

## УДК 528.94,654.165

Л. ПРИМАК

Кафедра геоінформатики та фотограмметрії, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, 03037, Україна, тел. +380508470357, ел. пошта: lidiya.plyska@gmail.com, orcid 0000-0003-0883-4803

## ДО ГІС-ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ВИСОТНОГО КЛАТЕРА РОСЛИННОСТІ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ПЛАНУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ LTE ТА 5G МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Вимоги до точності та деталізації геопросторових даних, використовуваних для планування 4G та 5G стільникових мереж, значно вищі, ніж до застосовуваних у плануванні 2G та 3G мереж. Рекомендована роздільна здатність цифрової моделі рельєфу, клатера та висотного клатера в плануванні 4G та 5G мереж даних становить 1–2 метра, що дає змогу відобразити найменші виступи будівель, висотні надбудови на дахах, окремі кусти чи дерева. **Мета** роботи полягає у розробленні технології створення висотного клатера в частині рослинності для цілей планування та оптимізації LTE та 5G мереж стільникового зв'язку із використанням геоінформаційної системи ArcGIS. **Методика** досліджень ґрунтується на використанні аерофотознімків як первинного джерела інформації про місцевість, проте може бути адаптована до використання LiDAR даних. Технологія передбачає попереднє оброблення геопросторових даних, растеризацію даних, обчислення відносних висот рослинності, фільтрацію даних та експорт даних у формат аналітично-програмної платформи для планування та оптимізації радіомереж Atoll. У **результаті** практичної реалізації запропонованої технології отримано висотний клатер рослинності високої детальності. **Наукова новизна та практична значущість.** Запропонована технологія побудови висотного клатера рослинності для цілей планування та оптимізації LTE та 5G стільникових мереж передбачає інтеграцію даних між такими сучасними програмними комплексами, як Inpho (Trimble), Digitals (ООО “Аналітика”), ArcGIS (ESRI), Atoll (Forsk). Для визначення висот об'єктів рослинності використовують растрові цифрові моделі рельєфу та поверхні, попередньо створені автоматичним методом у вигляді хмари точок за допомогою фотограмметричного комплексу Inpho. Оброблення та фільтрацію даних забезпечено функціями геоінформаційної системи ArcGIS. Для конвертації даних у ході роботи використано такі платформи для інтеграції даних, як FME та GlobalMapper.

*Ключові слова:* ЦМР; ЦМП; клатер; висотний клатер; рослинність; 5G; LTE.

### Вступ

Стрімкий розвиток мереж мобільного радіозв'язку п'ятого покоління (5G) у світі та постійне використання мереж LTE (4G) у повсякденному житті спонукають до удосконалення процесу планування та оптимізації цих мереж, котрий реалізований в програмно-аналітичних платформах на кшталт Atoll Forsk, ICS Telecom, Asset Aircomm та інших. Відомо, що мінімальним набором геопросторових даних, що є основою процесу радіопланування та оптимізації телекомунікаційних радіомереж, є растрові цифрова модель рельєфу, клатер території та висотний клатер (Примак, 2018). Нагадаємо терміни та поняття, використані далі в статті:

– *Цифрова модель рельєфу (ЦМР, digital terrain model, DTM; digital elevation model, DEM; Digital Terrain Elevation Data, DTED)* – цифрове подання рельєфу у вигляді множини тривимірних точок підстильної земної поверхні відкритих ділянок (*bare ground*),

що уможливує побудову функції визначення висоти в будь-якій точці із заданою точністю.

– *Цифрова модель поверхні (ЦМП, DSM)* – множина тривимірних моделей точок першої відбивної поверхні, виявлена датчиком, усіх штучних і природних об'єктів місцевості, яка може бути підстильною земною поверхнею відкритих ділянок (*bare ground*) або поверхнею будівель, споруд та рослинності.

– *Модель висот об'єктів (canopy height model, CHM)* – набір даних про відносні відмітки штучних (будівель, мостів тощо) та динамічних (рослинності, автомобілів тощо) перешкод.

