

การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธีเสอากาศแบบลูปกาทหลายอัน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF THE LIGHTNING LOCATION SYSTEM WITH MULTI CROSS LOOP ANT
ENNAS

Mr. Nattanapong Kongtrakul



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธีเสาสอากาศแบบ ลูปกากบาทหลายอัน
โดย	นายณัฐธนนพงค์ คงตระกูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อภิบาล พุกษานูบาล)

ณัฐธนพงศ์ คงตระกูล : การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธีเสาอากาศแบบลูป
 ภาทบาทหลายอัน (DEVELOPMENT OF THE LIGHTNING LOCATION SYSTEM WITH
 MULTI CROSS LOOP ANTENNAS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วีระพันธ์ รั้งสี
 วิจิตรประภา, 72 หน้า.

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมในการตั้งเสาอากาศแบบบ่วงเพื่อให้ได้
 ตามเงื่อนไขมาตรฐาน IEC 62858 Ed.1 โดยการพิจารณาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าและความ
 แม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า ซึ่งประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าของเสาอากาศแบบบ่วงจะอยู่ใน
 รูปของฟังก์ชันขนาดกระแส ระยะทาง และทิศทางที่เกิดฟ้าผ่า โดยฟ้าผ่ามีขนาดกระแสตั้งแต่ 5 kA -
 300kA เนื่องจากประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าทั้งระบบคือเหตุการณ์ที่ระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่า
 สามารถหาตำแหน่งฟ้าผ่าได้ เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพการตรวจจับจึงคำนึงถึงระเบียบวิธีที่ใช้ในการ
 ระบุตำแหน่งฟ้าผ่า สำหรับความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า จะกำหนดตำแหน่งฟ้าผ่าและขนาด
 กระแสเท่ากับ 31 kA และใช้หลักการ MDF และ TOA ในการหาตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสม โดยค่า
 ความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าคือ ระยะห่างระหว่างจุดที่เกิดฟ้าผ่ากับจุดที่ได้มากจากการ
 คำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสม โดยจะพิจารณาถึงจำนวนเสาอากาศแบบบ่วงในระบบระบุ
 ตำแหน่งฟ้าผ่าตั้งแต่ 2 ตัว จนถึง 4 ตัว และพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองจากโปรแกรม
 MATLAB 20121a

จากการศึกษาพบว่าวิธี MDF นั้นใช้เสาอากาศแบบบ่วงเพียงแค่ 2 ตัวจึงทำให้มี
 ประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่ามากกว่าวิธี TOA ซึ่งใช้ 4 ตัว แต่อย่างไรก็ตามวิธี TOA จะให้ความ
 แม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าที่ดีกว่า MDF เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเวลานั้นมีค่าน้อยกว่า
 ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากมุมอะซิมีท และยังพบว่าระยะห่างระหว่างเสาอากาศที่น้อยที่สุดคือ
 200 กิโลเมตร และมากที่สุด 424.26 กิโลเมตร เพราะว่าจะทำให้ทำให้ประสิทธิภาพการตรวจจับและ
 ความแม่นยำเป็นไปตามเงื่อนไข สำหรับระบบการกำหนดตำแหน่งและขนาดกระแสฟ้าผ่า ให้
 ครอบคลุมประเทศไทยอย่างเหมาะสม และมีความแม่นยำ ควรใช้สถานีเพื่อติดตั้งเสาอากาศแบบบ่วง
 จำนวนทั้งสิ้น 12 จุด

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5470553021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: LIGHTNING; LIGHTNING LOCATION SYSTEM; IEC62858

NATTANAPONG KONGTRAKUL: DEVELOPMENT OF THE LIGHTNING LOCATION SYSTEM WITH MULTI CROSS LOOP ANTENNAS. ADVISOR: ASST. PROF. WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Ph.D., 72 pp.

The objective of the study is to determine the optimal baseline of lightning location system for general requirements in accordance with IEC 62858 Ed.1, which considers lightning flash detection efficiency and location accuracy. The lightning flash detection efficiency of loop antennas depends on lightning current in the range of 5 kA to 300 kA, distance between lightning and loop antennas and azimuth angle. In fact, the lightning flash detection efficiency is percentage of flashes detected as a percentage of the total number of flashes occurring in reality, so the lightning flash detection efficiency considers a localization of lightning flash method. For lightning accuracy, supposition of lightning location and peak current equal to 31 kA under Magnetic direction finding method and time of arrival method to determine optimal lightning location.

The finding indicated that MDF method using 2 Loop antennas to determine lightning location, so lightning flash detection efficiency was greater than TOA method which requires 4 Loop antennas. On the other hand TOA method yields a better location accuracy compare to MDF method because time deviation is less than azimuth angle deviation. The finding showed that minimum baseline and maximum baseline between 200 kilometers and 424.26 kilometers respectively. For determine lightning location and lightning current to properly cover Thailand area. The optimum precision shall include 12 loop antenna lightning stations.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนกราบขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำที่ดีเยี่ยมในการเรียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนกราบขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. อภิบาล พฤษานาบุล กรรมการภายนอก ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้เขียนกราบขอบคุณอาจารย์ในแลปและเจ้าหน้าที่ไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ผู้เขียนกราบขอบคุณในความช่วยเหลือตลอดมาจากพี่น้องๆในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงตลอดการเรียนปริญญาโท ผู้เขียนกราบขอบคุณบิดามารดาที่คอยเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำทั่วไป	5
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	5
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	7
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 สาเหตุของการเกิดฟ้าผ่า.....	9
2.2 ลักษณะของฟ้าผ่า.....	9
2.3 การแจกแจงขนาดกระแสฟ้าผ่าสูงสุด (Peak Current Distribution).....	11
2.4 สนามแม่เหล็กแพร่กระจายจากลำฟ้าผ่า.....	12
2.5 สเปกตรัมคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับ.....	13
2.6 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	14
2.7 ระเบียบวิธีในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า	15
2.7.1 Magnetic direction Finding (MDF)	15
2.7.2 Time of arrival (TOA)	18
2.8 กระบวนการหาตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสม.....	20
2.9 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในมาตรฐาน IEC 62858 Ed.1.....	20
2.9.1 ประสิทธิภาพการตรวจจับลำฟ้าผ่า (Flash detection efficiency).....	20

2.9.2 ค่ามัธยฐานความแม่นยำบอกตำแหน่ง (Median location accuracy)	21
2.9.3 ข้อกำหนดโดยทั่วไป (General requirements)	21
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้างระบบตรวจจับฟ้าผ่าโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	22
3.1 การทำงานของระบบตรวจจับฟ้าผ่า	23
3.2 ส่วนรับสัญญาณ	23
3.2.1 เสาอากาศแบบบ่วงกากบาท (Cross Loop Antenna)	23
3.2.2 วงจรปรีแอมป์	28
3.2.3 วงจรเปรียบเทียบ (Comparator circuit)	30
3.2.4 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter)	32
3.2.5 จีพีเอส (GPS)	33
3.2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)	33
3.2.7 รูปแบบการต่ออุปกรณ์	34
3.3 ส่วนประมวลผลสัญญาณ	35
3.3.1 โปรแกรมคำนวณหาสัญญาณแรงดัน	35
3.3.1 โปรแกรมคำนวณหาขนาดและตำแหน่งฟ้าผ่า	36
บทที่ 4 ผลการจำลองระบบตรวจจับฟ้าผ่าเพื่อประเมินหาระยะห่างที่เหมาะสม	38
4.1 คุณลักษณะของระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่าที่นำมาใช้ในการจำลอง	38
4.2 กระบวนการจำลองประสิทธิภาพตรวจจับฟ้าผ่าในระบบ	38
4.2.1 ประสิทธิภาพในการตรวจจับของแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า	39
4.2.2 ผลการจำลองประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับฟ้าผ่าต่อระยะทางและ มุมระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่า	40
4.2.3 ประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธีMDF	41
4.2.4 ประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธีTOA	46

4.2.5	ข้อค้นพบการจำลองประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธี MDF และ TOA.....	48
4.3	การจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในระบบ	48
4.3.1	การจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในระบบด้วยวิธี MDF	48
4.3.2	การจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในระบบด้วยวิธี TOA.....	50
4.4	ข้อค้นพบจากแบบจำลองประสิทธิภาพการตรวจจับและความแม่นยำในการบอกพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่าโดยคำนึงถึงเส้นเชื่อมฐาน	51
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	53
5.1	สรุปผล.....	53
5.2	ข้อเสนอแนะ	56
ภาคผนวก ก.	วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าและขนาดกระแสฟ้าผ่าในการศึกษา	57
ก.1	วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี MDF.....	57
ก.1	วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA.....	59
ภาคผนวก ข	แบบจำลองหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในระบบ	61
ข.1.	กระบวนการคำนวณหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่า	61
ข.1.1	ความน่าจะเป็นแจกแจงของขนาดกระแสฟ้าผ่า	61
ข.2.2	วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพการตรวจจับในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า	62
ข.2.3	วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าของระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่า	64
ข.3	กระบวนการคำนวณหาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า	64
ข.3.1	MDF.....	65
ข.3.2	TOA (Time of Arrival).....	66
	รายการอ้างอิง	68
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	72

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ c_1 และ c_2 ตามรูปทรงของเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna).....	22
ตารางที่ 3.2 ลักษณะเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) ที่ถูกออกแบบ.....	25



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะก้อนเมฆคิวมูโลนิมบัส (Cumulonimbus).....	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะของการเกิดฟ้าผ่าทั้ง 4 ประเภท.....	8
รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน (Cloud-to-Ground discharge).....	9
รูปที่ 2.4 ความน่าจะเป็นสะสมของขนาดกระแสลำฟ้าผ่าย้อนกลับสูงสุด (Cumulative statistical distributions of return stroke current peak).....	10
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมกำลังของลำฟ้าผ่าย้อนกลับ.....	11
รูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับตัดผ่านพื้นที่หน้าตัดขดลวด.....	13
รูปที่ 2.7 อัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna).....	14
รูปที่ 2.8 ระยะทำการของเสาอากาศแบบบ่วงกากบาท.....	14
รูปที่ 2.9 ตำแหน่งฟ้าผ่าที่ได้จากระเบียบวิธีการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าMDF.....	15
รูปที่ 2.10แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อตำแหน่งฟ้าผ่าใกล้เส้นเชื่อมระหว่างเสาอากาศแบบลูปกากบาท.....	15
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งฟ้าผ่าจากเสาอากาศแบบลูปกากบาท3ตัว.....	16
รูปที่ 2.12 ระเบียบวิธีการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA.....	17
รูปที่ 2.13 ระเบียบวิธีการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA 3 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า.....	18
รูปที่ 3.1 แบบจำลองการทำงานของชุดตรวจจับฟ้าผ่า.....	20
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของเสาอากาศแบบบ่วง (Equivalent Circuit of Loop Antenna).....	21
รูปที่ 3.3 การจำลองวงจรสมมูลของเสาอากาศจำลองในโปรแกรม LTspiceIV.....	25

รูปที่ 3.4 ผลกระแสที่ไหลในเสาอากาศจำลองในโปรแกรม LTspiceIV.....	26
รูปที่ 3.5 ผลแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเสาอากาศจำลองในโปรแกรม LTspiceIV.....	26
รูปที่ 3.6 รูปแบบการต่อเสาอากาศแบบบ่วงกับวงจรปรีแอมป์.....	27
รูปที่ 3.7 วงจรเสาอากาศแบบบ่วงและการต่อกับปรีแอมป์.....	28
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการตอบสนองความถี่ของวงจรปรีแอมป์(Pre-Amplifier).....	28
รูปที่ 3.9 วงจรยกระดับสัญญาณ.....	29
รูปที่ 3.10 วงจรเปรียบเทียบแบบ window detector	29
รูปที่ 3.11 ลักษณะจีพีเอสที่เลือกใช้ (GPS)	31
รูปที่ 3.12 รูปร่างบอร์ดPIC32MX460F512L.....	32
รูปที่ 3.13 บอร์ดวงจรปรีแอมป์ (Pre-Amp)	32
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ในด้านบันทึกผล.....	33
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาสัญญาณแรงดัน.....	34
รูปที่ 3.16 รูปแบบการบันทึกข้อมูลเอสดีการ์ด (SD-Card)	34
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาขนาดและตำแหน่งฟ้าผ่า.....	35
รูปที่ 4.1 กระบวนการประเมินหาประสิทธิภาพตรวจจับฟ้าผ่า.....	37
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับฟ้าผ่าต่อระยะทางและมุมระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่า.....	38
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับฟ้าผ่าต่อระยะทางและมุมระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่า.....	39
รูปที่ 4.4 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า2ตัวเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	40
รูปที่ 4.5 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า2ตัวเส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	40
รูปที่ 4.6 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า2ตัวเส้นเชื่อมฐาน 300 km ด้วยวิธี MDF.....	41
รูปที่ 4.7 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า3ตัวเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	41
รูปที่ 4.8 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า3ตัวเส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	42

รูปที่ 4.9 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า3ตัวเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	42
รูปที่ 4.10 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4ตัวเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	43
รูปที่ 4.11 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4ตัวเส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	43
รูปที่ 4.12 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4ตัวเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	43
รูปที่ 4.13 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4ตัวเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตรด้วยวิธี TOA.....	45
รูปที่ 4.14 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4ตัวเส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตรด้วยวิธี TOA.....	45
รูปที่ 4.15 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4ตัวเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตรด้วยวิธี TOA.....	45
รูปที่ 4.16 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัวเส้นเชื่อมฐาน100กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	47
รูปที่ 4.17 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัวเส้นเชื่อมฐาน200กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	47
รูปที่ 4.18 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัวเส้นเชื่อมฐาน300กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF.....	47
รูปที่ 4.19 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัวเส้นเชื่อมฐาน100กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA.....	49
รูปที่ 4.20 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัวเส้นเชื่อมฐาน200กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA.....	49
รูปที่ 4.21 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัวเส้นเชื่อมฐาน300กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA.....	49
รูปที่ 5.1 จำลองประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าทั้ง 12 ชุดตรวจจับฟ้าผ่าโดยเมื่อใช้วิธี MDFหาตำแหน่งฟ้าผ่า.....	52
รูปที่ 5.2 จำลองประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าทั้ง 12 ชุดตรวจจับฟ้าผ่าโดยเมื่อใช้วิธี TOA หาตำแหน่งฟ้าผ่า.....	53
รูปที่ ก.1 การพิจารณาเครื่องหมายของสัญญาณแรงดัน.....	57
รูปที่ ก.2 สัญญาณแรงดันต่อมุมอะซิมีท (Azimuth)	58
รูปที่ ข.1 ความน่าจะเป็นแจกแจงของขนาดกระแส.....	61

บทที่ 1

บทนำทั่วไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นบนโลกเป็นระยะเวลาที่ยาวนานก่อนสิ่งมีชีวิตเสียอีกและยังแฝงไปด้วยความลับต่างๆ ในสมัยโบราณมนุษย์มองว่าฟ้าผ่าเป็นความน่าสะพรึงกลัว และมีความเชื่ออยู่ในรูปของพระเจ้าต่าง อาทิเช่น ตำนานกรีก ฟ้าผ่าถูกสร้างมาจากสุริยักษ์ตาเดียว ไชคลอปส์, ตำนานสแกนดิเนเวีย ธอร์สามารถควบคุมฟ้าผ่าได้จากค้อนมยอลเนียร์, ในคัมภีร์ไบเบิล ฉบับปฐมกาล ฟ้าผ่าได้ผ่าลงบนภูเขาซีนายขณะที่โมเสสรับบัญญัติ 10 ประการจากพระเจ้า จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1752 เบนจามิน แฟรงคลิน (Benjamin Franklin)[1] ได้พิสูจน์ทดลองและอธิบายให้ทราบว่าฟ้าผ้านั้นเป็นผลของการดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ นับเป็นการเริ่มต้นของการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์เพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะสมบัติของฟ้าผ่า

เมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบที่ตามมาทั้งด้านความร้อน แสงกล และผลทางไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อคน สิ่งมีชีวิต สิ่งปลูกสร้าง สถาปัตยกรรมต่างๆรวมทั้งในระบบไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ฟ้าผ่าลงร่างกายของสิ่งมีชีวิตโดยตรงก็อาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ หรืออาจทำให้เกิดการลุกไหม้หรือระเบิด ณ จุดที่เกิดฟ้าผ่า สำหรับสถิติความสูญเสียจากฟ้าผ่าในประเทศไทยนั้น ข้อมูลจากการนำเสนอข่าวประเด็นฟ้าผ่าในสื่อพิมพ์พบว่าตั้งแต่ เดือนมกราคม พ.ศ.2550-มิถุนายน พ.ศ.2552 มีผู้เสียชีวิต 39 คน บาดเจ็บ 16 คน [2] ในปีพ.ศ. 2551-2558 มีผู้ได้รับบาดเจ็บจากฟ้าผ่าจำนวน 180 คน เสียชีวิต 46 คน เฉลี่ยปีละ 36 คน [3]

ในส่วนของผลกระทบทางไฟฟ้านั้นถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง จะทำให้เกิดแรงดันเกินเสิร์จมีค่าสูง เกิดคลื่นจรวิ่งเข้าสู่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า อาจทำให้ฉนวนเกิดความผิพอง อันนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับ จากการศึกษาของ Fedoseev, S.A.[4] พบว่าการเกิดฟ้าผ่าแต่ละครั้ง กระแสฟ้าผ่ามีโอกาสเข้าสู่ระบบมากกว่า 50 % ของกระแสสูงสุด จึงเห็นได้ชัดเจนว่าฟ้าผ่าเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดไฟฟ้าดับและความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า เช่น สายส่ง หม้อแปลง อุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย อุปกรณ์ป้องกัน สถานีไฟฟ้าและบริเวณอื่น ๆ ภายในสถานีไฟฟ้า เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ามีอัตราสูง

จึงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไประบบกวนระบบสื่อสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบที่เกิดกับอุปกรณ์ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันทรานเซียนต์ ทำให้อุปกรณ์ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ จัดเป็นการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Interference (EMI)) อย่างหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันต่างๆให้กับระบบไฟฟ้าระบบสื่อสาร และสิ่งปลูกสร้าง รวมถึงการป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกเพื่อป้องกันและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า

การเกิดฟ้าผ่าแต่ละครั้งจะมีปริมาณกระแส ประจุพลังงาน และความร้อนเกิดขึ้น เพราะฉะนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันนั้นต้องสามารถทนทานต่อค่ากระแสสูงๆ(กิโลแอมแปร์) และอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าได้ การจัดหาวัสดุที่จะใช้ในการสร้างอุปกรณ์ การวางแผนการออกแบบและการสร้างระบบป้องกันนั้น เราจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลเรื่องฟ้าผ่า เพื่อที่จะทราบข้อมูลทางสถิติ และค่าตัวแปรต่างๆที่เกิดจากฟ้าผ่าให้แน่นอนเสียก่อน[5]

การศึกษาข้อมูลฟ้าผ่าในประเทศไทยนั้นเริ่มขึ้นโดยสถาบันวิจัยฟ้าผ่า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2534 โดยใช้เครื่องนับฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นเองตามมาตรฐานที่ CIGRE กำหนด [6, 7]ในการเก็บข้อมูลจำนวนวันที่เกิดฝนฟ้าคะนองในรอบปี ต่อมา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้นำระบบตรวจหาตำแหน่งฟ้าผ่า (Lightning Location System , LLS) เข้ามาใช้งาน เพื่อระบุตำแหน่งของฟ้าผ่ารวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟ้าผ่า เช่น ค่ายอดของกระแสฟ้าผ่าและจำนวนฟ้าผ่าซ้ำ เป็นต้น โดยระบบ LLS ดังกล่าวจะทำการบันทึกวันและเวลาที่เกิดขึ้นจริงพร้อมตำแหน่งที่เกิดขึ้น ทำให้ทราบข้อมูลโดยละเอียดมากกว่าที่ใช้เครื่องนับฟ้าผ่าอย่างเดียว

ในปัจจุบันนี้ระบบตรวจหาตำแหน่งฟ้าผ่า (Lightning Location System, LLS) ถูกนำมาใช้ในหลายๆประเทศด้วยกัน อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา [8] อังกฤษ[9] ญี่ปุ่น [10] แคนาดา [11] ออสเตรเลีย [12] อิตาลี[13] นอร์เวย์[14] โปแลนด์[15] เยอรมัน[16] จีน[17] ฮองกง[18] บราซิล[19] มาเลเซีย[20] โดยข้อมูลฟ้าผ่าที่ได้จากระบบ LLS สามารถที่จะประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในหลายๆรูปแบบ อาทิ เช่น การประเมินความเสี่ยงในพื้นที่สนใจเพื่อนอกแบบป้องกันฟ้าผ่าให้เหมาะสม[21] การปรับปรุงสมรรถนะระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง[22] การวิจัยและศึกษาปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและภูมิอากาศวิทยา[23] ความรวดเร็วในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ สามารถตรวจสอบได้ว่าสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นมาจากฟ้าผ่าหรือไม่[24] สามารถระบุตำแหน่งฟ้าผ่าซึ่งเป็นสาเหตุของไฟฟ้า[25] การเตือนภัยล่วงหน้าต่อผู้ปฏิบัติงานการแจ้งในกรณีพายุฝนฟ้าคะนองเคลื่อนที่เข้ามา

แต่อย่างไรก็ตามระบบตรวจหาตำแหน่งฟ้าผ่าจากต่างประเทศนั้นยังมีค่าใช้จ่ายที่สูงประกอบกับในงานวิจัยที่ผ่านมาจะเป็นการทดสอบระบบตรวจจับเพื่อประเมินหาขนาดและตำแหน่งของ

ฟ้าผ่า ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งยังขาดเครื่องบันทึกข้อมูลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนามได้ [26] ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบระบบตรวจหาตำแหน่งฟ้าผ่าขึ้นมาซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปประเมินขนาดและตำแหน่งของฟ้าผ่า

แต่ถึงกระนั้นก็ตามคุณภาพข้อมูลตำแหน่งฟ้าผ่าที่จะนำมาหาความหนาแน่นฟ้าผ่าลงดิน (Ground Flash Density) ต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62858 Ed.1[27] โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้
 1) ประสิทธิภาพการตรวจจับล้าฟ้าผ่า(Flash Detection Efficiency, DE) ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 80% 2) ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง(Location accuracy, LA) ต้องดีกว่า 500 m 3) การจำแนกฟ้าผ่าลงดินกับฟ้าผ่าก่อนเมฆต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 85% โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคือระยะห่างเส้นเชื่อมฐาน(Sensor Baseline Distance) ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมในพื้นที่สนใจและศึกษาความเป็นไปได้ในการระบุพิกัดที่ตั้งเสาอากาศโดยเงื่อนไขอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 62858 Ed.1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 ทหาระยะห่างที่เหมาะสมในการตั้งเสาอากาศแบบบ่วงในพื้นที่สนใจ

1.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการระบุพิกัดที่ตั้งเสาอากาศ เพื่อเก็บข้อมูลให้ครอบคลุมประเทศไทย

1.2.3 เพื่อพัฒนาเสาอากาศและระบบเก็บข้อมูลและระบบวิเคราะห์เพื่อระบุตำแหน่งและกระแสฟ้าผ่าในพื้นที่ที่สนใจ

1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 มีความรู้เรื่องระเบียบวิธีในการหาตำแหน่งฟ้าผ่าและสามารถที่จะออกแบบชุดตรวจจับฟ้าผ่าและชุดบันทึกข้อมูลได้

1.3.2 สามารถนำระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่าขึ้นไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนามได้

1.3.3 สามารถกำหนดระยะห่างที่เหมาะสมในการติดตั้งชุดตรวจจับฟ้าผ่า

1.3.4 สามารถที่จะกำหนดระบุพิกัดที่ตั้งเสาอากาศในประเทศไทยตามมาตรฐาน IEC 62858 Ed.1.ได้

1.3.5 มีความรู้เรื่องความหนาแน่นฟ้าผ่าจากระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 62858 Ed1.

