

ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ КОРИСТУВАЧА В МЕРЕЖІ 5G НА БАЗІ КОМПЛЕКСНИХ СПЛАЙН-ФУНКЦІЙ

DOI 10.36994 / 2788-5518-2022-01-03-04

Стрелковська І.В., д.т.н., проф. Міжнародний гуманітарний університет, Одеса, Україна.
i.strelkovskaya@mgu.edu.ua

Соловська І.М., к.т.н., доц. Міжнародний гуманітарний університет, Одеса, Україна.
i.solovskaya@mgu.edu.ua

Стрелковська Ю.О., к.ю.н., доц. Національний університет «Одеська юридична академія», Одеса, Україна. 4800632s@gmail.com

Анотація: Розглянуто основні положення позиціонування користувачів в мережі 5G в умовах високої концентрації користувачів та складностей при поширенні радіосигналів. Запропоновано використання комплексних плоских сплайн-функцій для визначення місцезнаходження користувача на основі метода Fingerprinting. Наведено приклад побудови комплексних плоских лінійних сплайнів. Встановлено, що використання комплексних сплайн-функцій дозволяє підвищити точність місцезнаходження користувача.

Ключові слова: позиціонування, місцезнаходження, мережа 5G, локальне позиціонування LBS, мережа Wi-Fi, метод Fingerprinting, комплексний плоский сплайн, лінійний сплайн, похибка.

5G NETWORK USER'S POSITIONING BASED ON COMPLEX SPLINE-FUNCTIONS

Irina Strelkovskaya, Dr. habil., Prof. International Humanitarian University, Odesa, Ukraine.
i.strelkovskaya@mgu.edu.ua

Irina Solovskaya, Ph.D., Ass. Prof. International Humanitarian University, Odesa, Ukraine.
i.solovskaya@mgu.edu.ua

Julia Strelkovska, Ph.D., Ass. Prof. National University «Odesa Law Academy», Odesa, Ukraine.
4800632s@gmail.com

Abstract: The basic considerations for user positioning in a 5G network under conditions of high user concentration and radio signal transmission difficulties are reviewed. It is found that modern services and applications, which provide many areas of user activity (search services, photo and video geolocation, logistics, crowdsourcing), are based on the current user location and require new approaches and positioning methods that will increase positioning accuracy. The main provisions of the 3GPP TS 22.261 specification for user positioning in a 5G network are reviewed, which are shaped as requirements for positioning accuracy, positioning service availability and basic positioning scenarios. It is found that the positioning of a user on a 5G network requires in-plane positioning, with vertical and horizontal coordinates and increased accuracy. In order to meet the above requirements, the Fingerprinting positioning method is proposed, which is based on measured RSSI signal strength values when determining the distance between the user and the signal transmitter, and uses the k-nearest-neighbour method for positioning. It is offered to use complex plane spline functions for user positioning on the basis of Fingerprinting method. The use of complex planar splines in Fingerprinting significantly reduces the computational complexity of positioning, thereby reducing positioning time and significantly increasing the accuracy of user positioning. An example of the construction of complex plane linear splines is given. The construction of a linear complex spline for given RSSI signal power values is shown. It is established that the use of complex spline functions can improve the accuracy of user location. It is shown that the use of the proposed Fingerprinting method based on complex planar splines provides improved user indoor positioning accuracy, enabling the provision of LBS-oriented services.

Key words: positioning, location, 5G network, LBS local positioning, Wi-Fi network, Fingerprinting method, complex plane spline, linear spline, error.

Вступ

Розвиток мереж радіодоступу сьогодні знаходиться на етапі еволюційного переходу до мереж п'ятого покоління 5G (Generation), що зумовлює використання користувачами нових сервісів і додатків, які базуються на місцезнаходженні користувача LBS (Location-based Services), таких як: локальний пошук, визначення найближчих точок інфраструктури, геолокація фотографій, відео, таргетована реклама за місцем розташування. З іншого боку, такі сервіси й додатки притаманні мережам 5G, досить критичні до точності місцезнаходження користувача та регламентуються специфікаціями 3GPP TS 22.261 [2] та 3GPP TS 22.872 [3].

Відповідно до специфікації 3GPP TS 22.261 [2] при визначенні місцезнаходження користувача використовується сім рівнів сервісу позиціонування, які визначають показники точності місцезнаходження користувача, доступності сервісу та час затримки позиціонування. Вимоги до позиціонування 3GPP TS 22.261 визначають необхідність використання як

відносних координат місцезнаходження при відображенні на карті, так і абсолютних (наближених) координат в разі позиціонування, наприклад, для безпілотних літальних апаратів.

