

รูปแบบการตรวจสอบความเสียหาย โครงข่ายสายส่งไฟฟ้าด้วยอากาศยานไร้คนบิน

สุริยะเวช บุญธรรารัตน์^{1*}, อีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ^{2**} และ อรประภา ภูมิเมภาญจนะ โรแบร์^{3***}

วันที่รับ 30 มีนาคม 2563 วันที่แก้ไข 15 เมษายน 2563 วันที่ตอบรับ 17 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

หนึ่งในการสร้างความเชื่อมั่นและเสถียรภาพทางพลังงาน โดยเฉพาะระบบสายส่งไฟฟ้า มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตและสภาพทางเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้น การซ่อมบำรุงให้สายส่งไฟฟ้าคงสภาพและใช้งานได้อย่างต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีสำหรับการตรวจสอบสถานะสายส่งไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ณ ปัจจุบัน เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนบิน (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) ได้ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้สำหรับสำรวจเพื่อการตรวจหาตำแหน่งความเสียหายของอุปกรณ์สายส่งไฟฟ้า ประกอบกับสามารถตรวจสอบสาเหตุการเสื่อมสภาพได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น ผู้ใช้งานอากาศยานไร้คนบินจึงจำเป็นต้องเรียนรู้ลักษณะของอากาศยาน รวมถึงข้อดี-ข้อเสีย สำหรับการใช้งานในแต่ละภารกิจ โดยการใช้งานอากาศยานไร้คนบินในแต่ละครั้งต้องคำนึงถึงสภาพภูมิประเทศเป็นสำคัญ อนึ่ง ปัจจัยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายส่งไฟฟ้ามักมีสาเหตุจากการดิสชาร์จทางไฟฟ้า (Partial discharge) ซึ่งกระบวนการเกิดความเสียหายของสายส่งไฟฟ้านี้มีลักษณะการแผ่ของสนามแม่เหล็กเป็นรูปแบบวงแหวนโคโรนา (Corona ring) โดยรอบอุปกรณ์ ซึ่งการแผ่ของสนามแม่เหล็กนี้เองมีอิทธิพลต่อการบังคับควบคุมและการสื่อสารระหว่างสถานีภาคพื้นและอากาศยานไร้คนบิน ทำให้การใช้งานอากาศยานของผู้บังคับการต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยสรุป เนื่องจากการตรวจสอบระบบสายส่งไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่มีความเสี่ยงแตกต่างกันไป ดังนั้น รูปแบบการใช้งานอากาศยานจำเป็นต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์สำหรับการวางแผนการบิน (Planning photogrammetric surveys) อีกทั้งรูปแบบเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบความเสียหายต้องมีความจำเพาะและเหมาะสมต่อการตรวจวัด ทั้งนี้ การใช้งานอากาศยานไร้คนบิน ผู้บังคับอากาศยานต้องบริหารความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นเป็นสำคัญหรือพร้อมปรับเปลี่ยนวิธีการตรวจสอบใด ๆ ตามความเหมาะสม

คำสำคัญ : อากาศยานไร้คนบิน, การดิสชาร์จทางไฟฟ้า, การตรวจวัดด้วยรังสี UV

¹ ฝ่ายองค์ความรู้และการเผยแพร่, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร

* ผู้แต่ง, อีเมล: suriyawate.b@dti.or.th

** ผู้แต่ง, อีเมล: teerawong@msu.ac.th

*** ผู้แต่ง, อีเมล: robert_o@silpakorn.edu

An approach to the inspection of damages of power grid network using unmanned aerial technology

Suriyawate Boonthalarath ^{1*}, Theerawong Laohsuwan ^{2**}
and Ornprapa Pummakarnchana Robert ^{3***}

Received 30 March 2020, Revised 15 April 2020, Accepted 17 April 2020

Abstract

One of the ways to build confidence on energy stability especially is to maintain good condition of a power transmission system because an adverse effect causes difficulties in living everyday life and ultimately the economy of the country. In order to keep the transmission line stable and continuously reliable, it is necessary to look for technologies for the checkup of transmission line status. At present, unmanned aerial technology has been developed and applied for surveying and detecting positions of an equipment grid as well as for accurately determining the cause of deterioration. Therefore, unmanned technology users need to learn the characteristics of the aircraft as well as the pros and cons for use in each mission. During the time of use of unmanned aircraft, topology must be taken into account. In addition, damage factors to the power transmission line are usually caused by the electrical discharge or partial discharge, whose process of damage to the power transmission line has associated with it characteristics of radiating the magnetic field in form of corona ring around a device. The spread of this magnetic field influences the control and communications between ground stations and unmanned aircraft, causing the aircraft operators to take extra care during the operation of the aircraft. Finally, the power transmission system in each area has different risks caused by different topology. Therefore, the use of aircraft requires expertise and experience to plan missions of photogrammetric surveys and to handle tools for checking damages specifically and suitably for measurement. In addition, the aircraft operator must exercise judgmental management upon significant risks or be ready to adjust measures in place for any incurring and popup incidence in the field

Keywords : Unmanned technology, electrical discharge, UV radiating inspection

¹ Knowledge and Publication Management Department, Defence Technology Institute

² Department of Physics, Faculty of Science, Maharakham University

³ Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University

* Corresponding author, E-mail: suriyawate.b@dti.or.th

** Corresponding author, E-mail: teerawong@msu.ac.th

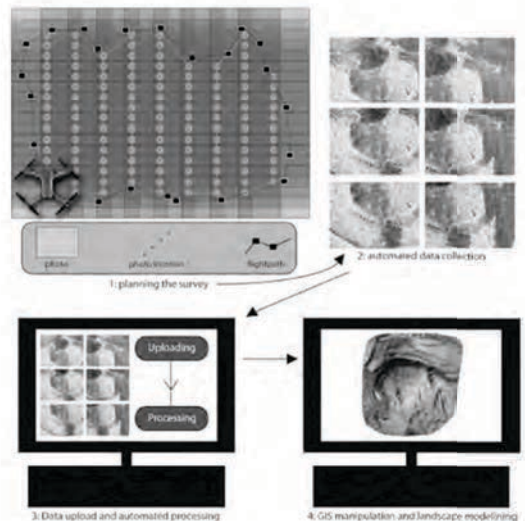
*** Corresponding author, E-mail: robert_o@silpakorn.edu

1. บทนำ

กว่าสองทศวรรษในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนบิน (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) ทั้งแบบปีกนิ่งและปีกหมุนให้มีขนาดเล็กลง ปลอดภัย รวดเร็ว และลดต้นทุน [1] โดยมีได้มุ่งหวังในการกิจเฉพาะด้าน อย่างการสำรวจเพื่อการจัดทำแผนที่ หรือการควบคุมด้านยุทธวิธีอีกต่อไป หากแต่เป็นการพัฒนาอากาศยานไร้คนบินให้ก้าวเข้าสู่การประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น ๆ รวมถึงการขยายขอบเขตการใช้งานเข้าสู่ภาคพลเรือนมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น การขนส่งสินค้า [2] การช่วยเหลือด้านภัยพิบัติ [3] รวมถึงเพื่อสันตินาการ [4] เป็นต้น ทั้งนี้ การใช้อากาศยานไร้คนบินภาคพลเรือนส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้งานเพื่อสำรวจระบบสาธารณูปโภคและซ่อมแซมโครงสร้างขั้นพื้นฐาน ดังจะเห็นได้จากการสำรวจพื้นที่เพื่อการสร้างถนน การสำรวจแหล่งน้ำเพื่อสร้างเขื่อน และการสำรวจสายส่งเพื่อวางแผนสายไฟฟ้าสำหรับใช้กับชุมชน อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจและการตรวจวัดด้วยอากาศยานไร้คนบินจำเป็นต้องผนวกองค์ความรู้จากหลากหลายสาขาเชิงระบบร่วมกัน (Numerous disciplines) [5-7] เพื่อสังเคราะห์ข้อมูลและประเมินผลกระทบเพื่อการจัดการข้อมูล (Data management) อย่างเป็นระบบ ดังนั้น ผู้ใช้งานอากาศยานไร้คนบินจำเป็นต้องเรียนรู้คุณสมบัติอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ให้เหมาะสมในการกิจแต่ละด้าน รวมถึงการใช้งานต้องสอดคล้องกับประเภทของอากาศยานไร้คนบินตามลักษณะงาน ตลอดจนข้อดีข้อด้อยตามวัตถุประสงค์ของอากาศยานไร้คนบินในแต่ละภารกิจ

จากการขยายตัวของประชากร ภาคสังคม และเศรษฐกิจที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีความต้องการใช้พลังงาน โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว การสำรวจพื้นที่ภูมิประเทศเพื่อขยายโครงข่ายและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า พร้อมการสำรวจเพื่อการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโครงข่ายระบบไฟฟ้าจึงมีความจำเป็น

อย่างยิ่งที่ต้องใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย หน่วยงานผู้รับผิดชอบจึงได้อาศัยข้อดีของการใช้อากาศยานไร้คนบินที่สามารถสำรวจพื้นที่ภูมิประเทศขนาดใหญ่รวมถึงระบบสาธารณูปโภคที่มีอยู่ก่อนแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งใช้เวลาไม่นานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสำรวจในรูปแบบเดิมที่เคยใช้กันมามากยิ่งขึ้น [8] ซึ่งหลักการทั่วไปของการใช้อากาศยานไร้คนบินคือการเก็บภาพถ่ายทางอากาศพร้อมพิกัดภูมิศาสตร์จากระบบ Global Navigation Satellite System (GNSS) และระบบตรวจวัดความคลาดเคลื่อนเชิงพิทช์ (Inertial Measurement Unit: IMU) จากการสำรวจครอบคลุมพื้นที่สังเกตการณ์ ในท้ายที่สุดจะได้ภาพถ่ายภูมิประเทศความละเอียดสูง (Orthomosaic) ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและอ้างอิงระวางตำแหน่ง ระยะทางของระบบสาธารณูปโภคนั้น ๆ ได้อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการตรวจสอบตำแหน่งเพื่อค้นหาพิกัดและเชื่อมโยงโครงข่ายสามารถประเมินข้อมูลจากภาพถ่ายภูมิประเทศความละเอียดสูงได้โดยทันที [9] โดยรูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลตามขั้นตอนการตรวจสอบตำแหน่งเพื่อค้นหาพิกัดโดยอากาศยานไร้คนบิน



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลตามขั้นตอนการตรวจสอบตำแหน่งเพื่อค้นหาพิกัด โดยอากาศยานไร้คนบิน [9]

