського господарства (прогноз врожайності).

Список використаних джерел:

1. Alpert S. I. Data combination method in Remote Sensing tasks in case of conflicting information sources. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 8(3). P. 44–48.
2. Binaghi E., Madella P., Montesano M. G., Rampini A. Fuzzy contextual classification of multiresource remote sensed images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1997. Vol. 35(2). P. 326–340.
3. Blonda P. N., Pasquariello G., Losito S., Mori A., Posa F., Ragno, D. An experiment for the interpretation of multitemporal remotely sensed images based on a fuzzy logic approach. *Int. J. Remote Sensing*. 1991. Vol. 12(3). P. 463–476.
4. Cannon R., Dave J., Bezdek J. C., Trivedi M. Segmentation of a thematic mapper image using the fuzzy c-means clustering algorithm. *IEEE Trans. Geo. and Remote Sensing*. 1986. Vol. 24(3). P. 400–408.
5. Canters F. Evaluating the uncertainty of area estimates derived from fuzzy land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1997. Vol. 63(4). P. 403–414.
6. Chang C. I. Hyperspectral data processing. Algorithm design and analysis. *Hoboken, N J: John Wiley and Sons*. 2013. 1164 p.
7. Dubois D., Prade H. Fundamentals of Fuzzy sets. *Boston: Kluwer Academic Publishers*. 2000. P. 125–193.
8. Dutta P., Boruah H., Ali T. Fuzzy arithmetic with and without using α -cut method: a comparative study. *International Journal of Latest trends in Computing*. 2011. Vol. 2 (1). P. 99–108.
9. Fisher P. F., Pathirana S. The evaluation of fuzzy membership of land cover classes in the suburban zone. *Remote Sensing of the Environment*. 1990. Vol. 34. P. 121–132.
10. Gopal S., Woodcock C. Theory and methods for accuracy estimation of thematic maps using fuzzy sets. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1994. Vol. 60. P. 181–188.

-
11. Kaufman A., Gupta M. M. Introduction to Fuzzy Arithmetic, Theory and applications. *Van Nostrand Reinhold Co. Inc., Workingham, Berkshire*. 2003. 361 p.
 12. Kent J. T., Mardia K. V. Spatial Classification Using Fuzzy Membership Models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1988. Vol. 10(5). P.659–671.
 13. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28(5). P. 823–870.
 14. Wang E. Improving Remote Sensing Image Analysis through Fuzzy Information Representation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1990. Vol. 56(8). P.1163–1169.

References:

1. Alpert, S. I. (2021). Data combination method in Remote Sensing tasks in case of conflicting information sources. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 8(3), 44–48.
2. Binaghi, E., Madella, P., Montesano, M. G., Rampini, A. (1997). Fuzzy contextual classification of multiresource remote sensed images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(2), 326–340.
3. Blonda, P. N., Pasquariello, G., Losito, S., Mori, A., Posa, F., Ragno, D. (1991). An experiment for the interpretation of multitemporal remotely sensed images based on a fuzzy logic approach. *Int. J. Remote Sensing*, 12(3), 463–476.
4. Cannon, R., Dave, J., Bezdek, J. C., Trivedi, M. (1986). Segmentation of a thematic mapper image using the fuzzy c-means clustering algorithm. *IEEE Trans. Geo. and Remote Sensing*, 24(3), 400–408.
5. Canters, F. (1997). Evaluating the uncertainty of area estimates derived from fuzzy land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(4), 403–414.
6. Chang, C. I. (2013). Hyperspectral data processing: Algorithm design and analysis. *Hoboken, N J: John Willey and Sons*, 1164 p.
7. Dubois, D., Prade, H. (2000). Fundamentals of Fuzzy sets. *Boston: Kluwer Academic Publishers*, 125–193.
8. Dutta, P., Boruah, H., Ali, T. (2011). Fuzzy arithmetic with and without using α -cut method: a comparative study. *International Journal of Latest trends in Computing*, 2 (1), 99–108.
9. Fisher, P. F., Pathirana, S. (1990). The evaluation of fuzzy membership of land cover classes in the suburban zone. *Remote Sensing of the Environment*, 34, 121–132.
10. Gopal, S., Woodcock, C. (1994). Theory and methods for accuracy estimation of thematic maps using fuzzy sets, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 181–188.
11. Kaufman, A., Gupta, M. M. (2003). Introduction to Fuzzy Arithmetic, Theory and applications. *Van Nostrand Reinhold Co. Inc., Workingham, Berkshire*, 361 p.
12. Kent, J. T., Mardia K. V. (1988). Spatial Classification Using Fuzzy Membership Models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(5), 659–671.
13. Lu, D., Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870.
14. Wang, E. (1990). Improving Remote Sensing Image Analysis through Fuzzy Information Representation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(8), 1163–1169.

Дата надходження статті: 08.08.202

Дата прийняття статті: 10.09.2025

Опубліковано: 30.12.2025