В цьому випадку для позиціонування у відносних координатах використовується система глобального позиціонування GPS (Global Positioning System), а для позиціонування у абсолютних наближених координатах локального позиціонування LBS. Наступною вимогою до позиціонування в мережах 5G є перехід від знаходження координат користувача на площині в мережах 3G-4G до позиціонування у просторі для мереж 5G [2]. Основні вимоги до визначення місцезнаходження в мережах 5G наведено в табл. 1.

Таблиця 1.
Вимоги до позиціонування в мережі 5G (3GPP TS 22.261)

Рівень сервісу	Абсолютне (A) Відносне (B) позиціонування	Точність позиціонування, м		Доступність сервісу, %	Час затримки позиціонування, с
		Горизон- тальна	Верти- кальна		
1	A	10	3	95	1
2	A	3	3	99	1
3	A	1	2	99	1
4	A	1	2	99,9	0,015
5	A	0,3	2	99	1
6	A	0,3	2	99,9	0,010
7	B	0,2	0,2	99	1

Згідно табл. 1 та специфікації 3GPP TS 22.261, у відповідність до кожного рівня сервісу встановлені сценарії використання зони позиціонування (Indoor та Outdoor) та зони з підвищеною точністю. Причому, для 1 рівня сервісу встановлений сценарій позиціонування в приміщенні Indoor, для 2 та 3 рівня сервісів позиціонування – сценарій позиціонування зовні приміщень Outdoor для щільної міської забудови та приміських територій, 4 рівень сервісу позиціонування – тільки для зони з підвищеною точністю в приміщенні Indoor. Рівні 5-7 сервісу позиціонування використовують різні комбінації сценаріїв використання. Такий підхід до визначення місцезнаходження користувача потребує перегляду існуючих методів позиціонування та пошуку математичних методів, альтернативних до відомих раніше, які дозволять визначити координати місцезнаходження користувача у просторі з заданою точністю. При цьому значно спрощується процес визначення місцезнаходження та одночасно надаються нові способи розв'язання задач позиціонування.

Таким інструментом можуть бути методи інтерполяції, апроксимації та екстраполяції за допомогою дійсних та комплексних сплайн-функцій. Раніше авторами в роботах при вирішенні задач відновлення та оцінки станів даних, сигналів та трафіку, задач обробки сигналів та підвищення характеристик якості QoS (Quality of Service)/QoE (Quality of Experience) при функціонуванні інфокомунікаційних мереж та прогнозування характеристик трафіку різних додатків було використано дійсні сплайн-функції (лінійні, квадратичні, кубічні, B-сплайни), які спростили розв'язок багатьох завдань.

В роботах [1], [7-8] авторами запропоновано рішення завдання позиціонування користувача в мережі Indoor за допомогою комплексних плоских сплайнів. Використання комплексних плоских сплайнів при рішенні завдань визначення координат місцезнаходження користувача дозволяє забезпечити вимоги специфікації 3GPP TS 22.261 щодо визначення абсолютної наближеної координати та позиціонування в просторі для позиціонування в мережі 5G.

Метою даної роботи є визначення місцезнаходження користувача в мережі 5G на базі комплексних плоских лінійних сплайнів щодо підвищення точності позиціонування.

Відомо [9-12], що група технологій радіодоступу Wi-Fi (IEEE 802.11ac/ad)/ Bluetooth/BLE (IEEE 802.15.1) забезпечує низку вимог до точності позиціонування в різних сценаріях 5G.

Відповідно до результатів, отриманих в роботах [10-12], встановлено, що доцільним для місцезнаходження користувача є використання методу Fingerprinting, який використовує результати вимірювання значень рівня потужності сигналу RSS (Received Signal Strength) для визначення відстані до користувача. В якості алгоритму позиціонування для визначення координат користувача використано метод К-найближчих сусідів KNN (K-Nearest Neighbor) або

метод найближчого сусіда з ваговими коефіцієнтами WKNN (Weighted K-nearest) [11]. Розглянемо задачу позиціонування користувача за допомогою методу Fingerprinting на базі комплексних плоских лінійних сплайнів.

Визначення місцезнаходження користувача за допомогою методу Fingerprinting на базі комплексних плоских лінійних сплайнів

Розглянемо фрагмент мережі радіодоступу Wi-Fi (IEEE 802.11ac/ad) (рис. 1), яка складається з точок доступу AP_i (Access Point), $i = \overline{1,3}$. Знайдемо координати користувача $M(x, y)$.

