

С.С. Ільєнко, к.т.н., А.В. Ільєнко, к.т.н., В.В. Тихонов к.т.н.
(Національний авіаційний університет, Україна)

Обґрунтування ефективності інтеграції та застосування спеціалізованих типів БПЛА в процес технічного обслуговування інфраструктури високовольтних ЛЕП

Широке застосування БПЛА для підвищення якості технічного обслуговування високовольтних ЛЕП набуває все більшого розповсюдження та використовується компаніями енергетичного сектору України. Енергоефективність та швидкість обробки інформації про стан ЛЕП за допомогою спеціалізованого ПЗ формує потрібну звітну інформацію якісного періодичного обслуговування високовольтних ЛЕП особливо важкодоступних місць їх прокладання. Точне виявлення ЛЕП за допомогою БПЛА базується на методах, які використовують глибоко контрольовані нейронні мережі, що здатні обробляти зображення у вигляді піксельного формату тривимірних даних хмар точок.

Вступ

Застосування спеціалізованих типів БПЛА, які інтегровані в процес періодичного технічного обслуговування (визначення технічного стану) інфраструктури високовольтних ЛЕП на сучасному етапі відбувається для вирішення таких завдань безпечного та ефективного застосування БПЛА поблизу струмопровідних частин ЛЕП, що перебувають під напругою, а також використання спеціалізованого програмного забезпечення для формування звітної інформації щодо якісного періодичного обслуговування дослідних ЛЕП (картографічна обробка участків з складним рельєфом прокладання, 2D та 3D-модельовання, зберігання та періодичне наповнення потрібної інформації стану дослідних ЛЕП). На даний час на ринку України є ліцензовані компанії, які надають спеціалізовані БПЛА (приклад на рис.1) які мають технічні можливості впоратись з задачами що цікавлять енергокомпанії, що обслуговують високовольтні ЛЕП. Досить суттєве зниження затрат, що несуть обслуговуючі компанії, в співставленні з затратами на традиційні методи обслуговування високовольтних ЛЕП, вже опрацювали та оцінили такі компанії як ДТЕК вже з початку 20-их років цього десятиріччя.



Рис. 1. Спеціалізовані БПЛА на ринку України для задач технічного обслуговування інфраструктури високовольтних ЛЕП (а) –Flyability Elios; б) - DJI Matrice)

Основне технічне обладнання для БПЛА, що може застосовуватись для обслуговування дослідних високовольтних ЛЕП: наземна станція управління БПЛА; відео/фото RGB дуо-камери ІЧ та УФ діапазонів; термодатчики потрібної чутливості; геолокаційна системи GPS, тощо.

На практиці вже отримано статистичну інформацію енергоефективного використання таких БПЛА на необхідних нам ЛЕП. Такі БПЛА виявляють потенційні дефекти та несправності, пошкоджені ізолятори, виявляють та оцінюють стан фарбового покриття, можуть збирати геолокаційні дані та формувати 3D-моделі рослинності, потенційно заважаючої стабільній роботі струмопровідним елементам високовольтних ЛЕП, здатен виявити ефекти «корони», гніздіння птахів на опорах, тощо.

Розглянемо приклад автоматичного ідентифікування потрібної високовольтної ЛЕП та врахування наявних перешкод в її зоні обслуговування (рис. 2). Задача зводиться до визначення коридору прокладання ЛЕП по конкретній місцевості та виявлення потенційно небезпечних завад цього коридорі. Основна задача та ціль польоту БПЛА над потрібною нам ЛЕП – отримання зображення та наземних контрольних точок (параметр DSK). На їх основі та за допомогою налаштування пучка блоків (ВВА) дослідний коридор ЛЕП зображується у вигляді зовнішньоорієнтованих зображень. Застосовуючи платформи PLAMEC або SPMEC з певної кількості стереозображень (згідно рис.2 а - мінімум двох смуг) формуються 3D-векторна візуалізація ЛЕП. Наступним етапом є формування даних зад-для отримання 3D-зображень ЛЕП (алгоритм на рис. 2 б). Наступним кроком є автоматична ідентифікація та локалізація перешкод шляхом обробки оптичних зображень. Це потрібно виконати, застосувавши метод розрахунку, що прораховує просторову відстань між дослідною ЛЕП та хмарою точок (орієнтирів) на земній поверхні.

