

5. Strelkovskaya I., Zolotukhin R., “Research of low-bandwidth radionetworks QoS parameters” in Information and Telecommunication Sciences, *International Research Journal*, Volume 11, Number 1(20), January-June 2020, DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12020.77-81>.

6. STANAG 4677: 2014 Dismounted soldier systems standards and protocols for command, control, communications and computers (C4) interoperability / NATO 2014.

7. MQTT Version 3.1.1. Edited by A. Banks and R. Gupta. 2014. OASIS Standard.

8. OMG Data Distribution Service (DDS) Version 1.4. April 2015.

**I. Strelkovskaya, R. Zolotukhin, T. Grigorieva. Comparative analysis of data transmission protocols of automated control systems in low-bandwidth communication networks. – Article.**

**Summary.** The organization of interaction and transmission of information between system nodes is a critical task, when creating automated control systems in low-bandwidth communication networks. In IoT networks, publish-subscribe algorithms and protocols are widely used for data exchange in low-bandwidth networks. The JDSS protocol of the STANAG 4677 standard was created for work in networks that basis on UHF\VHF radios. The paper presents comparative analysis of JDSS, MQTT and DDS protocols for construction of the automated control systems based on UHF\VHF radio stations. The analysis of the possibility to providing authentication, encryption, data protection, data compression and implementation of access control is carried out.

**Key words:** comparative analysis, ACS, JDSS, MQTT, DDS, UHF\VHF, low-bandwidth communication channels.

**И. В. Стрелковская, Р. В. Золотухин, Т. И. Григорьева. Сравнительный анализ протоколов передачи данных автоматизированных систем управления в низкоскоростных сетях связи. – Статья.**

**Аннотация.** При создании автоматизированных систем управления в низкоскоростных сетях связи критически важной задачей является организация взаимодействия и передачи информации между узлами системы. В сетях IoT для обмена данными в низкоскоростных сетях широко применяются алгоритмы и протоколы технологии publish-subscribe. Для работы в сетях на базе УКВ радиостанций был создан протокол JDSS стандарта STANAG 4677. В работе проведен сравнительный анализ протоколов JDSS, MQTT и DDS по их использованию для построения автоматизированных систем управления с активным перемещением пользователей низового звена управления в низкоскоростных сетях связи на базе УКВ радиостанций. Проведен анализ возможности обеспечения проверки подлинности, шифрования, защиты данных, сжатия данных и реализации контроля доступа протоколов JDSS, MQTT и DDS.

**Ключові слова:** сравнительный анализ, ACS, JDSS, MQTT, DDS, УКВ, низкоскоростные каналы связи.

**УДК 621.39:519.65**

**І. В. Стрелковська**

доктор технічних наук, професор,  
декан факультету кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Міжнародний гуманітарний університет  
м. Одеса, Україна

**І. М. Соловська**

кандидат технічних наук, доцент,  
звідувачка кафедри комп'ютерних наук  
Міжнародний гуманітарний університет,  
м. Одеса, Україна

## **IPS-ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ РАДІОДОСТУПУ WI-FI НА БАЗІ КОМПЛЕКСНИХ ПЛОСКИХ СПЛАЙНІВ**

**Анотація.** Розглянуто основні методи IPS-позиціонування користувачів в мережах радіодоступу Wi-Fi, які засновано на різних принципах функціонування. Для позиціонування користувача запропоновано використання комплексних плоских сплайнів. Показано побудову комплексних плоских лінійних сплайнів. Встановлено, що використання комплексних плоских лінійних сплайнів дозволяє підвищити точність позиціонування.

**Ключові слова:** IPS-позиціонування, мережа радіодоступу Wi-Fi, комплексний плоский лінійний сплайн, похибка позиціонування.

Розвиток сучасних мереж радіодоступу різних технологій та особливостей використання сьогодні забезпечується мережами Wi-Fi (IEEE 802.11n/ac/ad), Bluetooth або BLE (Bluetooth low energy) (IEEE 802.15.1), RFID (Radio Frequency IDentification) та NFER (Near-Field Electromagnetic Ranging) [1-4]. Кожна з цих мереж має надавати безліч сервісів і додатків, які базуються на результатах позиціонування користувачів в приміщеннях IPS (Indoor Positioning System) [1-4]. Саме IPS-позиціонування всередині приміщень, паркінгів, будівель, складів, виставкових залів, виробничих приміщень, медичних організаціях, бізнес-центрів та інших місць викликає значні складнощі, такі як: багатопробне поширення при відображенні сигналу від стін та інших перешкод, відсутність прямої видимості, ослаблення та розсіювання сигналу через перешкоди, підвищені вимоги до точності та збіжності результатів [5]. З іншого боку, IPS-позиціонування може мати значне спрощення через невеликі зони покриття мережі радіодоступу, стабільні умови середовища та порівняно низькі швидкості руху користувачів. Майже всі існуючі технології локального позиціонування відповідають широкому спектру вимог у різних ситуаціях. Проте все ще бувають ситуації, коли необхідна точність позиціонування не може бути досягнута.