Для визначення відстані між пристроєм користувача та точками доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$ використаємо значення рівня потужності сигналу RSSI згідно формули [1]:

$$P_{d_i} = P_0 - 10n \lg \left(\frac{d_i}{d_0} \right), \quad (1)$$

де P_{d_i} – значення потужності сигналу RSSI відповідної точки доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$, d_i – відстань від пристрою користувача M до точки доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$, d_0 – відстань від пристрою до точки RP , P_0 – потужність сигналу, виміряна на відстані d_0 , n – коефіцієнт втрат потужності сигналу при поширенні у середовищі.

Визначення місцезнаходження користувача за допомогою методу Fingerprinting відбувається в два етапи (рис. 1). На першому етапі формується база даних Fingerprinting Data Base, яка зберігає дані MAC-адреси та виміряні значення рівня потужності приймаемого сигналу RSSI для точок доступу AP_i , з відповідними характеристиками точок доступу $(MAC_{i,1}, RSSI_{i,1})$, $(MAC_{i,2}, RSSI_{i,2})$, $(MAC_{i,3}, RSSI_{i,3})$.

На другому етапі визначаються координати місцезнаходження користувача за допомогою алгоритму позиціонування найближчого сусіда KNN або WKNN, який визначає координати місцезнаходження користувача, як середнє арифметичне координат відповідних точок. Зважаючи на вищезазначене, в роботах запропоновано «модифікацію» метода Fingerprinting з використанням комплексних плоских сплайнів, що дозволило значно спростити розв'язання задачі позиціонування, тим самим підвищивши точність визначення координат користувача.

Для визначення координат місцезнаходження користувача в мережі радіодоступу за допомогою методу Fingerprinting на базі комплексних плоских лінійних сплайнів розглянемо їхню побудову.

Нехай задано область G , елементом якого є фрагмент розглядаємої мережі Wi-Fi (IEEE 802.11ac/ad), яка утворена за допомогою точок доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$ та s -ліній. Ця область розбита на окремі клітини довільної форми, що включають в себе точки доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$ та s -ліній. Для кожної точки доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$ відомі значення $f(z_j)$ потужності сигналу, відповідно до якого визначається відстань між користувачем та точкою доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$.

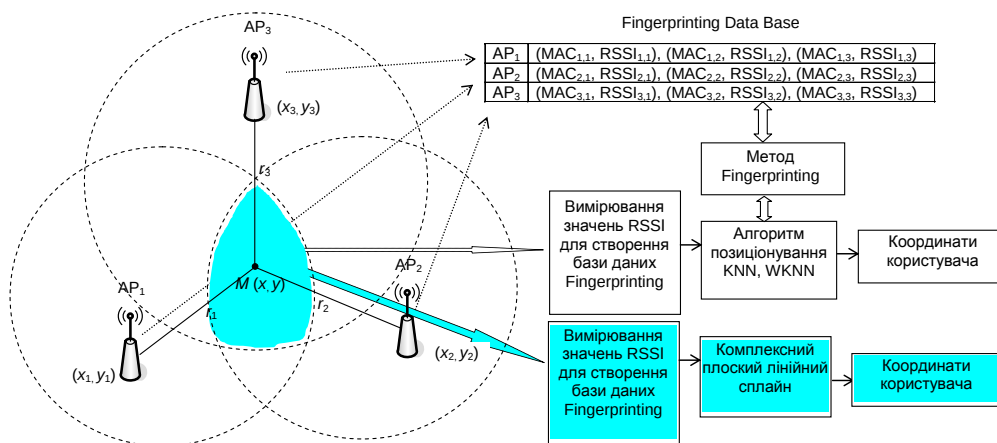


Рис. 1. Визначення місцезнаходження користувача за допомогою методу Fingerprinting

Розглянемо область $\bar{G} \subset Q$, де $\bar{G} = G \cup \partial G$, ∂G – границя області G , $Q = [a, a+H] \times [b, b+H]$ – квадрат зі стороною $H > 0$ (рис. 2), N – натуральне число, тоді $h_N = \frac{H}{N}$, $x_k = a + kh_N$, $y_j = b + jh_N$, $k, j = 0, 1, \dots, N$. Тоді будемо розглядати область $Q = \bigcup_{k,j=0}^{N-1} Q_{k,j}$, де

$Q_{k,j}$ – квадратні клітини з кроком h_N , $Q_{k,j} = \left\{ z = x + iy : x \in [x_k, x_{k+1}], y \in [y_j, y_{j+1}] \right\}$. Таке розбиття позначимо як Δ_N [1].

