

การศึกษาการกระเจิงของคลื่นวิทยุจากพายุโดยใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า



นายประเสริฐ จันวดี

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

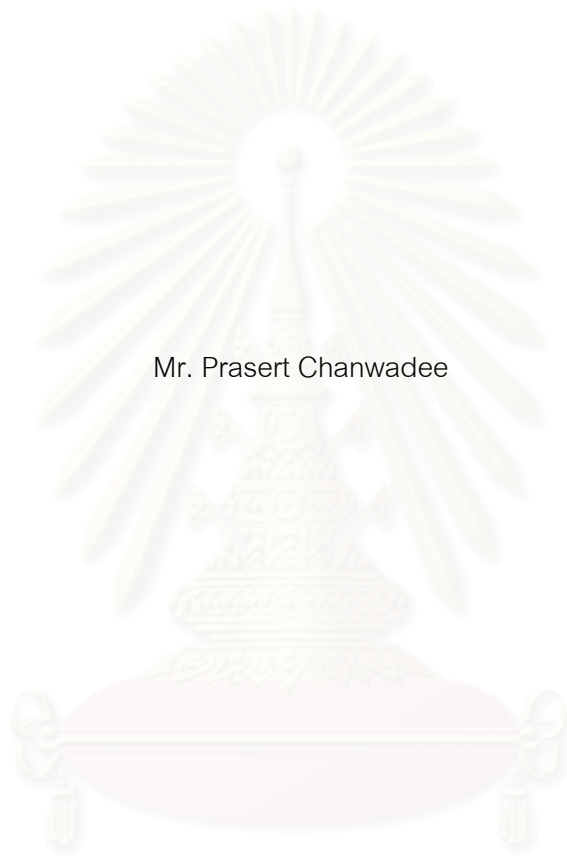
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3561-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF RADIO WAVE SCATTERING FROM STORMS BY THE USE OF
AN OVER THE HORIZON RADAR SYSTEM



Mr. Prasert Chanwadee

สถาบันวิทยบริการ
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 2548

ISBN 974-17-3561-8

ประเสริฐ จันวดี : การศึกษาการกระเจิงของคลื่นวิทยุจากพายุโดยใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า (A STUDY OF RADIO WAVE SCATTERING FROM STORMS BY THE USE OF AN OVER THE HORIZON RADAR SYSTEM) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร, 130 หน้า, ISBN 974-17-3561-8.

พายุหมุนเขตร้อนเป็นระบบมวลอากาศที่มีสมบัติแตกต่างจากอากาศทั่วไป การทำความเข้าใจระบบมวลอากาศภายในพายุหมุนเขตร้อนนี้สามารถทำได้โดยการศึกษาจากแบบจำลองพายุ แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษานั้นจำเป็นต้องตรวจสอบว่าถูกต้องหรือใกล้เคียงกับปรากฏการณ์พายุที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพายุที่พัฒนาขึ้นทำได้โดยประยุกต์ใช้คลื่นวิทยุ เนื่องจากความสามารถในการกระเจิงได้ของสัญญาณคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่แตกต่างกัน

พายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้นเกิดจากมวลอากาศก่อตัวในแนวตั้งเรียงกันหลายชั้นตามระยะรัศมีพายุพร้อมทั้งเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางพายุในลักษณะเป็นวง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอแบบจำลองพายุเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ซึ่งพิจารณาพายุหมุนเขตร้อนว่าเป็นระบบมวลอากาศที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตามแนวตั้ง เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ และวางซ้อนอยู่บนแกนเดียวกัน โดยทรงกระบอกแต่ละชั้นมีอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศคงที่ตลอดภายในชั้น แต่ต่างจากชั้นอื่นๆ ตามระยะของรัศมีพายุ โดยค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศนี้สามารถนำมาคำนวณค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในแต่ละชั้นของแบบจำลองพายุเพื่อใช้วิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุต่อไปได้ การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุนี้ใช้กรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบโดยสามารถวิเคราะห์ผลของคลื่นกระเจิงกรณีที่ค่าของอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศภายในพายุเปลี่ยนแปลงได้ อีกทั้งยังอาจใช้ประกอบเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของพายุจากสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุได้เช่นกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้วิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากแบบจำลองพายุในกรณีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันอากาศ และกรณีการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่งเข้าไปยังพายุโดยใช้ระบบเรดาร์

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบผลการคำนวณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นที่พัฒนาขึ้นกับผลตรวจวัดจริง โดยจัดสร้างสถานีเรดาร์เพื่อทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุที่เกิดขึ้นจริง ผลการเปรียบเทียบลักษณะของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการวิเคราะห์กับลักษณะของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัดปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต *ประเสริฐ จันวดี*
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร*
 ปีการศึกษา2548.....

4670370321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: RADIO WAVE SCATTERING / STORM MODEL / OVER THE HORIZON RADAR / STORM / TROPICAL CYCLONE

PRASERT CHANWADEE : A STUDY OF RADIO WAVE SCATTERING FROM STORMS BY THE USE OF AN OVER THE HORIZON RADAR SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, Ph.D., 130 pp. ISBN 974-17-3561-8.

Tropical cyclone or storm is an air mass system with different characteristics from its surrounding air mass. Understanding of air mass system inside the storm can be gained by studying storm model. The developed storm model needs validation that can confirm its appropriateness of representing natural storm. The fact that radio waves can be scattered when propagate through boundary between different media makes possible the use of radiowave in storm model validation.

Natural tropical storm is a vertical formation of radially stratified air mass, with inward spiral motion towards its centre. This thesis thus proposes an electromagnetic model of multi-layered cylinder type as an approach for storm modelling. The proposed model considers any tropical storm consisting of a number of coaxial vertical cylinders, each of which has its own meteorological parameters eg. temperature, humidity and pressure of constant value through out each cylindrical layer. These meteorological parameters can be related to a certain figure of dielectric constant for analysis of the scattered radiowave from the storm. Full wave analysis is adopted as a method for investigating radiowave scattering from the storm on various conditions of temperature, humidity and pressure. In addition the time evolution of the storm can be studied from temporal change of scattered radiowave. This thesis investigate the effects of varying temperature, relative humidity and pressure on characteristic of the scattered radiowaves. Also investigated is the effects of the incident radar pulse width

Comparison of the results based on the storm model and the detected radar waveform is by setting up a radar station in the province of Nakorn Srithammarat. It is found that the detected radar waveform are in good agreement with the calculated scattered waveform.

Department Electrical Engineering Student's signature Prasert Chanwadee
 Field of study Electrical Engineering Advisor's signature C. Waiya
 Academic year ..2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยยาพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว และรองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เภญจพลกุล ที่ได้กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนบางส่วนในการทำงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณอนันต์ เจริญสุข หัวหน้าอุทยานแห่งชาติเขานัน จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำงานวิจัย ความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์สถานที่พัก และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่านของอุทยานแห่งชาติเขานัน ที่ให้ความดูแล และความช่วยเหลือในการวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ธีรศักดิ์ อนันตกุล คุณพัฒนเกียรติ ณ นคร ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย ขอขอบคุณ คุณศุภมาส สุวรรณวัฒน์ คุณรชฏ ถาวรศิริ และคุณกุลธวัช ภูมิวงศ์พิทักษ์ ที่ให้คำปรึกษาและสละเวลาให้ความช่วยเหลือในการทดลองงานวิจัยสำเร็จ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพฤษัช อินนุกูล คุณจิตจรลดา ม้าชัย และคุณนิดา จงลีพันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และครอบครัว ซึ่งสนับสนุนทุนการศึกษา รวมทั้งเป็นแรงกายและแรงใจที่สำคัญยิ่งแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
แนวเหตุผล	1
หลักการและทฤษฎี.....	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 หลักการเบื้องต้นของการใช้ระบบเวดาร์เหนือขอบฟ้าตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิง	
จากพายุเขตร้อน	6
ความนำ	6
2.1 การหักเหสัญญาณวิทยุในชั้นบรรยากาศ	7
2.1.1 ชั้นต่างๆ ของบรรยากาศ	7
2.1.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	9
2.1.3 การหักเหของคลื่นวิทยุเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	11
2.2 พายุหมุนเขตร้อน.....	16
2.2.1 บริเวณต่างๆ ของโลกที่มีการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน.....	16
2.2.2 เกณฑ์ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อน	18
2.2.3 ลำดับขั้นการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน	19
2.2.4 โครงสร้างการก่อตัวของพายุไต้ฝุ่น	23

2.3 ระบบเรดาร์.....	25
2.3.1 ระบบพัลส์เรดาร์.....	26
2.3.2 หลักการของระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า	27
2.3.2.1 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุในแถบความถี่สูง.....	27
2.3.2.2 การพิจารณาความถี่ปฏิบัติการของเรดาร์คลื่นฟ้า	29
บทที่ 3 แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนสำหรับการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิง	31
ความนำ	31
3.1 แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน.....	31
3.1.1 ชนิดของแบบจำลอง	32
3.1.2 แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น	33
3.1.2.1 ข้อสมมุติของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน.....	33
3.1.2.2 การกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุน เขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น	35
3.2 การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน ชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น	37
3.2.1 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอก	37
3.2.2 เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของแบบจำลองพายุหมุน เขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น	44
3.2.2.1 กรณีคลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพายุ	45
3.2.2.2 กรณีคลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพายุ.....	47
3.2.3 การคำนวณอัตราส่วนของคลื่นกระเจิงต่อคลื่นตกกระทบของแบบจำลอง พายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น.....	49
3.2.3.1 กรณีคลื่นเดินทางเข้าหาแกนพายุ (กรณี $i > j$).....	50
3.2.3.2 กรณีคลื่นเดินทางออกจากพายุ (กรณี $i < j$)	51
3.3 แนวคิดของการวิเคราะห์ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ โดยใช้แบบ จำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ในกรณีที่สูง สัญญาณคลื่นวิทยุลักษณะเป็นพัลส์และมีความกว้างพัลส์จำกัด	54

บทที่ 4 การตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนด้วยระบบเรดาร์	57
ความนำ	57
4.1 บริเวณการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน	57
4.2 อุปกรณ์ การปรับเทียบอุปกรณ์ และการวิเคราะห์หึ่งบกำลังเบื้องต้น	59
4.2.1 อุปกรณ์ภาคส่ง	59
4.2.2 อุปกรณ์ภาครับ	60
4.2.3 การปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง	60
4.2.4 การปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ	61
4.2.5 การวิเคราะห์หึ่งบกำลังเบื้องต้น.....	62
4.3 การปรับเทียบระบบเรดาร์กับเป้าอ้างอิง	62
4.4 ผลการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวน ณ บริเวณที่จะตั้งสถานีเรดาร์.....	64
4.5 การทดสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์เนื่องจากการส่งสัญญาณกำลังสูง	65
4.6 การวิเคราะห์กำลังรับของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน.....	67
4.7 ลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนที่ได้จากการตรวจวัด	68
4.7.1 ผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน ครั้งที่ 1	70
4.7.2 ผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน ครั้งที่ 2	75
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนและการเปรียบเทียบ กับผลจากการตรวจวัด.....	80
ความนำ	80
5.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุกรณีนุณหภูมิและ ความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลง.....	81
5.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุตามเวลา	82
5.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์.....	83
5.2.2 ผลการแปรค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิด ทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น	84
5.2.3 ผลการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลอง พายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น.....	86

5.2.4 ผลการแปรค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่ง.....	89
5.2.5 ผลการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างชั้นของแบบจำลองพายุ.....	91
5.2.6 ผลการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุ.....	92
5.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิง จากพายุหมุนเขตร้อน	94
5.3.1 การเปรียบเทียบผลคลื่นกระเจิงกรณีเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ ของสัญญาณส่ง	95
5.3.2 การเปรียบเทียบรูปแบบคลื่นกระเจิงระหว่างการวิเคราะห์กับ การตรวจวัด	96
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	102
สรุปการวิจัย.....	102
ข้อเสนอแนะ	104
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก	110
ภาคผนวก ข.....	119
ภาคผนวก ค	120
ภาคผนวก ง.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	130

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เกณฑ์ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อน 19
3.1	พารามิเตอร์การถดถอยกรณีพายุเกิด ณ บริเวณอ่าวเบงกอลและบริเวณ มหาสมุทรแปซิฟิกเหนือฝั่งตะวันตก 37
4.1	ผลการรับ-ส่งกำลังงานเพื่อทดสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ โดยตรงกับสายอากาศ 66
5.1	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ 100
ก.1	รายชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบน และทะเลจีนใต้ 110
ก.2	ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 1 112
ก.3	ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 2 113
ก.4	ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 3 114
ก.5	ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 4 115
ก.6	ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 5 117
ข.1	สถิติพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนตัวผ่านภาคต่างๆ ของประเทศไทยคาบ 54 ปี (พ.ศ. 2494-2547) 119
ค.1	พายุที่เคยเกิดขึ้นบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ และอาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าที่ติดตั้ง ณ จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้ 120
ค.2	จำนวนพายุหมุนเขตร้อนที่อาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าได้ในช่วง เวลาครึ่งเดือนแรกและครึ่งเดือนหลัง ของพายุที่เคยเกิดขึ้นในแต่ละเดือน 122

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แนวการเคลื่อนที่ของพายุ และตำแหน่งของเครื่องรับ-ส่งเรดาร์.....3
1.2	รูปแบบของสัญญาณส่งและสัญญาณรับ จากระบบพัลส์เรดาร์.....4
2.1	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศแต่ละชั้น8
2.2	การแจกแจงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....9
2.3	ชั้นย่อยต่างๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....10
2.4	การหักเหของสัญญาณคลื่นวิทยุจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์12
2.5	บริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....14
2.6	บริเวณต่างๆ ของโลกทั้ง 7 บริเวณที่มีการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน.....18
2.7	คลื่นโซนร้อน21
2.8	พายุดีเปรสชันเขตร้อน.....21
2.9	พายุโซนร้อน.....22
2.10	พายุไต้ฝุ่น หรือเฮอริเคน.....23
2.11	โครงสร้างของพายุไต้ฝุ่นและทิศทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศตามแนวตัดขวาง.....25
2.12	การแพร่กระจายคลื่นวิทยุในแถบความถี่สูง28
2.13	บริเวณเขตกระโดดข้ามของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในแถบความถี่สูง.....29
2.14	เรขาคณิตประกอบการกำหนดความถี่ที่หักเหได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....30
3.1	แบบจำลองคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาและออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์.....38
	(ก) กรณีคลื่นวิทยุเดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์
	(ข) กรณีคลื่นวิทยุเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์
3.2	คลื่นตกกระทบทำมุมใดๆ กับแกนของทรงกระบอก39
3.3	สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทำมุมใดๆ กับแกนของทรงกระบอก.....40
3.4	การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระเจิงตามการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของขอบเขต.....54
	(ก) กรณีเมื่อระยะห่างของขอบเขตมากกว่า $ct/2$
	(ข) กรณีเมื่อระยะห่างของขอบเขตเท่ากับ $ct/2$
	(ค) กรณีเมื่อระยะห่างของขอบเขตน้อยกว่า $ct/2$
3.5	การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระเจิงตามการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์56
4.1	ตำแหน่งพายุหมุนเขตร้อนที่ตรวจวัดสัญญาณกระเจิงโดยใช้ระบบเรดาร์ ครั้งที่158

รูปที่	ฐ หน้า
4.2 ตำแหน่งพายุหมุนเขตร้อนที่ตรวจวัดสัญญาณกระเจิงโดยใช้ระบบเรดาร์ ครั้งที่2	58
4.3 ผังอุปกรณ์ภาคส่ง	59
4.4 ผังอุปกรณ์ภาครับ	60
4.5 ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง	61
4.6 ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ	61
4.7 สัญญาณกระเจิงเพื่อใช้อ้างอิงในการปรับเทียบ	63
4.8 ระดับสัญญาณรบกวนเฉลี่ยในรอบวัน ณ บริเวณสถานีเรดาร์	64
4.9 ผังการเชื่อมต่อสายอากาศกับอุปกรณ์ที่อาจจะได้รับความเสียหาย จากการส่งสัญญาณกำลังสูง	65
4.10 ลักษณะสัญญาณคลื่นส่งและคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัด	68
4.11 ลักษณะสัญญาณกระเจิงกรณีสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์สูง	69
4.12 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 11:19:50 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec	70
4.13 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 11:30:20 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec	70
4.14 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 12:29:28 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec	71
4.15 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 12:35:50 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec	71
4.16 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 12:39:13 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 1 mSec	72
4.17 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 12:39:52 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec	72
4.18 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 13:03:40 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec	73
4.19 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 13:30:28 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec	73
4.20 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 13:35:28 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec	74

รูปที่	
4.21	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 13:51:53 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec74
4.22	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 14:12:22 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec75
4.23	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48 เวลา 13:26:05 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec76
4.24	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48 เวลา 13:31:10 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec76
4.25	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48 เวลา 13:50:19 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec77
4.26	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48 เวลา 16:15:38 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec77
4.27	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48 เวลา 16:30:26 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec78
4.28	ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48 เวลา 17:15:34 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec78
5.1	การเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุกรณีอุณหภูมิลดลงและ ความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลง81
5.2	เปรียบเทียบค่า g ของคลื่นในแบบแผน TE กรณีอุณหภูมิลดลงและความชื้นสัมพัทธ์ เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 5.183
5.3	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกกรณีหน้าตัดข้างแบบเกาส์และแปรค่าตาม ϵ_r สูงสุด84
5.4	เปรียบเทียบค่า g ของคลื่นในแบบแผน TM และ TE กรณีหน้าตัดข้างแบบเกาส์ และมี ϵ_r สูงสุดแตกต่างกัน85
	(ก) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.001
	(ข) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.005
	(ค) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.013
	(ง) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.020
5.5	เปรียบเทียบค่า g ของคลื่นในแบบแผน TE กรณีหน้าตัดข้างแบบเกาส์ แปรค่าตาม ϵ_r สูงสุด86

รูปที่	หน้า
5.6	เปรียบเทียบค่า g กรณีเปลี่ยนแปลงรูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก87
	(ก) ϵ_r แบบเกาส์
	(ข) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบเกาส์
	(ค) ϵ_r แบบเอกซ์โพเนนเชียล
	(ง) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบเอกซ์โพเนนเชียล
	(จ) ϵ_r แบบเชิงเส้น
	(ฉ) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบเชิงเส้น
	(ช) ϵ_r แบบพาราโบลาคว่ำ
	(ซ) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบพาราโบลาคว่ำ
	(ณ) ϵ_r แบบเรย์เล
	(ญ) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบแบบเรย์เล
5.7	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสำหรับการวิเคราะห์คลื่นกระเจิงกรณีแปรค่าความกว้างพัลส์89
	(ก) กรณีหน้าตัดข้างแบบเอกซ์โพเนนเชียล
	(ข) กรณีหน้าตัดข้างแบบเกาส์
5.8	เปรียบเทียบค่า g กรณีแปรค่าตามความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่งด้วยระบบพัลส์เรดาร์90
	(ก) กรณีคลื่นในแบบแผน TE และหน้าตัดข้าง ϵ_r เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล
	(ข) กรณีคลื่นในแบบแผน TM และหน้าตัดข้าง ϵ_r เป็นแบบเกาส์
5.9	เปรียบเทียบค่า g กรณีแปรค่าระยะห่างระหว่างชั้นของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่มีรูปแบบหน้าตัดข้างเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล91
	(ก) การแปรค่าระยะการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_r
	(ข) คลื่นกระเจิงกรณีคลื่น TE
5.10	เปรียบเทียบค่า g กรณีแปรค่าระยะห่างระหว่างชั้นของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่มีรูปแบบหน้าตัดข้างเป็นแบบเกาส์92
	(ก) การแปรค่าระยะการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_r
	(ข) คลื่นกระเจิงกรณีคลื่น TE
5.11	เปรียบเทียบค่า g จากการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุกรณีรูปแบบหน้าตัดข้างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแบบเอกซ์โพเนนเชียล93
	(ก) ϵ_r จากการเปลี่ยนแปลงระยะรัศมีพายุ
	(ข) คลื่นกระเจิงกรณีคลื่น TE

รูปที่		
5.12	เปรียบเทียบค่า g จากการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุกรณีรูปแบบหน้าตัดข้าง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแบบเกาส์	93
	(ก) ϵ_r จากการเปลี่ยนแปลงระยะรัศมีพายุ	
	(ข) คลื่นกระเจิงกรณีคลื่น TE	
5.13	ตัวอย่างที่ 1 ผลการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนกรณีเปลี่ยน ความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง	95
	(ก) ความกว้างพัลส์ 1 mSec	
	(ข) ความกว้างพัลส์ 5 mSec	
5.14	ตัวอย่างที่ 2 ผลการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนกรณีเปลี่ยน ความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง	95
	(ก) ความกว้างพัลส์ 2 mSec	
	(ข) ความกว้างพัลส์ 5 mSec	
5.15	ตัวอย่างที่ 1 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec.....	96
5.16	ตัวอย่างที่ 2 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec.....	97
5.17	ตัวอย่างที่ 3 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec.....	97
5.18	ตัวอย่างที่ 4 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec.....	98
5.19	ตัวอย่างที่ 5 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec.....	98
5.20	ตัวอย่างที่ 6 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec.....	99
5.21	ตัวอย่างที่ 7 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec.....	99
5.22	ตัวอย่างที่ 8 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec.....	100
ง.1	เครื่องกำเนิดสัญญาณ	123
ง.2	เครื่องกำเนิดและควบคุมสัญญาณมอดูเลต.....	124

รูปที่	ด หน้า
ง.3 เครื่องขยายกำลังต่ำ.....	125
(ก) ลักษณะวงจร	
(ข) วงจรที่บรรจุในกล่องแล้ว	
ง.4 เครื่องขยายกำลังสูง	126
(ก) ลักษณะวงจร	
(ข) วงจรที่บรรจุในกล่องแล้ว	
ง.5 เครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ	126
ง.6 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่.....	127
ง.7 ตำแหน่งการติดตั้งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับของระบบเรดาร์.....	128
ง.8 ชุดสายอากาศส่ง	128
ง.9 ชุดสายอากาศรับ	129
ง.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ	129

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

แนวเหตุผล

ปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดผลกระทบเป็นบริเวณกว้างนับร้อยตารางกิโลเมตร คือ พายุ พายุเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนเวียนของมวลอากาศที่มีอุณหภูมิ และความชื้นที่แตกต่างกัน ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากพายุจะแปรผันตามความรุนแรงของพายุ ประเทศไทยและอีกหลายประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนแถบละติจูดต่ำจะได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อน (tropical cyclone) ที่เคลื่อนตัวพาดผ่านประเทศเหล่านั้น ดังเช่นในอดีตเมื่อ พ.ศ. 2513 ที่ประเทศบังคลาเทศ ในครั้งนั้นพายุไซโคลนในมหาสมุทรอินเดียมีความรุนแรงมากเคลื่อนตัวพาดผ่านบริเวณแกงจีส์ และพราหมบุตรา (Ganges-Bramaputra) ซึ่งส่งผลกระทบต่อประชาชนกว่า 3 ล้านคน ในเนื้อที่กว่า 7,500 ตารางกิโลเมตร มีผู้เสียชีวิตประมาณ 250,000 คน [1] กรณีของประเทศไทย ผลกระทบอย่างรุนแรงจากพายุที่เคยเกิดขึ้นในอดีตได้แก่ พายุไซนร้อนแฮเรียต ที่เคลื่อนเข้าสู่แหลมตะลุมพุก จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อวันที่ 25-26 ตุลาคม พ.ศ. 2505 พายุไต้ฝุ่นเกย์ ที่เคลื่อนเข้าสู่จังหวัดชุมพร เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 และพายุไต้ฝุ่นลินดา ที่เคลื่อนเข้าสู่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540

แม้ว่าปัจจุบันการพยากรณ์อากาศสามารถคาดการณ์หรือทำนายพายุหมุนเขตร้อนที่จะเกิดขึ้นได้ แต่การพยากรณ์ที่ให้ผลถูกต้องสมบูรณ์โดยไม่มีความผิดพลาดนั้นเป็นสิ่งที่ไม่อาจกระทำได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจวัดลักษณะอากาศ เพื่อช่วยเสริมในการวิเคราะห์และพยากรณ์พายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้น เครื่องมือที่สำคัญในปัจจุบันที่ใช้ในการตรวจพายุหมุนเขตร้อนได้แก่ ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา และเรดาร์ตรวจสภาพอากาศ

ประเทศไทยไม่มีดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา แต่ได้นำเข้าเรดาร์ตรวจสภาพอากาศจากต่างประเทศมาติดตั้งและตรวจวัดสภาพอากาศที่เกิดขึ้นทั้งบริเวณภายในประเทศหรือบริเวณแถบประเทศเพื่อนบ้าน ด้วยงบประมาณที่มากกว่า 600 ล้านบาท โดยได้นำเข้าและเริ่มใช้ในราชการเมื่อ พ.ศ. 2519 จนถึงปัจจุบัน (พ.ศ. 2549) ประเทศไทยยังคงนำเข้าเรดาร์จากต่างประเทศ และมีสถานีเรดาร์ตรวจอากาศทั่วประเทศแล้วทั้งหมด 20 สถานี เรดาร์เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ตรวจ

ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นบางอย่างได้ เช่น ตรวจวัดฝน พายุฟ้าคะนอง ลูกเห็บ หิมะ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถตรวจและแสดงตำแหน่งศูนย์กลางของพายุหมุนเขตร้อนได้ เมื่อศูนย์กลางของพายุเคลื่อนเข้ามาในรัศมีห้วงผลของเรดาร์ เรดาร์ตรวจสภาพอากาศที่กรมอุตุนิยมวิทยาของไทยใช้งานในปัจจุบันนั้นแบ่งเป็น 3 ชนิด [2] คือ 1) ชนิด X-band (9345-9405 MHz) เหมาะสำหรับใช้ตรวจวัดฝนกำลังอ่อน-กำลังปานกลาง รัศมีรัศมีห้วงผล 60 กิโลเมตร 2) ชนิด C-band (5400-5900 MHz) เหมาะสำหรับใช้ตรวจวัดฝนกำลังปานกลาง-กำลังแรง หรือตรวจจับพายุหมุนที่มีกำลังไม่แรง เช่น พายุดีเปรสชัน รัศมีรัศมีห้วงผล 230 กิโลเมตร และ 3) ชนิด S-band (2700-2900 MHz) เหมาะสำหรับใช้ตรวจวัดฝนกำลังแรง-กำลังแรงมาก หรือใช้ตรวจจับพายุที่มีกำลังแรง เช่น พายุไต้ฝุ่น โดยมีรัศมีรัศมีห้วงผลประมาณ 230 กิโลเมตร จะเห็นว่าปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ทำให้เกิดความเสียหายมหาดศาล เช่น พายุหมุนเขตร้อน สามารถตรวจจับได้ด้วยระบบเรดาร์ แต่กรณีถ้าพายุเคลื่อนเข้ามาอยู่ห่างเกินกว่ารัศมีห้วงผลของเรดาร์ เช่น 500 กิโลเมตร เรดาร์ทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้อยู่ในประเทศไทยนั้นก็ไม่สามารถที่จะตรวจพายุนั้นได้ เพราะถูกจำกัดด้วยปัญหาเนื่องจากความโค้งของโลกและการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงของคลื่นวิทยุที่มีความถี่ปฏิบัติการในย่านไมโครเวฟ แต่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ถ้าระบบเรดาร์ที่ใช้ตรวจจับพายุมีความถี่ปฏิบัติการที่ต่ำ

งานวิจัยนี้จะตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุในระยะไกลโดยใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า (Over the Horizon Radar, (OTHR)) เนื่องด้วยเหตุผลที่ว่า พายุหมุนเขตร้อนเป็นระบบมวลอากาศที่มีสมบัติแตกต่างจากอากาศทั่วไป เพราะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศที่แตกต่างจากอากาศภายนอก และจากเหตุที่คลื่นวิทยุเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่แตกต่างกันจะทำให้มีสัญญาณบางส่วนกระเจิงกลับได้ ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้คลื่นวิทยุในการตรวจจับพายุหมุนเขตร้อนได้เช่นกัน แต่เนื่องจากปัญหาการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่การกระเจิงจากพายุเป็นปัญหาที่ซับซ้อน เนื่องจากระบบมวลอากาศเป็นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงส่งผลให้ลักษณะของพายุเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุจึงจำเป็นต้องมีแบบจำลองพายุที่เหมาะสมเพื่อทำนายลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอแบบจำลองพายุชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น เพื่อใช้ศึกษาลักษณะสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ ตามการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพายุ และเพื่อตรวจสอบผลวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น จึงได้จัดสร้างสถานีเรดาร์ขึ้นเพื่อทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุที่เกิดขึ้นจริง โดยการ

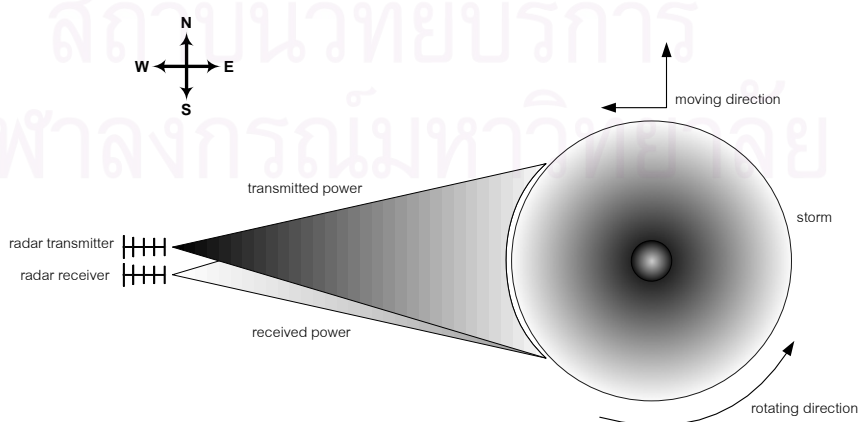
ทั้งหมดก็เพื่อพัฒนาแบบจำลองการกระเจิงคลื่นวิทยุจากพายุที่เหมาะสมสำหรับกรณีของพายุหมุนเขตร้อน

หลักการและทฤษฎี

การใช้ระบบเรดาร์ส่งและรับคลื่นวิทยุในการตรวจวัดพายุเนื่องด้วยเหตุผลที่ว่า เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่แตกต่างกันจะมีสัญญาณบางส่วนกระเจิงกลับมา สัญญาณที่กระเจิงกลับมานั้นสามารถจะนำมาวิเคราะห์ได้ว่าตัวกลางที่ทำให้สัญญาณกระเจิงนั้นมีสมบัติอย่างไร เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางผ่านพายุซึ่งเป็นตัวกลางหนึ่งที่แตกต่างจากอากาศก็จะทำให้มีสัญญาณบางส่วนกระเจิงกลับมาได้เช่นกัน

พายุหมุนเขตร้อน (tropical cyclone) ซึ่งเป็นคำทั่วๆ ไปที่เรียกพายุหมุนที่มีถิ่นกำเนิดเหนือมหาสมุทรในเขตร้อนแถบละติจูดต่ำหรือบริเวณระหว่างละติจูด 23.5 องศาเหนือ และ 23.5 องศาใต้ กรณีประเทศไทย มีผลกระทบเนื่องจากพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศส่วนใหญ่จากทางด้านตะวันออกของประเทศ โดยมีแหล่งกำเนิดในมหาสมุทรแปซิฟิกและทะเลจีนใต้ ส่วนพายุหมุนเขตร้อนที่มีแหล่งกำเนิดในอ่าวเบงกอล หรือทะเลอันดามันจะเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยทางด้านตะวันตก แต่จะมีเพียงส่วนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับด้านตะวันออกของประเทศ

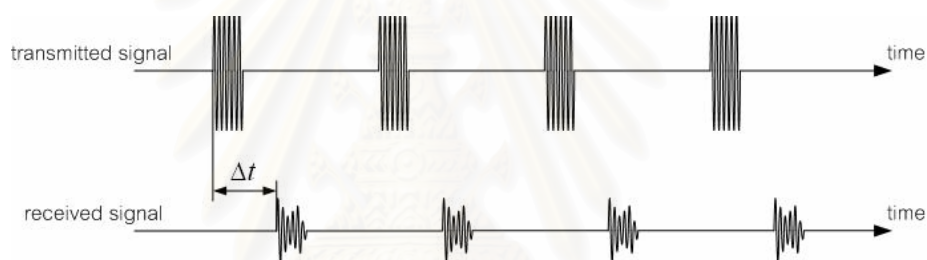
เนื่องจากพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยส่วนใหญ่มาจากด้านตะวันออกของประเทศ ดังนั้นการจะตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุด้วยระบบเรดาร์ จึงต้องจัดตำแหน่งให้เครื่องส่งและเครื่องรับเรดาร์อยู่ในแนวที่พายุเคลื่อนตัว ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แนวการเคลื่อนที่ของพายุ และตำแหน่งของเครื่องรับ-ส่งเรดาร์

เรดาร์เป็นเครื่องประมวลผลทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการตรวจหา และชี้ตำแหน่งของวัตถุ โดยหลักการทำงานคือ เครื่องส่งเรดาร์จะส่งสัญญาณคลื่นวิทยุผ่านทางสายอากาศส่ง เมื่อสัญญาณที่ส่งออกไปกระทบกับเป้าก็จะมีสัญญาณบางส่วนกระเจิงกลับมาสู่เครื่องรับเรดาร์โดยผ่านทางสายอากาศรับ จากนั้นประมวลผลสัญญาณที่รับได้ และแสดงผลออกมา ตามลำดับงานวิจัยนี้ใช้หลักการของระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าในการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ โดยรูปคลื่นสัญญาณที่จะใช้กับระบบเรดาร์มีลักษณะเป็นขบวนพัลส์สี่เหลี่ยม ที่มีความกว้างพัลส์แคบๆ แล้วยก (modulate) กับสัญญาณคลื่นพาห้ (carrier signal) ที่ความถี่ 21 MHz เรดาร์ที่ส่งคลื่นสัญญาณวิทยุที่มีรูปคลื่นดังที่กล่าวนี้ เรียกว่า พัลส์เรดาร์ (pulse radar)

หลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณวิทยุที่กระเจิงจากพายุเมื่อถูกส่งออกจากเครื่องส่งพัลส์เรดาร์สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 รูปแบบของสัญญาณส่งและสัญญาณรับ จากระบบพัลส์เรดาร์

รูปที่ 1.2 เป็นแนวทางพื้นฐานในการวิเคราะห์หาระยะระหว่างเป้า (ในที่นี้หมายถึงพายุ) กับเรดาร์ โดยการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเวลาของสัญญาณส่งกับสัญญาณที่รับได้จากระบบพัลส์เรดาร์ จากนั้นนำผลความแตกต่างของเวลาระหว่างสัญญาณทั้งสองมาคำนวณหา ระยะ นอกจากนี้ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณรับที่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ได้ว่าเป้าหมายมีสัมประสิทธิ์การสะท้อน หรือความหนาแน่น เป็นอย่างไร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะสมบัติการกระเจิงคลื่นวิทยุของพายุ
2. พัฒนาแบบจำลองของพายุ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี และหลักการเกี่ยวกับการทำงานของระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า
2. ศึกษาเกี่ยวกับพายุ อันได้แก่ ลักษณะของพายุ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ เป็นต้น รวมถึงช่วงเวลาและสถิติที่พายุเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย
3. สร้างระบบวิเคราะห์สัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุเพื่อใช้ในการตรวจวัด
4. พัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับระบบเรดาร์ที่จะใช้ในงานวิจัย
2. ศึกษาเกี่ยวกับพายุ อันได้แก่ ลักษณะของพายุ แบบจำลองของพายุ รวมถึงช่วงเวลาที่พายุเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย
3. ออกแบบ จัดสร้างอุปกรณ์ พร้อมทั้งทดสอบและพัฒนาเพื่อที่จะใช้ในงานวิจัย
4. พัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองโดยอาศัยทฤษฎีและข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
5. วิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่วัดได้กับผลจากแบบจำลอง
6. สรุปงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองพายุที่เป็นประโยชน์ทั้งในเชิงอุตุนิยมวิทยา และการพัฒนาเรดาร์
2. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้ระบบเรดาร์
3. แนวทางในการพัฒนากระบวนการหรือวิธีการใหม่ๆ ในการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากวัตถุใดๆ

บทที่ 2

หลักการเบื้องต้นของการใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าตรวจวัด คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุเขตร้อน

ความนำ

การตรวจจับหรือตรวจหาเป้าใดๆ ด้วยคลื่นวิทยุนั้นสามารถทำได้โดยใช้ระบบเรดาร์ ระบบไมโครเวฟเรดาร์ทั่วๆ ไปที่ใช้ความถี่ปฏิบัติการ 200-40000 MHz [4] จะมีข้อจำกัดคือ สามารถตรวจจับเป้าได้เพียงระยะในแนวเส้นตรง หรือประมาณ 20 ไมล์ทะเล [5] เท่านั้น ถ้าเป้าและเรดาร์อยู่บนพื้นโลก เพราะถูกจำกัดด้วยความโค้งของโลก ดังนั้นการตรวจจับเป้าซึ่งในที่นี้หมายถึง พายุ จะไม่มีประโยชน์ ถ้าสามารถตรวจจับในระยะทางเพียงใกล้ๆ เท่านั้น เพราะไม่สามารถแจ้งเตือนให้ประชาชนทราบและเตรียมพร้อมกับผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที ดังนั้นการตรวจจับพายุที่เกิดขึ้นในระยะไกลๆ สามารถทำได้โดยใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า เรดาร์ชนิดนี้ใช้ความถี่ปฏิบัติการในแถบความถี่สูง (HF band) ซึ่งมีความถี่ในช่วง 3-30 MHz ซึ่งสามารถลดข้อจำกัดเนื่องจากความโค้งของโลกได้ ระบบเรดาร์ชนิดนี้ใช้ประโยชน์จากชั้นบรรยากาศในการหักเหสัญญาณคลื่นวิทยุ จึงสามารถตรวจจับเป้าที่อยู่ในระยะไกลๆ นับพันกิโลเมตรได้

การหักเหของคลื่นวิทยุที่ส่งจากเครื่องส่งเรดาร์ไปยังพายุ และมีสัญญาณบางส่วนกระเจิงกลับจากพายุมายังเครื่องรับเรดาร์ในชั้นบรรยากาศนั้น จะไม่สามารถเกิดได้ตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากชั้นบรรยากาศที่สามารถทำให้คลื่นวิทยุเกิดการหักเหได้นั้น จะต้องเป็นชั้นบรรยากาศที่มีปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากพอที่จะทำให้คลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการค่าหนึ่งๆ นั้นเกิดการหักเหได้ นอกจากชั้นบรรยากาศจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าตรวจจับพายุได้ ตัวของเป้าหรือพายุก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งเช่นกันที่ทำให้เกิดการกระเจิงกลับของสัญญาณคลื่นวิทยุมายังเครื่องรับเรดาร์ ตัวพายุจริงๆ แล้วคือมวลอากาศ ถ้าเมื่อใดมวลอากาศของพายุเหมือนกับมวลอากาศบริเวณรอบนอก (อากาศภายนอกพายุ) ก็จะไม่สามารถทำให้คลื่นวิทยุที่กระทบนั้นกระเจิงกลับมายังเครื่องรับเรดาร์ได้ ดังนั้นตัวของพายุจะต้องมีมวลอากาศที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกับมวลอากาศบริเวณรอบนอก จึงสามารถทำให้มีสัญญาณกระเจิงกลับมายังรายละเอียดยกเกี่ยวกับเรื่องนี้รวมถึงการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าเพื่อตรวจจับพายุจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อๆ ดังนี้

เนื้อหาในบทนี้จะแยกกล่าวออกเป็น 3 หัวข้อ โดยหัวข้อแรกจะกล่าวถึง การหักเห สัญญาณคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศ มีเนื้อหาที่จะกล่าวถึงได้แก่ ชั้นต่างๆ ของบรรยากาศ, ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และการหักเหของคลื่นวิทยุเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึง พายุหมุนเขตร้อน มีเนื้อหาที่จะกล่าวถึงได้แก่ บริเวณต่างๆ ของโลกที่มีการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน, เกณฑ์ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อน, ลำดับชั้นการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน และโครงสร้างการก่อตัวของพายุไต้ฝุ่น และหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึง ระบบเรดาร์ มีเนื้อหาได้แก่ ระบบพัลส์เรดาร์ และหลักการของระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า รายละเอียดในแต่ละเรื่องซึ่งแยกเป็นหัวข้อตามที่แสดงไว้ข้างต้น มีดังนี้

