

АНОТАЦІЯ

Примак Л. В. Геоінформаційне забезпечення радіочастотного планування телекомунікаційних стільникових систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 19 – «Архітектура і будівництво», за спеціальністю 193 – «Геодезія та землеустрій». – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної задачі підвищення достовірності та точності радіочастотного планування телекомунікаційних стільникових систем (РПТСС) на основі використання геоінформаційних моделей місцевості та методів геоінформаційного аналізу.

Сучасний стан розвитку стільникових телекомунікаційних систем зв'язку характеризується використанням мереж третього покоління (3G), а також тенденцією переходу до мереж четвертого (4G) та п'ятого поколінь (5G). Це знайшло своє відображення в Розпорядженні Кабінету Міністрів України від 11 листопада 2020 р. № 1409-р. «Про затвердження плану заходів щодо впровадження в Україні системи рухомого (мобільного) зв'язку п'ятого покоління».

Процес радіочастотного планування телекомунікаційних стільникових систем зв'язку базується на побудові емпірично-математичної моделі розповсюдження радіохвиль. Моделі, в основі розрахунку яких лежать геопросторові дані, є картографічними детермінованими моделями й використовуються для зовнішнього (за межами приміщень будівель) планування мереж стільникового зв'язку.

Стрімкий розвиток 4G та 5G стільникових телекомунікаційних систем супроводжується значним підвищенням вимог до геопросторових даних, що використовуються при плануванні мереж, зокрема підвищення точності,

збільшення просторового розрізнення та геометричних характеристик об'єктів, та їх математичних моделей, що в свою чергу вимагає відповідного розвитку геоінформаційного забезпечення технологічного процесу радіочастотного планування.

Нормативно-правове регулювання вимог до створення, оновлення та зберігання геопросторових даних в Україні є на етапі становлення: прийнято Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», розпочато процес впровадження нових стандартів до геопросторових даних, що базуються на міжнародних стандартах серій ISO та Open Geospatial Consortium. Окрім цього діють й застарілі з точки зору цифрової картографії вимоги, такі як класифікатори інформації, яка відображається на топографічних картах та планах. Аналіз діючих нормативно-регулятивних документів показав, що вони не враховують специфіки радіочастотного планування в частині представлення висоти об'єктів перешкод. Тому автором на концептуальному рівні в нотаціях уніфікованої мови моделювання UML на основі СОУ 71.12-37-949:2014 «База топографічних даних. Каталог об'єктів і атрибутів» розроблено модель бази даних для забезпечення радіочастотного планування стільникових телекомунікаційних систем, об'єктно-орієнтовану базу даних про об'єкти місцевості та електронний каталог векторних геопросторових об'єктів. Для кожного типу об'єктів запропоновано тип просторової локалізації, набір атрибутів та додаткові топологічні обмеження. Запропонована концептуальна модель бази даних забезпечує уніфікацію вихідних даних для радіочастотного планування телекомунікаційних стільникових систем третього, четвертого та п'ятого поколінь.

Для реалізації математичних моделей та технологічних схем перетворення векторних геопросторових даних в тематичний набір геопросторових даних для РПТСС обрано геоінформаційну систему ArcGIS завдяки розширеному функціоналу пакетної обробки даних та можливості побудови моделей за допомогою додатку ModelBuilder. В роботі подано схеми

моделей для додатку ModelBuilder для створення клатера, висотного клатера та 3D-об'єктів перешкод на основі векторних геопросторових даних.