Визначимо область G_N як об'єднання усіх квадратних клітин $Q_{k,j}$, для яких $Q_{k,j} \cap G \neq \emptyset$. Кожен квадрат $Q_{k,j} \subset G_N$ розіб'ємо діагоналлю на два трикутники $P_{k,j}^1$ та $P_{k,j}^2$. Таке розбиття позначимо Δ'_N . Позначимо через G'_N – об'єднання всіх трикутників $P_{k,j}^1$ та $P_{k,j}^2$, для яких $P_{k,j}^1 \cap G \neq \emptyset$, $P_{k,j}^2 \cap G \neq \emptyset$.

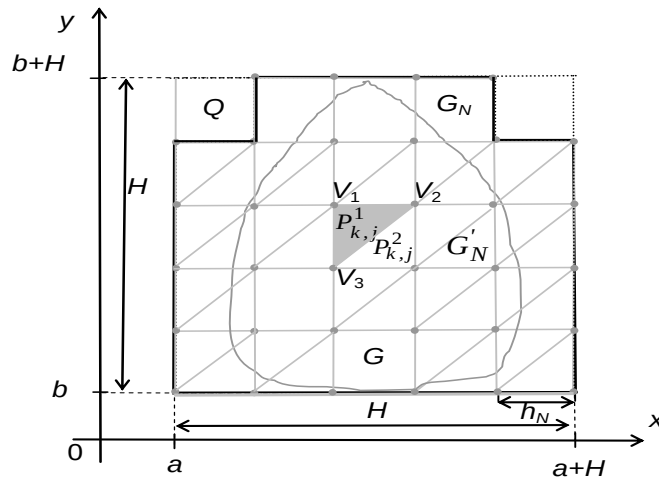


Рис. 2. Побудова області G_N

Розглянемо один з трикутників $P_{k,j}^1$ й $P_{k,j}^2$, який входить до області G'_N з вершинами V_1 , V_2 , V_3 такими, для яких виконуються наступні вимоги [1]:

$$\operatorname{Im} V_1 = \operatorname{Im} V_2, \quad \operatorname{Re} V_1 = \operatorname{Re} V_3.$$

Побудуємо по триангульованій області G'_N комплексний плоский лінійний сплайн $S_\Delta(z)$, який інтерполює функцію $f(z)$ у вершинах одного з трикутників $P_{k,j}^1$ й $P_{k,j}^2$ [1]:

$$S_\Delta(z) = a + bz + c\bar{z}, \quad (2)$$

де $z = x + iy$, $\bar{z} = x - iy$, $S_\Delta(z) = a + b(x + iy) + c(x - iy)$,

$$S_\Delta(z) = a + bx + cx + i(by - cy) = \operatorname{Re} S_\Delta(z) + i \operatorname{Im} S_\Delta(z),$$

де

$$\operatorname{Re} S_\Delta(z) = a + bx + cx, \quad \operatorname{Im} S_\Delta(z) = by - cy.$$

Тоді відповідно до інтерполяційних умов в точках $z_{k,j} = x_k + iy_j$ [1],[7]:

$$S_\Delta(z_{k,j}) = f(z_{k,j}), \quad f(z) = \operatorname{Re} f(z) + i \operatorname{Im} f(z),$$

$$\operatorname{Re} S_{\Delta}(z)=\operatorname{Re} f(z), \operatorname{Im} S_{\Delta}(z)=\operatorname{Im} f(z) .$$

Лема 1. [1]. Нехай функція $f(z)$ неперервна в клітинній області $\overline{G_N}$, а $S_{\Delta}(z)$ – комплексний плоский лінійний сплайн виду (2), який інтерполює функцію $f(z)$ у вузлах $\{z_{kij}\}$. Тоді:

$$|f(z)-S_{\Delta}(z)| \leq 4 \omega(f ; h),$$

де $h = h_N$ и $\omega(f, h)$ – модуль неперервності функції $f(z)$ в $\overline{G_N}$.

Побудуємо за допомогою MathCAD 15 для розглянутої області G (рис. 1, рис. 2), комплексний лінійний плоский сплайн виду (2) для вихідних даних в табл. 2.

Результати побудови комплексного плоского лінійного сплайна для заданої області G показано на рис. 3. Таким чином, визначення координат місцезнаходження користувача можливе в межах кожної квадратної клітини Q_{kij} .

Таблиця 2.