– *Растрова модель даних (Карпінський, 2001).*  
Растр – це:

$$R = \langle M, P, r \rangle, \quad (1)$$

де  $M$  – матриця чисел,  $P$  – множина атрибутивних характеристик, наприклад, кольорів,  $r$  – роздільна здатність. Елемент матриці  $M$  – піксель вміщує атрибутивну характеристику із множини  $P$  та визначається

координатами  $(i, j)$ , де  $i$  – номер рядка у матриці  $M$ ,  $j$  – номер стовпчика.

– *Клатер (clutter)* – модель радіолокаційних перешкод у вигляді растра, де  $M$  та  $P$  являють собою відповідно значення та множину класів перешкод, що спричиняють втрату потужності радіосигналу. Термін “clutter” належить до сфери радіолокації та використовується як визначення для небажаних ехо-сигналів у електронних системах, особливо в радарних.

– *Висотний клатер (clutter height)* – модель висот об’єктів у вигляді растра, де  $M$  являє собою значення відносних висот перешкод. Може бути розрахована за формулою:

$$CHM = DSM - DEM. \quad (2)$$

Вимоги до точності та деталізації геопросторових даних, що використовують для планування 4G та 5G мереж, значно вищі, ніж до застосовуваних у плануванні 2G та 3G мереж. Так, звична роздільна здатність растрових геопросторових даних у плануванні 4G та 5G мереж становить 1–2 метра (Forsk, 2020), а в деяких програмно-аналітичних платформах вже роблять спроби реалізації півметрової роздільної здатності. Роздільна здатність один метр дає змогу відобразити найменші виступи будівель, висотні надбудови на дахах, окремих куцх чи дерево, що, своєю чергою, змушує використовувати аерофотознімки чи LiDAR дані як джерела для створення геопросторових даних з метою планування та оптимізації 4G та 5G телекомунікаційних систем.

Технології створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та клатера території вже достатньо вивчені та описані в літературі. Створювати ЦМР можна за допомогою звичайної векторизації із карт або стереозбирання зі стереопар космічних чи аерознімків. До побудови клатера місцевості вже залучено технології машинного навчання (Maxwell, 2018), контури будівель можна отримати із зображень місцевості за допомогою математичної морфології (Gavankar, Crosh, 2018) тощо.

Важливість точного подання висотного клатера підкреслено у працях (Jimoh, 2015) та (Chizhik, 2011). Роль детального відображення висот рослинності унаочнюється такими глобальними виробниками геопросторових даних для планування та оптимізації радіомереж, як LuxCarta (LuxCarta, 2019) та Visicom (Visicom, 2020).

Технологія отримання висотного клатера сьогодні переважно ґрунтується на ручному стереозбиранні висот перешкод (будівель, рослинності). Недоліком

цього методу є те, що всьому контуру перешкоди присвоюється одне середнє чи максимальне значення відносної висоти, незалежно від форми крони об’єкта рослинності. Інший метод висот об’єктів ґрунтується на автоматичному створенні моделі місцевості на основі стереопар космічних знімків із подальшим відніманням від неї ЦМР. Така методика отримання відносних висот об’єктів реалізована, наприклад, в геобазі даних Geoscape, Австралія (Geoscape, 2018). Проте, на нашу думку, висотний клатер, що є результатом застосування такого методу, потребує істотного ручного коригування з-за недостатньої роздільної здатності космічних знімків.

Сучасні фотограмметричні комплекси, такі як Inpho (Trimble), дають змогу на основі стереопар аерофотознімків одержати у вигляді хмари точок цифрову модель місцевості високої точності (Trimble, 2019), яка може слугувати джерелом відносних висот для створення третьої необхідної складової для планування 4G та 5G мобільних мереж – висотного клатера.

### Мета

Мета дослідження полягає у розробленні технології створення висотного клатера рослинності за наявної цифрової моделі рельєфу, контурів рослинності та хмари точок цифрової моделі місцевості із використанням геоінформаційної системи ArcGIS.