Для дослідження впливу точності геопросторових даних на процес радіочастотного планування стільникових телекомунікаційних систем важливою задачею було порівняти значення потужності радіосигналу, розраховані на основі геопросторових даних, що досліджуються, з тими, що розраховані на основі більш точних геопросторових даних: топографічних карт 1:2 000 та точніше, чи LiDAR даних. З цією метою було проаналізовано існуючі можливості статистичного аналізу растрових моделей даних, що реалізовані в сучасних геоінформарційних системах та програмно-аналітичних платформах для радіочастотного планування? та виявлено, що існуючі математичні алгоритми під час розрахунку абсолютних похибок обмежують поле розрахунку до мінімального обмежувального прямокутника, що описує першу з заданих моделей для порівняння. Тому автором було запропоновано модель оцінки точності обчислення значень втрат амплітуди й потужності радіосигналу з використанням GRID-моделі просторового розподілу характеристик радіосигналу на основі вибірки великої розмірності, яка полягає в взаємному розширенні матриць, що порівнюються, до однакової розмірності з врахуванням порогового значення втрати амплітуди та потужності радіосигналу. Запропонована модель статистичної оцінки підвищує її достовірність у порівнянні з традиційними «табличними» методами вибірки малої розмірності та уточнює аналіз даних, доступний в аналітично програмних платформах; а також може бути використана для неперервних географічних полів різного природного походження, зокрема, потужності сигналу, рельєфу, температури тощо.

Великий обсяг картографічної інформації у відкритому онлайн-доступі заохочує її використання у різних галузях економіки, в тому числі і для телекомунікаційних технологій. Автором проведено аналіз глобальних джерел геопросторових даних на предмет можливості їх використання в радіочастотному плануванні стільникових телекомунікаційних систем та

виконано дослідження щодо залучення в процес планування матриць цифрових моделей місцевості, а саме SRTM v. 3.0 (НАСА, радіолокаційні топографічні дані про висоти земної поверхні), Aster GDEM2 (METI, НАСА, стереотопографічні дані про рельєф земної поверхні на основі космічних знімків Aster) та AW3D v. 2.2 (EORC, JAXA, на основі стереопар супутникових знімків ALOS). Автором обґрунтовано, що використання AW3D v. 2.2 та SRTM v.3 при РПТСС без додаткової обробки на стрімких нахилах місцевості та забудованих територіях є на границі точності 6-7 дБ. Залучення ж даних Aster GDEM2 призводить до виходу розрахунків при РПТСС за межу точності 6-7 дБ.

Технологія LiDAR та сучасні фотограмметричні комплекси дають змогу отримати цифрову модель місцевості високої детальності у вигляді хмари точок, яка в свою чергу може слугувати джерелом інформації про висоти об'єктів-перешкод для створення висотного клатера. Автором запропоновано технологічну схему та практично реалізовано технологію побудови висотного клатера на основі хмари точок цифрової моделі місцевості, створеної на основі матеріалів аерофотознімання території частини міста Львова.

Критеріями тематичного набору геопросторових даних, котрі впливають на точність РПТСС, автором виділено просторове розрізнення, точість представлення висот об'єктів-перешкод та детальність їх геометричного контуру. Для дослідження впливу вказаних чинників розроблено методи генералізації геопросторових даних засобами геоінформаційної системи ArcGIS, проведено розрахунки потужності вхідного сигналу та їх порівняння з польовими вимірами та розрахунками на основі еталонного тематичного набору геопросторових даних. Автором обґрунтовано, що найкращу відповідність за точністю польовим вимірам та еталонному набору геопросторових даних показав метод моделювання об'єктів-перешкод, в якому детальність геометричного контуру перешкоди 1 м, а висота об'єктів-будівель визначена як середнє значення відміток даху.

Ключові слова: геоінформаційні системи, радіопланування, клатер, висотний клатер, потужність радіосигналу.

ABSTRACT

L. V. Prymak. Geoinformation support of radio frequency propagation of cellular communication network. – Qualifying scientific manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of the Doctor of Philosophy in Knowledge 19 – “Architecture and Construction”, according to specialty 193 – “Geodesy and Land Management”. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv. – Kyiv National University of Construction and Architecture, MES Ukraine, Kyiv, 2021

The thesis deals with the task of solving the scientific and applied problem of increasing the efficiency of radio frequency planning of telecommunication cellular networks (RFP) based on the use of geoinformation models and methods.

The current state of development of cellular telecommunication systems is characterized by the use of third generation (3G) networks, as well as the trend towards the transition to fourth (4G) and fifth generation (5G) networks. This was reflected in the Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of November 11, 2020 № 1409 on the Action Plan for the implementation of the fifth generation mobile communication system in Ukraine.

