

ОБРОБКА GPS КООРДИНАТ З ВИКОРИСТАННЯМ КАЛМАНІВСЬКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Проведено аналіз джерел і форматів геоданих про місцезнаходження сучасних мобільних комунікаційних пристроїв. Виявлено причини похибки визначення місцерозташування, отримуваних від різних джерел, і запропоновано метод фільтрації даних для виключення завідомо неточних координат, що дозволяє збільшити точність побудови треку руху об'єкта. Адекватність та ефективність представленого методу підтверджені результатами аналізу експериментальних даних.

Ключові слова: фільтрація навігаційних даних, фільтр Калмана, GPS, Android, навігаційна система.

Вступ

Системи глобального супутникового позиціонування все частіше використовуються для визначення місцерозташування в системах моніторингу рухомих об'єктів. Розвиток і поширення сучасних систем супутникового моніторингу тісно пов'язані з підвищенням точності та достовірності прийнятих навігаційних даних. Однак через похибки, що обумовлені рядом причин, підсумковий результат не відповідає у точності оригінальному треку (маршруту) відстежуваного об'єкта. Спостерігаються як незначні відхилення (~до 50 м), що не надто ускладнюють сприйняття візуальної інформації про маршрут об'єкта і його аналіз, так і вельми значні (до 1 км), в разі втрати сигналу від супутників і використанні базових станцій оператора стільникового зв'язку.

1. Система глобального супутникового позиціонування

Супутникова навігаційна система – система космічного базування, яка дозволяє у глобальних масштабах визначати поточне місцезнаходження рухомих об'єктів і їх швидкість та здійснювати точну координацію часу [1]. Супутникову навігаційну систему можна розглядати як високотехнологічну інформаційну систему, що складається з п'яти основних сегментів (рис. 1) [2].

Наземний керуючий сегмент включає у себе центр керування космічним сегментом, станції контролю за навігаційни-

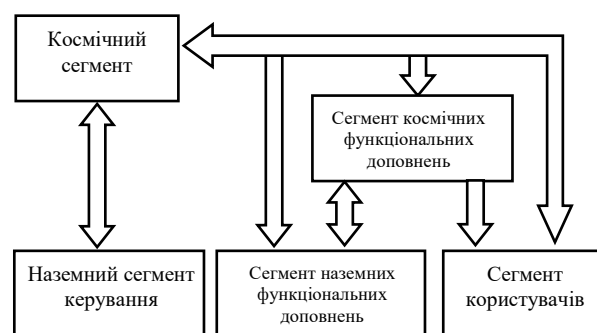


Рис. 1. Організація супутникової навігаційної системи

ми супутниками. Керуючий сегмент вирішує завдання визначення, прогнозування та уточнення параметрів руху навігаційних супутників. Космічний сегмент – це система навігаційних супутників, що обертаються по еліптичних орбітах навколо Землі. Сегмент користувачів складається з користувацьких приймачів. Сегменти наземних і космічних функціональних доповнень представляють собою апаратно-програмні комплекси призначені для забезпечення точності навігаційних визначень, цілісності, безперервності, доступності та експлуатаційної готовності системи.

Поточна конфігурація GPS складається з 31 супутника (2017) [3], що обертаються навколо Землі на високих орбітах. Кожен супутник, що входить до сузір'я GPS обертається на висоті близько 20000 кілометрів над землею. Орбітальна швидкість становить близько 14000 кілометрів на годину (орбітальний період дорівнює ~12 годин, супутники GPS не знаходяться на геостационарній або геосинхронній ор-

бітах). Параметри розташування угруповання космічних апаратів вибрані не випадково: у будь-який момент часу в будь-якій точці земної кулі необхідно отримати сигнали як мінімум від 3-х супутників, що є необхідною умовою визначення координат приймача. Для більш точного визначення місцезнаходження необхідний сигнал від четвертого супутника. GPS-приймач визначає своє поточне розташування і напрямок шляхом порівняння сигналів часу, отримуваних з різних GPS-супутників (зазвичай від 4 до 12) і трилатерації за поточним станом кожного з супутників. Таким чином досягається висока точність: найпростіший кишеньковий GPS-приймач може визначити абсолютну позицію відносно поверхні Землі за декілька секунд з точністю до кількох метрів чи менше (за допомогою різницевої техніки, які порівнюють два прилеглих приймача; а точності порядку сантиметрів у відносному положенні часто досягаються протягом години або близько того). Сателіти GPS обладнані точним атомним годинником, котрий періодично синхронізується з наземними станціями. Дані станції використовуються для уточнення параметрів орбіти супутників.