### Методика

Завданням дослідження є інтегрування експортованих векторних даних цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі поверхні та контурів перешкод у середовище геоінформаційної системи ArcGIS та їх опрацювання з метою створення висотного клатера для планування та оптимізації LTE і 5G радіомереж.

На рис. 1 подано структурну схему дослідження.

Для експерименту вибрано територію з різноманітною (лісною, очеретяною, прибудинковою, трав’яною) рослинністю – північну частину селища Морозівка Київської області (рис. 2). Орієнтовна площа вибраної території 0,5 кв. км.

Аерофотознімання виконано БПЛА в червні 2019 р. аерофотокамерою FC330. Орієнтування здійснено в місцевій системі координат Київської області UA\_UCS\_2000/LCS\_32 (ДСУ, 2017).

До оброблення цифрових зображень аерофотознімків залучено такі програмні комплекси, як Inpho (Trimble, USA) та Digitals (ТзОВ “Аналітика”, Україна).



Рис. 1. Технологічна схема створення висотного клатера

Fig. 1. The clutter height production technological scheme

Отже, вихідними даними для створення висотного клатера слугували:

1. Цифрова модель рельєфу. Отримана в автоматичному режимі для горбистої території із густиною точок 1 піксель засобами програмного забезпечення Match3DX (Inpho) та скоригована в стереорежимі за допомогою збирання структурних ліній.

2. Хмара точок цифрової моделі поверхні, де кожна точка місцевості має інформацію про її абсолютну відмітку (поле Elevation). Створена за допомогою програмного модуля Match-3DX (Inpho) із густиною точок 1 піксель. Приклад відображення одного тайла хмари точок, що належить об'єктам рослинності, наведено на рис. 3.

3. Векторні контури рослинності. Зібрані в програмному забезпеченні Digitals (ТзОВ "Аналітика", Україна).

Експорт вихідних даних у формат shapefile геоінформаційної системи ArcGIS виконано засобами

програмного забезпечення GlobalMapper, для хмари точок використано тайловий розподіл на файли розміром 100×100 м.

Попереднє оброблення даних у середовищі геоінформаційної системи ArcGIS передбачало:

- перепроєктування вихідних даних у систему координат, яку можуть сприйняти програмно-аналітичні платформи для планування та оптимізації радіомереж. В нашому випадку здійснено перепроєктування в систему координат UTM35 (WGS84);
- трансформацію ЦМР у растровий формат geotif;
- трансформацію ЦМП у растровий формат geotif.

Для ЦМР та векторних даних про рослинність перепроєктування у систему координат UTM35 (WGS84) виконано функцією BatchProject із використанням трансформації Ukraine\_2000\_to\_WGS1984. Конвертацію векторної ЦМР у растрову здійснено функціями Create TIN та TIN To Raster у додатку 3D Analyst (ArcGIS). Роздільна здатність отриманої ЦМР 1 м.

Хмара точок ЦМП являє собою блоки (файли) точок, автоматично створені програмним комплексом Inpho. Орієнтовний розмір одного блока 100×100 м. Кількість блоків у нашому випадку становила 66. Тому попереднє оброблення ЦМП полягало в пакетному обробленні даних засобами ModelBuilder, а саме:

- перепроєктування ЦМП у систему координат UTM35 (WGS84) функцією Project (рис. 4, a);
- сортування даних за зростанням абсолютних висот функцією Sort (рис 4, b);
- трансформування даних у растровий формат geotif функцією Feature To Raster (рис 4, c);
- об'єднання даних ЦМП в один растровий файл функцією Append.

Побудову висотного клатера за формулою (2) виконано із використанням функції Raster Calculator у межах контурів рослинності. Для видалення помилкових значень із висотного клатера значення висот, менші за 1 м, видалені за допомогою функції Extract by Attributes.

Фільтрацію помилкових значень на краях контурів рослинності виконано із застосуванням таких фільтрів, як Focal Statistics та Low Pass Filter, із попереднім зменшенням розміру пікселя вдвічі задля збереження точних контурів рослинності. Після фільтрації даних розмір пікселя було повернуто до 1 м.