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตในการวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เพื่อที่จะพัฒนาระบบตรวจหาตำแหน่งฟ้าผ่าเพื่อใช้ในงานภาคสนามอย่างน้อย3เครื่อง โดยใช้หลักการของแรงดันเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีเงื่อนไขในการทดลองกำหนดตัวแปรควบคุมดังนี้

1.4.1 ฟ้าผ่าที่ใช้เป็นลำฟ้าผ่าที่สามารถเกิดขึ้นได้หลายจุดในเวลาพร้อมกันในระยะห่างอย่างน้อย877เมตร ขึ้นไปด้วยคอนโทรลเลอร์ ขนาด 20MS/s

1.4.2 สมมติให้ลำฟ้าผ่าเป็นแบบฟ้าผ่าลงและมีแนวตรงตั้งฉากกับพื้นที่สนใจ

1.4.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นในขณะเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง เท่ากับความเร็วแสง
(3×10^8 m/s)

1.4.4 กระแสฟ้าผ่าในการศึกษามีขนาด 5kA-300 kA

1.4.5 การคำนวณระบบประมวลผลจะได้ตำแหน่งการเกิดฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่าและประเภทของฟ้าผ่าบวกรหรือลบ

1.4.6 ผลกระทบอันเนื่องมาจากความสูงของเสาอากาศไม่พิจารณา

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาเหตุของการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเกิดขึ้นเนื่องจากเมฆที่มีประจุไฟฟ้าสูงๆสะสมกันมาก จนสามารถที่จะกระโดดข้ามตัวกลางคืออากาศซึ่งเป็นฉนวนที่ไม่สมบูรณ์ได้นับเป็นกิโลเมตรก่อให้เกิดฟ้าผ่า เมฆที่ก่อให้เกิดฟ้าผ่ามากที่สุดคือเมฆที่ก่อตัวเป็นเมฆพายุฝน หรือ ที่นักอุตุนิยมวิทยาเรียกว่า Cumulonimbus ดังรูปที่ 2.1 ทำให้เกิดฝนตกหนัก ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง บางครั้งมีลูกเห็บตก จึงมักถูกเรียกว่า เมฆฝนฟ้าคะนอง (Thunderstorm clouds)



รูปที่ 2.1 ลักษณะก้อนเมฆคิวมูโลนิมบัส (Cumulonimbus) [28]

ภายในก้อนเมฆ จะประกอบไปด้วยละอองน้ำ เกล็ดน้ำแข็ง หยดน้ำ ฯลฯ เป็นจำนวนมาก ซึ่งการเสียดสีกันอยู่ตลอดเวลาของพวกมันทำให้มีประจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นและประจุเหล่านี้จะเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อนของพลังงาน ที่พร้อมจะวิ่งออกจากก้อนเมฆเมื่อการสะสมประจุภายในก้อนเมฆนั้นมากขึ้นประจุไฟฟ้าเหล่านั้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงข้ามที่พื้นโลกด้วย

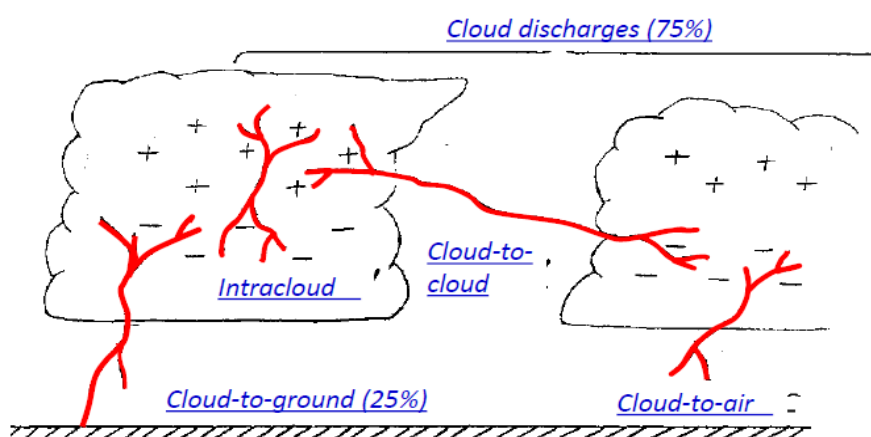
2.2 ลักษณะของฟ้าผ่า

ลักษณะของฟ้าผ้านั้นแบ่งได้ออกเป็น 4 ประเภทคือ

- ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นภายในก้อนเมฆ (Intra-cloud discharge)
- ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆ (Cloud-to-Cloud discharge)

- ฟผ่าที่เกดขึ้นระหว่งกอนเมฆกับอากาศ (Cloud-to-air discharge)
- ฟผ่าที่เกดขึ้นระหว่งกอนเมฆกับพื้นดิน (Cloud-to-ground discharge)

ซึ่งสามารถแยกได้อีกเป็นฟผ่าลงพื้นโลกกับไม่ลงพื้นโลก ในส่วนของฟผ่าไม่ลงพื้นโลก (Cloud discharge) นั้น จะจำแนกได้เป็น 3 ประเภท (1) ฟผ่าที่เกดขึ้นภายในกอนเมฆ (2) ฟผ่าที่เกดขึ้นระหว่งกอนเมฆ (3) ฟผ่าที่เกดขึ้นระหว่งกอนเมฆกับอากาศ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ของการถ่ายเทประจุของกอนเมฆนั้นจะเป็นแบบฟผ่าที่เกดขึ้นภายในกอนเมฆ (Intra-cloud discharge) (ดังรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการเกิดฟผ่าทั้ง 4 ประเภท

แม้ว่าฟผ่าส่วนใหญ่จะไม่ผ่าลงดินซึ่งมีประมาณ 3 เท่าของฟผ่าลงดินแต่ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นกับลักษณะของพายุ ลำดับขั้นของการพัฒนาพายุ และตัวแปรอื่นๆ แต่ในทางตรงข้าม เมื่อมองในด้านภัยอันตรายที่เกิดขึ้นกับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนพื้นโลกนั้น ฟผ่าจากกอนเมฆสู่กอนเมฆ หรือภายในกอนเมฆนั้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่อมนุษย์แต่อย่างใด ยกเว้นเสียแต่ว่าจะส่งผลกระทบต่อเครื่องบิน ในกรณีที่เครื่องบินอาจบินผ่านกอนเมฆนั้น ในขณะที่ฟผ่าที่ผ่าจากกอนเมฆลงดิน ส่งผลกระทบต่างๆที่สร้างความเสียหายให้แก่มนุษย์และทรัพย์สินมากกว่า เพื่อทราบถึงผลกระทบต่างๆเราจึงจำเป็นต้องศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับฟผ่าชนิดลงดิน

ลักษณะของฟผ่าที่เกดขึ้นระหว่งกอนเมฆและพื้นโลกจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับทิศทางของลิตเตอร์เริ่มต้น และการถ่ายเทประจุของกอนเมฆลงสู่พื้นโลก โดยแบ่งออกเป็นสองลักษณะดังนี้

- ฟผ่าลงกับฟผ่าขึ้น

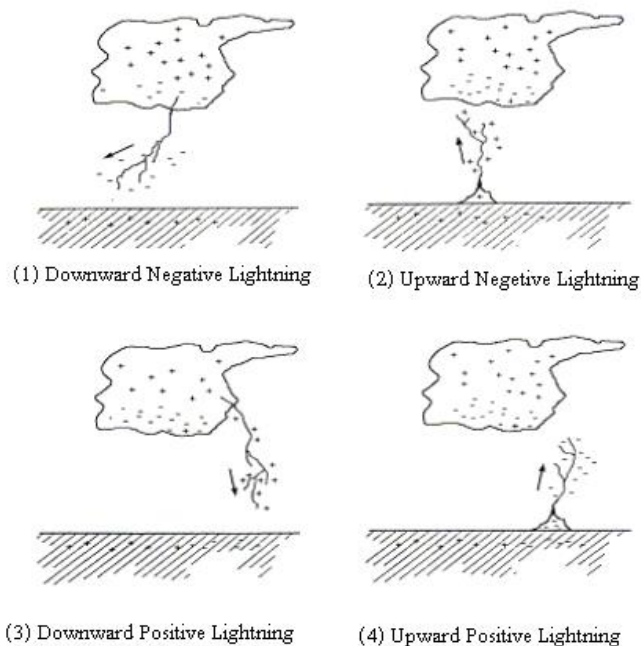
ฟผ่าลง หมายความว่าลิตเตอร์เริ่มขึ้นที่กอนเมฆแล้วเคลื่อนที่ลงมาสู่พื้นโลก

ฟ้าผ่าขึ้น หมายความว่าลิตเตอร์เริ่มขึ้นที่พื้นโลกแล้วเคลื่อนที่ไปสู่ก้อนเมฆ ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากสิ่งปลูกสร้างที่มีความสูง 100 เมตรขึ้นไป หรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนภูเขา

หัวของประจุที่ถ่ายเทลงสู่พื้นโลกนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น ขั้วบวกหรือขั้วลบ โดยจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับลิตเตอร์ที่เคลื่อนที่จากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทประจุไฟฟ้าของก้อนเมฆที่ลงพื้นดิน และทิศทางของลิตเตอร์เริ่มต้น จึงสามารถแบ่งลักษณะของการเกิดฟ้าผ่าได้เป็น 4 ประเภท (ดังรูปที่ 2.3) [29]

- ฟ้าผ่าลงขั้วลบ (Downward negative lightning)
- ฟ้าผ่าขึ้นขั้วลบ (Upward negative lightning)
- ฟ้าผ่าลงขั้วบวก (Downward positive lightning)
- ฟ้าผ่าขึ้นขั้วบวก (Upward positive lightning)

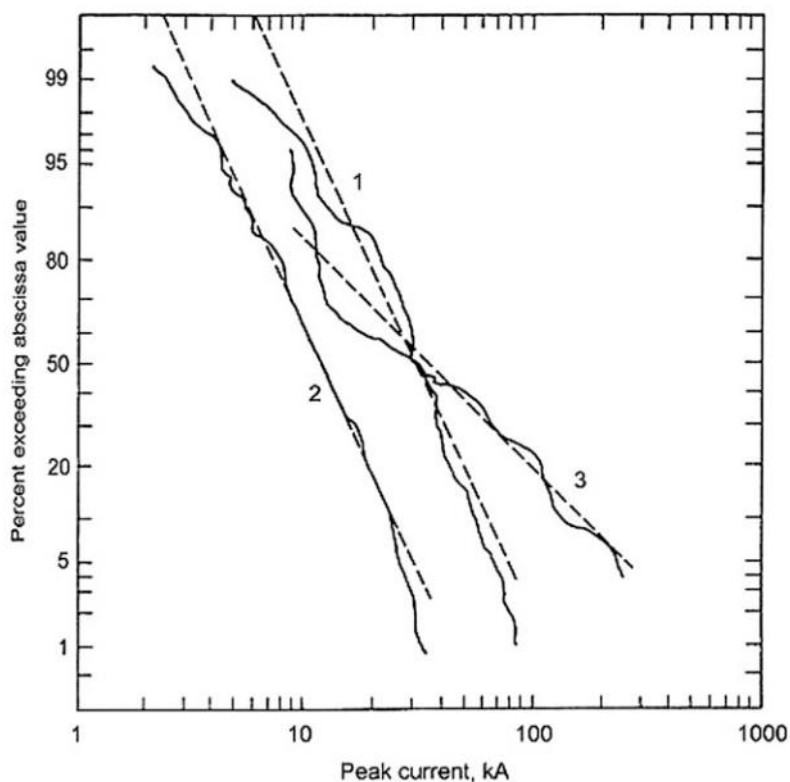


รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน (Cloud-to-Ground discharge)

2.3 การแจกแจงขนาดกระแสฟ้าผ่าสูงสุด (Peak Current Distribution)

ในการป้องกันฟ้าผ่านั้นระดับความปลอดภัยเราเลือกตามขนาดของกระแสฟ้าผ่าลำแรก เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องรู้ถึงการกระจายตัวของขนาดกระแสฟ้าผ่าในพื้นที่ป้องกันฟ้าผ่า จากรูป

2.4



รูปที่ 2.4 ความน่าจะเป็นสะสมของขนาดกระแสลำฟ้าผ่าย้อนกลับสูงสุด (Cumulative statistical distributions of return stroke current peak) 1. ลำฟ้าผ่าแรกชั่วลบ 2. ลำฟ้าผ่าตามชั่วลบ 3. ลำฟ้าผ่าชั่วบวก [30]

จะพบว่าลำฟ้าผ่าลำแรกชั่วลบนั้นมีขนาดกระแสฟ้าผ่าเฉลี่ยประมาณที่ 30 kA และลำฟ้าผ่าตามชั่วลบประมาณที่ 12 kA และลำฟ้าผ่าชั่วบวกประมาณ 35 kA

2.4 สนามแม่เหล็กแพร่กระจายจากลำฟ้าผ่า

เมื่อเกิดฟ้าผ่าอันเกิดจากการดีสชาร์จประจุไฟฟ้าจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลกจะทำให้เกิดลำฟ้าผ่าย้อนกลับระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B แพร่กระจายออกไปโดยรอบลำฟ้าผ่า

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้สนใจเฉพาะสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการแพร่เท่านั้น ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.1) โดยคำนึงถึงการหน่วงเวลาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นสนามแม่เหล็ก

$$B_{\phi(t+\frac{r}{c})} = \frac{\mu_0 v I_p}{2\pi cr} \quad (2.1)$$

โดยที่

r คือ ระยะทางในแนวระดับจากลำฟ้าผ่าถึงจุดที่ต้องการหาค่าสนามแม่เหล็ก

c คือ ความเร็วแสง = 3×10^8 m/s

μ_0 คือ สภาพความซึมซาบสัมพัทธ์ = $4\pi \times 10^{-7}$

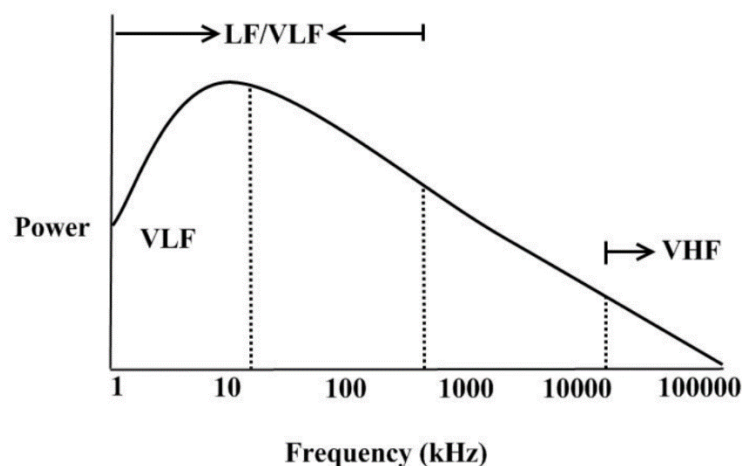
v คือ ความเร็วของลำฟ้าผ่าย้อนกลับ (m/s) (โดยประมาณ 1×10^8 m/s)

I_p คือ กระแสค่าสูงสุด (kA)

ผลของสนามแม่เหล็กแพร่กระจายที่เกิดขึ้นจากลำฟ้าผ่า นี้เองจะช่วยให้สามารถตรวจจับได้ว่ามีฟ้าผ่าเกิดขึ้น

2.5 สเปกตรัมคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับ

คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากลำฟ้าพ่านั้นถูกพิจารณาเป็นอิมพัลส์ เพราะฉะนั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในลักษณะที่เป็นแถบความถี่กว้าง โดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่จะปล่อยพลังงานในย่านความถี่ VLF (Very Low Frequency) และ LF (Low Frequency) โดยจุดสูงสุดของสเปกตรัมกำลังจะอยู่ประมาณที่ 10 kHz ดังรูป 2.5[31]



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมกำลังของลำฟ้าผ่าย้อนกลับ

2.6 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อนำขดลวดที่มีขนาดพื้นที่เท่ากับ A ตารางเมตร และจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N รอบ มาวางในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในขดลวดในทิศทางตามกฎมือขวา และแรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้ง 2 ข้างของขดลวดดังรูปที่ 2.6 สามารถหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดได้ตามสมการที่ (2.2)

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

เมื่อ

e คือแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced voltage; Volt: V)

N คือจำนวนรอบของขดลวด (Number of turns; Turns: N)

ϕ คือฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux; Webers: Wb)

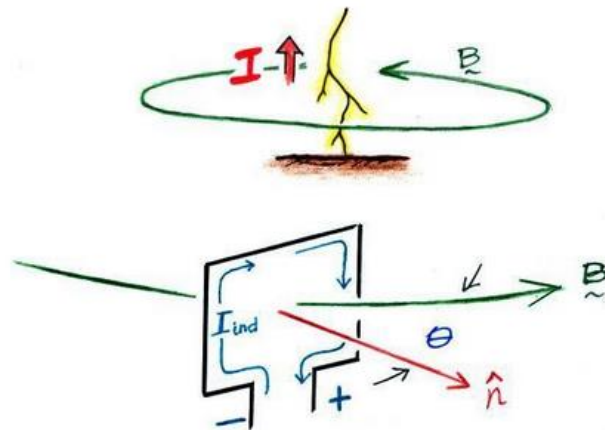
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) หรือขนาดของสนามแม่เหล็ก (B) มีค่าเท่ากับ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) ต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กตั้งฉาก ฉะนั้น ค่าของขนาดสนามแม่เหล็กเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{B} = \frac{\phi}{A} \quad (2.3)$$

เมื่อ

B คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density; Tesla: T)

A คือพื้นที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (m^2)



รูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กจากลำฟ้าย้อนกลับตัดผ่านพื้นที่หน้าตัดขดลวด

การหาขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของเสาอากาศ ถูกแสดง
ดังสมการที่ 2.4

$$\varphi = BA \cos \theta \quad (2.4)$$

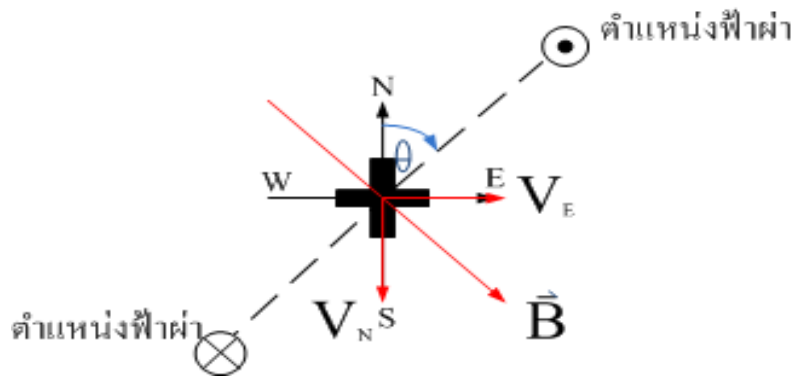
พบว่าค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก \vec{B} ใน Free space มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ ความ
เข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity: \vec{H}) ดังสมการ 2.5

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.5)$$

2.7 ระเบียบวิธีในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า

2.7.1 Magnetic direction Finding (MDF)

การตรวจจับการเกิดฟ้าผ่าด้วยวิธีMDFนั้นจะอาศัยหลักการ จากแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น
จากเสาอากาศแบบบ่วงวง (Loop Antenna) เมื่อบ่วงวงกันในแนวตั้งฉาก ซึ่งเสาอากาศจะวางใน
ทิศทาง เหนือ-ใต้ และ ตะวันออก - ตะวันตก โดยแรงเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเสาอากาศที่วางในทิศทาง
เหนือ-ใต้ นั้นจะเปลี่ยนไปตามมุมโคไซน์ระหว่างลำฟ้าผ่า กับระนาบของเสาอากาศ ในส่วนของแรงดัน
เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเสาอากาศทิศตะวันออก - ตะวันตกนั้น จะเปลี่ยนไปตามไซน์โดยขนาดมุม
เท่ากัน (ดังรูปที่2.7)



รูปที่ 2.7 อัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) ในแต่ละแกน

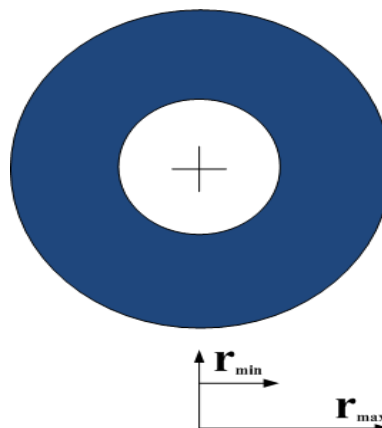
$$V_N = -NA \cos \theta \frac{dB}{dt} \tag{2.6}$$

$$V_E = -NA \sin \theta \frac{dB}{dt} \tag{2.7}$$

ซึ่งจะอัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะสัดส่วนกับมุมแทนเจนต์ระหว่างทิศเหนือของเสาอากาศกับฟ้าผ่า สมการ(2.8)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_E}{V_N} \tag{2.8}$$