Метою даної роботи є розробка методу позиціонування користувача в мережах радіодоступу на базі комплексних плоских сплайнів щодо підвищення точності позиціонування.

Розглянемо класифікацію методів IPS-позиціонування (рис. 1) [1-4].

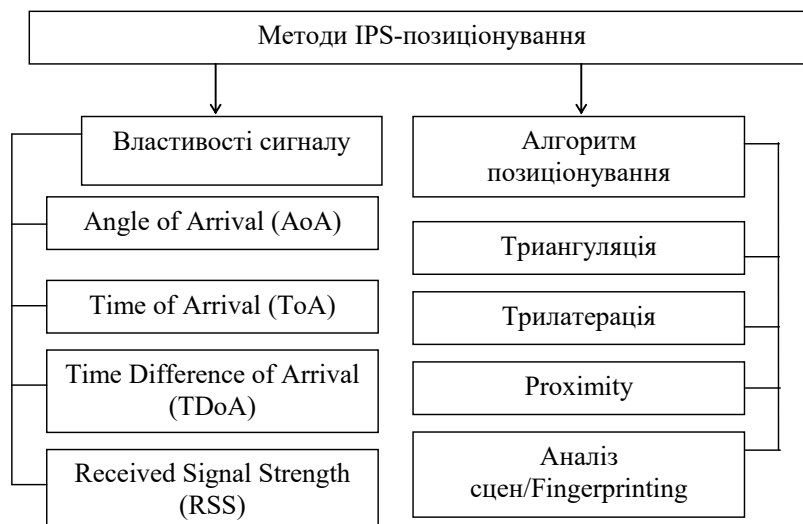


Рис. 1. Класифікація методів IPS-позиціонування

IPS-позиціонування користувача в приміщенні виконується в два етапи. На першому етапі визначається відстань між користувачем та точкою доступу AP (Access Point) мережі радіодоступу за допомогою наступних методів, які класифіковано за властивостями сигналу [1-4]:

- метод RSS (Received Signal Strength) використовує для визначення відстані між користувачем та точкою доступу AP результати вимірювання потужності прийнятого сигналу;
- метод AOA (Angle of Arrival) використовує для визначення відстані між користувачем та точкою доступу AP виміри кута надходження сигналу щодо джерела сигналу;
- методи TOA (Time of Arrival) та TDoA (Time Difference of Arrival), використовують вимірювання часу затримки поширення радіосигналу [1-3].