สำหรับการบริการซ่อมบำรุงโครงข่ายเสาไฟฟ้า ผู้ใช้อากาศยานไร้คนบินต้องอาศัยการตรวจสอบความเสียหายจากอุปกรณ์ตรวจวัด และต้องตระหนักถึงอันตรายจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบบริเวณเสาไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดิสชาร์จทางไฟฟ้า (Partial discharge) [10-13] ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการเกิดความเสียหายของโครงข่ายเสาไฟฟ้าและลดทอนประสิทธิภาพการส่งกระแสไฟจากโครงข่ายสายส่ง [14] จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีผู้ศึกษาความเสียหายของอุปกรณ์จากสาเหตุการเกิดการดิสชาร์จทางไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากต้นเหตุในหลายปัจจัย ได้แก่ มีฝนกรดบริเวณโครงข่าย การเกิดออกไซด์บนอุปกรณ์ รวมถึงการเกิด Corona discharges และ UV radiation [15-21] โดยจากปัจจัยข้างต้นทำให้เกิดสนามแม่เหล็กโดยรอบอุปกรณ์รั่วไหลผ่านระบบฉนวนของโครงข่ายสายส่งเป็นประจุอิเล็กตรอนปะปนกับอากาศ ณ สิ่งแวดล้อมรอบนอกและเกิดเป็นวงแหวนโคโรนาขึ้น (Corona ring) ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของระบบสายส่งลดลง เกิดคลื่นวิทยุแทรกสอด (Radio interference) ตามรอยรั่วของฉนวนของอุปกรณ์ ยิ่งไปกว่านั้นหากไม่เร่งดำเนินการแก้ไขจุดบกพร่องนี้จะนำมาสู่การสูญเสียระบบฉนวนทั้งระบบ และลุกลามภายในอุปกรณ์นั้น ๆ ทำให้ไม่มีระบบฉนวนคุ้มกันการเกิดไฟฟ้าลัดวงจร อีกทั้งเกิดการขยายตัวของสนามแม่เหล็กประมาณการคือ 0.3–0.4 kV/mm [22] ตามตัวอย่างรูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่เสียหายจากการเกิดการดิสชาร์จทางไฟฟ้านำไปสู่การสูญเสียโครงข่ายระบบสาธารณูปโภคต่อไป



รูปที่ 2 การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์บนระบบสายส่งไฟฟ้าในสภาวะกำลังไฟสูง (High voltage) จากการทดสอบโดยการเร่งอายุหลัง 5 ปี [22]

การศึกษาในครั้งนี้ จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาอากาศยานไร้คนบินผนวกเข้ากับองค์ความรู้เชิงป้องกันจากความเสียหายของระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐาน ซึ่งจะนำไปสู่ขั้นตอนการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบ (Inspection) ความเสียหายโครงข่ายสายส่งไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการประยุกต์ใช้งานอากาศยานไร้คนบิน ก่อนการเกิดสถานการณ์ฉุกเฉินเพื่อการเผชิญเหตุภาคประชาสังคม (Dual used) อีกทั้งได้นำเสนอผลการศึกษาการใช้เทคโนโลยีด้านอากาศยานไร้คนบินเพื่อการสำรวจพร้อมอธิบายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบหาสาเหตุข้อบกพร่อง และแนวโน้มการความเสียหายของอุปกรณ์ด้วยเครื่องตรวจวัด โดยมุ่งเน้นกับพื้นที่การเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

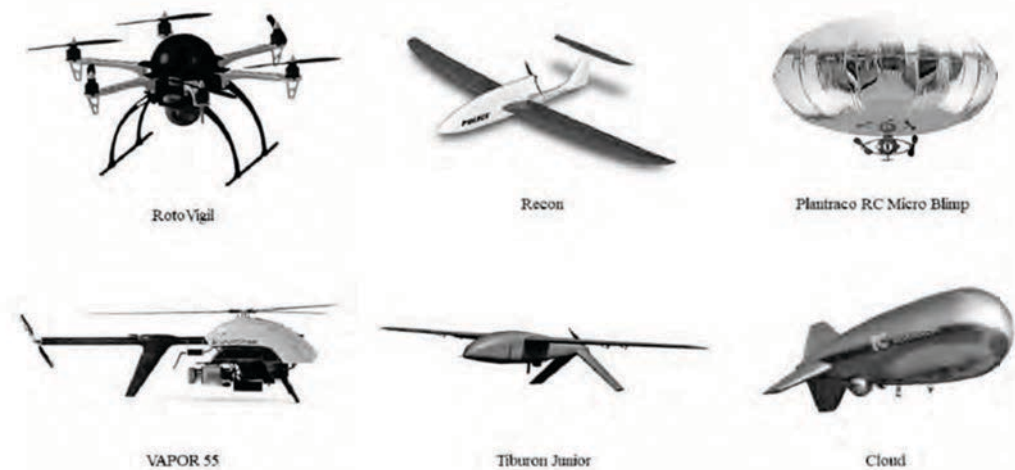
2. ชนิดของอากาศยานไร้คนบินและชนิดของระบบตรวจวัด

2.1 ชนิดของอากาศยานไร้คนบิน

การปฏิบัติการในรูปแบบต่าง ๆ นั้น ผู้ใช้อากาศยานไร้คนบินจำเป็นต้องเรียนรู้คุณลักษณะและโครงสร้างพร้อมข้อดี - ข้อด้อย ของอากาศยานไร้คนบินชนิดต่าง ๆ ตามแต่ละภารกิจ เพื่อที่จะเลือกใช้อากาศยานไร้คนบินให้เหมาะสมกับภารกิจและช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุต่อการนำมาใช้ โดยทั่วไปสามารถจัดแบ่งอากาศยานไร้คนบินตามโครงสร้างการใช้งานได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ อากาศยานไร้คนบินแบบปีกนิ่ง (Fixed-Wings) แบบปีกหมุน (Rotary-Wings) และแบบโพนมยาน (Airships) แสดงตามรูปที่ 3 ซึ่งลักษณะทั่วไปของอากาศยานไร้คนบินแบบปีกนิ่งสามารถทำความเร็วและมีระยะการบินได้ยาวนานกว่าอากาศยานไร้คนบินแบบปีกหมุนและแบบโพนมยาน เนื่องจากโครงสร้างของอากาศยานไร้คนบินแบบปีกนิ่งถูกออกแบบตามหลักอากาศพลศาสตร์ ส่งผลให้มีความเสถียรขณะลอยตัวและใช้พลังงานในการบินน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม อากาศยานไร้คนบินแบบปีกนิ่งยังคงมีข้อด้อย ได้แก่ การไม่สามารถทำการบินในแนวตั้ง

และหยุดนิ่งกลางอากาศได้เหมือนอากาศยานไร้คนบินแบบปีกหมุน ด้วยเหตุนี้ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องคำนึง

ถึงการใช้งานตามภารกิจเป็นหลัก เพื่อเลือกรูปแบบอากาศยานไร้คนบินได้ตามความเหมาะสม



รูปที่ 3 ตัวอย่างการจัดแบ่งรูปแบบอากาศยานไร้คนบิน [23]

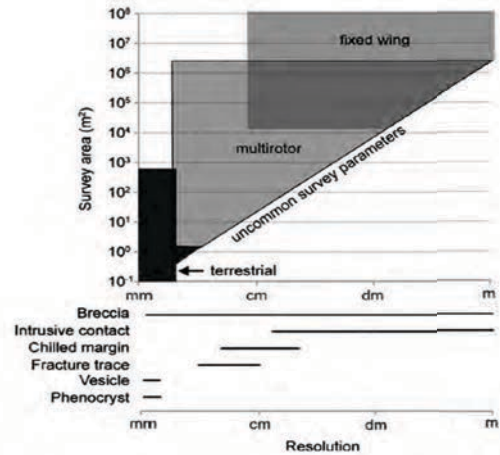
อากาศยานไร้คนบินแบบปีกหมุน เป็นอากาศยานที่นิยม ณ ปัจจุบัน เนื่องจากการบังคับควบคุมที่ง่ายกว่าอากาศยานไร้คนบินแบบปีกนิ่งและมีความสามารถลอยตัวกลางอากาศได้ ทำให้ลดอุบัติเหตุได้ในขณะที่ทำการบิน อีกทั้งการนำอากาศยานขึ้น - ลง สามารถขึ้นลงได้ตามแนวตั้ง ใช้พื้นที่น้อย ดังนั้นผู้ผลิตในปัจจุบันจึงมีการออกแบบให้มีขนาดหลากหลายและสะดวกต่อการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม จากรูปร่างอากาศยานที่มีลักษณะสวนทิศทางลม (Drag) ทำให้ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการทำการบิน ดังนั้นอากาศยานไร้คนบินแบบปีกหมุนจึงมีระยะเวลาสำหรับการบินที่ไม่ยาวนานนัก

ในส่วนของอากาศยานไร้คนบินแบบโพรเพลเลอร์สามารถแบ่งแยกประเภทได้อีก 3 ลักษณะย่อยตามรูปร่างลำเรือ (Hull Shapes) ได้แก่ non-rigid airships, semi-rigid airships และ rigid airships โดยในแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างที่รูปร่างลำเรือตามการใช้งาน ซึ่งถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการผลิตก๊าซภายในบอลูน (Internal pressure) ใช้สำหรับยกตัวในขณะที่ปฏิบัติงาน ณ

ปัจจุบัน อากาศยานไร้คนบินแบบโพรเพลเลอร์มีการออกแบบโครงสร้างที่หลากหลายเพื่อเพิ่มความสามารถในการบิน รวมถึงสามารถทำระยะการบินได้ยาวนานขึ้นและมีความเสถียรขณะลอยตัวกลางอากาศ จากข้อดีดังกล่าวนี้เองทำให้อากาศยานไร้คนบินแบบโพรเพลเลอร์มีคุณลักษณะการบินที่ครอบคลุมลักษณะการบินรูปแบบทั้งอากาศยานไร้คนบินแบบปีกนิ่งและปีกหมุนเข้าไว้ด้วยกัน [24] แต่ทว่าอากาศยานไร้คนบินแบบโพรเพลเลอร์จะมีความเสถียรกลางอากาศ ณ ความเร็วต่ำขณะทำการบิน และสามารถลอยตัวกลางอากาศได้เหมือนกับอากาศยานไร้คนบินแบบปีกหมุนเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำความเร็วได้ดีเหมือนอากาศยานไร้คนบินแบบปีกนิ่ง อีกทั้งอากาศยานไร้คนบินแบบโพรเพลเลอร์ยังมีสถานะการบินที่ไวต่ออุณหภูมิภายนอก โดยอากาศยานไร้คนบินแบบโพรเพลเลอร์เมื่อทำการบินในหัวเวลากลางวัน (อากาศร้อน) ความร้อนจากพื้นดินจะทำให้เกิดลมยกตัวทำให้มีแรงยกตัวจึงยกลำเรือลอยตัวสูงขึ้นได้ง่าย ดังนั้นการนำอากาศยานลงเป็นจึงเป็นเรื่องยากลำบาก ผู้บังคับการบินต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเป็นอย่างมากในการบังคับเครื่องลง

ในทางตรงกันข้าม ขณะที่ทำการบินในห้วงเวลากลางคืน (อากาศเย็น) ผู้บังคับการบินจำเป็นต้องใช้อากาศร้อนหรือ ก๊าซที่เบากว่าอากาศจำนวนมากเพื่อพองลำเรือให้ลอยตัว อยู่ได้ ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้อากาศยานรูปแบบดังกล่าวใน การกิจช่วยเหลือฉุกเฉิน (Emergency operation) หรือ ทำการถ่ายภาพภูมิประเทศในระยะใกล้ โดยเฉพาะกิจกรรม ประเภทในร่ม (Indoor application) [25-26] เท่านั้น