2.1 การหักเหสัญญาณคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศ

2.1.1 ชั้นต่างๆ ของบรรยากาศ

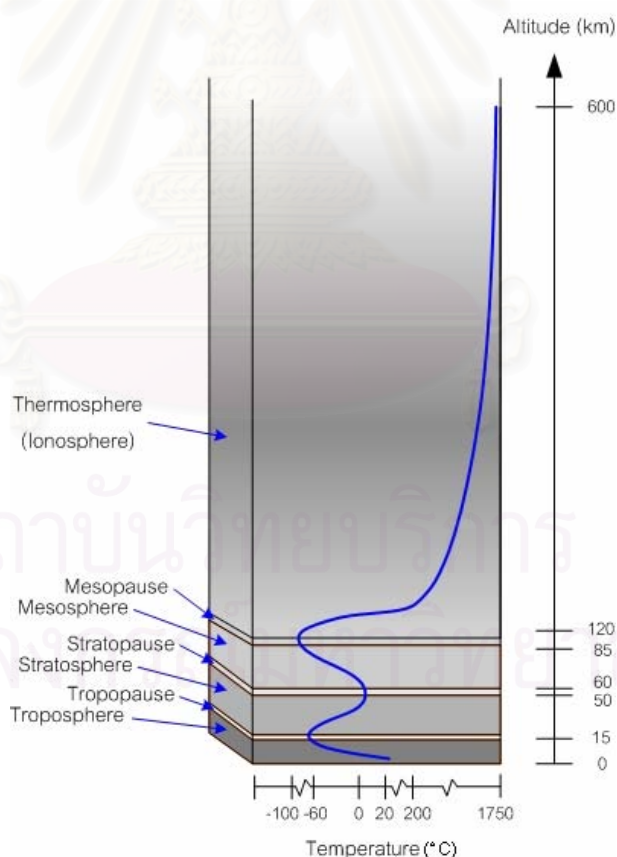
ชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกแบ่งออกได้เป็น 4 ชั้น ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.1 อันได้แก่ ชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) ชั้นสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) ชั้นเมโซสเฟียร์ (Mesosphere) และชั้นเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) สำหรับรายละเอียดของบรรยากาศในแต่ละชั้นกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

1. บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ เป็นบรรยากาศชั้นล่างสุดที่อยู่สูงจากพื้นโลกขึ้นไป มีระยะความสูงประมาณ 10-12 กิโลเมตร ประกอบด้วยส่วนผสมของก๊าซชนิดต่าง ๆ และไอน้ำ อุณหภูมิของอากาศจะลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น จนถึงระดับที่เรียกว่า โทรโปพอส (Tropopause) ซึ่งเป็นระดับสูงสุดของบรรยากาศชั้นนี้ บรรยากาศชั้นนี้มีการเคลื่อนไหวของอากาศทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ ทางอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ ในบรรยากาศชั้นนี้มากมาย เช่น การก่อตัวของเมฆ ฝน พายุ เป็นต้น

2. บรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ เป็นบรรยากาศที่อยู่สูงถัดจากชั้นโทรโพสเฟียร์ขึ้นไป มีแนวกันระหว่างชั้นที่เรียกว่า โทรโปพอส บรรยากาศชั้นนี้จะมีก๊าซโอโซนและด้วยคุณสมบัติในการดูดแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงเหนือม่วง (Ultraviolet (UV)) จึงทำให้อุณหภูมิของอากาศในชั้นนี้เพิ่มขึ้นตามความสูง โดยชั้นสูงสุดของบรรยากาศชั้นนี้เรียกว่า สตราโทพอส (Stratopause) ซึ่งอยู่สูงจากพื้นดินประมาณ 50-55 กิโลเมตร

3. บรรยากาศชั้นเมโซสเฟียร์ เป็นบรรยากาศที่อยู่สูงขึ้นไปต่อจากชั้นสตราโทสเฟียร์ มีเขตกั้นระหว่างชั้นบรรยากาศทั้งสองที่เรียกว่า สตราโทพอส บรรยากาศชั้นนี้อยู่สูงขึ้นไปจนถึงระดับความสูงประมาณ 85 กิโลเมตร จากพื้นดิน และอุณหภูมิของอากาศจะลดลงอย่างรวดเร็วทันทีที่ผ่านพ้นเขตสตราโทพอสขึ้นไป สำหรับชั้นสูงสุดของบรรยากาศชั้นนี้เรียกว่า เมโซพอส (Mesopause) ซึ่งเป็นเขตกั้นระหว่างบรรยากาศชั้นเมโซสเฟียร์กับชั้นเทอร์มอสเฟียร์

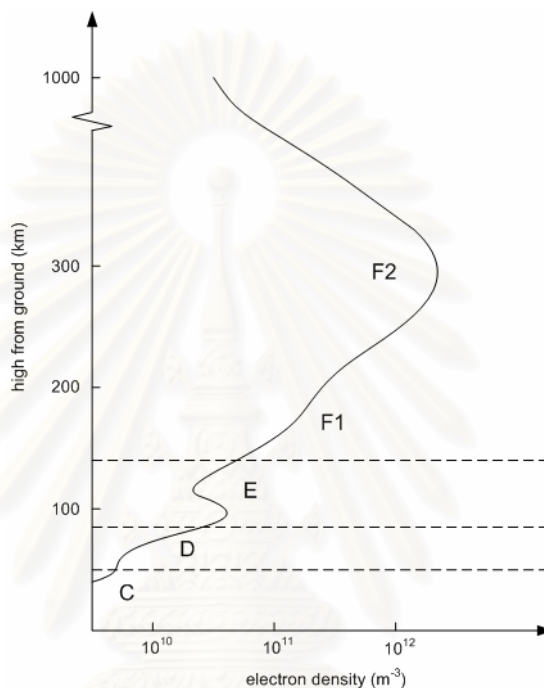
4. บรรยากาศชั้นเทอร์มอสเฟียร์ เป็นบรรยากาศชั้นนอกสุดที่ห่อหุ้มโลก ซึ่งลักษณะเด่นของบรรยากาศในชั้นนี้คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความสูงอย่างไม่มีการสิ้นสุด โดยบรรยากาศในชั้นนี้จะมีการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ มากที่สุด มีประจุไฟฟ้าอิสระอยู่มาก จึงเรียกบรรยากาศชั้นนี้อีกอย่างหนึ่งว่า บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ซึ่งหมายถึง การมีประจุไฟฟ้าอิสระอยู่มาก โดยบรรยากาศชั้นนี้สามารถสะท้อนวิทยุคลื่นสั้นได้ จึงเป็นชั้นบรรยากาศที่ใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคม



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศแต่ละชั้น

2.1.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศชั้นที่สำคัญที่เป็นปัจจัยในการส่งคลื่นวิทยุของระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า เพื่อตรวจจับเป้าในระยะไกลๆ คือ บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ รายละเอียดเกี่ยวกับบรรยากาศในชั้นนี้ มีดังนี้

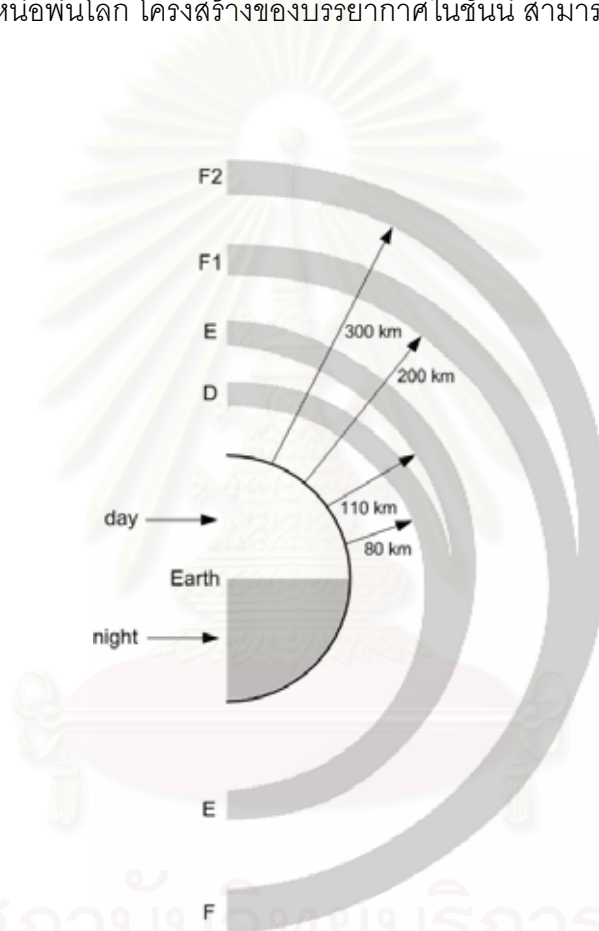


รูปที่ 2.2 การแจกแจงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์เริ่มมีความสำคัญเมื่อมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์ได้เมื่อปี ค.ศ. 1901 โดย Marconi ประสบความสำเร็จในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก โดยที่ก่อนหน้านี้การส่งสัญญาณวิทยุส่งได้ประมาณ 200-300 กิโลเมตร เท่านั้น ซึ่งการศึกษาต่อมาได้อธิบายโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบน (diffraction) ของคลื่นดิน (ground wave) ภายหลังพบว่าทฤษฎีการเลี้ยวเบนของ Marconi นั้นไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นดินเพียงอย่างเดียว จึงสรุปว่าต้องมีการเดินทางของคลื่นในลักษณะอื่นนอกจากการเลี้ยวเบนของคลื่น ในปี ค.ศ. 1902 Heaviside ได้เสนอแนวความคิดที่ว่า การที่คลื่นวิทยุสามารถเดินทางได้ไกลมากนั้นน่าจะมีการสะท้อนจากชั้นบรรยากาศ การที่คลื่นเดินทางได้ไกลนั้นคลื่นสัญญาณวิทยุจะมีการสะท้อนไปมาระหว่างชั้นบรรยากาศกับพื้นดินหลายครั้ง ในปี ค.ศ. 1925 Appleton และ Barnett ใช้เครื่องส่งวิทยุของ BBC ในการทดลอง ซึ่งมีการพบชั้นย่อยต่างๆ ของชั้นบรรยากาศซึ่ง

ให้ชื่อเรียกว่า ชั้น E และชั้น F มาจากคำว่า Electric และ Field หลังจากนั้นได้มีการค้นพบชั้นย่อยที่ต่ำกว่าชั้น E และ F อีกสองชั้น จึงตั้งชื่อตามตัวอักษรว่า ชั้น D และชั้น C สำหรับช่วงแรกมีการใช้ชื่อชั้นบรรยากาศนี้หลายชื่อ เช่น Heaviside layer หรือ Appleton layer จึงทำให้ Plendl ได้เสนอชื่อชั้นบรรยากาศนี้ว่า Ionosphere

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่มีการไอออไนซ์ของก๊าซ มีขอบเขตประมาณ 50-2000 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก โครงสร้างของบรรยากาศในชั้นนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ชั้นย่อยต่างๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

พิจารณารูปที่ 2.2 และ 2.3 พบว่าลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถแบ่งเป็นชั้นย่อยๆ ได้ ดังนี้

1. ชั้น F (140 กิโลเมตร ขึ้นไปจากพื้นดิน) ประกอบด้วยสองชั้นย่อย คือ ชั้น F1 และชั้น F2 ซึ่งเกิดจากแสงอาทิตย์ย่าน Extream Ultra Violet (EUV) โดยทั้งสองชั้นย่อยนี้จะเกิดในเวลากลางวัน ส่วนกลางคืนชั้นทั้งสองจะรวมเป็นชั้นเดียวคือ ชั้น F

2. ชั้น E (90–140 กิโลเมตร) ประกอบด้วยชั้น E ธรรมดา และชั้น Sporadic E (Es) ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว โดยเกิดจากแสงอาทิตย์ย่าน Soft X-Rays
3. ชั้น D (60–90 กิโลเมตร) เกิดจากแสงอาทิตย์ย่าน Ly α , Hard X-Rays
4. ชั้น C (50–60 กิโลเมตร) เกิดจากแสงอาทิตย์ย่าน Cosmic Rays

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เกิดจากการแตกตัวของก๊าซอันเนื่องมาจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นเมื่อมีแสงอัลตราไวโอเล็ตมาก (ความสูงจากพื้นดินมากปริมาณแสงอัลตราไวโอเล็ตก็จะมาก) และมีโมเลกุลของก๊าซมาก (คือที่ที่มีความกดอากาศสูงซึ่งความสูงจากพื้นดินมีค่าน้อย) แสดงว่าที่ความสูงจากพื้นดินจุดหนึ่งจะมีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระที่แตกตัวเกิดขึ้นมาก ซึ่งก็คือความสูงที่ตรงกับชั้น E นั่นเอง แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเมื่อชนกับไอออนบวกซึ่งเกิดจากอะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวขึ้นใหม่ (Recombination process) ในชั้น E ได้ง่ายกว่าชั้น F ซึ่งมีความสูงจากพื้นดินมากกว่าทำให้เกิดความกดอากาศน้อยกว่า เนื่องจากชั้น F มีการรวมตัวกันใหม่ได้ยากกว่าจึงเป็นสาเหตุที่ชั้น F มีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระมากกว่าชั้น E ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในชั้น F มากกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในชั้น E นั่นเอง

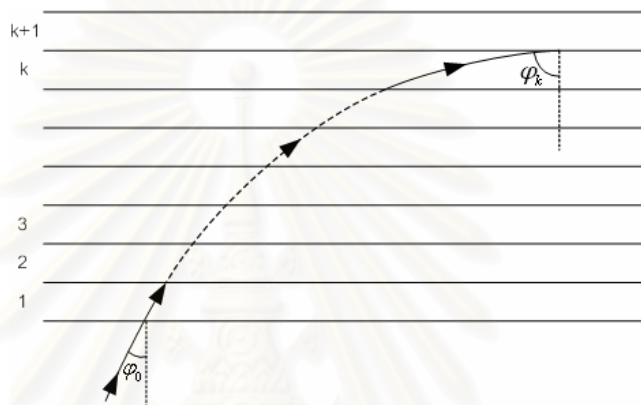
2.1.3 การหักเหของคลื่นวิทยุเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนไม่เป็นเอกพันธ์ (inhomogeneous) เกิดจากการแตกตัวของก๊าซอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ โดยที่ระดับความสูงหรือตำแหน่ง และเวลาที่แตกต่างกัน จะมีปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนแตกต่างกัน ดังนั้นการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในตัวกลางที่ไม่เป็นเอกพันธ์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะไม่เป็นเส้นตรง แต่จะเป็นเส้นโค้งตามกฎการหักเหของสเนลล์ (Snell's law) เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นเส้นโค้งดังนั้นการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุจากพื้นโลกสู่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะทำให้เกิดการหักเหของสัญญาณที่ส่งกลับลงมาสู่พื้นโลกได้

ความไม่เป็นเอกพันธ์ของตัวกลางในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่ต่อเนื่องคงที่ ทำให้มีดัชนีหักเห (refractive index) ของตัวกลางในบรรยากาศชั้นนี้แตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงหรือตำแหน่ง เวลา และความถี่ [6] ดังสมการ (2.1)

$$n = \sqrt{1 - \frac{80.8N}{f^2}} \quad (2.1)$$

โดยที่ n คือ ดัชนีหักเหในแต่ละระดับชั้นความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
 N คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นความสูง (electrons/m³)
 f คือ ความถี่ปฏิบัติการ (Hz)



รูปที่ 2.4 การหักเหของสัญญาณคลื่นวิทยุจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

พิจารณารูปที่ 2.4 ประกอบ สัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งจากพื้นโลกสู่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วหักเหกลับลงมาสู่พื้นโลกได้นั้น บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ต้องมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นความสูงเป็นไปดังสมการ (2.2)

$$0 < N_1 < N_2 < \dots < N_k < N_{k+1} \quad (2.2)$$

โดยที่ ดัชนี “ k ” แสดงถึงลำดับชั้นของตัวกลางที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแตกต่างกัน

เนื่องจากอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดจากการแตกตัวของก๊าซอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ ดังนั้นปริมาณอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นความสูงจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ ซึ่งปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ในแต่ละบริเวณจะเปลี่ยนแปลงตามการหมุนรอบตัวเองของโลก และการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบวัน และฤดูกาล โดยปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้น F2 อาจสูงถึงประมาณ $2 \sim 5 \times 10^{12}$

electrons/m³ [7] ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเฉลี่ย สามารถพิจารณาได้ดังสมการ (2.3) [6]

$$N_0(\chi, z) = \begin{cases} 0 & ; z \leq z_{m_1}(\chi) - b_1 \\ N_{m_1} \left[1 - \left\{ \frac{z - z_{m_1}(\chi)}{b_1} \right\}^2 \right] & ; z_{m_1}(\chi) - b_1 \leq z \leq z_{m_1}(\chi) + b_1 \\ N_{m_2} \left[1 - \left\{ \frac{z - z_{m_2}(\chi)}{b_2} \right\}^2 \right] & ; z_{m_1}(\chi) + b_1 \leq z \leq z_{m_1}(\chi) + b_2 \end{cases} \quad (2.3)$$

กำหนดให้

$$N_{m_i}(\chi) = N_{m_i}(0) \sqrt{\cos \chi} \quad (2.4)$$

$$z_{m_i}(\chi) = z_{m_i}(0) + H \ln \sec \chi \quad (2.5)$$

$$h_o = z_{m_1}(\chi) - b_1 \quad (2.6)$$

โดยที่ $N_0(\chi, z)$ คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนซึ่งแปรค่าตาม χ และ z

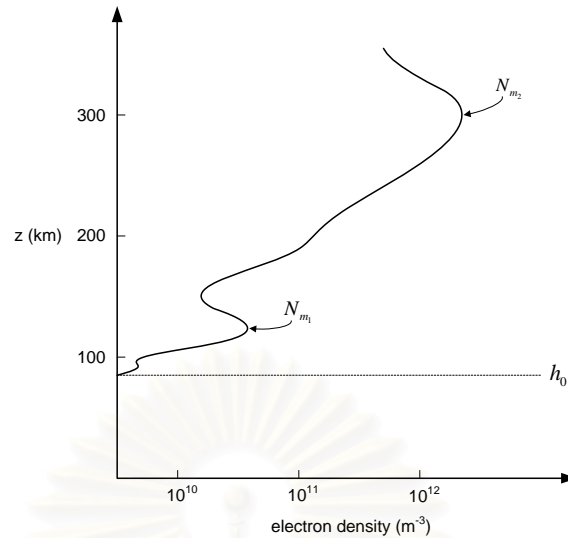
χ คือ มุมเซนนิทสุริยะ (solar zenith angle)

z คือ ความสูงจากพื้นโลก

H คือ ตัวประกอบมาตราส่วน (scale factor) ซึ่งกำหนดเท่ากับ 50 กิโลเมตร

h_o คือ ความสูงของฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

N_{m_i} และ z_{m_i} คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด และความสูงจากพื้นโลกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ตามลำดับ ซึ่งแปรค่าตาม χ โดยที่ดัชนี “ i ” แสดงถึงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

มุมเซนิทดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งใดๆ สมการ (2.3) คือ มุมที่ตัดกันระหว่างเส้นตรงที่ลากผ่านตำแหน่งดังกล่าวและตั้งฉากกับพื้นโลก กับเส้นตรงที่ลากผ่านตำแหน่งนั้นไปยังดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเขียนนิพจน์คณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [8]

$$\cos \chi = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\xi) \quad (2.7)$$

โดยที่ ϕ คือ มุมละติจูดทางภูมิศาสตร์

δ คือ มุมบ่ายเบนสุริยะ (solar declination)

ξ คือ มุมชั่วโมงท้องถิ่น (local hour angle) ของดวงอาทิตย์ ซึ่งวัดไปทางทิศตะวันตกจากเที่ยงวัน โดยกำหนดเที่ยงวัน ξ เท่ากับ 0 องศา

มุมบ่ายเบนสุริยะ (δ) เป็นมุมละติจูดบนพื้นโลกที่ดวงอาทิตย์อยู่ในแนวตั้งฉากในเวลาเที่ยงสุริยะ (solar noon) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\delta = 23.44 \sin[0.9856(Y - 80.7)] \quad (2.8)$$

โดยที่ Y คือค่าเลขประจำวันใน 1 ปีซึ่งเริ่มต้นนับตั้งแต่วันที่ 1 เดือนมกราคม

พิจารณาสมการ (2.1) และสมการ (2.2) สัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งจากพื้นโลกสู่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วหักเหกลับลงมาสู่พื้นโลกได้นั้น จะต้องมีความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหในแต่ละระดับชั้นความสูง ตามสมการ (2.9)

$$1 > n_1 > n_2 > \dots > n_k > n_{k+1} \quad (2.9)$$

ทิศทางการหักเหของสัญญาณคลื่นวิทยุในแต่ละระดับชั้นความสูงตามกฎการหักเหของสเนลล์ ดังรูปที่ 2.4 แสดงได้ดังสมการ (2.10)

$$1 \sin \varphi_0 = n_1 \sin \varphi_1 = \dots = n_k \sin \varphi_k \quad (2.10)$$

นอกจากเงื่อนไขในสมการ (2.2) และ (2.9) สัญญาณคลื่นวิทยุที่หักเหกลับลงมาสู่พื้นโลกได้นั้น จะต้องมีความโค้งที่จุดยอดของวิถีการเคลื่อนที่ของสัญญาณน้อยกว่าผลรวมของรัศมีของโลกกับระยะความสูงของจุดวกกลับ (turning point) หรือ $R < (a + h)$ ซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ 2.14 นอกจากเงื่อนไขตามที่กล่าวแล้วข้างต้น สัญญาณคลื่นวิทยุที่หักเหกลับลงมาสู่พื้นโลกได้นั้น จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามความสูงในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นดังสมการ (2.11) [9]

$$\frac{dN}{dh} > \frac{2n^2 f^2}{80.8(a + h)} \quad (2.11)$$

โดยที่ $\frac{dN}{dh}$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามความสูง (electrons/m⁴)

n คือ ดัชนีหักเห

f คือ ความถี่ปฏิบัติการ (Hz)

a คือ รัศมีของโลกซึ่งประมาณเท่ากับ 6.37×10^6 เมตร

h คือ ระยะความสูงของจุดวกกลับ (m)

2.2 พายุหมุนเขตร้อน

การศึกษาการกระเจิงสัญญาณคลื่นวิทยุจากพายุนั้น นอกจากจะศึกษาช่องสัญญาณที่คลื่นวิทยุเดินทางแล้ว สิ่งจำเป็นที่สุดที่เป็นตัวการหลักที่ทำให้เกิดการกระเจิงกลับได้ของสัญญาณคลื่นวิทยุ นั้น คือ ตัวของพายุ ดังนั้นการศึกษาพายุซึ่งรวมถึง การเกิดพายุ และโครงสร้างของพายุ จึงเป็นส่วนสำคัญที่เป็นจุดเริ่มต้นในการหาข้อสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองของพายุ สำหรับเนื้อหาที่เกี่ยวกับพายุ นั้น มีดังนี้

พายุหมุน (Cyclonic Storm) เป็นพายุที่มีขนาดใหญ่ เริ่มก่อตัวและมีกำลังแรงขึ้นจากบริเวณศูนย์กลางความกดอากาศต่ำและพัดเวียนเข้าสู่ศูนย์กลาง โดยการแบ่งประเภทของพายุหมุนตามลักษณะและแหล่งกำเนิด สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท [10] คือ

1. พายุหมุนเขตร้อน (Tropical Cyclone) เป็นพายุที่มีแหล่งกำเนิดบริเวณมหาสมุทรหรือทะเลในเขตละติจูดต่ำ
2. พายุหมุนนอกเขตร้อน (Extratropical Cyclone) เป็นพายุที่มีแหล่งกำเนิดบริเวณละติจูดที่สูงกว่าแหล่งกำเนิดของพายุหมุนเขตร้อน
3. พายุหมุนทอร์นาโด (Tornado) เป็นพายุหมุนที่มีขนาดเล็กที่สุด แต่มีความรุนแรงมาก ซึ่งลมพัดรอบศูนย์กลางอาจมีความเร็วถึง 800 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ลักษณะเด่นชัดของพายุชนิดนี้ คือ เป็นพายุที่ก่อตัวจากก้อนเมฆ และย้อยลงมาบนผืนดินในลักษณะเป็นกรวยเกลียว ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50-500 เมตร พายุประเภทนี้ถ้าเกิดบริเวณเหนือพื้นน้ำเรียกว่า น้ำค่น้ำ (watersprout)

2.2.1 บริเวณต่างๆ ของโลกที่มีการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน

บริเวณต่างๆ ของโลกมีโอกาสที่จะเกิดการก่อตัวของพายุได้แตกต่างกันออกไป บางบริเวณมีโอกาสที่จะเกิดได้สูง แต่บางบริเวณไม่มีโอกาสที่จะเกิดได้ เนื่องจากบริเวณที่มีโอกาสจะเกิดพายุได้นั้น จำเป็นต้องมีเงื่อนไขบางอย่างที่ทำให้พายุก่อตัวขึ้นได้ ซึ่งเงื่อนไขที่ทำให้พายุก่อตัวได้นั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป สำหรับพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณต่างๆ ของโลก สามารถแบ่งได้เป็น 7 บริเวณ [11] คือ

1. Atlantic basin คือ บริเวณมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือ อ่าวเม็กซิโก และทะเลแคริบเบียน บริเวณนี้จะมีการก่อตัวของพายุในช่วงต้นเดือนมิถุนายนถึงปลายเดือนพฤศจิกายน

แต่อาจจะมีบ้างในคาบเวลา 2-3 ปี ที่มีพายุก่อตัวในช่วงเดือนพฤษภาคมหรือเดือนธันวาคม ช่วงเวลาที่มีความถี่การก่อตัวของพายุได้สูงนั้นคือ ช่วงก่อนเดือนถึงกลางเดือนกันยายน

2. Northeast Pacific basin คือ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือฝั่งตะวันออก หรือ บริเวณจากเส้นลองจิจูด 180 องศา ถึงชายฝั่งตะวันตกของประเทศเม็กซิโก บริเวณนี้พายุเริ่มก่อตัว ตั้งแต่ปลายเดือนพฤษภาคมหรือต้นเดือนมิถุนายน ถึงปลายเดือนตุลาคมหรือต้นเดือนพฤศจิกายน

3. Northwest Pacific basin คือ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือฝั่งตะวันตก หรือช่วง บริเวณจากเส้นลองจิจูด 180 องศา ถึงชายฝั่งตะวันออกของทวีปเอเชียและรวมถึงบริเวณทะเลจีนใต้ ณ บริเวณนี้ช่วงเวลาของการเกิดพายุค่อนข้างแน่นอน คือ ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนมีนาคมจะมีการก่อตัวของพายุไม่มากนัก แต่จะเริ่มมากขึ้นในระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงเดือนพฤศจิกายน และช่วงเวลาที่มียโอกาสการก่อตัวของพายุได้สูงคือ ช่วงปลายเดือนสิงหาคมถึงต้นเดือนกันยายน

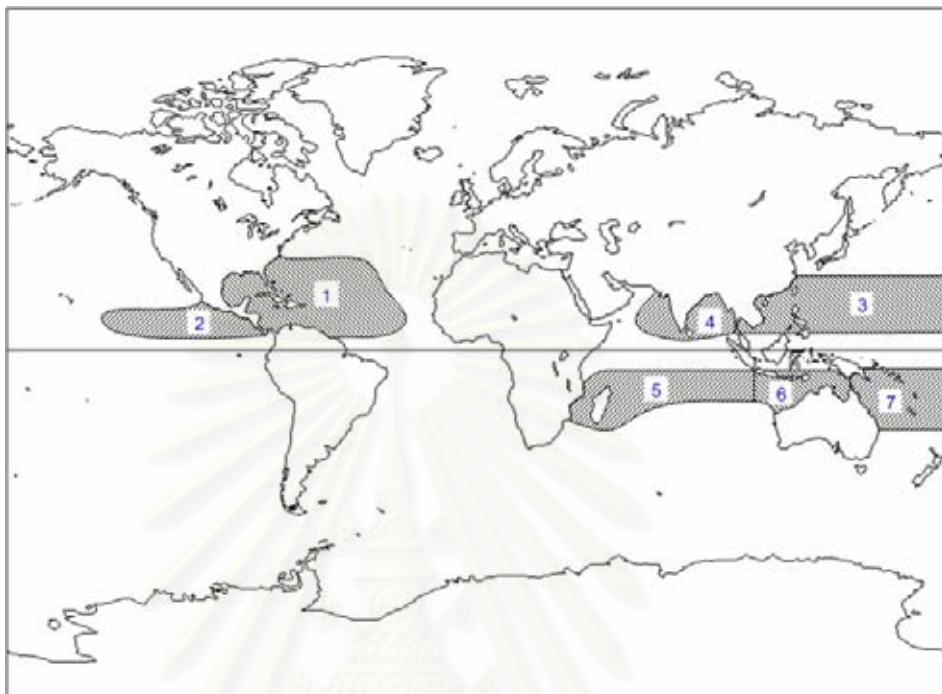
4. North Indian basin คือ บริเวณมหาสมุทรอินเดียเหนือ อ่าวเบงกอล และทะเลอาราเบียน สำหรับบริเวณนี้มีโอกาสที่จะเกิดพายุได้ตั้งแต่เดือนเมษายนถึงเดือนธันวาคม แต่ในช่วงระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน และช่วงระหว่างปลายเดือนกันยายนถึงปลายเดือนธันวาคม จะมีโอกาสที่จะเกิดพายุอย่างรุนแรง

5. Southwest Indian basin คือ บริเวณมหาสมุทรอินเดียใต้ฝั่งตะวันตก จากลองจิจูดประมาณ 100 องศาตะวันออก ถึงชายฝั่งของทวีปแอฟริกา สำหรับบริเวณนี้เริ่มเกิดพายุตั้งแต่ปลายเดือนตุลาคมหรือต้นเดือนพฤศจิกายน และสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม ส่วนช่วงเวลาที่มียโอกาสจะเกิดพายุได้สูงนั้นคือ ช่วงกลางเดือนมกราคม และในช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงต้นเดือนมีนาคม

6. Southeast Indian/Australian basin คือ บริเวณมหาสมุทรอินเดียใต้ฝั่งตะวันออก และบริเวณชายฝั่งของทวีปออสเตรเลีย หรือบริเวณเส้นลองจิจูดประมาณ 100 องศาตะวันออก ถึงลองจิจูดประมาณ 142 องศาตะวันออก สำหรับบริเวณนี้ช่วงเวลาของการเกิดพายุจะไม่ต่างกับบริเวณ Southwest Indian basin

7. Australian/Southwest Pacific basin คือ บริเวณชายฝั่งของทวีปออสเตรเลีย และบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกใต้ฝั่งตะวันตก หรือบริเวณลองจิจูดประมาณ 142 องศาตะวันออก ถึงลองจิจูดประมาณ 120 องศาตะวันตก บริเวณนี้เริ่มมีการก่อตัวของพายุตั้งแต่ปลายเดือนตุลาคมหรือต้นเดือนพฤศจิกายน มีโอกาสที่จะเกิดพายุมากในปลายเดือนกุมภาพันธ์หรือต้นเดือนมีนาคม และจะสิ้นสุดในช่วงต้นเดือนพฤษภาคม

บริเวณต่างๆ ของโลกทั้ง 7 บริเวณที่มีการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 บริเวณต่างๆ ของโลกทั้ง 7 บริเวณที่มีการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน

2.2.2 เกณฑ์ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อน

พายุหมุนเขตร้อนเป็นพายุที่มีถิ่นกำเนิดเหนือมหาสมุทรในเขตร้อนแถบละติจูดต่ำหรือบริเวณระหว่างละติจูด 23.5 องศาเหนือ และ 23.5 องศาใต้ แต่อยู่นอกเขตบริเวณเส้นศูนย์สูตร เพราะยังไม่เคยปรากฏว่ามีพายุหมุนเขตร้อนเกิดที่เส้นศูนย์สูตร พายุนี้เกิดขึ้นในมหาสมุทรหรือทะเลที่มีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 26 องศาเซลเซียส หรือ 27 องศาเซลเซียสขึ้นไป [1] และมีปริมาณไอน้ำสูง เมื่อเกิดขึ้นแล้วมักเคลื่อนตัวตามกระแสลมส่วนใหญ่จากทิศตะวันออกมาทางทิศตะวันตก และโค้งขึ้นไปทางละติจูดสูงแล้วเวียนโค้งกลับไปทางทิศตะวันออกอีก ระบบการหมุนเวียนของลมในซีกโลกเหนือเป็นไปโดยพัดเวียนเป็นวงในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเข้าสู่ศูนย์กลางของพายุ ส่วนทางซีกโลกใต้จะพัดเวียนเป็นวงในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ยิ่งใกล้ศูนย์กลางพายุลมจะหมุนเกือบเป็นวงกลมและมีความเร็วสูงที่สุด ซึ่งอาจจะมีความเร็วถึง 130 นอต หรือมากกว่า [12] ส่วนความกดอากาศต่ำสุดที่บริเวณศูนย์กลางพายุโดยทั่วไปต่ำกว่า 1,000 มิลลิบาร์ ถ้ามองจากภาพถ่ายจากดาวเทียมจะเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณศูนย์กลางพายุจะมีลักษณะคล้ายกับตาเป็นวงกลม เรียกว่า

ตาพายุ (Eye of storm) หรือในทางวิชาการ เรียกว่า Vortex ซึ่งเป็นบริเวณเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-60 กิโลเมตร [10] ภายในตาพายุนี้เป็นบริเวณที่มีอากาศแจ่มใส มีเมฆเล็กน้อย และมีลมพัดอ่อน

การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเร็วลมและคงที่เป็นเวลานานโดยเฉลี่ยประมาณ 10 นาที จะนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อน ตามการกำหนดของ World Meteorological Organization (WMO) ซึ่งเป็นองค์การอุตุนิยมวิทยาโลก แต่ทั้งนี้การจัดเกณฑ์ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อนอาจจะแตกต่างกันออกไป ตามแต่องค์การที่เป็นผู้พิจารณาเกณฑ์ความรุนแรงของพายุ เช่น Japan Meteorological Agency (JMA) ซึ่งเป็นองค์การอุตุนิยมวิทยาแห่งประเทศญี่ปุ่น ได้จัดเกณฑ์ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อนที่ต่างกันออกไปกับการแบ่งตามมาตรฐานสากล (International Category) ตามตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อน [13]

มาตรฐานญี่ปุ่น	ความเร็วลม นอต (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	มาตรฐานสากล
Tropical Depression	≤ 33 (≤ 62)	Tropical Depression (TD)
Typhoon	34-47 (63-88)	Tropical Storm (TS)
	48-63 (89-118)	Severe Tropical Storm (STS)
Strong Typhoon	64-84 (119-156)	Typhoon (TY) or Hurricane
Very Strong Typhoon	85-104 (157-192)	
Extreme Typhoon	≥ 105 (≥ 193)	

2.2.3 ลำดับขั้นการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน

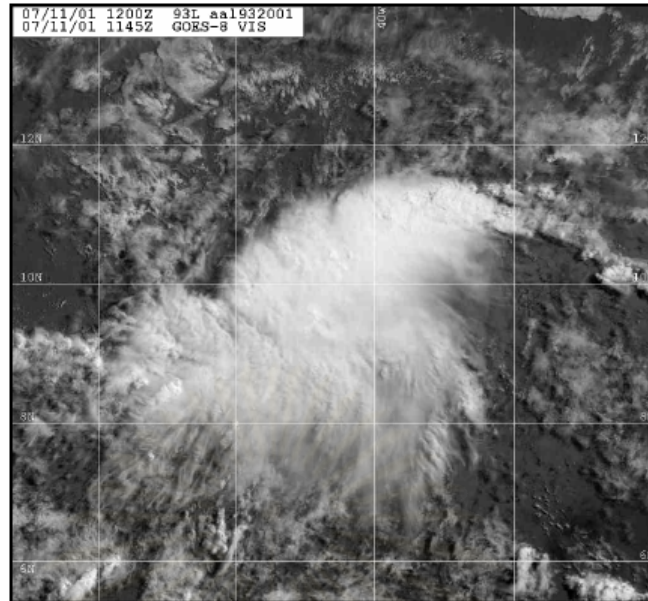
ณ บริเวณต่างๆ ทั่วโลกมีโอกาสที่จะเกิดการก่อตัวของพายุได้แตกต่างกันออกไป บางบริเวณอาจมีโอกาที่จะเกิดการก่อตัวของพายุได้สูง แต่บางบริเวณอาจไม่สามารถที่จะเกิดการก่อตัวของพายุขึ้นได้ เพราะไม่มีเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเกิดการก่อตัวของพายุ สำหรับบริเวณที่มีโอกาสที่จะเกิดการก่อตัวของพายุได้นั้น ต้องมีเงื่อนไขดังนี้

1. อุณหภูมิผิวน้ำทะเลหรือมหาสมุทร ไม่ต่ำกว่า 26.5°C (79.7°F)
2. ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีสูง
3. ตำแหน่งที่จะเกิดพายุได้ต้องอยู่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรไม่ต่ำกว่าประมาณ 500 กิโลเมตร หรือพิกัดละติจูดมากกว่าประมาณ 5 องศา จากเส้นศูนย์สูตร
4. แรงเฉือนลม (wind shear) คือ การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม และ/หรือ ทิศทางของลมในระยะสั้นๆ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง สำหรับพายุที่จะสามารถก่อตัวได้นั้นแรงเฉือนลมในแนวตั้ง (vertical wind shear) ไม่เกินประมาณ 10 m/s
5. มีสภาวะที่ทำให้เริ่มก่อเกิดความปั่นป่วนของอากาศ เช่น พายุฟ้าคะนอง การเคลื่อนตัวเข้าหากันของมวลอากาศขึ้น

บริเวณต่างๆ ถ้ามีเงื่อนไขตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการก่อตัวของพายุขึ้น ลำดับขั้นการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อนตั้งแต่สภาวะเริ่มแรกจนถึงขั้นของพายุไต้ฝุ่นหรือเฮอริเคน มีลำดับขั้นของการเกิดดังนี้

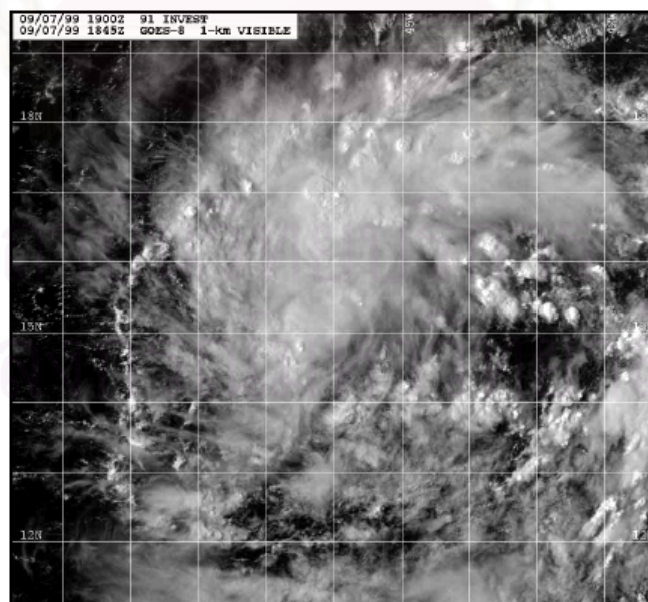
ขั้นแรกจะเป็นช่วงที่อากาศกำลังเริ่มเกิดความปั่นป่วน หรือเกิดคลื่นโซนร้อน (tropical wave) คือ เริ่มการเกาะกลุ่มของมวลอากาศขึ้น และเริ่มที่จะหมุน ซึ่งจะช่วยให้กลุ่มเมฆรวมตัวกันเป็นกลุ่ม โดยสามารถมองเห็นกลุ่มเมฆได้จากภาพถ่ายจากดาวเทียมซึ่งเป็นกลุ่มเล็ก ๆ หรือบางครั้งเป็นกลุ่มใหญ่มาก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แต่ในขั้นนี้จะไม่มีการไหลเวียนของอากาศหรืออาจมีน้อย สำหรับความกดอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับความกดอากาศโดยรอบจะไม่แตกต่างกันมากนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



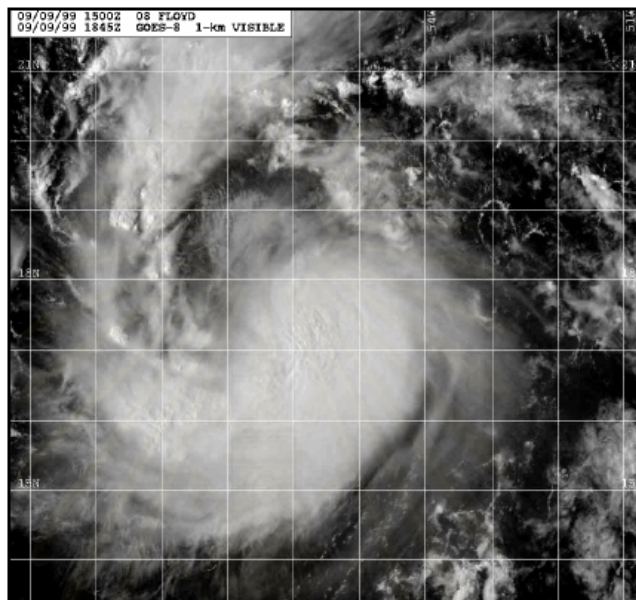
รูปที่ 2.7 คลื่นไซนร้อน

ในลำดับขั้นต่อมา The National Hurricane Center (NHC) ซึ่งเป็นหน่วยงานด้านอุตุนิยมวิทยาของสหรัฐอเมริกาได้ให้ความเห็นว่า เป็นการเข้าสู่ขั้นของ พายุดีเปรสชันเขตร้อน ซึ่งจะทำให้มีความกดอากาศต่ำมากขึ้น และการไหลเวียนของอากาศเพิ่มมากขึ้นกว่าขั้นแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีความกดอากาศต่ำกว่าบริเวณอากาศโดยรอบประมาณ 2-3 มิลลิบาร์