1.1 Необхідні набори даних та типи запуску приймача

Перш ніж навігаційний приймач зможе видавати інформацію про місцезнаходження, він має володіти наступними наборами даних [4]: сигнали від супутника; альманах – інформація про приблизні параметри орбіт всіх супутників, а також дані для калібрування годин і характеристики іоносфери; ефемериди – точні параметри орбіт і годин кожного супутника.

Щодо початку роботи приймача, існують наступні типи початку роботи [5]: холодний старт – описує ситуацію, коли приймачу необхідне отримання всієї інформації для визначення місцезнаходження (тривалість: до 5 хв); теплий старт (нормальний) – описує ситуацію, коли у приймача є майже вся необхідна інформація в пам'яті і він визначить місце протягом хвилини; гарячий (режим очікування) – приймач має дійсні дані про час, позицію, аль-

манах і ефемериди, що дозволяє швидко отримувати супутникові сигнали. Час, необхідний приймачу в цьому стані для обчислення фіксації позиції, може також називатися "Час до наступного виправлення" (TTSF) – 1–5 с.

2. Точність визначення місцезнаходження

Точність позиціонування залежить від ряду факторів, у тому числі помилки обладнання навігаційних супутників, помилки GPS приймача і помилки поширення супутникового сигналу. У загальному випадку, середня точність позиціонування для побутового GPS приймача становить у середньому 25 м.

Основними джерелами помилок, що впливають на точність навігаційних обчислень у GPS-системі, є: [6].

- Іоносферні затримки сигналу. Затримки поширення сигналів призводять до помилок близько 20–30 м вдень і 3–6 м вночі.

- Тропосферні затримки сигналу. Величина похибки безпосередньо залежить від метеорологічних параметрів (температури, тиску, вологості) та висоти супутника над горизонтом. Тропосферні затримки компенсуються шляхом проведення розрахунку математичної моделі шару атмосфери. Значення похибок даного типу не перевищують 30 м.

- Ефемеридна похибка. Помилки, що обумовлюються розбіжністю між фактичним положенням супутника та його розрахунковим положенням. Значення похибки до 3 м.

- Багатопроменевий прийом. З'являється в результаті вторинних відбиттів сигналу супутника від великих перешкод, розташованих у безпосередній близькості від приймача. Виникає явище інтерференції, у зв'язку з чим, вимірювана відстань виявляється більше дійсної.

- Похибка відходу шкали часу супутника викликана розбіжністю шкал часу різних супутників. Усувається дана похибка за допомогою наземних станцій спостереження.

- Похибка визначення відстані до супутника. Не корелюється з іншими видами похибок. Її величина не перевищує 10 м.
- Неточне визначення часу. Призводить до виникнення систематичної помилки визначення координат близько 0.6 м. Усувається за допомогою встановлення сервера точного часу на стороні приймача.
- Помилки обчислення орбіт. З'являються внаслідок неточностей прогнозу і розрахунку ефемерид супутників, виконуваних в апаратурі приймача. Похибка призводить до помилки вимірювання координат близько 0.6 м.
- Інструментальна помилка приймача. Зумовлена наявністю шумів в електронному тракті приймача. Відношення сигнал/шум приймача визначає точність процедури порівняння, прийнятого від супутника і опорного сигналів, тобто похибка обчислення псевдодальності. Призводить до виникнення координатної помилки порядку 1.2 м.
- Геометричне розташування супутників. При обчисленні сумарної помилки необхідно врахувати взаємне положення приймача і супутників. Для цього вводиться спеціальний коефіцієнт геометричного зниження точності GDOP (Geometric Dilution Of Precision) [7], на який необхідно помножити всі вищепераховані помилки, щоб отримати результуючу помилку. Вона обернено пропорційна об'єму фігури, яка буде утворена, якщо провести поодинокі вектори від приймача до супутників. Велике значення GDOP говорить про невелике розташування супутника і велике значення помилки.