อนึ่ง จากการออกแบบรูปร่าง ลักษณะการบิน รวมถึงระบบการนำเครื่องขึ้น - ลง ของอากาศยานไร้คนบิน เพื่อตอบสนองในแต่ละภารกิจ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องคำนึง ถึงปัจจัยสำคัญก่อนการนำมาใช้ ได้แก่ ความสามารถในการทำความสูงขณะทำการบินของอากาศยาน (Flight altitude) ระยะเวลาและระยะทางทำการใน การทำการบิน (Duration and range) ความสามารถในการบรรทุกสัมภาระ (Payload characteristics) และขนาดพื้นที่และความละเอียดของภาพถ่ายแผนที่ 3 มิติ ดังแสดงตัวอย่างรายละเอียดตามรูปที่ 4 โดย ปัจจุบันแนวโน้มการวิจัยล้วนมุ่งเน้นการเพิ่มระยะเวลา และระยะทางทำการในการทำการบินเป็นสำคัญ [27] อย่างไรก็ตาม สำหรับผู้ใช้งานอากาศยานไร้คนบินกลับให้ ความสำคัญสำหรับการนำอากาศยาน ขึ้น - ลง ในแต่ละ ภูมิประเทศมากกว่า เนื่องจากการนำอากาศยานขึ้น - ลง มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและสร้างความเสียหาย ได้ในวงกว้างหากพื้นที่ทำการขึ้น - ลง ไม่เอื้ออำนวย ดังนั้น การพัฒนาอากาศยานไร้คนบินแบบขึ้น - ลงทางตั้ง (Vertical movement) จะสามารถตอบสนองผู้ใช้งานในอนาคตต่อไป ได้ดีกว่า เนื่องจากอากาศยานขึ้น - ลงทางตั้ง (VTOL) เป็นอากาศยานที่ช่วยลดปัญหาการนำเครื่องออก ปฏิบัติการในพื้นที่ที่มีอุปสรรคในการนำเครื่องขึ้น - ลง หรือบริเวณที่ไม่สามารถนำอากาศยานขึ้น - ลงได้ อีกทั้ง ลักษณะการขึ้น - ลงทางตั้ง จะช่วยลดความเสี่ยงในการ เกิดอุบัติเหตุที่ไม่จำเป็นจากการใช้งานของอากาศยาน ผิดวัตถุประสงค์อีกด้วย



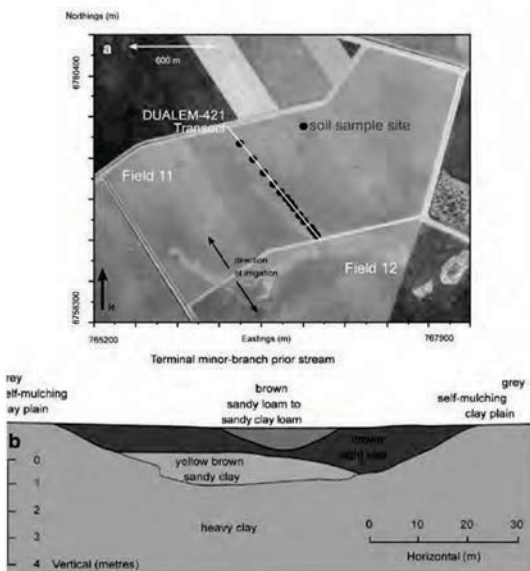
รูปที่ 4 ปริมาณการความละเอียดของภาพถ่ายภูมิประเทศ บนพื้นที่สำรวจจากอากาศยานไร้คนบินรูปแบบต่าง ๆ [28] ปี

2.2 ลักษณะเครื่องตรวจวัด

เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการขยายตัวของงานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับการค้นคว้าด้านพื้นที่ภูมิประเทศด้วย ภาพถ่ายความละเอียดสูงร่วมกับภูมิประเทศที่มีลักษณะ ทางกายภาพที่หลากหลาย [29] เพิ่มสูงขึ้น เนื่องด้วยงาน วิจัยดังกล่าวมีข้อจำกัดด้านการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่ พืชพรรณ หรือแม้แต่การพยากรณ์ภัยพิบัติบนพื้นที่ลุ่มน้ำด้วย ความละเอียดจากภาพถ่ายดาวเทียม อีกทั้งข้อจำกัดอื่น ๆ ของภาพถ่ายดาวเทียม ได้แก่ ความต้องการช่วงเวลานั้น ๆ ในการถ่ายภาพของดาวเทียม และการรอคอยห้วงเวลา วงโคจรการหมุนรอบของดาวเทียมต่าง ๆ ทำให้นักวิจัยเริ่ม นำเอาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนบินมาใช้งานร่วมกับ อุปกรณ์ตรวจวัดในลักษณะต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้การค้นคว้า ดังกล่าวยังคงอาศัยหลักการของวิชาสาขารณมิติเทคนิค (Geodetic techniques) บนพื้นฐานสำหรับการจัดการข้อมูล ที่ง่าย รวดเร็ว และอยู่ในงบประมาณที่จำกัด อีกทั้งต้อง สามารถเข้าถึงพื้นที่สำรวจขนาดใหญ่ในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก

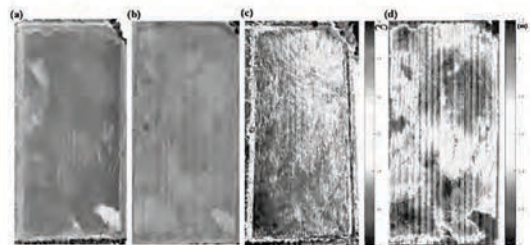
สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการตรวจสอบ โครงข่ายสายส่งไฟฟ้า (ซึ่งใช้เป็นโมเดลการศึกษาครั้งนี้) คือ การตรวจวัดระดับการเปลี่ยนแปลงความสูงของ ข้อมูล (Elevation changes) และลักษณะทางกายภาพ

ของพื้นที่สำรวจดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากระบบโครงข่ายสายส่งจะเสมือนลอยอยู่กลางอากาศเมื่อผู้วิจัยทำการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายความละเอียดสูง การประมวลผลการทดสอบจะมีการซ้อนเหลื่อมของชั้นข้อมูลพื้นดินกับแนวสายไฟของระบบเครือข่าย ดังนั้นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความสูงที่ไม่ถูกต้องจะส่งผลให้การตรวจสอบระบบโครงข่ายสายส่งผิดพลาด อีกทั้งได้มีการยืนยันผลการทดสอบความผิดพลาดของข้อมูลความสูงอยู่ระหว่าง 30-90 เมตร และความผิดพลาดแนวราบอยู่ระหว่าง 10-20 เมตร [30-31] ที่ได้จากเครื่องตรวจวัดในรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นการวัดขนาดการเปลี่ยนแปลงความสูงของข้อมูลพื้นที่เป็นข้อมูลจำเป็นที่ผู้ใช้ต้องอาศัยความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดและต้องใช้อุปกรณ์บนอากาศยานไร้คนบินให้เหมาะสมกับสภาพงาน



รูปที่ 5 ตัวอย่างพื้นที่สำรวจทั้งแนวราบและแนวตั้งจากเครื่องตรวจวัดบนอากาศยานไร้คนบิน [32]

ในปัจจุบันมีการผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถใช้งานร่วมกับอากาศยานไร้คนบินหลากหลายชนิด โดยเครื่องตรวจวัดที่นิยมจะมีวัตถุประสงค์ของการใช้งานขึ้นอยู่กับเครื่องตรวจวัดรังสี หรือประสิทธิภาพการแยกแยะรังสี (Radiation detected and detection efficiency) โดยอุปกรณ์ตรวจวัดบนอากาศยานไร้คนบินที่นิยมใช้ เช่น เครื่องตรวจวัดด้วยรังสีแบบ Visible (VIS) เครื่องตรวจวัดแบบแยกแยะรังสีแบบ Multispectral (MS) เครื่องตรวจวัดรังสีความร้อนแบบ Thermal Infrared (TIR) และเทคโนโลยี Ground Penetrating Radar (GPR) หรือที่รู้จักในนาม LiDar เป็นต้น จากความหลากหลายในเทคโนโลยีของอุปกรณ์ตรวจวัดนี้เอง ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเรียนรู้ลักษณะพื้นฐานของรังสีในแต่ละด้านเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาให้ตรงตามความต้องการ ตัวอย่างแสดงตามรูปที่ 6 ในลักษณะพื้นที่บริเวณเดียวกันแต่ใช้เครื่องตรวจวัดที่แตกต่างกันในการตรวจสอบ



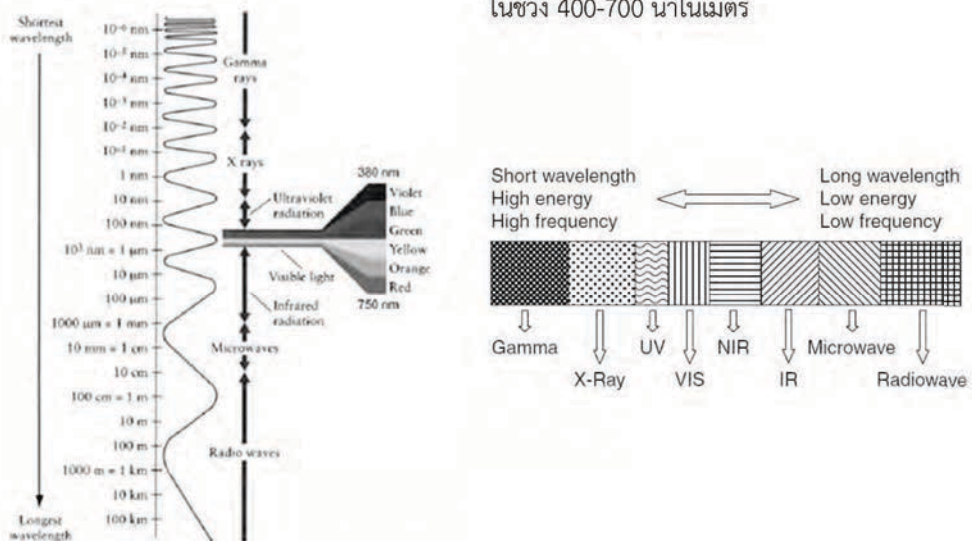
รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพถ่ายภูมิประเทศ 3 มิติ ได้แก่

- ภาพถ่ายความละเอียดสูง (RGB)
- ภาพถ่ายจากเครื่องตรวจวัดแบบ Multispectral
- ภาพถ่ายจากเครื่องตรวจวัดความร้อน
- ภาพถ่ายความละเอียดสูงที่ระบุความสูงของพื้นที่ [33]

การประมวลผลผลลัพธ์ของข้อมูลอุปกรณ์ตรวจวัดบนอากาศยานนั้นเป็นการตรวจวัดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการสะท้อน (Reflect) หรือการแผ่ (Emitted) จากพื้นผิว โดยแหล่งพลังงานตั้งต้นมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดสามารถตรวจวัดได้ในช่วงคลื่นตามองเห็น (Visible) และอินฟราเรด (Infrared) ช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงมาได้ เรียกว่า หน้าต่างบรรยากาศ (Atmospheric window) มีเฉพาะในช่วงคลื่น

