

Імітаційне моделювання хмарного покриття за допомогою алгоритму diamond-square

Сукач^f Р. В., ORCID [0000-0002-4562-2730](https://orcid.org/0000-0002-4562-2730)

e-mail majorissue@outlook.com

Клен^s К. С., к.т.н., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

e-mail ekateryna.osypenko@gmail.com

Факультет електроніки, кафедра промислової електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Реферат – В наведеній статті представлено спосіб імітації хмарного покриття при моделюванні роботи фотоелементів, сонячних панелей, або сонячних електростанцій. Для створення імітаційної моделі хмари запропоновано модифікацію алгоритму diamond-square, також відомого як fractal cloud. Показано, що алгоритм дозволяє долати проблему отримання достатньо деталізованих для потреб моделювання зображень хмар з початкових даних низької роздільності. Запропоновано шляхи для подальшого покращення імітаційної моделі хмарного покриття.

Ключові слова – фрактальна розмірність хмари; модуляція інтенсивності випромінювання; збільшення роздільної здатності зображення хмари; показник прозорості атмосфери; алгоритм diamond-square.

I. ВСТУП

Останні двадцять років спостерігалися значні якісні зміни в складі вироблюваної енергії в світі. Значно зросла частка відновлюваної енергетики в окремих країнах світу. Наприклад КНР, де якість повітря з кожним роком погіршується, а в багатьох областях вже характеризується як «нездорова», активно розвивають альтернативну енергетику [1, 2]. В Індії за допомогою сонячних електростанцій вирішують проблему забезпечення енергією малих, розріджених населених пунктів [3]. В Україні потужність сонячних електростанцій (СЕС) в 2018-му році досягла рівня 1389 МВт, а це майже вдвічі більше ніж в 2017-му. Також запланована побудова найпотужнішої СЕС України – Нікопольської СЕС, потужністю 200 МВт [4].

Незважаючи на те, що для широкомасштабного введення в експлуатацію СЕС необхідно подолати чимало технологічних проблем, як-то мала ефективність сонячних панелей, низька продуктивність допоміжних підсистем СЕС, різноманітні економічні завади (а саме високі фінансові витрати на побудову електростанції та відсутність механізмів фінансування), сонячна енергетика визнається одним з небагатьох засобів задоволення постійно зростаючого енергетичного попиту [5].

Оскільки питання економічної доцільності є одним з вирішальних, то необхідно забезпечити фахівців якомога точнішою інформацією щодо прогнозованої потужності СЕС та засобами вибору оптимальних параметрів СЕС. Для моделювання СЕС в близьких до природних умовах необхідно вирішити ряд питань, зокрема розробити імітаційну модель

щільності хмарного покриття, його руху і висоти, зміну температури та моделювання фотоелементів, сонячних панелей та інших підсистем СЕС.

В даній роботі запропоновано спосіб представлення хмарного покриття у вигляді двовимірного масиву прозорості. Крім того представлено алгоритм, який дозволяє генерувати цей масив за заданими початковими даними. Джерелами даних про прозорість атмосфери можуть виступати дані з наземних датчиків [11], або дані з супутників [12].

Так, беручи за основу метод, запропонований Фурньє [6], для генерації масиву значень прозорості атмосфери для імітації зміни інтенсивності сонячного випромінювання використано алгоритм diamond-square. Модифікація алгоритму дозволить отримувати моделі хмарного покриття у вигляді масиву значень індексів прозорості.

II. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АЛГОРИТМУ

В основі імітаційної моделі лежить припущення, що хмари мають «фрактальну природу» [18]. Через це вважається доцільним використання алгоритму diamond-square [8] для генерації «самоподібних» структур – фракталів. (Для визначення поняття фракталу, [18])

Алгоритм починається з задання масиву з довжиною та висотою 2^{n+1} . Далі задаються 4 початкових значення по краях масиву. Подальшу роботу алгоритму можна розбити на два повторюваних кроки. Перший полягає в тому, що для кожного квадрату в масиві значення центрального елемента визначається як арифметичне середнє від суми чотирьох куткових значень (рис. 1(a)). Другий крок, в свою



чергу, використовуєе отримане на попередньому кроці значення щоб отримати кутові значення для нових квадратів як середнє арифметичне від суми відповідних елементів (рис. 1(б)).

