

Я. І. Виклюк, канд. фіз-мат. наук, проф.;
Б. М. Гаць

КЛІТИННО-АВТОМАТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ УРБАНІЗОВАНИХ СИСТЕМ

Засобами нечіткої логіки побудовано поля ймовірності урбанізації туристичних містечок Карпатського регіону. На основі отриманих полів проведено моделювання росту туристичних поселень за допомогою клітинних автоматів.

Вступ

Для багатьох регіонів України притаманний швидкий розвиток індустрії туризму. Розміщення нових центрів привабливості (гірськолижні підйомники, готелі тощо) залежить від характеру території (особливостей рельєфу, віддаленості від елементів інфраструктури і т. п.). Прогнозування геометрії росту населених пунктів та їхньої внутрішньої структури дозволить планувати розміщення нових центрів привабливості в околі туристичних містечок і розвиток відповідної інфраструктури з максимальною ефективністю. Тому виникає задача моделювання фрактальної структури туристичних містечок, що дасть змогу спрогнозувати подальший характер їхнього розвитку. Крім того моделювання дозволить визначити спеціалізацію окремих сегментів населеного пункту й передбачити інвестиційні потоки такої системи [1].

Метою роботи є моделювання складних соціальних процесів на прикладі розвитку населених пунктів.

Актуальність дослідження — визначення привабливості території та можливість розробки рекомендацій щодо ефективного розміщення елементів інфраструктури на основі моделювання структури туристичних поселень.

Новизна роботи полягає у розробленій концепції прогнозування структури процесу розбудови туристичних поселень на базі методів фрактального росту кристалів у поєднанні з теорією нечіткої логіки.

Розвиток туристичних містечок, обумовлений наявністю і розвитком центрів привабливості для рекреації. Прикладом може слугувати гірськолижний підйомник, історико-культурний об'єкт, лікувальне джерело та ін. В процесі розвитку навколо таких центрів формується супутня інфраструктура: заклади харчування, прокат спорядження, готельний сервіс, продаж сувенірної продукції та ін. Оскільки транспортне сполучення є основним фактором для переміщення від центру отримання туристичних послуг до центрів привабливості, то урбанізація території буде проходити від центру і направлена вздовж доріг. Схожий механізм у фізичних системах призводить до дендритного росту на прикладі кристалів [2]. Це дає змогу використати апробовану модель Cellular Urban Model (CUM) [1, 3], що базується на теорії дискретної дифузно-обмеженої агрегації та реалізована за допомогою асинхронних клітинних автоматів (КА).

КА вдало застосовуються для моделювання процесу урбанізації, складних соціальних, екологічних, економічних систем, що враховують дискретність своїх складових. Для адекватного моделювання властивостей перелічених систем необхідно приймати до уваги індивідуальні особливості мікроелементів системи, оскільки причиною виникнення і розвитку будь-якої макроструктури є сукупність елементарних актів взаємодії в системі на мікрорівні. В зв'язку з цим оптимальним апаратом для моделювання процесів урбанізації є КА методи.

Розрахунок фрактальної структури населених пунктів

Для розв'язання поставленої задачі розрахунку фрактальної структури населених пунктів використовувався алгоритм, що складається з таких кроків:

1. *Визначення вхідних параметрів.* В ізотропному середовищі розвиток населеного пункту відбувається симетрично [4]. В реальних умовах виникає деформація міста від сферичності, а основними факторами деформації є дороги і існуюча інфраструктура. Як показано в роботах [1, 5], існує низка ключових факторів, що визначають анізотропію міста (відстань до найближчого автобану, автодороги, центру міста, залізниці, аеропорту, об'їзної дороги, метрополітену).

Використовуючи сучасні ГС (в наших розрахунках була використана MapInfo), визначається положення атракторів (центр населеного пункту, вектори доріг).

2. *Визначення поля ймовірності урбанізації.* Для побудови фрактальної структури реальних населених пунктів необхідно враховувати поле ймовірності урбанізації.