ที่ยาวกว่าช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) เท่านั้น [34] ดังนั้น ความยาวคลื่น (λ) จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการใช้งาน ซึ่งความยาวคลื่นจะระบุคุณลักษณะจำเพาะของการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุต่าง ๆ บนพื้นผิวโลกที่ผู้วิจัยต้องการตรวจสอบ ยกตัวอย่างเช่น การถ่ายภาพภูมิประเทศ 3 มิติ ด้วยเครื่องตรวจวัดแสงแบบ RGB (กล้องถ่ายรูปธรรมดา) เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีทุกย่านคลื่นความถี่กระทบลงบนวัตถุ (ลำแสงตกกระทบ) โดยวัตถุบนพื้นโลก เช่น พรรณพืชต่าง ๆ จะยินยอมให้แสงในช่วงคลื่นความถี่สูงที่ตามนุษย์มองไม่เห็นทะลุผ่านและดูดซับในช่วงคลื่นที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นบางย่านแต่กลับสะท้อนย่านคลื่นสีเขียวกลับไปและหักเหช่วงคลื่นในย่านความถี่ต่ำ ขณะทำการตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจสอบบนอากาศยานไร้คนบิน โดยในการสะท้อนย่านคลื่นสีเขียวนี้เองที่ตัวตรวจวัดบนอากาศยานไร้คนบิน

สามารถตรวจวัดรังสีได้ พร้อมกันนี้เครื่องตรวจวัดแสงแบบ RGB จึงประมวลผลข้อมูลและแบ่งซ้ำภาพถ่ายภูมิประเทศ 3 มิติ บริเวณที่เป็นต้นไม้จะสะท้อนคลื่นสีเขียว ดังนั้นภาพถ่ายภูมิประเทศ 3 มิติ จึงเห็นต้นไม้เป็นสีเขียว จากตัวอย่างข้างต้น ผู้วิจัยจึงต้องเข้าใจลักษณะและแยกแยะความแตกต่างของช่วงคลื่นตามการตรวจวัดของเครื่องมือตรวจสอบจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยหลายส่วนความยาวคลื่นตั้งแต่คลื่นสั้นไปจนถึงคลื่นยาว แสดงได้ตามรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็นสามกลุ่มลักษณะใหญ่ ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นสั้น คือ Gamma rays, X-rays และ Ultra Violet rays (UV) ช่วงความยาวคลื่นยาว คือ IR rays, Microwaves และ Radio waves ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร



รูปที่ 7 แบบจำลองสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ตามความยาวคลื่น [35-36]

กรณีการสำรวจพื้นที่ภูมิประเทศในการกิจต่าง ๆ ผู้ใช้งานอากาศยานไร้คนบินจะดำเนินการจัดทำข้อมูลภาพถ่ายในรูปแบบของแบบจำลองความสูงของภูมิประเทศ (Digital Surface Model: DSM) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะมีข้อมูลความสูงของบริเวณพื้นผิวรวมอยู่ด้วย อีกทั้งภาพถ่ายทางอากาศ (Orthophoto) สามารถ

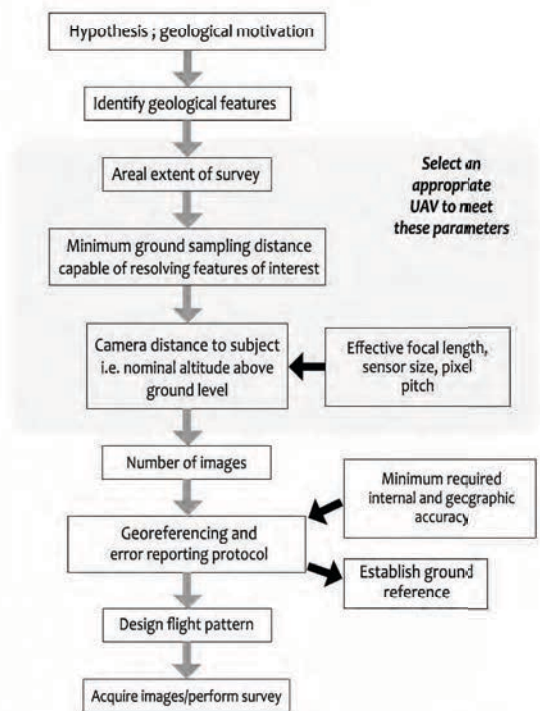
แบ่งข้อมูลพิกัดได้เที่ยงตรงตามพิกัดแผนที่และความสูงของข้อมูลตามที่กล่าวมาแล้ว ทว่าอุปสรรคสำคัญในการแยกแยะข้อมูลของวัตถุคือ สายส่ง ออกจากข้อมูลผิวดินและความสำคัญของข้อมูลความสูงจากที่เคยกล่าวก่อนหน้านี้นี้ แสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบระบบโครงข่ายสายส่งบนพื้นที่ขนาดใหญ่ต้องอาศัยระบบ LiDar เนื่องจาก

ระบบดังกล่าวสามารถให้รายละเอียดด้านพื้นที่ที่สำรวจพร้อมข้อมูลความสูงจากสเปกตรัมใน 2 ช่วงคลื่น ประกอบด้วย ช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร ได้แก่ ช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง โดยช่วงคลื่นนี้ใช้แยกแยะพืชพรรณที่ปกคลุมดินออกจากวัตถุ และได้ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่สำรวจทั้งหมด กับช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) มีความยาวคลื่นในช่วง 700 - 3,000 นาโนเมตร โดยช่วงคลื่นนี้ใช้บ่งชี้ลักษณะความชื้น-ลึกที่แตกต่างกันของสภาพภูมิประเทศ ซึ่งแสดงถึงข้อมูลชั้นความสูงของภูมิประเทศนั่นเอง จากการยกตัวอย่างจะเห็นได้ว่าวัตถุพืชพรรณหรือสภาวะที่นักวิจัยเฝ้าสังเกตต่างล้วนมีปรากฏการณ์การแผ่รังสีที่แตกต่างกันตามหลักวิทยาศาสตร์ทั่วไป ได้แก่ การทะลุผ่าน การดูดซับ การสะท้อน และการหักเห ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องตรวจวัดบนอากาศยาน ผู้ใช้อากาศยานจึงต้องเรียนรู้ปรากฏการณ์การสะท้อนรังสีให้ตรงตามการตรวจวัด เพื่อจะได้ตรวจวัดด้วยเครื่องมือและสามารถแยกแยะผลการทดสอบได้อย่างถูกต้อง

3. การสำรวจเพื่อการตรวจวัด

การออกแบบแผนการบินสำรวจพื้นที่ (Planning photogrammetric surveys) เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพถ่ายภูมิประเทศ 3 มิติ ให้มีลักษณะครอบคลุมพื้นที่สำรวจที่ต้องการ มีความละเอียดของพื้นผิวพื้นที่ตามต้องการ และข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจวัดข้อมูลได้อย่างแม่นยำ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ใช้งานอากาศยานไร้คนบินต้องคำนึงถึงตัวแปรเหล่านี้เป็นสำคัญ ได้แก่ ความละเอียดของภาพถ่าย (Resolution) ความแม่นยำของข้อมูลภาพถ่าย (Ground Sampling Distance: GSD) และประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนบินที่ใช้งาน โดยก่อนการสำรวจพื้นที่ที่ผู้ใช้อากาศยานจำเป็นต้องเรียนรู้ลักษณะเด่นของพื้นที่และเส้นทางการนำอากาศยานขึ้น-ลงอย่างปลอดภัย อีกทั้งต้องใช้เครื่องมือตรวจวัดที่เหมาะสมให้ตรงตามความต้องการของข้อมูล และสิ่งสำคัญที่สุดคือ

การกำหนดความสูงของแผนการบิน เนื่องจากอุปสรรคของแผนการบินอาจเกิดจากคลื่นในลักษณะต่าง ๆ ที่ตามองไม่เห็น เช่น สนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นวิทยุ จากเสาอุปกรณ์สื่อสาร เสาสัญญาณโทรศัพท์ ซึ่งสามารถรบกวนระบบการสื่อสารของอากาศยานกับผู้บังคับที่ภาคพื้น อาจทำให้อากาศยานไร้คนบินตกขณะทำการบินได้ ทั้งนี้สามารถสรุปกระบวนการสำคัญก่อนทำการขึ้นบินสำรวจพื้นที่ต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 สรุปกระบวนการก่อนการนำอากาศยานไร้คนบินเข้าสำรวจพื้นที่ ณ ภูมิประเทศต่าง ๆ [37]

ในกรณีการสำรวจพื้นที่สังเกตการณ์ให้ครอบคลุมและมีความเที่ยงตรงเชิงพิกัดแผนที่ ผู้ใช้อากาศยานไร้คนบินจำเป็นต้องเข้าใจในระบบอ้างอิงพิกัด (Coordinate) ซึ่งในปัจจุบันการสำรวจเพื่อการอ้างอิงเชิงพิกัดแผนที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การใช้เทคโนโลยีดาวเทียมเพื่อระบุตำแหน่ง (Global Positioning System: GPS) และระบบการแก้ไขและคำนวณเชิงพิกัด โดยในการสำรวจระบบแรกนิยมใช้สำหรับการนำทาง

(Navigation) และผู้ใช้งานต้องการความถูกต้องแม่นยำของพิกัดสูง ดังจะเห็นได้จากการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมาสำรวจทางธรณีวิทยาและการสำรวจการขนส่งเทือนของพื้นพิภพผ่านการศึกษาทางธรณีวิทยาอื่น ๆ [38] โดยการสำรวจพื้นที่ด้วย GPS นี้จัดแบ่งได้เป็น 2 หมวดการทำงาน ได้แก่ หมวดภาคสถิต “Static mode” ซึ่งการสำรวจแบบนี้เริ่มจากผู้สำรวจต้องเข้าสำรวจพื้นที่บริเวณโดยรอบและหาจุดอ้างอิง (Certain position) เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงพิกัดภูมิศาสตร์ (Georeferencing) ให้ครอบคลุมบริเวณพื้นที่สำรวจทั้งหมด (อย่างน้อย 5 จุดครอบคลุมบริเวณทั้งหมด) จากนั้นทำการตรึงพิกัดทั้งหมดด้วย GPS ในการตรึงพิกัดด้วย GPS นี้มีหลักการทำงานคือตัวรับสัญญาณ (Receiver) จะรับข้อมูลเชิงพิกัดอย่างต่อเนื่องจากทุกดาวเทียมที่เครื่องตรวจรับสัญญาณสามารถตรวจพบได้ (การตรึงพิกัดด้วยเครื่อง GPS ควรใช้เวลาในแต่ละจุดอย่างน้อย 30 นาที) และจะทำการประมวลตำแหน่งพิกัด ณ จุดนั้น ๆ ในลักษณะค่าเฉลี่ย (Average value) ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของพิกัดดังกล่าวจัดอยู่ในระดับ “มิลลิเมตร” [39] เนื่องจากตำแหน่งพิกัดโดยเฉลี่ยนี้เป็นพิกัดที่แน่นอนและเป็นข้อมูลที่คำนวณจากการเคลื่อนที่โดยตรงของดาวเทียมซึ่งไม่ผ่านการประมวลผลใด ๆ [40] จากนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยเชิงพิกัดที่ได้นำไปปรับแก้พิกัดบนภาพถ่ายภูมิประเทศ 3 มิติ เพื่อประมวลข้อมูลต่อไป สำหรับตรึงพิกัดพื้นที่ด้วย GPS ในหมวดจลนศาสตร์ “Kinematic” ผู้สำรวจต้องทำการตรึงพิกัดด้วย GPS ณ ตำแหน่งจุดอ้างอิงพิกัดภูมิศาสตร์ที่เหมาะสมเพียงตำแหน่งเดียวในพื้นที่ซึ่งจุดนี้เองจะเรียกว่าจุดฐาน (Base) จากนั้นผู้สำรวจจะทำการ รับ-ส่ง ข้อมูลตำแหน่งโดยเฉลี่ยจากตัวรับสัญญาณที่เคลื่อนที่รอบบริเวณสำรวจอีกตัวหนึ่ง ซึ่งเรียกตัวรับสัญญาณนี้ว่า โรเวอร์ “Rover” ในระหว่างการ รับ-ส่ง ข้อมูลเชิงพิกัดระหว่างจุดฐานและโรเวอร์จะมีการคำนวณตำแหน่งพิกัดโดยเฉลี่ย ซึ่งอ้างอิงจากระยะห่างจากจุดฐานและจุดเคลื่อนที่ที่สำคัญ โดยความคลาดเคลื่อนเชิงพิกัดเมื่อเปรียบเทียบกับ การตรึงพิกัดด้วยระบบ