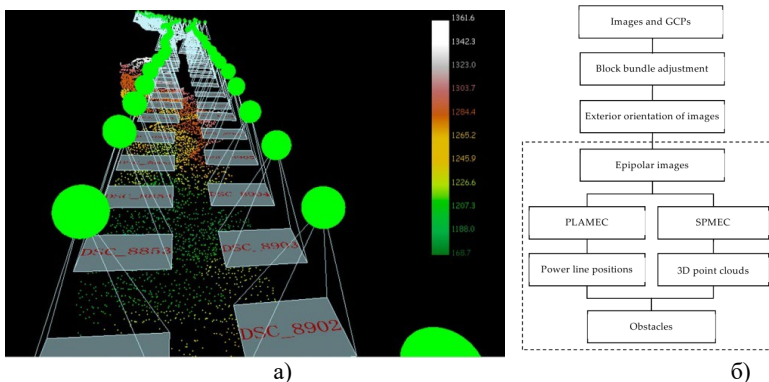


Рис.2. Автоматичне ідентифікування дослідної високовольтної ЛЕП: а - схема польотів по двом смугам БПЛА вздовж ЛЕП; б – алгоритмічне автоматичне виявлення перешкод високовольтних ЛЕП

Ефективність фотозйомки напряму залежить від висоти польоту БПЛА. Але на більшій висоті струмопровідні частини занадто тонкі задля чіткого їх

фіксування. Для якісного отримання інформації діаметр струмопровідної частини повинен становити близько 4 см., що становить від одного до трьох пікселів, тому й приймається $GSD \approx 4$ см. Бічне перекриття стереозображень не менше 80% в обидва боки польоту БПЛА з прив'язкою до геолокації зображень за допомогою системи GPS.

Поетапне виявлення струмопровідних частин ЛЕП з стандартного зображення (рис.3): 1) фіксація рельєфних особливостей прокладання ЛЕП за допомогою оператора коефіцієнта сірого; 2) сегментація ЛЕП на основі однакових умов лінії; 3) на основі формування бази «попередніх знань» виділення векторів ЛЕП.

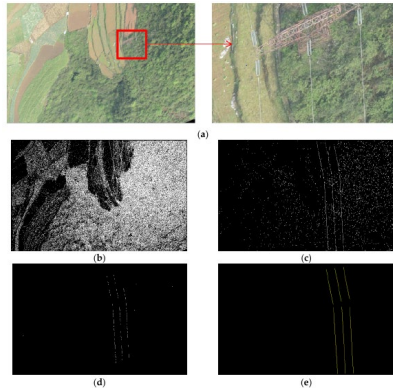


Рис. 3. Формування поетапної візуалізації струмопровідних частин дослідної ЛЕП: а) візуальне стереозображення; б) виявлення особливостей ЛЕП оператором «сірого коефіцієнта»; с, d) сегментація ЛЕП за допомогою умов еквівалентної лінії; е) витягнуті вектори ЛЕП (2D векторне виділення)

Ще один спосіб ідентифікації струмопровідних елементів високовольтних ЛЕП на високоякісних кольорових зображеннях побудований на обробці структурованого обмеження шляхом використання нейронної мережі, що працює над обробкою зображень. Тривимірні дані хмар точок зображення обробляються на піксельному рівні (використовується набір даних PLDM та PLDU). Це такі БПЛА, що працюють з бортовою платформою NVIDIA Jetson TX2, або архітектурою мережі VGG16. Приклад виявлення струмопровідних частин ЛЕП VGG16 показано на рис.4

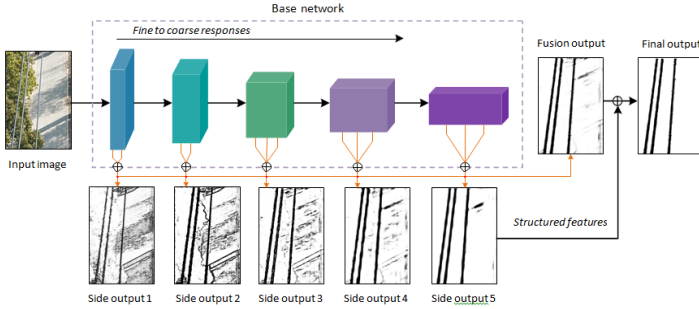


Рис.4. Виділення струмопровідних частин ЛЕП за допомогою архітектури мережі VGG16

Методика виділення струмопровідних частин ЛЕП за допомогою архітектури мережі VGG16 відома та базується на обробі отриманих зображень. Відсоток пікселів струмопровідних елементів в загальному зображенні дослідної ЛЕП (рис.4) становить значно менше 10%. За такої ситуації ефективним є застосування класово-збалансованої крос-ентропійної функції. Функція β здатна зменшити дисбаланс між краєвими та некраєвими пікселями. Математична функція допустимих втрат якості кожного зображення на етапі m :

$$L_{side}^{(m)}(x_i; W, w^{(m)}) = -\beta \sum_{i \in Y^+} \log P(y_i = 1 | x_i; W, w^{(m)}) - \lambda(1 - \beta) \sum_{i \in Y^-} \log(1 - P(y_i = 0 | x_i; W, w^{(m)}))$$

