

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ІНЕРЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ
АЛГОРИТМУ КАЛМАНА****V.L.Dunets Ph.D., Associate professor; A.V. Khyh****FORECASTING THE TRAJECTORY OF INERTIAL OBJECTS USING THE
KALMAN ALGORITHM**

Прогнозування траєкторії рухомих об'єктів є актуальною задачею для систем навігації, зокрема керування безпілотними літальними апаратами. Основна складність при вирішенні цієї проблеми полягає у наявності значних шумів у вимірюваннях координат та швидкостей об'єкта, що призводить до неприпустимих похибок при використанні простих методів екстраполяції. Для вирішення цієї проблеми запропоновано застосувати фільтр Калмана [1-5] — оптимального рекурсивного алгоритму, що забезпечує найбільш точне оцінювання стану динамічної системи шляхом інтеграції зашумлених вимірювань та моделі руху об'єкта. Для побудови фільтра розроблено математична модель динаміки інерційного об'єкта у двовимірному просторі, де рух описується вектором стану $x=[x,y,v_x,v_y]^T$, а динаміка визначається рівняннями з урахуванням гравітаційного прискорення та сил опору повітря, які пропорційні квадрату швидкості. Модель простору станів представлена у дискретній формі з матрицею переходу F , а матриця вимірювань H відображає можливість прямого вимірювання всіх компонент вектора стану. При цьому, враховано вплив двох типів невизначеностей: вимірювальні шуми змодельовані білим гаусовим процесом зі стандартними відхиленнями 5 м для координат та 2 м/с для швидкостей, а процесні шуми відображають невраховані фактори динаміки, маючи стандартні відхилення для прискорень 0,5 м/с². На основі цієї моделі реалізований алгоритм фільтрації Калмана рекурсивно виконує етапи прогнозування апіорної оцінки стану та корекції, де ключовим елементом є коефіцієнт посилення Калмана, що оптимально зважує довіру до моделі та вимірювань.

Чисельне моделювання траєкторії об'єкта, виконане на часовому інтервалі 20 секунд з кроком 0,1 секунди, підтвердило значну ефективність розробленого підходу. Результати показали, що середньоквадратична похибка (RMSE) оцінювання положення фільтром Калмана виявилася суттєво нижчою за похибку безпосередніх зашумлених вимірювань. Фільтровані оцінки положення мали похибку лише в кілька метрів, тоді як прямі вимірювання сягали 5 м, що доводить оптимальність поєднання інформації з моделі та експериментальних даних. Фільтр Калмана забезпечив ефективне згладжування зашумлених даних та точне відновлення справжньої траєкторії руху. Коректність та консистентність роботи фільтра підтверджено аналізом послідовності інновацій, які демонстрували властивості білого шуму з нульовим математичним сподіванням. Графіки інновацій положення та швидкості (Рис. 1) ілюструють, що похибки оцінювання залишаються в межах трикратного стандартного відхилення, визначеного коваріаційною матрицею. Крім оцінювання поточного стану, на основі останньої оцінки було виконано прогнозування майбутньої траєкторії на 5 секунд вперед шляхом ітеративної екстраполяції. Незважаючи на природне зростання коваріаційної матриці похибки прогнозу, що відображає накопичення невизначеності, траєкторія може бути передбачена з прийнятною точністю. Можливість квантифікації

невизначеності через коваріаційну матрицю є особливо важливою, оскільки дає змогу будувати довірчі інтервали для оцінки надійності прогнозів.