GPS ในหมวดภาคสถิต ถือว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า อีกทั้งวิธีดังกล่าวยังคงเป็นที่ถกเถียงกันในหมู่นักวิชาการ เรื่องการตรวจสอบพิกัดที่ได้ว่าเป็นการอนุมานจากการทดลองที่ไม่เป็นระบบ (non-systematic experiments) หรือเป็นเพียงแค่การแยกสัญญาณพิกัดที่ได้จากตัวรับสัญญาณเดียวกันไปยังตำแหน่งที่สอง [40–42]

จากความซับซ้อนในกระบวนการอ้างอิงพิกัดภูมิศาสตร์เพื่อการจัดทำแผนที่ข้างต้น จึงมีผู้พัฒนาระบบอ้างอิงพิกัดภูมิศาสตร์เพื่อลดขั้นตอนและความยุ่งยากต่อการระบุพิกัดภูมิประเทศในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วนหลัก ได้แก่ อุปกรณ์อ้างอิงพิกัดทางสถานีภาคพื้นดินด้วยระบบนำทางผ่านดาวเทียม (Global Navigation Satellite System: GNSS) และตัวรับสัญญาณสำหรับการวางจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points: GCPs) เพื่อการอ้างอิงพิกัดภูมิศาสตร์ที่แม่นยำในการสำรวจพื้นที่ซึ่งติดตั้งบนอากาศยานไร้คนบิน [43] โดยอากาศยานไร้คนบินสามารถสำรวจพื้นที่ได้ตรงตามแผนการบิน โดยที่ไม่จำเป็นต้องแก้ไขข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์อ้างอิงพิกัด GNSS อีกทั้งยังคงประสิทธิภาพในการบันทึกภาพถ่ายภูมิประเทศ 3 มิติ ได้อย่างเหมาะสมและพร้อมสำหรับการประมวลผลข้อมูลต่อไป ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถลดเวลาในการติดตั้งจุดควบคุมภาคพื้นดินในกระบวนการสำรวจภาคสนาม อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนในการระบุพิกัดของระบบดังกล่าวยังคงจัดอยู่ในระดับ “เมตร” [44] และการใช้งานยังต้องอาศัยนักสำรวจพื้นที่ หรือผู้บังคับอากาศยานที่มีความเชี่ยวชาญโดยเฉพาะ [45] เพื่อที่จะขยายข้อจำกัดดังกล่าวและตอบสนองต่องานวิจัยในการขยายขอบเขตพื้นที่สำรวจ พร้อมทั้งลดขั้นตอนการปฏิบัติ ก่อปรกับลดเวลาในการวางจุดควบคุมภาคพื้นดินบนสภาพพื้นที่รูปแบบต่าง ๆ จึงมีการพัฒนาระบบ RTK (Real Time Kinematic) และระบบ PPK (Post Processed Kinematic) มาติดตั้งบนอากาศยานไร้คนบินเพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดภูมิศาสตร์ของภาพถ่าย

ทางอากาศหรือที่เรียกว่า “Geotags” จากระบบดังกล่าว ทำให้การระบุพิกัดภูมิศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับ “เซนติเมตร” ทั้งนี้ ผู้เขียนขออธิบายหลักการทำงานเบื้องต้นของทั้งระบบ RTK และ PPK ดังต่อไปนี้ โดยในระบบ PPK จะเป็นการแยกการรับข้อมูลการระบุพิกัดภูมิศาสตร์ GNSS ในทุก ๆ แนวการบินของอากาศยาน ให้นักบินตามแผนการบิน ซึ่งข้อมูลอ้างอิงพิกัด GNSS ส่วนหนึ่งจะถูกบันทึกลงบนอากาศยานให้นักบิน ซึ่งขณะทำการบินสำรวจนี้อากาศยานให้นักบินจะเป็นตัวรับสัญญาณพิกัดแบบโรเวอร์ ในขณะที่ข้อมูลอ้างอิงพิกัด GNSS อีกส่วนหนึ่งจะถูกบันทึกลงบนอุปกรณ์รับสัญญาณภาคพื้น ซึ่งเป็นตัวรับสัญญาณแบบจุดฐาน ทั้งนี้การรับข้อมูลอ้างอิงพิกัด GNSS ของตัวรับสัญญาณทั้งสองจะดำเนินการควบคู่กันไป (simultaneously) และเมื่อทำการสำรวจแล้วเสร็จ ผู้บังคับอากาศยานให้นักบินจะดำเนินการจัดทำพิกัดภูมิศาสตร์ของภาพถ่ายทางอากาศลงบนภาพถ่ายทางอากาศ โดยการเทียบเคียงข้อมูลอ้างอิงพิกัด GNSS จากตัวรับสัญญาณทั้งสอง หากข้อมูลอ้างอิงพิกัด GNSS ใกล้เคียงกันและมีความถูกต้องเพียงพอจึงสามารถบันทึกภาพถ่ายทางอากาศได้ โดยการสำรวจรูปแบบดังกล่าวผู้บังคับอากาศยานให้นักบินไม่จำเป็นต้องทำการสำรวจและบันทึกจุดควบคุมภาคพื้นดินไว้ล่วงหน้า [46] ในขณะที่ระบบ RTK เป็นการพัฒนาระบบการบังคับทิศทางอากาศยานให้นักบินผ่านทาง การรับ-ส่งข้อมูลอ้างอิงพิกัด GNSS ลงบนโปรแกรมควบคุมการบิน และใช้ข้อมูลอ้างอิงพิกัด GNSS เป็นแผนการบินด้วยคลื่นความถี่เชิงเดี่ยว (single frequency GNSS systems) [47] โดยการสื่อสารระหว่างสถานีภาคพื้นกับอากาศยานให้นักบิน ซึ่งจะทำการ รับ - ส่ง ข้อมูลแบบ real time ด้วยสัญญาณวิทยุ หรือสัญญาณโทรศัพท์ ทั้งนี้ อุปกรณ์รับสัญญาณภาคพื้นเป็นตัวรับสัญญาณแบบจุดฐาน และอากาศยานให้นักบินจะเป็นตัวรับสัญญาณแบบโรเวอร์

อนึ่ง การสำรวจพื้นที่เพื่อยืนยันตำแหน่ง ระวัง

หรือการสำรวจแนวโครงข่ายสาธารณูปโภคใด ๆ ก็ตาม ผู้บังคับอากาศยานจำเป็นต้องพิจารณาเทคนิคการสำรวจพื้นที่ตามความเหมาะสมของภูมิประเทศ และใช้แนวทางการสำรวจดังที่กล่าวไว้ข้างต้นให้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการสำรวจโครงข่ายระบบไฟฟ้ามีการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญ ดังนั้น การรบกวนสัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงสูง อีกทั้ง การเข้าถึงพื้นที่ตั้งของระบบโครงข่ายอาจเป็นไปได้ยาก ผู้ใช้งานอากาศยานให้นักบินจึงต้องพิจารณาว่าจะใช้กระบวนการสำรวจพื้นที่แบบใดจึงจะเหมาะสม ซึ่งไม่สามารถกำหนดลักษณะการสำรวจได้แบบตายตัว อย่างไรก็ตาม ข้อสังเกตของผู้ปฏิบัติคือต้องไม่สับสนระหว่างกระบวนการสำรวจพื้นที่ในหมวดภาคสถิติ หรือ หมวดจลนศาสตร์ เนื่องจากแต่ละวิธีมีทั้งข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป อีกทั้งระดับความคลาดเคลื่อนของหน่วยการวัดไม่เท่ากัน อาจเป็นสาเหตุให้การตรงพื้นที่ผิดพลาดได้ง่าย

4. ปรากฏการณ์ดิสชาร์จทางไฟฟ้า

ความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายของระบบฉนวนบนเครือข่ายไฟฟ้าทางสายส่งจากปรากฏการณ์ดิสชาร์จทางไฟฟ้า สามารถเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ได้แก่ การเกิดคลื่นวิทยุแทรกสอดในบริเวณนั้น ๆ การเกิดประกายไฟ การเกิดความร้อนสูง และการเกิดคลื่นเสียง ทั้งในช่วงคลื่นที่สามารถได้ยินและไม่สามารถได้ยิน [48] ดังนั้น ก่อนที่จะทำการตรวจสอบการดิสชาร์จทางไฟฟ้า การระบุตำแหน่งที่เสียหายของระบบโครงข่ายสายส่ง การตรวจวัดปริมาณความเสียหายของระบบฉนวน และการวิเคราะห์ความรุนแรงการดิสชาร์จทางไฟฟ้า ผู้ใช้งานอากาศยานให้นักบินจึงจำเป็นต้องเรียนรู้ต้นเหตุหรือจุดสำคัญพร้อมกับลักษณะและรูปแบบต่าง ๆ ของการดิสชาร์จทางไฟฟ้าก่อนทำการบิน เพื่อความปลอดภัยทั้งกับตนเองและอุปกรณ์ตรวจวัดบนอากาศยาน ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าปรากฏการณ์ดิสชาร์จทางไฟฟ้ามีความรุนแรงอยู่ในช่วง พิโคคูลอมม์