3. Задача фільтрації GPS координат

Підвищення точності позиціонування можна досягти шляхом застосування різних алгоритмів обробки прийнятих навігаційних даних. Одним з рішень що дозволяє підвищити достовірність, зменшити обсяг навігаційної інформації, переданої користувачеві, є фільтрація помилкових і надлишкових даних отриманих від GPS

модуля, що входить до складу мобільного терміналу. Фільтрація даних полягає у виключенні надлишкових даних, що не приносять ніякої корисної інформації про місцезнаходження об'єкта, а також у відсіві викидів, які призводять до спотворень даних і перешкод у визначенні місцезнаходження.

У мобільних пристроях під керуванням операційної системи Android існують наступні механізми отримання геолокаційних даних: використання NMEA (National Marine Electronics Association) даних безпосередньо з GPS приймача [8] та використання системних API геолокації. У першому випадку можливе отримання необроблених геолокаційних даних у форматі символічних повідомлень різного типу. Проте, не кожен GPS приймач підтримує всі існуючі типи повідомлень. Найрозповсюдженішими типами є: \$GP(GL)GGA – дані геопозиціонування, котрі містять поточну широту, довготу, час, кількість супутників; \$GP(GL)RMC – рекомендовані мінімальні дані геопозиціонування, крім часу, широти і довготи включають швидкість, магнітне схилення; API геолокації. API геолокації у свою чергу може надавати оброблені дані високої точності від GPS приймача, Wi-Fi точок доступу – геолокаційні дані середньої точності, засновані на місцезнаходженні Wi-Fi точок доступу, стільникових станцій – геолокаційні дані низької точності, що базуються на триангуляції місцезнаходження пристрою з базових станцій стільникового зв'язку, пасивні джерела – найчастіше неактуальні геолокаційні дані, отримані на основі запитів геолокації інших додатків.

Для подальшої фільтрації будемо використовувати дані від всіх доступних джерел.

3.1. Вихідні дані

Вихідні дані, отримувані від доступних пристрою джерел, включають у себе моментальні характеристики розташування: широта (lat, град) – широта поточної точки, довгота (lon, град) – довгота поточної точки, швидкість (spd, м/с) – моментальна швидкість в поточній точці, точність (acc, м) – радіус кола, в якому знаходяться

поточні координати, час (t , мс) – час фіксації місцезнаходження.

4. Фільтр Калмана

Фільтр Калмана – послідовний рекурсивний алгоритм, який використовує прийнятну модель динамічної системи для отримання оцінки, що може бути істотно скоригована в результаті аналізу кожної нової вибірки вимірювань у часовій послідовності [9]. Цей алгоритм застосовується в процесі керування багатьма складними динамічними системами, так як це математичний апарат, який дозволяє згладжувати дані на льоту, не накопичуючи їх для аналізу. При керуванні динамічною системою, перш за все, необхідно повністю знати її фазовий стан в кожен момент часу. Але виміряти всі змінні, якими необхідно управляти, не завжди можливо, і в цих випадках фільтр Калмана є тим засобом, який дозволяє відновити відсутню інформацію за допомогою наявних неточних (зашумлених) вимірювань.

Також він використовується для обробки даних від датчиків і будь-яких пристроїв. Як правило, такі показники схильні до шумів і відхилень, їх потрібно відсікати. Фільтр Калмана дозволяє відкидати піки (викиди) [10] і бачити усереднену, найімовірнішу картину процесу.

Можна виділити наступні типи «викидів»: хаотичний, грубий, систематичний. Хаотичний – викиди такого типу спостерігаються при русі на малих швидкостях або при стоянці на одному місці протягом не тривалого часу. Їх поява пов'язана з перешкодами відбитих сигналів супутників від висотних будівель або інших об'єктів. На карті такого роду помилки відображається як дрейф (нерівномірний розкид) передбачуваного місцезнаходження. Грубий – виникає в разі тривалої стоянки об'єкта на одному місці. Являє собою рух в деякому напрямку з постійним прискоренням протягом тривалого інтервалу часу. Розпізнати такі викиди на карті можна по характерному миттєвому (різкому) стрибку з останньої передбачуваної точки місцезнаходження об'єкта на його реальне місце розташування, при цьому стрибок супроводжується прискоренням руху, що вихо-

дить за межі розумного. Систематичний – даний тип викидів обумовлений зміною умов прийому сигналів з супутників. Систематичні викиди характеризуються невеликим відхиленням по одному або декільком параметрам, у тому числі координат місцезнаходження. На відміну від хаотичних викидів, помилка у визначенні координат супроводжується зниженням вбудованих показників точності в отримуваних навігаційних даних.