Поле ймовірності складно формалізувати і аналітичного вигляду залежності вхідних і вихідної змінних немає. Однак з ГС можна отримати навчальні вибірки, тому для знаходження прихованих залежностей зручно скористатися методами SoftComputing. Ця залежність подана у формі «чорного ящика». При цьому її виявлення й визначення в явному теоретико-множинному або аналітичному вигляді не уявляється можливим через недолік інформації про проблемну область. Для конструктивного вирішення подібних завдань розроблений спеціальний математичний апарат нейронних мереж [6]. Перевагою моделей, побудованих на основі нейронних мереж, є можливість отримання нової інформації про проблемну область у формі деякого прогнозу. Недоліком нейронних мереж є подання знань про проблемну область у спеціальному вигляді, що може істотно відрізнятися від можливої змістовної інтерпретації існуючих взаємозв'язків і відносин. Нечіткі нейронні (гібридні) мережі покликані об'єднати в собі переваги нейронних мереж і систем нечіткого виводу. З одного боку, вони дозволяють розробляти й подавати моделі систем у формі правил нечітких продукцій, які володіють наочністю змістовної інтерпретації. З іншого боку, для побудови правил нечітких продукцій використовуються методи нейронних мереж. З огляду на це використано адаптивну систему нейронного виводу ANFIS.

Для побудови навчальної вибірки вибрані найтипівіші туристичні містечка Українських Карпат. Навколо заданих містечок визначалась область радіусом декілька кілометрів. Із заданої області стохастично вибирається довільна точка, визначаються її координати, відстань до автомобільних доріг, залізничної станції, центру міста і ступінь урбанізації, що є вихідною змінною навчальної вибірки. Ця величина виражається числовою характеристикою досліджуваної області: у випадку наявності міста вона приймає значення 1, у випадку відсутності — 0. Такий алгоритм повторюється необхідну кількість разів, в результаті формується навчальна вибірка довільного розміру. Навчальна множина являє собою кортеж у вигляді $p = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle$, де x_1 — відстань до центру населеного пункту; x_2 — відстань до найближчої автодороги; x_3 — відстань до залізничної станції.

В результаті навчання гібридної мережі є можливість отримання функціональної залежності. Отже, модель просторових розподілів ймовірності урбанізації може бути подана таким чином:

$$p = f(x_1, x_2, x_3), \quad (1)$$

де p — ймовірність урбанізації території, тобто числове вираження можливості забудови території, $0 \leq p \leq 1$.

3. *Моделювання фрактального росту населених пунктів.* Доповнивши модель дискретної дифузії додатковим параметром, що враховує можливість дифузійного переміщення частинок по полю (за нульового значення рух частинок заборонений, а за одиничного — дозволений), отримаємо модель дендритного росту. В випадку клітинно-автоматного моделювання маємо систему

$$\begin{cases} c_1^i = c_1^i + s(c_1^2 - c_1^1)(1 - c_2^1)(1 - c_2^2); \\ c_2^i = c_2^i + c_2^{i+s}(1 - c_2^i)c_1^i, \end{cases} \quad (2)$$

де $i = 1, 2$ — індекси двох взаємодійних клітин, $s = +1$ для $i = 1$, $s = -1$ для $i = 2$.

Ця система відображає двошарову структуру двомірного поля клітинних автоматів. Одиничні комірки шару c_1 показують координати рухомих частинок, ненульові комірки шару c_2 визначають положення агрегованих частинок [7]. Під частинкою будемо розуміти урбанізовану територію, агрегована частинка означає, що територія використовується (збудована) і рухома частинка — потенційно можливе положення для урбанізації території.

Модель CUM

У випадку, коли ріст населеного пункту відбувається на одній «затравці» (атракторі), то він набуває сферичної симетрії. Для його деформації необхідно враховувати поле ймовірності урбанізації. В моделі CUM пропонується вибирати напрями переходів клітинок не з рівномірного розподілу, а з урахуванням поля ймовірності урбанізації.

Доповнимо існуючу модель неперервних асинхронних клітинних автоматів третім шаром, що дозволяє враховувати ймовірність напрямку переходу клітинки. На клітинному полі випадковим чином вибирається комірка і чотири сусідні клітинки, що мають певну ймовірність p_i , $i = 1, \dots, 4$, з якою рух буде відбуватись в напрямку вгору—вниз—вправо—вліво.