Детально налаштування функцій та їх порядок наведено на рис. 5.

**Результати**

Загальний вигляд висотного клатера рослинності, створеного за запропонованою технологією у межах експериментальної ділянки, наведено на рис. 6. Деякі приклади збільшеного відображення висотного клатера подано в таблиці.

Висотний клатер із формату tif було експортовано в формат grd, що використовується в програмно-аналітичній платформі для планування та оптимізації радіомереж Atoll. Для експортування використано платформу для інтеграції даних FME.



Рис. 2. Межі території дослідження  
 Fig. 2. An experimental area in Kyiv region



Рис. 3. Приклад 3D зображення тайла хмари точок  
 Fig. 3. 3D view of obstacles point cloud

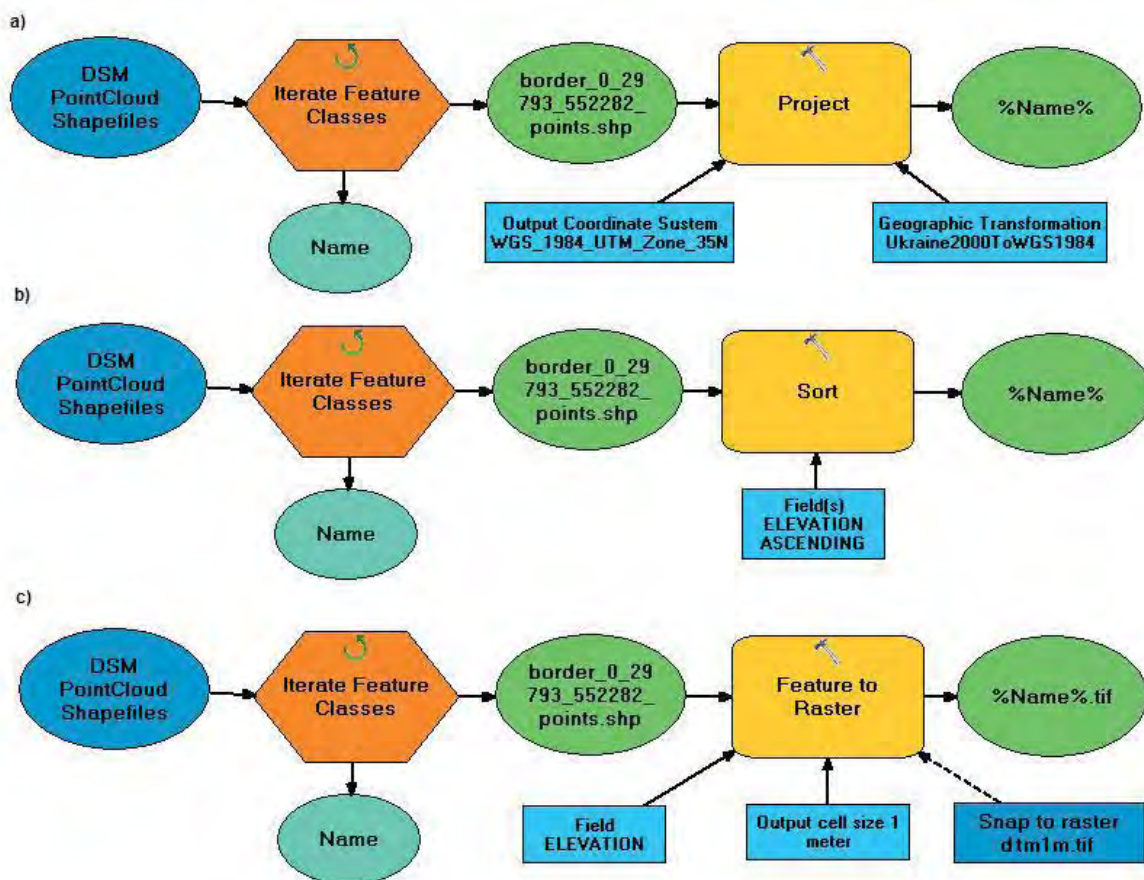


Рис. 4. Моделі попереднього оброблення даних a – перепроєктування; b – сортування; c – растрезації  
 Fig. 4. ArcGIS geoprocessing models for DSM pre-processing: a – reprojecting; b – sorting; c – rasterization