รูปที่ 2.8 พายุดีเปรสชันเขตร้อน

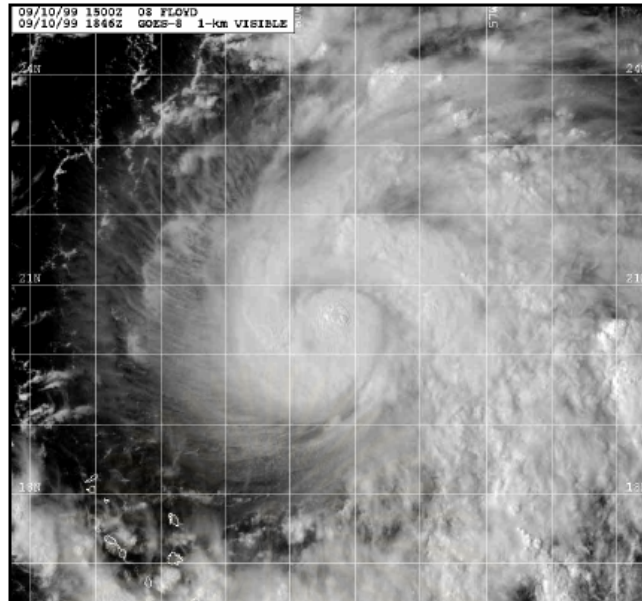
ขั้นต่อไปจะเป็นขั้นของการเกิด พายุโซนร้อน โดยขั้นนี้การเคลื่อนตัวของมวลอากาศยังคงดำเนินไปเรื่อยๆ ซึ่งถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายจากดาวเทียมแล้วจะเห็นว่ามีการก่อตัวของเมฆในบริเวณกึ่งกลางของพายุอย่างหนาแน่น และมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยความกดอากาศจะต่ำกว่าอากาศโดยรอบประมาณ 5-10 มิลลิบาร์



รูปที่ 2.9 พายุโซนร้อน

ขั้นสุดท้าย จะเป็นขั้นของการเกิด พายุเฮอริเคน หรือพายุไต้ฝุ่น ทั้งนี้ชื่อเรียกขึ้นกับสถานที่ที่เกิดพายุ โดยในขั้นนี้บริเวณแกนกลางจะมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นเนื่องจากความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นจากการกลั่นตัวของไอน้ำ ทำให้ความกดอากาศลดต่ำลงมากขึ้น และความเร็วลมบริเวณรอบๆ ศูนย์กลางความกดอากาศต่ำเพิ่มสูงขึ้น โดยขั้นนี้ความกดอากาศบริเวณผิวน้ำทะเลจะต่ำกว่าความกดอากาศโดยรอบประมาณ 10-15 มิลลิบาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 พายุไต้ฝุ่น หรือเฮอริเคน

2.2.4 โครงสร้างการก่อตัวของพายุไต้ฝุ่น

พายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณต่างๆ ทั่วโลก เมื่อมีกำลังสูง (ความเร็วลมสูง) จะมีชื่อเรียกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิด บริเวณที่มีพายุหมุนเขตร้อนเกิดขึ้นประจำ ได้แก่

- บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือ ด้านตะวันตกของลองจิจูด 170 องศาตะวันออก และทะเลจีนใต้ เมื่อมีกำลังสูงสุด เรียกว่า ไต้ฝุ่น (typhoon)
- บริเวณมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือ ทะเลแคริบเบียน และอ่าวเม็กซิโก เมื่อเกิดพายุหมุนเขตร้อนและมีกำลังสูงสุด เรียกว่า เฮอริเคน (hurricane)
- บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือฝั่งตะวันตกของประเทศเม็กซิโก เมื่อมีกำลังสูงสุด เรียกว่า เฮอริเคน
- บริเวณมหาสมุทรอินเดียเหนือ อ่าวเบงกอล และทะเลอาราเบียน เมื่อเกิดพายุหมุนเขตร้อนและมีกำลังสูงสุด เรียกว่า ไซโคลน (cyclone)
- บริเวณมหาสมุทรอินเดียใต้ ตะวันตกเฉียงเหนือของทวีปออสเตรเลีย เรียกว่า วิลลี่-วิลลี่ (willy-willy)

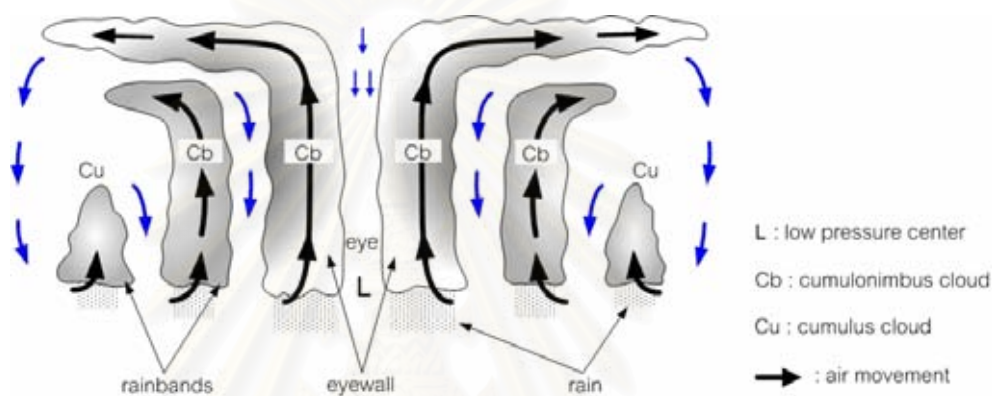
ไต้ฝุ่นหรือเฮอริเคน ต่างเป็นชื่อเรียกของพายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นและมีความเร็วลมสูงสุดบริเวณรอบๆ ศูนย์กลางพายุ ดังนั้นลำดับขั้นในการก่อตัวและโครงสร้างของพายุก็จะเหมือนกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นแรก เป็นช่วงที่อากาศกำลังเริ่มก่อเกิดความปั่นป่วน หรือเกิดคลื่นความร้อน คือ เริ่มการเกาะกลุ่มของมวลอากาศขึ้น และเริ่มที่จะหมุน ทำให้กลุ่มเมฆรวมตัวกันเป็นกลุ่ม และเมื่อเข้าสู่ชั้นของพายุโซนร้อน ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างกลุ่มเมฆกับบริเวณผิวน้ำทะเลมีความแตกต่างกันมาก เกิดการไหลขึ้นของมวลอากาศร้อนขึ้นที่อยู่บริเวณผิว ซึ่งในช่วงแรกบริเวณศูนย์กลางของแกนพายุเป็นบริเวณที่มีการไหลขึ้นของมวลอากาศร้อนขึ้นมากที่สุด แต่ท้ายที่สุดปริมาณการไหลขึ้นของมวลอากาศร้อนขึ้นที่บริเวณศูนย์กลางของแกนพายุจะเปลี่ยนไปเมื่อมีตาพายุ (storm eye) เกิดขึ้น ตาพายุ คือ บริเวณศูนย์กลางของพายุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นบริเวณที่มีลมสงบ ท้องฟ้าแจ่มใส และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-60 กิโลเมตร

เนื่องจากพายุไต้ฝุ่นเป็นระบบของความกดอากาศต่ำ มวลอากาศบริเวณรอบๆ ที่มีความกดอากาศสูงกว่าจะเคลื่อนเข้ามายังบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่า ดังนั้นในช่วงแรกบริเวณศูนย์กลางของความกดอากาศต่ำจะมีการไหลขึ้นของมวลอากาศมาก เมื่อมวลอากาศเคลื่อนตัวสูงขึ้นก็จะขยายตัวและเย็นลงเนื่องจากที่สูงมีอุณหภูมิต่ำกว่า ไอน้ำในอากาศจะกลั่นตัวรวมกันเป็นเมฆ และคายความร้อนแฝงออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตลอดกระบวนการข้างต้นดังกล่าวมีผลทำให้อากาศ ณ บริเวณที่ไอน้ำกลั่นตัวมีอุณหภูมิต่ำลง ซึ่งในขณะนั้นความเร็วลมที่บริเวณต่ำกว่าสูงขึ้นด้วย และแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางพายุเนื่องจากการหมุนเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับแรงดันอากาศที่เคลื่อนเข้ามายังบริเวณศูนย์กลางของความกดอากาศต่ำก่อนหน้านี้ ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลอากาศขึ้นถอยห่างออกจากบริเวณศูนย์กลางของแกนพายุ โดยระยะห่างจากศูนย์กลางของแกนพายุถึงบริเวณที่สมดุลระหว่างแรงเหวี่ยงกับแรงดันอากาศที่เคลื่อนเข้ามา เรียกว่า ขนาดของตาพายุ และบริเวณที่สมดุลระหว่างแรงเหวี่ยงกับแรงดันอากาศที่เคลื่อนเข้ามา เรียกว่า ผนังตา (eyewall) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วลมสูงสุด และห่างจากศูนย์กลางพายุไม่เกิน 30 กิโลเมตร [14]

นอกจากนี้ ในช่วงขณะที่เกิดพายุไต้ฝุ่น หรือเฮอริเคนนั้น แรงลมที่พัดไหลเข้ายังบริเวณศูนย์กลางของความกดอากาศต่ำ มีระบบการหมุนเวียนของลมเป็นไปโดยพัดเวียนเป็นวงเข้าหาศูนย์กลางในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งกรณีนี้เกิดขึ้นในซีกโลกเหนือ แต่ถ้าเกิดพายุในซีกโลกใต้จะมีแรงลมพัดเวียนเป็นวงเข้าหาศูนย์กลางความกดอากาศต่ำในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

โดยการพัดเวียนของลมทำให้เมฆฟ้าคะนอง (thunderclouds) ที่อยู่รอบๆ พายุ เคลื่อนตัวในลักษณะเป็นขดเกลียวตามแนวทิศทางการพัดของลม ทำให้เกิดแถบฝนขดเกลียว (spiral rainbands) ขึ้นซึ่งมีความกว้างของขดเกลียว 20-40 กิโลเมตร ห่างจากศูนย์กลางพายุประมาณ 40 กิโลเมตร และจะเกิดขึ้นภายในรัศมี 500 กิโลเมตร จากจุดศูนย์กลางพายุ [15] โดยทั้งบริเวณผนังตาและบริเวณแถบฝนขดเกลียวเป็นบริเวณที่มีมวลอากาศร้อนขึ้น ทำให้มวลอากาศไหลขึ้นข้างบน อากาศที่ลอยขึ้นและขยายตัวจะเย็นลง ไอน้ำก็จะกลั่นตัวและตกลงมาเป็นฝน โดยโครงสร้างของพายุได้ฝุ่นตามแนวตัดขวาง และทิศทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ พิจารณาได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของพายุไต้ฝุ่นและทิศทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศตามแนวตัดขวาง

ความรุนแรงของพายุนั้น สามารถพิจารณาได้ที่ความกดอากาศต่ำสุดที่บริเวณตาพายุและความเร็วลมสูงสุดที่บริเวณผนังตา โดยความรุนแรงของพายุจะไม่ขึ้นกับขนาดของพายุแต่อย่างใด

2.3 ระบบเรดาร์

ในการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุที่เกิดขึ้นในระยะไกลนั้น นอกจากจำเป็นต้องศึกษาของสัญญาณที่คลื่นวิทยุเดินทาง และตัวของเป้าหรือพายุที่ทำให้สัญญาณคลื่นวิทยุสะท้อนกลับแล้ว สิ่งจำเป็นอีกอย่างที่ขาดไม่ได้คือ ระบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุดังกล่าว ซึ่งในที่นี้คือ เรดาร์

เรดาร์ (radar) ย่อมาจากคำว่า radio detection and ranging ซึ่งเป็นเครื่องประมวลทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการตรวจหา และชี้ตำแหน่งของวัตถุ โดยแรกเริ่มได้ใช้เรดาร์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจหาเป้า และวัดระยะห่างของเป้าที่ตรวจจับได้เท่านั้น ความก้าวหน้าของระบบเรดาร์ปัจจุบันสามารถที่จะให้ข้อมูลได้มากกว่าระยะห่างของเป้าที่ตรวจจับได้เพียงอย่างเดียว อาทิ สามารถที่จะให้ข้อมูลทั้งความเร็วของวัตถุ ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือชนิดของวัตถุได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตามฟังก์ชันพื้นฐานของระบบเรดาร์ที่ฟังจะมีก็คือ สามารถตรวจหาเป้าหมายและวัดระยะของเป้าหมายได้ สำหรับรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ส่งในระบบเรดาร์โดยทั่วไปแล้ว จะมีลักษณะเป็นขบวนพัลส์สี่เหลี่ยม ที่มีความกว้างพัลส์แคบๆ แล้วกล้ำกับสัญญาณคลื่นพาห์ เพื่อที่จะส่งออกสู่สายอากาศต่อไป ระบบเรดาร์ที่ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุในรูปแบบข้างต้นดังกล่าว เรียกว่า ระบบพัลส์เรดาร์

2.3.1 ระบบพัลส์เรดาร์

ระบบพัลส์เรดาร์ เป็นระบบเรดาร์ใดๆ ที่ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุในลักษณะที่เป็นขบวนพัลส์ ซึ่งหลักการของเรดาร์ชนิดนี้สามารถที่จะให้ข้อมูลพื้นฐานตามที่ระบบเรดาร์ควรจะมี คือ ระยะห่างและทิศทางของเป้าที่ตรวจจับได้ โดยทิศทางของเป้าที่ตรวจจับได้คือ ทิศทางที่เรดาร์ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ ส่วนระยะของเป้านั้นสามารถที่จะพิจารณาได้ ดังนี้

รูปที่ 1.2 เป็นรูปแบบของสัญญาณวิทยุเบื้องต้นที่ส่งและรับได้จากระบบพัลส์เรดาร์ จะเห็นว่าสัญญาณรับจะมีช่วงเวลาประวิง (delay time) เทียบกับสัญญาณส่งเป็น Δt ดังนั้นการวิเคราะห์หาระยะระหว่างเป้ากับเรดาร์ สามารถพิจารณาได้ดังสมการ (2.12) [16]

$$R = \frac{c(\Delta t)}{2} \quad (2.12)$$

โดยที่ R คือ ระยะระหว่างเป้ากับเรดาร์ (m)

c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

Δt คือ ช่วงเวลาประวิงของสัญญาณรับเมื่อเทียบกับสัญญาณส่ง (sec)

ความสามารถแยกแยะระหว่างเป้าทางระยะ (range resolution) ของเรดาร์ซึ่งเป็นความสามารถในการตรวจแยกกลุ่มวัตถุที่อยู่ใกล้ชิดกัน กรณีของระบบพัลส์เรดาร์สามารถที่จะ

ตรวจแยกกลุ่มวัตถุที่อยู่ใกล้ชิดกันได้ถ้าวัตถุตั้งกล่าวอยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสม โดยระยะห่างของวัตถุต่ำสุดที่สามารถแยกแยะได้ พิจารณาได้ดังสมการ (2.13) [16]

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (2.13)$$

โดยที่ ΔR คือ ระยะห่างระหว่างวัตถุต่ำสุดที่สามารถตรวจแยกกลุ่มวัตถุนั้นออกจากกันได้ (m)
 τ คือ ความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง (sec)

2.3.2 หลักการของระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้า

เรดาร์เหนือขอบฟ้า (Over the Horizon Radar, (OTHR)) เป็นเรดาร์ที่ใช้ความถี่ปฏิบัติการในแถบความถี่สูง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด [17] คือ

1. เรดาร์คลื่นฟ้า (sky wave radar) เป็นเรดาร์ที่ใช้ประโยชน์จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ในการหักเหสัญญาณคลื่นวิทยุ ทำให้สามารถตรวจจับเป้าที่ระยะไกลได้ โดยทั่วไปแล้วเรดาร์ชนิดนี้จะใช้ความถี่ในช่วง 5-35 MHz โดยมีความสามารถตรวจจับเป้าได้ไกลถึง 500 – 3500 กิโลเมตร [18]

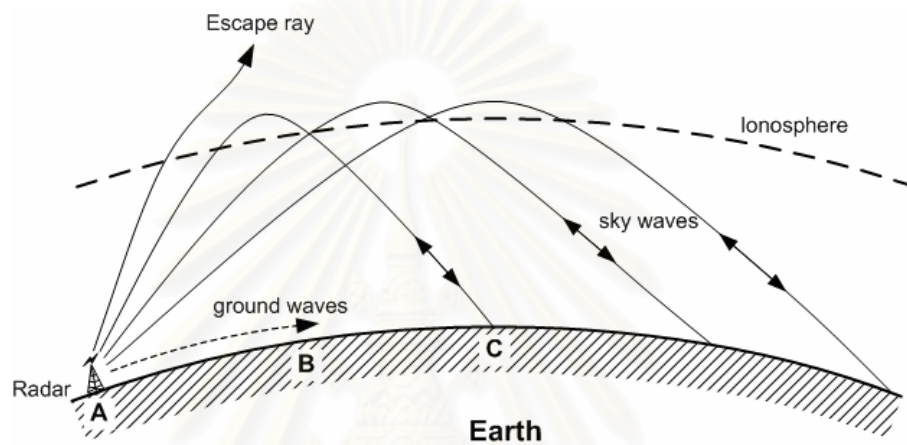
2. เรดาร์คลื่นผิว (surface wave radar) เป็นเรดาร์ที่อาศัยคลื่นดิน (ground wave) ในการตรวจจับเป้า ซึ่งจะใช้ความถี่ในช่วง 10 – 50 MHz [18] เรดาร์ชนิดนี้มีความยุ่งยากในการออกแบบระบบน้อยกว่าเรดาร์คลื่นฟ้ามาก ระยะในการตรวจจับเป้าโดยทั่วไปประมาณ 50 กิโลเมตร [19] เมื่อเทียบกับเรดาร์คลื่นฟ้าจะมีระยะน้อยกว่ามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังส่ง และความถี่ที่ใช้ด้วย

งานวิจัยนี้ใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าเพื่อศึกษาการกระเจิงของคลื่นวิทยุจากพายุ โดยตำแหน่งในการก่อตัวของพายุที่คาดหวังไว้ห่างจากเครื่องส่งเรดาร์ประมาณ 1000 กิโลเมตร ดังนั้นชนิดของเรดาร์ที่จะนำมาประยุกต์ใช้คือ เรดาร์คลื่นฟ้า

2.3.2.1 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุในแถบความถี่สูง

สำหรับในแถบความถี่สูง (HF band) คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายนั้นจะมีทั้งคลื่นฟ้าซึ่งเป็นคลื่นวิทยุที่เกิดจากการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คลื่นดินซึ่งเป็นคลื่นที่เกิดในช่วงความถี่ต่ำ และคลื่นตรงซึ่งเป็นคลื่นที่

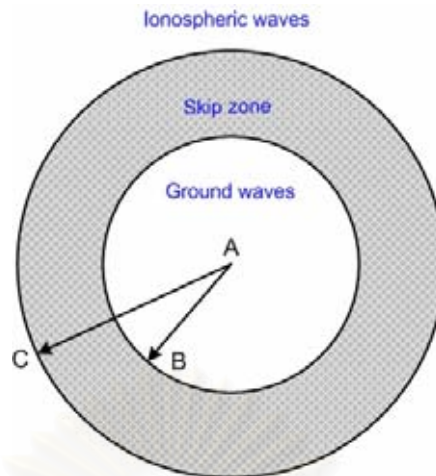
เกิดในช่วงความถี่สูงของย่าน HF คลื่นดินนั้นจะเคลื่อนไปตามแนวโค้งของโลก โดยระยะจะขึ้นอยู่กับพื้นผิวของพื้นโลก กำลังส่ง และความถี่ปฏิบัติการ ส่วนคลื่นตรงที่เรดาร์แพร่พลังงานออกไป และสามารถรับพลังงานที่กระเจิงเมื่อกระทบกับเป้าได้นั้น ต้องมีระยะที่เหมาะสมซึ่งจำกัดด้วยความโค้งของโลก เช่น เรดาร์ภาคพื้นดินตามแนวชายฝั่งทะเลสามารถตรวจจับเรือที่อยู่ห่างจากชายฝั่งประมาณ 20 ไมล์ทะเล เท่านั้น ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะทางของสัญญาณที่หักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



รูปที่ 2.12 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุในแถบความถี่สูง

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุในแถบความถี่สูงนั้นมีทั้งคลื่นตรง คลื่นดิน และคลื่นฟ้า ระยะทางสั้นที่สุดที่สามารถรับสัญญาณคลื่นวิทยุที่หักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ (ระยะ AC) เรียกว่า ระยะกระโดดข้าม (skip distance) ส่วนแถบบริเวณที่ไม่สามารถรับสัญญาณคลื่นวิทยุที่หักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และสัญญาณจากคลื่นดินได้ เรียกว่า เขตกระโดดข้าม (skip zone) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 บริเวณเขตกระโดดข้ามของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในแถบความถี่สูง [9]

2.3.2.2 การพิจารณาความถี่ปฏิบัติการของเรดาร์คลื่นฟ้า

เรดาร์คลื่นฟ้าเป็นเรดาร์ที่ใช้ความถี่ปฏิบัติการซึ่งสามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และย้อนกลับลงมาที่พื้นโลกได้ โดยความถี่ที่เลือกใช้นี้สามารถกำหนดได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.14 ประกอบ ซึ่งจะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ [9]

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{80.8 N_{\max} \left(1 + \frac{2h}{a}\right)}{\sin^2 \beta + \frac{2h}{a}}} \quad (2.14)$$

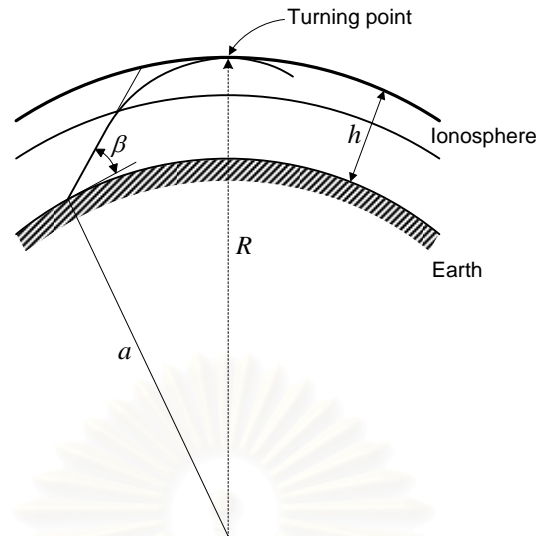
โดยที่ f_{\max} คือ ความถี่สูงสุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ (Hz)

N_{\max} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (electrons/m³)

h คือ ความสูงของชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็น N_{\max} (km)

a คือ รัศมีของโลก

β คือ มุมเงยของสายอากาศเทียบกับพื้นโลก



รูปที่ 2.14 เรขาคณิตประกอบการกำหนดความถี่ที่หักเหได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ถ้ากำหนดให้มุมเงยของสายอากาศที่ส่งพลังงานคลื่นวิทยุตั้งฉากกับพื้นโลก หรือกำหนดให้ $\beta = 90^\circ$ ความถี่สูงสุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ คือ

$$f_{\max \beta=90} = f_c = \sqrt{80.8 N_{\max}} \quad (2.15)$$

โดยที่ f_c คือ ความถี่วิกฤต (critical frequency) หรือความถี่สูงสุดที่ส่งคลื่นในทิศตั้งฉากกับพื้นโลกสู่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และสามารถหักเหกลับมาได้

การพิจารณาเลือกใช้ความถี่ปฏิบัติการสำหรับเรดาร์คลื่นฟ้า โดยการกำหนดค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด (N_{\max}) แล้วปรับค่ามุมเงยของสายอากาศเทียบกับพื้นโลก (β) เพื่อให้สามารถรับสัญญาณคลื่นวิทยุที่หักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้นั้น ไม่ควรปรับค่า β เกินกว่าประมาณ 25 หรือ 30 องศา [4] เพราะจะทำให้สัญญาณคลื่นวิทยุทะลุผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไปได้

บทที่ 3

แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนสำหรับการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิง

ความนำ

คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนนั้นมีลักษณะแตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการกระเจิงกลับของสัญญาณ ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกภายในพายุ ขนาดของพายุ หรือแม้แต่การเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ส่งไปยังพายุ (กรณีส่งสัญญาณด้วยระบบพัลส์เรดาร์) ก็ทำให้เกิดการกระเจิงกลับของสัญญาณแตกต่างกัน เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่การกระเจิงจากพายุจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ นอกเหนือจากนี้แล้วสิ่งสำคัญอีกประการที่มีผลต่อการวิเคราะห์คลื่นวิทยุ คือ แบบจำลองพายุ วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นในการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิง

การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นดังกล่าว จำเป็นต้องกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุก่อนจึงจะสามารถวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุต่อไปได้ แนวทางการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน จะพิจารณาแยกกล่าวเป็นหัวข้อๆ ดังนี้

หัวข้อแรกจะกล่าวถึง แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน มีเนื้อหาสำคัญที่จะกล่าวถึงคือแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ซึ่งจะกล่าวถึงข้อสมมุติของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน และการกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึง การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น หัวข้อสุดท้ายกล่าวถึง แนวคิดของการวิเคราะห์ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ โดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ในกรณีที่ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุลักษณะเป็นพัลส์และมีค่าความกว้างพัลส์จำกัด รายละเอียดในแต่ละหัวข้อ มีดังนี้

3.1 แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน

การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุนั้น จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองของพายุเพื่อนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุดังกล่าว กระบวนการหรือแนวทางใน

การสร้างแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนเพื่อนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์คลื่นวิทยุ มีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ชนิดของแบบจำลอง

การศึกษาหรือทำความเข้าใจกับระบบใดๆ นอกจากจะศึกษาโดยตรงจากโครงสร้างจริงของระบบนั้น ยังสามารถศึกษาได้โดยการสร้างแบบจำลองของระบบนั้นๆ ขึ้นมา ถึงแม้ว่าแบบจำลองใดๆ ที่สร้างขึ้นนั้นจะไม่เหมือนกับระบบจริงก็ตาม แต่จะช่วยให้สามารถเข้าใจระบบจริงได้ดียิ่งขึ้น สำหรับข้อสำคัญในการสร้างแบบจำลองใดๆ นั้น มีดังนี้

- มีข้อสมมุติที่ง่ายต่อการสร้าง
- มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตหรือเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลอง
- มีการกำหนดขอบเขตการประยุกต์ใช้งานของแบบจำลองนั้นๆ

แบบจำลองที่สร้างเพื่อวิเคราะห์ระบบจริงใดๆ สามารถแบ่งได้เป็น 5 ชนิด คือ

1. Conceptual Model คือ แบบจำลองเชิงคุณลักษณะซึ่งช่วยในการเชื่อมโยงส่วนสำคัญๆ ของระบบจริงกับส่วนประมวลผล โดยแบบจำลองนี้เป็นส่วนแรกที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองชนิดอื่นๆ

2. Physical Model คือ แบบจำลองเชิงกายภาพซึ่งมีลักษณะเฉพาะคล้ายกับข้อสำคัญที่ถูกระบุขึ้นในการสร้างแบบจำลอง โดยแบบจำลองชนิดนี้เป็นเหมือนตัวเชื่อมโยงระหว่าง conceptual model กับแบบจำลองชนิดอื่นๆ ที่ใช้อธิบายระบบจริง

3. Mathematical Model เป็นแบบจำลองที่อาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของระบบจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง หรือดูการเปลี่ยนแปลงของระบบเมื่อค่าตัวแปรบางตัวเปลี่ยนไป ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้สามารถแบ่งย่อยเป็น แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (analytical model) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical model)

4. Statistical Model เป็นแบบจำลองที่อธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระบบจากข้อมูลในเชิงสถิติ นอกจากนี้ยังใช้เพื่อการทำนายพฤติกรรมของระบบที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตได้จากชุดข้อมูลที่มีอยู่

5. Visualization Model เป็นแบบจำลองที่ช่วยให้สามารถมองเห็นการทำงานของระบบ โดยแบบจำลองชนิดนี้สามารถเชื่อมโยงกันโดยตรงกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองชนิดอื่นๆ

จากนั้นแปลงผลลัพธ์ที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถสังเกตได้ในลักษณะต่างๆ เช่น กราฟิก 1 มิติ, 2 มิติ, 3 มิติ หรือภาพเคลื่อนไหว เป็นต้น

ชนิดของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน ที่จำเป็นต้องนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์การกระเจิงคลื่นวิทยุจากพายุ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพายุได้นั้น จำเป็นต้องรู้โครงสร้างของพายุหรือแบบจำลองทางกายภาพของพายุก่อน จึงสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพายุต่อไปได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพายุหมุนเขตร้อนที่จำเป็นต้องนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์การกระเจิงคลื่นวิทยุจากพายุ นั้น สามารถพิจารณาได้ในหัวข้อถัดไป

3.1.2 แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

หัวข้อที่ 2.2 ได้กล่าวถึงกระบวนการของการเกิดพายุ และโครงสร้างเบื้องต้นของพายุสรุปได้ว่า พายุเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนเวียนของมวลอากาศที่มีอุณหภูมิ และความชื้นที่แตกต่างกัน เป็นผลทำให้ความกดอากาศบริเวณภายในตัวพายุแตกต่างกันออกไป โดยบริเวณรอบๆ ใกล้จุดศูนย์กลางพายุจะเป็นบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ และบริเวณที่อยู่ถัดห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางพายุจะมีความกดอากาศที่สูงกว่า และจะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางพายุมากขึ้น จนเท่ากับความกดอากาศของสิ่งแวดล้อมภายนอกหรือประมาณเท่ากับ 1013 มิลลิบาร์ การศึกษาการกระเจิงคลื่นวิทยุจากพายุ นั้น จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของพายุ เพื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากพายุ และวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุต่อไปได้

3.1.2.1 ข้อสมมุติของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน

สิ่งจำเป็นในการสร้างแบบจำลองใดๆ คือ ข้อสมมุติเกี่ยวกับแบบจำลองนั้นๆ พายุหมุนเขตร้อนซึ่งเป็นพายุขนาดใหญ่อาจมีรัศมีถึง 500 กิโลเมตรหรือมากกว่า พายุหมุนเขตร้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศทั้งในแนวตั้งและแนวระดับที่มีอุณหภูมิ และความชื้นแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศ บริเวณศูนย์กลางพายุเป็นบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ และมีปริมาณการไหลขึ้นของมวลอากาศร้อนขึ้นมากที่สุด (บริเวณที่มีมวลอากาศร้อนขึ้นไหลขึ้นมากที่สุดนั้นจะเปลี่ยนไปยังบริเวณผนังตา (eyewall) เมื่อมีตาพายุเกิดขึ้น) ส่วนบริเวณโดยรอบจะมีความกดอากาศที่สูงกว่า จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเข้าหาศูนย์กลาง

พายุ (อากาศเคลื่อนจากบริเวณความกดอากาศสูงไปยังบริเวณความกดอากาศต่ำ) การเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้มีลักษณะเวียนเป็นวงเข้าหาศูนย์กลางพายุ และทำให้เกิดแถบฝนชดถึยวขึ้นซึ่งมีความกว้างของแถบฝนชดถึยวประมาณ 20-40 กิโลเมตร ดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นจากข้อสรุปของการเกิดพายุดังกล่าวข้างต้น สามารถตั้งข้อสมมุติสำหรับแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน ได้ดังนี้

1. เนื่องจากพายุเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศทั้งในแนวตั้งและแนวระดับกรณีในแนวระดับ กำหนดให้มวลอากาศเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางพายุในทุกทิศทาง และมีปริมาณมวลอากาศที่เคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางพายุในแต่ละทิศทางที่เท่ากัน หรือมีความสมมาตรของปริมาณมวลอากาศในแนวรัศมีของพายุ

2. กรณีการเคลื่อนที่ของมวลอากาศในแนวตั้ง บริเวณศูนย์กลางพายุกำหนดให้เป็นบริเวณที่มีปริมาณมวลอากาศเคลื่อนที่ในแนวตั้งมากที่สุด (ก่อนเกิดตาพายุ) แต่จะเปลี่ยนไปยังบริเวณผนังตาเมื่อมีตาพายุเกิดขึ้น ส่วนบริเวณที่ห่างออกไปตามแนวรัศมีพายุจะกำหนดให้มีปริมาณมวลอากาศลดลงเรื่อยๆ

3. เนื่องจากมวลอากาศเคลื่อนที่เข้าหาบริเวณศูนย์กลางพายุ ดังนั้นบริเวณศูนย์กลางพายุจะเป็นบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางพายุตามแนวรัศมี

4. อุณหภูมิใกล้ศูนย์กลางพายุสูงกว่าอุณหภูมิของบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางพายุตามแนวรัศมี

5. เนื่องจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศทำให้เกิดแถบฝนชดถึยวขึ้น ซึ่งมีความกว้างของแถบฝนชดถึยวประมาณ 20-40 กิโลเมตร ดังนั้นจึงกำหนดให้ความดันอากาศ ความชื้น และอุณหภูมิ ในแนวของรัศมีพายุเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันตามระยะความกว้างของแถบฝน และการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นภายในระยะรัศมีพายุเท่านั้น

ข้อสมมุติทั้ง 5 ข้อของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนดังกล่าวข้างต้น ทำให้สรุปได้ดังนี้

แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนเป็นแบบจำลองของมวลอากาศที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตามแนวตั้ง เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ และวางซ้อนอยู่บนแกนเดียวกัน โดยทรงกระบอกแต่ละชั้นมีอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศคงที่ตลอดภายในชั้น แต่ต่างจากชั้นอื่นๆ ตามระยะของรัศมีพายุ การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศ จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่เท่ากับระยะความกว้างของแถบฝนชดถึยว และการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้น

ภายในระยะรัศมีพายุเท่านั้น ดังนั้นแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนในลักษณะนี้ เรียกว่า แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

3.1.2.2 การกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

พายุ แท้จริงก็คือ มวลอากาศ สัญญาณคลื่นวิทยุสามารถกระเจิงจากมวลอากาศของพายุได้ก็ต่อเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ นั้น ต่างจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของมวลอากาศที่แวดล้อมอยู่ภายนอก ถ้าเมื่อใดมวลอากาศของพายุเหมือนกับมวลอากาศที่แวดล้อมอยู่ภายนอก พายุแล้ว ก็ไม่สามารถเกิดการกระเจิงกลับของคลื่นวิทยุที่ส่งเข้าไปยังพายุได้ การกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของมวลอากาศ เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ และนำผลมาวิเคราะห์สัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ นั้น สามารถพิจารณาได้ดังนี้

เนื่องจากพายุเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ โดยบรรยากาศในชั้นนี้เป็นบรรยากาศที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกไม่คงที่ ซึ่งขึ้นกับปัจจัยสำคัญ 3 ประการคือ ความดันอากาศ อุณหภูมิ และความดันไอน้ำแฝง (water-vapour pressure) [21] อีกทั้งทำให้ดัชนีหักเห (refractive index) ของอากาศในชั้นนี้เปลี่ยนแปลงตามค่าปัจจัยดังกล่าวด้วย ซึ่งพิจารณาได้จากสมการดังนี้

$$n = 1 + \left(\frac{77.6}{T} \right) \left(P + \frac{4810e}{T} \right) \times 10^{-6} \quad (3.1)$$

โดยที่ n คือ ดัชนีหักเหของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์

P คือ ความดันอากาศ (mbar)

e คือ ความดันไอน้ำแฝง (mbar)

T คือ อุณหภูมิ (K)

ความดันไอน้ำแฝงตามสมการ (3.1) สัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ตามสมการดังนี้

$$e = 6.11 \times H \times \exp\left(19.7 \frac{T - 273}{T}\right) \quad (3.2)$$

โดยที่ H คือ ความชื้นสัมพัทธ์

การวิเคราะห์การกระเจิงคลื่นวิทยุจากพายุนั้นจำเป็นต้องรู้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก หรือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ของตัวกลางหรือพายุก่อน จึงสามารถวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงต่อไปได้ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์นั้นสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเห ตามสมการดังนี้

$$\varepsilon_r = n^2 \quad (3.3)$$

โดยที่ ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

เนื่องจากพายุเป็นมวลอากาศที่มีความดันอากาศแตกต่างกันตามแนวเส้นรัศมีของพายุ ซึ่งสามารถแสดงนิพจน์คณิตศาสตร์ได้ดังสมการ (3.4) และ (3.5) ดังนี้ [22]

$$P_A = P_C + (\Delta P) \exp\left(-\left(r/r_M\right)^{-B}\right) \quad (3.4)$$

$$\Delta P = P_N - P_C \quad (3.5)$$

โดยที่ P_A คือ ความดันอากาศตามแนวรัศมีของพายุ (mbar)

P_C คือ ความดันอากาศบริเวณศูนย์กลางพายุ (mbar)

P_N คือ ความดันอากาศที่แวดล้อมภายนอกพายุ (mbar)

B คือ พารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (shape parameter)

r, r_M คือ ระยะตามแนวรัศมีของพายุ และระยะจากจุดศูนย์กลางพายุไปยังบริเวณที่มีความเร็วลมสูงสุด ตามลำดับ

ค่าความเร็วลมสูงสุดบริเวณรอบศูนย์กลางพายุ (W_M) ความแตกต่างระหว่างความดันอากาศที่แวดล้อมภายนอกพายุกับความดันอากาศบริเวณศูนย์กลางพายุ (ΔP) และพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (B) ตามสมการ (3.4) และ (3.5) มีความสัมพันธ์กันดังสมการ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับดังนี้ [22]

$$W_M = K_p (\Delta P)^\beta \quad (3.6)$$

$$B = \frac{2.718}{\gamma^2} \frac{\rho_A}{(100)\Delta P} \left(\frac{1}{36} K_p (\Delta P)^\beta \right)^2 \quad (3.7)$$

โดยที่ W_M คือ ความเร็วลมสูงสุดบริเวณรอบศูนย์กลางพายุ (km/hr)

K_p, β คือ พารามิเตอร์การถดถอย (regression parameter)

γ คือ ค่าคงที่ซึ่งกำหนดเท่ากับ 1.05

ρ_A คือ ความหนาแน่นอากาศซึ่งกำหนดเท่ากับ 1.15 kg/m^3

การคำนวณค่าความดันอากาศตามแนวรัศมีของพายุ (P_A) นั้นจำเป็นต้องกำหนดค่าความเร็วลมสูงสุดบริเวณรอบศูนย์กลางพายุ (W_M) และพารามิเตอร์การถดถอย (K_p, β) ก่อน โดยที่พารามิเตอร์การถดถอยสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์การถดถอยกรณีพายุเกิด ณ บริเวณอ่าวเบงกอลและบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือฝั่งตะวันตก

พารามิเตอร์	พายุที่เกิด ณ อ่าวเบงกอล	พายุที่เกิด ณ มหาสมุทรแปซิฟิกเหนือฝั่งตะวันตก
K_p	26.3	15.5
β	0.5	0.644

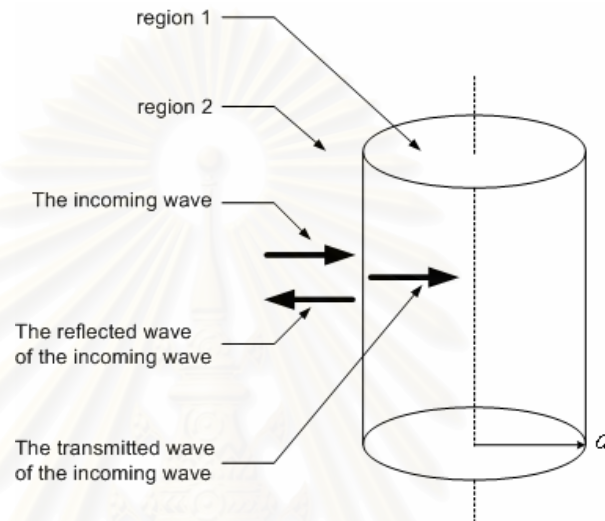
3.2 การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

การวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระเจิงจากพายุ นั้น นอกจากจำเป็นต้องใช้แบบจำลองพายุดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1.2 สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ รูปแบบของสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองพายุดังกล่าว เนื่องจากแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า ทรงกระบอกพายุ) ดังนั้นรูปแบบของสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะใช้วิเคราะห์การกระเจิงคลื่นวิทยุจากพายุ คือ รูปแบบของสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอก ดังที่จะกล่าวต่อไป