Для визначення напрямку переходу необхідно пронормувати ймовірності

$$\bar{p}_i = \frac{p_i}{\sum_i p_i}. \quad (3)$$

Після цього розраховуються інтегровані ймовірності p_{int} :

$$\begin{aligned} p_{\text{int}1} &= p_1, p_{\text{int}2} = p_{\text{int}1} + p_2; \\ p_{\text{int}3} &= p_{\text{int}2} + p_3, p_{\text{int}4} = p_{\text{int}3} + p_4. \end{aligned} \quad (4)$$

Для вибору напрямку вибирається випадкова величина r з рівноймовірним розподілом. В залежності від того, в який діапазон p_1, \dots, p_4 потрапить число, в відповідному напрямку буде взаємодіяти клітинка.

Комп'ютерний експеримент

Для розрахунку поля ймовірності урбанізації була побудована нечітка система типу Сугено з допомогою ANFIS-редактора пакету MATLAB. Система нечіткого виведення містить 3 вхідні змінні, одну вихідну змінну, кожна з яких описується трьома термами. В якості терм-множини для вхідних змінних використовувалась множина $T = \{\text{«близько»}, \text{«посередньо»}, \text{«далеко»}\}$ або в символічному вигляді $T = \{\text{«PS»}, \text{«PM»}, \text{«PB»}\}$. Навчальна вибірка складалась з 5 тис. значень. В результаті навчання сформовано 27 правил нечітких продукцій (табл.). В роботі досліджувались FIS-системи з різними типами функцій належності: гаусівська, узагальнена дзвіноподібна, трикутна і трапецієподібна.

Для побудови полів ймовірності урбанізації туристичних містечок область, що моделюється розбивається сіткою. Для кожного вузла сітки визначаються значення вхідних параметрів моделі просторових розподілів ймовірності урбанізації (1). Результатом розрахунку є матриця розміром 1000000×3 . Отримані матриці використані в якості аргументів функції evalfis пакету FuzzyLogic Toolbox, за допомогою якої виконано нечіткий вивід в побудованих FIS-системах. На виході отримані матриці, що відображають ймовірність урбанізації кожного з вузлів сітки і побудовані поля просторових розподілів ймовірності урбанізації м. Яремче (рис. 1).

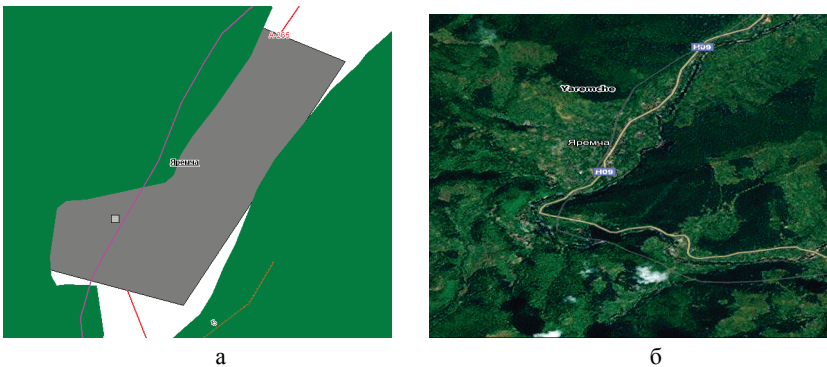


Рис. 1. М. Яремче: а — в ГІС MapInfo, б — світлина з космосу

В ході експерименту досліджувалися поля ймовірності, що побудовані на основі FIS-систем з різними типами функцій належності, а саме: гаусівських, узагальнених дзвіноподібних, трикутних і трапецієподібних.

На рис. 2 показані поля ймовірностей урбанізації для м. Яремче. Видно, що поля, побудовані на основі FIS-систем з гаусівськими,

дзвіноподібними і трикутними функціями належності, дають майже ідентичний результат (рис. 2а, 2б, 2г). Причому, найвища ймовірність урбанізації спостерігається вздовж однієї лінії. Це пояснюється наявністю автодороги, яка проходить через туристичне містечко, і залізничної станції, що там розташована. Ці фактори є визначальними в процесі розвитку і впливають на характер побудованих полів ймовірності урбанізації.