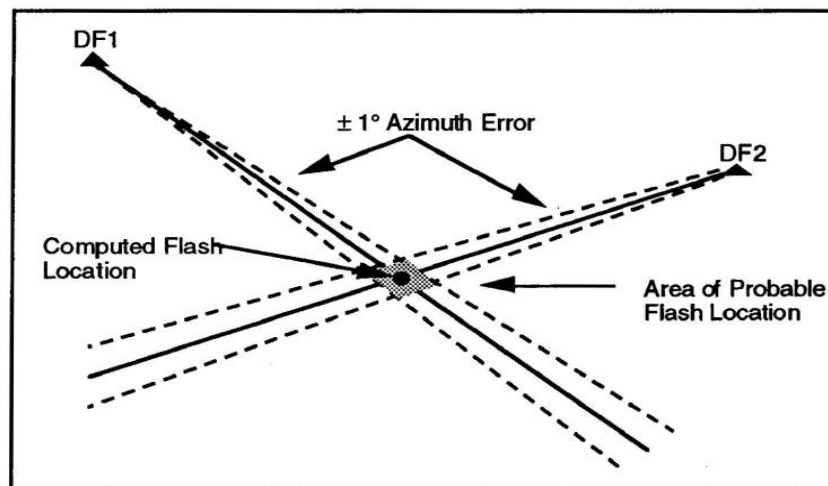
ในแต่ละเสาอากาศนั้นจะมีระยะทำการของตัวเองที่ได้ออกแบบอยู่ (ดังรูปที่ 2.8) จะเห็นได้ว่าในระยะที่น้อยกว่า r_{min} และระยะที่มากกว่า r_{max} นั้นเป็นระยะที่เสาอากาศจะไม่ทำงาน เพราะฉะนั้นเสาอากาศอันถัดไปนั้นระยะทำการต้องครอบคลุมพื้นที่สีขาว



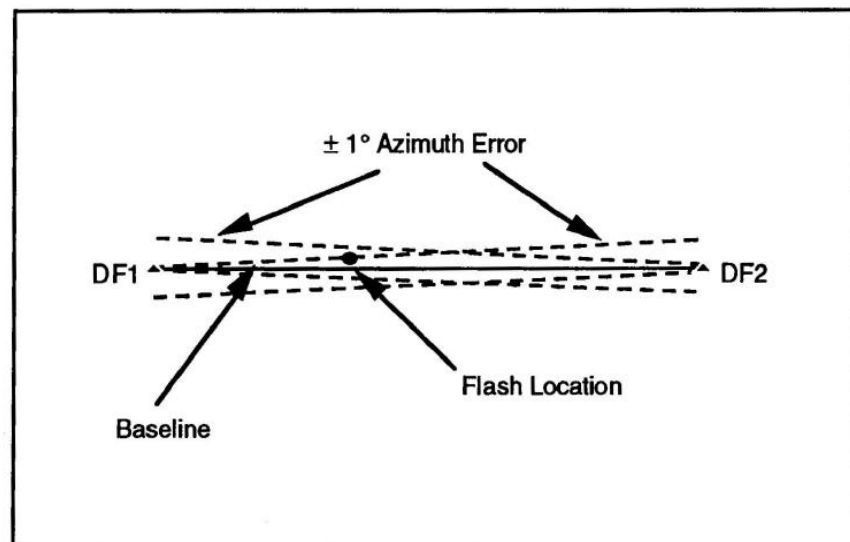
รูปที่ 2.8 ระยะทำการของเสาอากาศแบบบ่วงกากบาท

แต่การระบุตำแหน่งฟ้าผ่าได้นั้นจำเป็นต้องใช้เสาอากาศอย่างน้อยสองเครื่องซึ่งจุดตัดที่เกิดขึ้นนั้นก็คือ ตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่านั่นเอง (ดังรูปที่ 2.9)

ในบางครั้งนั้นตำแหน่งที่ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นอยู่ใกล้กับเส้นเชื่อมฐาน ระหว่างเสาอากาศ ทำให้ในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่านั้นเกิดข้อผิดพลาดสูง เนื่องจากเสาอากาศแบบวงจะมองเห็นตำแหน่งฟ้าผ่านั้น ใกล้เป็นเส้นเดียวมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อตำแหน่งฟ้าผ่าขยับเข้าใกล้เส้นฐาน ดังรูปที่ 2.10

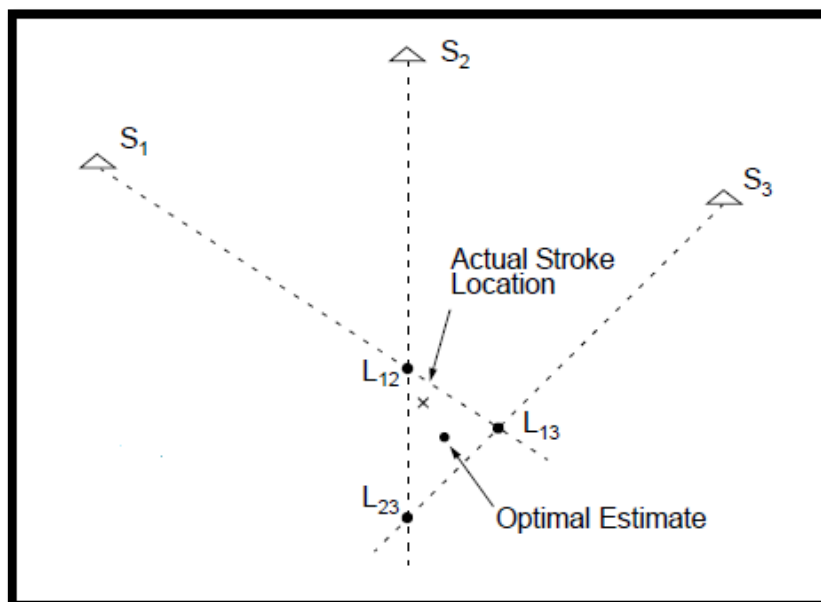


รูปที่ 2.9 ตำแหน่งฟ้าผ่าที่ได้จากระเบียบวิธีการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า MDF



รูปที่ 2.10 แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อตำแหน่งฟ้าผ่าใกล้เส้นเชื่อมระหว่างเสาอากาศแบบลูกบาท

จากที่ได้แสดงไปแล้วนั้นเมื่อตำแหน่งฟ้าผ่าใกล้เส้นฐานมากขึ้นนั้นจะเกิดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งมากขึ้นเรื่อย ๆ จึงจำเป็นที่จะต้องมีส่วนประกอบตัวที่ 3 ที่ช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งมากขึ้น(ดังรูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งฟ้าผ่าจากเสาอากาศแบบรูปกากบาท3ตัว

2.7.2 Time of arrival (TOA)

ในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่านั้นจะทำการระบุเวลาของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจะลำฟ้าผ่าถึงชุดตรวจจับฟ้าผ่าโดยใช้นาฬิกาอะตอมที่วัดพิคโตวินาที (Global Positioning System : GPS) ดังสมการ 2.8 โดยแสดงดังรูป 2.12

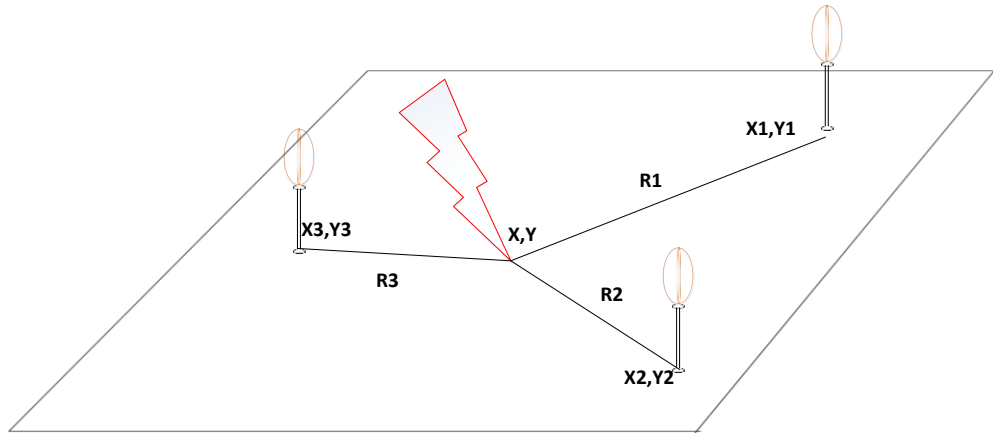
$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c} \quad (2.8)$$

โดยที่ t_i คือเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาถึงแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า [second; s]

t คือเวลาที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น [second; s]

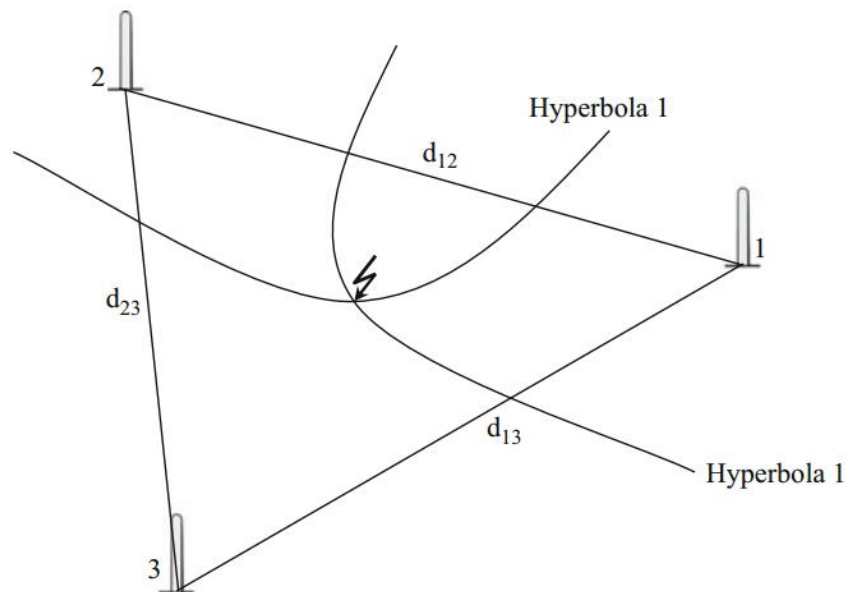
x, y คือตำแหน่งฟ้าผ่า [metre; m]

x_i, y_i คือตำแหน่งชุดตรวจจับฟ้าผ่า [metre; m]



รูปที่ 2.12 ระเบียบวิธีการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA

เนื่องจากมีตัวแปรไม่ทราบค่าอยู่ 3 ตัวเพราะฉะนั้นจึงต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 3 ตัว โดยความแตกต่างทางเวลาที่มาถึงของแต่ละคู่ชุดตรวจจับฟ้าผ่า สร้างเป็นวิธีเรขาคณิตแบบไฮเพอร์โบลา (Hyperbola locus) ซึ่งจุดตัดของเส้นไฮเพอร์โบลานี้คือตำแหน่งฟ้าผ่า ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระเบียบวิธีการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA 3 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า

แต่ถ้าเมื่อตำแหน่งฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นอยู่นอกวงสามเหลี่ยมของชุดตรวจจับฟ้าผ่าอาจทำให้เกิดจุดตัดสองจุดทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งฟ้าผ่าอย่างแน่นอนได้เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าทั้งหมด 4 ตัว

2.8 กระบวนการหาค่าตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสม

การทดสอบโคสแควร์จะทำให้หาค่าตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสมได้โดยคำนึงถึงค่าความคลาดเคลื่อนของการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และความคลาดเคลื่อนจาก จีพีเอส (GPS) โดยจุดที่ค่าโคสแควร์มีค่าต่ำสุดจะเป็นตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสมในการหาค่าตำแหน่งฟ้าผ่าจะใช้ระเบียบวิธีเลขคณิต Marquardt method

สำหรับวิธี MDF ในการหาค่าตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสมต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 3 ตัว เนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่ต้องการหาทั้งหมด (x, y) ดังสมการ 2.9 ในขณะที่วิธี TOA ต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 4 ตัว เพราะมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ตัว (x, y, t) ดังสมการ 2.10

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\theta_{mi} - \theta_i)}{\sigma_{\theta i}} \right]^2 \quad (2.9)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-3} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(t_{mi} - t_i)}{\sigma_{ti}} \right]^2 \quad (2.10)$$

โดยที่ N คือ จำนวนชุดตรวจจับฟ้าผ่าทั้งหมดที่ตรวจจับได้

θ_{mi} คือ มุมอะลิมัทที่ได้จากชุดตรวจจับฟ้าผ่า i

θ_i คือ มุมอะลิมัทที่ได้จากการคำนวณวิธีเชิงเลขคณิต

$\sigma_{\theta i}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมอะลิมัทที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่า i

t_{mi} คือ เวลาคลื่นแพร่เข้ามาหาชุดตรวจจับฟ้าผ่า i

t_i คือ เวลาที่คลื่นแพร่เข้ามาหาชุดตรวจจับฟ้าผ่าได้จากการคำนวณวิธีเชิงเลขคณิต

σ_{ti} คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการบันทึกเวลาที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่า i

2.9 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในมาตรฐาน IEC 62858 Ed.1

2.9.1 ประสิทธิภาพการตรวจจับลำฟ้าผ่า (Flash detection efficiency)

ประสิทธิภาพการตรวจจับลำฟ้าผ่า คือ ร้อยละของลำฟ้าผ่าที่ตรวจจับได้จากร้อยละทั้งหมดของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริง

2.9.2 ค่ามัธยฐานความแม่นยำบอกตำแหน่ง (Median location accuracy)

คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่าจริงกับตำแหน่งฟ้าผ่าที่ได้จากระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่า (LLS)

2.9.3 ข้อกำหนดโดยทั่วไป (General requirements)

2.9.3.1 ประสิทธิภาพการตรวจจับลัมฟ้าผ่า (Flash detection efficiency)

ต้องมีอย่างน้อย ร้อยละ 80 ในพื้นที่ต้องการหาความหนาแน่นลัมฟ้าผ่าลงดิน (Ground flash density)

2.9.3.2 ค่ามัธยฐานความแม่นยำบอกตำแหน่ง (Median location accuracy)

ต้องดีกว่า 500 m ในพื้นที่ต้องการหาความหนาแน่นฟ้าผ่าลงดิน (Ground flash density)



บทที่ 3

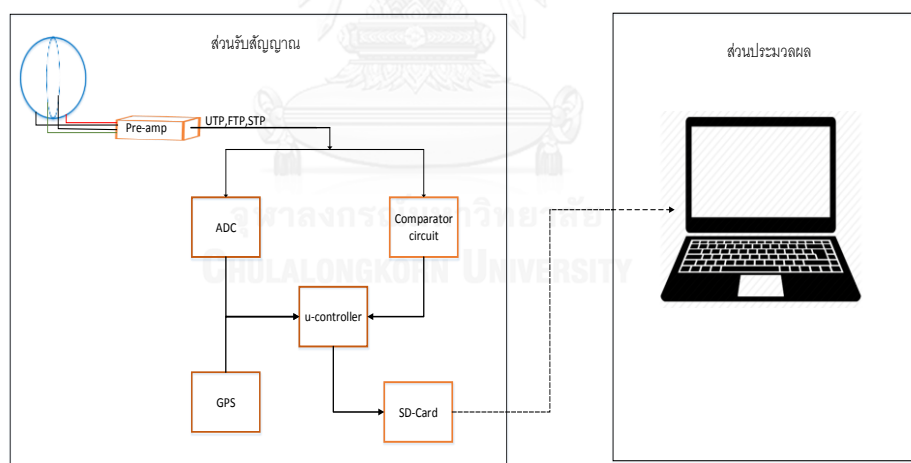
การออกแบบและประกอบสร้างระบบตรวจจับฟ้าผ่าโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชุดตรวจจับฟ้าผ่าซึ่งจะใช้ความรู้จากทฤษฎีจากบทที่ 2 ในการออกแบบชุดตรวจจับฟ้าผ่าประกอบกับใช้โปรแกรม LTspiceIV จำลองผลที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ

การออกแบบระบบตรวจจับเพื่อประเมินหาขนาดและตำแหน่งฟ้าผ่านั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนดังนี้

1. การออกแบบส่วนรับสัญญาณ
2. การออกแบบส่วนประมวลผล

องค์ประกอบต่างๆของชุดตรวจจับฟ้าผ่าเพื่อประเมินหาขนาดและตำแหน่งฟ้าผ่าสามารถแสดงได้ดังรูปที่3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองการทำงานของชุดตรวจจับฟ้าผ่า

โดยชุดตรวจจับฟ้าผ่านั้นประกอบไปด้วย เสาอากาศแบบบ่วงกากบาท (Cross Loop Antenna), ปรีแอมป์ (Pre-amplifier), วงจรเปรียบเทียบ (Comparator Circuit), วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter), วงจรบันทึกผล (Recorder Circuit) เป็นต้น

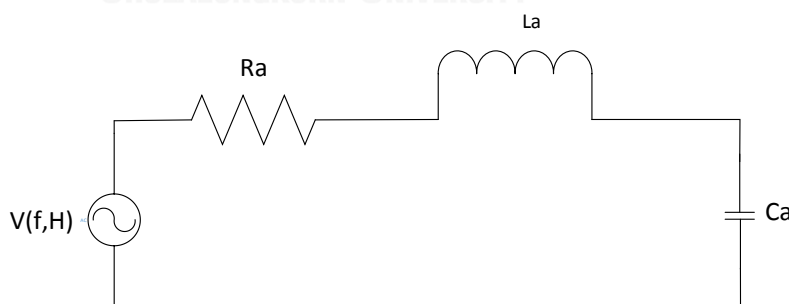
3.1 การทำงานของระบบตรวจจับฟ้าผ่า

การทำงานของระบบตรวจจับฟ้าผ่า นั้นจะอาศัยเสาอากาศแบบบ่วงวางตั้งฉากซึ่งกันและกัน เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องมาจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับโดยจะวางชุดตรวจจับฟ้าผ่าในทิศทางที่ทราบค่าแน่นอน เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่เสาอากาศแบบบ่วง ทั้งสองแกนเหนือ-ใต้ และตะวันออก - ตะวันตก ตามมุมอะซิมัทและระยะทาง โดยวงจรปริ๊อมป์จะทำหน้าที่แปลงกระแสเหนี่ยวนำจากเสาอากาศแบบบ่วง เป็นสัญญาณแรงดัน เมื่อสัญญาณแรงดันนั้นมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม วงจรเปรียบเทียบก็จะส่งสัญญาณไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำงาน ในขณะเดียวกันนั้นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลก็จะเป็นสัญญาณแรงดันให้อยู่ในรูปสัญญาณดิจิตอลเพื่อไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถบันทึกค่าสัญญาณแรงดันลงในเอสดีการ์ด (SD-Card) ได้ พร้อมทั้งนั้นจะทำการบันทึกเวลาที่เสาอากาศแบบบ่วงตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอ้างอิงเวลามาจากจีพีเอส (GPS) ซึ่งทำให้นำข้อมูลที่บันทึกนั้นวิเคราะห์ผลได้

3.2 ส่วนรับสัญญาณ

3.2.1 เสาอากาศแบบบ่วงกากบาท (Cross Loop Antenna)

ในการออกแบบเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) นั้นจะคำนึงถึงผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) และ ความไว (Sensitivity) ของเสาอากาศแบบบ่วง เป็นหลัก เนื่องจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับปล่อยพลังงานคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่ำมาก VLF (Very Low Frequency) และความถี่ต่ำ LF (Low Frequency) เป็นหลัก โดยจุดสูงสุดของสเปกตรัมกำลังจะอยู่ประมาณที่ 10 kHz



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของเสาอากาศแบบบ่วง (Equivalent Circuit of Loop Antenna)

โดยที่ V คือ แรงดันเหนี่ยวนำเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna; Voltage; V)

f คือความถี่ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz)

H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)

Ra คือค่าความต้านทานของเสาอากาศแบบบ่วง (Ω)

La คือความเหนี่ยวนำของเสาอากาศแบบบ่วง (Henry)

Ca คือค่าตัวเก็บประจําของเสาอากาศแบบบ่วง (Farad)

ค่าความต้านทานของเสาอากาศแบบบ่วงหาได้จากสมการ 3.1

$$Ra = \frac{4\rho Ns}{\pi d^2} \quad (3.1)$$

โดยที่

ρ คือสภาพต้านทานของเส้นลวด ($\Omega \cdot m$)

N คือจำนวนรอบของเส้นลวด (Number of turns; Turns: N)

S คือความยาวเส้นรอบวง (metre; m)

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด (metre; m)

ค่าความเหนี่ยวนำของเสาอากาศแบบบ่วงหาได้จากสมการที่ 3.2

$$La = 2 \times 10^{-7} N^2 c_1 \sqrt{A} \left[\ln\left(\frac{c_1 \sqrt{A}}{\sqrt{Nd}}\right) - c_2 \right] \quad (3.2)$$

โดย A คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาอากาศแบบบ่วง (m^2)

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ c_1 และ c_2 ตามรูปทรงของเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna)[32]

รูปทรงเสาอากาศแบบบ่วง	C1	C2
วงกลม	3.545	0.815
สี่เหลี่ยมด้านจัตุรัส	4	1.217

เมื่อสนามแม่เหล็กตัดผ่านพื้นที่หน้าตัดของเสาอากาศทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.3[33]

$$V = 2\pi fNAH \cos \theta \quad (3.3)$$

โดยที่ θ คือมุมอะซิมัท (มุมระหว่างเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) ในทิศเหนือกับตำแหน่งลำฟ้าผ่าย้อนกลับ)

จะเห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันโดยตรงกับความถี่ทำให้อัตราขยายของเสาอากาศแบบบ่วงนั้นแปรผันตามความถี่ ในการหาอัตราขยายระหว่างแรงดันและความเข้มสนามแม่เหล็กถูกแสดงดังสมการที่ 3.4

$$\frac{V}{H} = 2\pi fNA \cos \theta \quad (3.4)$$

จะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำๆนั้นเสาอากาศแบบบ่วงจะไม่ตอบสนองต่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตัดผ่านพื้นที่หน้าตัดของเสาอากาศ ในการเพิ่มความไวตอบสนองของเสาอากาศแบบบ่วงนั้นจึงต้องเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของเสาอากาศหรือไม่ก็เพิ่มจำนวนรอบ ประกอบกับสเปกตรัมกำลังของลำฟ้าผ่าย้อนกลับนั้นเป็นแถบความถี่กว้างจึงต้องออกแบบให้สัญญาณที่วัดได้นั้นไม่ขึ้นกับความถี่ โดยการนำเสาอากาศแบบบ่วง ต่อเข้ากับความต้านทานต่ำหรือลัดวงจรทำให้ได้ขนาดกระแสที่ไหลในเสาอากาศเป็นดังสมการที่ 3.5

$$I_a = \frac{V}{\sqrt{Ra^2 + X_l^2}} \quad (3.5)$$

โดยที่ X_l คือ รีแอกแตนซ์ = $2\pi fLa$ (Ω)

จะเห็นได้เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆนั้นค่ากระแสที่ไหลในเสาอากาศจะไม่ขึ้นกับความถี่เมื่อค่า $X_l \gg Ra$ โดยกระแสที่ไหลในเสาอากาศจะมีค่าคงที่เปรียบเสมือนเป็นวงจรกรองความถี่สูง (High pass filter) โดยความถี่ตัด (Cut off frequency) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$f_c = \frac{R}{2\pi La} \quad (3.6)$$

แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานของเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) นั้นจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นที่เสาอากาศแบบบ่วงซึ่งเปรียบเสมือนขนาดแรงดันต่ำสุดที่เสาอากาศแบบบ่วงนั้นสามารถตรวจจับได้หาได้จากสมการที่ 3.7

$$E_a = (4k_B TRa)^{0.5} \quad [V \text{ Hz}^{-0.5}] \quad (3.7)$$

โดยที่ k_B คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ $= 1.38 \times 10^{-23}$ [J K⁻¹]

T คือ อุณหภูมิ [kelvins]

เมื่อรวมสมการที่ 3.4 และ 3.7 เข้าด้วยกันทำให้ได้ความไว (Sensitivity) ของเสาอากาศดังสมการที่ 3.8

$$S_a = \frac{(4kTRa)^{0.5}}{2\pi fNA} \quad [\text{T Hz}^{-0.5}] \quad (3.8)$$

ที่ความถี่สูงๆ นั้น S_a มีค่าลดลงทำให้เสาอากาศมีความไวมากยิ่งขึ้นสามารถตรวจจับสัญญาณค่าต่ำๆ ได้ดีขึ้นเพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบความไวของเสาอากาศจึงทำการนอร์มัลไลซ์ความไวของเสาอากาศได้ดังสมการที่ 3.9

$$S_0 = \frac{(4kTRa)^{0.5}}{2\pi NA} \quad [\text{T Hz}^{0.5}] \quad (3.9)$$

จึงได้ทำการออกแบบเสาอากาศแบบบ่วงในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ส่วนการออกแบบชุดตรวจจับฟ้าผ่าเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมจะกล่าวในบทที่ 4

โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- 1) ผลตอบสนองความถี่อยู่ในช่วง 650 Hz-300 kHz
- 2) เสาอากาศเป็นแกนพลาสติกและมีขนาดเล็กเนื่องจากต้องทำการย่อส่วนจากฟ้าผ่าในสภาพจริงโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร
- 3) ขนาดกระแสที่ไหลในเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) ต้องมีค่าน้อยกว่า 20 มิลลิแอมป์ เนื่องจากกระแสอาจไหลเข้าไปในวงจรปริแอมป์มากจนทำให้เกิดความเสียหาย
- 4) ออกแบบให้ใช้กับพื้นที่ทดลอง 2 x 4 ตารางเมตร
- 5) เสาที่ใช้แทนล้าฟ้าผ่าสูง 3 เมตร

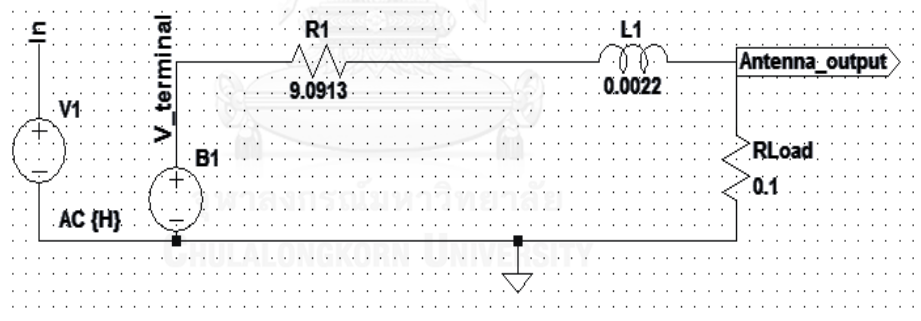
ในการออกแบบจะใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดเล็กเพื่อที่จะสามารถพันได้หลายๆรอบซึ่งจะให้ผลค่าความเหนี่ยวนำมีค่าที่สูงทำให้ขนาดกระแสที่ไหลในเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) มีค่าน้อยกว่า 20 มิลลิแอมป์ จึงใช้ลวดทองแดงเบอร์ 34 (SWG) พันจำนวนทั้งสิ้น 160 รอบทำให้ได้ค่าความ

ต้านทาน, ค่าความเหนี่ยวนำ, ความถี่ตัด (Cutoff frequency) และความไวของเสาอากาศแบบบ่วง ดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ลักษณะเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) ที่ถูกออกแบบ

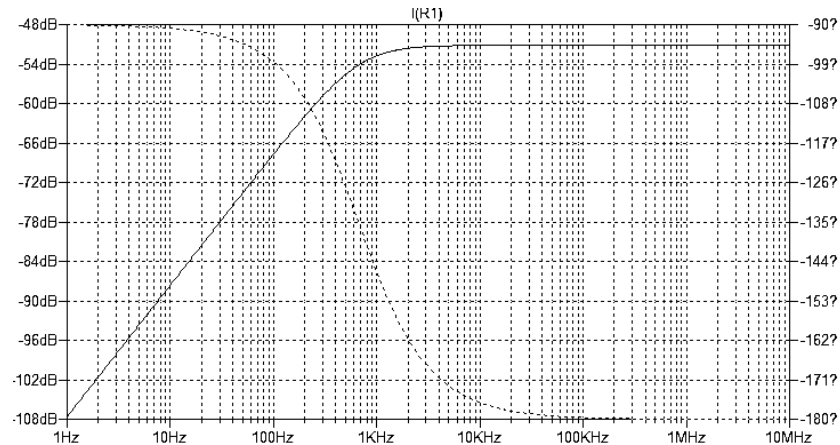
ลวดทองแดงเบอร์ 34 (SWG)	
จำนวนรอบ	160 รอบ
ความต้านทาน	9.0913Ω
ค่าความเหนี่ยวนำ	2.2×10^{-3} Henry
ความถี่ตัด	654.8 Hz
ความไวของเสาอากาศแบบบ่วง S_0	$2.39 \times 10^{-10} \text{ T Hz}^{0.5}$

นอกจากนี้จึงได้ทำการจำลองวงจรสมมูลของเสาอากาศในโปรแกรม LTspiceIV ดังรูปที่ 3.3 โดยต่อเข้ากับความต้านทานค่าน้อยๆ

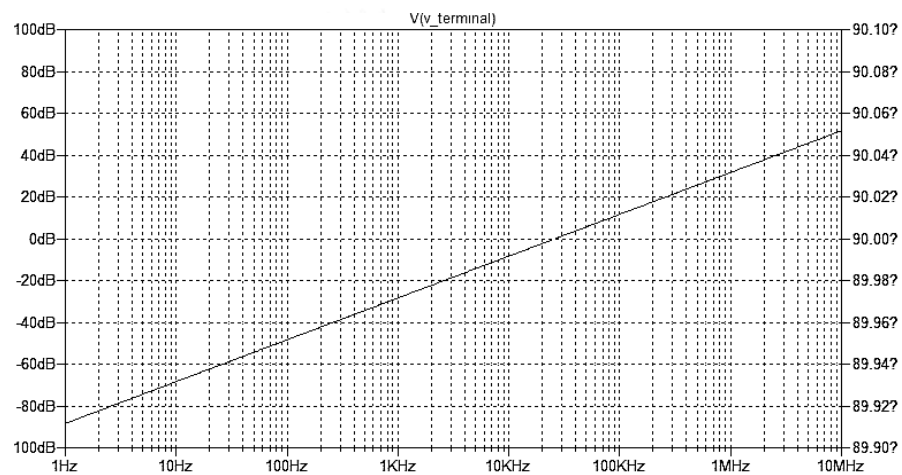


รูปที่ 3.3 การจำลองวงจรสมมูลของเสาอากาศจำลองในโปรแกรม LTspiceIV

จากการจำลองจะพบว่ากระแสที่ไหลในเสาอากาศนั้นเมื่อเลยความถี่ตัด (Cutoff frequency) ประมาณ 10 เท่า จะไม่แปรผันตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.4 แต่แรงดันเหนี่ยวนำนั้นจะแปรผันตรงกับความถี่ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ผลกระแสที่ไหลในเสาอากาศจำลองในโปรแกรม LTspiceIV



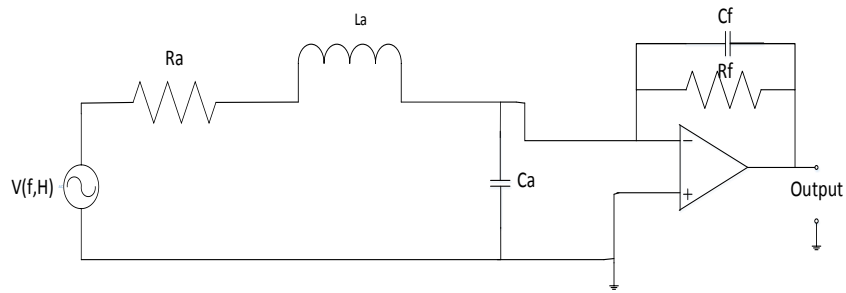
รูปที่ 3.5 ผลแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเสาอากาศจำลองในโปรแกรม LTspiceIV

3.2.2 วงจรปริแอมป์

วงจรปริแอมป์ได้ทำการออกแบบการทำงานในรูปของการแปลงกระแสที่ไหลในเสาอากาศแบบบ่วงไปเป็นแรงดัน (Current to Voltage Converter) โดยขาบวกของออปแอมป์ต่อลงกราวด์ทำให้ตัวเก็บประจุของเสาอากาศแบบบ่วงนั้นถูกลัดวงจรไป ดังรูปที่ 3.6 ทำให้แรงดันขาออก หาได้จากสมการที่ 3.9 โดยสาเหตุที่ต่อตัวเก็บประจุ (C_f) เข้าไปด้วยนั้นเพื่อทำหน้าที่กรองความถี่ต่ำในย่านที่สนใจและยังทำหน้าที่เพิ่มเสถียรภาพของออปแอมป์

$$V_{output} = I_a Z \quad (3.9)$$

โดนต์ Z คือ อิมพีแดนซ์ของวงจรป้อนกลับออปแอมป์ ($Z = \frac{R_f}{j2\pi f C_f + 1}$)



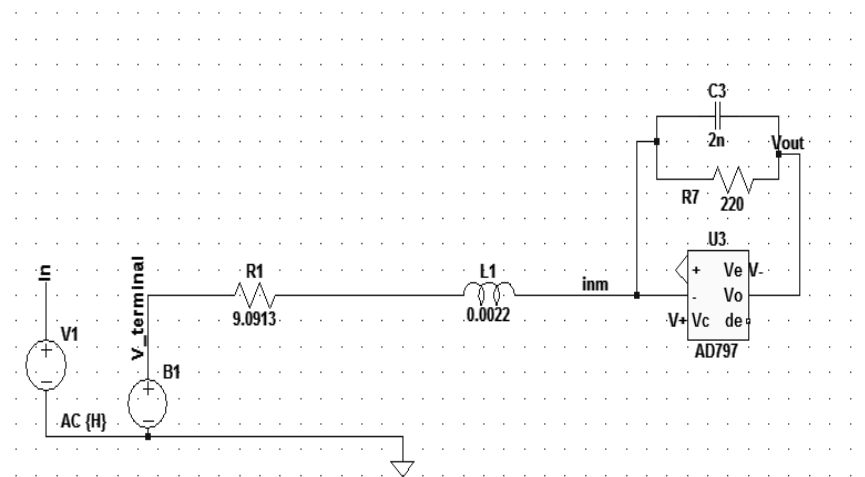
รูปที่ 3.6 รูปแบบการต่อเสาอากาศแบบบ่วงกับวงจรปรีแอมป์

เมื่อรวมสมการที่ 3.3, 3.5 และ 3.9 ทำให้ได้อัตราขยายของวงจรอยู่ในรูปแรงดันต่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กดังสมการที่ 3.10

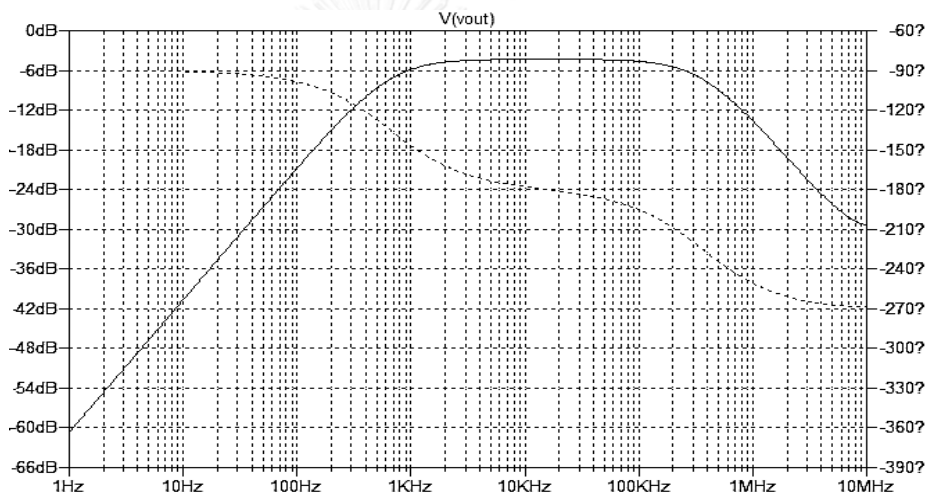
$$\frac{V_{output}}{B} = \frac{NAZ}{La} \quad (3.10)$$

พิจารณาเสาอากาศแบบบ่วงอยู่แนวเดียวกับตำแหน่งลำฟ้าผ่าย้อนกลับ ($\theta=0$ ดีกรี) ที่ระยะห่าง 3 เมตรจากเสากับเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 2.395×10^{-5} T เมื่อพิจารณาขนาดกระแส 1kA จึงทำการเลือกค่า R_f เท่ากับ 220Ω และ $C_f = 2\text{nF}$ สำหรับความถี่ตัด ทำให้ได้อัตราขยายเท่ากับ $25440 \left[\frac{V}{T} \right]$

ในการเลือกอปแอมป์ที่ใช้งานนั้นต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวนชนิดแรงดันและกระแสของอปแอมป์ ทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมาจาก 3 ส่วนคือ 1) สัญญาณรบกวนชนิดแรงดันจากความต้านทานเสาอากาศแบบบ่วง 2) สัญญาณรบกวนชนิดแรงดันจากอปแอมป์ 3) สัญญาณรบกวนชนิดแรงดันอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนชนิดกระแสของอปแอมป์ ไหลเข้าไปในอิมพีแดนซ์ของเสาอากาศแบบบ่วง จึงได้ทำการเลือก อปแอมป์เบอร์ AD797 จากบริษัท Analog Devices มาใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการเนื่องมาจากเป็น อปแอมป์(Op-amp) ที่มีค่าสัญญาณรบกวนชนิดแรงดันและกระแสที่ต่ำอีกทั้งยังมีช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้าง โดยผลการจำลองด้วยโปรแกรม LTSPICE IV แสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 วงจรเสาอากาศแบบบ่วงและการต่อกับปรีแอมป์

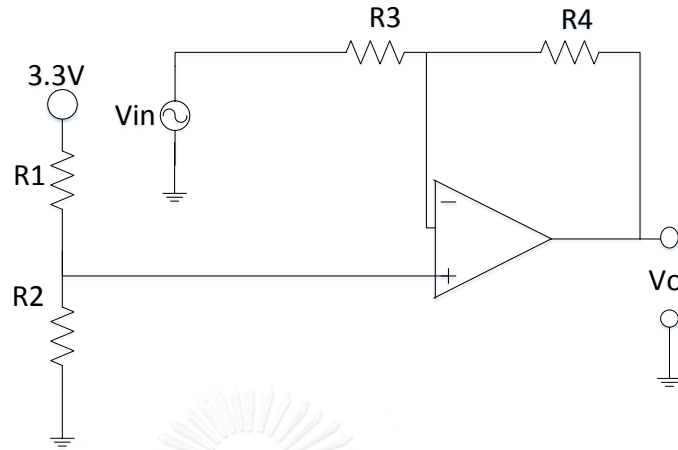


รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการตอบสนองความถี่ของวงจรปรีแอมป์ (Pre-Amplifier)

3.2.3 วงจรเปรียบเทียบ (Comparator circuit)

วงจรเปรียบเทียบได้ออกแบบการใช้งานอยู่ในรูปแบบของ window detector โดยเมื่อใดก็ตามที่ $V_{in} \geq V_{threshold}$ หรือ $V_{in} \leq -V_{threshold}$ สัญญาณแรงดันที่ออกจากวงจรเปรียบเทียบนั้นจะเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นตัวส่งสัญญาณไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าสามารถตรวจจับฟ้าผ่าได้ โดยมีการออกแบบดังนี้ โดยเลือกใช้ IC MCP 6566 เนื่องจากมีค่าเวลาล่าช้าในการเปลี่ยนแปลงจากลอจิก 1 ไป 0 เพียง 56ns เพราะฉะนั้นจึงสามารถตอบสนองเหตุการณ์ฟ้าผ่าได้ทันที แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นใช้ขนาดไฟเลี้ยงในวงจรเท่ากับ 3.3 V เพราะฉะนั้นวงจรเปรียบเทียบจึงต้องใช้ไฟเลี้ยงเท่ากับ 3.3 V ไปด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องยกระดับแรงดันก่อนเข้าวงจรเปรียบเทียบเป็น 1.6 V จึงใช้วงจรยกระดับสัญญาณ IC เลือกใช้คือเบอร์ LM318N อันเนื่องมาจากราคาถูกให้แบนด์วิดท์

(Bandwidth) ที่กว้างและสลูว์เรท (Slew rate) ที่สูง จึงไม่เกิดการหน่วงทางเวลาขึ้น โดยวงจรรยะดับสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.9



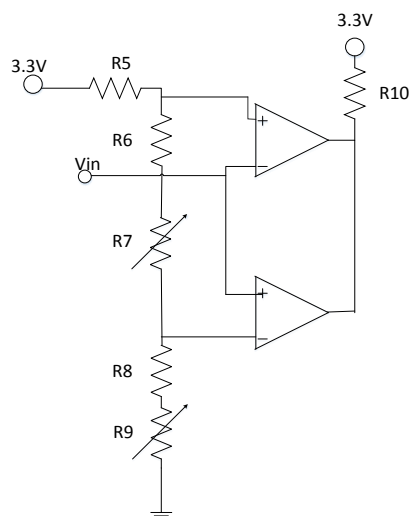
รูปที่ 3.9 วงจรรยะดับสัญญาณ

แรงดันจาก 0 V จะถูกยกระดับเป็น 1.65 V เนื่องจากเพื่อให้สัญญาณมีค่า ไดนามิก เรนจ์ (Dynamic Range) มากที่สุด แรงดันขาออกหาได้จากสมการที่ 3.11

$$V_o = \left(\frac{3.3R_2}{R_2 + R_1} \right) \cdot \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - \frac{R_4}{R_3} V_{in} \quad (3.11)$$

โดยเลือกค่า R3 และ R4 เท่ากับ $2 \text{ k}\Omega$ และ $R_1 = 3R_2 = 3 \text{ k}\Omega$

วงจรเปรียบเทียบแบบ window detector มีวงจรดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรเปรียบเทียบแบบ window detector

โดยเลือก แรงดันขีดเริ่มเท่ากับ ($V_{\text{threshold}}$) เท่ากับ 400 mv กำหนด $R5 = 100\text{ k}\Omega$
 $R8+R9 = 100\text{ k}\Omega$ $R10 = 10\text{ k}\Omega$ เพราะฉะนั้นจะเกิดกระแสไหลในวงจรดังสมการที่ 3.12

$$I = \frac{3.3 - (2 \times V_{\text{threshold}})}{200\text{ k}\Omega} \quad (3.12)$$

$I = 12.5\text{ }\mu\text{A}$ เพราะฉะนั้น $R6+R7 = \frac{(2 \times V_{\text{threshold}})}{I} = 64\text{ k}\Omega$ จึงเลือก $R6 = 60\text{ k}\Omega$
 และ $R7 = 10\text{ k}\Omega$

3.2.4 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter)

เนื่องจากสนใจความถี่ของฟ้าผ่าในช่วง 1-300 kHz จึงจำเป็นที่จะต้องม้อัตราการสุ่ม (Sampling Rate) ที่มากกว่า 600kHz เป็นอย่างน้อย จึงได้ออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีอัตราการสุ่มที่ 900kHz โดยต้องการให้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) เท่ากับ 70dB เพราะฉะนั้นจำนวนบิตที่มีประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3.13

$$n = \frac{SNR(\text{db}) - 1.76}{6.02} \quad (3.13)$$

โดยที่ n คือจำนวนบิตที่มีประสิทธิภาพ

$SNR(\text{db})$ คืออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio)

เพราะฉะนั้นจะได้จำนวนบิตที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 12 บิต ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14

$$\sigma_n^2 = \frac{(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})^2}{12 \cdot (2^n)^2} \quad (3.14)$$

โดยที่ σ_n^2 คือ ความแปรปรวนในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

V_{max} คือ แรงดันสูงที่สุดที่ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

V_{min} คือ แรงดันต่ำที่สุดที่ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

จากข้อกำหนดที่กล่าวมานั้นการสุ่มสัญญาณนั้นจะต้องสุ่มพร้อมๆกันเนื่องจากชุดตรวจจับฟ้าผ่ามีเสาอากาศ 2 แขนและต้องใช้สัญญาณแรงดันมาทำการหาตำแหน่งฟ้าผ่า จึงได้เลือก IC เบอร์ AD7356 ของบริษัท ANALOG DEVICES ซึ่งมีอัตราการสุ่มเท่ากับ 5MSPS และมีจำนวนบิตเท่ากับ 12 บิต โดยมีค่า V_{max} และ V_{min} เท่ากับ $\pm 2.048V$ ทำให้ได้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล เท่ากับ 0.14264×10^{-3}

3.2.5 จีพีเอส (GPS)

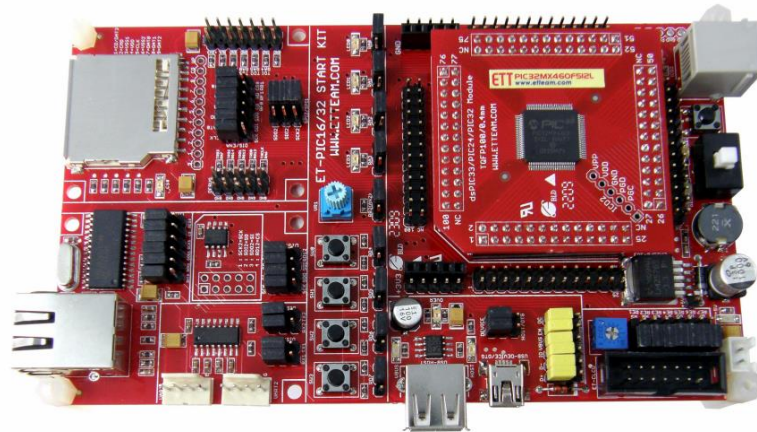
จีพีเอส (GPS) ถูกนำมาใช้อ้างอิงเวลาที่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าทำให้ในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าที่อ้างอิงเวลาเดียวกัน โดย GPS มีการสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบ UART จึงได้ทำการเลือก GPS ยี่ห้อ HANG YU รุ่น TA070010-1 เนื่องจากมีราคาที่ถูก ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะจีพีเอสที่เลือกใช้ (GPS)