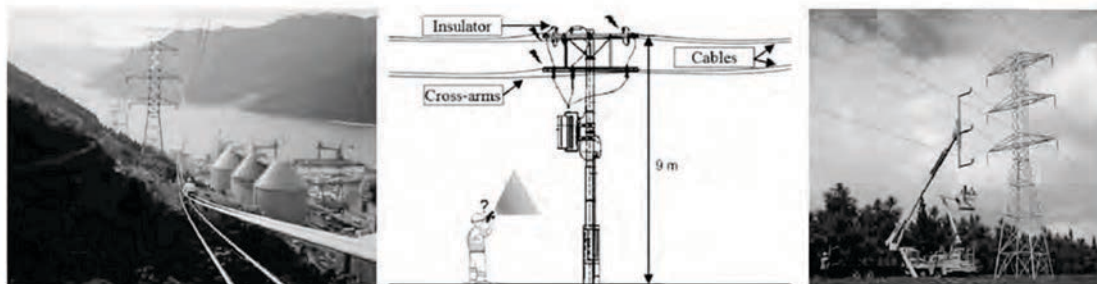
(picoCoulomb: pC) [48] ขึ้นอยู่กับความเสียหายของระบบฉนวนและระดับแหล่งพลังงานต้นกำเนิดของระบบเครือข่ายสายส่ง ฉะนั้นบริเวณที่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าของระบบฉนวนของสายส่งจึงเปรียบเสมือนตัวเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Conductor) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะปล่อยกระแสไฟออกมาเป็นช่วง ๆ (Partial discharge pulse) ในแต่ละครั้งใช้เวลาน้อยกว่า 1 ไมโครวินาที [49] จึงเป็นสาเหตุให้การสำรวจความเสียหายด้วยอากาศยานเป็นไปด้วยความยากลำบาก ปรากฏการณ์ที่นักวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องได้ทำการตรวจพบดิสชาร์จทางไฟฟ้า ได้แก่

- 1) การเกิดประกายไฟ
- 2) การเกิดเสียงแทรกสอด
- 3) กระแสไฟลัดระดับลง
- 4) การเกิดคลื่นวิทยุแทรกสอด
- 5) การสั่นทางกล (Mechanical vibrations)
- 6) ปฏิกิริยาเคมีในบริเวณโดยรอบ
(Chemical reactions)

ซึ่งปัจจัยทั้ง 6 ข้อที่กล่าวมานี้เอง มีส่วนที่สามารถทำให้อากาศยานไร้คนบินตกได้ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงพยายามค้นหาความเสี่ยงเพื่อป้องกันการเสียการควบคุมอากาศยานเหล่านั้นไป

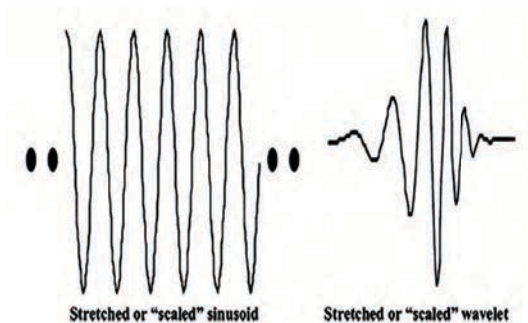
4.1 ลักษณะคลื่นเสียงบริเวณที่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า

จากลักษณะการเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าบนระบบฉนวนโครงข่ายสายส่ง คลื่นเสียงเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ที่มักถูกใช้เป็นปัจจัยสำหรับการตรวจสอบ เนื่องจากสามารถตรวจพบได้ง่ายจากประสาทสัมผัสของมนุษย์ ประกอบกับในตำแหน่งความเสียหายบนระบบฉนวนจะมีการแทรกของคลื่นวิทยุร่วมอยู่ด้วย ฉะนั้น การติดตามระบบโครงข่ายสายไฟฟ้าเมื่อตรวจพบสายไฟที่เกิดเสียงจึงสันนิษฐานได้ว่าบริเวณดังกล่าวเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าขึ้น อย่างไรก็ตาม ในภูมิประเทศที่ยากจะเข้าถึงการติดตามด้วยคลื่นเสียงก็อาจทำได้ยากนัก ดังนั้น การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จึงมักนิยมใช้กับพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้ง่าย แสดงตามรูปที่ 9 อนึ่ง ด้วยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแทรกสอดด้วยคลื่นเสียงนี้เอง การติดตั้งเครื่องตรวจวัดเสียงด้วยอากาศยานไร้คนบินจึงเป็นอีกแนวทางในการตรวจสอบการดิสชาร์จทางไฟฟ้า แต่ก่อนจะทำการตรวจสอบด้วยวิธีดังกล่าวเราจำเป็นต้องเรียนรู้ตัวแปรที่สำคัญและการประเมินผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

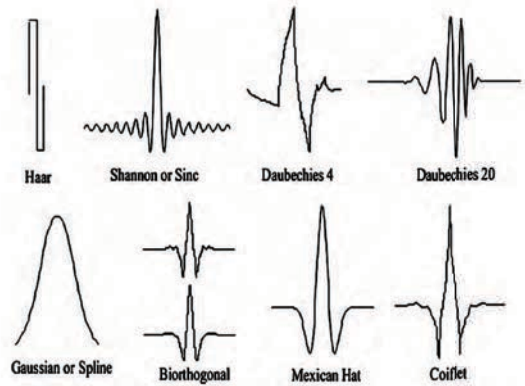


รูปที่ 9 ตัวอย่างการตรวจสอบความเสียหายของสายส่งจากภาคพื้น [50]

1) ลักษณะคลื่นเสียง เป็นการตรวจสอบการดิสชาร์จทางไฟฟ้าด้วยคลื่นเสียง นิยมอ้างอิงการแปรผลลัพท์ด้วยตัวแปร wavelet ซึ่งการแปรผลเป็นไปตามค่าคณิตศาสตร์ แต่เพื่อให้เข้าใจต่อการนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผลลัพท์ เบื้องต้นจึงขออธิบายข้อแตกต่างระหว่างเสียงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ กับเสียงที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดิสชาร์จทางไฟฟ้า แสดงตามรูปที่ 10 พบว่า เมื่อเราพิจารณาคลื่นเสียงในห้วงหนึ่งของเวลา (limited duration) และขยายระยะเวลาการพิจารณาของคลื่นเสียงออกไปจนถึงระยะอนันต์ตามทฤษฎี wavelet จะมีจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดของคลื่นแสดงตามรูปที่ 10 ด้านขวา และรูปร่างของคลื่นมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ (irregular) ในขณะที่คลื่นเสียงปกติจะมีความเรียบ (smooth) เป็นระเบียบและสามารถทำนายการกวัดแกว่งของลูกคลื่นได้อีกทั้งความถี่ของคลื่นเสียงปกติจะคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะหยุดนิ่ง (stationary) [51] แสดงลักษณะคลื่นตามรูปที่ 10 ด้านซ้าย จากนิยามเบื้องต้นได้มีนักวิจัยค้นคว้ารูปแบบเสียงของ wavelet ในลักษณะต่าง ๆ แสดงตามรูปที่ 11 ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เอง เราสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้มาแปรผลการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งความเสียหายจากดิสชาร์จทางไฟฟ้า ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งเราสามารถอ้างอิงพิกัดบนภาพถ่ายภูมิประเทศ 3 มิติ ที่เรารวบรวมพิกัดอยู่แล้วได้

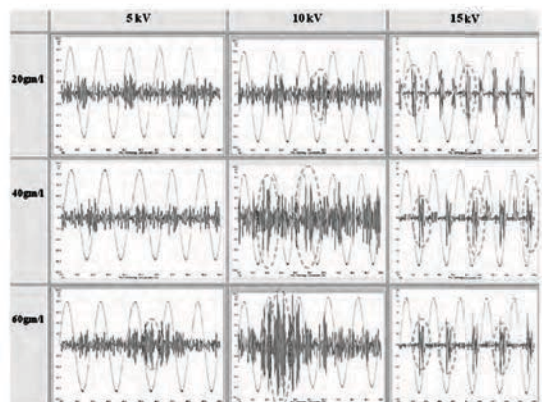


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบลักษณะความแตกต่างของคลื่นเสียงของอุปกรณ์ที่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า [52]



รูปที่ 11 รูปแบบเสียงของ wavelet ในลักษณะต่าง ๆ [52]

2) การสังเกตลักษณะคลื่นเสียง จากการทดสอบการแสดงผลในลักษณะรูปแบบเสียงด้วยความต่างศักย์ขนาดต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมจำลองของห้องปฏิบัติการ [48] พบว่า แนวโน้มการเกิดรูปแบบเสียงของระบบเครือข่ายสายไฟเมื่อเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า มีขนาดเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความต่างศักย์ แต่ทว่าสิ่งกีดขวางหรือมลภาวะในสภาพแวดล้อมมีส่วนที่ทำให้ไม่พบรูปแบบเสียงที่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า ณ ความต่างศักย์ขนาดน้อย ๆ และจะไม่ส่งผลกระทบต่อตำแหน่งเครือข่ายที่มีความต่างศักย์ขนาดสูง ๆ แสดงผลตามรูปที่ 12 จากผลการทดสอบนี้เองเป็นเครื่องยืนยันว่าการตรวจสอบระบบเครือข่ายด้วยอากาศยานไร้คนบินด้วยเครื่องตรวจวัดเสียงมีความเป็นไปได้ในกรณีที่อยู่ในพื้นที่ที่ยากเข้าถึง และเพื่อสำรวจระบบโครงข่ายที่มีความต่างศักย์สูง ๆ นั้นเอง

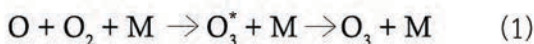


รูปที่ 12 รูปแบบเสียงที่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า ณ ความต่างศักย์ต่าง ๆ ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน [48]

4.2 การเปล่งแสงบริเวณที่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า

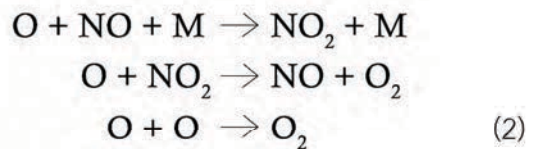
การเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าบนระบบโครงข่ายสายส่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งรูปแบบกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) เมื่อบริเวณพื้นผิวนานกั้นไฟฟ้ามีการสะสมของสนามไฟฟ้ามากเพียงพอ [53] และผลลัพธ์ที่ตามมาคือ การสูญเสียกระแสไฟและเกิดผลกระทบตามมาอีกมากดังที่เคยกล่าวไว้แล้วข้างต้น

หนึ่ง ปฏิบัติการเคมีในบริเวณโดยรอบดิสชาร์จทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้น มีประโยชน์ต่อการตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจสอบเชิงแสง ซึ่งก่อนที่จะนำเครื่องมือตรวจสอบมาใช้งานอย่างถูกต้องจำเป็นต้องเรียนรู้กระบวนการเปล่งคลื่น (Emit) ณ บริเวณอุปกรณ์ฉนวนที่เสียหาย โดยดิสชาร์จทางไฟฟ้าจะเกิดการขยายตัวของสนามไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนภายในสนามไฟฟ้าทำปฏิกิริยาไอออไนเซชัน (Ionization) กับออกซิเจน เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน จากนั้นโมเลกุลดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในชั้นบรรยากาศเกิดเป็นไอออนขึ้น [54] แสดงตามสมการที่ 1 โดยที่ M คือ โมเลกุลของ ออกซิเจน (O_2) หรือ ไนโตรเจน (N_2) ในบรรยากาศรอบบริเวณดิสชาร์จทางไฟฟ้า