На рис. 2 показано відфільтровані дані з імітаційного GPS приймача. Використання фільтра Калмана дає можливість задати апріорну інформацію про характер системи, зв'язку змінних і на підставі цього будувати більш точну оцінку, тому що він дозволяє окремо враховувати похибки вимірювань і похибки випадкового процесу.

Однак для оцінки місцезнаходження на пристроях Android загальна теорія зводиться до іншої форми. Провайдери розташування Android надають місцезнаходження у вигляді широти і довготи разом з точністю, яка визначається як єдине число, виміряне в метрах. Реалізація рішення передбачає, що найкраща оцінка поточного місцезнаходження є останнім відомим місцезнаходженням, і якщо об'єкт перебуває у русі, то можливо використовувати датчики Android пристрою для отримання більш точної оцінки.

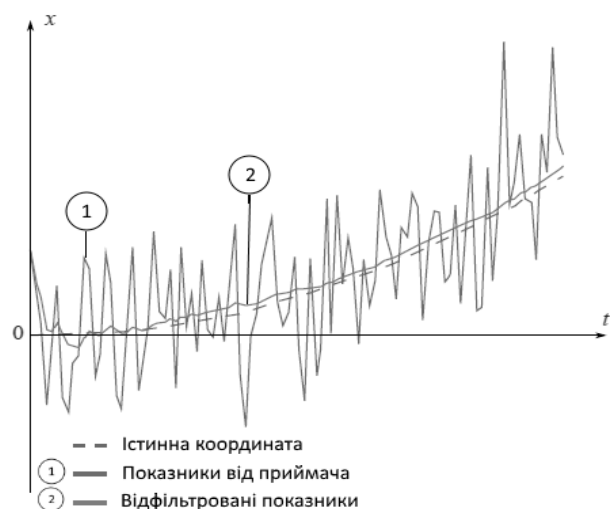


Рис. 2. Відфільтровані дані з імітаційного GPS приймача

5. Експериментальне дослідження

Як приймач використовується смартфон на базі ОС Android із чіпом GNS7560 [11]. Збір даних для обробки здійснюється застосунком, який записує у лог інформацію про об'єкт (широта, довгота, швидкість, тип провайдера, час, точність). Експорт відбувається у .grx формат [12]. Таймаут між точками під час збору – 15 с. Кількість точок, зібраних на маршруті – 68. Результатом роботи фільтру є послідовність координат із скоригованою широтою і довготою. Після збору даних у лог, вони завантажуються до візу-

алізатора, до якого імпортується grx-лог (рис. 3).

На рис. 3 та 4 показано загальний вигляд треку до обробки. На рис. 4 видно, що у даному прикладі присутні координати з високим ступенем похибки, що виражаються у наявності «викидів» – координат значно віддалених від основного маршруту.

Застосування фільтра дає можливість позбавитися від «викидів» та згладити трек. У результаті ми маємо майже повну відсутність «піків», за винятком найбільшого, котрий в свою чергу був зменшений (рис. 5).