Але щоб отриманий фрактал можна було використувати для імітації реальних природних об'єктів необхідно ввести випадкову складову. Алгоритм, запропонований у роботі [8], визначає цю складову як реалізацію випадкової величини з рівномірним законом розподілу Гауса помножену на коефіцієнт кроку, заданий наступним виразом (показник Херста):

$$\sigma_i = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \sigma_0 \cdot 2^{-H \cdot i}, & \text{для Diamond step} \\ \sigma_0 \cdot 2^{-H \cdot i}, & \text{для square step} \end{cases}$$

Тут $\sigma_0 = 1$ – стандартне відхилення для розподілу Гауса, i – номер кроку алгоритму. H – величина, зв'язана з фрактальною розмірністю хмари D [7]: $D = 2 - H$

Визначена декількома методами величина фрактальної розмірності D [18], зокрема аналізом зображень з супутника, знаходилася в межах числових значень від 1.4 до 1.6. В [8] запропоновано и обгрунтовано використання значення $H=0,5$ для усіх масштабів.

Перетворений згідно з (1) масив даних показано на рисунку.2. Модифікований алгоритм дозволяє отримувати «поверхню» фарктальної природи, яка і представляє собою імітаційну модель хмари.

Для зазначених раніше цілей доцільно представити значення масиву як значення прозорості атмосфери k^* . Цей показник визначається як: $k^* = G/G_{CS}$, де G – інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні, а G_{CS} – очікувана інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні землі в безхмарну погоду. Оскільки G_{CS} необхідно обраховувати для конкретної місцевості і отримати точне значення навіть прямими вимірюваннями неможливо, то його значення здебільшого занижене. Це приводить до того, що k^* може приймати значення більші за 1. Зі зміною методу розрахування G_{CS} необхідно змінювати і спосіб розрахунку k^* . Наприклад в [9] було отримано в результаті аналізу даних за 10 років спостережень емпіричні формули: $k^* = 1 - 0.75(N/8)^{3/4}$; $G_{CS} = 910 \sin \theta_e - 30$, де N – окти, а θ_e – це висота сонця над горизонтом (0-90°). За допомогою N кількісно оцінюють хмарність неба [10]. 0.75 – середнє значення коефіцієнту форми хмари, який, наприклад, для перистих хмар становить 0.39.

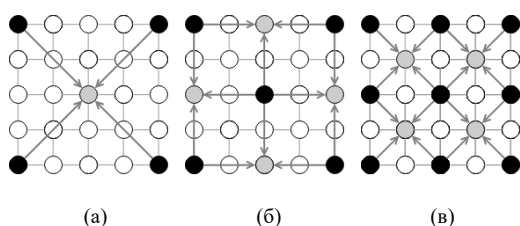


Рис.1 Ілюстрації до алгоритму diamond-square: (а, в) – перший крок, (б) – другий крок.

Отримані в результаті виконання алгоритму значення подані через показник хмарності (n). Ці данні запропоновано переводити [8] в індекс прозорості атмосфери за наступною формулою:

$$k^* = \begin{cases} 1.2, & n \leq -0.2 \\ 1-n, & -0.2 < n \leq 0.8 \\ 1.1661 - 1.7814n + 0.725n^2, & 0.8 < n \leq 1.05 \\ 0.09, & n > 1.05 \end{cases} \quad (1)$$

III. РОБОТА З РІЗНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ДАНИХ

Зі структури алгоритму diamond-square видно, що кількість початкових точок може відповідати наступному виразу: $(2^k + 1)^2, k \geq 0$. В якості прикладу було оброблене звичайне зображення із супутника. Вибрана область має розмір 65 на 65 пікселів (рис. 3(а)).