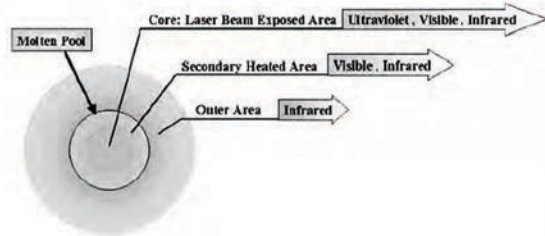
จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่า ไอออน (O_3) สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยากับทั้งก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนอีกต่อ ๆ ไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน แสดงดังสมการที่ 2 เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนมีพลังงานกระตุ้น (Excitation energy) อยู่ที่ระดับ 11 eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่น้อยกว่าพลังงานกระตุ้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ถึง 1.5 eV [55] จึงทำให้เกิดไนโตรเจนในรูปแบบต่าง ๆ ได้ง่ายกว่าเกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นไนโตรเจนไอออน ไนโตรเจนอะตอมและโมเลกุลของไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ [56-57] ต่อมาส่วนหนึ่งของไนโตรเจนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน เกิดเป็นไอออน หมุนเวียน

ต่อไป และอีกส่วนหนึ่งเกิดปฏิกิริยาต่อไปเกิดเป็นก๊าซในรูปแบบต่าง ๆ ของไนโตรเจน หรือที่เรียกว่า NO_x [58-59] ซึ่งก๊าซรูปแบบต่าง ๆ ของไนโตรเจนเหล่านี้เองเป็นตัวเร่งให้เกิดการขยายตัวของดิสชาร์จทางไฟฟ้า ณ ระบบฉนวนกั้นไฟฟ้าของโครงข่ายสายส่ง



จากคำอธิบายของการเกิดก๊าซข้างต้น เมื่อนานวันขึ้นจะทำให้เกิดการสะสมของสนามไฟฟ้าบริเวณดิสชาร์จทางไฟฟ้าบนระบบฉนวนและขยายตัวออกไปเป็นลักษณะวงแหวน หรือเรียกว่า “โคโรนาดิสชาร์จ” และจะทำให้ลายการเป็นฉนวนของอุปกรณ์ในขณะเดียวกันกับการเกิดปรากฏการณ์วงแหวนนี้เองจะเกิดปรากฏการณ์การแผ่รังสีและมีอุณหภูมิสูงขึ้นควบคู่กันไปด้วย จากมูลเหตุนี้เอง ผู้บังคับอากาศยานไร้คนบินจึงจำเป็นต้องหาเครื่องตรวจวัดการแผ่รังสีและความร้อนในย่านคลื่นที่เหมาะสม เพราะในกรณีความร้อนที่เกิดจากการดิสชาร์จทางไฟฟ้าจะมีความร้อนสูงขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า เนื่องจากการส่งกระแสไฟตามสายส่งก็เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อนอยู่แล้ว อีกทั้งกรณีการตรวจวัดการแผ่รังสี เครื่องตรวจวัดต้องสามารถแยกแยะปรากฏการณ์การแผ่รังสีจากวัตถุได้อย่างชัดเจน สำหรับการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อน (ในที่นี้คือ สายส่งกระแสไฟฟ้า) มีลักษณะการแผ่รังสีและความร้อนในรูปแบบ blackbody radiation นั้นหมายความว่าสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0 K หรือ -273.15°C) จะสามารถเปล่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีขนาดและส่วนประกอบของช่วงคลื่นแตกต่างกันไป ซึ่งพลังงานที่วัตถุแผ่ออกมามากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น [60] ตามภาพที่ 13 ฝั่งซ้ายจะ

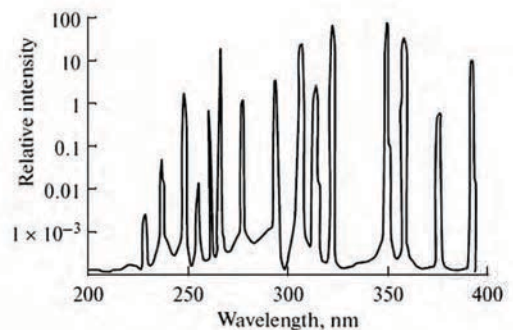
เป็นการแผ่รังสีที่เกิดขึ้น 2 บริเวณ บริเวณแรกคือ แกนกลาง (Core) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากการ ดิสชาร์จทางไฟฟ้าจะเกิดการแผ่ความร้อนและแผ่รังสี ขึ้นโดยตรงจากแกนกลางออกสู่ด้านนอก ซึ่งการแผ่รังสี นี้อยู่ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet wavelength region) เนื่องจากแกนกลางของแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิ สูงที่สุด จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงจนกระทั่งถึงขอบ นอกของแกนกลาง จะเกิดการแผ่รังสีของช่วงคลื่น ที่ตามองเห็น (Visible) และช่วงคลื่นอินฟราเรด (Infrared) ณ บริเวณที่ 2 (Secondary heated area) มากกว่าในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลต จนกระทั่งถึง รอบนอกจึงมีการแผ่รังสีในช่วง infrared เท่านั้น [60]



รูปที่ 13 ตัวอย่างการแผ่รังสีของโครงข่ายสายไฟ และการตรวจวัดรังสีในช่วงคลื่น UV [60,55]

จากผลการการศึกษาดิสชาร์จทางไฟฟ้าบน อุปกรณ์โครงข่ายไฟฟ้าพบว่าเครื่องมือตรวจสอบที่ สามารถติดตั้งบนอากาศยานไร้คนบังคับควรเป็นเครื่อง ตรวจวัดการแผ่รังสีย่านอัลตราไวโอเลต อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วยย่านความถี่อื่น ๆ ไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากเครื่องตรวจวัดไม่สามารถตรวจวัดความแตกต่าง ทางความร้อนที่เกิดขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้ใช้งาน อากาศยานจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องตรวจวัดประเภทนี้ เพียงประเภทเดียว ซึ่งข้อควรระวังสำหรับการใช้อุปกรณ์ ดังกล่าวได้แก่ การตรวจวัดด้วยคลื่นย่านอัลตราไวโอเลต มักมีความไวต่อการแยกแยะสัญญาณรบกวนต่ำ

ดังนั้นเมื่อทำการตรวจสอบการเกิดปรากฏการณ์ ดิสชาร์จทางไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการพบว่าเมื่อเกิด ฟ้าผ่าในรูปแบบต่าง ๆ ของไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นทำให้ระบบ ฉนวนของอุปกรณ์สายส่งเสื่อมสภาพลงและเป็นการ ขยายสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ตลอดจนทำให้ความดัน ภายในของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น เมื่อทำการตรวจสอบการแผ่รังสี ย่านคลื่นอัลตราไวโอเลตด้วยเครื่องตรวจวัดสามารถ ตรวจสอบสเปกตรัมได้ตามรูปที่ 13 ด้านขวา ซึ่งเป็นการ ยืนยันผลการตรวจสอบว่าการดิสชาร์จทางไฟฟ้า สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจวัดในช่วงคลื่น อัลตราไวโอเลต



(Signal to Noise Ratio) เนื่องจากการใช้อากาศยาน บินสำรวจในช่วงเวลากลางวันจะมีการรบกวนของ คลื่นอัลตราไวโอเลตจากแสงอาทิตย์ ทำให้สัญญาณ ที่ตรวจวัดได้มีขนาดต่ำหรือไม่สามารถแยกแยะได้เลย ดังนั้นการแก้ปัญหาสำหรับการตรวจวัดสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การเลือกช่วงเวลาการบิน โดยช่วงเวลา ที่เหมาะสมคือช่วงเวลาเช้าและมีแสงแดดรบกวนไม่มาก และการปรับแผนการบินโดยให้เพดานบินมีความ สูงลดลงเพื่อให้ตัวตรวจวัดสามารถตรวจจับการ เปลี่ยนแปลงของความถี่ย่านอัลตราไวโอเลตได้ อย่างไรก็ตาม การปรับลดเพดานบินมีความเสี่ยงต่อ

การทำให้อากาศยานตก เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า บริเวณที่เกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าอาจรบกวนระบบสื่อสารของอากาศยาน ดังนั้นในการตรวจวัดจึงนิยมเลือกช่วงเวลาในการตรวจวัดก่อน

5. บทสรุป

การตรวจสอบระบบโครงข่ายสาธารณูปโภค เพื่อซ่อมบำรุงเป็นส่วนหนึ่งของการบรรเทาสาธารณภัยเชิงป้องกันด้านหนึ่ง ณ ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนบินมาประยุกต์ใช้ในการบรรเทาสาธารณภัยในด้านต่าง ๆ รวมถึงการใช้เพื่อตรวจสอบและซ่อมบำรุงระบบโครงข่ายไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย ทั้งนี้ผู้ใช้อากาศยานไร้คนบินจะต้องมีทักษะด้านการวางแผนการบินอย่างปลอดภัย อีกทั้งยังจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเรียนรู้ลักษณะข้อดี - ข้อด้อยของเครื่องตรวจวัดเป็นอย่างดี เนื่องจากการตรวจวัดความเสียหายด้วยการถ่ายภาพพร้อมระบุตำแหน่งบนแผนที่ภูมิประเทศ 3 มิติ โดยเฉพาะแนวโครงข่ายสายไฟมีความเสี่ยงในการที่อากาศยานไร้คนบินจะตก เพราะมีการรบกวนระบบสื่อสารระหว่างอากาศยานและภาคพื้นดินด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อีกทั้งการระบุพิกัด หรือตำแหน่งของอุปกรณ์โครงข่ายสายส่งจำเป็นอย่างยิ่งต้องแยกแยะข้อมูลออกจากข้อมูลความสูงของพื้นดิน ซึ่งต้องมีการจัดการข้อมูลอย่างถูกต้อง และข้อควรระวังมากที่สุดคือ การตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจวัดย่าน UV ผู้บังคับอากาศยานมักแก้ไขแผนการบินเมื่อพบว่าไม่สามารถตรวจสอบบริเวณต้องสงสัยในการเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า โดยการลดระดับเพดานบินเพื่อให้เครื่องตรวจวัดเข้าใกล้อุปกรณ์โครงข่ายสายส่งมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่เสี่ยงมาก ทั้งนี้หากมีความจำเป็นต้องตรวจสอบบริเวณดังกล่าว ควรใช้วิธีอื่น ๆ เข้าร่วมหรือเปลี่ยนเครื่องตรวจวัดเป็นแบบตรวจสอบด้วยเสียง หรือวิธีใด ๆ ตามความเหมาะสม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kumar, V., Michael, N.: Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles. In: Robotics Research, pp.41–58. Springer (2017)
- [2] Agha-mohammadi, A.-a., Ure, N.K., How, J.P., Vian, J.: Health aware stochastic planning for persistent package delivery missions using quadrotors. In: IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3389–3396. Chicago (2014)
- [3] Alvissalim, M.S., Zaman, B., Hafizh, Z.A., Ma'sum, M.A., Jati, G., Jatmiko, W., Mursanto, P.: Swarm quadrotor robots for telecommunication network coverage area expansion in disaster area. In: Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, pp. 2256–2261. Akita (2012)
- [4] Augugliaro, F., Schoellig, A.P., D'Andrea, R.: Methods for designing and executing an aerial dance choreography. IEEE Robot. Autom. Mag. 20(4), 96–104 (2013)
- [5] Aleotti, J., Micconi, G., Caselli, S., Benassi, G., Zambelli, N., Bettelli, M., Zappettini, A.: Detection of nuclear sources by UAV teleoperation using a visuo-haptic augmented reality interface. Sensors 17, 2234 (2017)
- [6] Burtiniak, V., Zabulonov, Y., Stokolos, M., Bulavin, L., Krasnoholovets, V.: The remote radiation monitoring of highly radioactive sports in the chornobyl exclusion zone. J. Intell. Robot. Syst. 90, 437–442 (2018)
- [7] Falciiglia, P.P., Biondi, L., Catalano, R., Immè, G., Romano, S., Vagliasindi, F.G.: Pre-

liminary investigation for quali-quantitative characterization of soils contaminated with 241 Am and 152 Eu by low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with small size γ -ray spectrometer: detection efficiency and minimum detectable activity (MDA) concentration assessment. *J. Soils Sediments* 18, 2399–2409 (2018)