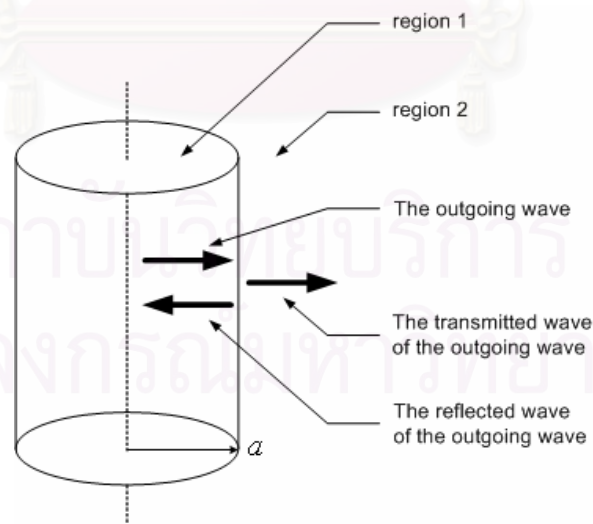
3.2.1 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอก

คลื่นระนาบใดๆ ที่เดินทางเข้าหาหรือเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์ตั้งรูปที่ 3.1 สามารถแสดงได้ในรูปคลื่นระนาบ 2 คลื่น ที่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแกนของทรงกระบอก คลื่นระนาบดังกล่าวเรียกว่า คลื่น TM (transverse magnetic)

และคลื่น TE (transverse electric) ตามลำดับ ถ้าหากคลื่นระนาบตกกระทบบทงกระบอกในทิศทางใดๆ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 และกำหนดให้พจน์การแปรผันตามเวลาของคลื่นเป็น $e^{j\omega t}$ องค์ประกอบในแนวแกน z ของคลื่นตกกระทบบ คลื่นกระเจิง และคลื่นที่ทะลุผ่านทงกระบอก ในแบบแผนของคลื่น TM สำหรับกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาทงกระบอกเอกพันธ์สามารถแสดงได้ด้วยสมการตามลำดับดังนี้ [23],[24]



(ก) กรณีคลื่นวิทยุเดินทางเข้าหาทงกระบอกเอกพันธ์



(ข) กรณีคลื่นวิทยุเดินทางออกจากทงกระบอกเอกพันธ์

รูปที่ 3.1 แบบจำลองคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาและออกจากทงกระบอกเอกพันธ์ [25]

$$E_z^{int(in)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_0^{(in)} \cos(\alpha) \sin(\theta^{int}) j^{-m} e^{-jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^{int})} J_m(k_{2\rho}\rho) \quad (3.8)$$

$$E_z^{sct(in)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m^{(in)} j^{-m} e^{-jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^{int})} H_m^{(2)}(k_{2\rho}\rho) \quad (3.9)$$

$$E_z^{thr(in)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m^{(in)} j^{-m} e^{-jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^{int})} J_m(k_{1\rho}\rho) \quad (3.10)$$

โดยที่ $E_0^{(in)}$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ กรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอก

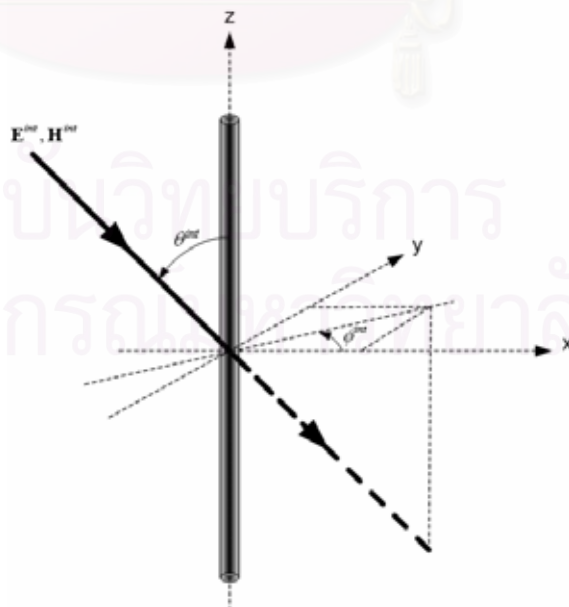
k_z และ $k_{i\rho}$ คือ องค์ประกอบในแนวแกน z และในแนวแกนที่ตั้งฉากกับแกน z ของเวกเตอร์ค่าคงตัวการแพร่กระจาย \mathbf{k} โดยที่ดัชนี “ i ” ของ $k_{i\rho}$ แสดงลำดับที่ของบริเวณที่พิจารณาดังรูปที่ 3.1

$J_m(k_{i\rho}\rho)$ และ $H_m^{(2)}(k_{i\rho}\rho)$ คือ ฟังก์ชันเบสเซลและฟังก์ชันแฮงเคลชนิดที่ 1 อันดับ m ตามลำดับ

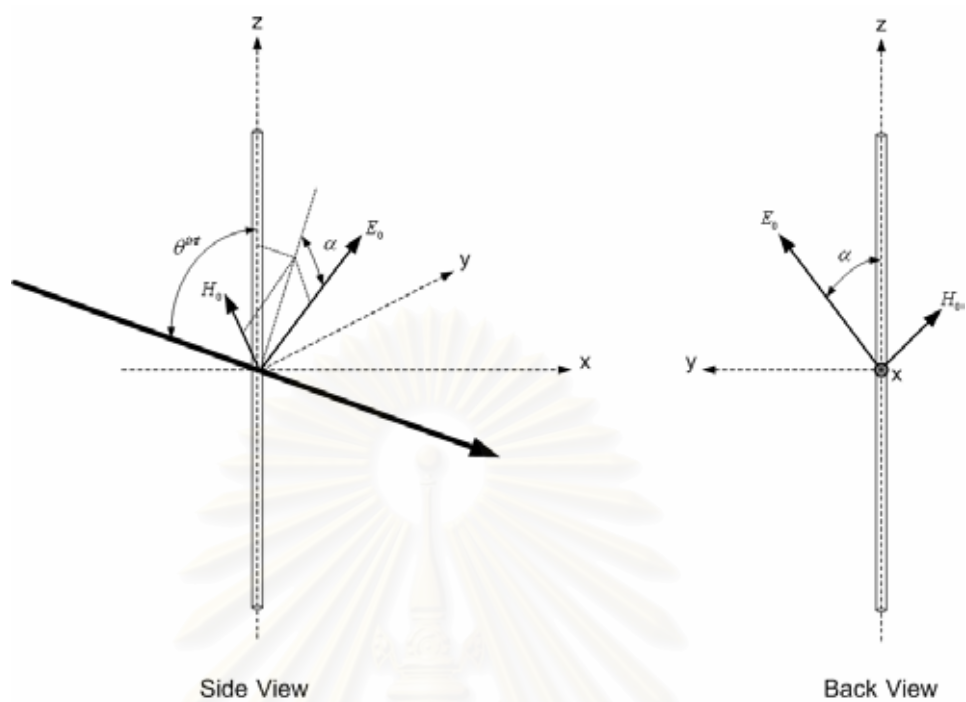
$R_m^{(in)}$ และ $T_m^{(in)}$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นที่เดินทางเข้าหาทรงกระบอก อันดับ m ตามลำดับ

θ^{int} คือ มุมตกกระทบเทียบกับแกน z ของทรงกระบอก

α คือ มุมระหว่างเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบกับรอยตัดระหว่างระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ชี้ทิศทางการแพร่กระจายกับแกนของทรงกระบอก และระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กตกกระทบ ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 คลื่นตกกระทบทำมุมใดๆ กับแกนของทรงกระบอก



รูปที่ 3.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทำมุมใดๆ กับแกนของทรงกระบอก

กรณีที่คลื่นระนาบเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์ องค์ประกอบในแนวแกน z ของคลื่นตกกระทบ คลื่นกระเจิง และคลื่นที่ทะลุผ่านทรงกระบอก ในแบบแผนของคลื่น TM สามารถแสดงได้ด้วยสมการตามลำดับดังนี้

$$E_z^{int(out)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_0^{(out)} \cos(\alpha) \sin(\theta^{int}) j^{-m} e^{-jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^{int})} H_m^{(2)}(k_1 \rho) \quad (3.11)$$

$$E_z^{scr(out)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m^{(out)} j^{-m} e^{-jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^{int})} J_m(k_1 \rho) \quad (3.12)$$

$$E_z^{thr(out)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m^{(out)} j^{-m} e^{-jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^{int})} H_m^{(2)}(k_2 \rho) \quad (3.13)$$

โดยที่ $E_0^{(out)}$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ กรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอก

$R_m^{(out)}$ และ $T_m^{(out)}$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นที่เดินทางออกจากทรงกระบอก อันดับ m ตามลำดับ

ส่วนคลื่นในแบบแผน TE ทั้งกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าและคลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์ สามารถแสดงได้ด้วยสมการลักษณะเดียวกับสมการ (3.8)-(3.10) และสมการ (3.11)-(3.13) ตามลำดับ การพิจารณาคลื่นทั้ง 2 แบบแผน รวมทั้งการวิเคราะห์หาลัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นทั้ง 2 กรณี ดำเนินตามลำดับต่อไปนี้

พิจารณาสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (3.14)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\mathbf{E} \quad (3.15)$$

กำหนดตัวดำเนินการ $\nabla = \nabla_s + \hat{a}_z \frac{\partial}{\partial z}$ และกำหนดดัชนี "s" หมายถึง องค์ประกอบในแนวแกนที่ตั้งฉากกับแกน z ดังนั้นถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้า \mathbf{E} และสนามแม่เหล็ก \mathbf{H} เป็นฟังก์ชันของค่าคงตัวการแพร่กระจาย k_ρ และเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง \mathbf{r} ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการตามลำดับ ดังนี้

$$\mathbf{E}(k_\rho, \mathbf{r}) = \mathbf{E}_s(k_\rho, \mathbf{r}) + \hat{a}_z E_z(k_\rho, \mathbf{r}) \quad (3.16)$$

$$\mathbf{H}(k_\rho, \mathbf{r}) = \mathbf{H}_s(k_\rho, \mathbf{r}) + \hat{a}_z H_z(k_\rho, \mathbf{r}) \quad (3.17)$$

แทนสมการ (3.16) และ (3.17) ในสมการ (3.14) และ (3.15) จะได้สมการตามลำดับ คือ

$$\left(\nabla_s + \hat{a}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \times (\mathbf{E}_s + \hat{a}_z E_z) = -j\omega\mu(\mathbf{H}_s + \hat{a}_z H_z) \quad (3.18)$$

$$\left(\nabla_s + \hat{a}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \times (\mathbf{H}_s + \hat{a}_z H_z) = j\omega\varepsilon(\mathbf{E}_s + \hat{a}_z E_z) \quad (3.19)$$

จัดรูปสมการ (3.18) และ (3.19) จะได้รูปแบบสมการ ตามลำดับดังนี้

$$\nabla_s \times \hat{a}_z E_z + \frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \mathbf{E}_s = -j\omega\mu\mathbf{H}_s \quad (3.20)$$

$$\nabla_s \times \hat{a}_z H_z + \frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \mathbf{H}_s = j\omega\varepsilon\mathbf{E}_s \quad (3.21)$$

พิจารณาเฉพาะสมการ (3.20) โดยนำ $\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z$ คูณแบบเวกเตอร์ทั้งสองข้างของสมการ จะได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times (\nabla_s \times \hat{a}_z E_z) + \frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \left(\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \mathbf{E}_s \right) = -j\omega\mu \left(\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \mathbf{H}_s \right) \quad (3.22)$$

แทนค่าพจน์ $\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \mathbf{H}_s$ ในสมการ (3.21) ลงในสมการ (3.22) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times (\nabla_s \times \hat{a}_z E_z) + \frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \left(\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \times \mathbf{E}_s \right) = -j\omega\mu (j\omega\epsilon \mathbf{E}_s - \nabla_s \times \hat{a}_z H_z) \quad (3.23)$$

จัดรูปสมการ (3.23) และใช้คุณสมบัติทางเวกเตอร์ จะได้

$$\begin{aligned} \omega^2 \mu\epsilon \mathbf{E}_s + j\omega\mu \nabla_s \times \hat{a}_z H_z &= \left(\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \cdot \hat{a}_z E_z \right) \nabla_s - \left(\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \cdot \nabla_s \right) \hat{a}_z E_z \\ &+ \left(\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \cdot \mathbf{E}_s \right) \frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z - \left(\frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \cdot \frac{\partial}{\partial z} \hat{a}_z \right) \mathbf{E}_s \end{aligned} \quad (3.24)$$

สมการ (3.24) สามารถลดรูปได้ดังสมการ (3.25)

$$\nabla_s \frac{\partial}{\partial z} E_z - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{E}_s = \omega^2 \mu\epsilon \mathbf{E}_s + j\omega\mu \nabla_s \times \hat{a}_z H_z \quad (3.25)$$

ทั้งนี้ถ้ากำหนดให้พจน์การแปรผันตามแกน z ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็น $e^{-jk_z z}$ หรือคลื่นเดินทางในแนวแกน $+z$ สมการ (3.25) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (3.26)

$$\nabla_s \frac{\partial}{\partial z} E_z + k_z^2 \mathbf{E}_s = \omega^2 \mu\epsilon \mathbf{E}_s + j\omega\mu \nabla_s \times \hat{a}_z H_z \quad (3.26)$$

สนามไฟฟ้าในแนวแกนที่ตั้งฉากกับแกน z จากสมการ (3.26) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{E}_s = \frac{1}{(\omega^2 \mu\epsilon - k_z^2)} \left[\nabla_s \frac{\partial}{\partial z} E_z + (j\omega\mu \hat{a}_z \times \nabla_s H_z) \right] \quad (3.27)$$

พิจารณาสมการ (3.27) สามารถหาสนามแม่เหล็กในแนวแกนที่ตั้งฉากกับแกน z ได้ โดยใช้ทฤษฎีบททวิภาพ (duality theorem) ซึ่งจะได้ตามสมการดังนี้

$$\mathbf{H}_s = \frac{1}{(\omega^2 \mu \varepsilon - k_z^2)} \left[\nabla_s \frac{\partial}{\partial z} H_z - (j\omega \varepsilon \hat{a}_z \times \nabla_s E_z) \right] \quad (3.28)$$

เนื่องจากผลเฉลยของคลื่นในพิกัดทรงกระบอก สามารถจัดได้ตามรูปแบบของสมการ (3.29) [26]

$$\psi(\mathbf{r}) = F_m(\rho) e^{jm\phi - jk_z z} \quad (3.29)$$

โดยกำหนดให้ $\psi(\mathbf{r})$ หมายถึง ฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการพิจารณาคลื่นในแนวแกนที่ตั้งฉากกับแกน z ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สามารถพิจารณาได้ด้วยสมการตามลำดับ ดังนี้

$$\mathbf{E}_s = \frac{1}{k_\rho^2} \left[-jk_z \nabla_s E_z + (j\omega \mu \hat{a}_z \times \nabla_s H_z) \right] \quad (3.30)$$

$$\mathbf{H}_s = \frac{1}{k_\rho^2} \left[-jk_z \nabla_s H_z - (j\omega \varepsilon \hat{a}_z \times \nabla_s E_z) \right] \quad (3.31)$$

โดยที่

$$k_\rho^2 = k^2 - k_z^2 \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} \nabla_s &= \hat{a}_\rho \frac{\partial}{\partial \rho} + \hat{a}_\phi \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \phi} \\ &= \hat{a}_\rho \frac{\partial}{\partial \rho} + \hat{a}_\phi \frac{j m}{\rho} \end{aligned} \quad (3.33)$$

พิจารณาสมการ (3.30) และ (3.31) สามารถหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน ϕ ได้ด้วยสมการตามลำดับ ดังนี้

$$E_\phi = \frac{1}{k_\rho^2} \left[-jk_z \left(\frac{j m}{\rho} \right) E_z + j\omega \mu \frac{\partial}{\partial \rho} H_z \right] \quad (3.34)$$

$$H_\phi = \frac{1}{k_\rho^2} \left[-jk_z \left(\frac{j m}{\rho} \right) H_z - j\omega \varepsilon \frac{\partial}{\partial \rho} E_z \right] \quad (3.35)$$

เนื่องจากฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในพิกัดทรงกระบอก สามารถจัดในรูปของฟังก์ชันเบสเซลหรือฟังก์ชันแองเกิลได้ ดังนั้นถ้าให้ E_z และ H_z เป็นฟังก์ชันของ

$B_m(k_\rho \rho)$ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ $B_m(k_\rho \rho)$ เป็นฟังก์ชันเบสเซลหรือฟังก์ชันแองเคิล อันดับ m และกำหนดให้ A_{E_z} และ A_{H_z} เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน z ตามลำดับ ดังนั้นสมการ (3.34) และ (3.35) สามารถแสดงได้ตามลำดับ ดังนี้

$$E_\phi = \frac{1}{k_\rho^2} \left[\frac{k_z m}{\rho} (A_{E_z} B_m(k_\rho \rho)) + j\omega \mu k_\rho (A_{H_z} B'_m(k_\rho \rho)) \right] \quad (3.36)$$

$$H_\phi = \frac{1}{k_\rho^2} \left[\frac{k_z m}{\rho} (A_{H_z} B_m(k_\rho \rho)) - j\omega \epsilon k_\rho (A_{E_z} B'_m(k_\rho \rho)) \right] \quad (3.37)$$

กำหนดให้เครื่องหมาย “'” คือ การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $B_m(k_\rho \rho)$ เทียบกับตัวแปร $k_\rho \rho$ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน ϕ ของสมการ (3.36) และ (3.37) สามารถจัดให้ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_\phi \\ H_\phi \end{bmatrix} = \frac{1}{k_\rho^2} \begin{bmatrix} mk_z B_m(k_\rho \rho) & j\omega \mu k_\rho B'_m(k_\rho \rho) \\ -j\omega \epsilon k_\rho B'_m(k_\rho \rho) & mk_z B_m(k_\rho \rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{E_z} \\ A_{H_z} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

การวิเคราะห์รูปแบบของสมการคลื่นในพิกัดทรงกระบอกตามที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาผลการกระเจิงคลื่นวิทยุจากแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น หรือแบบจำลองใดๆ ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกได้

3.2.2 เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นนั้น ก่อนอื่นจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลองพายุก่อน จึงสามารถหาคoefficient แม่เหล็กไฟฟ้าที่กระเจิงดังสมการ (3.9) และ (3.12) ต่อไปได้ การวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นนั้น พิจารณาได้ดังนี้

จะเห็นได้จากสมการ (3.30) และ (3.31) ว่ามีการเชื่อมโยง (coupling) กันระหว่างคลื่น TM และคลื่น TE ยกเว้นกรณีที่คลื่นตกกระทบบนตั้งฉากกับทรงกระบอก (แกน z) เนื่องจากความเป็นทวิภาวะ (duality) การแสดงสมการของทั้งคลื่น TM และ TE จึงสามารถทำได้พร้อมกันในรูปของสมการเมทริกซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นในแต่ละแบบแผนจะอยู่ในรูปของเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่าน ตามลำดับ

สำหรับการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นวิทยุจากแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น สามารถแยกพิจารณาออกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีคลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพายุ และกรณีคลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพายุ ซึ่งจะแยกพิจารณาในแต่ละกรณี ดังนี้

3.2.2.1 กรณีคลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพายุ

คลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพายุ หมายถึง คลื่นวิทยุที่เดินทางในทิศทางของแกน $-z$ ของพิกัดทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.1(ก) ดังนั้นขนาดของคลื่นในบริเวณ 2 ที่ฮาร์มอนิกอันดับ m ใดๆ จะแปรค่าตามสมการ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{2z} \\ H_{2z} \end{bmatrix} = J_m(k_{2\rho}\rho) \bar{\mathbf{A}}_2 \quad (3.39)$$

$$\bar{\mathbf{A}}_i = \begin{bmatrix} A_{E_{iz}} \\ A_{H_{iz}} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

โดยที่ E_{iz}, H_{iz} คือ องค์ประกอบในแนวแกน z ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ โดยที่ดัชนี “ i ” แสดงถึงลำดับที่ของบริเวณที่พิจารณา

$\bar{\mathbf{A}}_i$ คือ เมทริกซ์แอมพลิจูดของคลื่นในบริเวณ i

$A_{E_{iz}}, A_{H_{iz}}$ คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางแกน z ของบริเวณ i ตามลำดับ

ทั้งนี้ค่าของสนามที่ฮาร์มอนิกอันดับ m ใดๆ ในทุกๆ บริเวณ i นอกจากจะมีขนาดเป็นดังสมการ (3.39) ตามที่กล่าวแล้ว แต่ยังขึ้นกับพจน์ $e^{jm(\phi-\phi^m)}$ และพจน์ $e^{-jk_z z}$ ด้วย แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ก็จะเพิกเฉยต่อการพิจารณาพจน์ทั้งสองดังกล่าว

โดยทั่วไปแล้วในบริเวณ 2 นอกจากมีคลื่นที่เดินทางเข้าหาทรงกระบอกแล้ว ยังมีคลื่นที่สะท้อนจากขอบเขตชั้นของทรงกระบอกของคลื่นที่เดินทางเข้าหาทรงกระบอกด้วย ซึ่งทิศทางการสะท้อนจะอยู่ในแนวแกน $+z$ ของพิกัดทรงกระบอก ดังนั้นถ้าพิจารณารวมกันของคลื่นทั้งสองส่วน จะได้สนามในบริเวณ 2 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{2z} \\ H_{2z} \end{bmatrix} = H_m^{(2)}(k_{2\rho}\rho) \bar{\mathbf{R}}_{m(2,1)} \bar{\mathbf{A}}_2 + J_m(k_{2\rho}\rho) \bar{\mathbf{A}}_2 \quad (3.41)$$

โดยกำหนดให้ $\bar{\mathbf{R}}_{m(i,j)}$ คือ เมทริกซ์การสะท้อนอันดับ m ของบริเวณ i ไปยังบริเวณ j โดยที่คลื่นจะสะท้อนกลับมายังบริเวณ i

สนามในบริเวณ 1 เป็นคลื่นที่มาจาก การส่งผ่านของคลื่นที่เดินทางเข้าในบริเวณ 2 ซึ่งพิจารณาได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{1z} \\ H_{1z} \end{bmatrix} = J_m(k_{1\rho}\rho) \bar{\mathbf{T}}_{m(2,1)} \bar{\mathbf{A}}_2 \quad (3.42)$$

โดยกำหนดให้ $\bar{\mathbf{T}}_{m(i,j)}$ คือ เมทริกซ์การส่งผ่านอันดับ m ของบริเวณ i ไปยังบริเวณ j โดยที่คลื่นจะถูกส่งผ่านเข้าไปยังบริเวณ j

การพิจารณาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กองค์ประกอบในแนวแกน ϕ ของบริเวณ 2 และบริเวณ 1 ถ้าพิจารณาสมการ (3.36) – (3.38) ประกอบในการวิเคราะห์ จะได้ระบบสมการในแกน ϕ ของทั้งสองบริเวณ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{2\phi} \\ H_{2\phi} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{2\rho}\rho) \bar{\mathbf{R}}_{m(2,1)} \bar{\mathbf{A}}_2 + \bar{\mathbf{J}}_m(k_{2\rho}\rho) \bar{\mathbf{A}}_2 \quad (3.43)$$

$$\begin{bmatrix} E_{1\phi} \\ H_{1\phi} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{J}}_m(k_{1\rho}\rho) \bar{\mathbf{T}}_{m(2,1)} \bar{\mathbf{A}}_2 \quad (3.44)$$

อาศัยสมการ (3.43) และ (3.44) เพื่อง่ายต่อการพิจารณา แทน $\bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(\cdot)$ และ $\bar{\mathbf{J}}_m(\cdot)$ ด้วย $\bar{\mathbf{B}}_m(\cdot)$ เมื่อกำหนดให้

$$\bar{\mathbf{B}}_m(k_{i\rho}\rho) = \frac{1}{k_{i\rho}^2} \begin{bmatrix} mk_{iz} B_m(k_{i\rho}\rho) & j\omega\mu_i k_{i\rho}\rho B'_m(k_{i\rho}\rho) \\ -j\omega\varepsilon_i k_{i\rho}\rho B'_m(k_{i\rho}\rho) & mk_{iz} B_m(k_{i\rho}\rho) \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

โดยที่ B_m คือ $H_m^{(2)}$ หรือ J_m ขึ้นกับการกำหนดเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{B}}_m$ ว่าเป็น $\bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}$ หรือ $\bar{\mathbf{J}}_m$ ตามลำดับ

การวิเคราะห์หาค่าเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านตามสมการ (3.41) - (3.44) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด 2×2 จำเป็นต้องพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ประกอบ ดังนั้นถ้ากำหนดให้ $\rho = a$ เป็นขอบเขตระหว่างบริเวณ 2 กับบริเวณ 1 จะได้ระบบสมการตามลำดับ ดังนี้

$$\left[H_m^{(2)}(k_{2\rho}a) \bar{\mathbf{R}}_{m(2,1)} + J_m(k_{2\rho}a) \bar{\mathbf{I}} \right] \bar{\mathbf{A}}_2 = \left[J_m(k_{1\rho}a) \bar{\mathbf{T}}_{m(2,1)} \right] \bar{\mathbf{A}}_2 \quad (3.46)$$

$$\left[\bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{2\rho}a) \bar{\mathbf{R}}_{m(2,1)} + \bar{\mathbf{J}}_m(k_{2\rho}a) \right] \bar{\mathbf{A}}_2 = \left[\bar{\mathbf{J}}_m(k_{1\rho}a) \bar{\mathbf{T}}_{m(2,1)} \right] \bar{\mathbf{A}}_2 \quad (3.47)$$

โดยที่ $\bar{\mathbf{I}}$ คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด 2×2

อาศัยสมการ (3.46) และสมการ (3.47) สามารถหาเมทริกซ์การสะท้อนและการส่งผ่านจากบริเวณ 2 ไปยังบริเวณ 1 ได้ตามลำดับ ดังนี้

$$\bar{\mathbf{R}}_{m(2,1)} = \bar{\mathbf{D}}_{m(2,1)}^{-1} \left[J_m(k_{1\rho}a) \bar{\mathbf{J}}_m(k_{2\rho}a) - J_m(k_{2\rho}a) \bar{\mathbf{J}}_m(k_{1\rho}a) \right] \quad (3.48)$$

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(2,1)} = \bar{\mathbf{D}}_{m(2,1)}^{-1} \left[H_m^{(2)}(k_{2\rho}a) \bar{\mathbf{J}}_m(k_{2\rho}a) - J_m(k_{2\rho}a) \bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{2\rho}a) \right] \quad (3.49)$$

โดยที่

$$\bar{\mathbf{D}}_{m(2,1)} = \left[H_m^{(2)}(k_{2\rho}a) \bar{\mathbf{J}}_m(k_{1\rho}a) - J_m(k_{1\rho}a) \bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{2\rho}a) \right] \quad (3.50)$$

3.2.2.2 กรณีคลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพวย

คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพวย หมายถึง คลื่นวิทยุที่เดินทางในทิศทางของแกน $+z$ ของพิกัดทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.1(ข) โดยที่คลื่นในบริเวณ 2 จะเป็นคลื่นที่ถูกส่งผ่านของคลื่นที่เดินทางออกจากบริเวณ 1 ในขณะที่คลื่นของบริเวณ 1 จะมีทั้งคลื่นในเส้นทางออกจากทรงกระบอกและคลื่นที่สะท้อนจากขอบเขตระหว่างบริเวณ 1 กับบริเวณ 2 ของคลื่นที่เดินทางออก ดังนั้นในการพิจารณาคคลื่นในบริเวณ 1 จะต้องรวมคลื่นทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน โดยที่คลื่นในบริเวณ 1 และบริเวณ 2 ของกรณีคลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพวยนั้น สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยสมการตามลำดับดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{1z} \\ H_{1z} \end{bmatrix} = J_m(k_{1\rho}\rho)\bar{\mathbf{R}}_{m(1,2)}\bar{\mathbf{A}}_1 + H_m^{(2)}(k_{1\rho}\rho)\bar{\mathbf{A}}_1 \quad (3.51)$$

$$\begin{bmatrix} E_{2z} \\ H_{2z} \end{bmatrix} = H_m^{(2)}(k_{2\rho}\rho)\bar{\mathbf{T}}_{m(1,2)}\bar{\mathbf{A}}_1 \quad (3.52)$$

การหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กองค์ประกอบในแนวแกน ϕ ของทั้งสองบริเวณ สามารถทำได้เช่นเดียวกับกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพวย ดังนั้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กองค์ประกอบในแนวแกน ϕ ของทั้งสองบริเวณ 1 และบริเวณ 2 สำหรับกรณีคลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพวย สามารถแสดงได้ด้วยสมการตามลำดับ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{1\phi} \\ H_{1\phi} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{J}}_m(k_{1\rho}\rho)\bar{\mathbf{R}}_{m(1,2)}\bar{\mathbf{A}}_1 + \bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{1\rho}\rho)\bar{\mathbf{A}}_1 \quad (3.53)$$

$$\begin{bmatrix} E_{2\phi} \\ H_{2\phi} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{2\rho}\rho)\bar{\mathbf{T}}_{m(1,2)}\bar{\mathbf{A}}_1 \quad (3.54)$$

ผลจากสมการ (3.51) - (3.54) ทำให้สามารถหาเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านได้เช่นเดียวกับกรณีแรก ถ้ากำหนดเงื่อนไขขอบเขต $\rho = a$ ที่ขอบเขตระหว่างบริเวณ 1 กับบริเวณ 2 ดังนั้นที่ขอบเขตจะได้ระบบสมการตามลำดับ ดังนี้

$$\left[J_m(k_{1\rho}a)\bar{\mathbf{R}}_{m(1,2)} + H_m^{(2)}(k_{1\rho}a)\bar{\mathbf{I}} \right] \bar{\mathbf{A}}_1 = \left[H_m^{(2)}(k_{2\rho}a)\bar{\mathbf{T}}_{m(1,2)} \right] \bar{\mathbf{A}}_1 \quad (3.55)$$

$$\left[\bar{\mathbf{J}}_m(k_{1\rho}a)\bar{\mathbf{R}}_{m(1,2)} + \bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{1\rho}a) \right] \bar{\mathbf{A}}_1 = \left[\bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{2\rho}a)\bar{\mathbf{T}}_{m(1,2)} \right] \bar{\mathbf{A}}_1 \quad (3.56)$$

สามารถเขียนเมทริกซ์การสะท้อนและการส่งผ่านจากบริเวณ 1 ไปยังบริเวณ 2 จากสมการ (3.55) และสมการ (3.56) ได้ดังนี้

$$\bar{\mathbf{R}}_{m(1,2)} = \bar{\mathbf{D}}_{m(1,2)}^{-1} \left[H_m^{(2)}(k_{1\rho}a)\bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{2\rho}a) - H_m^{(2)}(k_{2\rho}a)\bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{1\rho}a) \right] \quad (3.57)$$

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(1,2)} = \bar{\mathbf{D}}_{m(1,2)}^{-1} \left[H_m^{(2)}(k_{1\rho}a)\bar{\mathbf{J}}_m(k_{1\rho}a) - J_m(k_{1\rho}a)\bar{\mathbf{H}}_m^{(2)}(k_{1\rho}a) \right] \quad (3.58)$$

อาศัยสมการ (3.57) และ (3.58) จะได้ว่าเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{D}}_{m(1,2)} = \bar{\mathbf{D}}_{m(2,1)}$

3.2.3 การคำนวณอัตราส่วนของคลื่นกระเจิงต่อคลื่นตกกระทบของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

สัญญาณคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่ไม่ต่อเนื่องคงที่ หรือเดินทางผ่านขอบเขตของตัวกลางที่แตกต่างกัน จะทำให้มีสัญญาณบางส่วนสะท้อนกลับได้ โดยสัญญาณที่สะท้อนกลับนั้นจะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน หรืออัตราส่วนของคลื่นกระเจิงต่อคลื่นตกกระทบของบริเวณขอบเขตตัวกลางที่แตกต่างกัน การพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของตัวกลางที่เป็นทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ทั้งกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพายุ และกรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพายุ สามารถทำได้โดยอาศัยเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านตามลำดับ ดังนี้

เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านอันดับ m ของขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ใดๆ ทั้งกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพายุ และกรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพายุ สามารถเขียนได้ตามลำดับดังนี้

$$\bar{\mathbf{R}}_{m(i,j)} = \begin{bmatrix} R_{m(i,j)}^{11} & R_{m(i,j)}^{12} \\ R_{m(i,j)}^{21} & R_{m(i,j)}^{22} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(i,j)} = \begin{bmatrix} T_{m(i,j)}^{11} & T_{m(i,j)}^{12} \\ T_{m(i,j)}^{21} & T_{m(i,j)}^{22} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

ค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน z ที่กระเจิงจากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ใดๆ ออกมาสู่บริเวณภายนอกสุด (บริเวณ n) ของทรงกระบอกพายุ ทั้งกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาและกรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกพายุ สามารถหาได้ด้วยสมการตามลำดับ ดังนี้

$$E_{z(i,j)}^{sct} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^{-m} e^{-jk_{nz}z} e^{jm(\phi-\phi^{im})} H_m^{(2)}(k_{n\rho}\rho) R_{m(i,j)}^E \quad (3.61)$$

$$H_{z(i,j)}^{sct} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^{-m} e^{-jk_{nz}z} e^{jm(\phi-\phi^{im})} H_m^{(2)}(k_{n\rho}\rho) R_{m(i,j)}^H \quad (3.62)$$

โดยที่ $R_{m(i,j)}^E$ และ $R_{m(i,j)}^H$ มีค่าดังสมการตามลำดับ ดังนี้

$$R_{m(i,j)}^E = \tilde{R}_{m(i,j)}^{11} E_0 \cos(\alpha) \sin(\theta^{int}) + \tilde{R}_{m(i,j)}^{12} H_0 \sin(\alpha) \sin(\theta^{int}) \quad (3.63)$$

$$R_{m(i,j)}^H = \tilde{R}_{m(i,j)}^{21} E_0 \cos(\alpha) \sin(\theta^{int}) + \tilde{R}_{m(i,j)}^{22} H_0 \sin(\alpha) \sin(\theta^{int}) \quad (3.64)$$

เมื่อกำหนดให้

$R_{m(i,j)}^E$ และ $R_{m(i,j)}^H$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมอันดับ m จากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ออกมาสู่บริเวณนอกสุด (บริเวณ n) ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ

$\tilde{R}_{m(i,j)}^{11}, \tilde{R}_{m(i,j)}^{12}, \tilde{R}_{m(i,j)}^{21}$ และ $\tilde{R}_{m(i,j)}^{22}$ คือ สมาชิกของเมทริกซ์ $\tilde{\mathbf{R}}_{m(i,j)}$ ซึ่งจะพิจารณาต่อไป

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมอันดับ m จากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ใดๆ ออกมาสู่บริเวณนอกสุด ทั้งกรณีของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังที่กล่าวข้างต้น ต้องแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีคลื่นเดินทางเข้าหาแกนพายุหรือกรณี $i > j$ และกรณีคลื่นเดินทางออกจากแกนพายุหรือกรณี $i < j$ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.3.1 กรณีคลื่นเดินทางเข้าหาแกนพายุ (กรณี $i > j$)

กรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาแกนพายุ การหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมอันดับ m จากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ใดๆ ออกมาสู่บริเวณนอกสุด ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยกำหนด $i > j$ พิจารณาได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} R_{m(i,j)}^E \\ R_{m(i,j)}^H \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{R}}_{m(i,j)} \bar{\mathbf{A}}_n = \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} \bar{\mathbf{R}}_{m(i,i-1)} \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} \bar{\mathbf{A}}_n \quad (3.65)$$

กำหนดให้

$$\bar{\mathbf{A}}_n = \begin{bmatrix} A_{E_{nz}} \\ A_{H_{nz}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \cos(\alpha) \sin(\theta^{int}) \\ H_0 \sin(\alpha) \sin(\theta^{int}) \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{m(i,j)} = \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} \bar{\mathbf{R}}_{m(i,i-1)} \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} = \begin{bmatrix} \tilde{R}_{m(i,j)}^{11} & \tilde{R}_{m(i,j)}^{12} \\ \tilde{R}_{m(i,j)}^{21} & \tilde{R}_{m(i,j)}^{22} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

โดยที่

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} = \bar{\mathbf{T}}_{m(i+1,i)} \bar{\mathbf{T}}_{m(i+1)}^{in} \quad (3.68)$$

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} = \bar{\mathbf{T}}_{m(i+1)}^{out} \bar{\mathbf{T}}_{m(i+1)} \quad (3.69)$$

พิจารณาสมการ (3.67) ถึงสมการ (3.69) เมื่อ $i \geq n$ จะได้ว่า

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} = \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

โดยที่ $\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in}$ คือ เมทริกซ์การส่งผ่านรวมอันดับ m จากบริเวณนอกสุด n เข้าไปสู่บริเวณ i
 $\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out}$ คือ เมทริกซ์การส่งผ่านรวมอันดับ m จากบริเวณ i ออกไปสู่บริเวณนอกสุด n
 $\bar{\mathbf{R}}_{m(i,j)}$ คือ เมทริกซ์การสะท้อนรวมอันดับ m จากระหว่างบริเวณ (i, j) ออกไปสู่บริเวณนอกสุด n

3.2.3.2 กรณีเคลื่อนเดินทางออกจากแกนพายุ (กรณี $i < j$)

การหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมอันดับ m จากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ใดๆ ออกมาสู่บริเวณนอกสุด ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในกรณีที่เคลื่อนเดินทางออกจากแกนพายุ จะเริ่มพิจารณาจากเริ่มต้นตั้งแต่ที่เคลื่อนเดินทางเข้าหาทรงกระบอกพายุ ทะลุผ่านแกนพายุ และเดินทางออกจากทรงกระบอกพายุ โดยจะเกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณเมื่อเคลื่อนเดินทางออกและผ่านขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ใดๆ ของทรงกระบอกพายุ โดยกำหนด $i < j$ นั้น สามารถหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} R_{m(i,j)}^E \\ R_{m(i,j)}^H \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{R}}_{m(i,j)} \bar{\mathbf{A}}_n = \bar{\mathbf{T}}_{m(1)}^{out} \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} \bar{\mathbf{R}}_{m(i,i+1)} \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} \bar{\mathbf{T}}_{m(1)}^{in} \bar{\mathbf{A}}_n \quad (3.71)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\bar{\mathbf{R}}_{m(i,j)} = \bar{\mathbf{T}}_{m(1)}^{out} \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} \bar{\mathbf{R}}_{m(i,i+1)} \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} \bar{\mathbf{T}}_{m(1)}^{in} \quad (3.72)$$

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} = \bar{\mathbf{T}}_{m(i-1)}^{in} \bar{\mathbf{T}}_{m(i,i-1)} \quad (3.73)$$

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} = \bar{\mathbf{T}}_{m(i-1,i)} \bar{\mathbf{T}}_{m(i-1)}^{out} \quad (3.74)$$

พิจารณาสมการ (3.72) ถึงสมการ (3.74) เมื่อ $i \leq 1$ จะได้ว่า

$$\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in} = \bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

โดยที่ $\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{in}$ คือ เมทริกซ์การส่งผ่านรวมอันดับ m จากบริเวณ i เข้าไปสู่บริเวณในสุด (บริเวณ 1)

$\bar{\mathbf{T}}_{m(i)}^{out}$ คือ เมทริกซ์การส่งผ่านรวมอันดับ m จากบริเวณในสุด ออกไปสู่บริเวณ i

การพิจารณาค่าสนามไฟฟ้ากระเจิงขององค์ประกอบในแนวแกนที่ตั้งฉากกับแกน z ของพิกัดทรงกระบอก ทำได้โดยการแทนสมการ (3.61) และ (3.62) ลงในสมการ (3.30) ดังนั้น สนามไฟฟ้ากระเจิงทุกๆ องค์ประกอบ สามารถแสดงได้ด้วยสมการตามลำดับ ดังนี้

$$E_{\rho(i,j)}^{sct} \stackrel{\rho \rightarrow \infty}{\simeq} \frac{-k_{nz}}{k_{n\rho}} \sqrt{\frac{2j}{\pi k_{n\rho} \rho}} e^{-j(k_{n\rho} \rho + k_{nz} z)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{jm(\phi - \phi^{int})} R_{m(i,j)}^E \quad (3.76)$$

$$E_{\phi(i,j)}^{sct} \stackrel{\rho \rightarrow \infty}{\simeq} \frac{\omega \mu}{k_{n\rho}} \sqrt{\frac{2j}{\pi k_{n\rho} \rho}} e^{-j(k_{n\rho} \rho + k_{nz} z)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{jm(\phi - \phi^{int})} R_{m(i,j)}^H \quad (3.77)$$

$$E_{z(i,j)}^{sct} \stackrel{\rho \rightarrow \infty}{\simeq} \sqrt{\frac{2j}{\pi k_{n\rho} \rho}} e^{-j(k_{n\rho} \rho + k_{nz} z)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{jm(\phi - \phi^{int})} R_{m(i,j)}^E \quad (3.78)$$