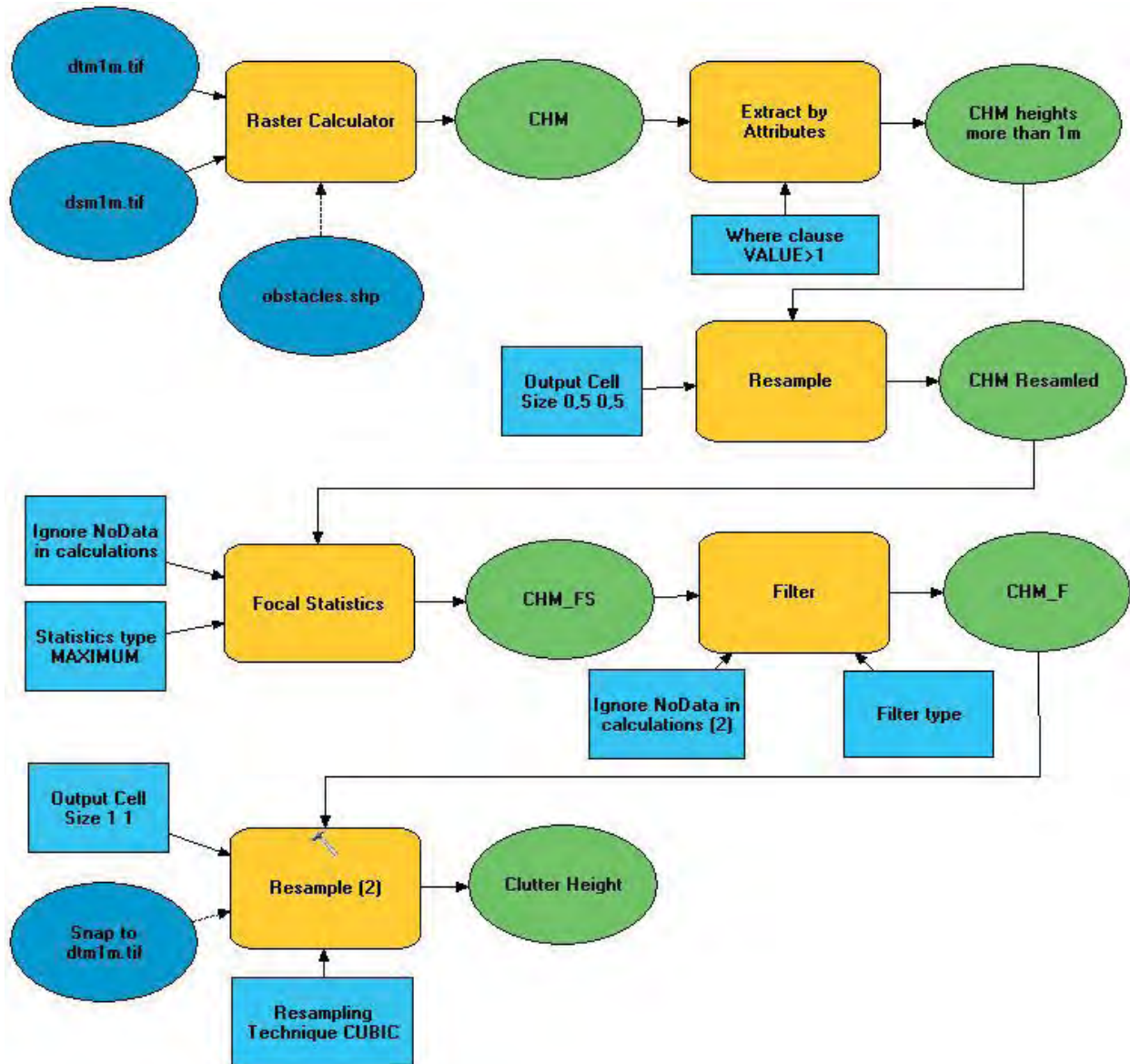


Рис. 5. Моделі побудови та фільтрації висотного кластера рослинності

Fig. 5. ArcGIS geoprocessing model for clutter height calculation and filtering

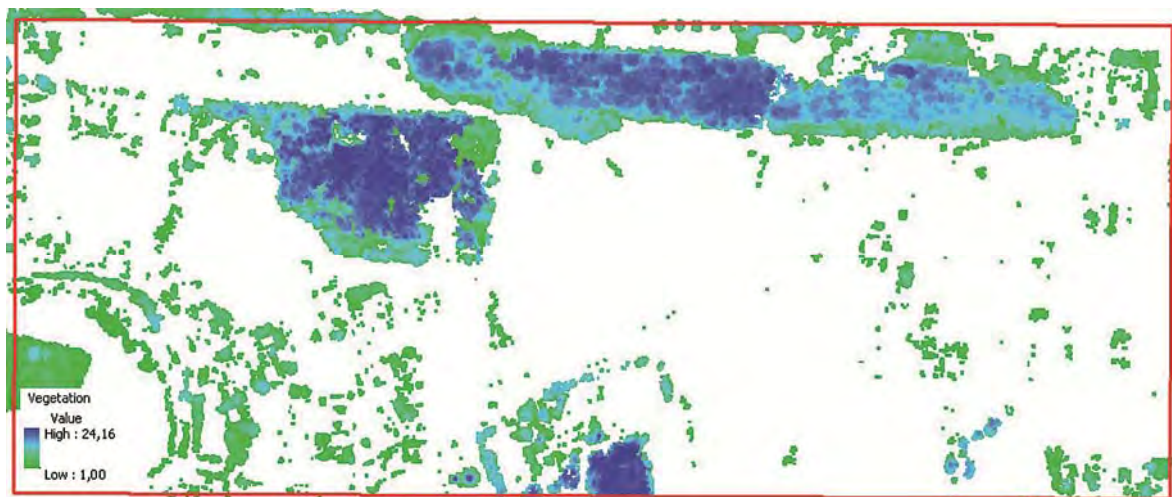
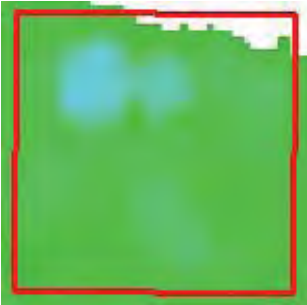

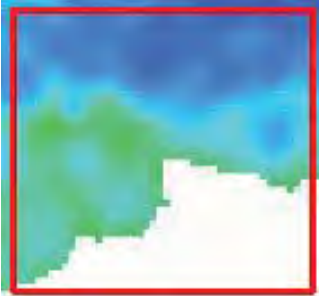

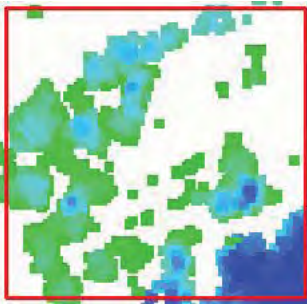







Рис. 6. Загальний вигляд висотного кластера рослинності

Fig. 6. Vegetation clutter height general view

Приклади збільшеного відображення висотного клатера рослинності

Vegetation clutter height examples

Тип рослинності	Висотний клатер	Зображення
Лісиста низько-висотна		
Лісиста висока		
Розріджена різновисотна		
Прибудинкова		
Очеретяна		

### Висновки

Запропонована технологія побудови висотного клатера рослинності з метою планування та оптимізації LTE та 5G мереж ґрунтується на використанні аерофотознімків території, проте її можна адаптувати до залучення LiDAR даних як вихідних даних про місцевість.