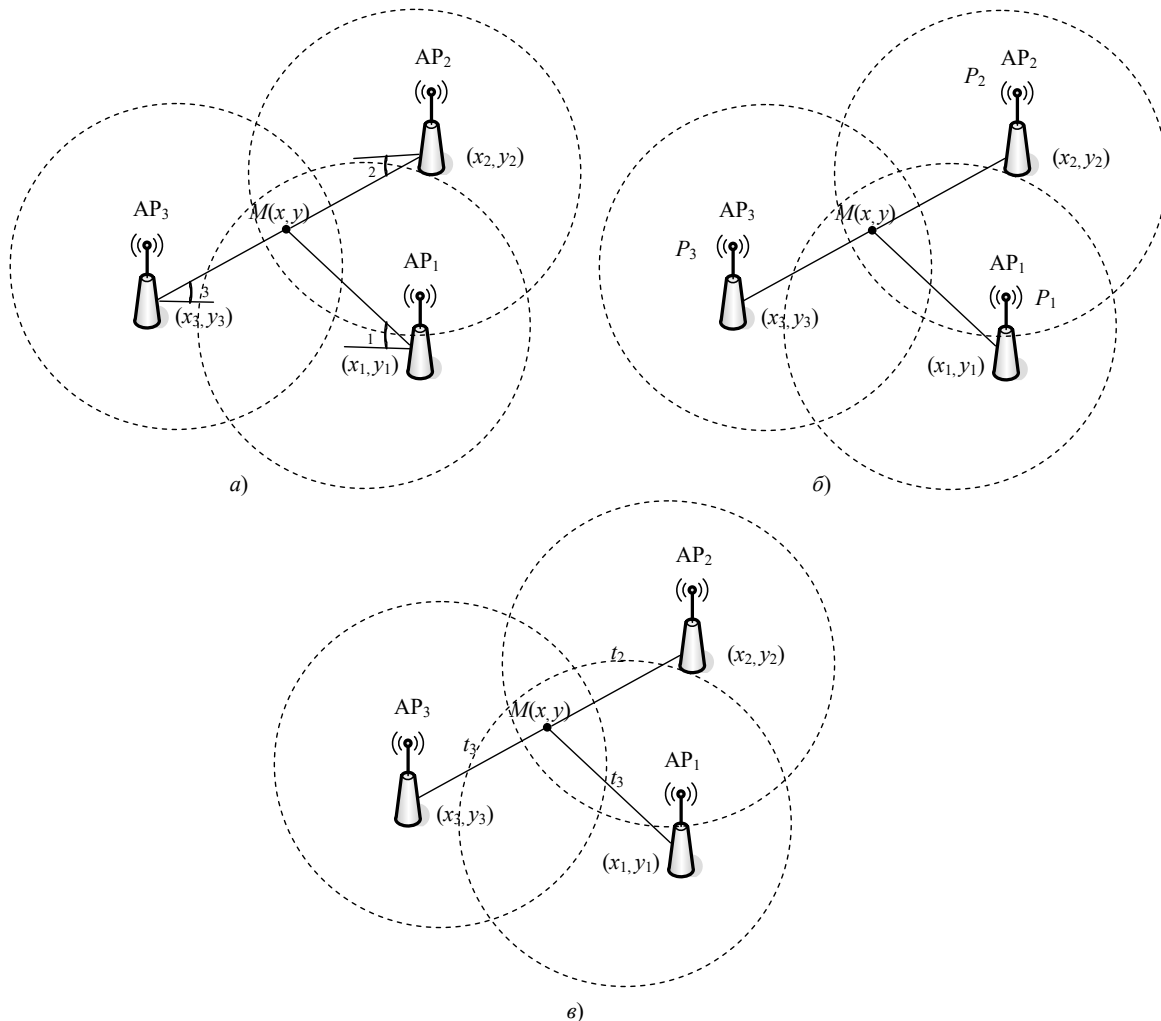
Розглянемо детальніше вищезазначені методи позиціонування (RSS, AOA, TOA, TDoA) для мережі Wi-Fi, яка об'єднує точки доступу  $AP_i(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1,3}$  (рис. 2). Позначимо координати користувача через  $M(x, y)$ .

Для визначення відстані між користувачем  $M(x, y)$  та точками доступу  $AP_i$ ,  $i = \overline{1,3}$  мережі Wi-Fi в основі методу AoA (рис. 2,а) є кут прийняття сигналу відносно точки доступу на основі діаграми спрямованості антени. Для використання цього методу IPS-позиціонування необхідною умовою є наявність у конструкції кожної точки доступу  $AP_i$ ,  $i = \overline{1,3}$  поворотної антени або антени з фазовою решіткою. Основною перевагою використання методу AoA є достатня простота алгоритму для визначення місцеположення користувача та можливість роботи і різних фізичних середовищах. Недоліками методу є вимоги щодо конструкції антени та залежність точності позиціонування від відстані між користувачем та точкою доступу.

Метод RSS (рис. 2,б) засновано на вимірюванні потужності отриманого сигналу ( $P_1, P_2, P_3$ ) і дозволяє визначити відстань між користувачем та точками доступу  $AP_i, i = \overline{1,3}$  за допомогою формули [5]:

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

де  $P_{d_i}$  – значення потужності сигналу 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.



**Рис. 2. Фрагмент мережі Wi-Fi визначення позиціонування користувача за допомогою:**  
**а) методу AoA, б) методу RSS, в) методу TOA і TDoA**

Основною перевагою методу RSS є низьке енергоспоживання мобільного пристрою при позиціонуванні та низька вартість, але важливим недоліком є низька точність позиціонування на значних відстанях. Тому метод рекомендується використовувати тільки для коротких відстаней в приміщеннях.

Методи TOA та TDoA (рис. 2,в) використовують результати вимірювань часу затримки передачі сигналу ( $t_1, t_2, t_3$ ) між пристроєм користувача та точкою доступу  $AP$ . Метод TOA засновано на вимірюванні часу проходження сигналу від користувача до точки доступу, де відстань обчислюється на основі різниці між часом відправлення сигналу та часом його отримання. Відстань визначається як  $L = ct$ , де  $c$  – швидкість світла,  $t$  – час затримки передачі сигналу. Метод TDoA використовує вимірювання різниці часу надходження сигналу від користувача  $M(x, y)$  точок доступу  $AP_i, i = \overline{1,3}$ . Перевагами цих методів є висока точність IPS-позиціонування та великий радіус дії.