Рис. 3. Загальний маршрут досліджуваного об'єкта

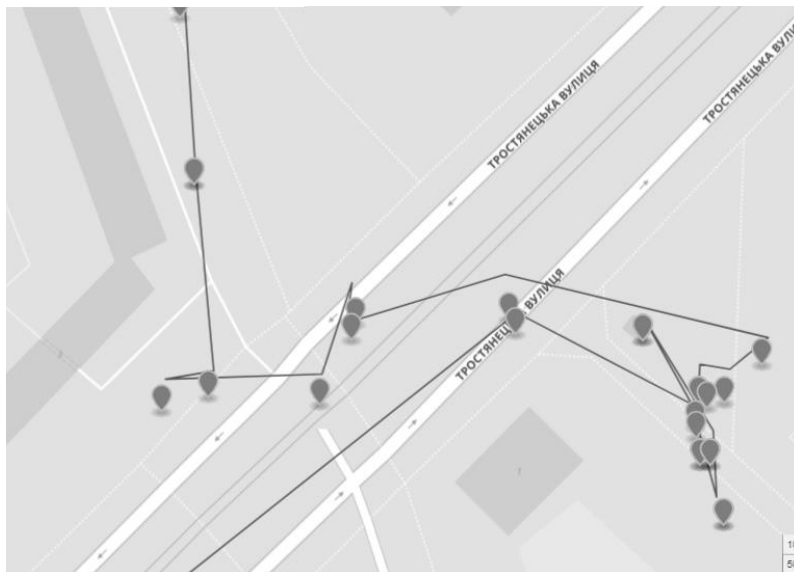


Рис. 4. Візуалізація «викидів»



Рис. 5. Відфільтрований трек

6. Оцінка результатів

На рис. 6 показано графік з показниками точності зібраних невідфільтрованих даних у кожній точці. Середнє значення точності – 25,2 м.

На рис. 7 показано графік з показниками точності зібраних даних, до яких було застосовано фільтр Калмана. Середнє значення точності зменшилося до 11 м.