3.2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

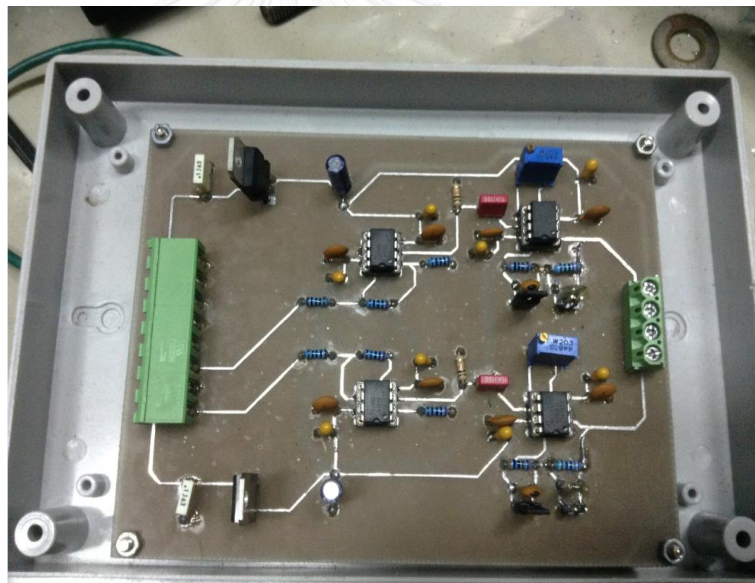
เนื่องจากจำเป็นที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องมีการสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกได้แก่ จีพีเอส (GPS) สื่อสารแบบ UART , วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลสื่อสารแบบ SPI และ SD-Card สื่อสารแบบ SPI นี้คือข้อกำหนดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องรองรับในการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก ด้วยเหตุนี้จึงทำการเลือก PIC32MX460F512L ซึ่งรองรับสัญญาณนาฬิกาสูงสุด 80MHz ของบริษัท Microchip Technology อีกทั้ง Pic32 มี ดีเอ็มเอ็มเอ (Direct Memory Access) เปรียบเสมือนการถ่ายข้อมูลจากจุดหนึ่งไปสู่จุดหนึ่งโดยที่ไม่ได้ขัดจังหวะการทำงานของส่วนประมวลผลหลักเลย ดังรูป 3.12



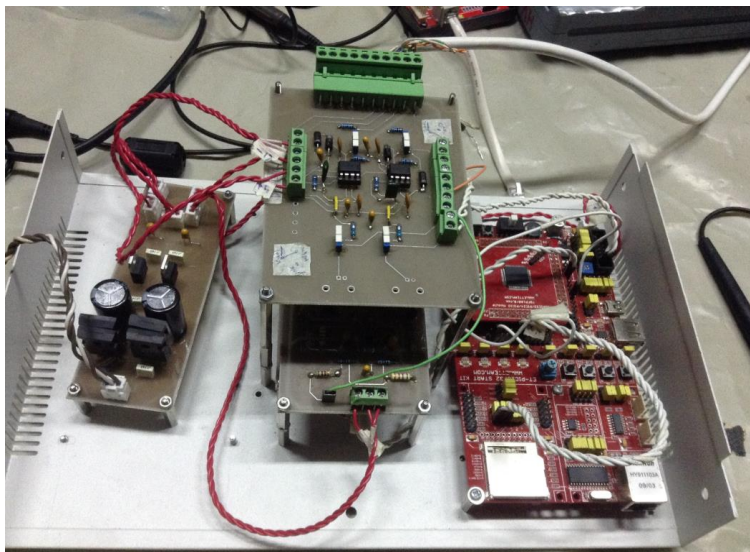
รูปที่ 3.12 รูปร่างบอร์ด PIC32MX460F512L

3.2.7 รูปแบบการต่ออุปกรณ์

รูปของวงจรตรวจจับฟ้าผ่าที่ได้ทำการออกแบบนั้นแสดงดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



รูปที่ 3.13 บอร์ดวงจรปรีแอมป์ (Pre-Amp)



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ในด้านบันทึกผล

3.3 ส่วนประมวลผลสัญญาณ

ในส่วนประมวลผลนี้ เป็นการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของชั่วกระแสและพิกัดที่เกิดฟ้าผ่า โดยประมวลผลจากสัญญาณแรงดันที่บันทึกลงในเอสดีการ์ด (SD-Card) โดยใช้โปรแกรม MATLAB2012A ในการเขียนโปรแกรมคำนวณ และแสดงผลโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

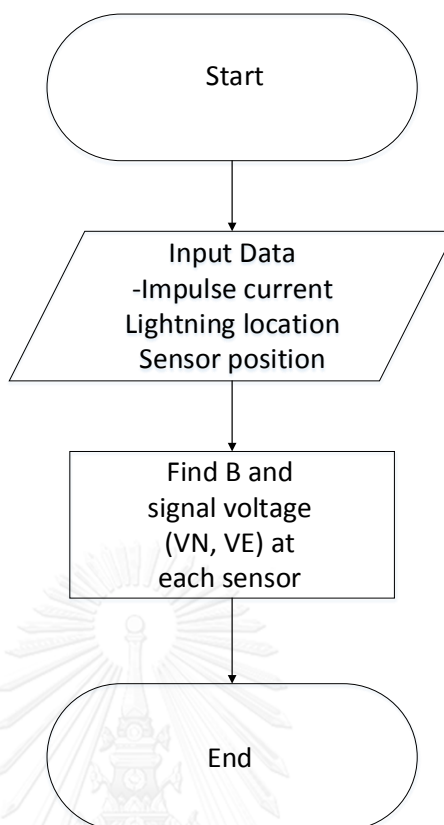
3.3.1 โปรแกรมคำนวณหาสัญญาณแรงดัน

เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการคำนวณสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าในแต่ละตัวเพื่อทำการตรวจสอบสมมติฐานและเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง

โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

- 1) กำหนดขนาดกระแสอิมพลส์ (kA)
- 2) กำหนดพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่า (x, y)
- 3) กำหนดพิกัดตำแหน่งชุดตรวจจับฟ้าผ่า(x_i, y_i)
- 4) ทำการคำนวณหาสนามแม่เหล็กและสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า

โดยค่าที่ได้ออกมานั้นจะแสดงสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนของเสาอากาศ โดยขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาสัญญาณแรงดัน

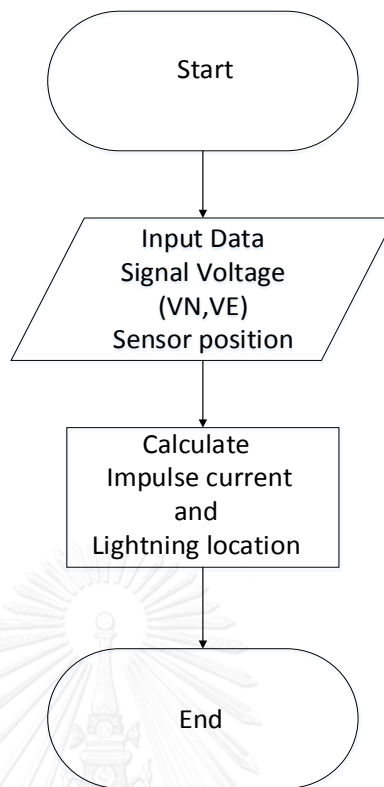
3.3.1 โปรแกรมคำนวณหาขนาดและตำแหน่งฟ้าผ่า

เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อคำนวณหาขนาด และตำแหน่งฟ้าผ่าเพื่อใช้ในการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะบันทึกลงเอสดีการ์ด (SD-Card) ซึ่งมีรูปแบบการแสดงผลดังรูปที่ 3.16

ชั่วโมง	นาที	วินาที	เศษเหลือจากวินาที	VN	VE
Hr:	mm	:ss.	3030160	+2.0510	-2.0500

รูปที่ 3.16 รูปแบบการบันทึกข้อมูลเอสดีการ์ด (SD-Card)

โดยหลังจากนั้นจะนำข้อมูลสัญญาณแรงดันที่ศเหนือ-ใต้และตะวันออก-ตะวันตกในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่ามาทำการพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่า (x, y) และขนาดชั่วกระแสของลำฟ้าผ่า (kA) โดยมีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรกดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาขนาดและตำแหน่งฟ้าผ่า

บทที่ 4

ผลการจำลองระบบตรวจจับฟ้าผ่าเพื่อประเมินหาระยะห่างที่เหมาะสม

4.1 คุณสมบัติของระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่าที่นำมาใช้ในการจำลอง

รูปร่างเสาอากาศแบบบ่วงลักษณะวงกลม รัศมี 0.3 เมตร

ลวดทองแดงเบอร์ 34 (SWG)

จำนวนรอบ 52 รอบ

ค่าความต้านทาน 39.3954Ω

ค่าความเหนี่ยวนำ 0.0064 Henry

ความถี่ตัด 991Hz

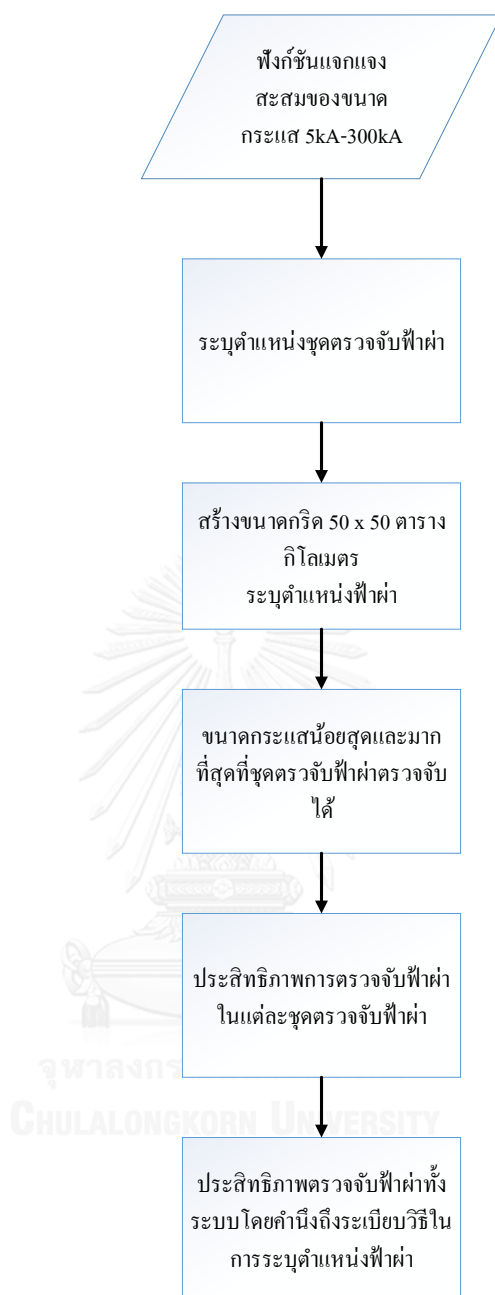
อัตราขยายของระบบ 20000 เท่า

แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) = $\pm 100mv$

แรงดันสูงสุด (Maximum Voltage) = $\pm 2 V$

4.2 กระบวนการจำลองประสิทธิภาพตรวจจับฟ้าผ่าในระบบ

ในส่วนของการจำลองประสิทธิภาพตรวจจับฟ้าผ่าเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะพิจารณาจากขนาดกระแสตั้งแต่ 5kA ถึง 300kA ขึ้นไปโดยอ้างอิงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative probability function) จาก IEEE ให้ผ่าลงบนพื้นที่แต่ละกริดขนาด 50 x 50 ตารางกิโลเมตร หลังจากนั้นพิจารณาคุณลักษณะในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า อาทิเช่นระยะทางระหว่างชุดตรวจจับฟ้าผ่ากับพื้นที่กริด, มุมระหว่างชุดตรวจจับฟ้าผ่ากับพื้นที่กริดทำให้ในแต่ละกริดจะได้ขนาดกระแสที่ตรวจจับได้กับมากที่สุดที่ใช้งานได้ในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า หลังจากนั้นจะพิจารณาถึงระเบียบวิธีในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า TOA และ MDF ซึ่งในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่านั้นต้องใช้จำนวนชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 4 และ 2 ตัวขึ้นไปตามลำดับ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการตรวจจับฟ้าผ่าทั้งระบบ โดยออกแบบให้ชุดตรวจจับฟ้าผ่ามีระยะห่างที่แตกต่างกันไปจนนำไปสู่ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างชุดตรวจจับฟ้าผ่าขึ้นตอนการจำลองแสดงโดยรูปภาพ 4.1

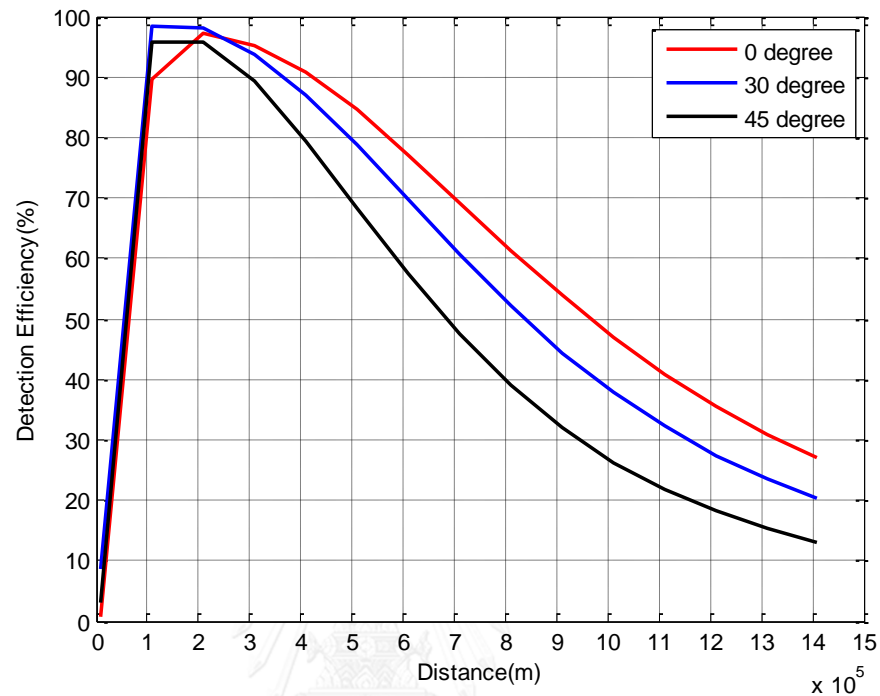


รูปที่ 4.1 กระบวนการประเมินหาประสิทธิภาพตรวจจับฟ้าผ่า

4.2.1 ประสิทธิภาพในการตรวจจับของแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า

ประสิทธิภาพในการตรวจจับของแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ้านั้นจะเป็นฟังก์ชัน (function) ของระยะทางและมุมระหว่างชุดตรวจจับฟ้าผ่ากับลำฟ้าผ่า แต่เนื่องจากเสาอากาศเป็นแบบกากบาท ทำให้ลำฟ้า ณ จุดที่ 0 องศาและ 90 องศา ระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่ามีประสิทธิภาพในการตรวจจับที่เท่ากันเมื่อพิจารณา ณ ระยะห่างที่เท่ากัน เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดในทิศทางขนาดลำฟ้าผ่า ส่วนทิศทางตั้งฉากกับลำฟ้าผ้านั้น แรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำสุด

4.2.2 ผลการจำลองประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับฟ้าผ่าต่อระยะทางและมุมระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่า

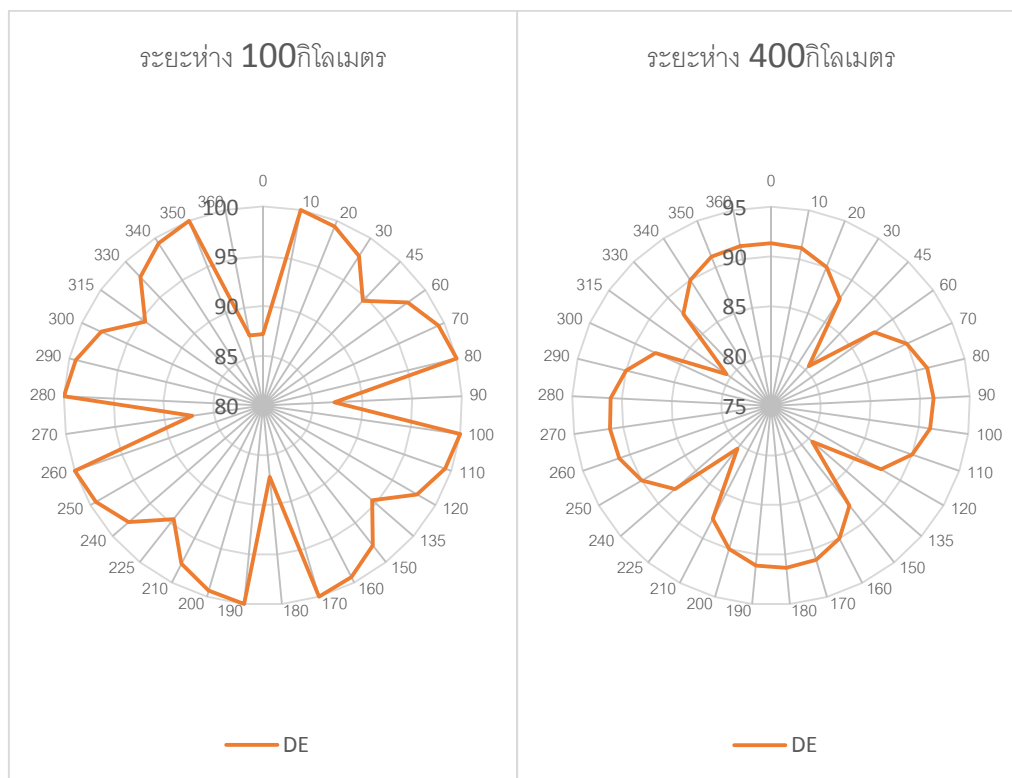


รูปที่ 4.2 ผลการจำลองประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับฟ้าผ่าต่อระยะทางและมุมระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อฟ้าผ่าใกล้ๆกับชุดตรวจจับฟ้าผ่านั้นจะทำให้สัญญาณแรงดันที่ระบบบันทึกนั้นมีค่ามากกว่าแรงดันสูงสุดทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นได้ จึงเป็นผลให้มุม 0 องศา มีประสิทธิภาพการตรวจจับในระยะ 100 กิโลเมตร ต่ำที่สุดเพราะว่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่มุมนี้มีค่าสูงสุด ในขณะที่มุม 30 องศา มีประสิทธิภาพการตรวจจับในระยะ 100 กิโลเมตรสูงที่สุดเพราะว่าแรงดันที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ แต่ในทางกลับกันจะเห็นได้ว่าที่ระยะห่างตั้งแต่ 300 กิโลเมตร เป็นต้นไปที่มุม 0 องศาจะมีประสิทธิภาพการตรวจจับมากกว่ามุมอื่นๆ เนื่องจากสนามแม่เหล็กลดลงตามระยะทางและมุมที่แปรผันตามโคไซน์ทำให้แรงดันที่ระบบบันทึกค่าได้นั้นต้องมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{\text{threshold}}$) ดังรูปที่ 4.3 เมื่อดูจากรูปที่ 4.2 แล้วนั้นที่จุด 200 กิโลเมตร มุม 0 องศา มีค่าเท่ากับประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับฟ้าผ่าเท่ากับ 90% จึงเป็นระยะห่างเส้นเชื่อมฐานน้อย (Minimum Baseline) ที่สุดสำหรับการตั้งชุดตรวจจับฟ้าผ่า ในขณะเดียวกันนั้นตำแหน่ง 300 กิโลเมตร มุม 45 องศา มีประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับ

ฟ้าผ่าเท่ากับ 90 % จึงทำให้ได้ระยะห่างเส้นเชื่อมฐาน(Maximum Baseline)ที่มากที่สุดของชุด

ตรวจจับฟ้าผ่าเท่ากับ $\frac{300}{\sqrt{2}} = 424.26$ กิโลเมตร



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองประสิทธิภาพในการตรวจจับของชุดตรวจจับฟ้าผ่าต่อระยะทางและมุมระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่า

4.2.3 ประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธีMDF

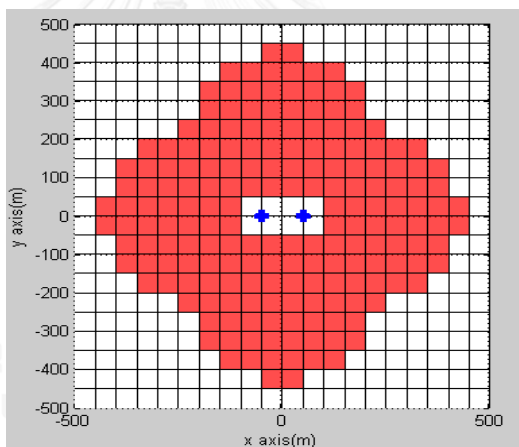
ระเบียบวิธีการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า MDF นั้นจะต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าในการระบุตำแหน่งอย่างน้อยสองตัว แต่ทว่าเมื่อลำฟ้าผ่าเกิดขึ้นระหว่างเส้นเชื่อมฐาน (baseline) ทำให้ความผิดพลาดนั้นมีค่าสูงในกรณีระบบมี 2 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า วิธีแก้ไขคือพิจารณาขนาดของแรงดันที่เกิดขึ้นในชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว ทำให้สามารถบอกตำแหน่งฟ้าผ่าได้ ในที่นี่ได้สร้างกริดขนาด 50 กิโลเมตร x 50 กิโลเมตร มาใช้ในการจำลองที่เกิดขึ้น รายละเอียดการคำนวณสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข.