Технологія передбачає інтеграцію таких програмних комплексів, як Inpho (Trimble), Digitals (ООО “Аналітика”), ArcGIS (ESRI), Atoll (Forsk). Для визначення висот об’єктів рослинності використовують цифрові моделі рельєфу та поверхні, створені автоматичним методом за допомогою фотограмметричного комплексу Inpho. Оброблення та фільтрацію даних забезпечено функціями геоінформаційної системи ArcGIS. Для конвертації даних у ході роботи використано такі платформи для інтеграції даних, як FME та GlobalMapper.

Застосовуючи запропоновану технологію побудови висотного клатера, вдалося значно підвищити висотну деталізацію рослинності. Проте у разі залучення аерофотознімків як джерела інформації про місцевість варто звертати увагу на дату проведення аерофотознімання для територій із листяною рослинністю. Крони листяних дерев є перешкодами для передавання радіосигналів, їх можна вилучити з обчислень, якщо аерофотознімання виконано після того, як опаде листя з дерев.

Побудований за запропонованою технологією висотний клатер було успішно завантажено в програмно-аналітичну платформу для планування та оптимізації радіомереж Atoll.

Поза темою телекомунікаційних систем використаний у роботі метод визначення висоти рослинності може бути корисний у таксації ростучих деревних насаджень чи в проєктуванні закладання кругових пробних площ під час інвентаризації лісів тощо.

### Література

- Chizhik D. (2011). Clutter height variation and its effect on frequency dependence of radio path loss. 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 3444–3447.
- Gavankar, Nitin & Ghosh, Sanjay (2018). Automatic building footprint extraction from high-resolution satellite image using mathematical morphology. *European Journal of Remote Sensing*, 51, pp. 182–193. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1416676>.
- International Telecommunication Union/ (2012) Radiocommunication Sector of ITU. Recommendation ITU-R P.1411-6 (02/2012) Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radiolocal area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. P Series. Radiowave propagation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-6-201202-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-6-201202-S!!PDF-E.pdf).
- Jimoh A. A. & Surajudeen-Bakinde, Nazmat & Faruk, Nasir & Bello, Olayiwola & Ayeni, Adeseko (2015). Clutter Height Variation Effects on Frequency Dependent Path Loss Models at UHF Bands in Build-Up Areas. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 4, pp. 138–147. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.4314/star.v4i4.21>.
- LuxCarta. (2019). 5g mmWave signal propagation with and without trees. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=V90QiG4u2cQ>
- Maxwell, Aaron & Warner, Timothy & Fang, Fang. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*. 39. 2784-2817. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>.
- Trimble (2019) Match-3DX / Match-T DSM Reference Manual for Version 9.2 and higher.
- Visicom (2020), The role of 3d trees model in 5g radio prediction. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://medium.com/@visicom3d/the-role-of-3d-trees-model-in-5g-radio-prediction-e5f2e0d23>
- Wallace A. (2017 April 12). How many buildings are in Australia? Geoscape is counting. *Position Magazine*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.spatialsource.com.au/gis-data/many-buildings-australia-geoscape-counting>.
- Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру (2017). Паспорт місцевої системи координат Київської області UA\_UCS\_2000/LCS\_32. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://dgm.gki.com.ua/files/uploads/documents/Kyivska\\_20170301.pdf](https://dgm.gki.com.ua/files/uploads/documents/Kyivska_20170301.pdf)
- Карпінський Ю., Грачов О. (2001). Трансформування растрових моделей цифрових карт і планів. *Вісник геодезії та картографії*, № 3, С. 65–73.
- Примак Л. (2018). Основні вимоги до складу топографічного забезпечення для радіочастотного планування телекомунікаційних систем. *Інженерна геодезія: наук.-техн. збірник*, № 65, С. 158–168.