[8] Tziavou, O., Pytharouli S., Somber J.: Unmanned Aerial Vehicles (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. *Engineering Geology*. 232, 12-21 (2018)

[9] Driscoll, J. O.: Landscape applications of photogrammetry using unmanned aerial vehicles. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 22, 32–44 (2018)

[10] Pinnangudi, B., Gorur, R.S., Kroese, A.J.: Energy quantification of corona discharge on polymeric insulators, in: *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*., 315–318 (2002)

[11] Yoshimura, N., Kumugai, S., Nishimura, S., Electrical and environmental aging of silicone rubber used for outdoor insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 6, 632–650 (1999)

[12] Moreno, V.M., Gorur, R.S.: AC and DC performance of polymeric housing materials for HV outdoor insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 5, 342–350 (1999)

[13] Montesinos, J., Gorur, R.S, Mobasher, B., Kingsbury, D.: Mechanism of brittle fracture in non ceramic insulators, *IEEE Transactions*

on Dielectrics and Electrical Insulation. 9, 236–243 (2002)

[14] Ilhan, S., Ozdemir, A.: Effects of corona ring design on electric field intensity and potential distribution along an insulator string, in: *IEEE ELECO07 Conference*, Bursa, Turkey, 2007.

[15] Rowland, S.M., Robertson, J., Xiong, Y., Day, R.J., Electrical and material characterization of field-aged 400 kV silicone rubber composite insulators, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 17, 375–383 (2010)

[16] Terrab, H., El-hag, A.H., Bayadi, A., Surface analysis of field aged transmission class silicone rubber outdoor insulators, in: *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Michigan, USA, 213–216 (2015)

[17] Cherney, E.A., et al., End-of-life and replacement strategies for RTV silicone rubber coatings, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 21, 253–261 (2014)

[18] R.A. Ghunem, L. Tay, H. Terrab, A.H. El-hag, Analysis of service-aged 200 kV and 400 kV silicone rubber insulation in the Gulf region, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 23, 3539–3546 (2016)

[19] Gustavsson, T.G., Gubanski, S.M., Hillborg, H., Karlsson, S., Gedde, U.W.: Aging of silicone rubber under ac or dc voltages in a coastal environment, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 8, 1029–1039 (2001)

[20] Guerrero, R.S., Corona, R.H., L.Gonzalez, F.A., García, L. R., Raizabal, V., Application of unusual techniques for characterizing ageing

on polymeric electrical insulation, *Electr. Power Syst. Res.* 117, 202–209 (2014)

[21] Zhu, Y., Otsubo, M., Honda, C., Tanaka, S., Loss and recovery of hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge, *Polym. Degrad. Stab.* 91, 1448–1454 (2006)

[22] Phillips A.J., et al., Electric fields on AC composite transmission line insulators, *IEEE Trans. Power Deliv.* 23, 823–830 (2008)

[23] Lee, C., Kim, H. R., Optimizing UAV-based radiation sensor systems for aerial surveys, *Journal of Environmental Radioactivity* 204, 76–85 (2019)

[24] Liao, L., Pasternak, I., 2009. A review of airship structural research and development. *Prog. Aero. Sci.* 45, 83–96.

[25] Lacroix, S., Toward Autonomous Airships: Research and Developments at LAAS/CNRS, 3rd International Airship Convention and Exhibition. Citeseer, Friedrichshafen (Germany), juillet 2000.

[26] Rao, J., Gong, Z., Luo, J., Xie, S.: Unmanned airships for emergency management. In: *IEEE International Safety, Security and Rescue Robotics, Workshop*, 2005. IEEE, 125–130 (2005)

[27] Chan, S.H., Stempien, J.P., Ding, O.L., Su, P.-C., Ho, H.K.: Fuel cell and hydrogen technologies research, development and demonstration activities in Singapore—an update. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 13869–13878 (2016)

[28] Dering, G. M., Micklethwaite, S., Thiele, S. T., Vollgger, S. A., Cruden, A. R.: Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of

dykes: Best practises and future potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 373, 148–166 (2019)

[29] Immerzeel, W.W., Kraaijenbrink, P.D.A., Shea, J.M., Shrestha, A.B., Pellicciotti, F., Bierkens, M.F.P., de Jong, S.M.: High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment.* 150, 93–103 (2014)

[30] Fujita, K., Suzuki, R., Nuimura, T., & Sakai, A. Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya. *Journal of Glaciology*, 54 (185), 220–228 (2008)

[31] Nuimura, T., Fujita, K., Yamaguchi, S., & Sharma, R. R.. Elevation changes of glaciers revealed by multitemporal digital elevation models calibrated by GPS survey in the Khumbu region, Nepal Himalaya, 1992–2008. *Journal of Glaciology*, 58 (210), 648–656 (2012)

[32] Triantafyllis, J., Monteiro Santos, F.A.: Electromagnetic conductivity imaging (EMCI) of soil using a DUALEM-421 and inversion modelling software (EM4Soil). *Geoderma* 211–212, 28–38 (2013)

[33] Feng, A., Zhou, J., Vories, E. D., Sudduth, K. A., Zhang, M., Yield estimation in cotton using UAV-based multi-sensor imagery, *biosystems engineering* 193, 101–114 (2020)

[34] Waldman, G., Introduction to Light: The Physics of Light, Vision, and Color. Dover Publications, New York 2002.

[35] Freedman, R.A., Kaufman III, W.J., Universe, seventh ed. W.H. Freeman and Company, New York 2005.

- [36] Singh C. B. and Jayas D. S., 'Spectroscopic techniques for fungi and mycotoxins detection in agriculture and food', in De Sager S , ed., Determining Mycotoxins and Mycotoxigenic Fungi in Food and Feed , Cambridge : Woodhead Publishing , 401–414, 2010.
- [37] Dering, G. M., Micklethwaite, S., Thiele, S. T., Vollgger, S. A., Cruden, A. R.: Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential, Journal of Volcanology and Geothermal Research. 373, 148–166 (2019)
- [38] Larson, K.M., Agnew, D.C.: Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement 1. Precision and accuracy. J Geophys Res 96(B10), 16547–65 (1991)
- [39] Nickitopoulou, A., Protopsalti, K., Stiros, S.: Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises. Engineering Structures 28, 1471–1482 (2006)
- [40] Nakamura, S.: GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements. J Struct Eng ASCE;126 (12), 1413–9 (2000)
- [41] Breuer, P., Chmielewski, T., Gorski, P., Konopka, E.: Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds. J Wind Eng Ind Aerodyn,90(3), 223–30 (2002)
- [42] Tamura, Y., Matsui, M., Pagnini, L-C, Ishibashi, R., Yoshida, A.: Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS. J Wind Eng Ind Aerodyn, 90, 1783–93 (2002)
- [43] Brown, C., Karuna, R., Ashkenazi, V., Roberts, G., Evans, R.: Monitoring of structures using the Global Positioning System. Proc Inst Civ Eng. 134, 97–105 (1999)
- [44] Hill, A., Limp, F., Casana, J., Laugier, E., Williamson, M., 2019. A new era in spatial data recording: low cost GNSS. Adv. Archaeol. Pract. <https://doi.org/10.1017/aap.2018.50>. (In press).
- [45] Gutierrez, G., Searcy, M., Introduction to the special edition: drones in archaeology. SAA Archaeol. Rec. 16 (2), 6–10. (2016)
- [46] Gerke, M., Przybilla, H.J., 2016. Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation 2016 (1), 17–30.
- [47] Stempfhuber, W., Buchholz, M.: A precise, low-cost RTK GNSS System for UAV applications. Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci. 38, 289–293 (2011)
- [48] Al-geelani, N. A., Piah, M. A. M., Abdul-Malek, Z., Identification of acoustic signals of corona discharges under different contamination levels using wavelet transform, Electr Eng 100, 1059–1067 (2018)
- [49] Lemke, E., Berlinjn, S., Galski, E., Muhr, M., Pultrum, E., Strehl, T., Hauschild, W., Rickmann, J., Rizzi, G., Guide for electrical partial discharge measurements in compliance to IEC 60270. Technical Brochure no 366 (2008)

- [50] Finotto, V.C., Horikawa, O., Hirakawa, A., Chamas, F.A.: Pole type robot for distribution power line inspection. Conf Appl Robot Power Ind CARPI 2012, 88–93 (2012)
- [51] Fugal, D.L.: Conceptual wavelets in digital signal processing: an in-depth, practical approach for the non-mathematician. Space & Signals Technical Pub (2009)
- [52] Chui CK.: An introduction to wavelets, vol 1. Academic Press, New York (1992)
- [53] Abdel-Salam, M.: High Voltage Engineering-theory and Practice, Marcel Dekker, New York, 2000.
- [54] Pek'arek, S.: Effect of catalysts on dc corona discharge poisoning. Eur. Phys. J. D 61, 657–662 (2011)
- [55] Krupenin, N. V., Zavidei, V. I.: Methods for Remote Monitoring and Defectoscopy Systems for Electrical Machine High Voltage Insulation by Using an Optical Radiation. Russian Electrical Engineering, 82(9) 460–463 (2011)
- [56] Martinez, P., Brandvold, D.K., Atmos. Environ. 30, 4177 (1996)
- [57] Rehbein, N., Cooray, V., J. Electrostat. 51-52, 333 (2001)
- [58] Kogelschatz, U., Eliasson, B., Hirth, M., Ozone: Sci. Eng. 30, 367 (1988)
- [59] Van Veldhuizen, E.M., Electrical discharges for environmental purposes: Fundamentals and Applications (Nova Science Publishers, Inc., New York, 1999)
- [60] Sakurada, N., Ishii, Y., Watanabe, K., Kubota, Y.: Visualization of Molten Pools and Invisible Laser Beam Profiles Using an Ultraviolet CCD Camera. Journal of Visualization, 4(4) 349-356 (2001)