4.2.3.1 ผลการจำลองประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธีMDF

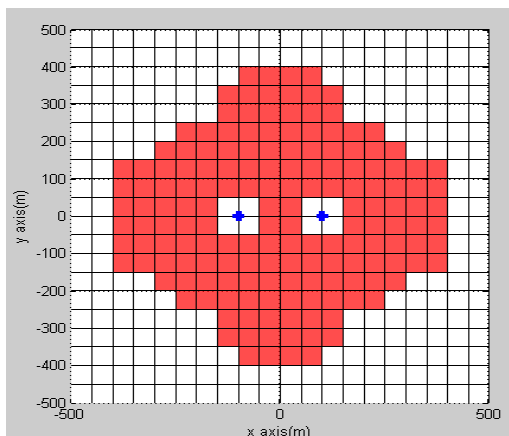
ตำแหน่งชุดตรวจจับฟ้าผ่าถูกแทนด้วยรูปกากบาทสีน้ำเงินส่วนพื้นที่สีแดงแสดงถึงพื้นที่ประสิทธิภาพการตรวจจับนั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 80% ส่วนพื้นที่สีขาวแสดงถึงประสิทธิภาพการตรวจจับมีค่าน้อยกว่า 80% ได้แบ่งกรณีระบบเป็น 1) ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว 2) ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 3 ตัว 3) ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัว

4.2.3.2 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว

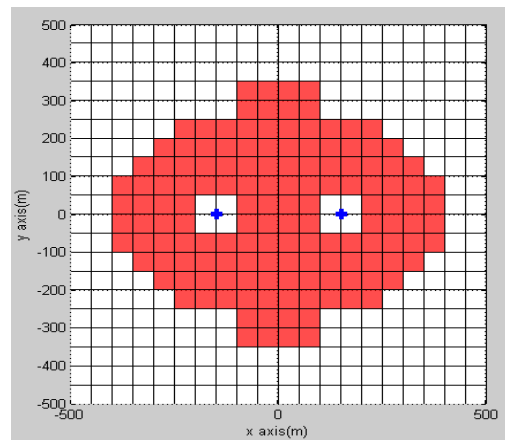
ได้ออกแบบพื้นที่ในการทดลองขนาด 1000×1000 ตารางกิโลเมตร มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับที่เกิดขึ้น จากรูป 4.4 จะเห็นได้ว่าในพื้นที่สีขาวใกล้ๆ ชุดตรวจจับฟ้าผ่าผ่านนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพในการตรวจจับมีค่าต่ำทำให้เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นแล้วนั้นมีค่าต่ำกว่า 80% ซึ่งเป็นระบบที่มีแค่ ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว เมื่อแรงดันที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งสองตัวนั้นมากกว่าแรงดันสูงสุดทำให้ไม่สามารถบอกตำแหน่งฟ้าผ่าได้ จากรูป 4.5 เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับรูป 4.4 จะพบว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับจะมีค่าลดลง ด้วยเหตุผลที่ว่าเมื่อเส้นเชื่อมฐานมากขึ้นทำให้โอกาสที่แรงดันที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{\text{threshold}}$) สูงขึ้นโดยมุมที่ 45 องศาประสิทธิภาพในการตรวจจับจะมีค่าลดลงมากที่สุดเนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ลำแกนของเสาอากาศลดลง 0.707 เมื่อเทียบกับมุมที่ 0 องศาซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับนั้นลดลงน้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 4.6 เส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร



รูปที่ 4.4 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF



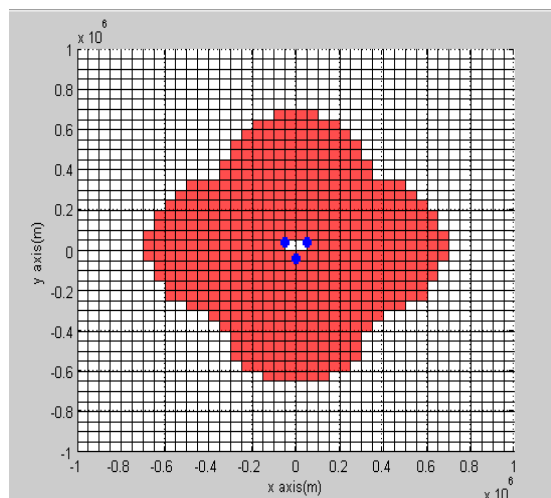
รูปที่ 4.5 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF



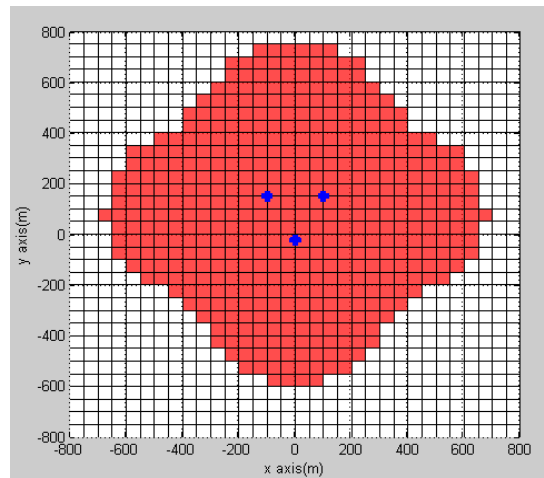
รูปที่4.6 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า2 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 300 km ด้วยวิธี MDF

4.2.3.3 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า3 ตัว

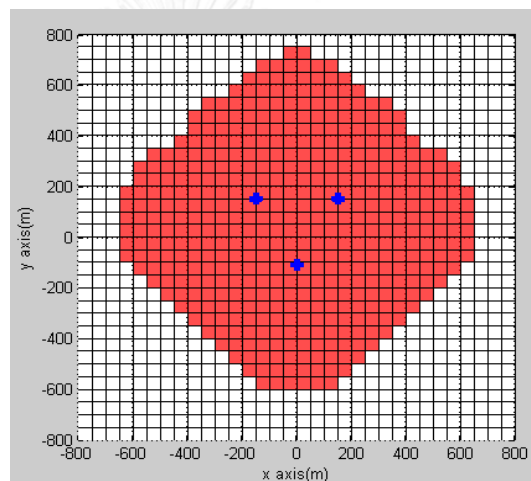
ได้ออกแบบพื้นที่ในการทดลองขนาด 2000 x 2000 ตารางกิโลเมตร มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับที่เกิดขึ้น จากรูป4.7, 4.8, 4.9 มีเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร, 200 กิโลเมตร และ300 กิโลเมตรตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีชุดตรวจจับฟ้าผ่า3 ตัวนั้น พื้นที่ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับนั้นขยายใหญ่ขึ้นกว่าชุดตรวจจับฟ้าผ่า2 ตัว รวมทั้งจุดยอดในบริเวณใกล้ๆชุดตรวจจับฟ้าผ่าผ่านั้นได้หายไป โดยในแนวพื้นที่ประสิทธิผลยังคงเป็นแนวที่แต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าทำมุมใกล้เคียง 0 องศา โดยเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตรมีจำนวนช่องสีแดง 478 ช่อง, เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร มี 476 ช่อง



รูปที่4.7 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 3 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF



รูปที่4.8 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า3 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF

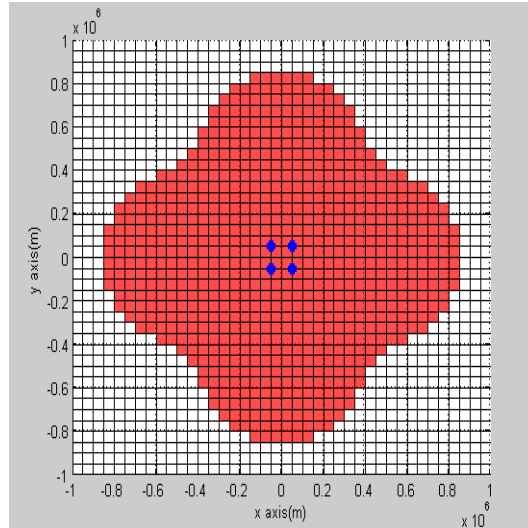


รูปที่4.9 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า3 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF

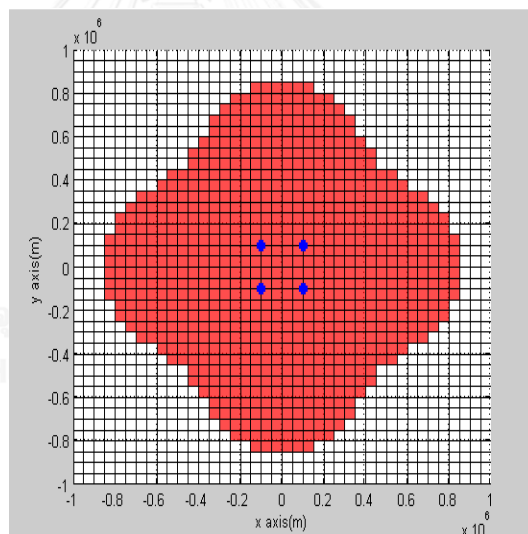
4.2.3.4 กรณีชุดตรวจจับฟ้าผ่า4 ตัว

ได้ออกแบบพื้นที่ทดลองขนาด 2000×2000 ตารางกิโลเมตร มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับที่เกิดขึ้น จากรูป4.10-4.12 มีเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร, 200 กิโลเมตร และ300 กิโลเมตรตามลำดับ เมื่อนับจำนวนช่องในแต่ละรูปจะพบว่าที่เส้นเชื่อมฐาน100 กิโลเมตรมี748 ช่อง , เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร มี 756ช่อง และเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร มี 744 ช่อง สาเหตุที่เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร มีจำนวนช่องมากที่สุดเนื่องมาจากการที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าห่างมากขึ้นนั้น เป็นการขยายรัศมีหวังผลมากยิ่งขึ้นและชุดตรวจจับฟ้าผ่าตัวอื่นๆในระบบยังสามารถตรวจจับได้อยู่ในขณะเดียวกันพื้นที่ในวงของชุดตรวจจับฟ้าผ่าก็ไม่ได้รับผลกระทบจึงทำให้จำนวนช่องนั้นมากขึ้น แต่ในทางตรงข้ามระหว่างเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร มีจำนวนช่องน้อยที่สุดเนื่องมาจากการที่ชุด

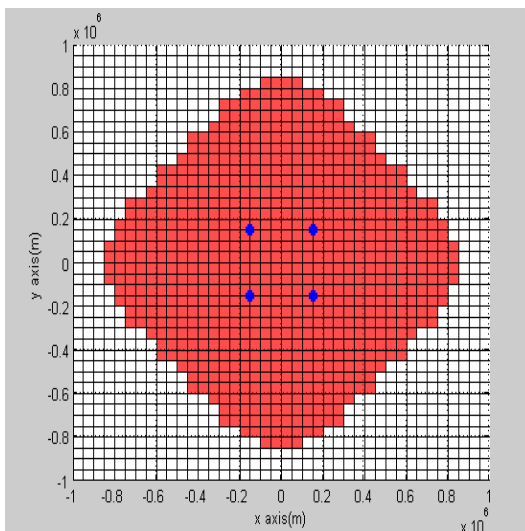
ตรวจจับฟ้าผ่าในแต่ละตัวห่างมากเกินไปจะทำให้พื้นที่มีประสิทธิภาพการตรวจจับมากกว่า 80 % ลดลง



รูปที่4.10 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4 ตัวตัวเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF



รูปที่4.11 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4 ตัวตัวเส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF



รูปที่4.12 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4 ตัวตัวเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF

4.2.3.5 ข้อค้นพบการตรวจจับด้วยวิธี MDF

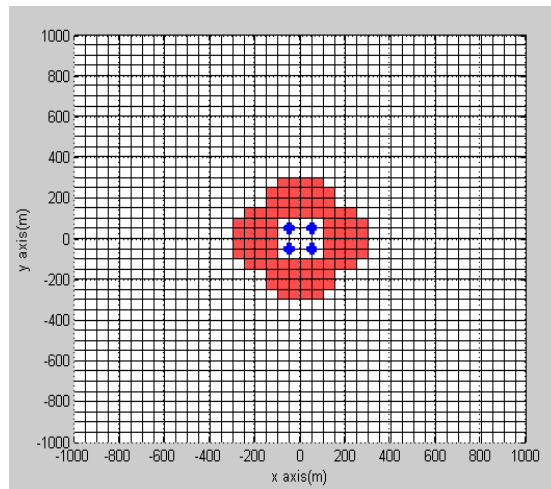
จากการศึกษาจะพบว่ากรณีที่ระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่ามีแค่ชุดตรวจจับฟ้าผ่า2 ตัวนั้นจะทำให้เกิดจุดบอดรอบๆแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าขึ้นเนื่องจากระเบียบวิธี MDF นั้นต้องใช้อย่างน้อย 2 ตัวในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า เมื่อตัวใดตัวหนึ่งมีแรงดันมากกว่าแรงดันสูงสุดก็จะทำให้ไม่สามารถบอกพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่าได้ โดยในมุม 45,135,225,315 นั้นเป็นแนวที่ประสิทธิภาพการตรวจจับนั้นลดลงสูงที่สุดเนื่องมาจากแรงดันที่เกิดขึ้นแปรผันตามโคไซน์ ในส่วนระบบที่มีชุดตรวจจับฟ้าผ่า 3 ตัวจะพบว่าจุดบอดที่เคยเกิดขึ้นรอบๆชุดตรวจจับฟ้าผ่า2ตัว นั้นได้หายไปเพราะว่าโอกาสที่จะตรวจจับฟ้าผ่านั้นมีมากขึ้น แต่จะพบว่ากรณีที่ระยะห่างเส้นเชื่อมฐานมากขึ้นนั้น ทำให้พื้นที่ประสิทธิภาพตรวจจับลดลง ในส่วนระบบที่มีชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัวจะพบว่า เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ให้พื้นที่ประสิทธิภาพในการตรวจจับที่สูงที่สุด เนื่องจากชุดตรวจจับฟ้าผ่าในแต่ละตัวจะขยายพื้นที่ตรวจจับไปมากขึ้นในขณะเดียวกันการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าที่ใช้เพียงแค่ 2 ตัวยังมีประสิทธิภาพอยู่ในทางตรงข้ามเมื่อระยะห่างระหว่างเส้นเชื่อมฐานเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจะทำให้ประสิทธิภาพการตรวจจับในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าในระยะห่างๆที่มากนั้นลดลงดังเช่นเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร โดยระยะห่างของชุดตรวจจับฟ้าผ่าต้องอยู่ในช่วง 200 กิโลเมตร – 424.26 กิโลเมตร

4.2.4 ประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธีTOA

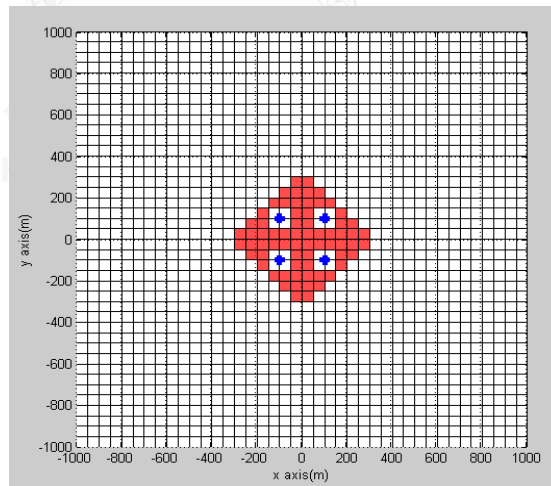
ระเบียบวิธี TOA นั้นต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 4 ตัวในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า ในที่นี้ได้ทำการศึกษาที่เส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร, 200 กิโลเมตร และ300 กิโลเมตร โดยในระบบที่มีชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัว โดยออกแบบพื้นที่ในการศึกษา 2000 x 2000 ตารางกิโลเมตร

4.2.4.1 ผลการจำลองประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธี TOA

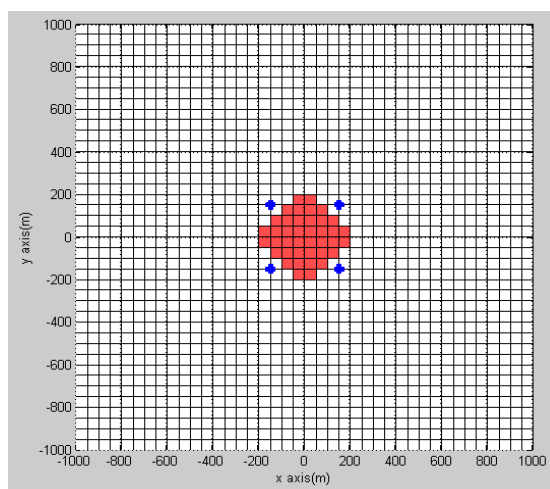
จากรูปที่ 4.13-4.15 จะเห็นได้ว่าการที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัวแล้วใช้ระเบียบวิธี TOA นั้นทำให้เกิดจุดบอดรอบๆชุดตรวจจับฟ้าผ่าขึ้นมาเนื่องจากเมื่อใดก็ตามที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าตัวใดตัวหนึ่งมีแรงดันมากกว่าแรงดันสูงสุดแล้วทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งฟ้าผ่าได้ จะสังเกตได้ว่าเมื่อระยะห่างเส้นเชื่อมฐานมีค่ามากขึ้นพื้นที่มีประสิทธิภาพการตรวจจับมากกว่า 80% นั้นลดลง ที่เส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร, 200 กิโลเมตร, 300 กิโลเมตร มีจำนวนช่อง 100, 84 และ 40 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA



รูปที่ 4.14 ชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA



รูปที่ 4.15 ชุดตรวจจับพิกัด 4 ตัวเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตรด้วยวิธี TOA

4.2.5 ข้อค้นพบการจำลองประสิทธิภาพการตรวจจับด้วยระเบียบวิธี MDF และ TOA

จากการศึกษาจะพบว่าระเบียบวิธี MDF นั้นให้พื้นที่ประสิทธิภาพในการตรวจจับที่มากกว่าหรือเท่ากับ 80% ขึ้นไปมากกว่าระเบียบวิธี TOA เนื่องจาก MDF นั้นใช้เพียงแค่ชุดตรวจจับพิกัด 2 ตัว ในการระบุตำแหน่งพิกัดที่เกิดขึ้น ส่วน TOA ต้องใช้ชุดตรวจจับพิกัดอย่างน้อย 4 ตัว โดยเมื่อมองทางด้านประสิทธิภาพในการตรวจจับแล้วเส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ในระบบชุดตรวจจับพิกัด 4 ตัวให้ผลที่เหมาะสมที่สุด

4.3 การจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งพิกัดในระบบ

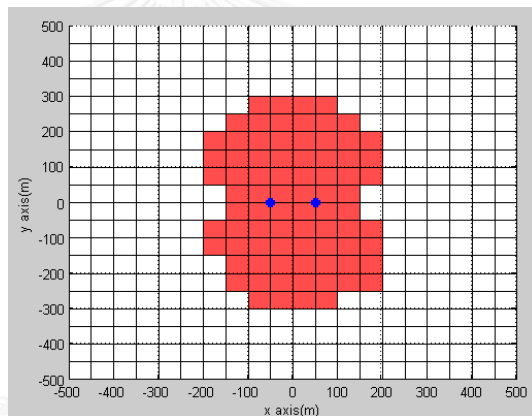
ในการศึกษาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งพิกัดได้แบ่งระเบียบวิธีที่ใช้ในการระบุตำแหน่งพิกัดเป็น 2 กรณี คือ MDF และ TOA โดยได้แบ่งกริดพื้นที่เป็น 50×50 ตารางกิโลเมตร โดยคำนึงถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้ง ADC และ จีพีเอส (GPS) ในการระบุตำแหน่งพิกัดที่เหมาะสมจะใช้วิธี Marquardt method พื้นที่สีแดงแสดงถึงความผิดพลาดน้อยกว่า 500 เมตร รายละเอียดการคำนวณสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข.

4.3.1 การจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งพิกัดในระบบด้วยวิธี MDF

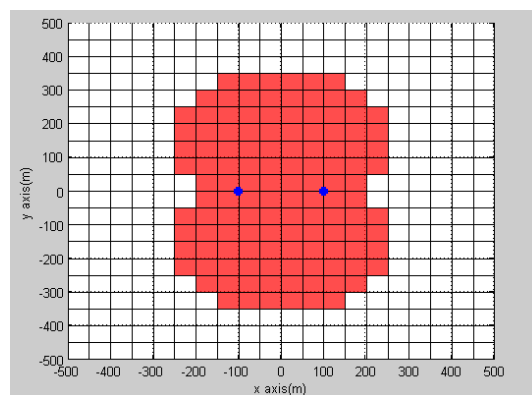
ตำแหน่งชุดตรวจจับพิกัดถูกแทนด้วยรูปกากบาทสีน้ำเงินส่วนพื้นที่สีแดงแสดงถึงความผิดพลาดน้อยกว่า 500 เมตร ส่วนพื้นที่สีขาวแสดงถึงความผิดพลาดมากกว่า 500 เมตร ได้แบ่งกรณีระบบเป็น 1) ชุดตรวจจับพิกัด 2 ตัว 2) ชุดตรวจจับพิกัด 3 ตัว 3) ชุดตรวจจับพิกัด 4 ตัว

4.3.1.1 กรณีระบบชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว

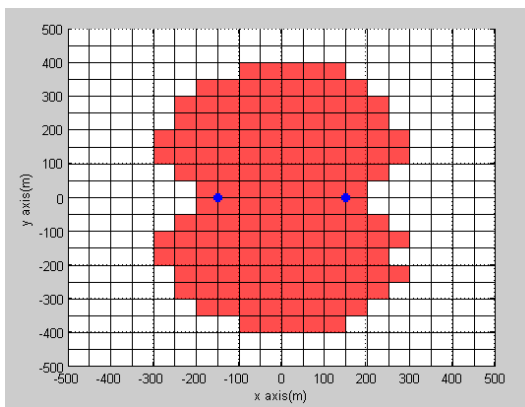
ได้ออกแบบพื้นที่ในการทดลองขนาด 1000 x 1000 ตารางกิโลเมตร มาทำการศึกษาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในระบบตัววิธี MDF จากรูป 4.16-4.18 สำหรับเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร, 200 กิโลเมตร, และ 300 กิโลเมตรตามลำดับจะเห็นถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจนว่ายิ่งเส้นเชื่อมฐาน (Baseline) มีระยะห่างมากขึ้น พื้นที่สีแดงนั้นมากขึ้นตามไปด้วยโดยเส้นเชื่อมฐาน 300 กิโลเมตร จะให้พื้นที่บอกความแม่นยำอันสูงที่สุดส่วนสาเหตุอันเนื่องมาจากวิธี MDF นั้นจะใช้สมการเส้นตรงตามมุมอะซิมัทสองเส้นตัดกันเพราะฉะนั้นเมื่อชุดตรวจจับฟ้าผ่าอยู่ชิดกันแต่ตำแหน่งฟ้าผ่าอยู่มากกว่าระยะเส้นเชื่อมฐานจะทำให้พื้นที่ความผิดพลาดนั้นมีค่าสูงแต่ในทางกลับกันเมื่อชุดตรวจจับฟ้าผ่าอยู่ไกลขึ้นและตำแหน่งฟ้าผ่าจุดเดียวกันนั้นชุดตรวจจับฟ้าผ่าตัวหนึ่งจะมองเห็นจุดฟ้าผ่าใกล้ยิ่งขึ้นทำให้พื้นที่ความผิดพลาดนั้นลดลง จะเห็นได้ตำแหน่งฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น ณ จุดตำแหน่งใกล้เคียงกับเส้นเชื่อมฐานจะเป็นตำแหน่งฟ้าผ่าที่มีความผิดพลาดสูงที่สุด