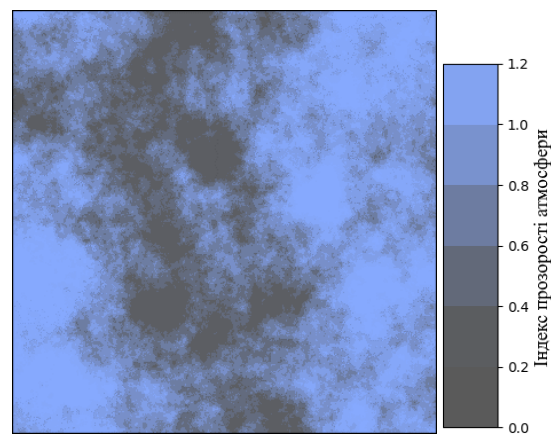


Рис.2 Масив, розмірністю 1025 на 1025 елементів з індексів прозорості атмосфери, представляє собою генеровану хмару

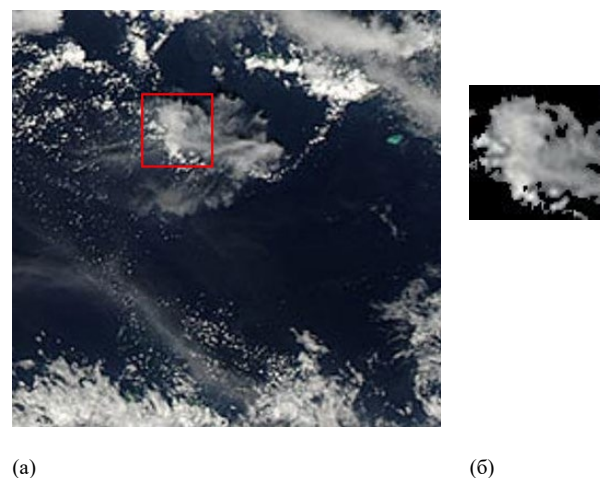


Рис. 3 Зображення із супутника (а), (б) – виділена для обробі хмара.

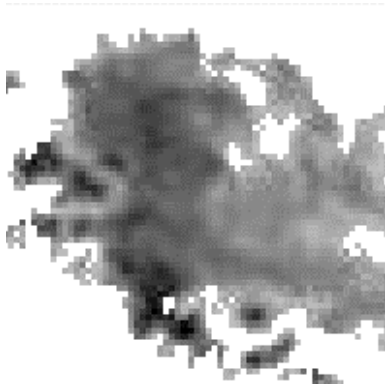


Рис. 4 Отриманий в результаті обробки 3 (б) масив індексів хмарності

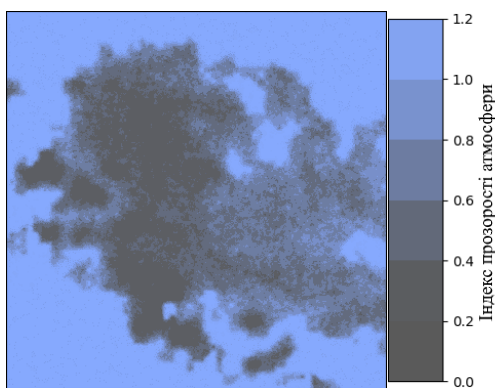


Рис. 5 Результат роботи алгоритму diamond-square – масив 1025 на 1025 елементів з індексів прозорості атмосфери

Виконуючи просту обробку зображення на рис. 5 був отриманий шаблон, дані з якого було трансформовано з RGB в індекс хмарності. На рис. 4 подано цей шаблон - масив значень індексу хмарності. Цей масив передано в алгоритм diamond-square. В результаті отримано масив розміром 1025 на 1025 з індексів прозорості атмосфери (рис. 5). Тобто роздільна здатність збільшена в 250 разів. При цьому є можливість уточнювати параметри алгоритму прямими спостереженнями.

Алгоритм diamond-square у вигляді, в якому він поданий в цій роботі потребує покращення зокрема при генеруванні псевдо-випадкових чисел: при зменшенні масштабу дисперсія нормального розподілу повинна зменшуватися, що призведе до зменшення «зернистості» (див. рис. 5).