The process of radio frequency planning of telecommunication cellular networks is based on the construction of an empirical and mathematical model of radio wave propagation. Models based on geospatial data are map based determined models and are used for outdoor planning of cellular networks.

The rapid development of 4G and 5G cellular telecommunications systems is accompanied by a significant increase of the requirements for geospatial data used in network planning, including increasing accuracy, increasing spatial resolution and detail geometry, improving the data structure and formation of new mathematical

models, which in turn requires appropriate development of geoinformation support of radio frequency planning.

Regulation requirements for the creation, updating and storage of geospatial data in Ukraine is on the way of its establishment: the Law of Ukraine on National Geospatial Data Infrastructure was adopted, the process of implementing new standards for geospatial data based on international standards ISO and Open Geospatial Consortium is started. In addition, there are outdated requirements in terms of digital cartography, such as classifiers of information displayed on topographic maps and plans. The analysis of the current normative-regulatory documents showed that they do not consider the specifics of radio frequency planning in terms of representing the height of obstacle objects. Therefore, the author at the conceptual level in the notations of the unified modelling language UML based on SOU 71.12-37-949: 2014 "Topographic database. Catalogue of Objects and Attributes" developed a database model to provide radio frequency planning of cellular telecommunications systems, object-oriented database and an electronic catalogue of vector geospatial objects. For each type of objects in the catalogue, the author proposes a type of spatial localization, a set of attributes and additional topological constraints that affect the further construction of a thematic set of geospatial data to ensure radio frequency planning of telecommunications cellular systems. The proposed conceptual model of the database provides unification of the source data for radio frequency planning of telecommunication cellular systems of the third, fourth and fifth generations.

To implement mathematical models and technological schemes for converting vector geospatial data into a thematic set of geospatial data for RFP the geographic information system ArcGIS was selected due to the advanced functionality of batch data processing and the ability to build models using the application ModelBuilder. The thesis presents model diagrams for the ModelBuilder application for creating a digital model of terrain, clutter, clutter height and 3D-objects of obstacles based on vector geospatial data.

To study the impact of the cartographic components on the process of radio frequency planning of cellular telecommunications systems, an important task was to determine the accuracy of network planning, which is based on the geospatial data under study, compared to more accurate geospatial data based on topographic maps scale of 1:2000 and better or LiDAR data. So the existing possibilities of statistical analysis of raster data models implemented in modern geoinformation systems and software-analytical platforms for radio frequency planning were analysed. In the course of the research it was found that the existing mathematical algorithms limit the standard deviation calculation to the minimum boundary rectangle (MBR) describing the first of the given models. In this case, the area from the second model, which is outside the MBR, does not participate in the calculation of the standard deviation. Therefore, the author proposed a model for estimating the accuracy of calculating the values of passloss and signal level using GRID-model of spatial distribution of radio characteristics based on a mutual expansion of comparable matrices to the same dimension taking into account the threshold value. The proposed model of statistical estimation increases its reliability in comparison with traditional "tabular" methods and refines the data analysis available in analytical software platforms. It can also be used for any continuous raster data models such as relief, temperature etc.

The large amount of cartographic information in open access encourages its use in various sectors of the economy. Telecommunication technologies are not an exception. The author analysed the global sources of geospatial data for the possibility of their use in radio frequency planning of cellular telecommunications systems and performed research on the involvement in the planning process of matrices of digital terrain models SRTM v. 3.0 (NASA, radar topographic data), Aster GDEM2 (METI, NASA, stereo topographic data based on Aster imagery) and AW3D v. 2.2 (EORC, JAXA, based on stereo pairs of ALOS imagery). The author substantiated that the use of AW3D v. 2.2 and SRTM v.3 in RFP without additional processing on steep slopes and built-up areas are at the limit of accuracy

of 6-7 dB. Involvement of the same data Aster GDEM2 leads to calculations in RFP beyond the accuracy of 6-7 dB.

LiDAR technology and modern photogrammetric systems make it possible to obtain a high-detail digital terrain model in the form of a point cloud, which in turn can serve as a source of information about the heights of obstacles to create a clutter height. The author proposed a technological model and practically implemented the technology of building a detail clutter height based on the point cloud based on Lviv aerial photography materials.