รูปที่ 4.16 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF



รูปที่ 4.17 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัว เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF



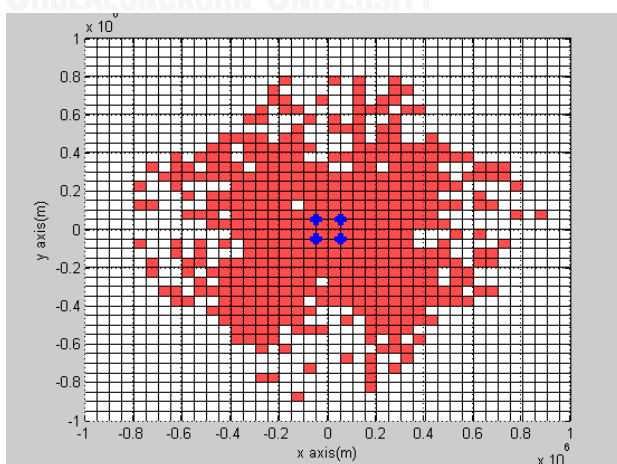
รูปที่4.18 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า2 ตัว เส้นเชื่อมฐาน
300กิโลเมตร ด้วยวิธี MDF

4.3.2 การจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในระบบด้วยวิธี TOA

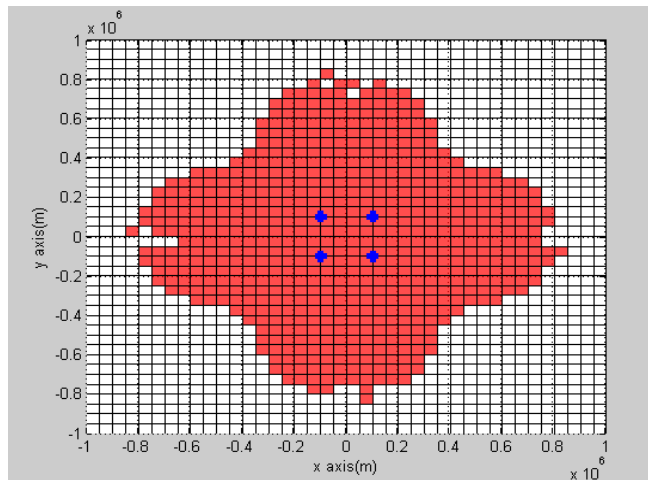
ในการจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA นั้นจำเป็นต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่า4 ตัวในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า ในที่นี้ได้ทำการศึกษาที่เส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร, 200 กิโลเมตร และ300 กิโลเมตร โดยออกแบบพื้นที่ในการศึกษา 2000 กิโลเมตร x 2000 กิโลเมตร

4.3.2.1 ผลการจำลองความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในระบบด้วยวิธี TOA

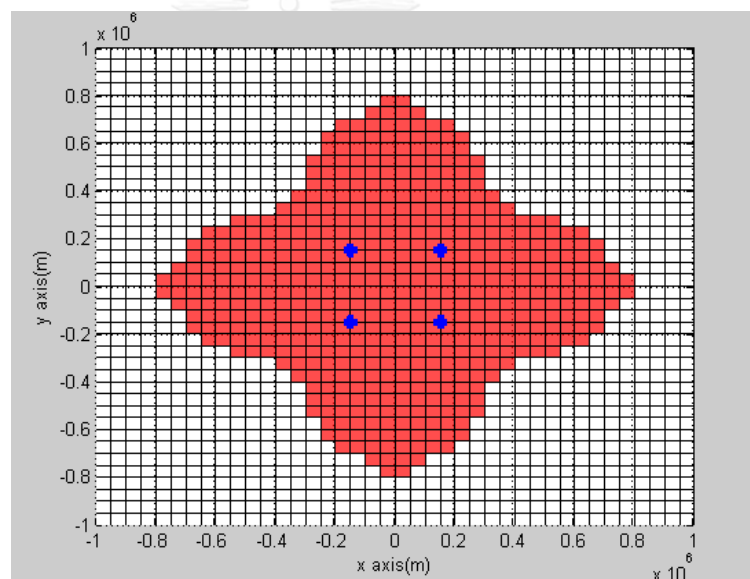
จากรูปที่ 4.19-4.21 จะพบว่าสำหรับเส้นเชื่อมฐาน 100 กิโลเมตร นั้นจะให้ค่าความผิดพลาดแกว่งไปแกว่งมา แต่เมื่อเส้นเชื่อมฐานห่างมากขึ้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดนั้นแกว่งน้อยลงโดยเส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร จะให้จำนวนพื้นที่ที่มีความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าน้อยกว่า 500 เมตรมากที่สุด



รูปที่4.19 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4ตัว เส้นเชื่อมฐาน
100 กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA



รูปที่ 4.20 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัว เส้นเชื่อมฐาน
200 กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA



รูปที่ 4.21 ความผิดพลาดในการบอกตำแหน่งสำหรับชุดตรวจจับฟ้าผ่า 4 ตัว เส้นเชื่อมฐาน
300 กิโลเมตร ด้วยวิธี TOA

4.4 ข้อค้นพบจากแบบจำลองประสิทธิภาพตรวจจับและความแม่นยำในการบอกพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่า โดยคำนึงถึงเส้นเชื่อมฐาน

เมื่อพิจารณาแบบจำลองประสิทธิภาพตรวจจับและความแม่นยำในการบอกพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่า พบว่าเส้นเชื่อมฐานที่เหมาะสมคือ 200 กิโลเมตร-424.26 กิโลเมตร เนื่องจากเป็นระยะห่างระหว่างชุดตรวจจับฟ้าผ่าที่ทำให้ประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าในพื้นที่สนใจเป็นไปตามเงื่อนไข มาตรฐาน IEC 62858 Ed.1

ถ้ามองถึงประเด็นความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าแล้วนั้นจะพบว่าในเส้นวงปิดของชุดตรวจจับฟ้าผ่าที่เส้นเชื่อมฐานเท่ากับ 424.26 กิโลเมตร นั้นมีความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งที่น้อยกว่า 500 เมตร แต่ถ้าจะมองถึงประเด็นความเหมาะสมของการลงทุนจำนวนชุดตรวจจับฟ้าผ่าในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งอาจจะจำเป็นต้องกำหนดขนาดพื้นที่นั้นออกมา ซึ่งในบทความต่อไปนั้นจะเป็นสรุปและข้อเสนอแนะความเป็นไปได้ในการระบุพิกัดที่ตั้งเสาอากาศเพื่อเก็บข้อมูลให้ครอบคลุมประเทศไทย โดยใช้เส้นเชื่อมฐาน 200 กิโลเมตร- 424.26 กิโลเมตร มาพิจารณา



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาระบบตรวจจับฟ้าผ่าเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนามได้ และหาระยะเส้นเชื่อมฐาน (Baseline) ที่เหมาะสมในการตั้งเสาอากาศในพื้นที่สนใจโดยอ้างอิงข้อกำหนดทั่วไปตามมาตรฐาน IEC 62858 Ed1. และศึกษาความเป็นไปได้ในการระบุพิกัดที่ตั้งระบบตรวจจับฟ้าผ่าเพื่อเก็บข้อมูลให้ครอบคลุมประเทศไทย ได้ข้อสรุปดังนี้

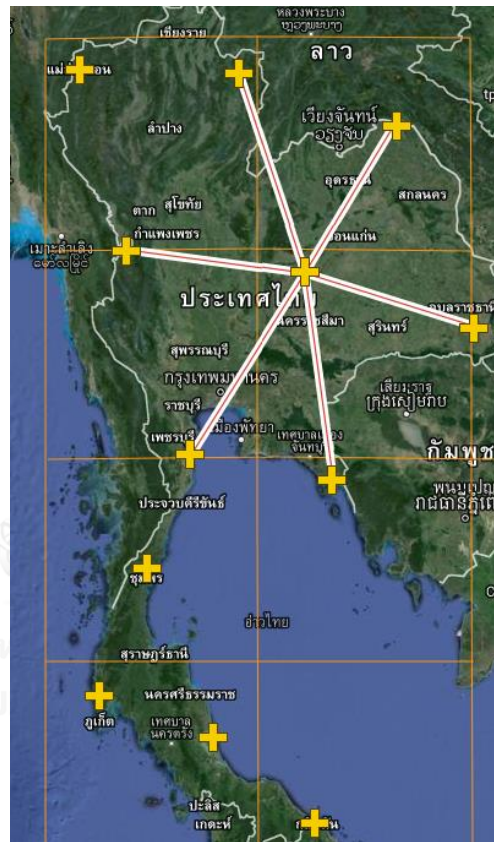
1. ชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่าและบันทึกข้อมูลที่พัฒนาขึ้นจะตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกมาจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) แล้วแปลงแรงดันเหนี่ยวนำอยู่ในรูปของกระแสเนื่องจากกระแสจะถูกชดเชยด้วยค่าความเหนี่ยวนำจากเสาอากาศแบบบ่วงทำให้ความถี่ที่เลยความถี่ตัด กระแสจะไม่แปรผันตามความถี่หลังจากนั้นจึงแปลงกระแสให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันแล้วจึงค่อยบันทึกข้อมูลลงใน เอสดี การ์ด (SD-Card) ทำให้สามารถนำชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่านำไปติดตั้งตามสถานที่ต่างๆได้ประกอบกับชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่าที่พัฒนาขึ้นมามีราคาที่ถูกราวๆ 3000บาท

2. จากการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าในกรณีมีชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่าจำนวน 2 ตัวนั้น จะเกิดจุดบอดรอบๆแต่ละชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่าเนื่องจากความน่าจะเป็นที่สัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนั้นมีขนาดมากกว่าแรงดันที่พิจารณา เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องมีชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่าอีกตัวที่มีระยะทำการครอบคลุมชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่า 2 ตัวที่วางนี้ โดยระยะห่างที่เหมาะสมในการตั้งชุดตรวจจับฟ้าผ่าคือ 200 กิโลเมตร – 424.26 กิโลเมตร เพื่อให้มั่นใจว่าประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าของระบบจะได้ตามข้อกำหนดทั่วไปของ IEC 62858 Ed1.

3. ระบบที่ใช้ระเบียบวิธี TOA ในระบุตำแหน่งฟ้าผ่าจะให้ความแม่นยำที่เกิดขึ้นมากกว่า MDF เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเวลาจาก จีพีเอส (GPS) นั้นน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่านั้นมีค่านี้น้อยกว่า MDF เพราะฉะนั้นจากข้อดีในแต่ละด้านของระเบียบวิธีในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ระเบียบวิธี TOA และ MDF ร่วมกัน

4. ความเป็นไปได้ในการระบุพิกัดที่ตั้งเสาอากาศแบบบ่วงเพื่อเก็บข้อมูลให้ครอบคลุมประเทศไทย ในส่วนนี้ได้ทำการจำลองระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างชุดตรวจจับฟ้าผ่าโดยมีเส้นเชื่อมฐานอยู่ที่ 200 กิโลเมตร – 424.26 กิโลเมตร โดยคำนึงหลักเศรษฐศาสตร์ และจำลองใน google

map กับ โปรแกรม MATLAB 2012A โดยจะกำหนดที่ตั้งจุดตรวจจับฟ้าผ่าจะพิจารณาสถานที่ดังนี้
 1) กรมอุตุนิยมวิทยา 2) มหาวิทยาลัยและวิทยาลัย ในส่วน Google Map เพื่อให้ง่ายต่อการกำหนด
 พิกัดจุดตรวจจับฟ้าผ่า จึงสร้างกริดช่องละ 400 กิโลเมตร หลังจากนั้นเลือกจุดเลือกจุดกึ่งกลางบริเวณ
 จังหวัดชัยภูมิ แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยใช้จำนวนจุดตรวจจับฟ้าผ่าทั้งหมด 12 ตัวครอบคลุมประเทศไทย
 จากรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงถึงการจำลองประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าทั้ง 12 จุดตรวจจับฟ้าผ่า
 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าพ้านั้นได้ตามมาตรฐาน IEC 62858 Ed1. ทั้งประเทศ จึงมี
 ความเป็นไปได้ที่จะสามารถเก็บข้อมูลฟ้าผ่าให้ครอบคลุมประเทศไทยได้

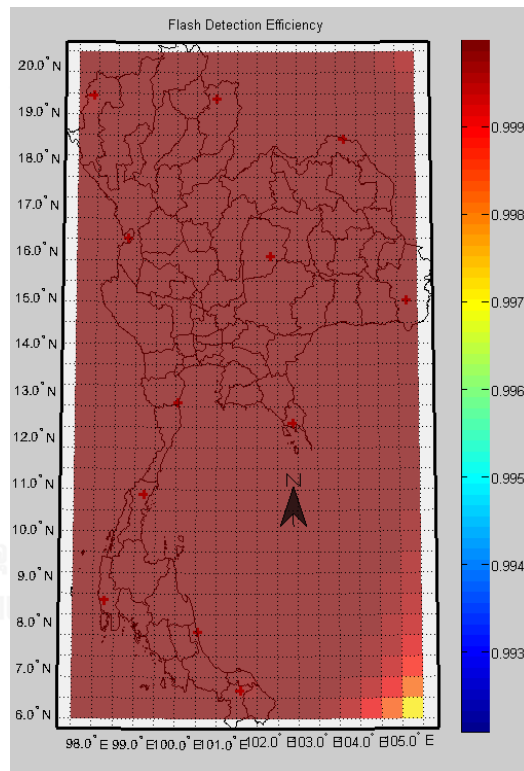


รูปที่ 5.1 ตำแหน่งจุดตรวจจับฟ้าผ่าในประเทศไทยจาก Google Map

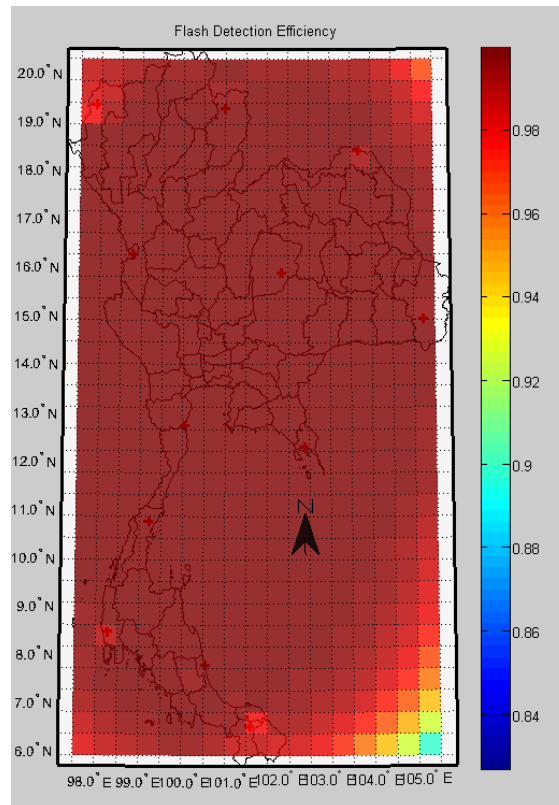
จำลองตำแหน่งที่ตั้งของจุดตรวจจับฟ้าผ่ามีดังนี้

- วิทยาลัยแม่ฮ่องสอน
- สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทกท่าวังผา
- สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทกอุ้มผาง
- สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยภูมิ
- วิทยาลัยการอาชีพบึงกาฬ

- วิทยาลัยเทคนิคเดชอุดม
- วิทยาลัยเทคนิครัต
- สถานีตรวจอากาศหัวหิน
- สถานีอุตุนิยมวิทยาชุมพร
- ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันตก
- อุตุนิยมวิทยาสทิงพระ จังหวัดสงขลา
- มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 5.2 จำลองประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าทั้ง 12 จุดตรวจจับฟ้าผ่าโดยเมื่อใช้วิธี MDF
หาตำแหน่งฟ้าผ่า



รูปที่ 5.2 จำลองประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าทั้ง 12 จุดตรวจจับฟ้าผ่าโดยเมื่อใช้วิธี TOA
หาดำแหน่งฟ้าผ่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่าควรมีการทดสอบต่อเหตุการณ์จริงและควรที่จะมีการส่งข้อมูลผ่านทางอินเทอร์เน็ตร่วมกับเอสดี การ์ด (SD-Card) เพื่อการประมวลผลหาดำแหน่งฟ้าผ่าได้ทันที
2. ควรพิจารณาสภาพความนำของตัวกลางที่คลื่นสนามแม่เหล็กแพร่กระจายด้วยเพื่อให้ผลที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับเหตุการณ์จริงมากที่สุด
3. ชุดระบบตรวจจับฟ้าผ่าควรจะมีวงจรรองเข้าไปด้วย เพื่อลดสัญญาณรบกวนอื่นๆที่ไม่ต้องการ
4. ควรเพิ่มแรงดันสูงสุดที่ใช้งานเนื่องจากการที่เพิ่มแรงดันสูงสุดที่ใช้งานนั้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับให้มากขึ้น

ภาคผนวก ก.

วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าและขนาดกระแสฟ้าผ่าในการศึกษา

การคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าแบ่งออกเป็น 2 วิธี 1) MDF 2) TOA ซึ่งในแต่ละวิธีมีการคำนวณดังนี้

ก.1 วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี MDF

วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี MDF จะอาศัยสัญญาณแรงดันที่ระบบบันทึกข้อมูลในเสาอากาศแต่ละแกนมาคำนวณหามุมอะลิมัท โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นระบบบันทึกข้อมูลในแต่ละแกนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$B = \frac{\mu_0 v I_p}{2\pi c D} \quad (\text{ก.1})$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{ก.2})$$

$$\phi = BA \cos \theta \quad (\text{ก.3})$$

$$e = N \frac{d(BA \cos \theta)}{dt} \quad (\text{ก.4})$$

$$e = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ $\omega L_a \gg R_a$

$$e = L_a \frac{di_a}{dt} \quad (\text{ก.6})$$

โดย B คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density; T)

c คือความเร็วแสง = 3×10^8 m/s

μ_0 สภาพความซึมซาบสัมพัทธ์ = $4\pi \times 10^{-7}$

v คือความเร็วของลำฟ้าผ่าย้อนกลับ (m/s)

I_p คือกระแสค่าสูงสุด (kA)

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)

D คือ ระยะห่างระหว่างเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) กับตำแหน่งฟ้าผ่า (m)

θ คือ มุมอะซิมัท

L_d คือ ความเหนี่ยวนำของเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) (Henry)

R_d คือ ค่าความต้านทานของเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) (Ω)

i_a คือ กระแสที่ไหลในเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) (A)

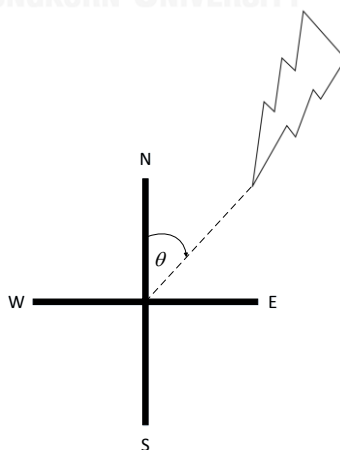
เมื่อรวมสมการที่ ก.1-ก.6 จะทำให้ได้กระแสที่ไหลในเสาอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) และสัญญาณแรงดัน ดังสมการ ก.7และก.8 ตามลำดับ

$$i_a = \frac{NA\mu_0 v I_p \cos \theta}{2\pi c D L_a} \quad (\text{ก.7})$$

$$V_{output} = i_a \cdot Gain \quad (\text{ก.8})$$

เพื่อแยกแยะผลของทิศทางสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมาจากลำฟ้าผ่าวิเคราะห์ตามทิศทางและภูมิมือขวา ในการกำหนดเครื่องหมายในการคำนวณมีวิธีดังนี้

เมื่อฟ้าผ่าในตำแหน่งดังรูปที่ ก.1



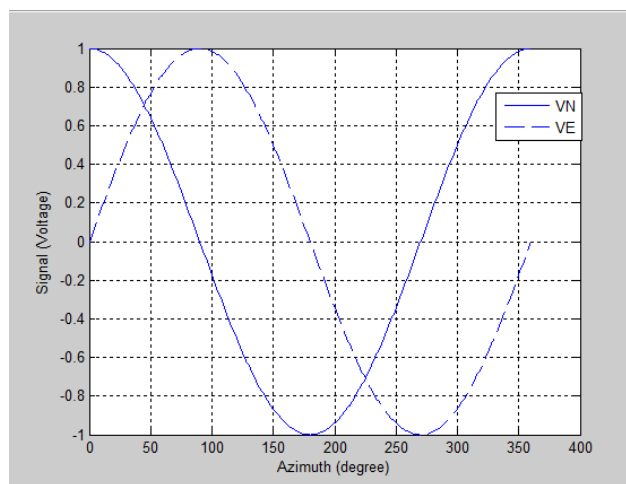
รูปที่ ก.1 การพิจารณาเครื่องหมายของสัญญาณแรงดัน

สัญญาณแรงดันแกนเหนือ – ใต้ และตะวันออก-ตะวันตกจะมีค่าเท่ากับสมการที่ ก.9 และก.10ตามลำดับ

$$V_N = \text{Gain} \left(\frac{NA}{L_a} \right) \left(-\frac{\mu_0 v}{2\pi cD} I_p \cos \theta \right) \quad (\text{ก.9})$$

$$V_E = \text{Gain} \left(\frac{NA}{L_a} \right) \left(\frac{\mu_0 v}{2\pi cD} I_p \sin \theta \right) \quad (\text{ก.10})$$

โดยเครื่องหมายของสัญญาณแรงดันจะแปรตามฟังก์ชันโคไซน์และไซน์ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 สัญญาณแรงดันต่อมุมอะซิมีท (Azimuth)

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมา จะสามารถหามุมอะซิมีท (Azimuth) ได้จากสมการที่ ก.11

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_E}{V_N} \quad (\text{ก.11})$$

เมื่อได้มุมอะซิมีทในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะสามารถหาทิศทางตำแหน่งฟ้าผ่าได้ ซึ่งจุดตัดของทิศทางตำแหน่งฟ้าผ่าในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะเป็นตำแหน่งฟ้าผ่า

ก.1 วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA

วิธีการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA จะอาศัยหลักการที่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายมาถึงแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าในเวลาที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากระยะทางแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่ากับตำแหน่งฟ้าผ่า หาได้จากสมการที่ ก.12 โดยความแตกต่างทางเวลาที่เกิดขึ้นในแต่ละคู่ของชุดตรวจจับฟ้าผ่าสามารถสร้างเป็นวิธีเรขาคณิตแบบไฮเพอร์โบลา ซึ่งจุดตัดของเส้นไฮเพอร์โบลาแต่ละคู่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะเป็นตำแหน่งฟ้าผ่าหาได้จากสมการ ที่ ก.13

$$c(t_i - t) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (\text{ก.12})$$

$$c(t_i - t_j) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} \quad (\text{ก.13})$$