โดยที่ $E_{\rho(i,j)}^{sct}$, $E_{\phi(i,j)}^{sct}$ และ $E_{z(i,j)}^{sct}$ คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน ρ แกน ϕ และแกน z ที่กระเจิงจากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ออกสู่บริเวณนอกสุด ของทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นตามลำดับ

สามารถหาอัตราส่วนระหว่างขนาดของสนามไฟฟ้ากระเจิงต่อสนามไฟฟ้าตกกระทบจากสมการ (3.76) – (3.78) ได้ด้วยสมการดังนี้

$$\frac{|\mathbf{E}_{(i,j)}^{sct}|}{|\mathbf{E}^{int}|} = \sqrt{\frac{2}{\pi k_{n\rho} \rho}} \left\{ \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j[m(\phi - \phi^{int})]} \left(\tilde{R}_{m(i,j)}^{11} \cos(\alpha) + \frac{\tilde{R}_{m(i,j)}^{12}}{\eta_0} \sin(\alpha) \right) \right]^2 + \eta_0^2 \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j[m(\phi - \phi^{int})]} \left(\tilde{R}_{m(i,j)}^{21} \cos(\alpha) + \frac{\tilde{R}_{m(i,j)}^{22}}{\eta_0} \sin(\alpha) \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.79)$$

สมการ (3.79) เป็นสมการการกระเจิงคลื่นวิทยุจากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ใดๆ ของทรงกระบอกพายุ ออกมาสู่บริเวณนอกลที่สุด โดยสัมพันธ์กับค่าของตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ ดังนี้

$$g = \sqrt{\frac{\pi k_{np} \rho}{2}} \frac{|\mathbf{E}_{(i,j)}^{sct}|}{|\mathbf{E}^{int}|} \quad (3.80)$$

นิยาม g คือ ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ

ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุตามสมการ (3.80) สามารถแสดงได้ในรูปองค์ประกอบทั้ง 4 องค์ประกอบของเมทริกซ์ $\tilde{\mathbf{R}}_{m(i,j)}$ หรือเมทริกซ์การสะท้อนรวมอันดับ m ระหว่างบริเวณ (i, j) ออกไปสู่บริเวณนอกลที่สุด ได้ดังนี้

$$g = \left\{ \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j[m(\phi-\phi^{int})]} \left(\tilde{R}_{m(i,j)}^{11} \cos(\alpha) + \frac{\tilde{R}_{m(i,j)}^{12}}{\eta_0} \sin(\alpha) \right) \right]^2 + \eta_0^2 \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j[m(\phi-\phi^{int})]} \left(\tilde{R}_{m(i,j)}^{21} \cos(\alpha) + \frac{\tilde{R}_{m(i,j)}^{22}}{\eta_0} \sin(\alpha) \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.81)$$

โดยที่ η_0 คือ อิมพีแดนซ์ของอวกาศว่าง

α คือ มุมระหว่างเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบ กับรอยตัดระหว่างระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ที่ชี้ทิศทางการแพร่กระจายกับแกนของพายุ (แกน z) และระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบกับสนามแม่เหล็กตกกระทบ ซึ่งพิจารณาได้ในรูปที่

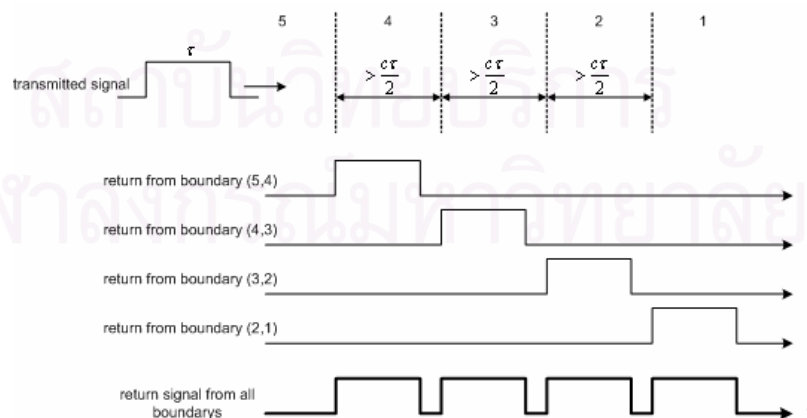
3.3

ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุในสมการ (3.81) กรณีที่มุม α เท่ากับ 0° คลื่นที่ตกกระทบจะเป็นคลื่นในแบบแผน TM เท่านั้น ส่วนในกรณีที่มุม α เท่ากับ 90° คลื่นตกกระทบก็จะเป็นคลื่นในแบบแผน TE

3.3 แนวคิดของการวิเคราะห์ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ โดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ในกรณีที่ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุลักษณะเป็นพัลส์และมีความกว้างพัลส์จำกัด

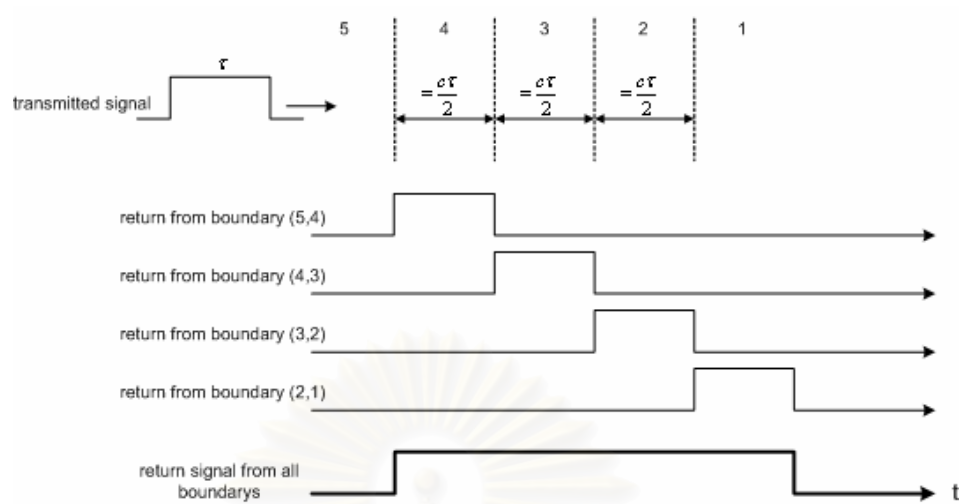
ในระบบเรดาร์ทุกๆ ไป การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อตรวจจับเป้าหรือวัตถุใดๆ นั้น สัญญาณที่ส่งมีลักษณะเป็นขบวนพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์แคบๆ ซึ่งมีเหตุผลเพื่อให้สามารถตรวจแยกวัตถุที่อยู่ใกล้ๆ กันได้ ดังสมการ (2.13) แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถส่งสัญญาณที่มีความกว้างพัลส์แคบมากๆ ได้ เพราะทำให้ความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ของการใช้งานซึ่งมีอยู่จำกัด มีค่าสูงเกินไป ส่งผลให้สัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ในระบบเรดาร์ไปรบกวนคลื่นวิทยุของระบบอื่นๆ ได้ อีกทั้งจะทำให้ระดับของสัญญาณรบกวนในระบบเรดาร์มีค่าสูง ซึ่งอาจจะทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากเป้าได้ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุตามการเปลี่ยนแปลงค่าของความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ส่ง พิจารณาได้ดังนี้

พิจารณาสมการ (3.80) พบว่า คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นนั้น ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ (g) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่า $|\mathbf{E}_{(i,j)}^{sct}|$ หรือขนาดของสนามไฟฟ้าที่กระเจิงจากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ออกสู่บริเวณนอกสุด เป็นหลัก ดังนั้นถ้าระยะห่างของขอบเขตในแต่ละบริเวณ หรือความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ส่งจากระบบเรดาร์มีค่าแตกต่างกันแล้ว จะทำให้ค่าของสนามไฟฟ้าที่กระเจิงจากขอบเขตระหว่างบริเวณ (i, j) ออกสู่บริเวณนอกสุดในแต่ละเวลาแตกต่างกันด้วย ส่งผลให้ตัวประกอบการสะท้อนจะมีค่าแตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของขอบเขต หรือความกว้างของสัญญาณพัลส์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ดังนี้

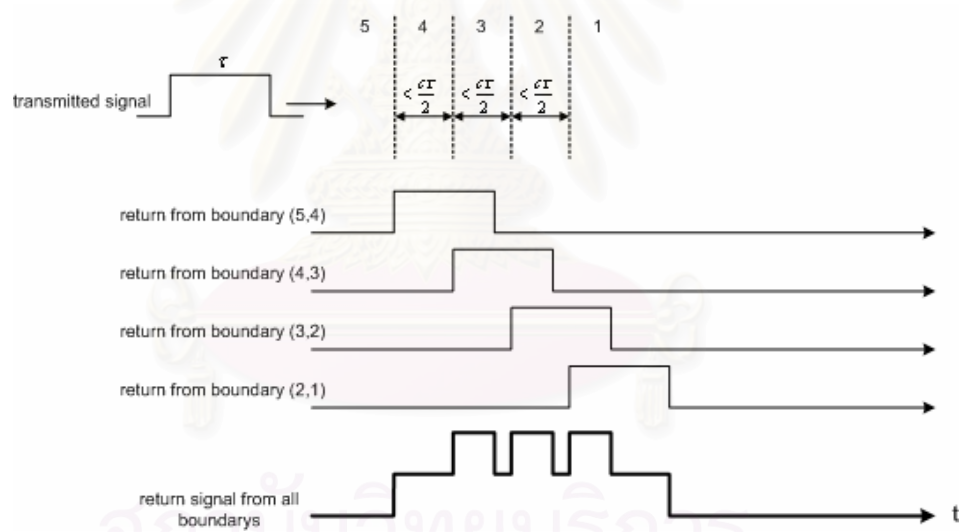


(ก) กรณีเมื่อระยะห่างของขอบเขตมากกว่า $cr/2$

รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระเจิงตามการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของขอบเขต

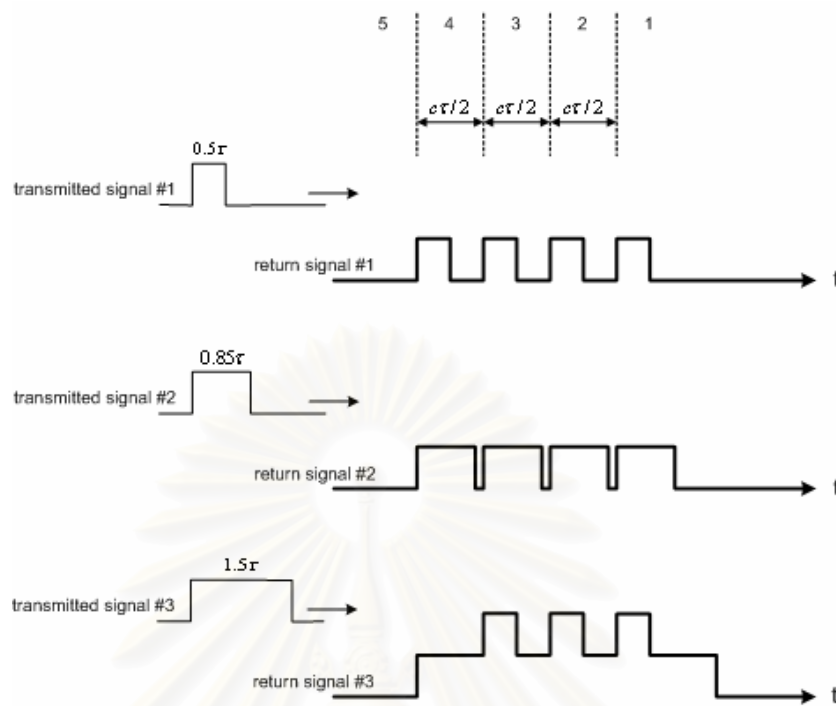


(ข) กรณีเมื่อระยะห่างของขอบเขตเท่ากับ $c\tau/2$



(ค) กรณีเมื่อระยะห่างของขอบเขตน้อยกว่า $c\tau/2$

รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระเจิงตามการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของขอบเขต (ต่อ)



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระเจิงตามการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์

รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 เป็นแนวคิดของการกระเจิงคลื่นวิทยุจากแบบจำลองพายุโดยใช้ระบบพัลส์เรดาร์ ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่สะท้อนกลับนั้นจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป ตามการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างของขอบเขตในแต่ละชั้นของแบบจำลองพายุ หรือเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ส่งจากระบบเรดาร์

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ โดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างของขอบเขตของทรงกระบอกพายุ และการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ใช้ส่งนั้น ผลที่ได้จะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

บทที่ 4

การตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนด้วยระบบเรดาร์

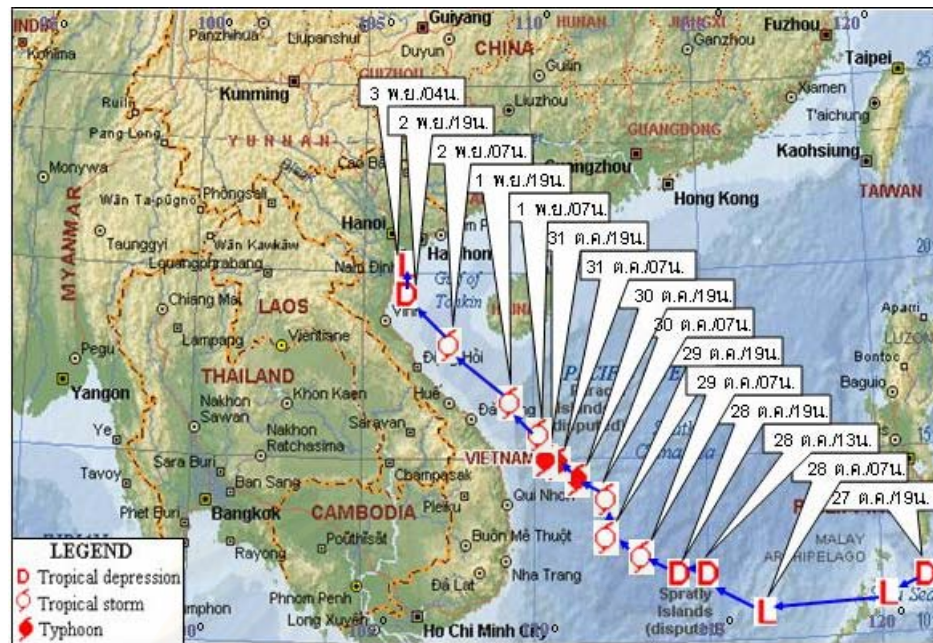
ความนำ

การตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ และเพื่อนำลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5 สำหรับการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนด้วยระบบเรดาร์ จำเป็นต้องสร้างระบบเรดาร์เพื่อใช้ในการตรวจวัด โดยสถานีเรดาร์ที่สร้างขึ้นได้ติดตั้งไว้ ณ อุทยานแห่งชาติเขานัน จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นบริเวณที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งสถานีเรดาร์ในประเทศไทย เพื่อตรวจจับพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัวบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้แล้วเคลื่อนตัวมายังบริเวณตอนใต้ของประเทศเวียดนามหรือปลายแหลมญวน

รายละเอียดต่างๆ ในบทนี้จะแยกกล่าวออกเป็นหัวข้อๆ โดยหัวข้อแรกจะกล่าวถึงข้อมูลของพายุหมุนเขตร้อนที่ได้ตรวจวัดคลื่นกระเจิง ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด การปรับเทียบอุปกรณ์ และการวิเคราะห์ทั้งกำลังเบื้องต้น กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงการปรับเทียบระบบเรดาร์กับเป้าอ้างอิง หัวข้อที่ 4 กล่าวถึงผลการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวน ณ บริเวณที่ตั้งสถานีเรดาร์ หัวข้อที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์เนื่องจากการส่งสัญญาณกำลังสูงเพื่อการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ หัวข้อที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์กำลังรับของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน และหัวข้อสุดท้ายกล่าวถึงลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนที่ได้จากการตรวจวัด รายละเอียดต่างๆ ของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

4.1 บริเวณการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน

พายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัวและเคลื่อนตัวมายังบริเวณที่สามารถทดสอบตรวจวัดสัญญาณกระเจิงเมื่อส่งคลื่นวิทยุเข้าไปยังพายุโดยใช้ระบบเรดาร์ได้นั้น เกิดขึ้น 2 ครั้ง โดยครั้งแรก พายุก่อตัวในทะเลแถบบริเวณประเทศฟิลิปปินส์แล้วเคลื่อนตัวไปทางตะวันตกเฉียงเหนือขนานกับชายฝั่งของประเทศเวียดนามเข้าสู่บริเวณอ่าวตังเกี๋ย ดังรูปที่ 4.1 ครั้งที่สอง เป็นพายุที่ก่อตัวบริเวณเดียวกันกับครั้งแรกแต่จะเคลื่อนตัวไปทางตะวันตกจนถึงบริเวณทะเลแถบตอนใต้ของประเทศเวียดนาม ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งพายุหมุนเขตร้อนที่ตรวจวัดสัญญาณกระเจิงโดยใช้ระบบเรดาร์ ครั้งที่ 1 [27]



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งพายุหมุนเขตร้อนที่ตรวจวัดสัญญาณกระเจิงโดยใช้ระบบเรดาร์ ครั้งที่ 2 [27]

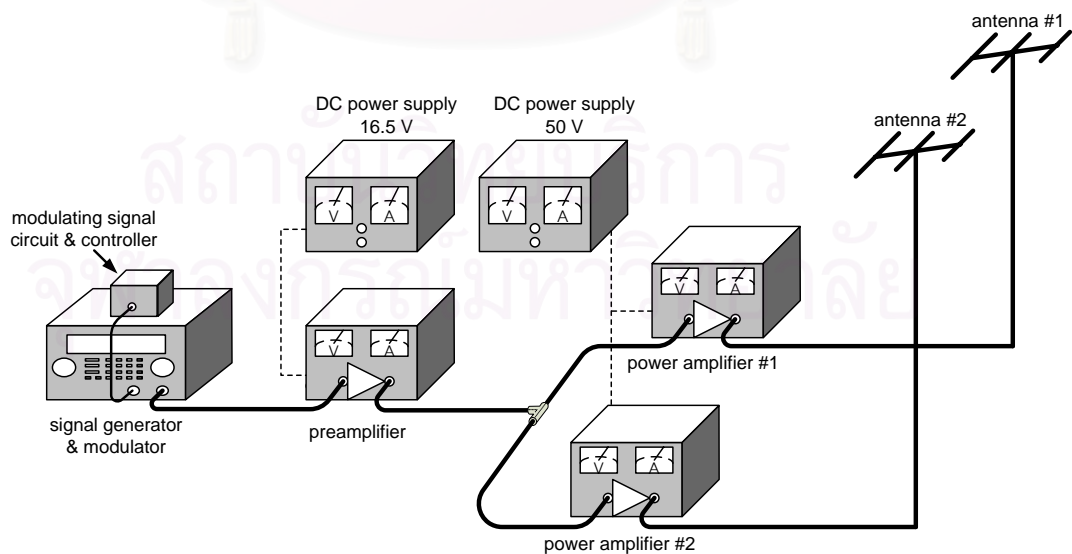
รูปที่ 4.1 แสดงแนวการเคลื่อนตัวของพายุหมุนเขตร้อน โดยพายุลูกนี้มีช่วงเวลาของการก่อตัวจนถึงการสลายตัวรวม 8 วัน คือเริ่มตั้งแต่วันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2548 ถึงวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 ในช่วงเวลาดังกล่าวได้ตรวจวัดการกระเจิงของคลื่นวิทยุ ด้วยการส่งสัญญาณไปยังพายุโดยใช้ระบบเรดาร์ที่สร้างขึ้น พายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นในครั้งนี้มีกำลังแรงจนเป็นพายุไต้ฝุ่น และมีชื่อว่า ไคตั๊ก

รูปที่ 4.2 แสดงแนวการเคลื่อนตัวของพายุหมุนเขตร้อน โดยพายุลูกนี้มีช่วงเวลาของการก่อตัวจนถึงการสลายตัวรวม 5 วัน คือเริ่มตั้งแต่วันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2548 ถึงวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2548 แต่พายุที่เกิดขึ้นในครั้งไม่ได้กำหนดชื่อของพายุไว้ เนื่องจากความรุนแรงของพายุในครั้งนี้อยู่ในระดับชั้นพายุดีเปรสชันเท่านั้น (กฎการตั้งชื่อให้กับพายุพิจารณาที่ภาคผนวก ก) ในครั้งนี้ได้มีการตรวจวัดการกระเจิงของคลื่นวิทยุ ด้วยการส่งสัญญาณไปยังพายุโดยใช้ระบบเรดาร์ เช่นเดียวกับในครั้งแรก

4.2 อุปกรณ์ การปรับเทียบอุปกรณ์ และการวิเคราะห์หีบกำลังเบื้องต้น

รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการติดตั้งอุปกรณ์ การปรับเทียบอุปกรณ์ ทั้งภาคส่งและภาครับ รวมถึงการวิเคราะห์หีบประมาณกำลังเบื้องต้นเพื่อการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ มีดังต่อไปนี้

4.2.1 อุปกรณ์ภาคส่ง

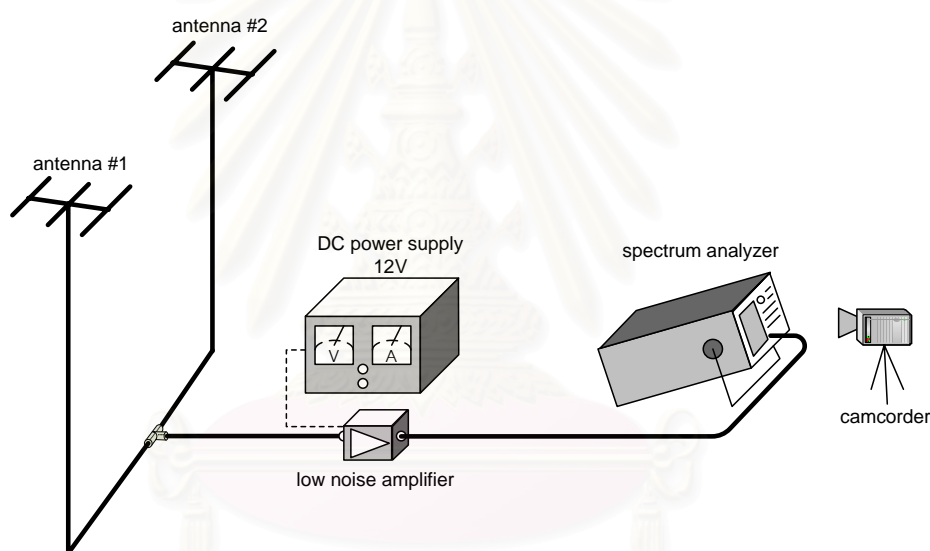


รูปที่ 4.3 ผังอุปกรณ์ภาคส่ง

อุปกรณ์ภาคส่งที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณ วงจรสร้างสัญญาณมอดูเลต เครื่องขยายสัญญาณ สายอากาศ และ อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น การจัดวางของชุดอุปกรณ์ภาคส่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.3

4.2.2 อุปกรณ์ภาครับ

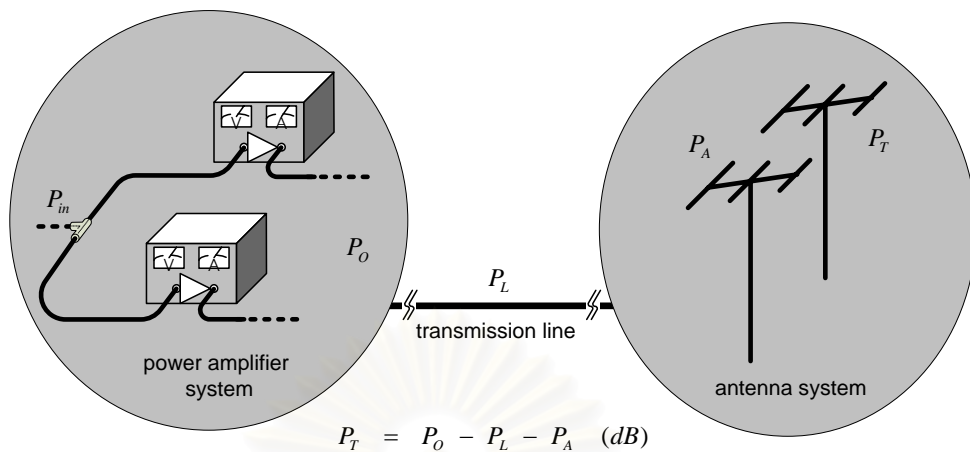
อุปกรณ์ภาครับประกอบด้วยสายอากาศจำนวน 2 ตัว วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ และกล้องวิดีโอ การจัดวางของชุดอุปกรณ์ภาครับมีลักษณะดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผังอุปกรณ์ภาครับ

4.2.3 การปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง

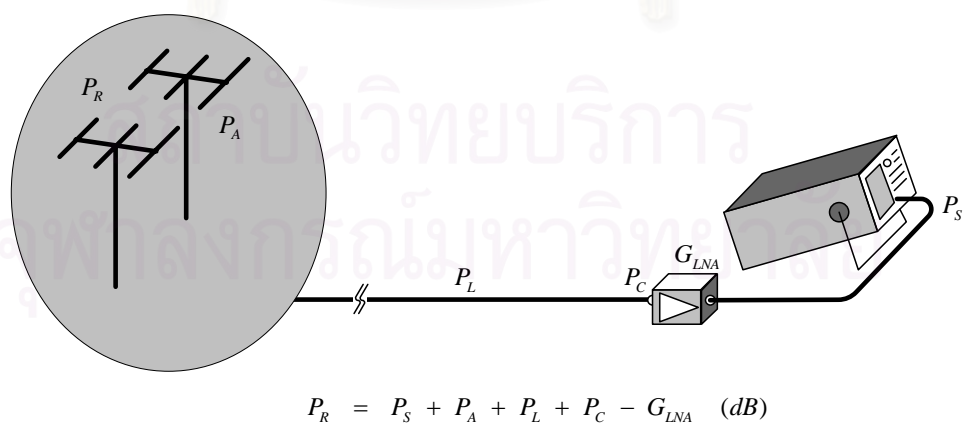
ในรูปที่ 4.3 วงจรขยายกำลังสูงเชื่อมต่อโดยตรงกับสายส่งและสายอากาศ ดังนั้นการปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่งจึงมีเพียงการชดเชยเฉพาะการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของสายส่ง และการสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสายอากาศเพียงเท่านั้น โดยผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่งแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง

4.2.4 การปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ

กำลังรับที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่เป็นกำลังรับที่เข้าของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่เท่านั้น ไม่ใช่เป็นกำลังรับที่สายอากาศรับได้ การหาค่ากำลังสัญญาณที่สายอากาศรับได้จึงต้องชดเชยการสูญเสียเนื่องจากสายส่ง หัวต่อ (connectors) และการสูญเสียเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสายอากาศก่อน จึงสามารถได้กำลังสัญญาณที่สายอากาศรับได้จริง โดยผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ

4.2.5 การวิเคราะห์หึ่งบกำลังเบื้องต้น

ปัจจัยหลักในการเลือกสถานีรับสัญญาณอยู่ที่กำลังรับจะต้องมีค่ามากกว่ากำลังสัญญาณรบกวนไม่น้อยกว่าค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (SNR) ที่กำหนดไว้ โดยกำลังสัญญาณรบกวนจำเป็นที่จะต้องได้ข้อมูลจากสถานที่จริง ขณะที่กำลังสัญญาณรับประมาณจากการวิเคราะห์หึ่งบกำลังเบื้องต้นดังนี้

เนื่องจากการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุได้ใช้ระบบเรดาร์ในการตรวจวัด และเป็นเรดาร์ชนิดที่สถานีส่งและสถานีรับอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน หรือเรียกว่า monostatic radar ดังนั้นกำลังสัญญาณที่สายอากาศรับได้ จึงสามารถหาได้โดยอาศัยสมการเรดาร์ดังนี้

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad (4.1)$$

โดยที่ P_T คือ กำลังที่สายอากาศส่ง

P_R คือ กำลังที่สายอากาศรับ

G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

G_R คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

R คือ ระยะทางระหว่างตัวกระเจิง (พายุ) กับเรดาร์

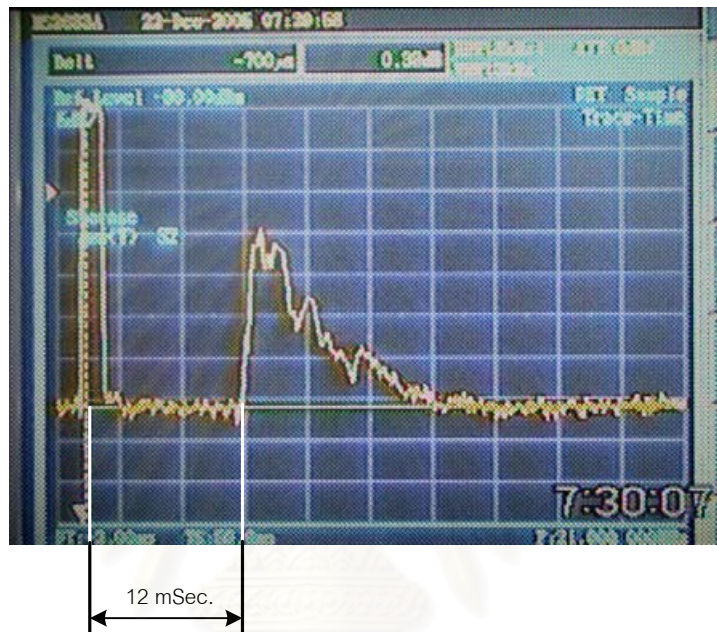
σ คือ ภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ของพายุ

กำลังสัญญาณรับที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (4.1) จะนำไปใช้หากำลังที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่อ่านค่าได้ตามกรรมวิธีการปรับเทียบอุปกรณ์ในหัวข้อที่ผ่านมา ประกอบกับค่าระดับสัญญาณรบกวนที่วัดจากสถานที่จริง จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการตัดสินใจว่าสถานีนั้นเหมาะต่อการติดตั้งสถานีเรดาร์เพื่อตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากพายุได้หรือไม่

4.3 การเปรียบเทียบระบบเรดาร์กับเป้าอ้างอิง

การตรวจวัดสัญญาณวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้ระบบเรดาร์ที่ได้จัดสร้างขึ้น จำเป็นต้องมีการเทียบระบบเรดาร์ก่อนที่จะนำผลข้อมูลที่ตรวจวัดได้มาใช้งานจริง การเทียบระบบเรดาร์ก็เพื่อต้องการปรับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดให้มีความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง การเทียบระบบเรดาร์ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังนี้

งานวิจัยนี้ตรวจวัดคลื่นกระเจิงเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงภายในวันที่ไม่มีการก่อตัวของพายุหมุนเขตร้อน ซึ่งตรวจวัดในวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2548 โดยหันสายอากาศของระบบเรดาร์ไปยังบริเวณทิศตะวันออกเฉียงหรือมุมที่ 110° จากทิศเหนือ และสถานีเรดาร์ติดตั้ง ณ บริเวณเดียวกับการติดตั้งเพื่อใช้ตรวจวัดสัญญาณวิทยุที่กระเจิงจากพายุ (อุทยานแห่งชาติเขานัน จังหวัดนครศรีธรรมราช) ซึ่งคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัดพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.7

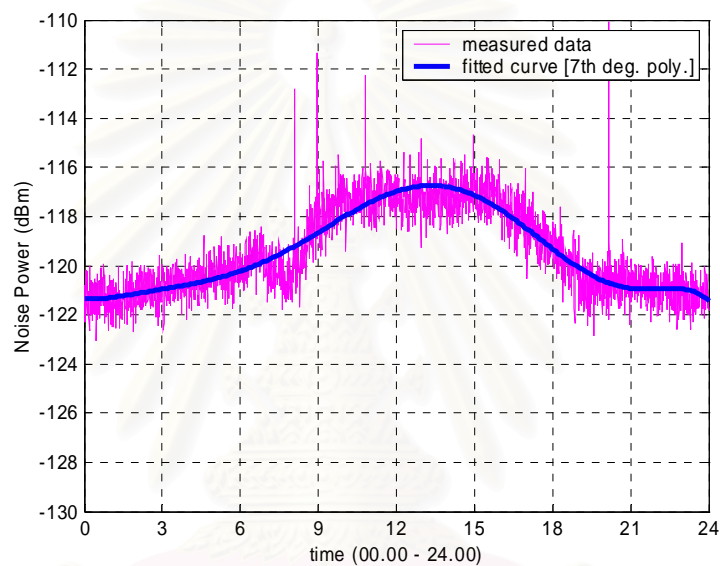


รูปที่ 4.7 สัญญาณกระเจิงเพื่อใช้อ้างอิงในการเปรียบเทียบ

รูปที่ 4.7 เป็นสัญญาณที่ตรวจวัดในวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2548 เวลาประมาณ 7.30 น. เพื่อใช้ในการอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน ซึ่งสัญญาณอ้างอิงนี้ได้จากการตรวจวัดคลื่นกระเจิงโดยหันสายอากาศไปยังมุม 110° จากทิศเหนือในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งแนวการกระเจิงคลื่นวิทยุตรงกับบริเวณตอนกลางของเกาะบอร์เนียว (Borneo) โดยระยะเวลาในการปรากฏของสัญญาณกระเจิงประมาณ 12 mSec. ซึ่งวัดจากเวลาที่มีการส่งสัญญาณสูงสุดไปยังเวลาที่เริ่มปรากฏสัญญาณคลื่นกระเจิง หรือปรับเป็นระยะในแนวราบโดยกำหนดให้สัญญาณหักเหจากชั้นบรรยากาศที่ความสูง 300 กิโลเมตรคำนวณได้ประมาณเท่ากับ 1700 กิโลเมตร และระยะในแนวราบที่ได้จากการวัดโดยใช้โปรแกรม Google Earth ประมาณเท่ากับ 1620 กิโลเมตร โดยผลต่างระหว่างค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดโดยใช้โปรแกรม Google Earth จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดของสัญญาณที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนได้ต่อไป

4.4 ผลการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวน ณ บริเวณที่จะติดตั้งสถานีเรดาร์

ระดับกำลังสัญญาณรบกวนของบริเวณที่จะเลือกเป็นสถานที่ที่จะติดตั้งสถานีเรดาร์ ต้องมีค่าระดับที่ต่ำกว่าระดับกำลังสัญญาณที่ต้องการ (สัญญาณที่กระเจิงจากพายุ) ซึ่งพิจารณาเบื้องต้นตามหลักการวิเคราะห์หึ่งบประมาณกำลัง ดังนั้นการวัดระดับกำลังสัญญาณรบกวนของบริเวณที่จะเลือกเป็นสถานที่ที่จะติดตั้งสถานีเรดาร์จึงเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับผลการวัดสัญญาณรบกวนในรอบวัน ณ บริเวณที่จะเลือกติดตั้งสถานีเรดาร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.8



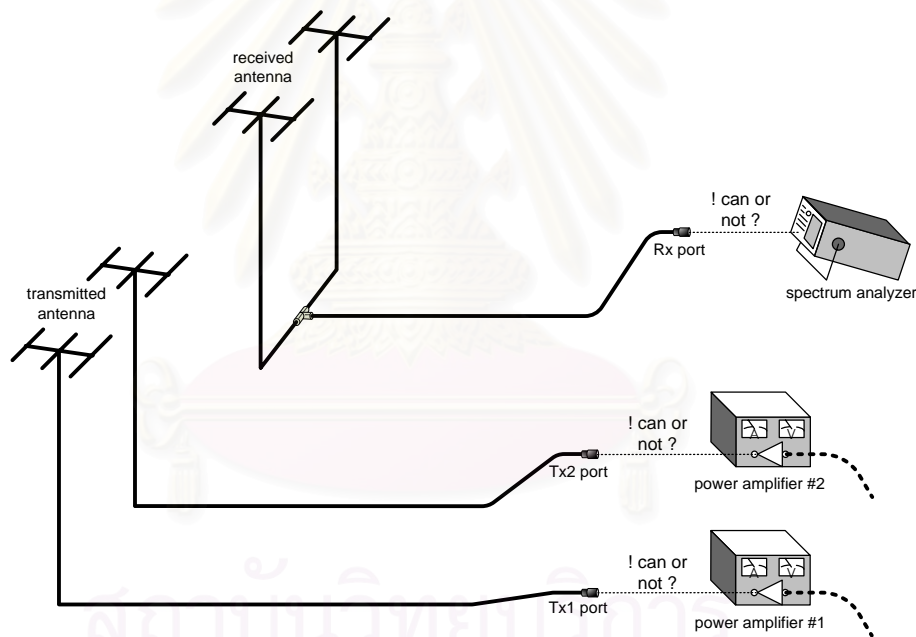
รูปที่ 4.8 ระดับสัญญาณรบกวนเฉลี่ยในรอบวัน ณ บริเวณสถานีเรดาร์

ผลการวัดระดับกำลังสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลารอบวัน ระดับกำลังสัญญาณรบกวนไม่คงที่ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิหรือกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้น ณ บริเวณสถานีเรดาร์ โดยในช่วงเวลาประมาณ 09.00 น. – 17.00 น. มีระดับกำลังสัญญาณรบกวนเฉลี่ยสูงกว่า -119 dBm และในช่วงเวลาประมาณ 19.00 น. – 06.00 น. มีระดับกำลังสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่ำกว่า -120 dBm แต่ทั้งนี้ค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ตรวจวัดได้ขึ้นกับการกำหนดค่าความกว้างแถบความถี่ของเครื่องรับ (RBW) ด้วย สำหรับผลการวัดดังกล่าวกำหนด RBW ไว้ที่ 3 kHz

4.5 การทดสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์เนื่องจากการส่งสัญญาณกำลังสูง

การทดสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบเรดาร์เพื่อการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการทดลองมีราคาสูง เช่น เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ เครื่องขยายสัญญาณกำลังสูง เป็นต้น ถ้าเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์เหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการทำงานและไม่สามารถที่จะทดลองต่อไปได้

การทดสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะพิจารณาทั้งส่วนของภาคส่งและภาครับของระบบเรดาร์ แต่ก่อนอื่นต้องพิจารณาการติดตั้งสายอากาศของภาคส่งและภาครับ รวมถึงอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศที่อาจจะได้รับความเสียหายจากการส่งสัญญาณกำลังสูงของระบบเรดาร์ก่อน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผงการเชื่อมต่อสายอากาศกับอุปกรณ์ที่อาจจะได้รับความเสียหายจากการส่งสัญญาณกำลังสูง

ระบบสายอากาศที่ใช้ในการทดลองทั้งภาคส่งและภาครับเป็นสายอากาศยาก็-อูดะ 3 องค์ประกอบ ที่มีลักษณะเรียงต่อกันเป็นแถวลำดับ ดังรูปที่ 4.9 โดยภาคส่งมีสายอากาศจำนวน 2 ชุด แต่ละชุดต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณกำลังสูงโดยตรง ส่วนภาครับมีสายอากาศจำนวน 2 ชุด ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่โดยตรง (กรณีไม่มีการติดตั้งวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ) เช่นกัน ดังนั้นการส่งสัญญาณกำลังสูงของสายอากาศส่งในแต่ละชุดจะมีผลโดยตรง

กับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับชุดของสายอากาศที่เหลือทั้งในส่วนของภาคส่งและภาครับ โดยเหตุเกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการแผ่พลังงาน (radiation coupling) ซึ่งสามารถแยกพิจารณาตามรูปที่ 4.9 ในแต่ละกรณีได้ดังนี้

1. การแผ่พลังงานจากสายอากาศ Tx1 จะมีผลโดยตรงกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศ Tx2 และชุดสายอากาศ Rx

2. การแผ่พลังงานจากสายอากาศ Tx2 จะมีผลโดยตรงกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศ Tx1 และชุดสายอากาศ Rx

3. การแผ่พลังงานจากชุดสายอากาศ Tx จะมีผลโดยตรงกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับชุดสายอากาศ Rx

ผลทดสอบการส่งกำลังงาน และวัดกำลังของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศหรือชุดสายอากาศในแต่ละกรณีดังกล่าวข้างต้น พิจารณาได้ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการรับ-ส่งกำลังงานเพื่อทดสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อโดยตรงกับสายอากาศ

สายอากาศส่ง	สายอากาศรับ	กำลังส่ง		กำลังรับ (dBm)	ผลต่างของกำลังส่งกับกำลังรับ (dB)
		watt	dBm		
Tx1	Tx2	2	33.01	-0.58	33.59
		7	38.45	4.60	33.85
คำนวณ : ถ้า Tx1 ส่ง 300 W (54.77 dBm)					
Tx2 จะรับกำลังงานได้ $54.77-33.59 = 21.18$ dBm (132.22 mW)					
Tx2	Tx1	2	33.01	-0.90	33.91
		7	38.45	4.40	34.05
คำนวณ : ถ้า Tx2 ส่ง 300 W (54.77 dBm)					
Tx1 จะรับกำลังงานได้ $54.77-33.91 = 20.86$ dBm (121.90 mW)					
Tx1	Rx	2	33.01	-21.88	54.89
		7	38.45	-16.42	54.87
		40	46.02	-8.40	54.42
คำนวณ : ถ้า Tx1 ส่ง 300 W (54.77 dBm)					
Rx จะรับกำลังงานได้ $54.77-54.42 = 0.35$ dBm (1.08 mW)					