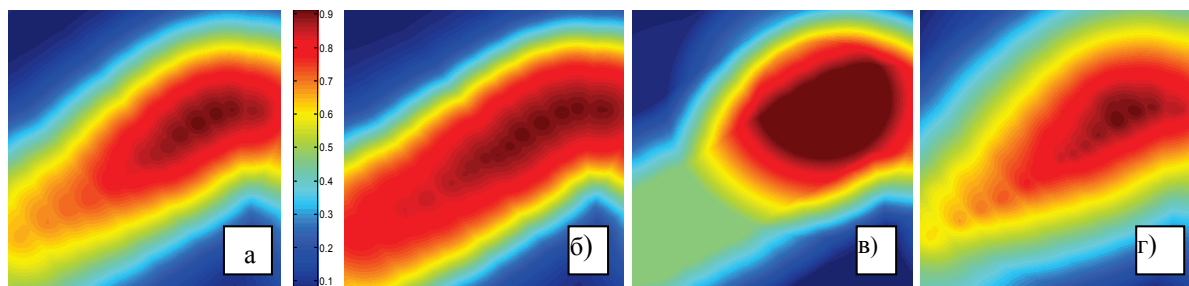


Рис. 2. Поля ймовірності урбанізації м. Яремче на основі FIS-систем з а — гаусівськими; б — дзвіноподібними; в — трапецієподібними; д — трикутними типами функцій належності

База правил нечітких продукцій системи нечіткого виведення

Номер пра-вила	Відстань до центру міста	Відстань до залізничної станції	Відстань до найближчої автодороги	Ймовірність урбанізації			
				гаусівські функції належності	дзвіноподібні функції належності	трапецієподібні функції належності	трикутні функції належності
1	PS	PS	PS	1	0,7946	0,9678	1
2	PS	PS	PM	0,01009	0	0,4993	0,5752
3	PS	PS	PB	1	1	0	1
4	PS	PM	PS	1	1	0,8382	1
5	PS	PM	PM	0	0,45552	0,2961	0
6	PS	PM	PB	0	0	0	0
7	PS	PB	PS	0	0,8318	0,1988	0,07919
8	PS	PB	PM	1	1	1	1
9	PS	PB	PB	0	0	0	0
10	PM	PS	PS	0,8182	0,7723	0,5157	0,7555
11	PM	PS	PM	0	0,1472	0,1156	0,08501
12	PM	PS	PB	0	0	0,07971	0,07224
13	PM	PM	PS	0	0,4819	0	0
14	PM	PM	PM	0,04031	0,0551	0,07995	0
15	PM	PM	PB	0,4775	1	0,01572	0,03573
16	PM	PB	PS	0	1	0,04309	0
17	PM	PB	PM	1	0,8374	0,3348	0,71
18	PM	PB	PB	1	1	1	1
19	PB	PS	PS	0	0	0,6864	0
20	PB	PS	PM	1	1	0,2733	1
21	PB	PS	PB	0	0	0,03523	0
22	PB	PM	PS	1	1	0,1674	0,695
23	PB	PM	PM	0	0	0	0
24	PB	PM	PB	0,1522	0,04285	0,01209	0,799
25	PB	PB	PS	0	0	0	0
26	PB	PB	PM	0	0	0	0
27	PB	PB	PB	0	0,3151	0	0,7014

На основі приведених полів ймовірності змодельована фрактальна структура м. Яремче. Для реалізації описаних вище моделей використовувалось клітинно-автоматне моделювання. На рис. 3 зображена картина фрактального росту на полі клітин розміром 200×200 в момент часу, що відповідає кількості міжклітинних взаємодій, рівній 7 млн. Час моделювання склав 15 хвилин.

З рисунка видно, що агреговані частинки розташовуються вздовж лінії, яка включає центр містечка, залізничну станцію і автодорогу. Ця територія має найбільший ступінь атрактивності і необхідно зазначити, що саме ця територія має найбільшу ймовірність урбанізації (рис. 3). Відомо, що розбудова поселень, які спеціалізуються на туризмі тяжіє до прокладених автошляхів. Тому наочно спостерігаємо, що агреговані частинки розташовуються на невеликій віддалі від центрів привабливості (центр міста і залізничний вокзал) і тяжіють до дороги. Така картина спостерігається в невеликих за розмірами туристичних містечках, де крамниці, ринки, бари розташовуються вздовж основної дороги.