โดยที่ t_i คือเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาถึงแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า [second; s]

t คือเวลาที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น [second; s]

x, y คือตำแหน่งฟ้าผ่า [metre; m]

x_i, y_i คือตำแหน่งชุดตรวจจับฟ้าผ่า [metre; m]



ภาคผนวก ข

แบบจำลองหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า ในระบบ

แบบจำลองหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าพัฒนามาจากโปรแกรม MATLAB 20012a โดยโปรแกรมจะอ้างอิงมาตรฐาน IEC62858 ซึ่งประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าต้องมีค่า 80% ขึ้นไป และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าต้องดีกว่า 500m ขึ้นไปจึงสามารถพิจารณาหาความหนาแน่นลำฟ้าผ่าในพื้นที่นั้นได้

ข.1. กระบวนการคำนวณหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่า

แบบจำลองประสิทธิภาพในการตรวจจับฟ้าผ่าจะพิจารณาความน่าจะเป็นของขนาดกระแสที่เกิดขึ้นโดยอ้างอิงจาก IEEE ถูกแทนเป็นจุดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาขนาดกระแสตั้งแต่ 5kA-300kA ซึ่งถูกแทนเป็นจำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมด เมื่อพิจารณาระยะห่างและมุมอะซิมัทที่เกิดขึ้นต่อแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะทำให้ทราบว่าในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าสามารถตรวจจับขนาดกระแสได้เป็นจำนวนทั้งหมดเท่าใดในจุดที่เกิดฟ้าผ่า ทำให้ทราบค่าประสิทธิภาพการตรวจจับในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า แต่อย่างไรก็ตามในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าประกอบไปด้วยวิธี MDF และ TOA เพราะฉะนั้นจึงต้องคำนึงถึงความน่าจะเป็นที่จะหาตำแหน่งฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นได้

ข.1.1 ความน่าจะเป็นแจกแจงของขนาดกระแสลำฟ้าผ่า

ความน่าจะเป็นสะสมของขนาดกระแสลำฟ้าผ่า (Cumulative probability function) ในที่ใช้สมการของ IEEE เป็นที่อ้างอิง

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_p}{31}\right)^{2.6}} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ P คือ ความน่าจะเป็นสะสมของขนาดกระแสลำฟ้าผ่า

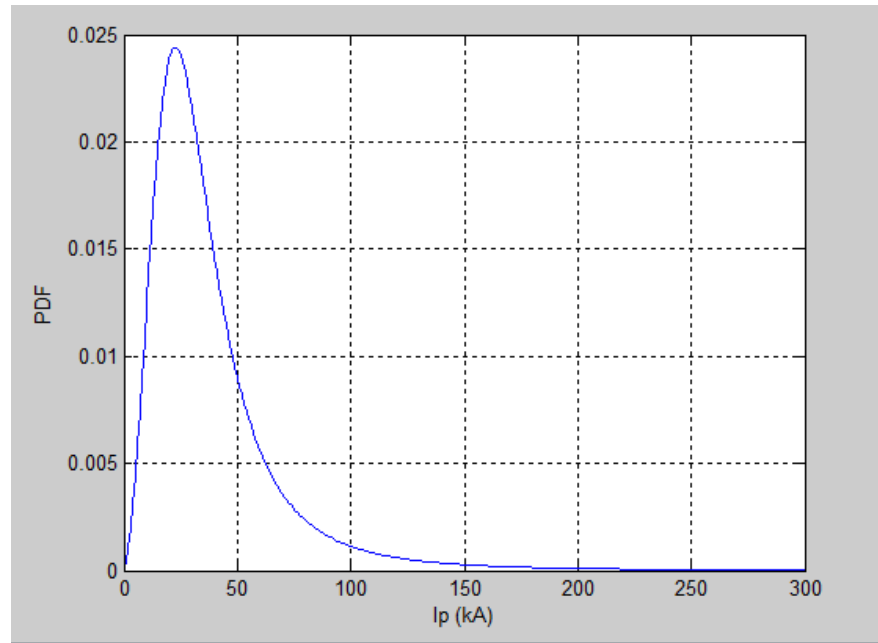
I_p คือ ขนาดกระแสของลำฟ้าผ่า

โดยความน่าจะเป็นแจกแจง(Probability density function) หาได้จากสมการ ข.2

$$PDF = \frac{d(1-P)}{I_p}$$

$$= \frac{(13 * (\frac{I_p}{31})^{1.6})}{(155 * ((\frac{I_p}{31})^{2.6} + 1)^2)} \quad (\text{ข.2})$$

ความน่าจะเป็นเป็นแจกแจงของขนาดกระแสแสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ความน่าจะเป็นเป็นแจกแจงของขนาดกระแส

ข.2.2 วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพการตรวจจับในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า

ประสิทธิภาพการตรวจจับในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะต้องคำนึงขนาดแรงดันน้อยที่สุดและมากที่สุดที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่านั้นตรวจจับได้ในที่นี้ แรงดันขีดเริ่ม ($V_{\text{threshold}}$) เริ่มมีค่า 100 mV และแรงดันมากที่สุด (V_{max}) มีค่า 2 V โดยความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเนื่องจากฟ้าผ่าหาได้ดังสมการ

ข.3

$$B = \frac{\mu_0 v I_p}{2\pi c D} \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่ μ_0 คือ สภาพความซึมซาบสัมพัทธ์

v คือ ความเร็วของลำฟ้าผ่าย้อนกลับ (Velocity of return stroke)

I_p คือ ขนาดกระแสของลำฟ้าผ่าย้อนกลับ (kA)

θ คือ มุมอะซิมัท (มุมระหว่างลำฟ้าผ่ากับชุดตรวจจับฟ้าผ่า)

D คือ ระยะห่างระหว่างลำฟ้าผ่าและชุดตรวจจับฟ้าผ่า (m)

c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

ขนาดกระแสเหนี่ยวนำ (Induced current) ที่เกิดขึ้นที่เสาอากาศแบบบ่วงหาได้จากสมการ

ข.4

$$i_a = \frac{NAB}{L_a} \quad (\text{ข.4})$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบของเสาอากาศแบบบ่วง (turns)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาอากาศแบบบ่วง (m^2)

L_a คือ ค่าความเหนี่ยวนำของเสาอากาศแบบบ่วง (Henry)

โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นที่ระบบวัดหาได้จากสมการ ข.5

$$V = i_a \times G \quad (\text{ข.5})$$

โดยที่ G คือ อัตราการขยายของชุดตรวจจับฟ้าผ่า

เมื่อแทนสมการ ข.3 และ ข.4 ลงไปในสมการ ข.5 ทำให้ได้สัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นที่ระบบวัดอยู่ในรูปฟังก์ชันของขนาดกระแสลำฟ้าพ่าย้อนกลับดังสมการที่ ข.7

$$V = \left(\frac{GNA \mu_0 v I_p \cos \theta}{2\pi L_a c D} \right) \quad (\text{ข.6})$$

$$I_p = \left(\frac{V 2\pi L_a c D}{GNA \mu_0 v \cos \theta} \right) \quad (\text{ข.7})$$

จากสมการที่ ข.7 นั้นจะทำให้ได้ขนาดกระแสน้อยที่สุด (I_{\min}) และมาก (I_{\max}) ที่สุดอยู่ในฟังก์ชันของระยะทางและมุมระหว่างลำฟ้าผ่าเพราะฉะนั้นเมื่อนำขนาดกระแสน้อยที่สุดและมากที่สุดแทนลงไปนสมการ ข.2 และทำการอินทิเกรตจะทำให้ได้จำนวนลำฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น ณ จุดนั้นที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าสามารถตรวจจับได้ แต่ทว่าชุดตรวจจับฟ้าผ่าที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นเสาอากาศแบบกากบาททำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นอีกนั้นเป็นมุมโคไซน์และไซน์ โดนชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะ

ทำงานเมื่อสัญญาณแรงดันแกนใดแกนหนึ่งของเสาอากาศแบบบ่วงเป็นไปตามเงื่อนไข $100mV \leq \|V\| \leq 2.05V$ ในกรณีเสาอากาศแบบบ่วงทั้งสองทำงานพร้อมกันจะพิจารณาขนาดกระแสที่น้อยที่สุดและมากที่สุดจากทั้งสองแกน ทำให้สามารถหาค่าความน่าจะเป็นของประสิทธิภาพการตรวจจับในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าได้สมการที่ ข.8

$$p_i(\%) = \left(\frac{\int_{300kA}^{i_{max}} (PDF) dI_p}{\int_{5kA}^{i_{min}} (PDF) dI_p} \right) \times 100 \quad (\text{ข.8})$$

ข 2.3 วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าของระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่า

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าของระบบระบุตำแหน่งฟ้าผ่านั้นจะต้องพิจารณาถึงระเบียบวิธีที่ใช้ในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า เนื่องจากในแต่ละระเบียบวิธีการหาตำแหน่งฟ้าผ่านั้นมีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ระเบียบวิธี MDF นั้นต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 2 ตัวในการบอกตำแหน่ง ในขณะที่ระเบียบวิธี TOA ต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 4 ตัวในการบอกตำแหน่ง ในกรณีระบบประกอบไปด้วยชุดตรวจจับฟ้าผ่าทั้งหมด 4 ตัว ประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าของระบบในกรณีระเบียบวิธี MDF หาได้จากสมการที่ ข.9 และประสิทธิภาพการตรวจจับฟ้าผ่าของระบบในกรณีระเบียบวิธี TOA หาได้จากสมการที่ ข.10

$$DE_{MDF}(\%) = (q_1 q_2 q_3 q_4) + (q_1 p_2 q_3 p_4) + (q_1 p_2 p_3 q_4) + (q_1 p_2 p_3 p_4) + (p_1 q_2 q_3 p_4) + (p_1 q_2 p_3 q_4) \quad (\text{ข.9})$$

$$+ (p_1 q_2 p_3 p_4) + (p_1 p_2 q_3 q_4) + (p_1 p_2 q_3 p_4) + (p_1 p_2 p_3 q_4) + (p_1 p_2 q_3 p_4) \quad (\text{ข.10})$$

$$DE_{TOA}(\%) = (p_1 p_2 p_3 p_4)$$

โดยที่ q_i คือ ความน่าจะเป็นที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าไม่สามารถตรวจจับฟ้าผ่าได้ $(1-p_i)$

ข.3 กระบวนการคำนวณหาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า

การคำนวณหาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่านั้นได้จำแนกเป็น 2 ประเภทตามระเบียบวิธีที่ใช้ในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่า คือ MDF (Magnetic direction finding) และ TOA (Time of arrival) โดยกำหนดมีขนาดกระแสฟ้าผ่าเท่ากับ 31kA เนื่องจากเป็นขนาดกระแสที่มีโอกาสเกิดสูงที่สุดลงใน

พื้นที่สนใจ การแพร่ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับ (Return stroke) ทำให้เกิดสัญญาณแรงดันเกิดขึ้นในชุดตรวจจับฟ้าผ่าผ่านทางเสาอากาศแบบบ่วงกากบาท (Cross Loop Antenna) โดยแต่ละแกนต้องอยู่ในช่วงแรงดัน $100mV \leq \|V\| \leq 2.05V$ ซึ่งเป็นแรงดันที่ระบบใช้งาน

ข.3.1 MDF

โดยสัญญาณแรงดันในเสาอากาศทิศ-ใต้(N-S)และตะวันออก-ตะวันตก(E-S)หาได้จากสมการที่ ข.11และข.12

$$V_N = \left(\frac{GNA \mu_0 \nu I_p \cos \theta}{2\pi L_a c D} \right) \pm error_N \quad (\text{ข.11})$$

$$V_E = \left(\frac{GNA \mu_0 \nu I_p \sin \theta}{2\pi L_a c D} \right) \pm error_E \quad (\text{ข.12})$$

โดยที่ $error_N$ คือสัญญาณแรงดันที่คลาดเคลื่อนของเสาอากาศแบบบ่วงแกนเหนือ-ใต้

$error_E$ คือสัญญาณแรงดันที่คลาดเคลื่อนของเสาอากาศแบบบ่วงแกนตะวันออก-ตะวันตก

โดยสัญญาณแรงดันที่คลาดเคลื่อนในการศึกษานี้พิจารณาความคลื่อนของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ทำให้มุมอะซิมัทที่เกิดขึ้นมานั้นมีค่าความผิดพลาดอยู่ดังสมการที่ ข.13

$$\theta_{mi} = \arctan\left(\frac{V_E}{V_N}\right) \quad (\text{ข.13})$$

ทำให้ในแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าจะได้สมการเส้นตรงดังสมการที่ ข.14

$$y_i = y_i + \frac{(x_l - x_i)}{\tan \theta_{mi}} \quad (\text{ข.14})$$

โดยที่ x_l, y_l คือ ตำแหน่งฟ้าผ่าที่ได้จากการคำนวณ

x_i, y_i คือ พิกัดของชุดตรวจจับฟ้าผ่า i (m)

ค่าความผิดพลาดสามารถหาได้จากสมการที่ ข.15

$$Error_{MDF} = \sqrt{(x_l - x_t)^2 + (y_l - y_t)^2} \quad (\text{ข.15})$$

โดยที่ x_t, y_t คือ ตำแหน่งฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริง

แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่ามากกว่า 2 ตัวขึ้นไปนั้นทำให้เกิดข้อมูลมากเกินไปทำให้สามารถใช้การทดสอบไคสแควร์ (Chi-square) ได้เพื่อประเมินหาตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสมดังสมการ ข.16

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\theta_{mi} - \theta_i)}{\sigma_{\theta_i}} \right]^2 \quad (\text{ข.16})$$

โดยที่ N คือ จำนวนชุดตรวจจับฟ้าผ่าที่ตรวจจับได้ต้องมากกว่า 2

σ_{θ_i} คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเนื่องจากมุมอะซิมีท (Azimuth)

θ_i คือ มุมอะซิมีท (Azimuth) ที่เกิดจากการคำนวณหาตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสม

โดยตำแหน่งฟ้าผ่าที่ทำให้การทดสอบไคสแควร์ (Chi-square) มีค่าน้อยที่สุดคือจะเป็นตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสม ในกระบวนการวิธีเชิงเลขคณิตนั้นจะใช้วิธีการ Marquardt method มาทำการหาตำแหน่งฟ้าผ่ารายละเอียดการคำนวณ[34]

ข.3.2 TOA (Time of Arrival)

โดยการศึกษาความแม่นยำในการบอกพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยวิธี TOA นั้นจำเป็นต้องใช้ชุดตรวจจับฟ้าผ่าอย่างน้อย 4 ตัวเนื่องจากเพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัดตำแหน่งฟ้าผ่าโดยเวลาที่แต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่าบันทึกได้หาได้จากสมการที่ ข.17

$$t_{mi} = t + \frac{\sqrt{(x_i - x_l)^2 + (y_i - y_l)^2}}{c} \pm error_t \quad (\text{ข.17})$$

โดยที่ t_{mi} คือ เวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาถึงแต่ละชุดตรวจจับฟ้าผ่า (s)

t คือ เวลาที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น (s)

x_l, y_l คือ พิกัดตำแหน่งฟ้าผ่า (m)

x_i, y_i คือ พิกัดตำแหน่งชุดตรวจจับฟ้าผ่า (m)

c คือ ความเร็วแสง (3×10^8) m/s

$error_t$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนทางเวลา (s)

แต่ทว่าเวลาที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่าบันทึกได้นั้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนทางเวลาอยู่ในที่นี้ พิจารณาความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจาก จีพีเอส (GPS) ทำให้เวลาที่บันทึกได้นั้นเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่เข้ามาถึงชุดตรวจจับฟ้าผ่าจริงๆ แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบไคสแควร์ (Chi-square) สามารถทำให้ได้พิกัดตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสมได้จากสมการ ข.18

$$\chi^2 = \frac{1}{N-3} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(t_{mi} - t_i)}{\sigma_{ti}} \right]^2 \quad (\text{ข.18})$$

โดยที่ N คือ จำนวนชุดตรวจจับฟ้าผ่าที่ตรวจจับ (ต้องมากกว่า 3ตัว)

t_i คือ เวลาที่คลื่นแพร่เข้ามาหาชุดตรวจจับฟ้าผ่าได้จากการคำนวณวิธีเลขคณิต

σ_{ti} คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการบันทึกเวลาที่ชุดตรวจจับฟ้าผ่า i

โดยตำแหน่งฟ้าผ่าที่ทำให้การทดสอบไคสแควร์ (Chi-square) มีค่าน้อยที่สุดคือจะเป็นตำแหน่งฟ้าผ่าที่เหมาะสม ในกระบวนการวิธีเชิงเลขคณิตนั้นจะใช้วิธีการ Marquardt method มาทำการหาตำแหน่งฟ้าผ่ารายละเอียดการคำนวณ[34]

รายการอ้างอิง

- [1] B. Dibner, *Linghtning Vol.1 Physics of Lightning*, p.^pp. 28: Academic Press Inc, 2000.
- [2] "ฟ้าผ่า?," http://www.coe.or.th/e_engineers/knc_detail.php?id=35.
- [3] สำนักข่าวไทย. "เผย 5 ปีคนไทยโดนฟ้าผ่า 180คน ส่วนใหญ่เกษตรกร," <http://www.mcot.net/site/content?id=51e8d88c150ba003390000f2#.Vf0-VdLtmkp>.
- [4] S. A. Fedoseev, and A. S. Fedoseev, "Tropical lightning stroke data collected and analyzed by computer based lightning detecting station," in *Electromagnetic Compatibility*, 2001, pp. 845-848.
- [5] K. L. Cummins, "Lightning Information for use in Power Systems Analysis: How much more do we need to know?," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2002.
- [6] R. B. Anderson, H. R. V. NieKerk, S. A. Pretince, and D. Mackerras, "Improved lightning flash counters," *Electra*, 1979.
- [7] ธ. พิชิตชัยกุล, "การพัฒนาเครื่องนับฟ้าผ่าแบบซีเกอร์," สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [8] K. L. Cummins, E. P. Krider, and M. D. Malone, "The U.S. National Lightning Detection NetworkTm and applications of cloud to ground lightning data by electric power utilities," in *Electromagn. Compat*, pp. 465-480.
- [9] M. I. Lees, "Lightning activity in the UK," 1997.
- [10] T. Shindo, and S. Yokoyama, "Lightning occurrence data observed with lightning location systems in Japan: 1992-1995," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1468 - 1474, 1998.
- [11] N. Herdotou, W. A. Chisholm, and W. Janischewskyj, "Distribution of lightning peak stroke currents in Ontario using an LLP system," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1331 - 1339, 1993.

- [12] G. Dienforfer, W. Schulz, and V. A. Rakov, "Lightning characteristics based on data from the Austrian lightning location system," *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 40, no. 4, pp. 452 - 464, 1998.
- [13] D. Biron, "LAMPINET-Lightning Detection in Italy," *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, p. 141: Springer, 2008.
- [14] Tor Aalborg, Jostrin Huse, Helge Johansen, and V. Larsen, "USER EXPERIENCE FROM NORWAY WITH OPERATION OF THE LLP-LIGHTNING LOCATION SYSTEM."
- [15] M. Loboda, H.Betz, P. Brański, and Z. Dziewit, "New Lightning Detection Networks in Poland – LINET and LLDN," *THE OPEN ATMOSPHERIC SCIENCE JOURNAL*, pp. 9, 2009.
- [16] Hans Betz, W.Oettinger, K. Schmidt, and M. Wirz, "Modern Lightning Detection and Implementation of a New Network in Germany," *Geophysical Research Abstract*, vol. 7, 2005.
- [17] Shui Ming Chen, Y. Du, and L. M. Fan, "Lightning Data Observed With Lightning Location System in Guang-Dong Province, China," 2004, pp. 1148 - 1153.
- [18] L. S. Lee, "COMPREHENSIVE AND LOCATION-SPECIFIC LIGHTNING INFORMATION SERVICE IN HONG KONG."
- [19] Osmar Pinto Jr, Iara R.C.A Pinto, Marcelo M.F. Saba, and K. P.Naccarato, "Cloud-to-Ground Lightning Observations in Brazil," *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, p. 209, 2009.
- [20] W.I.Ibrahim, L.N. Muhammad, S.A.Ghani, M.R.Ghazali, M.F.M. Jusof, N.A.A. Rahman, and N.M.Hatta, " Pekan Lightning Detection System (PLDS) and Data Validation with Lightning TNBR," in International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, 2013.
- [21] เดชสิทธิ์ ถาวร, "การเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยงของความเสี่ยงหายจากฟ้าผ่าระหว่าง IEC62305 Ed.1 และ Ed.2," จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2014.
- [22] Gunnar G. Lovas, Vegard Larsen , and H. Johansen, "ANALYSIS OF LIGHTNING LOCATION DATA FOR TWO LINE ROUTE ALTERNATIVES," *CIGRE WG 33.01 LIGHTNING*.
- [23] Donald R. MacGorman, and W. D. Rust, *The Electrical Nature of storms*.

- [24] Kenneth L. Cummins, Robert Burnett, William Hiscox , and A. Pifer, “Line reliability and fault analysis using the national lightning detection network,” 1993.
- [25] E.P. Krider, and R. Noggle, “Lightning Direction-Finding Systems for Forest Fire Detection,” *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 61, no. 9, 1980.
- [26] จตุพงษ์ พุทธิรักษา, “การประเมินขนาดและตำแหน่งการเกิดฟ้าผ่าจากการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ,” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [27] IEC 62858, "Lightning density based on lightning location systems (LLS)," 2015.
- [28] "Why is the Cumulonimbus cloud formation so dangerous?," [http://aviation.stackexchange.com/questions/16700/why-is-the-cumulonimbus-cloud-formation-so-dangerous.](http://aviation.stackexchange.com/questions/16700/why-is-the-cumulonimbus-cloud-formation-so-dangerous)
- [29] V.A. Rakov, and M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*: Cambridge, 2003.
- [30] K. Berger, "The earth flash," *Golde RH (ed) Lightning*, pp. 119–190, 1977.
- [31] S. Chen, X. Wang, B. Li, and S. Yang, “Frequency Spectrum of Standard Lightning Currents and Its Application,” *Meteorological*, pp. 11-19, 2006.
- [32] Sarah K. Harriman, Evans W. Paschal, and U. S. Inan, “Magnetic Sensor Design for Femtotesla Low-Frequency Signals,” 2010.
- [33] E. W. Paschal, *The Design of Broad-Band VLF Receivers with Air-Core Loop Antennas*, 1980.
- [34] Philip Bevington , and D. K. Robinson, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*: MC Graw Hill.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ณิชฐนพงศ์ คงตระกูล เกิดวันที่ 31 ตุลาคม 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปี 2554