Оскільки необхідно працювати з різними джерелами інформації, то необхідно розробити адекватні способи обробки інформації, наданої цими джерелами. Наприклад, отримані з супутника зображення можуть містити сніг, що призводить до виникнення яскравих ділянок, які не являються хмарами. Так як в основі методу отримання карти показників прозорості атмосфери з таких зображень лежить аналіз спектру відбитого випромінювання від поверхні землі та

хмар, то такі ділянки можуть сильно спотворювати загальну картину, особливо за наявності гір на поверхні землі [15].

Актуальним також залишається питання а як змінюється спектр випромінювання, що потрапляє на поверхню Землі долаючи різноманітні атмосферні явища? Величина генерованого сонячними панелями струму залежить від цього спектру [16]. Також існують моделі фото-елементів, які враховують вплив спектру на струм короткого замикання цих елементів [17].

ВИСНОВКИ

Запропонований алгоритм diamond-square дозволяє генерувати масиви для імітації зміни інтенсивності сонячного випромінювання довільного масштабу, беручи за основу інформацію з різних джерел. Це дозволяє створювати різноманітні імітаційні моделі СЕС [13, 14], які є близькими до реальних, за даними про зміну інтенсивності випромінювання під впливом атмосферних явищ.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI), <<http://aqicn.org/>>
- [2] Oil Club, Альтернативная энергетика в Китае (2019), <<http://club-oil.ru/>>
- [3] SULARU, Индия добавляет 100ГВт солнечной энергии в свою сеть (2018), <<https://www.sularu.com/theme/10366>>
- [4] Ліга.Tech, Энергия солнца 2019: кто и за сколько строит новые электростанции <<https://tech.liga.net/>>
- [5] Ehsanul Kabir , Pawan Kumar , Sandeep Kumar , Adedeji A. Adedolun , Ki-Hyun Kim., Solar energy: potential and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews (2018), Volume 82 Part 1, p894-900. doi: [10.1016/j.rser.2017.09.094](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094)
- [6] Fournier, D. Fussell, L. Carpenter, 1982. Computer Rendering of Stochastic Models, Graphics and Image Processing, Editor J. Foley. doi:[10.1145/358523.358553](https://doi.org/10.1145/358523.358553)
- [7] K. S. Osypenko; V. Ya. Zhuikov., The evaluation of fractal dimension and transfer function of the cloud, MikrosistElektronAkust (2017), Volume 22, №5, p13-19. <<http://elc.kpi.ua/article>>
- [8] Gerald M. Lohmann, A. Hammer, Adam H. Monahan, T. Schmidt , D. Heinemann., Simulating clear-sky index increment correlations under mixed sky conditions using a fractal cloud model, Solar Energy (2017) 150, p255-264. doi: [10.1016/j.solener.2017.04.048](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.048)
- [9] F. Kasten, G. Czeplak., Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud, Solar Energy (1980), Volume 24, Issue 2, p177-189. doi: [10.1016/0038-092X\(80\)90391-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(80)90391-6)
- [10] Met Office, 2018. How we measure cloud. <<https://www.metoffice.gov.uk/guide/weather/observations-guide/how-we-measure-cloud>>
- [11] Christopher J. Smith, Jamie M. Bright, R. Crook., Cloud cover effect of clear-sky index distributions and differences between human and automatic cloud observations, Solar Energy (2017) 144, p10-21. doi: [10.1016/j.solener.2016.12.055](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.055)
- [12] R. Perez, T. Cebecauer, M. Suri., Solar energy forecasting and resource assessment, Academic Press (2013), p21-48. ISBN 9780123971777
- [13] Куцаченко Р., Клен К. С., Імітаційне моделювання руху проєкцій хмар над площиною сонячної електростанції, Електронні системи та сигнали (2018), Том 23, №6, с37-42. <<http://elc.kpi.ua/article/view/153944/156799>>
- [14] Гарифулина М. Р., Власов А. И., Макаручук В. В., Адамович Н., Модель элемента солнечной батареи типа CIGS, Инженерный вестник (2012), с1-21. <https://iu4.ru/publ/2012_ing_vest_08_01.pdf>