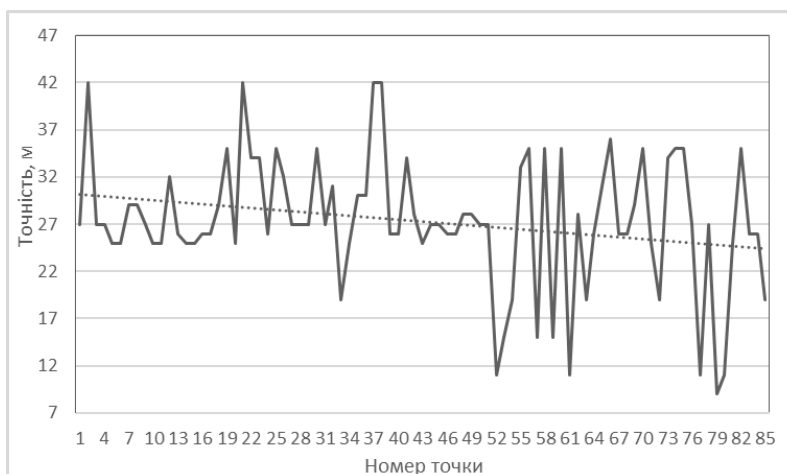


Рис. 6. Графік точності у кожній точці до обробки даних

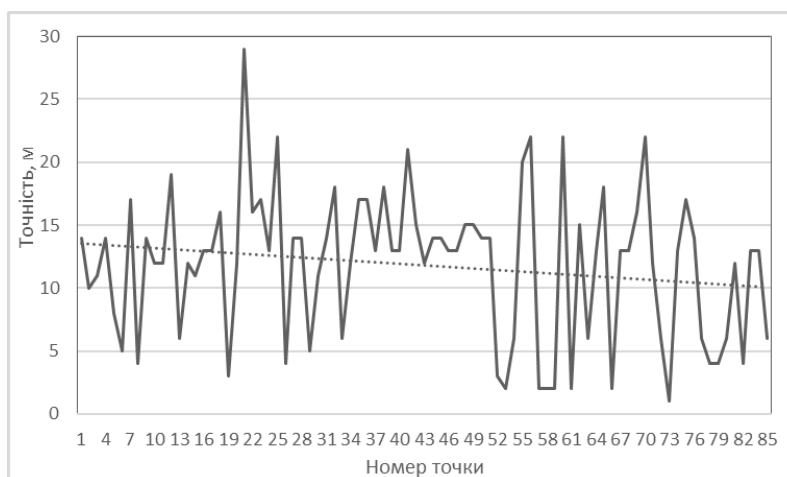


Рис. 7. Графік точності у кожній точці після обробки даних

Висновки

У даній роботі розглянуто підхід до обробки потоку GPS-координат за допомогою фільтра Калмана. Фільтр Калмана працює у реальному часі, що звільняє від необхідності накопичення даних та їх подальшої обробки, згладжує «викиди», що покращує візуальне сприйняття треку та привносить адекватність у відомості про маршрут відслідковуваного об'єкта. Із недоліків можна виділити, що він не згладжує повороти на маршруті. За допомогою наведеної реалізації вдалося позбавитися від найбільш помітних спотворень маршруту відслідковуваного об'єкта, що демонструє можливість застосування даного методу до задачі згладжування маршруту і усунення «викидів». Однак для подальшого підвищення якості роботи фільтра, необхідна додаткова обробка послідовності координат з метою усунення надлишкових точок, що виникають при відсутності руху спостережуваного об'єкта.

Середній показник точності визначення місцезнаходження покращено у 2, 3 рази.

Література

1. Спутниковые системы навигации [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: http://www.fcp-pbdd.ru/special_equipment/20042
2. GPS Overview [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.gps.gov/systems/gps/>
3. Stuff in space [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://stuffin.space/>
4. GPS_Navigation_Message [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Navigation_Message
5. TTFF (Hot start / Warm start / Cold start). [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: http://faq.holux.com/images/f/fd/What_is_GPS_cold_start.pdf
6. GPS | Wiki [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://wikipedia.org/wiki/GPS>

7. GPS Accuracy [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath>
8. NMEA data [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>
9. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>
10. Повышение точности позиционирования подвижных объектов на основе оригинальных методов фильтрации навигационных данных [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tochnosti-pozitsionirovaniya-podviznyh-obektov-na-osnove-originalnyh-metodov-filtratsii-navigatsionnyh-dannyh>
11. GNS7560 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://www1.futureelectronics.com/doc/ST-ERICSSON/GNS7560ET2UM.pdf>
12. GPX: the GPS Exchange Format [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://www.topografix.com/gpx.asp>

References

1. Satellites navigation system - Retrieved from http://www.fcp-pbdd.ru/special_equipment/20042
2. GPS Overview - Retrieved from <https://www.gps.gov/systems/gps/>
3. Stuff in space - Retrieved from <http://stuffin.space/>
4. GPS_Navigation_Message - Retrieved from http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Navigation_Message
5. TTFF (Hot start / Warm start / Cold start) - Retrieved from http://faq.holux.com/images/f/fd/What_is_GPS_cold_start.pdf
6. GPS | Wiki - Retrieved from <https://wikipedia.org/wiki/GPS>
7. GPS Accuracy - Retrieved from <http://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath>
8. NMEA data - Retrieved from <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>

9. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems - Retrieved from <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>
10. Increase of positioning accuracy of mobile objects on the basis of original methods of filtering navigational data - Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tochnosti-pozitsionirovaniya-podvizhnyh-obektov-na-osnove-originalnyh-metodov-filtratsii-navigatsionnyh-dannyh>
11. GNS7560 - Retrieved from <http://www1.futureelectronics.com/doc/ST-ERICSSON/GNS7560ET2UM>
12. GPX: the GPS Exchange Format - Retrieved from <http://www.topografix.com/gpx.asp>

Одержано 07.12.2017

Про авторів:

Соколенко Олександр Сергійович,
магістрант,
Національний технічний
університет України
"КПІ імені Ігоря Сікорського".
Кількість наукових публікацій в
українських виданнях – 1.
<https://orcid.org/0000-0001-6943-0533/>

Дорошенко Анатолій Юхимович,
доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу теорії
комп'ютерних обчислень
Інституту програмних систем
НАН України,
професор кафедри автоматички
і управління в технічних системах НТУУ
"КПІ імені Ігоря Сікорського".
Кількість наукових публікацій в
українських виданнях – понад 150.
Кількість наукових публікацій в
зарубіжних виданнях – понад 50.
Індекс Хірша – 5.
<http://orcid.org/0000-0002-8435-1451>.

Місце роботи авторів:

Національний технічний
університет України
"КПІ імені Ігоря Сікорського".
03056, Київ, проспект Перемоги, 37.
E-mail: doroshenkoanatoliy2@gmail.com,
alex.sklnk@gmail.com