Вихідні дані вимірювань потужності сигналу RSSI, дБм

(x,y)	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
y ₀	-38	-35	-44	-50	-42	-39
y ₁	-28	-40	-54	-48	-61	-21
y ₂	-31	-35	-49	-58	-45	-35
y ₃	-69	-42	-58	-44	-39	-34
y ₄	-39	-35	-52	-55	-45	-46
y ₅	-45	-39	-49	-47	-38	-67

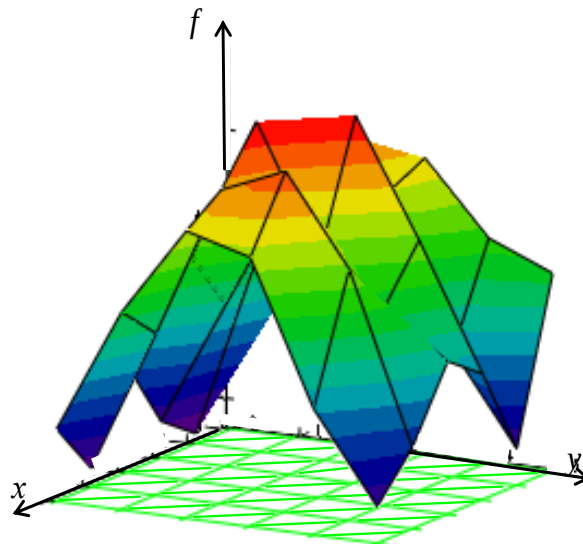


Рис. 3. Комплексний плоский лінійний сплайн для заданої області G

Висновки

1. Розглянуто задачу визначення місцезнаходження користувача в мережі 5G, розв'язання якої засновано на локальному позиціонуванні LRS в умовах високої концентрації користувачів та складностей при поширенні радіосигналів.

2. Запропоновано використання комплексних плоских лінійних сплайн-функцій для визначення місцезнаходження користувача на основі метода Fingerprinting. Наведено приклад

побудови комплексних плоских лінійних сплайнів. Встановлено, що використання комплексних сплайн-функцій дозволяє підвищити точність місцезнаходження користувача.

3. Напрямок подальших досліджень є використання комплексних плоских сплайнів (квадратичних, кубічних та В-сплайнів, тощо) для підвищення точності позиціонування користувача в мережі 5G.

Література

Referenzis

1. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J. Fingerprinting/Indoor positioning using complex planar splines. *Journal of Electrical Engineering*. 2021. Vol. 72, №6. P. 401-406.
2. 3GPP TS 22.261 V18.6.0 (2022-03). Service requirements for the 5G system. Stage 1. Release 18. 2022.
3. 3GPP TS 22.872 V16.1.0 (2018-09). Study on positioning use cases. Stage 1. Release 16. 2018.
4. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J. Spline-approximation and spline-extrapolation methods in telecommunication problems. *Current Trends in Communication and Information Technologies: Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. Vol. 212. P. 3-20. Springer.
5. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Makoganiuk A. Different extrapolation methods in Problems of Forecasting. *Advances in Information and Communication Technology and Systems: Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020. Vol 152. Springer. P. 217-228.
6. Strelkovskaya I., Solovskaya I. Using spline-extrapolation in the research of self-similar traffic characteristics. *Journal of Electrical Engineering*. 2019. Vol. 70, Is. 4. P. 310-316.
7. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J. Linear complex planar splines in Wi-Fi/Indoor positioning problems. *2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (IEEE UkrMiCo): proceedings of the Conference*, Kyiv, Ukraine, November 29 – December 3, 2021. P. 84-87. <https://doi.org/10.1109/ICITTE&R21.52722>
8. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J., Grigoryeva T. Using quadratic complex planar splines in solving local positioning problems. *16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, Ukraine, February 22–26, 2022. P. 602-605.
9. Hameedah S.H. et al. An Overview of Local Positioning System: Technologies, Techniques and Applications. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7(3), P. 1-5.
10. Gu F. et al. Indoor Localization Improved by Spatial Context – A Survey. *ACM Computing Surveys*. 2019. Vol. 52(3):64. P. 1-35
11. Rahmadini A.P., Kristalina P., Sudarsono A. Optimization of Fingerprint Indoor Localization System for Multiple, Object Tracking Based on Iterated Weighting Constant – KNN Method. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. 2018. Vol. 8(3). P. 998-1007.
12. Yang Q., Zheng S. and Liu M. Research on Wi-Fi indoor positioning in a smart exhibition hall based on received signal strength indication. *Wireless Com Network*. 2019.