Tx2	Rx	2	33.01	-32.17	65.18
		7	38.45	-26.80	65.25
		40	46.02	-19.20	65.22
<p>คำนวณ : ถ้า Tx2 ส่ง 300 W (54.77 dBm)</p> <p>Rx จะรับกำลังงานได้ 54.77-65.18 = -10.41 dBm (0.09 mW)</p>					
Tx	Rx	5	36.99	-18.12	55.11
		10	40.00	-15.25	55.25
		65	48.13	-6.93	55.06
<p>คำนวณ : ถ้า Tx ส่ง 600 W (57.78 dBm)</p> <p>Rx จะรับกำลังงานได้ 57.78-55.06 = 2.72 dBm (1.87 mW)</p>					

ผลการวัดสัญญาณในแต่ละส่วนของระบบสายอากาศที่ใช้ในระบบเรดาร์ดังตารางที่ 4.1 ผนวกกับผลการคำนวณกรณีที่กำลังส่งมีค่าสูงสุด สรุปว่าผลการเชื่อมโยงของกำลังงานจะไม่ทำให้อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อโดยตรงกับสายอากาศเกิดความเสียหาย เพราะค่ากำลังงานที่เกิดจากการเชื่อมโยงมีผลในระดับที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถเชื่อมอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับสายอากาศโดยตรงได้

4.6 การวิเคราะห์กำลังรับของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน

กำลังรับของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนแสดงได้เช่นเดียวกับสมการ (4.1) โดยที่ σ หรือภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ของพายุ มีความสัมพันธ์กับสนามกระเจิงและสนามตกกระทบดังนี้ [28]

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}^{sct}|^2}{|\mathbf{E}^{int}|^2} \right] \quad (4.2)$$

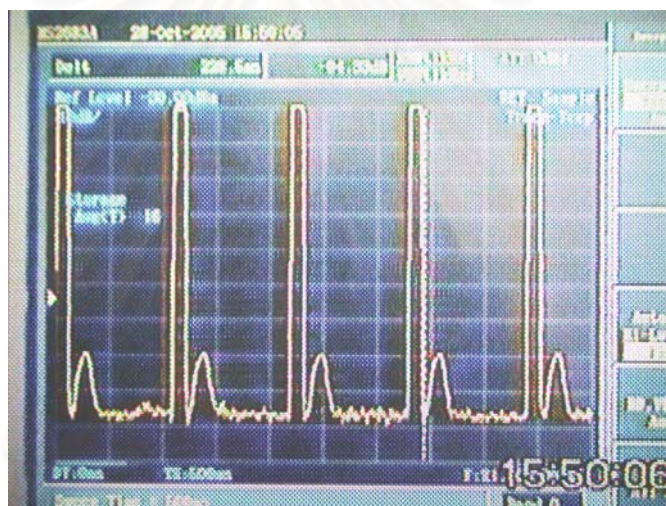
โดยที่ \mathbf{E}^{sct} และ \mathbf{E}^{int} คือ สนามกระเจิงและสนามตกกระทบตามลำดับ โดยสนามทั้งสองมีความสัมพันธ์กับตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ g ดังสมการ (4.3)

$$\frac{|\mathbf{E}^{sct}|}{|\mathbf{E}^{int}|} = \sqrt{\frac{2}{\pi k_\rho \rho}} g \quad (4.3)$$

โดยตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ g เป็นผลที่ได้จากกรรมวิธีวิเคราะห์ดังที่กล่าวในบทที่ 3 และมีค่าดังสมการ (3.81)

4.7 ลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนที่ได้จากการตรวจวัด

การส่งสัญญาณวิทยุเพื่อการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพายุทำได้โดยการส่งสัญญาณจากระบบเรดาร์ สัญญาณที่ส่งจากเรดาร์มีลักษณะเป็นขบวนพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างพัลส์แคบๆ และระยะห่างระหว่างพัลส์ต้องมากกว่าระยะเวลาของสัญญาณที่จะกระเจิงกลับเมื่อกระทบกับเป้า หลักการนี้พิจารณาได้ดังรูปที่ 1.2 เพื่อทดสอบหลักการดังกล่าวจึงทำการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากเป้าอ้างอิงเพื่อแสดงลักษณะสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะสัญญาณคลื่นส่งและคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัด

รูปที่ 4.10 เป็นลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดจากเป้าอ้างอิง ปรากฏว่าให้ผลสอดคล้องตามหลักการในรูปที่ 1.2 โดยแกนในแนวนอนและแนวตั้งแสดงถึง เวลา และแอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ ตามลำดับ จะเห็นจากรูปว่าสัญญาณที่วัดได้มีทั้งสัญญาณกระเจิง (พัลส์ที่มีแอมพลิจูดต่ำ) และสัญญาณส่งซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยง (coupling) ระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่งของระบบเรดาร์ ข้อดีที่เกิดการเชื่อมโยงของสายอากาศในระบบเรดาร์ที่ใช้ในการทดลองคือ สามารถอ้างอิงเวลาการปรากฏของสัญญาณกระเจิงเทียบกับสัญญาณส่งได้



รูปที่ 4.11 ลักษณะสัญญาณกระเจิงกรณีสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์สูง

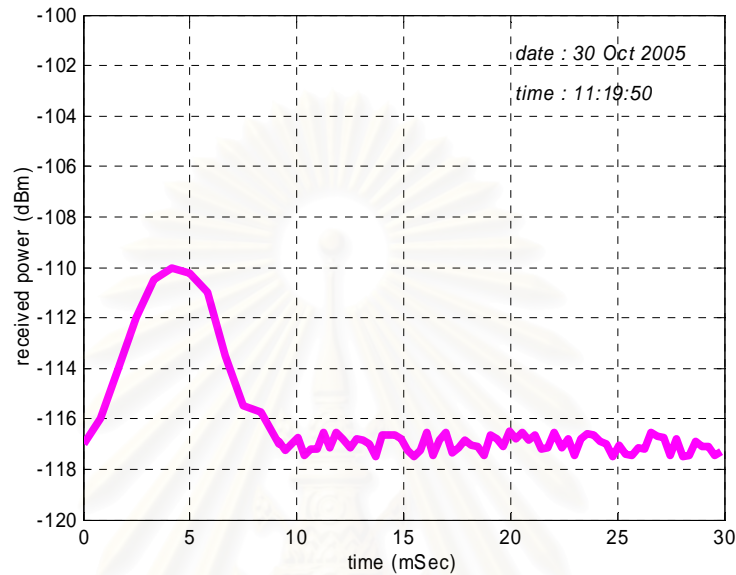
รูปที่ 4.11 เป็นสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดจากเป้าอ้างอิง จะเห็นว่าสัญญาณกระเจิงไม่สามารถแสดงลักษณะของสัญญาณในช่วงเวลาขาขึ้นได้ เพราะช่วงเวลาคว้างพัลส์ของสัญญาณส่งมากกว่าระยะเวลาการกระเจิงของสัญญาณจึงทำให้รายละเอียดของสัญญาณกระเจิงในช่วงเวลาขาขึ้นขาดหายไป

ดังนั้นจึงสรุปว่า การกำหนดค่าความกว้างพัลส์และระยะห่างระหว่างพัลส์ของสัญญาณส่งต้องเหมาะสมกับเวลาการปรากฏของสัญญาณกระเจิงจึงสามารถแสดงรายละเอียดของสัญญาณกระเจิงได้ชัดเจน

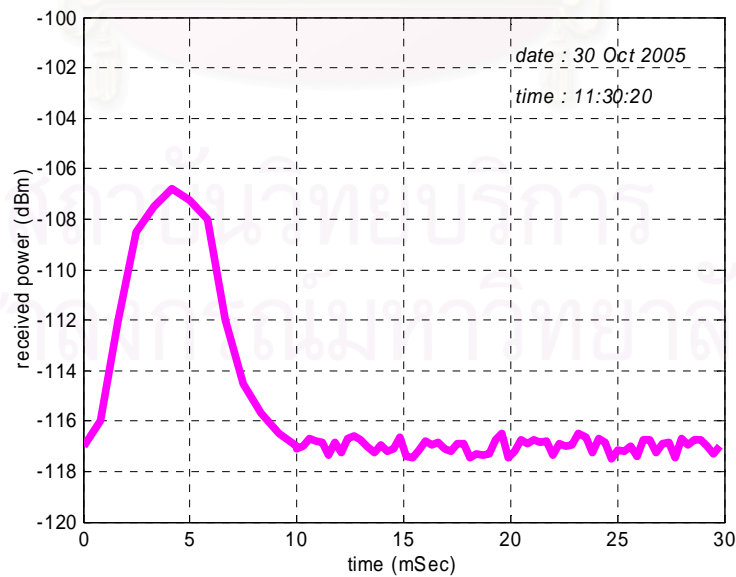
ผลของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ได้จากการตรวจวัดแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ ส่วนของสัญญาณกระเจิงจากวัตถุที่ต้องการ ส่วนของสัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมโยง และส่วนของสัญญาณรบกวน ดังนั้นการแสดงผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุดังที่จะกล่าวต่อไปนี้จะแสดงเฉพาะส่วนสัญญาณกระเจิงจากวัตถุที่ต้องการเท่านั้น ส่วนผลของสัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมโยงและสัญญาณรบกวนอื่นๆ จะไม่นำมาพิจารณา และเนื่องจากสัญญาณรบกวนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นการแสดงผลค่าสัญญาณรบกวนในที่นี้จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม โดยระดับค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนสุ่ม (random noise) เท่ากับค่าที่ตรวจวัดได้จริง ซึ่งการตรวจวัดคลื่นกระเจิงในทางปฏิบัติสามารถบรรเทาปัญหาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวนได้ โดยการปรับค่าความกว้างแถบความถี่ของเครื่องรับให้เหมาะสมกับค่าสัญญาณกระเจิงที่ตรวจวัดได้ สำหรับผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ทั้ง 2 ครั้ง จะแยกพิจารณาผลการตรวจวัดในแต่ละครั้งดังนี้

4.7.1 ผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนครั้งที่ 1

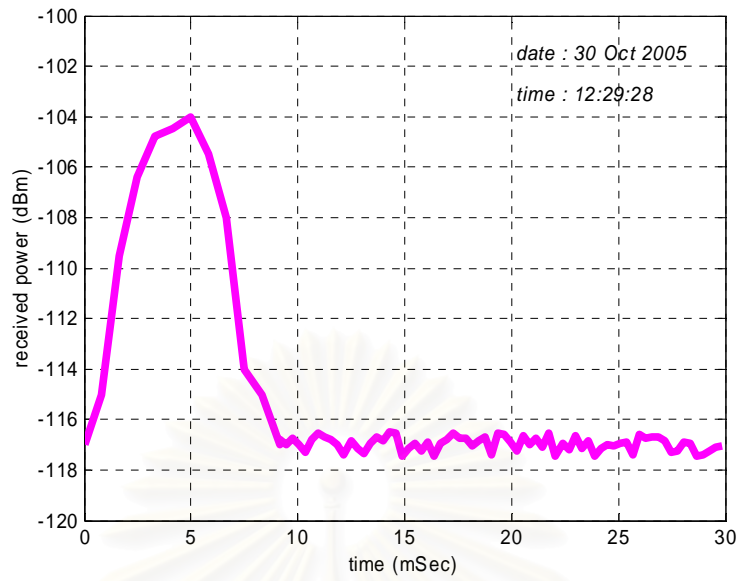
ผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุที่เกิดขึ้นระหว่างวันที่ 27 ตุลาคม 2548 ถึงวันที่ 3 พฤศจิกายน 2548 ตามเวลาต่างๆ แสดงได้ดังนี้



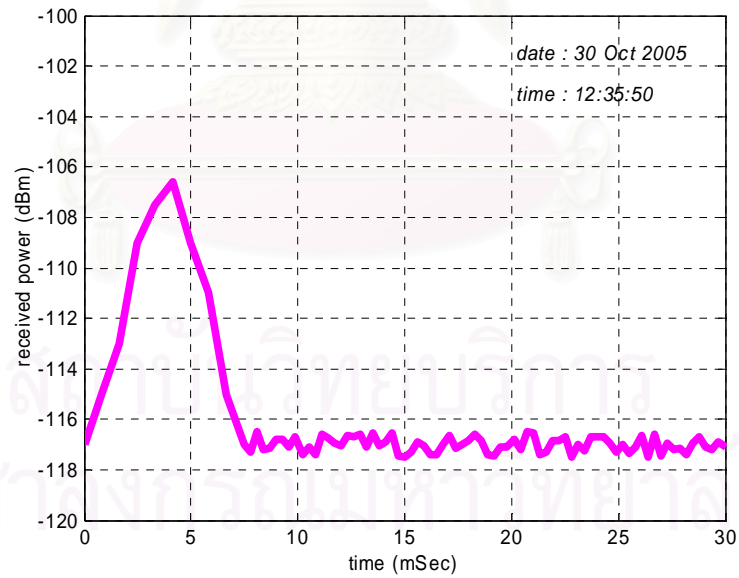
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 11:19:50 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



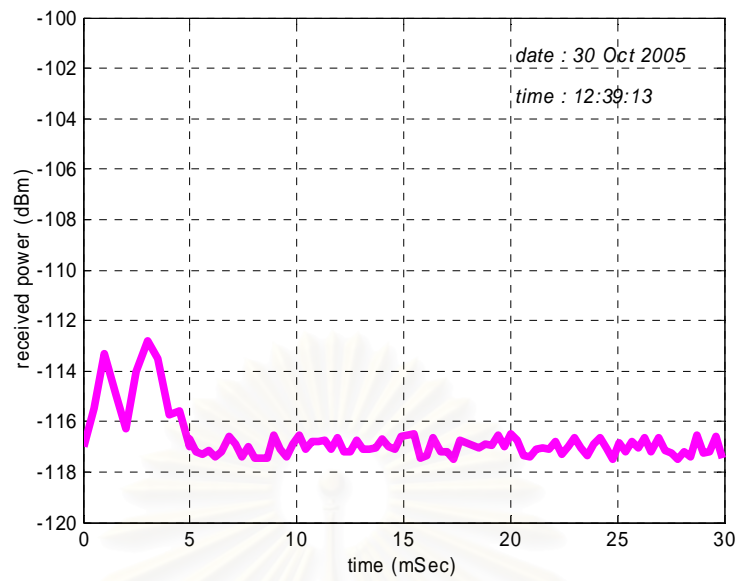
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48 เวลา 11:30:20 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



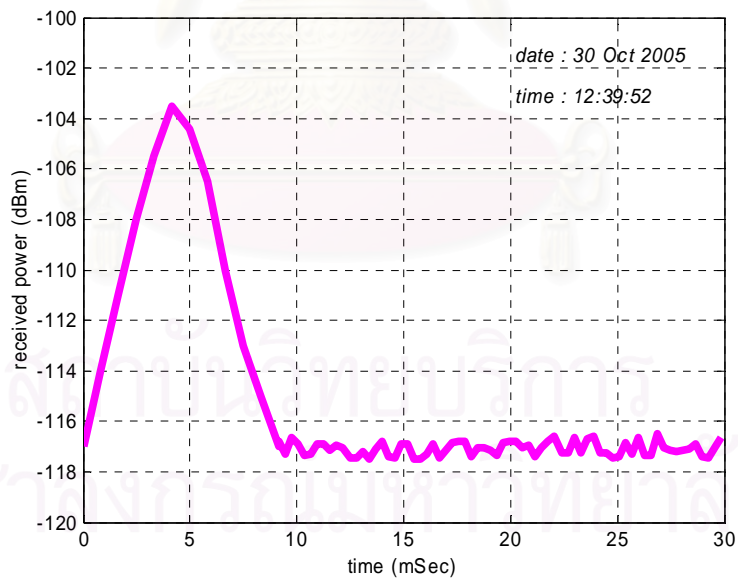
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 12:29:28 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



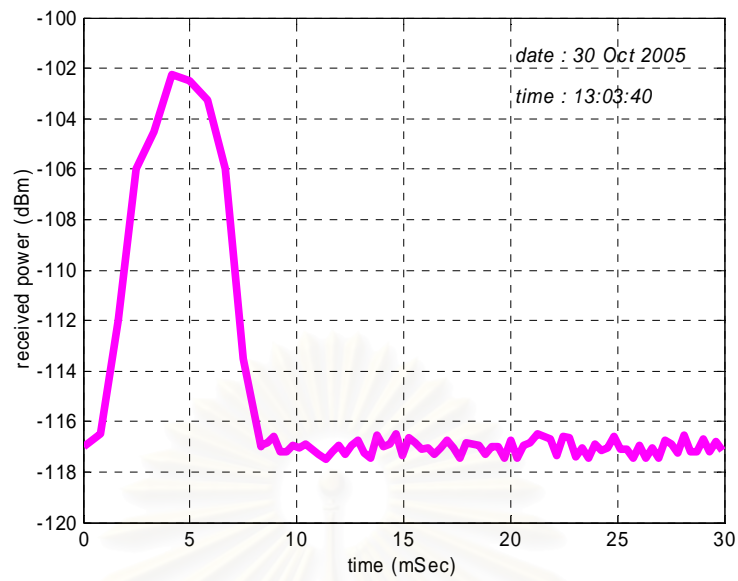
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 12:35:50 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



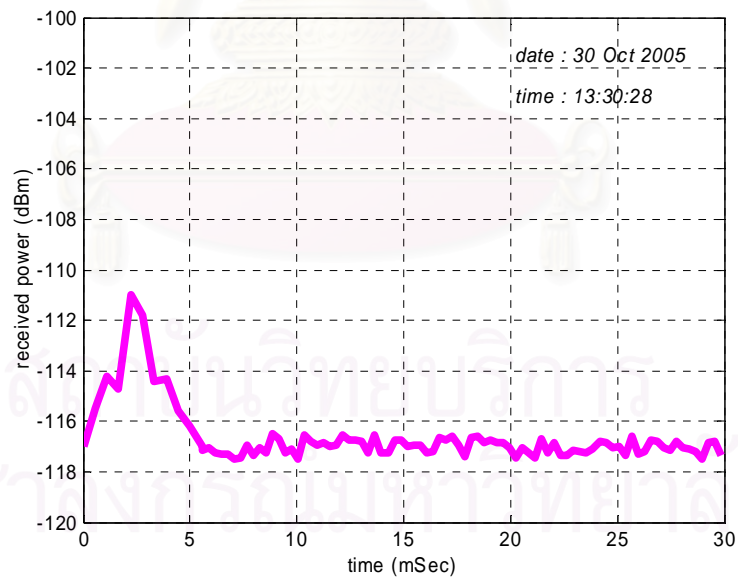
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 12:39:13 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 1 mSec



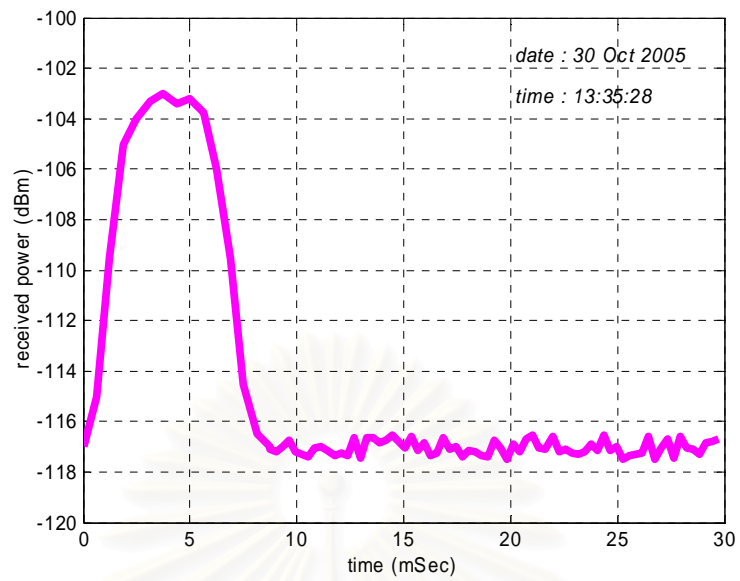
รูปที่ 4.17 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 12:39:52 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



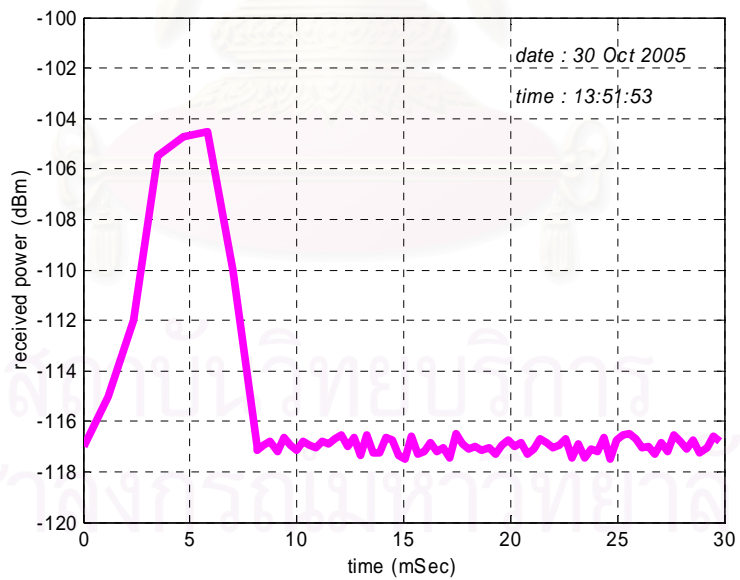
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 13:03:40 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



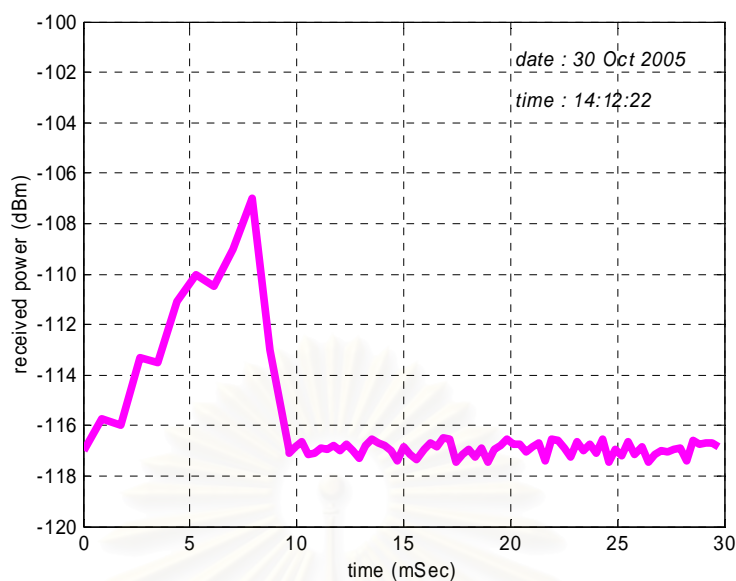
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 13:30:28 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 13:35:28 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 13:51:53 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 30/8/48
เวลา 14:12:22 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec

รูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.22 เป็นผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน ณ ตำแหน่งพายุดังรูปที่ 4.1 ซึ่งห่างจากสถานีเรดาร์ประมาณ 1300 กิโลเมตร ช่วงเวลาที่ตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพายุที่เกิดขึ้น ณ บริเวณดังกล่าวนี้ เป็นช่วงที่พายุมีระดับความรุนแรงในชั้นได้ฝุ่น ตัวอย่างสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในแต่ละเวลาไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากตัวอย่างผลการตรวจวัดรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.19 ซึ่งจะแตกต่างกับผลการตรวจวัดในรูปอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งขนาดแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงและช่วงระยะเวลาที่ยังคงเกิดการกระเจิงคลื่น ทั้งนี้เนื่องจากได้ปรับความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่งให้ต่ำลงจึงมีผลทำให้พลังงานของคลื่นกระเจิงลดต่ำลงด้วย แต่มีข้อดีคือ สามารถแสดงรายละเอียดของเป้าได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนตัวอย่างรูปกรณีที่ส่งสัญญาณที่มีความกว้างพัลส์ 5 mSec เฉพาะรูปที่ 4.22 มีลักษณะของสัญญาณกระเจิงต่างจากรูปอื่นๆ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ที่รูปร่างของพายุ ณ เวลาที่ตรวจวัดคลื่นกระเจิงตามรูปที่ 4.22 เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงทำให้ลักษณะของคลื่นกระเจิงเปลี่ยนแปลงไป สำหรับรายละเอียดต่อไปและผลการวิเคราะห์จะพิจารณาในบทที่ 5

4.7.2 ผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนครั้งที่ 2

ผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุที่เกิดขึ้นระหว่างวันที่ 17 ธันวาคม 2548 ถึงวันที่ 21 ธันวาคม 2548 ตามเวลาต่างๆ แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48
เวลา 13:26:05 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec

รูปที่ 4.23 ระดับสัญญาณรบกวนอยู่ที่ประมาณ -119 dBm มาตรฐาน (scale) ของ
แกนในแนวตั้งอยู่ที่ 5 dB และแกนในแนวนอนอยู่ที่ 10 mSec.



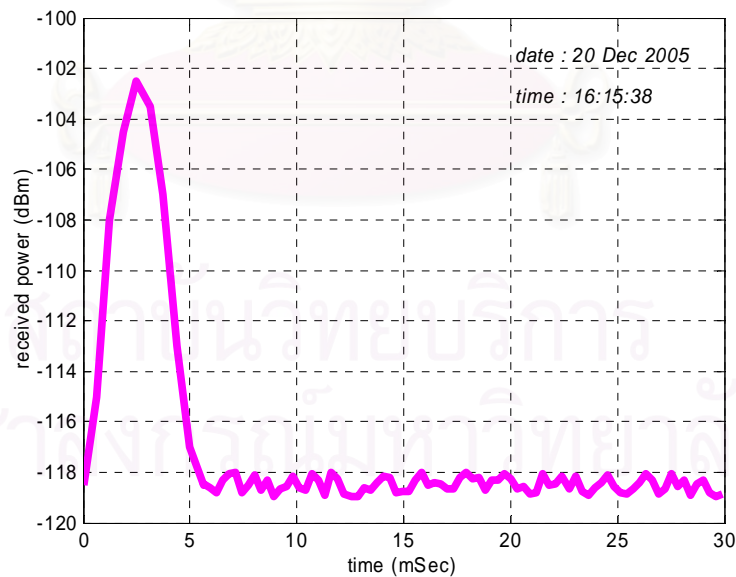
รูปที่ 4.24 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48
เวลา 13:31:10 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec

รูปที่ 4.24 ระดับสัญญาณรบกวนอยู่ที่ประมาณ -119 dBm มาตรฐาน (scale) ของ
แกนในแนวตั้งอยู่ที่ 5 dB และแกนในแนวนอนอยู่ที่ 10 mSec.

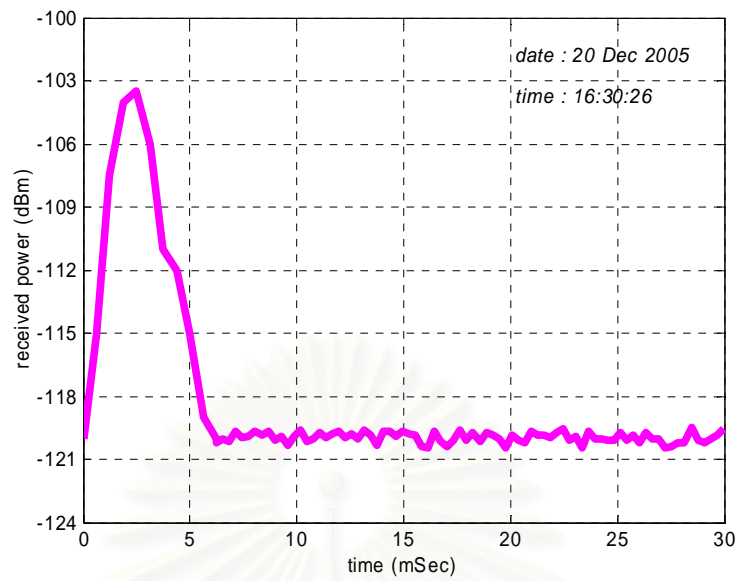


รูปที่ 4.25 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48
เวลา 13:50:19 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec

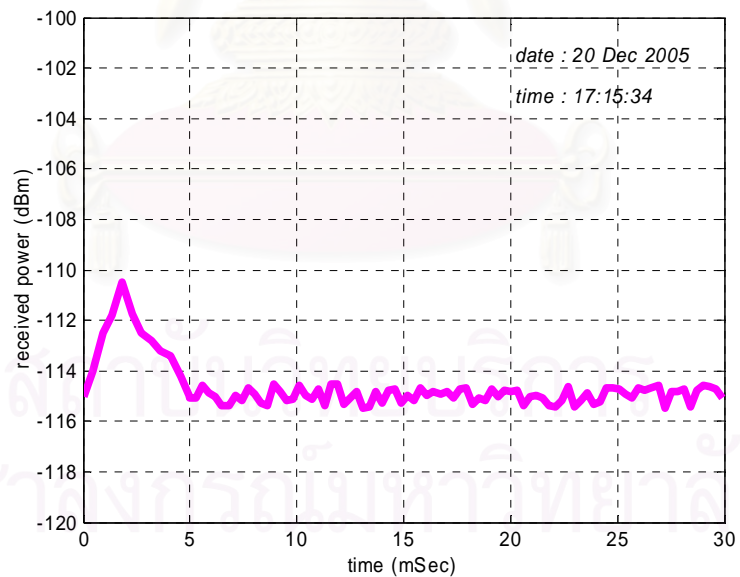
รูปที่ 4.25 ระดับสัญญาณรบกวนอยู่ที่ประมาณ -119 dBm มาตรฐาน (scale) ของ
แกนในแนวตั้งอยู่ที่ 2 dB และแกนในแนวนอนอยู่ที่ 5 mSec.



รูปที่ 4.26 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48
เวลา 16:15:38 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec



รูปที่ 4.27 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48
เวลา 16:30:26 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec



รูปที่ 4.28 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ วันที่ 20/12/48
เวลา 17:15:34 โดยสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec

รูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.28 เป็นตัวอย่างผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน ณ ตำแหน่งพายุตั้งรูปที่ 4.2 ซึ่งห่างจากสถานีเรดาร์ประมาณ 1100 กิโลเมตร ช่วงเวลาที่ตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพายุที่เกิดขึ้น ณ บริเวณดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่พายุมีระดับความรุนแรงในขั้นดีเปรสชัน สำหรับการพิจารณาผลสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในครั้งนี้จะแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. พิจารณาผลการตรวจวัดสัญญาณเฉพาะรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.25 ซึ่งเป็นตัวอย่างสัญญาณที่ยังไม่ได้แสดงค่าให้ชัดเจนเหมือนกับรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 จะเห็นว่า แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงในรูปที่ 4.24 ต่ำกว่าแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงเมื่อเทียบกับสองรูปที่เหลือ ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดให้ความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่งมีค่าที่ต่ำกว่านั่นเอง อีกทั้งยังมีผลทำให้ความยาวนานของช่วงเวลาที่ยังคงปรากฏสัญญาณคลื่นกระเจิงอยู่นั้นต่ำด้วย

2. พิจารณาผลการตรวจวัดสัญญาณเฉพาะรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในแต่ละเวลาจะไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นตัวอย่างผลการวัดของรูปที่ 4.28 ซึ่งแอมพลิจูดของสัญญาณแตกต่างกับผลการวัดในรูปอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัดเจน ถึงแม้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่งเท่ากันก็ตาม เพราะผลการวัดในช่วงเวลาของรูปดังกล่าวพายุใกล้อ่อนกำลังลงเป็นหย่อมความกดอากาศต่ำ (พิจารณารูปที่ 4.2 ประกอบ) จึงทำให้แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงมีค่าต่ำ อีกทั้งในช่วงเวลานี้ปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีน้อย จึงมีผลต่อปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศและมีผลต่อคลื่นวิทยุที่ใช้ชั้นบรรยากาศในการหักเหสัญญาณด้วยเช่นกัน

ในบทนี้พิจารณาผลของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนเฉพาะผลที่ได้จากการตรวจวัดโดยใช้ระบบเรดาร์ที่สร้างขึ้นและติดตั้งไว้ ณ อุทยานแห่งชาติเขานัน จังหวัดนครศรีธรรมราช เท่านั้น ส่วนรายละเอียดต่างๆ ของผลการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น รวมทั้งการเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์จะพิจารณาในบทที่ 5 ดังที่จะกล่าวต่อไป

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนและ การเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัด

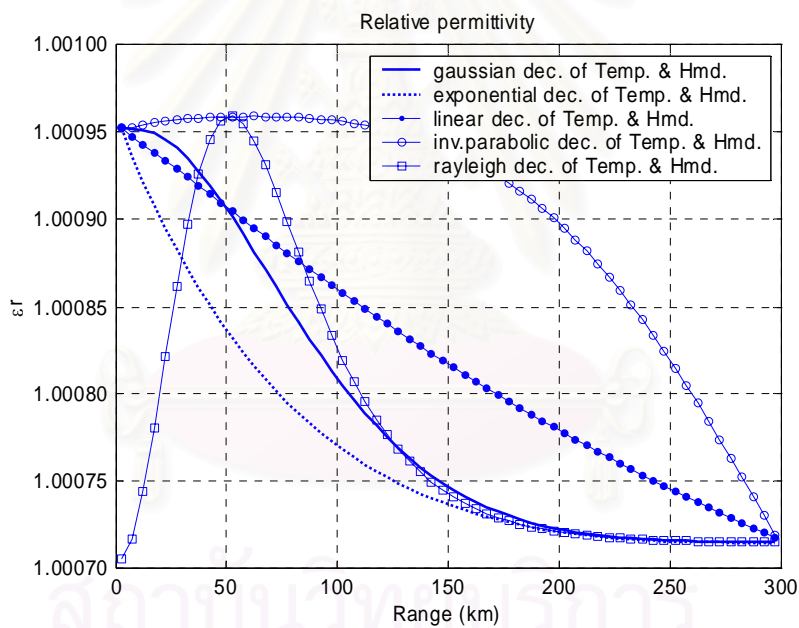
ความนำ

บทนี้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนและผลที่ได้จากการทดสอบ สำหรับผลการวิเคราะห์นั้นจะพิจารณาการกระเจิงคลื่นวิทยุทั้งกรณีคลื่นตกกระทบเป็นคลื่นในแบบแผน TM และแบบแผน TE โดยผลการกระเจิงคลื่นวิทยุจากพายุจะแสดงในรูปตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ (g) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 รวมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า g กับการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในพายุ การเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ การเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่ง และการเปลี่ยนแปลงรัศมีของพายุ เป็นต้น นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนที่ได้จากการทดสอบ ว่ามีแนวโน้มเหมือนกันหรือแตกต่างกันประการใด

หัวข้อแรกที่จะกล่าวถึงในบทนี้คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุกรณีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลง หัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุตามเวลา เทียบกับผลการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ดังนี้ 1) ผลการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ 2) ผลการแปรค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น 3) ผลการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น 4) ผลการแปรค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่ง 5) ผลการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างชั้นของแบบจำลองพายุ และ 6) ผลการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุ และหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน รายละเอียดในแต่ละเรื่องตามที่แสดงไว้ข้างต้นมีดังนี้

5.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุกรณิอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลง

ข้อสมมุติฐานของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ยังไม่ได้ระบุค่าที่เจาะจงหรือการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนของค่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ (พิจารณาสมการ (3.1) และ (3.3) ประกอบ) อันได้แก่ ความดันอากาศ อุณหภูมิ และความดันไอน้ำแฝง แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความดันอากาศสามารถพิจารณาได้ดังสมการ (3.4) ส่วนการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอื่นที่เหลือยังไม่ได้กำหนดแน่นอน เนื่องจากค่าความดันไอน้ำแฝงเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังสมการ (3.2) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะสรุปรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อพิจารณารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุซึ่งจะใช้วิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุต่อไป



รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ กรณิอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลง

เนื่องจากข้อสมมุติที่ 2 กำหนดให้บริเวณใกล้ศูนย์กลางพายุเป็นบริเวณที่มีปริมาณการเคลื่อนที่ของมวลอากาศมาก เมื่อเทียบกับบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางพายุตามแนวรัศมี และข้อสมมุติที่ 4 กล่าวว่า อุณหภูมิใกล้ศูนย์กลางพายุสูงกว่าอุณหภูมิของบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางพายุตามแนวรัศมี ดังนั้นจากข้อสมมุติทั้ง 2 ข้อนี้จึงกำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ณ บริเวณใกล้ศูนย์กลางพายุต้องสูงกว่าบริเวณที่ห่างออกไปตามแนวรัศมีพายุ

ส่วนรูปแบบหน้าตัดข้าง (profile) ของค่าทั้งสองจะกำหนดให้มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามกรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 กำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดที่บริเวณศูนย์กลางพายุ และมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลางพายุมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสอง จะกำหนดตามรูปแบบดังนี้

1. กำหนดให้เปลี่ยนแปลงแบบเกาส์ (gaussian form)
2. กำหนดให้เปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential form)
3. กำหนดให้เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น (linear form)
4. กำหนดให้เปลี่ยนแปลงแบบพาราโบลาคว่ำ (inverse parabolic form)

กรณีที่ 2 กำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงแบบเรย์เล (rayleigh form) คือ จากจุดศูนย์กลางพายุอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าสูงชันอย่างรวดเร็วจากค่าต่ำสุดไปสู่ค่าสูงสุด จากนั้นก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลางพายุมากขึ้น จนไปสู่ค่าต่ำสุดอีกครั้ง

ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิสูงสุด 35 องศาเซลเซียส ต่ำสุด 25 องศาเซลเซียส, ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด 100 % ต่ำสุด 70 %, ความเร็วลมสูงสุดของพายุ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง, รัศมีพายุ 300 กิโลเมตร และระยะรัศมีพายุที่มีความเร็วลมสูงสุด 20 กิโลเมตร จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกดังรูปที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อย่างมาก

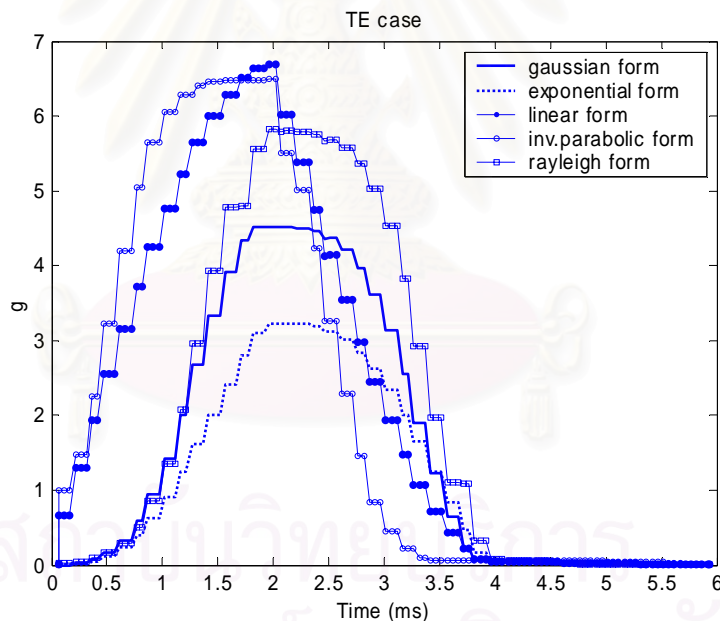
5.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุตามเวลา

ลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน ในหัวข้อนี้จะแสดงในรูปตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (3.81) โดยกำหนดให้คลื่นตกกระทบเป็นคลื่นในแบบแผน TM และแบบแผน TE สำหรับผลการวิเคราะห์ตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุจะนำเสนอในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุเทียบกับเวลา โดยที่เวลาในที่นี้หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่คลื่นวิทยุเริ่มเกิดการกระเจิงจากพายุจนถึงที่สุดการกระเจิงของสัญญาณคลื่นวิทยุ หรือหมายถึงเวลาที่เป็นผลตอบสนอง

ของสัญญาณรับ การวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนจะพิจารณาที่ ผลการแปรค่าของปัจจัยต่างๆ ซึ่งจะแยกกล่าวในแต่ละหัวข้อดังนี้

5.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

การเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของค่า อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตามรูปที่ 5.1 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ จะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ด้วย สำหรับผลการกระเจิงคลื่นวิทยุ จากแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น กรณีอุณหภูมิและความชื้น สัมพัทธ์เปลี่ยน โดยกำหนด ϵ_r เป็นดังรูปที่ 5.1 ระยะห่างระหว่างชั้นของแบบจำลองพายุ 20 กิโลเมตร และความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่ง $2000 \mu\text{Sec}$ มีลักษณะของสัญญาณ คลื่นวิทยุที่กระเจิงเป็นดังรูปที่ 5.2