- [15] T. Cebecauer, M. Suri, R. Perez., High performance MSG satellite model for operational solar energy applications, American Solar Energy Society National Solar Conference (2010). <<http://proceedings.ases.org/wp-content/uploads/2014/02/2010-086small.pdf>>
- [16] J. Day, S. Senthilarasu, T. K. Mallik., Improving spectral modifications for applications in solar cell, Renewable Energy (2019), Volume 132, p186-205. doi: [10.1016/j.renene.2018.07.101](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.101)
- [17] Jinqing Peng, Lin Lu, Meng Wang. A new model to evaluate solar spectrum impacts on the short circuit current of solar photovoltaic modules, Energy (2018), doi: 10.1016/j.energy.2018.12.003
- [18] Мандельброт Б., Фрактальная геометрия природы. Институт компьютерных исследований (2002). ISBN 5-93972-108-7

УДК 621.314

Имитационное моделирование облачного покрова с помощью алгоритма diamond-square

Сукач^f Р. В., ORCID [0000-0002-4562-2730](https://orcid.org/0000-0002-4562-2730)

e-mail majorissue@outlook.com

Клен^s Е. С., к.т.н., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

e-mail ekateryna.osypenko@gmail.com

Факультет электроники, кафедра промышленной электроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Реферат – В статье представлено способ имитации облачного покрова при моделировании работы фотоэлементов, солнечных панелей, или солнечных электростанций. Для создания имитационной модели облака предложено использовать модификацию алгоритма diamond-square, известного также как fractal cloud. Показано, что алгоритм позволяет справиться с проблемой получения достаточно детализированных для нужд моделирования изображений облаков с начальных данных низкого разрешения. Предложено способы для дальнейшего улучшения модели облачного покрова

Ключевые слова – фрактальная размерность облака, модуляция интенсивности излучения, увеличение разрешающей способности изображения облака, показатель прозрачности атмосферы, алгоритм diamond-square.



The simulation of cloud cover using the diamond-square algorithm

R. V. Sukach^f, ORCID [0000-0002-4562-2730](https://orcid.org/0000-0002-4562-2730)

e-mail majorissue@outlook.com

K. S. Klen^s, PhD, ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

e-mail ekateryna.osypenko@gmail.com

Faculty of electronics, Department of Industrial Electronics

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract — The method for simulation cloud cover of solar cells, solar panels or solar stations is presented. Modelling clear-sky index increments (i.e. changes in normalized surface irradiance over specified intervals of time) and their spatial autocorrelation structures is important for the reliable grid integration of photovoltaic power systems. In order to capture increment correlation structures under mixed sky conditions, I apply a fractal cloud model. Algorithm, based on method that Fournier proposed, was modified to generate fractal cloud for simulating surface horizontal irradiation variability. The modified algorithm allows us to get a "surface" of the fractal nature, which is a simulation model of the cloud. As the result, we have clouds represented as arrays of clear-sky indexes when algorithm done. Clear-sky index allows us to compute surface horizontal irradiance using only theoretical clear-sky global horizontal irradiation. Also it is shown, that the algorithm allows us to overcome the problem of obtaining sufficiently detailed for the needs of modeling cloud images of low-resolution source data. Parameters of the algorithm defined for the 10-step variant. As a random value was used an implementation of a normally distributed value with the step coefficient. The coefficient was choose to reduce the magnitude of the random value at each iteration. We used the Hurst exponent that is directly related to fractal dimension. As the sources of data we proposed both photos from satellite and cloud cover, recorded at meteorological stations as integer number of oktas, which is the number of eights of the sky obscured by clouds. The image obtained from a satellite was proceeded. For the analysis we need to get the clear sky surface global irradiation, that is the main problem of the algorithm. Aside from the solar-zenith angle, clear-sky irradiance is most influenced by aerosols, water vapor and ozone. Also we need to include ground elevation to get accurate value of clear sky irradiance. The resolution was increased 250 times, so we can use it for more detailed simulating. It thus helps to provide a variety of simulation model of solar power stations and even solar cells with information about surface horizontal irradiation variability. The ways for improvement of the simulation model of the cloud cover are proposed.

Keywords – cloud fractal dimension, solar irradiation modeling, cloud resolution improving, clear-sky index, diamond-square algorithm.