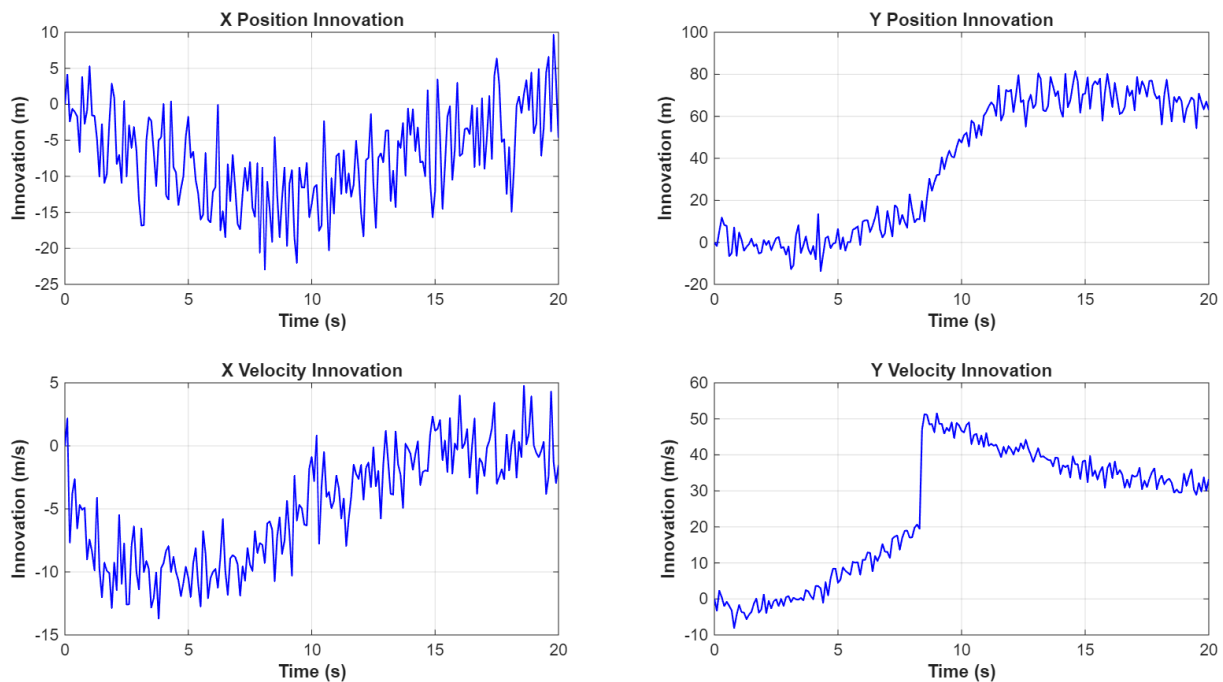


Рисунок 1. Графіки інновацій положення та швидкості

Таким чином, застосування фільтра Калмана для прогнозування траєкторії інерційних об'єктів демонструє високу ефективність у задачах оцінювання стану в умовах вимірювальних шумів, забезпечуючи суттєве підвищення точності порівняно з прямими вимірюваннями. Можливість квантифікації невизначеності робить цей метод надійним інструментом для оцінки надійності прогнозів. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розширенні моделі на тривимірний простір, впровадженні адаптивних алгоритмів для оцінювання параметрів шумів у реальному часі, а також розробці модифікацій для систем з нелінійною динамікою, зокрема розширеного фільтра Калмана, для більш точного врахування складних факторів опору повітря та інших нелінійних впливів.

Література

1. Тимків П.О. Верифікація удосконаленого методу визначення коефіцієнтів фільтра Калмана у низько інтенсивній електроретинографії. «ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті)»: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя 22-24 травня 2018 року). Тернопіль. С.22-23.
2. Pavlo Tymkiv, Yuriy Leshchyshyn. Algorithm Reliability of Kalman Filter Coefficients Determination for Low - Intensity Electoretino signal. «Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)»: Works of XVI internation alconference (Polyana-Svalyava, February 26 – March 2, 2019). Polyana. pp. 7.14-7.18.
4. Mur-Artal, R., & Montiel, J. M. M. (2015). ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5), 1147-1163.
4. Skog, I., &Handel, P. (2009). In-field calibration of a low-cost inertial measurement unit. *In Proc. of the 2009 Int. Conf. on Embedded Software and Systems*.

5. Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (1997). A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems. *In Proc. SPIE AeroSense*.

УДК 621.3

В. Л. Дунець к.т.н., доцент; Н. А. Гульовський

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ЦИФРОВА РАДІОРЕЛЕЙНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

V.L.Dunets Ph.D., Associate professor; N.A. Gulovsky

DIGITAL RADIO RELAY COMMUNICATION LINE FOR HIGH-SPEED DATA TRANSMISSION FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

Високошвидкісна та надійна передача даних з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є актуальною задачею. На сьогодні існує широкий спектр методів передавання даних — від провідних (оптоволоконних) до безпроводних (радіо телекомунікаційних) систем, кожна з яких має свої області застосування та переваги.

З розвитком смартфонів, інтернет-пристроїв виникла необхідність у високошвидкісній передачі інформації. Особливу увагу набули системи, здатні передавати відео високої роздільності в режимі реального часу. Такі технології дають змогу здійснювати моніторинг у реальному часі лісових масивів, полів, потенційно небезпечних територій а також у сучасних військових конфліктах, де швидкість передачі інформації є критично важливою.

Основна складність при вирішенні цієї проблеми полягає у передачі відео в реальному часі з БЛА, зокрема, в забезпеченні стабільного та швидкого зв'язку при обмеженій пропускній здатності, високій затримці, енергоспоживанні та потребі в безпечній передачі даних.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано застосувати обладнання Mikrotik LHG XL 52 ac, що дає змогу створити двосмугову цифрову радіорелейну лінію РРЛ (Рис.1) на відстань у кілька десятків кілометрів: основний канал 5 ГГц зі швидкістю до 600 Мбіт/с та резервний канал 2,4 ГГц зі швидкістю до 260 Мбіт/с. Побудована тестова система високоякісної передачі відео передбачає налаштування зв'язку типу «точка-точка» та дослідження характеристик каналу на відстані (>10 км) на основі РРЛ, створеної за стандартами IEEE 802.11, які зазвичай застосовуються у системах безпроводного зв'язку типу «точка-багатоточка» з локальним покриттям у межах сотень метрів.

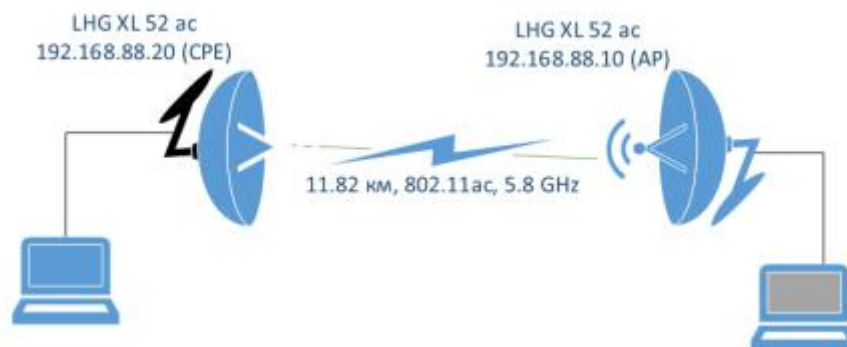


Рисунок 1. Схема підключення прийомопередавачів РРЛ Mikrotik та кінцевих терміналів з IP-адресами