На другому етапі позиціонування відбувається визначення координат місцезнаходження користувача за допомогою методів позиціонування, а саме: методів триангуляції або трилатерації [1–4], метода

Fingerprinting на базі метода К-найближчих сусідів KNN (K-Nearest Neighbor) або зваженого метода К-найближчих сусідів з використанням вагових коефіцієнтів KWNN (K-Weighted Nearest Neighbor) [6], або метода наближень Proximity [4] з використанням ймовірносних методів [2]. Результати порівняння алгоритмів позиціонування наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння алгоритмів позиціонування в мережах радіодоступу

Метод	Триангуляція	Трилатерація	Proximity	Fingerprinting
Мережа використання	Wi-Fi (IEEE 802.11n/ac/ad)	Bluetooth, BLE iBeacon (IEEE 802.15.1)	RFID та NFER	Wi-Fi (IEEE 802.11n/ac/ad), Bluetooth, BLE iBeacon (IEEE 802.15.1)
Точність IPS-позиціонування	5–10 м	5–10 м	5 м	2–5 м
Метод визначення відстані	RSS, TOA, TDoA	AOA	RSS, TOA, TDoA	RSS

Метод Fingerprinting засновано на визначенні місцезнаходження користувача на основі поточних вимірних значень потужності сигналу RSSI від усіх доступних точок доступу зі значеннями, які зберігаються в попередньо згенерованій базі даних. Основною перевагою методу є точність визначення місцезнаходження користувача [6]. Переважна більшість робіт різних авторів [1–4] віддають перевагу методу Fingerprinting. Цей вибір обумовлено тим, що він найпростіший у реалізації, не вимагає додаткового обладнання та розробки додаткового програмного забезпечення, але дозволяє досягти певних показників точності. Алгоритм IPS-позиціонування користувача в мережі Wi-Fi за допомогою методу Fingerprinting показано на рис. 3 [7].

Особливістю алгоритму позиціонування Fingerprinting є попереднє формування бази даних Fingerprinting DataBase, яка формується для приміщення та зберігання значення вимірних потужностей RSSI (Received Signal Strength Indicator) кожної з точок доступу у заданих точках RP (Reference Point) [7–10]. Початковим кроком роботи алгоритму позиціонування є запит на позиціонування від пристрою користувача UE (User Equipment) до найближчих трьох точок доступу  $AP_p, i = \overline{1,3}$ , після чого в кожній точці доступу виконується вимірювання потужності сигналу та результати відправляються до Fingerprinting Data Base. На наступному кроці визначаються координати користувача  $M(x, y)$  за допомогою методу К-найближчих сусідів KNN або методу найближчого сусіда з ваговими коефіцієнтами WKNN [5]. Для підвищення точності позиціонування розглянемо «модифікований» методу Fingerprinting на базі методу Fingerprinting, методу кінцевих елементів та комплексних плоских сплайнів [7–9]. Цей метод дозволяє визначити місцезнаходження користувача в мережі радіодоступу Wi-Fi з координатами  $M(x, y)$ .

В якості комплексного плоского лінійного сплайну, побудову якого показано у [9], розглянемо  $S_{\Delta}(z)$ , який інтерполює функцію  $f(z)$  у вершинах точок доступу  $AP_p, i = \overline{1,3}$  де  $f(z_i)$  – потужність сигналу в точках доступу  $AP_p, i = \overline{1,3}$ , має вигляд:

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

де  $z = x + iy$ ,  $\bar{z} = x - iy$ ,

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

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

де

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

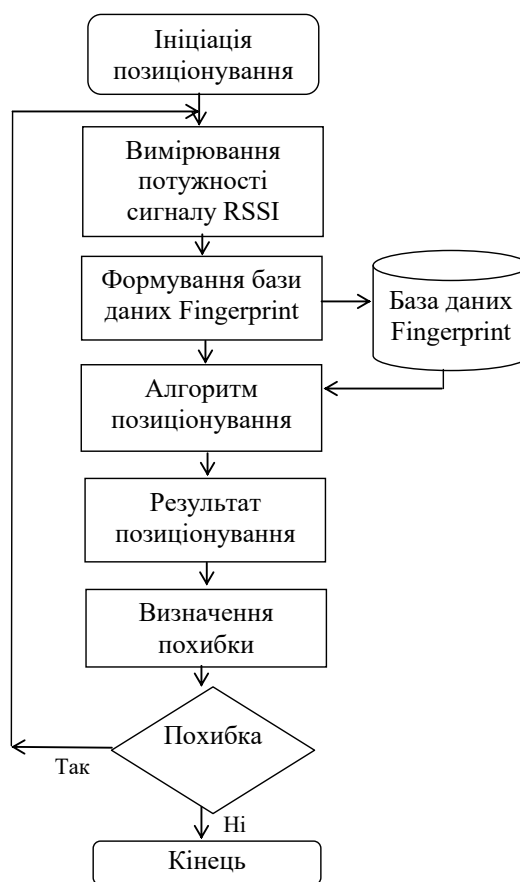


Рис. 3. Алгоритм IPS-позиціонування користувача за допомогою методу Fingerprinting

## Висновки

1. Розглянуто основні методи позиціонування користувачів в мережах радіодоступу Wi-Fi/IPS, які засновано на різних принципах функціонування. Визначено, що найбільш доцільним є використання методу Fingerprinting.

2. Запропоновано використання «модифікованого» методу Fingerprinting на базі методу Fingerprinting, методу кінцевих елементів та комплексних плоских сплайнів.

3. Напрямок подальших досліджень може бути використання комплексних плоских сплайнів (квадратичних, кубічних та B-сплайнів) для розв'язання задач позиціонування щодо підвищення точності місцезнаходження.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 3GPP TR 21.916 V16.1.0 (2022-01). Technical Specification Group Services and System. Release 16. 2022.
2. Kunhoth, J., Karkar, A., Al-Maadeed, S. et al. Indoor positioning and wayfinding systems: a survey. *Human-centric Computing and Information Sciences*. Vol. 10, 18 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00222-0>.
3. Hameedah S.H. et al. An Overview of Local Positioning System: Technologies, Techniques and Applications. *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7(3), pp. 1–5, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.25.17459>.
4. L. Liao K. Lin, X. Wang and X. Lai. Wi-Fi Positioning: A Survey. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 7 (3-4), pp. 229–248, 2016.
5. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J., «Fingerprinting/Indoor positioning using complex planar splines», in *Journal of Electrical Engineering*, vol. 72, № 6, 2021, pp. 401–406. DOI: <https://doi.org/10.2478/jee-2021-0057>.
6. A.P. Rahmadini, P. Kristalina, A. Sudarsono, «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*, vol. 8(3), pp. 998–1007. 2018. DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.3.6086>.
7. Strelkovskaya, I. Solovskaya I., J. Strelkovska. Linear complex planar splines in Wi-Fi/Indoor positioning problems, in 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (IEEE UkrMiCo), 2021, pp. 84–87. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716612>.
8. Strelkovskaya I. Solovskaya I., Strelkovska J. The use of linear complex planar splines to improve the accuracy of determining the location of the user in Wi-Fi/Indoor networks, in 2021 International Scientific-Practical Conference Proceedings (PICS&T 2021), 2021. P. 613-616. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772175>.
9. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J., Grigoryeva T., “Using quadratic complex planar splines in solving local positioning problems”, in IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2022, pp. 602–605. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766876>.

***I. Strelkovskaya, I. Solovskaya. IPS-positioning in Wi-Fi radio access network based on complex planar splines. – Article.***

***Summary.*** The basic methods of IPS user positioning in Wi-Fi radio access networks, based on different operating principles, are considered. The use of complex plane splines for user positioning is proposed. The construction of complex planar linear splines is shown. It is found that the use of complex planar linear splines can increase the accuracy of positioning.

***Key words:*** IPS-positioning, Wi-Fi radio access network, complex planar linear spline, positioning error.

***И. В. Стрелковская, И. Н. Соловская. IPS-позиционирование в сети радиодоступа Wi-Fi на базе комплексных плоских сплайнов. – Статья.***

***Аннотация.*** Рассмотрены основные методы IPS-позиционирования пользователей в сетях радиодоступа Wi-Fi, основанные на различных принципах функционирования. Для позиционирования пользователя предложено использование комплексных плоских сплайнов. Показано построение комплексных плоских линейных сплайнов. Установлено, что использование комплексных плоских линейных сплайнов позволяет увеличить точность позиционирования.

***Ключевые слова:*** IPS-позиционирование, сеть радиодоступа Wi-Fi, комплексный плоский линейный сплайн, погрешность позиционирования.