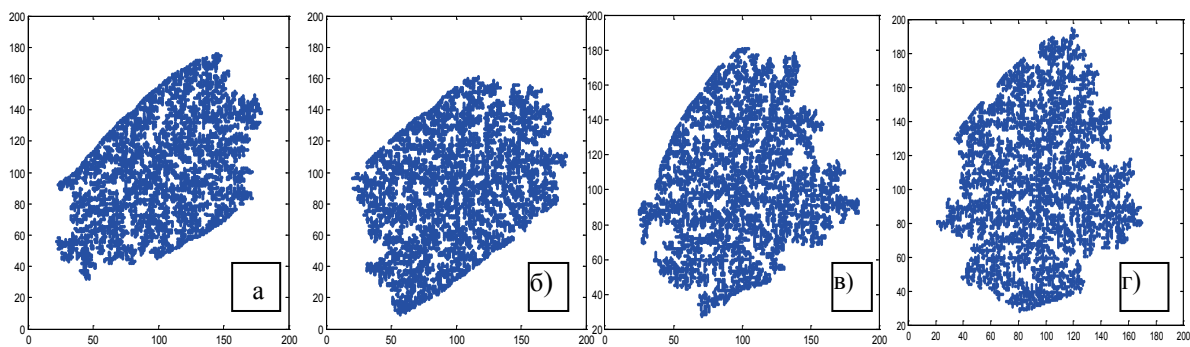


Рис. 3. Фрактальна структура м. Яремче для полів ймовірності на основі FIS-систем з

а — гаусівськими; б — дзвіноподібними; в — трапецієподібними;
д — трикутними типами функцій належності

З якісного аналізу видно, що найбільшу точність форм мають фрактальні структури для полів ймовірностей на основі FIS-систем з гаусівськими, дзвіноподібними і трапецієподібними функціями належності. Це дає змогу провести подальший аналіз, який дозволить встановити ступінь точності отриманих результатів. Схожість отриманих полів та побудованих на їхній основі фрактальних структур підтверджує адекватність запропонованої моделі CUM і може бути використана для подальших практичних досліджень.

Висновки

Розглянуто можливість застосування фрактального росту для прогнозування форми туристичних містечок. За допомогою апарату нечіткої логіки побудовано поля ймовірності урбанізації. Для моделювання динаміки просторового поширення була використана модель CUM. Основними перевагами CUM є можливість моделювання динаміки зростання населених пунктів на основі появи нових центрів привабливості території і під'їзних шляхів в короткостроковій перспективі (1—3 роки) та отримувати коректну форму периферії, що добре узгоджується з експериментом. Кожна агрегована точка розглядається як аналог урбанізованої території. Модель показала високий рівень точності форм, що підтверджує її адекватність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Qingsheng Yanga Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines / Qingsheng Yanga, Xia Lia, Xun Shid // Computers & Geosciences, 2008. — № 34 — С. 592—602.
2. Виклюк Я. І. Використання клітинних автоматів для моделювання та деформації дендритного росту / Я. І. Виклюк, Б. М. Гаць // Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. пр. — 2009. — Вип. 479: Комп'ютерні системи та компоненти. — С. 151—156.
3. Teknomo K. Stochastic cellular model for lowland urban development / K. Teknomo, G. Gerilla, K. Hokao // Lowland technology international — Vol. 8, No. 1 (2006). — P. 1—10.
4. Batty M. Fractal cities / M. Batty, P. Longley Academic Press, London and San Diego, 1996. — 394p.
5. He C. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China / C. He, N. Okada, Q. Zhang, P. Shi, J. Zhang // Applied Geography — 26 (2006). — P. 323—345.
6. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 735 с. : ил.
7. Генератор псевдовипадкових бінарних послідовностей на основі клітинних автоматів [Валь О. Д., Валь Л. О., Жихаревич В. В., Остапов С. Е.] // Науковий вісник Чернівецького університету. Серія Фізика. Електроніка, 2008. — вип. 426. — С. 39—43.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління

Стаття надійшла до редакції 11.02.11

Рекомендована до друку 15.03.11

Виклюк Ярослав Ігорович — професор Приватного вищого навчального закладу «Буковинський університет», Чернівці;

Гаць Богдан Миколайович — здобувач кафедри економічної кібернетики та інформаційних систем Чернівецького торговельно-економічного інституту Київського національного торговельно-економічного університету, Чернівці