L. PRYMAK

Department of geoinformatics and photogrammetry, Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv, 03037, Ukraine, Phone: +380508470357, E-mail: Lidiya.plyska@gmail.com; orcid /0000-0003-0883-4803

ON THE ISSUE OF GIS TECHNOLOGY TO PRODUCE  
AN ACCURATE VEGETATION CLUTTER HEIGHT FOR THE PURPOSES  
OF LTE AND 5G RADIO NETWORK PLANNING AND OPTIMIZATION

The geospatial data accuracy and specification requirements for LTE and 5G radio planning and optimization are much higher than those used in propagation 2G and 3G networks. The recommended geospatial data resolution of 1–2 meters allows the accurate display of the tree's canopy. The **aim** of the study is to develop a technology of an accurate vegetation clutter height production for the purposes of LTE and 5G radio network propagation and optimization. The research **methodology** is based on aerial images but may be adapted to use LiDAR data. The proposed technology includes geospatial data pre-processing, data rasterization, clutter height calculation, data filtering and export the data to the format of multi-technology wireless network design and optimization application Atoll. The **result** of practical implementation of the offered technology is an accurate vegetation clutter height. **Scientific novelty and practical significance.** The technology includes data integration between the softwares Inpho (Trimble), Digitals (Analitika Ltd), ArcGIS (ESRI) and – Atoll (Forsk). The vegetation heights were calculated by differences between DSM and DEM which were automatically built as point clouds using Inpho software. Data processing and filtering was done with ArcGIS functions in ModelBuilder application. For data conversion FME and GlobalMapper were used.

*Key words:* DTM; DEM; DSM; CHM; clutter; clutter height; vegetation; 5G; LTE.

**References**

- Chizhik D. (2011). Clutter height variation and its effect on frequency dependence of radio path loss. 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 3444–3447.
- Gavankar, Nitin & Ghosh, Sanjay. (2018). Automatic building footprint extraction from high-resolution satellite image using mathematical morphology. *European Journal of Remote Sensing*, 51, pp. 182–193. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1416676>.
- International Telecommunication Union/ (2012) Radiocommunication Sector of ITU. Recommendation ITU-R P. 1411-6 (02/2012) Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. P Series. *Radiowave propagation*. Retrieved from: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-6-201202-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-6-201202-S!!PDF-E.pdf).
- Jimoh A. A. & Surajudeen-Bakinde, Nazmat & Faruk, Nasir & Bello, Olayiwola & Ayeni, Adeseko. (2015). Clutter Height Variation Effects on Frequency Dependent Path Loss Models at UHF Bands in Build-Up Areas. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 4, pp. 138–147. Retrieved from: <https://doi.org/10.4314/star.v4i4.21>.
- Karpinskyi Yu. & Hrachov O. (2001). Transformuvannya rastrovnykh modelei tsyfrovnykh kart i planiv. *Visnyk heodezii ta kartohrafii*, 3, pp. 65–73 [in Ukrainian].
- LuxCarta. (2019) 5g mmWave signal propagation with and without trees. Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=V90QiG4u2cQ>
- Maxwell, Aaron & Warner, Timothy & Fang, Fang. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39, pp. 2784–2817. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>.
- Prymak L. (2018). Osnovni vymohy do skladu topografichnoho zabezpechennia dlia radiochastotnoho planuvannia telekomunikatsiynykh system. *Engineering Geodesy: Scientific and technical collection*, 65, pp. 158–168 [in Ukrainian].
- The State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre (2017). Pasport mistsevoi systemy koordynat Kyivskoi oblasti UA\_UCS\_2000/LCS\_32. Retrieved from: [https://dgm.gki.com.ua/files/uploads/documents/Kyivska\\_20170301.pdf](https://dgm.gki.com.ua/files/uploads/documents/Kyivska_20170301.pdf) [in Ukrainian].
- Trimble (2019). Match-3DX / Match-T DSM Reference Manual for Version 9.2 and higher.
- Visicom (2020). The role of 3d trees model in 5g radio prediction. Retrieved from: <https://medium.com/@visicom3d/the-role-of-3d-trees-model-in-5g-radio-prediction-e5f2ebea0d23>
- Wallace A. (2017 April 12). How many buildings are in Australia? Geoscape is counting. *Position Magazine*. Retrieved from: <https://www.spatialsource.com.au/gis-data/many-buildings-australia-geoscape-counting>.