$$\beta = \frac{|Y^-|}{|Y^+| + |Y^-|}$$

де Y^+ та Y^- – пікселі дослідної ЛЕП та пікселі фонових міток з орієнтиром у вигляді земної поверхні. Параметр λ є коефіцієнтом визначення ваги в різних наборах даних. Значення x_i – активація пікселя у вихідному вхідному зображенні X_i . Відповідно значення y_i – основна мітка істинності. W і $w^{(m)}$ є параметром нейронної мережі з кожного рівня бічного виводу. $P(x)$ – функція відображення значення активації між 0 і 1. Всі побічні виходи лінійно об'єднуються за вагою h , що дає змогу отримати остаточний результат синтезу. Реакція виходу y_{fuse} розраховується:

$$y_{fuse} = P(\sum_m h_m x_{side}^{(m)})$$

де $x^{(m)}$ – значення активації бічного вихідного шару m , карта країв кожного бічного виводу представлена як $y_{side} = P(x^{(m)})$. Втрати шару обчислюються за допомогою збалансованої за класом функції втрат:

$$L_{fuse} = loss(y, y_{fuse}).$$

Наступна важлива та необхідна задача навченої за нашими вимогами нейронної мережі полягає в зменшенні шуму, та зводиться до мінімуму шляхом використання стандартного стохастичного градієнтного зниження. Функ-

ція оптимізації використання L_{fuse} і L_{side} має такий вигляд:

$$(W, w, h)^* = \arg \min (\sum_m a_m \cdot L_{side}^{(m)} + L_{fuse})$$

Вимірювання площі дає змогу відфільтрувати зайві дрібні фрагменти:

$$K = area_{Lmax}/area$$

де $area_{Lmax}$ – пікселі найдовшого фрагмента.

Фрагмент набагато менший за стандартний у випадку, якщо K перевищує встановлене порогове значення T_A , та відхиляється як шум. Фільтрування за допомогою вимірювання орієнтації має наступний вигляд:

$$P = ||\theta_{Lmax} - |\theta||$$

де θ – кут між фрагментом і позитивним напрямком горизонтальної осі, а θ_{Lmax} – орієнтація фрагмента з найбільшою довжиною. P може визначатись у вигляді порогового значення T_θ , та за досягнення відповідних значень буде вважатись шумом. Фрагмент зображення буде вважатися частиною струмопроводної мережі якщо виконується вимога (T_A, T_θ) або $(1.5T_A, 0.5T_\theta)$.

Структуровані функції з першого до п'ятого бокового виходу є метою видалення ізольованих шумних фрагментів (показані на рис.5) поетапно: оригінальні входи, карти функцій, витягнуті з першого бічного виходу до п'ятого бічного виходу.

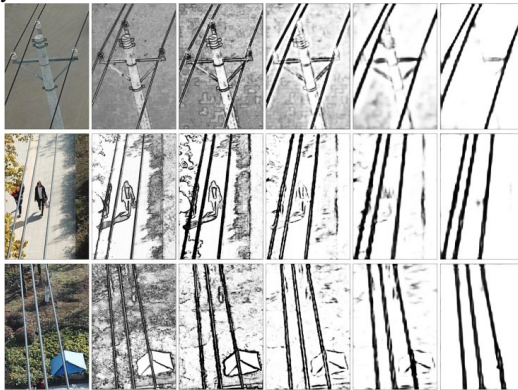


Рис. 5. Виділення струмопроводних елементів від грубого до тонкого бокового виходів

Висновок

Спеціалізовані типи БПЛА, що наразі вже досить масово використовуються в процесі технічного обслуговування інфраструктури високовольтних ЛЕП займають все більш вагомe місце для вирішення завдань безпечної та ефективної експлуатації високовольтних ЛЕП, що перебувають під напругою. Використання спеціалізованого програмного забезпечення для формування звітної інформації щодо якісного періодичного обслуговування дослідних ЛЕП формує відчутний економічний ефект та скорочує термін проведення експлуатаційних заходів без втрати якості такого виду робіт.

Список літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року [Електронний ресурс] // БІЛА КНИГА. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>.
2. План розвитку розподільних електричних мереж на 2016-2025 роки [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України – Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=24472812.
3. Гончаров Є. В., Крюкова Н. В., Вітвицька С. О., Марков В. С., Поляков І. В. Розвиток, конструювання та використання безпілотних літальних апаратів для ліній електропередач. Вісник Національного технічного університету. «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 15-20. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.03
4. Zhang H, Yang W, Yu H, Zhang H, Xia G-S. Detecting Power Lines in UAV Images with Convolutional Features and Structured Constraints. Remote Sensing. 2019; 11(11):1342. <https://doi.org/10.3390/rs11111342>.
5. Zhang, Yong, Xiuxiao Yuan, Wenzhuo Li, and Shiyu Chen. 2017. "Automatic Power Line Inspection Using UAV Images" Remote Sensing 9, no. 8: 824. <https://doi.org/10.3390/rs9080824>