As criteria for the thematic set of geospatial data that affect the accuracy of RFP, the author highlighted the resolution, the method of representing the heights of obstacles and the detail of their geometry. To study the influence of these factors, methods of geospatial data generalization for ArcGIS were developed, pass loss calculations were compared with the field measurements and calculations based on the reference thematic set of geospatial data. The author substantiated that the method of modelling obstacle objects, in which the detail of the obstacle geometry is 1 m and the height of building objects is defined as the average value of roof marks, showed the best correspondence to field measurements and the reference set of geospatial data.

Keywords: geographic information systems, radio planning, clutter, clutter height, pass loss, signal level.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

1. Примак Л.В. Основні вимоги до складу топографічного забезпечення для радіочастотного планування телекомунікаційних систем. *Науково-технічний збірник «Інженерна геодезія»*. 2018. №65. С. 158 – 168.
2. Примак Л.В. Використання відкритих даних про рельєф місцевості в плануванні та оптимізації радіочастотних телекомунікаційних мереж.

Науково-технічний збірник «Інженерна геодезія». 2019. №66. С. 95-104.
DOI: <https://doi.org/10.32347/0130-6014.2019.66.95-104>.

3. Карпінський Ю.О., Примак Л.В. Розрахунок точності растрових даних про втрати амплітуди радіосигналу засобами геоматики. *Збірник наукових праць «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*. 2020. №1 (39). С. 96-102. DOI: www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-39-16.

Здобувачем запропоновано методику оцінки точності та виконано автоматизацію процесу розрахунку точності растрових даних про втрати амплітуди радіосигналу на основі вибірки великої розмірності засобами геоінформаційної системи ArcGIS.

4. Примак Л.В. До ГІС-технології створення висотного клатера рослинності для цілей планування та оптимізації LTE та 5G мереж стільникового зв'язку. *Збірник наукових праць «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, 2020. №2 (40). С. 78-85. DOI: www.doi.org/10.33841/1819-1339-2020-2-40-78-85.

5. Prymak L. Geoinformation modeling as a fundamental method of cognition. AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research. Volume 11. Issue 1. Special Issue XV. 2021. p. 122-125. URL: http://www.magnanimitas.cz/ADALTA/110115/papers/D_06.pdf

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Примак Л. Дослідження функціоналу GBDX платформи для створення клатерних моделей території. *Геопростір-2017: матеріали міжнародної наук.-техн. конф.*, 4-6 грудня 2017, м. Київ. КНУБА. 2018. С. 88-89.

7. Примак Л.В. Використання відкритих даних про рельєф місцевості в плануванні та оптимізації радіочастотних телекомунікаційних мереж. *Матеріали 25-ї міжнародної науковотехнічної конференції «Геофорум-2020»*, 2020. С.14-16.

Наукові праці, які додатково відображають результати дисертаційного дослідження:

8. Баран П.І., Мінкевич Н.А., Олексій І.І., Примаєв Л.В., Примаєв О.В., Сулима О.В., Сушко В.Г. Про використання космічних знімків для кадастру земель та великомасштабного картографування. *Вісник геодезії та картографії*. 2006. №6. с.31-37.

Здобувачем досліджено точність контурної частини ортофотопланів у масштабі 1:2000, створених для забудованої території.

9. Баран П.І., Олексій І.І., Плиська Л.В., Примаєв О.В. Досвід використання цифрових технологій великомасштабного картографування у ДНВП «Укрінжгеодезія». *Вісник геодезії та картографії*. 2005. №4. С.11-16

Здобувачем подано технологію створення геопросторових даних на основі аерофотознімання з GPS-координуванням центрів аерофотознімання.

10. Баран П.І., Олексій І.І., Примаєв О.В., Плиська Л.В., Пурик Т.І. Досвід ДНВП «Укрінжгеодезія» в створенні цифрових планів для ГІС-користувачів. *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, Серия «География»*. 2006. Том 19 (58). №1. С.14-17.

Здобувачем подано структуру цифрових планів згідно з Класифікатором інформації, яка відображається на топографічних планах 1:5000? 1:2000, 1:1000, 1:500 та вказано на її недоліки.