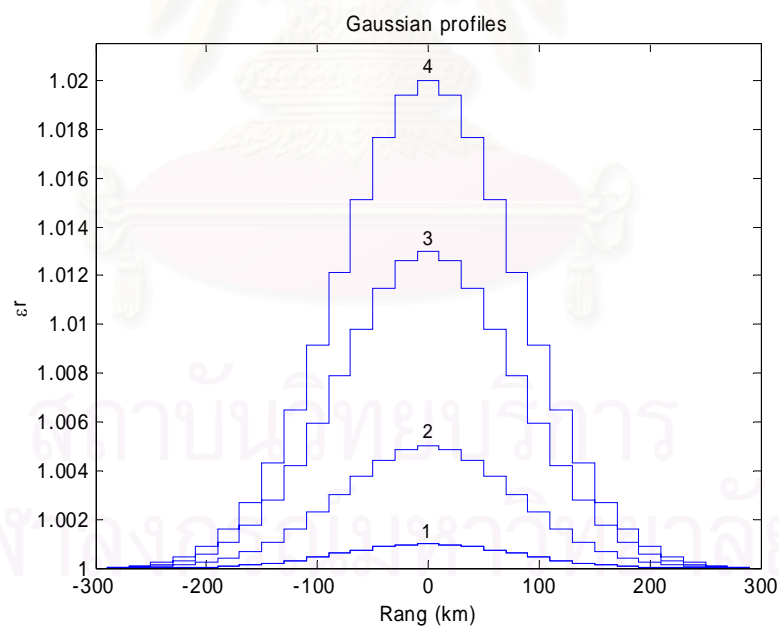
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบค่า g ของคลื่นในแบบแผน TE กรณีอุณหภูมิและ ความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.2 เป็นการเปรียบเทียบผลของคลื่นกระเจิงกรณีคลื่นตกกระทบเป็นคลื่นในแบบ แผน TE พิจารณาสัญญาณที่กระเจิงจากพายุกรณี ϵ_r เป็นแบบพาราโบลาคิดว่า จะให้การเพิ่มขึ้น ของแอมพลิจูดเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่ากรณี ϵ_r เป็นแบบอื่น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_r แบบพาราโบลาคิดว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าที่รวดเร็วกว่าแบบอื่นๆ (พิจารณาจากภายนอกพายุเข้า

ไปสู่ภายในพายุ) หรือมีความชันสูง และเป็นผลจากค่า ε_r ในแต่ละชั้นของรูปแบบพาราโบลาคว่ำที่มีความแตกต่างกันมาก (จากการที่กำหนดให้แต่ละชั้นห่างกัน 20 กิโลเมตร) จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณีนี้ ε_r เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลจะให้การเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเป็นไปอย่างช้าที่สุด ส่วนผลการกระเจิงคลื่นวิทยุกรณีคลื่นในแบบแผน TM จะไม่แสดงไว้เนื่องจากให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การกำหนดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ถูกต้องและเหมาะสมจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ และมีผลต่อการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุด้วย

5.2.2 ผลการแปรค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

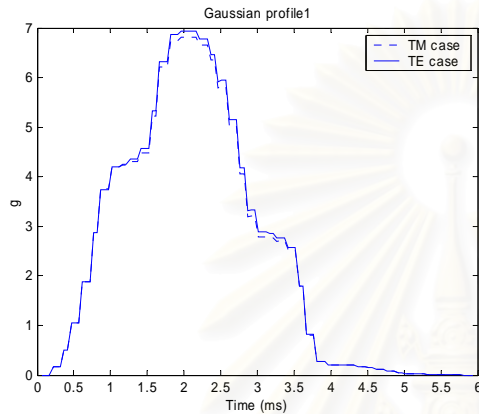
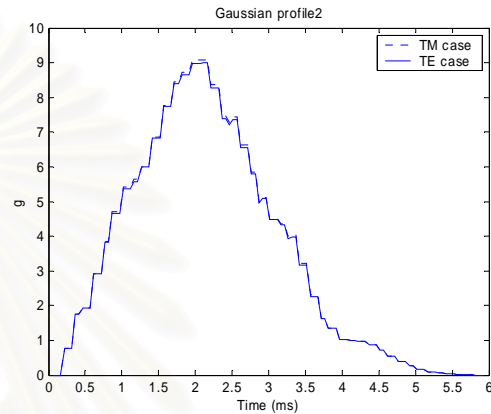
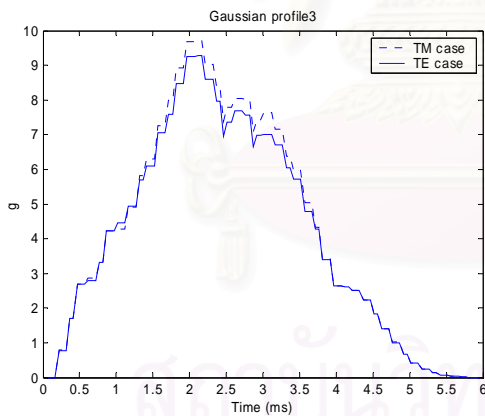
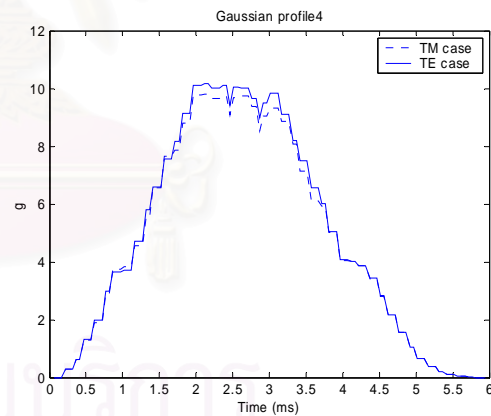
การพิจารณาคคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นในหัวข้อนี้ จะพิจารณาเฉพาะที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบหน้าตัดข้างเป็นแบบเกาส์และมีค่าสูงสุดของ ε_r แตกต่างกันดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกกรณีหน้าตัดข้างแบบเกาส์และแปรค่าตาม ε_r สูงสุด

ในรูปที่ 5.3 กำหนดให้ค่าสูงสุดในรูปแบบแต่ละรูปแบบของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ รูปแบบที่ 1 กำหนดให้ค่าสูงสุดของ ε_r เท่ากับ 1.001, รูปแบบที่ 2 เท่ากับ 1.005, รูปแบบที่ 3 เท่ากับ 1.013 และรูปแบบที่ 4 เท่ากับ 1.020 กำหนดให้มีค่าต่ำสุดของ

ϵ_r เท่ากับ 1.000 ในทุกรูปแบบ และระยะห่างของบริเวณที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน 20 กิโลเมตร ดังนั้นผลการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน ชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น กรณีแปรค่าสูงสุด ϵ_r แตกต่างกันดังรูปที่ 5.3 โดยกำหนดรัศมีพายุ 300 กิโลเมตร และความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่ง $2000 \mu\text{Sec}$ ลักษณะแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงเป็นดังรูปที่ 5.4

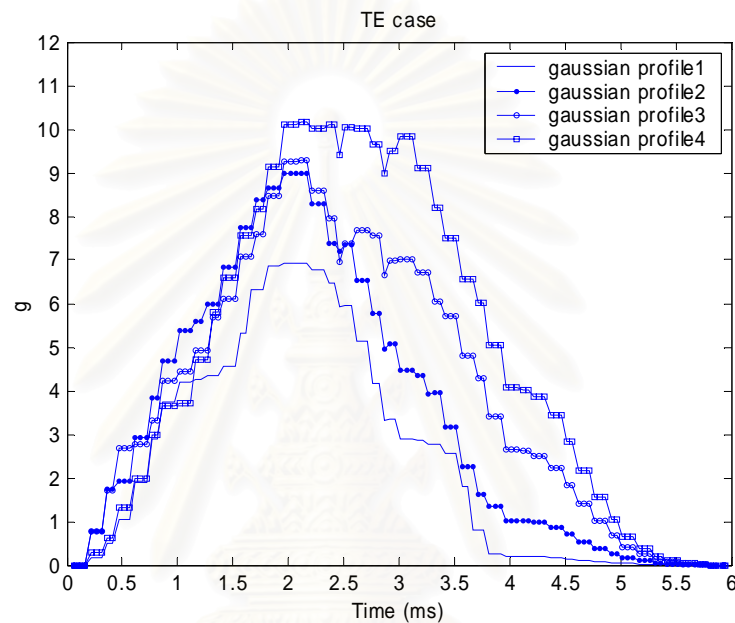
(ก) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.001(ข) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.005(ค) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.013(ง) ϵ_r สูงสุดเท่ากับ 1.020

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่า g ของคลื่นในแบบแผน TM และ TE กรณีหน้าตัดข้าง

แบบเกาส์และมี ϵ_r สูงสุดแตกต่างกัน

ผลเปรียบเทียบคลื่นกระเจิงในรูปที่ 5.4 เฉพาะกรณีที่คลื่นตกกระทบเป็นคลื่นในแบบแผน TE สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อค่าสูงสุดของ ϵ_r เปลี่ยนแปลง แม้รูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเหมือนกัน ก็มีผลทำให้ตัวประกอบการสะท้อน

คลื่นวิทยุจากพายุหรือคลื่นกระเจิงมีค่าแตกต่างกัน โดยขนาดแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงจะแปรตามการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก คือ เมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงสูง แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงก็จะสูง และถ้าเปลี่ยนแปลงต่ำแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงก็จะต่ำ ถึงแม้แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงมีค่าสูงหรือต่ำไม่ตลอดช่วงเวลาของการกระเจิง แต่โดยรวมแล้วขนาดแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงจะแปรตามการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งสังเกตได้ชัดในช่วงขาลงของสัญญาณ

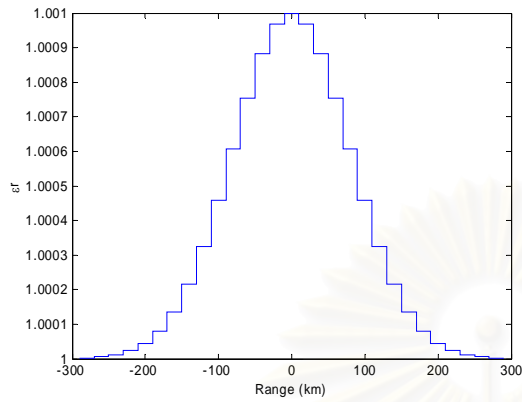


รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า g ของคลื่นในแบบแผน TE กรณีหน้าตัดข้างแบบเกาส์แปรค่าตาม ϵ_r สูงสุด

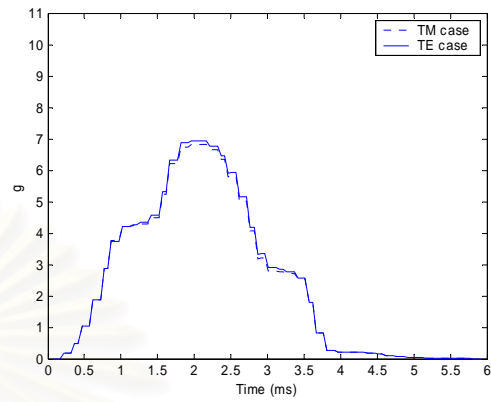
5.2.3 ผลการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในรูปที่ 5.1 เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตามรูปแบบต่างๆ คือ แบบเกาส์ แบบเอกซ์โพเนนเชียล แบบเชิงเส้น แบบพาราโบลาคว่ำ และแบบเรย์เล ส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าต่ำสุดและสูงสุดประมาณ 1.0007 และ 1.001 ตามลำดับ ในหัวข้อนี้จะกำหนดให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีรูปแบบหน้าตัดข้างเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แต่กำหนดให้ค่าต่ำสุดและสูงสุดของ ϵ_r เป็น 1.000 และ 1.001 ตามลำดับ ระยะห่างของบริเวณที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน 20 กิโลเมตร รัศมีพายุ 300 กิโลเมตร และความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุ

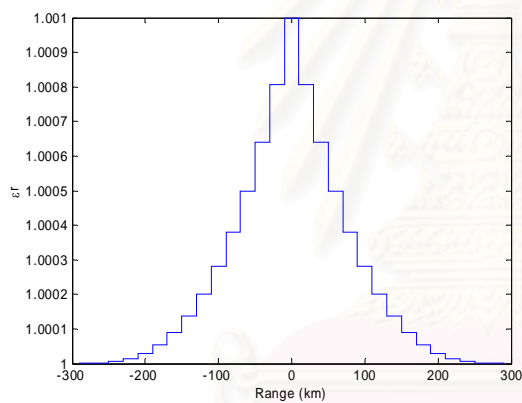
ที่ใช้ส่ง $2000 \mu\text{Sec}$ คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ในกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



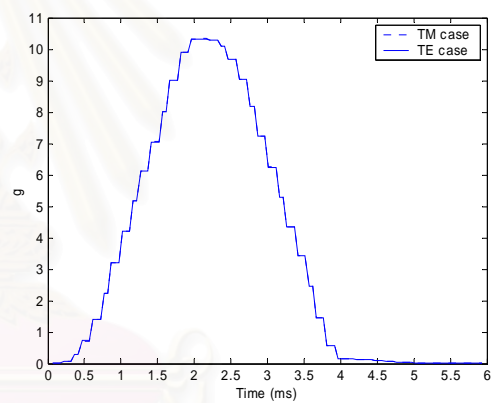
(ก) ϵ_r แบบเกาส์



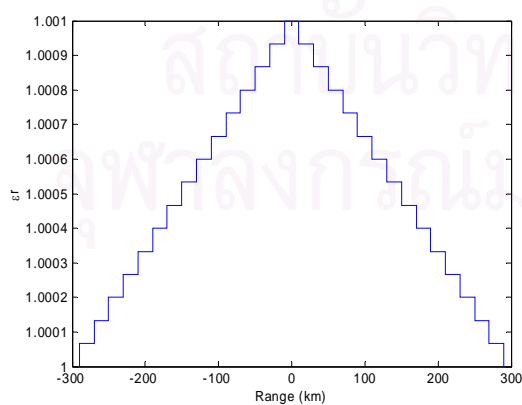
(ข) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบเกาส์



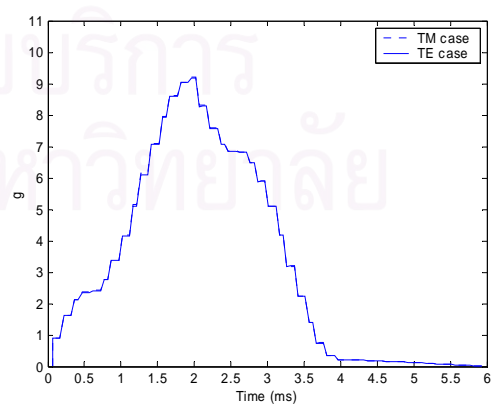
(ค) ϵ_r แบบเอกซ์โพเนนเชียล



(ง) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบเอกซ์โพเนนเชียล

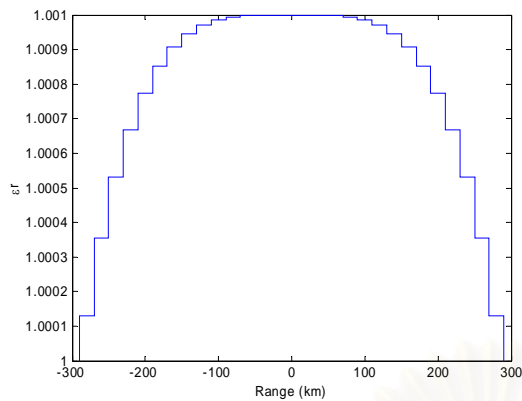
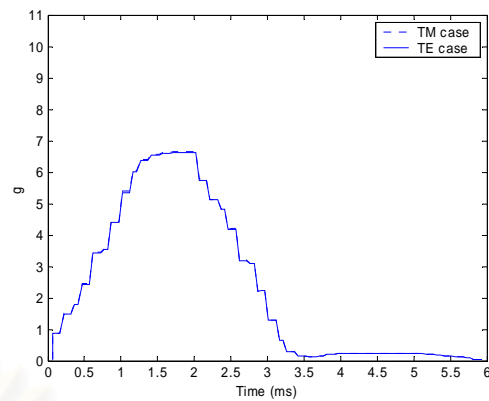
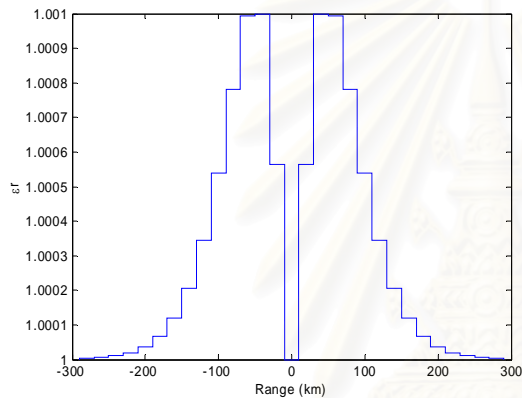
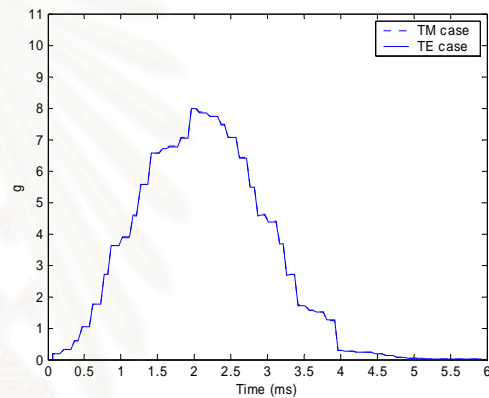


(จ) ϵ_r แบบเชิงเส้น



(ฉ) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบเชิงเส้น

รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบค่า g กรณีเปลี่ยนแปลงรูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

(ข) ϵ_r แบบพาราโบลาคว่ำ(ค) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบพาราโบลาคว่ำ(ง) ϵ_r แบบเรย์เด(จ) คลื่นกระเจิงกรณี ϵ_r แบบแบบเรย์เด

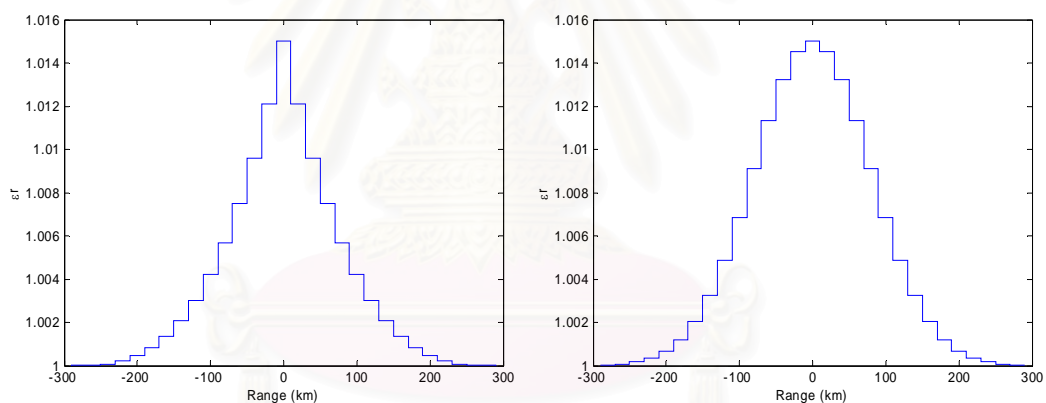
รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบค่า g กรณีเปลี่ยนแปลงรูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ต่อ)

รูปที่ 5.6 เป็นการเปรียบเทียบคลื่นกระเจิงกรณีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ซึ่งสังเกตได้ว่ากรณีที่ ϵ_r เปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงจะมีค่าสูงสุด ตามด้วยกรณีที่ ϵ_r เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น แบบเรย์เด แบบเกาส์ และแบบพาราโบลาคว่ำ ตามลำดับ กรณีที่ ϵ_r เป็นแบบพาราโบลาคว่ำ บริเวณยอดของแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบมากกว่ากรณีที่ ϵ_r เป็นแบบอื่น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ในกรณีนี้มีลักษณะค่อนข้างเรียบ (พิจารณาบริเวณของการเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_r) จึงทำให้ค่ายอดของคลื่นกระเจิงมีลักษณะค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงนอกจากจะขึ้นกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแล้ว ยังขึ้นกับขนาดของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และความแตกต่างในระหว่างชั้นของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกด้วย

5.2.4 ผลการแปรค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่ง

การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุด้วยระบบพัลส์เรดาร์ไปยังพายุหมุนเขตร้อน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุสามารถพิจารณาได้ตามหัวข้อต่างๆ ดังที่กล่าวไว้บางส่วนแล้วข้างต้น หัวข้อนี้จะพิจารณาในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคลื่นกระเจิงอย่างไร

การวิเคราะห์คลื่นกระเจิงในหัวข้อนี้กำหนดให้รูปแบบหน้าต่างข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีลักษณะแตกต่างกัน 2 กรณี คือ แบบเอกซ์โพเนนเชียล และแบบเกาส์ ดังรูปที่ 5.7 โดยกรณีแต่ละกรณีกำหนดให้มีค่าสูงสุดเป็น 1.015 ระยะห่างของบริเวณที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกันในแต่ละชั้นของแบบจำลองพายุเป็น 20 กิโลเมตร และรัศมีพายุ 300 กิโลเมตร ผลของคลื่นกระเจิงกรณีนี้ที่แปรค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่ง แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้



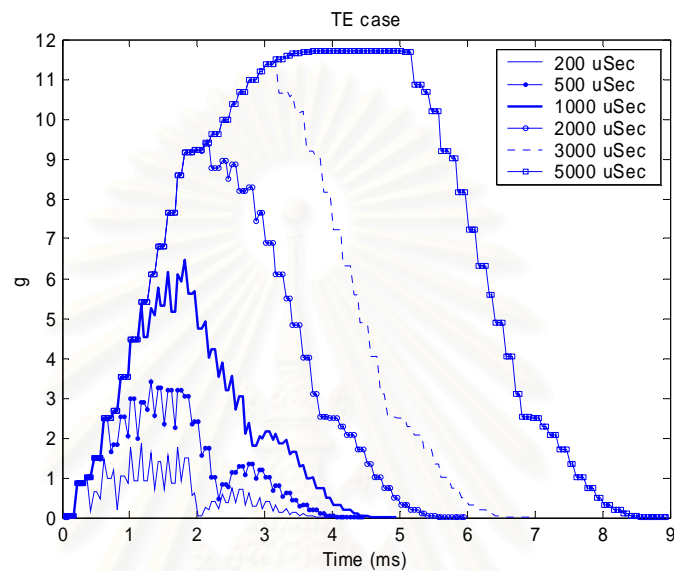
(ก) กรณีหน้าต่างข้างแบบเอกซ์โพเนนเชียล

(ข) กรณีหน้าต่างข้างแบบเกาส์

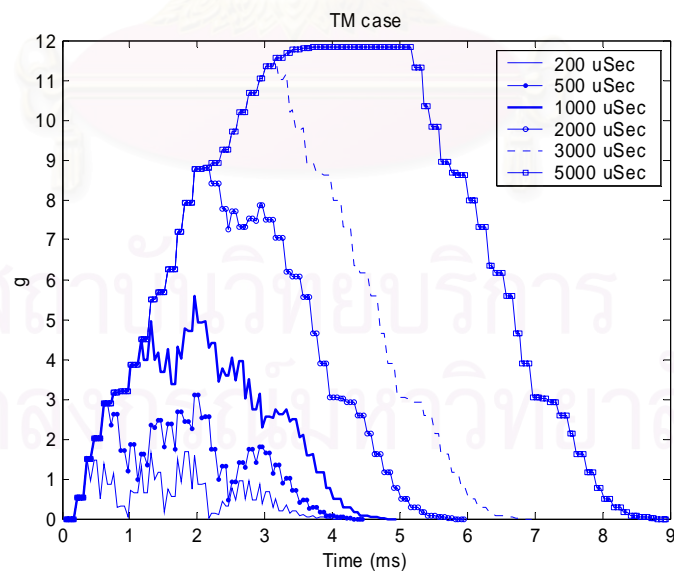
รูปที่ 5.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสำหรับกรวิเคราะห์คลื่นกระเจิงกรณีแปรค่าความกว้างพัลส์

ทั้งสองกรณีตามรูปที่ 5.8 การเพิ่มขนาดความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ส่งเข้าไปยังพายุ มีผลทำให้แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงและระยะเวลาที่คลื่นกระเจิงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากเหตุที่ระยะทางที่คลื่นพัลส์ครอบคลุมจะมีค่าแตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างพัลส์ ซึ่งหมายความว่า ถ้าสัญญาณมีพัลส์กว้างระยะที่คลื่นพัลส์ครอบคลุมก็จะกว้าง แต่ถ้าสัญญาณพัลส์แคบระยะที่คลื่นพัลส์ครอบคลุมก็จะแคบ เมื่อใดระยะที่คลื่นพัลส์ครอบคลุมกว้างกว่าระยะห่างที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกันแล้ว (ในที่นี้กำหนดไว้ที่ 20 กิโลเมตร) จะมีผลทำ

ให้เกิดการรวมกันของสัญญาณที่กระเจิงในแต่ละชั้นของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการรวมกันของสัญญาณและทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณเพิ่มขึ้น เหตุที่สัญญาณมีระยะเวลาในการกระเจิงเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างพัลส์สูงขึ้นเป็นเพราะสัญญาณที่กระเจิงจะแปรผันตรงกับระยะเวลาที่มีการส่งของสัญญาณ หรือระยะเวลาของความกว้างพัลส์ที่ใช้ส่งนั่นเอง



(ก) กรณีคลื่นในแบบแผน TE และหน้าตัดข้าง ϵ_r เป็นแบบเอกซีโพเนนเชียล



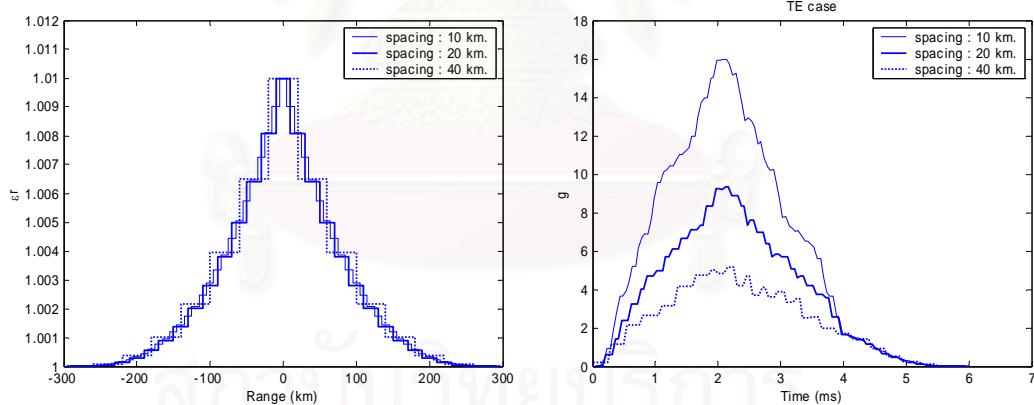
(ข) กรณีคลื่นในแบบแผน TM และหน้าตัดข้าง ϵ_r เป็นแบบเกาส์

รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบค่า g กรณีแปรค่าตามความกว้างพัลส์ของสัญญาณ
คลื่นวิทยุที่ใช้ส่งด้วยระบบพัลส์เรดาร์

5.2.5 ผลการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างชั้นของแบบจำลองพายุ

ข้อสมมุติลักษณะพายุหมุนเขตร้อนดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ และวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุได้ แต่เนื่องจากแบบจำลองของพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นยังไม่ได้กำหนดระยะห่างที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในแต่ละชั้นไว้เป็นที่แน่นอน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุโดยการปรับเปลี่ยนระยะห่างในแต่ละชั้นของแบบจำลองพายุ แล้วพิจารณาผลของคลื่นกระเจิงว่ามีลักษณะเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร

การวิเคราะห์คลื่นกระเจิงในกรณีนี้กำหนดให้รูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีลักษณะแตกต่างกัน 2 กรณี ดังรูปที่ 5.9ก และ 5.10ก โดยแต่ละกรณีกำหนดให้มีค่าสูงสุดเป็น 1.010 กำหนดรัศมีพายุคงที่ 300 กิโลเมตร และความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่งด้วยระบบพัลส์เรดาร์เป็น 2000 μSec คลื่นกระเจิงของทั้ง 2 กรณีสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5.9ข และ 5.10ข ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

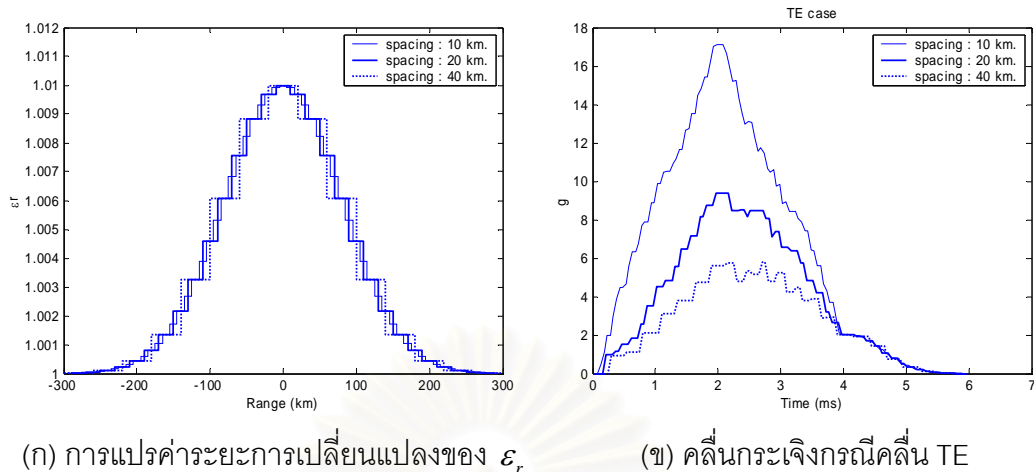


(ก) การแปรค่าระยะการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_r

(ข) คลื่นกระเจิงกรณีคลื่น TE

รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบค่า σ กรณีแปรค่าระยะห่างระหว่างชั้นของค่าคงตัว

ไดอิเล็กตริกที่มีรูปแบบหน้าตัดข้างเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบค่า g กรณีแปรค่าระยะห่างระหว่างชั้นของค่าคงตัว

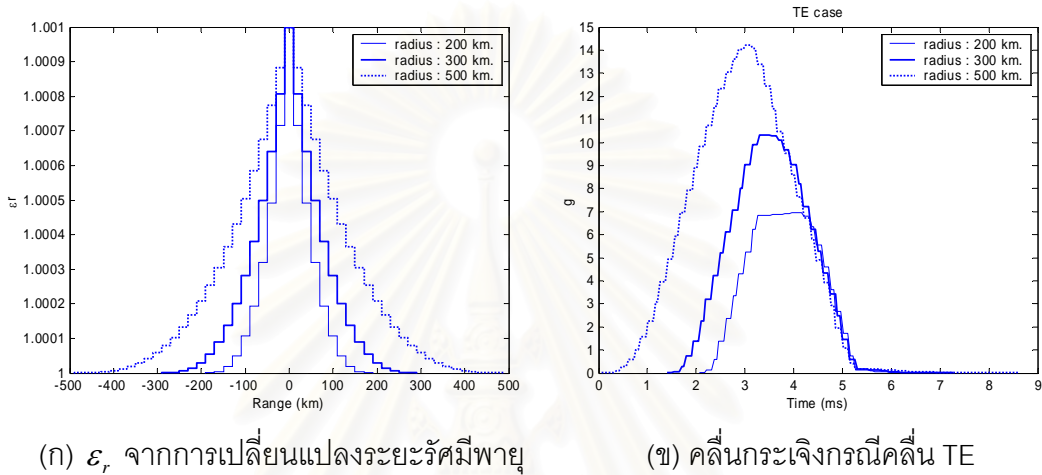
ไดอิเล็กตริกที่มีรูปแบบหน้าตัดข้างเป็นแบบเกาส์

การเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างในแต่ละชั้นของแบบจำลองพายุทั้ง 2 กรณีดังรูป 5.9 และ 5.10 มีผลทำให้แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เหมือนกันคือ แอมพลิจูดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างชั้นแคบลง และแอมพลิจูดต่ำลงเมื่อระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้น แต่ทั้งนี้ระยะเวลาที่มีสัญญาณคลื่นกระเจิงสังเกตได้ชัดว่าจะไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างชั้นแต่ประการใด การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงสามารถอธิบายสาเหตุได้เช่นเดียวกับกรณีการกระเจิงคลื่นในหัวข้อ 5.2.4 คือ ถ้าระยะห่างในแต่ละชั้นแคบจะทำให้มีสัญญาณกระเจิงจากขอบเขตระหว่างชั้นมากขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดรวมของคลื่นกระเจิงมีค่าสูง แต่ตรงกันข้ามถ้าระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้น สัญญาณกระเจิงจากขอบเขตระหว่างชั้นจะลดลงส่งผลทำให้แอมพลิจูดรวมของคลื่นกระเจิงต่ำลงด้วย

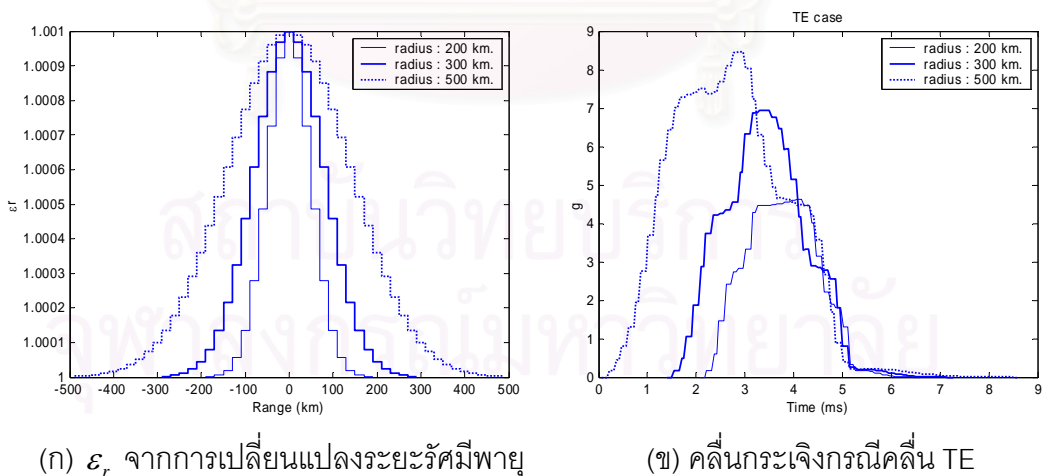
5.2.6 ผลการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุ

การพิจารณาคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนสำหรับกรณีการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุ จะนำเสนอเฉพาะกรณีที่รูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีการเปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และแบบเกาส์ เพียง 2 กรณีเท่านั้น โดยผลการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเนื่องจากการเปลี่ยนค่ารัศมีพายุในแต่ละกรณีดังกล่าวข้างต้น สามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 5.11ก และ 5.12ก ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์คลื่นกระเจิงกรณีค่ารัศมีพายุเปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้รูปแบบหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกทั้ง 2 กรณี มีค่าสูงสุดของ ϵ_r เป็น 1.001 กำหนดระยะห่างของบริเวณที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกันในแต่ละชั้นของแบบจำลองพายุเป็น 20 กิโลเมตร และความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใช้ส่ง $2000 \mu\text{Sec}$ คลื่นกระเจิงของทั้ง 2 กรณี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบค่า g จากการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุกรณีรูปแบบหน้าตัดข้างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบค่า g จากการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุกรณีรูปแบบหน้าตัดข้างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแบบเกาส์

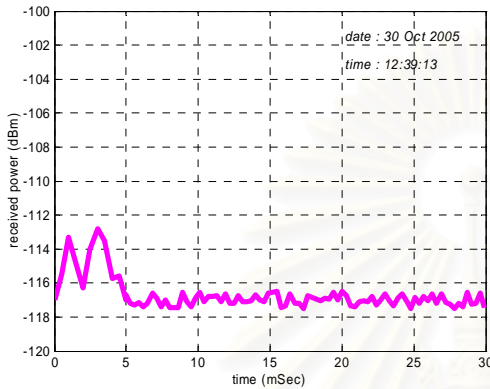
คลื่นกระเจิงในแต่ละกรณีที่เปลี่ยนแปลงหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุตามรูปที่ 5.11 และ 5.12 ให้ผลในลักษณะเดียวกัน คือ แอมพลิจูดเฉลี่ยของคลื่นกระเจิงมีค่าสูงในกรณีที่พายุมีรัศมีกว้างและแอมพลิจูดจะต่ำลงเมื่อระยะรัศมีน้อยลง แต่ผลดังกล่าวจะต้องสอดคล้องกับค่าเงื่อนไขตามที่กล่าวไว้ข้างต้นด้วย คือ ระยะห่างของบริเวณที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน ค่าขนาดความกว้างพัลส์ เป็นต้น สำหรับผลของระยะเวลาที่คลื่นกระเจิงกลับสังเกตได้ชัดว่ากรณีที่พายุมีรัศมีน้อย คลื่นจะใช้เวลากลับมายังเครื่องรับยาวนานกว่ากรณีที่พายุมีรัศมีกว้าง เพราะผลการวิเคราะห์ทั้งหมดได้กำหนดให้แกนของพายุอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นระยะทางจากเครื่องรับไปยังบริเวณที่เกิดการกระเจิงได้ของคลื่นจะมีค่ามากถ้าระยะรัศมีมีค่าน้อย คลื่นกระเจิงจึงต้องใช้เวลาในการเดินทางกลับมายังเครื่องรับยาวนานกว่าและจะตรงกันข้ามถ้าพายุมีระยะรัศมีกว้าง ส่วนความยาวนานของระยะเวลาที่คลื่นกระเจิงปรากฏอยู่นั้นจะขึ้นกับรัศมีพายุเช่นกันคือ ถ้าพายุมีรัศมีกว้างความยาวนานที่ยังคงปรากฏคลื่นกระเจิงจะมากกว่ากรณีที่พายุมีรัศมีน้อย เพราะแนวที่สามารถเกิดการกระเจิงได้ของคลื่นวิทยุกรณีที่พายุมีรัศมีกว้างมีระยะมากกว่ากรณีที่พายุมีรัศมีน้อย จึงทำให้ระยะเวลาที่คลื่นกระเจิงปรากฏอยู่นั้นมีมากกว่า

5.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน

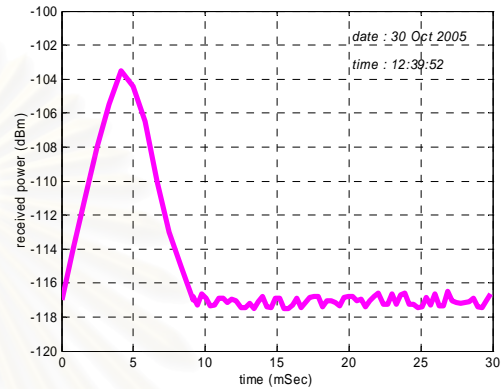
การเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์กับผลการตรวจวัดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน จะแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ 1) การเปรียบเทียบผลคลื่นกระเจิงกรณีเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง และ 2) การเปรียบเทียบรูปแบบคลื่นกระเจิงระหว่างการวิเคราะห์กับการตรวจวัด สำหรับรูปแบบการนำเสนอเพื่อเปรียบเทียบผลคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของกราฟ ซึ่งกำหนดให้แกนในแนวตั้งของกราฟเป็นระดับสัญญาณของคลื่นกระเจิง และแกนในแนวนอนเป็นระยะเวลาที่ยังคงปรากฏสัญญาณคลื่นกระเจิงอยู่ สำหรับผลของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัดจะแสดงเฉพาะผลของสัญญาณที่กระเจิงจากเป้าที่ต้องการเท่านั้น ส่วนสัญญาณที่กระเจิงจากแหล่งอื่นหรือสัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่งจะไม่นำมาพิจารณา (ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.6) สำหรับการเปรียบเทียบผลทั้งสองกรณีดังกล่าวข้างต้นแยกพิจารณาได้ดังนี้

5.3.1 การเปรียบเทียบผลคลื่นกระเจิงกรณีเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง

ผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพาหุหมุนเขตร้อนกรณีเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง สามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ดังนี้

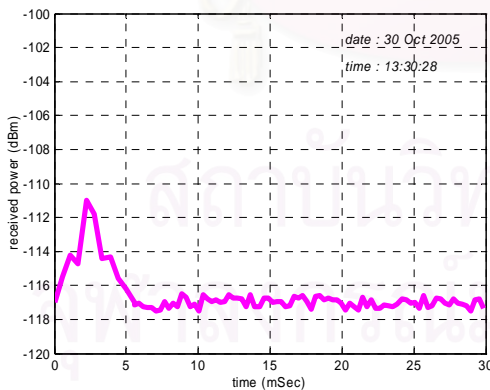


(ก) ความกว้างพัลส์ 1 mSec

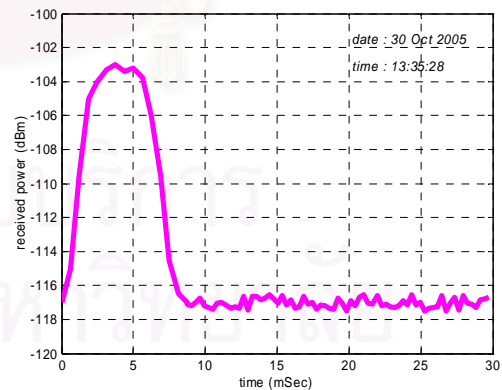


(ข) ความกว้างพัลส์ 5 mSec

รูปที่ 5.13 ตัวอย่างที่ 1 ผลการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพาหุหมุนเขตร้อนกรณีเปลี่ยนความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง



(ก) ความกว้างพัลส์ 2 mSec



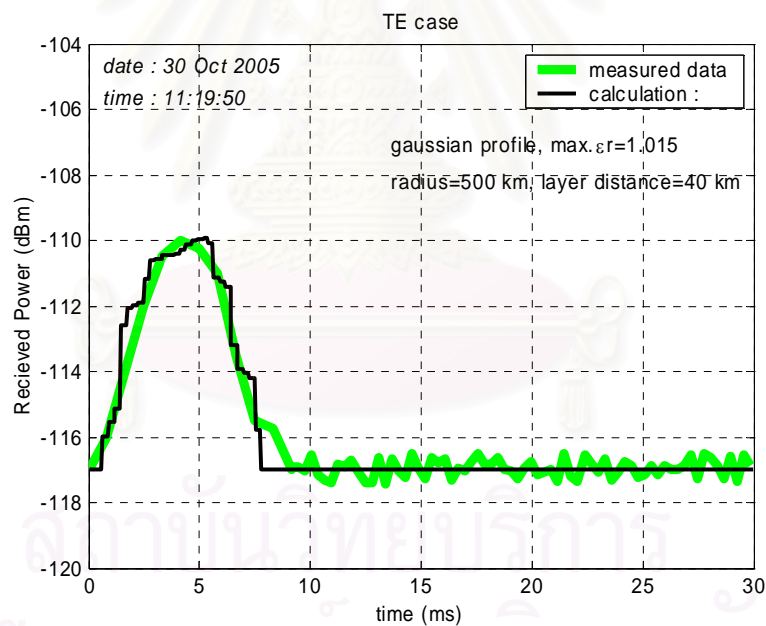
(ข) ความกว้างพัลส์ 5 mSec

รูปที่ 5.14 ตัวอย่างที่ 2 ผลการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพาหุหมุนเขตร้อนกรณีเปลี่ยนความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง

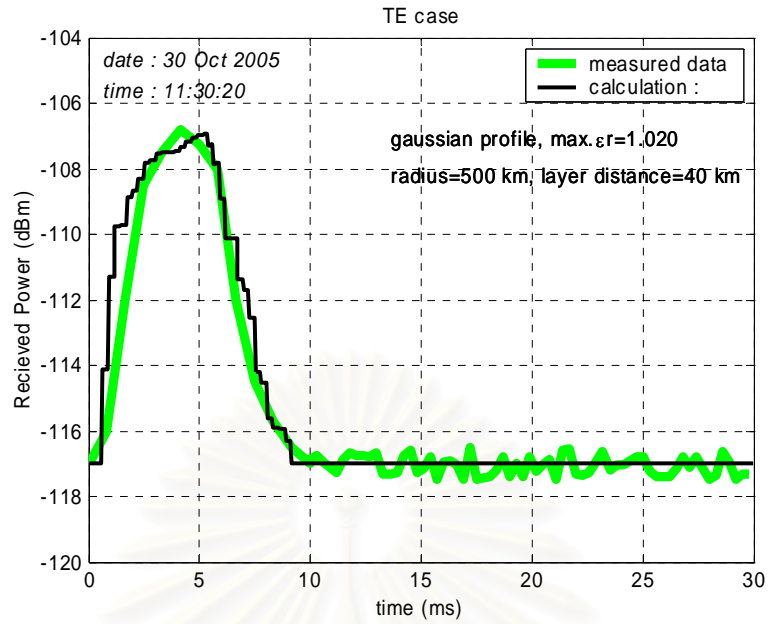
รูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 เป็นตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนกรณีเปลี่ยนความกว้างพัลส์ของสัญญาณส่ง ปรากฏว่าให้ผลสอดคล้องกับสัญญาณคลื่นวิทยุที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น คือ ถ้าสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์มากจะทำให้ระดับแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงมีค่าสูง รวมทั้งความยาวนานของระยะเวลาที่ยังคงปรากฏคลื่นกระเจิงอยู่นั้นมากด้วย โดยสามารถเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้ในรูปที่ 5.8

5.3.2 การเปรียบเทียบรูปแบบคลื่นกระเจิงระหว่างการวิเคราะห์กับการตรวจวัด

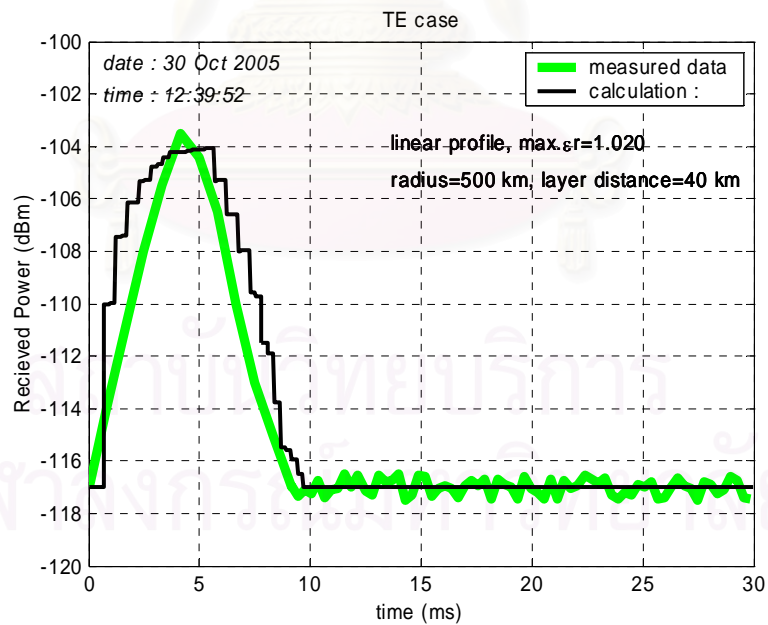
ตัวอย่างการเปรียบเทียบรูปแบบของสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนที่ได้จากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นนั้น สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้



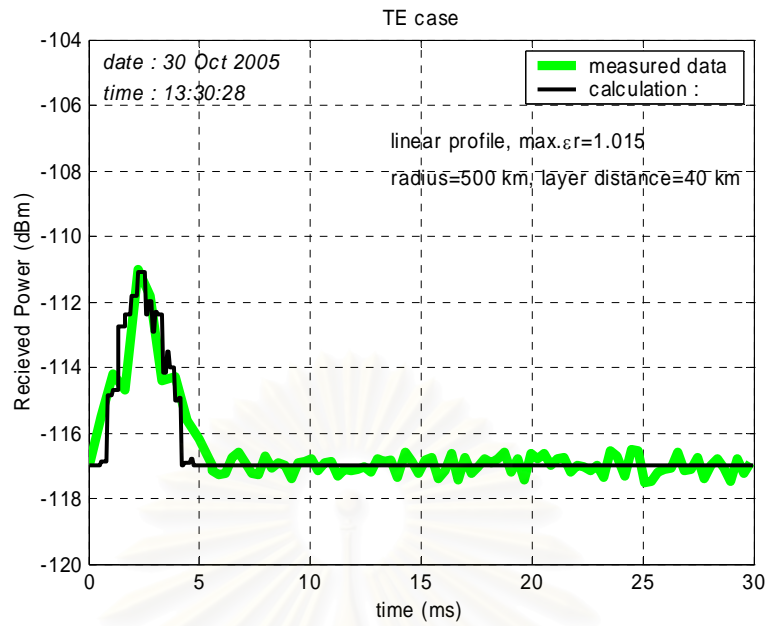
รูปที่ 5.15 ตัวอย่างที่ 1 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



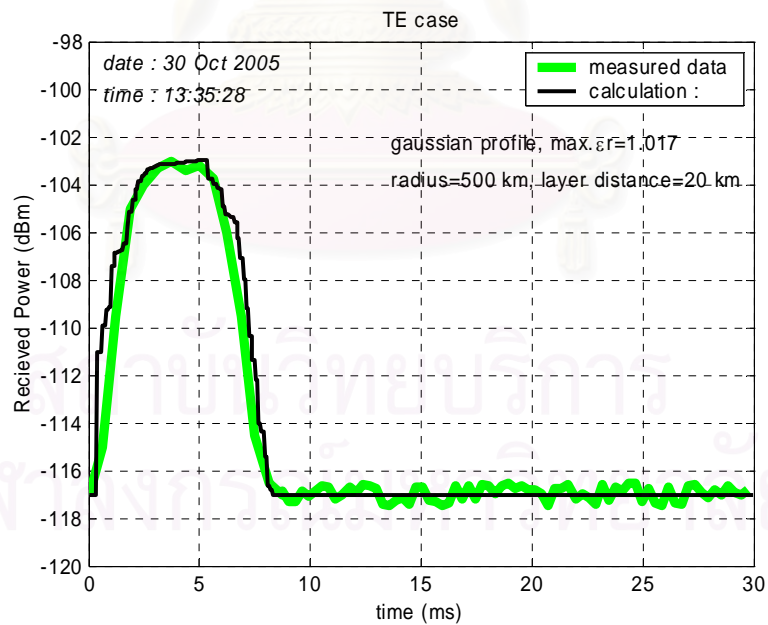
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างที่ 2 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



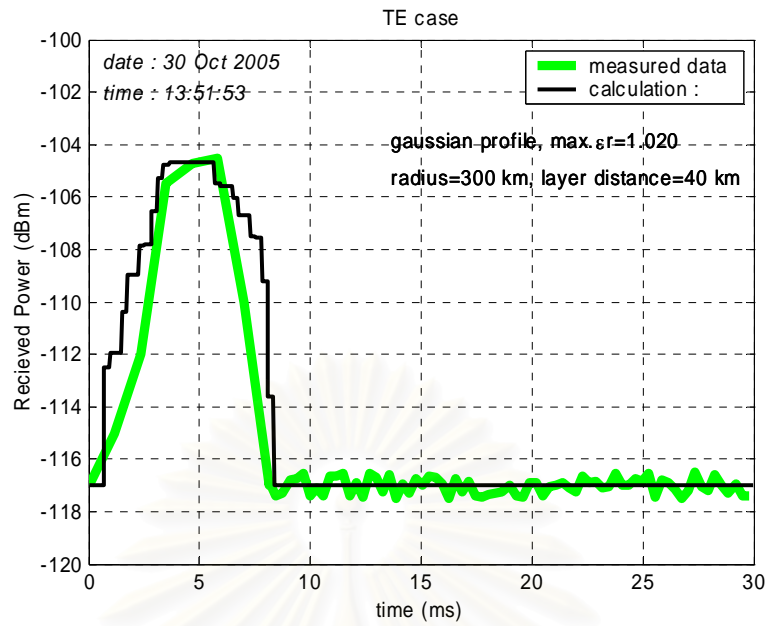
รูปที่ 5.17 ตัวอย่างที่ 3 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



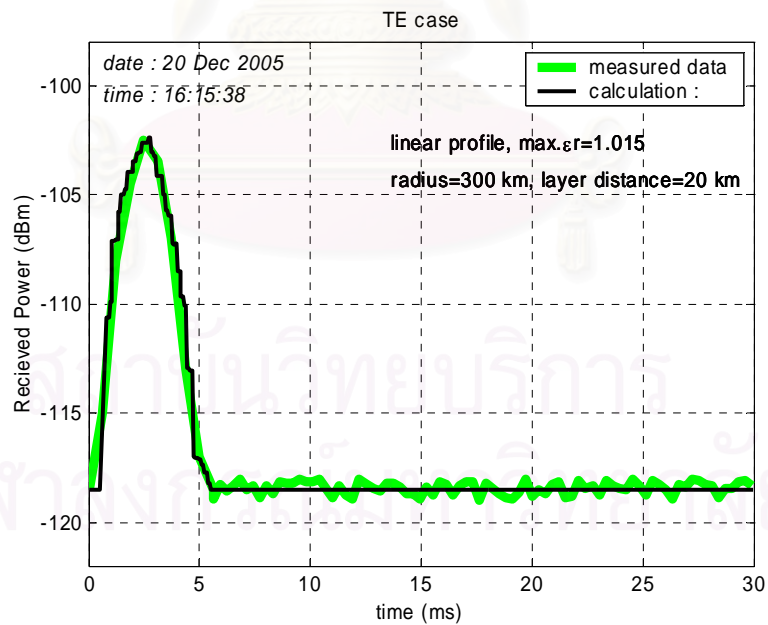
รูปที่ 5.18 ตัวอย่างที่ 4 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec



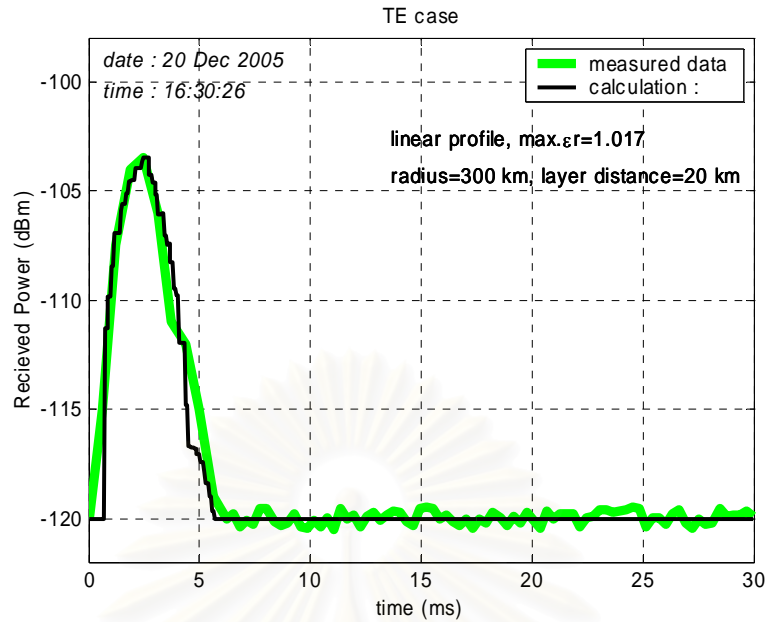
รูปที่ 5.19 ตัวอย่างที่ 5 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



รูปที่ 5.20 ตัวอย่างที่ 6 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 5 mSec



รูปที่ 5.21 ตัวอย่างที่ 7 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec



รูปที่ 5.22 ตัวอย่างที่ 8 ผลการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนเมื่อสัญญาณส่งมีความกว้างพัลส์ 2 mSec

รูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.22 เป็นตัวอย่างรูปแบบสัญญาณคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ
หมุนเขตร้อนที่ได้จากการตรวจวัดที่เคยเกิดขึ้นทั้ง 2 ครั้งตามรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 เปรียบเทียบ
กับรูปแบบสัญญาณคลื่นวิทยุที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิด
ทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ปรากฏว่าให้ผลสอดคล้องและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงใน
ทิศทางเดียวกัน แต่ทั้งนี้ในส่วนผลการวิเคราะห์จะต้องกำหนดรูปแบบหน้าต่างข้างของค่าคงตัว
ไดอิเล็กตริกของพายุให้เหมาะสมด้วยจึงจะได้ผลสอดคล้องกับผลการตรวจวัดมากที่สุด สำหรับ
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ตามรูปที่ 5.15
ถึงรูปที่ 5.22 พิจารณาได้ตามตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์

รูปที่	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
5.15	0.9779
5.16	0.9604
5.17	0.9450
5.18	0.9128

5.19	0.9777
5.20	0.8994
5.21	0.9920
5.22	0.9780

ผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนกับผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ปรากฏว่าให้ผลสอดคล้องและมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถนำผลการวิเคราะห์มาใช้เทียบเคียงกับผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของพายุในเชิงเวลาได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัด ถ้าพิจารณาตามแบบจำลองแล้วคือ เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างในแต่ละชั้นของพายุ หรือการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกภายในพายุ ซึ่งทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาภายในพายุหมุนเขตร้อนได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปการวิจัย

คลื่นวิทยุสามารถเกิดการกระเจิงกลับของสัญญาณได้เมื่อเดินทางผ่านบริเวณของตัวกลางที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน เหตุผลนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนที่พัฒนาขึ้นได้ แบบจำลองพายุที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกตามแนวรัศมีพายุแตกต่างกัน และเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันอากาศ การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนทำได้โดยนำแบบจำลองพายุที่พัฒนาขึ้นใช้ประกอบในการวิเคราะห์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น เพื่อศึกษาการกระเจิงของคลื่นวิทยุเมื่อส่งสัญญาณเข้าไปยังพายุหมุนเขตร้อนด้วยระบบพัลส์เรดาร์ โดยทั่วไปแล้วพายุจะเกิดที่บริเวณเหนือมหาสมุทรหรือทะเล ที่มีอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำสูง ซึ่งบริเวณดังกล่าวอาจเป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากสถานีเรดาร์ในระยะที่ไกลมาก (สถานีเรดาร์ติดตั้ง ณ จังหวัดนครศรีธรรมราช) อาจมากกว่า 1000 กิโลเมตร ดังนั้นถ้าจะใช้ระบบไมโครเวฟเรดาร์ในการตรวจจับพายุจะไม่เหมาะสม เนื่องจากตำแหน่งของพายุไกลเกินกว่ารัศมีหวังผลของระบบไมโครเวฟเรดาร์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าซึ่งเป็นระบบเรดาร์ที่ใช้ความถี่ปฏิบัติการในแถบความถี่สูง (HF band) เพื่อการตรวจจับพายุหมุนเขตร้อนที่เกิดในระยะไกล

แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นเป็นแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองของมวลอากาศที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตามแนวตั้ง เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ และวางซ้อนอยู่บนแกนเดียวกัน โดยทรงกระบอกแต่ละชั้นมีอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศคงที่ตลอดภายในชั้น แต่ต่างจากชั้นอื่นๆ ตามระยะของรัศมีพายุ ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศ ทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุในแต่ละชั้นแตกต่างกัน จึงสามารถวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนได้

การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนใช้กรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่หาสนามกระเจิงจากสมการแมกซ์เวลล์โดยตรง ด้วยการแก้ปัญหาค่า

ขอบเขตของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละชั้นของแบบจำลองพายุ ซึ่งประกอบด้วยสนามตกกระทบ สนามกระเจิง และสนามที่ส่งผ่านเข้าไปยังพายุ โดยผลเฉลยในเบื้องต้นจะอยู่ในรูปเมทริกซ์การสะท้อน และเมทริกซ์การส่งผ่าน จากนั้นจึงนำผลเฉลยดังกล่าวมาวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุตามเวลา โดยผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปตัวประกอบของการสะท้อนคลื่นวิทยุจากพายุ เป็นขั้นต่อไป

แบบแผนคลื่นวิทยุที่ตกกระทบพายุหมุนเขตร้อน แบ่งได้เป็น 2 แบบแผนคือ คลื่น TM หรือคลื่นที่มีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับแกนของพายุ และคลื่น TE หรือคลื่นที่มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแกนของพายุ ความเป็นทวิภาวะของคลื่นทั้งสองแบบแผนทำให้สามารถแสดงสมการของคลื่น TM และ TE พร้อมกันในรูปของเมทริกซ์ สมการในรูปเมทริกซ์นี้สามารถแยกแสดงองค์ประกอบของคลื่นกระเจิงเป็นองค์ประกอบที่ไม่มีการเชื่อมโยงและองค์ประกอบที่เกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างคลื่นทั้งสองแบบแผนได้ โดยอาศัยแบบจำลองพายุร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีเชิงคลื่นเต็มรูปแบบ วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน โดยการแปรค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของพายุ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากพายุ อันได้แก่ การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ การแปรค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น การเปลี่ยนแปลงหน้าตัดข้างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น การแปรค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ใส่ส่ง การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างชั้นของแบบจำลองพายุ และการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปัจจัยในลักษณะต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคลื่นกระเจิง สรุปได้ดังนี้

1. ถ้ากำหนดลักษณะรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์ภายในพายุเหมือนกัน จะส่งผลให้ลักษณะรูปแบบของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกภายในพายุเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงแปรตามการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

2. แอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุจะแปรตามการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกภายในพายุ ดังนั้นถ้ารูปแบบหน้าตัดข้างหรือขนาดของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกภายในพายุเปลี่ยนแปลง ก็ส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงเปลี่ยนแปลงเช่นกัน

3. ทั้งแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุและช่วงระยะเวลาที่มีสัญญาณคลื่นวิทยุกระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน จะแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งผ่านเข้าไปยังพายุ

4. แอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงจะมีค่าสูงถ้าระยะห่างของบริเวณที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกันมีระยะแคบ แต่จะตรงกันข้ามถ้าระยะห่างของบริเวณที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแตกต่างกันมีระยะกว้าง

5. การเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีพายุจะทำให้ช่วงระยะเวลาที่มีสัญญาณคลื่นวิทยุกระเจิงจากพายุเปลี่ยนแปลงเช่นกัน คือ ถ้าระยะรัศมีพายุมีค่าน้อยช่วงระยะเวลาที่มีสัญญาณคลื่นวิทยุกระเจิงจากพายุก็จะน้อย แต่ถ้าระยะรัศมีพายุมีค่ามากช่วงระยะเวลาที่มีสัญญาณคลื่นวิทยุกระเจิงจากพายุก็จะมาก

สำหรับผลของลักษณะรูปร่างของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นกับลักษณะรูปร่างของคลื่นวิทยุที่ได้จากการทดสอบโดยการตรวจวัด ให้ผลในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้ต้องกำหนดรูปแบบของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแบบจำลองพายุให้เหมาะสมด้วย

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยพิจารณาแล้วเห็นว่า สิ่งที่จะควรจะได้รับการปรับปรุงสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการวิเคราะห์ และส่วนของการทดสอบ

ส่วนของการวิเคราะห์

การวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน งานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการวิเคราะห์คือ เริ่มต้นสร้างแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อน จากนั้นวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน โดยใช้แบบจำลองพายุที่ได้สร้างขึ้นเป็นตัวอ้างอิงกับพายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ โดยสิ่งที่จะควรปรับปรุงเพื่อให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลตรวจวัดจริงมากที่สุดคือ

1. แบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนอาจต้องปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขใหม่ เพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบของพายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุให้ผลใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจริงยิ่งขึ้น
2. กรรณวิธีวิเคราะห์คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน งานวิจัยฉบับนี้ใช้กรรณวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ ซึ่งเป็นกรรณวิธีหาสนามกระเจิงจากสมการแมกซ์เวลล์โดยตรง ดังนั้นอาจต้องปรับเปลี่ยนไปใช้กรรณวิธีวิเคราะห์แบบใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับแบบจำลองพายุหมุนเขตร้อนที่ได้สร้างขึ้นมามากที่สุด

ส่วนของการทดสอบ

งานวิจัยฉบับนี้ใช้ระบบเรดาร์เพื่อศึกษาผลของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อน แต่เนื่องจากบริเวณที่พายุก่อตัว หรือบริเวณแนวการเคลื่อนตัวของพายุอยู่ห่างจากสถานีเรดาร์มาก ดังนั้นจึงต้องใช้ระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าเพื่อตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุว่า ให้ผลสอดคล้องประการใดกับผลของการวิเคราะห์คลื่นกระเจิงโดยใช้แบบจำลองพายุที่ได้สร้างขึ้น สำหรับสิ่งที่ควรแก้ไขในส่วนของการทดสอบนี้ มีดังนี้

1. เนื่องจากบริเวณที่พายุก่อตัว หรือบริเวณแนวการเคลื่อนตัวของพายุหมุนเขตร้อนอยู่ห่างจากสถานีเรดาร์มาก ดังนั้นอาจต้องย้ายสถานีเรดาร์ไปยังบริเวณที่ใกล้เคียงกับบริเวณที่พายุก่อตัว หรือใกล้เคียงกับบริเวณแนวที่พายุเคลื่อนตัว เพื่อให้ผลการตรวจวัดถูกต้องยิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถลดผลของสัญญาณกระเจิงจากสิ่งที่ไม่ต้องการได้

2. ระบบเรดาร์ที่ใช้ตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนในงานวิจัยนี้ มีความกว้างลำคลื่นของระบบสายอากาศมากเกินไป (ดูภาคผนวก ง) อาจต้องปรับปรุงระบบสายอากาศใหม่ เพื่อให้ความกว้างลำคลื่นแคบลงกว่านี้ ซึ่งจะสามารถลดผลของสัญญาณที่กระเจิงจากตำแหน่งที่ไม่พึงประสงค์ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] 2002. พายุหมุนเขตร้อน [Online]. The Meteorological Department. Available from : http://www.tmd.go.th/knowledge/know_storm02_n.html [2005, December 14]
- [2] เรดาร์ตรวจอากาศ และเครือข่ายเรดาร์ตรวจอากาศทั่วประเทศ [Online]. The Meteorological Department. Available from : <http://www.tmd.go.th/~satellite/document.html> [2005, December 14]
- [3] R.G. Barry and R.J. Chorley. Atmosphere Weather and Climate. Third Edition. Bungay, Suffolk : Richard Clay (The Chaucer Press), Ltd., 1976.
- [4] James M. Headrick. Looking over the horizon. IEEE SPECTRUM. (July 1990) : 36-39.
- [5] John C. Wise and J.C. Wise Associates. Summary of Recent Australian Radar Developments. IEEE A&E Systems Magazine. (December 2004) : 8-10.
- [6] Alfonso Malaga and Robert E. McIntosh. Analysis of HF Pulse Refraction from a Randomly Varying Ionosphere. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-27, 4 (July 1979) : 508-516.
- [7] Charles M. Rush. Ionospheric Radio Propagation Models and Predictions A Mini-Review. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-34, 9. (September 1986) : 1163-1170.
- [8] Kenneth Davies. Ionospheric Radio Propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, 1965.
- [9] M. Dolukhanov. Propagation of Radio Waves. Moscow : Mir Publishers, 1971.
- [10] ปราณี นิลเหม. ปรากฏการณ์พายุหมุน [Online]. Available from: <http://web1.dara.ac.th/yanin/atmosphere/cyclone.htm> [2005, February 27]
- [11] 2005. Tropical Cyclone Formation Regions [Online]. Fort Worth, Texas: National Weather Service. Available from : http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/tropics/tc_basins.htm [2006, January 22]
- [12] William T. Hodge. Characteristics of North Pacific Typhoons. MTS-IEEE. Oceans'76, 22G : 1-3.

- [13] Kitamoto, Asanobu. Classification of Typhoons [Online]. Available from : <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/help/unit.html> [2006, January 22]
- [14] Kristen L. Corbosiero and John Molinari. The Relationship between Storm Motion, Vertical Wind Shear, and Convective Asymmetries in Tropical Cyclones. Journal of the Atmospheric Sciences. 60, (2003) : 366-376.
- [15] K. C. Chow, Kwing L. Chan, and Alexis K.H.Lau. Generation of Moving Spiral Bands in Tropical Cyclones. Journal of the Atmospheric Sciences. 59 : 2930-2950.
- [16] Bassem R. Mahafza. Radar System Analysis and Design Using Matlab. Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [17] D J Emery. The Choice of Operating Frequency in HF Surfacewave Radar Design. IEE. (2003) : 278-281.
- [18] Frederick H. Raab, Robert Caverly and Richard Campbell, HF, VHF, and UHF System and Technology. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. 50, 3 (March 2002) : pp. 888-898.
- [19] T.M. Georges and J.A. Harlan. New Horizons for Over-the-Horizon Radar?. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 36, 4 (August 1994) : 14-24.
- [20] กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา. การศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้สัญญาณดาวเทียม GPS. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.
- [21] Mohammed H. Bataineh and Raymond V. Macario. Modelling Refractivity Variation in the VHF/UHF Bands. (1996) : 267-271.
- [22] Flemming Jakobsen and Henrik Madsen. Comparison and further development of parametric tropical cyclone models for storm surge modelling. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. (2004) : 375-391.
- [23] ธีรศักดิ์ อนันตกุล. แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [24] C.A. Balanis. Advanced Engineering Electromagnetics. USA : John Wiley & Sons, 1989.

- [25] Dheerasak Anantakul and Chatchai Waiyapattanakorn. Investigation of Oblique Scattering of Radio Wave from a Meteor Trail. IEICE Transactions on Communications. E85-B, 9, (September 2002) : 1774-1786.
- [26] W.C. Chew. Waves and fields in inhomogeneous media. New York.
- [27] 2002. แผนที่อากาศ [Online]. The Meteorological Department. Available from : http://www.tmd.go.th/program/map_weather_n.php [2006, January 5]
- [28] C.A. Balanis. Antenna Theory Analysis and Design. 2nd Edition. USA : John Wiley & son, 1997.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

รายชื่อ ความหมาย และที่มาของพายุหมุนเขตร้อน

การตั้งชื่อพายุเริ่มแรกจะใช้หมายเลข 1,2,3,4,... แต่ค่อนข้างสับสน องค์การอุตุนิยมวิทยาโลกและสมาชิกจึงตั้งชื่อเป็นอักษรโรมัน ตั้งแต่ตัว A-Z ตามลำดับก่อนหลังตามวันและเวลาเกิดพายุ และใช้ชื่อผู้หญิงเพื่อจะได้ลดความเกี้ยวกราดของพายุลง แต่กลุ่มสตรีในอเมริกาได้ประท้วงหาว่าเปรียบผู้หญิงเป็นผู้โชคร้าย จากนั้นจึงได้มีการตั้งชื่อผู้ชายเข้าไปด้วย แต่ในปี พ.ศ. 2543 ได้เกิดระบบการตั้งชื่อพายุขึ้นใหม่โดยใช้ภาษาพื้นเมืองของแต่ละประเทศ สำหรับประเทศในแถบบริเวณแปซิฟิกตอนบนกับทะเลจีนใต้รวม 14 ประเทศ ได้ตกลงกับองค์การอุตุนิยมวิทยาโลกเกี่ยวกับการตั้งชื่อพายุขึ้นเอง โดยแต่ละประเทศจะเสนอชื่อพายุประเทศละ 10 ชื่อ รวม 140 ชื่อ แล้วแบ่งเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มละ 28 ชื่อ เมื่อมีพายุเกิดขึ้นก็จะตั้งชื่อเรียงตามรายชื่อในกลุ่มแรกเรื่อยไปจนหมด ต่อด้วยรายชื่อในกลุ่มที่ 2, 3, 4 และ 5 ต่อเนื่องกันไป ตามลำดับ

รายชื่อชุดใหม่ของพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัวบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กรมอุตุนิยมวิทยาได้แต่งตั้งคณะกรรมการเพื่อกำหนดการออกเสียงชื่อพายุเป็นภาษาไทย โดยได้ร่วมประชุมเมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2543 โดยมีการพิจารณารายชื่อพายุ และความหมายของชื่อพายุซึ่งได้กำหนดใช้เฉพาะกิจการอุตุนิยมวิทยาให้เข้ากับการออกเสียงของราชบัณฑิตยสถานเพื่อใช้ในราชการ สำหรับส่วนของประเทศไทยได้เสนอชื่อพายุจำนวน 10 ชื่อ ได้แก่ พระพิรุณ ทูเรียน วิภา รามสูร เมขลา นิดา มรกต ชบา กุหลาบ และขนุน

สำหรับรายชื่อ ความหมาย และที่มา (ประเทศที่เสนอชื่อพายุ) ของพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัวบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ ในแต่ละกลุ่ม พิจารณาได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ก.1 รายชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้

กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3	กลุ่มที่ 4	กลุ่มที่ 5
Damrey	Kong-rey	Nakri	Krovanh	Sarika
Longwang	Yutu	Fengshen	Dujuan	Haima
Kirogi	Toraji	Kalmaegi	Maemi	Meari

Kai-tak	Man-yi	Fung-wong	Choi-wan	Ma-on
Tembin	Usagi	Kammuri	Koppu	Tokage
Bolaven	Pabuk	Phanfone	Ketsana	Nock-ten
Chanchu	Wutip	Vongfong	Parma	Muifa
Jelawat	Sepat	Rusa	Melor	Merbok
Ewiniar	Fitow	Sinlaku	Nepartak	Nanmadol
Bilis	Danas	Hagupit	Lupit	Talas
Kaemi	Nari	Changmi	Sudal	Noru
Prapiroon	Wipha	Mekkhala	Nida	Kulap
Maria	Francisco	Higos	Omais	Roke
Saomai	Lekima	Bavi	Conson	Sonca
Bopha	Krosa	Maysak	Chanthu	Nesat
Wukong	Haiyan	Haishen	Dianmu	Haitang
Sonamu	Podul	Pongsona	Mindulle	Nalgae
Shanshan	Lingling	Yanyan	Tingting	Banyan
Yagi	Kajiki	Kujira	Kompasu	Washi
Xangsane	Faxai	Chan-hom	Namtheun	Matsa
Bebinca	Vamei	Linfa	Malou	Sanvu
Rumbia	Tapah	Nangka	Meranti	Mawar
Soulik	Mitag	Soudelor	Rananim	Guchol
Cimaron	Hagibis	Imbudo	Malakas	Talim
Chebi	Noguri	Koni	Megi	Nabi
Durian	Rammasun	Morakot	Chaba	Khanun
Utor	Chataan	Etau	Aere	Vicente
Trami	Halong	Vamco	Songda	Saola

วิธีการตั้งชื่อพายุหมุนเขตร้อน

การตั้งชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ มีลำดับการพิจารณาในการตั้งชื่อพายุ เรียงตามลำดับดังนี้

1. เมื่อมีพายุก่อตัวและมีความเร็วลมสูงสุดใกล้ศูนย์กลางของพายุ มากกว่า 34 นอต หรือ 62 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พายุนั้นจะถูกตั้งชื่อ

2. ชื่อของพายุกจะเริ่มใช้ในกลุ่มที่ 1 ตัวบนสุดก่อน เช่น เมื่อมีพายุเกิดขึ้นและมีความเร็วลมสูงสุดใกล้จุดศูนย์กลางตามที่กำหนดในข้อ 1. เป็นตัวแรกของปี (พ.ศ. 2543 ซึ่งเป็นปีแรกที่เริ่มการใช้ชื่อใหม่) พายุนั้นจะมีชื่อว่า Damrey (ดอมเรย)

3. เมื่อมีพายุตัวต่อไปเกิดขึ้นอีก และมีความเร็วลมสูงสุดใกล้จุดศูนย์กลางตามที่กำหนดในข้อ 1. พายุนั้นจะใช้ชื่อที่อยู่ถัดลงมา เช่น พายุตัวที่สองในกลุ่มที่ 1 จะมีชื่อว่า Longwang (หลงหวาง)

4. เมื่อใช้ชื่อในกลุ่มจนหมดให้ใช้ชื่อแรกของกลุ่มที่อยู่ถัดไป เช่น พายุที่เกิดหลังพายุ Trami (จ่ามี) จะใช้ชื่อ Kong-rey (กองเรย)

5. เมื่อใช้รายชื่อในกลุ่มที่ 5 หมด ให้กลับมาใช้ชื่อแรกของกลุ่มที่ 1 อีกครั้ง เช่น พายุที่เกิดหลังพายุ Saola (ซาวลา) จะใช้ชื่อ Damrey (ดอมเรย)

ตารางที่ ก.2 ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก
ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ **กลุ่มที่ 1**

ชื่อพายุ		ความหมาย	ที่มา (ประเทศ)
Damrey	ดอมเรย	ช้าง	กัมพูชา
Longwang	หลงหวาง	พญามังกร	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Kirogi	ไคโรจิ	ห่านป่า (ฝูงนกที่อพยพมาเกาหลีในฤดูใบไม้ร่วง และอพยพกลับไปทางเหนือในต้นฤดูใบไม้ผลิ ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับพายุโซนร้อน)	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนเกาหลี
Kai-tak	ไคตัก	ชื่อสนามบินเก่าของฮ่องกง	ฮ่องกง
Tembin	เทมบิง	ราศีตุลย์/ตาซัง	ญี่ปุ่น
Bolaven	โบลาวอน	ที่ราบสูง	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
Chanchu	จันจู	ไข่มุก	มาเก๊า
Jelawat	เจลาวัต	ปลาน้ำจืด	มาเลเซีย
Ewiniar	เอวินีแยร์	เทพเจ้าแห่งพายุ (ภาษาพื้นเมืองของเผ่า Chuuk)	ไมโครนีเชีย
Bilis	บิลิส	ความเร็ว	ฟิลิปปินส์
Kaemi	แกมี	มด	สาธารณรัฐเกาหลี
Prapiroon	พระพิรุณ	เทพเจ้าแห่งฝน	ไทย
Maria	มาเรีย	ชื่อสตรี (ภาษาพื้นเมืองของหมู่เกาะมารีนา ในมหาสมุทรแปซิฟิก)	สหรัฐอเมริกา
Saomai	ซาวไม	เทพธิดาแห่งความรัก	เวียดนาม

Bopha	โบฟา	ชื่อดอกไม้/ชื่อของเด็กหญิง	กัมพูชา
Wukong	หูกง	ชื่อของวีรบุรุษในพงศาวดารจีน	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Sonamu	โซนามู	ต้นสน	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนเกาหลี
Shanshan	ซานซาน	ชื่อของหญิงสาว	ฮ่องกง
Yagi	ยาจิ	ราศีมังกร/แพะ	ญี่ปุ่น
Xangsane	ข้างสาร	ข้าง	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
Bebinca	เบบินคา	ขนมพุดดิ้ง	มาเก๊า
Rumbia	รัมเบีย	ต้นปาล์ม	มาเลเซีย
Soulik	ซูลิก	ตำแหน่งหัวหน้าเผ่าโบราณโพหนเป (Pohnpei)	ไมโครนีเชีย
Cimaron	ซีมารอน	วัวป่า	ฟิลิปปินส์
Chebi	เชบี	นกนางแอ่น	สาธารณรัฐเกาหลี
Durian	ทุเรียน	ชื่อผลไม้	ไทย
Utor	อูตอร์	แนวพายุฝนฟ้าคะนอง (ภาษาพื้นเมืองชาวเกาะมาแชลในมหาสมุทรแปซิฟิก)	สหรัฐอเมริกา
Trami	จ่ามี	ชื่อดอกไม้ชนิดหนึ่ง	เวียดนาม

ตารางที่ ก.3 ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก
ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ **กลุ่มที่ 2**

ชื่อพายุ		ความหมาย	ที่มา (ประเทศ)
Kong-rey	กองเรย	ชื่อสาวงามในตำนานของเขมร/ชื่อภูเขา	กัมพูชา
Yutu	ยูทู	กระต่ายในพงศาวดารจีน	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Toraji	โทราจิ	ต้นไม้ชนิดหนึ่ง มีดอกสวยงาม พบในหุบเขาของเกาหลี รากใช้ทำยาและอาหาร	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนเกาหลี
Man-yi	มานหยี่	ชื่อช่องแคบ ปัจจุบันเป็นอ่างเก็บน้ำ	ฮ่องกง
Usagi	อุซางิ	กระต่าย	ญี่ปุ่น
Pabuk	ปลาบึก	ปลาน้ำจืดขนาดใหญ่	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
Wutip	หวูตีบ	ผีเสื้อ	มาเก๊า
Sepat	เซอแปต	ปลาน้ำจืดที่มีครีบเล็กๆ สำหรับคลาน	มาเลเซีย
Fitow	ฟีโทว์	ชื่อดอกไม้สวย มีกลิ่นหอม (ภาษาพื้นเมืองของหมู่เกาะ Yapese)	ไมโครนีเชีย
Danas	ดานัส	ประสบการณ์ และความรู้สึก	ฟิลิปปินส์

Nari	นารี	ดอกไม้	สาธารณรัฐเกาหลี
Wipha	วิภา	ชื่อสตรี	ไทย
Francisco	ฟรานซิสโก	ชื่อบุรุษ (ภาษาพื้นเมืองของหมู่เกาะมารีน่า ในมหาสมุทรแปซิฟิก)	สหรัฐอเมริกา
Lekima	เลกึมา	ผลไม้ชนิดหนึ่ง	เวียดนาม
Krosa	กรอซา	ปิ่น	กัมพูชา
Haiyan	ไห่เยียน	นกทะเลชนิดหนึ่ง	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Podul	โพดอล	ต้นหลิว ต้นไม้ที่มักจะพบในเกาหลี	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนเกาหลี
Lingling	เหล่งเหล่ง	ชื่อของสาวน้อย	ฮ่องกง
Kajiki	คะจิกิ	ปลาทะเลชนิดหนึ่ง เกิดจะเปลี่ยนสีเมื่อขึ้นจากน้ำ	ญี่ปุ่น
Faxai	ฟ้าไส	ชื่อสตรี	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนลาว
Vamei	ฮัวเหม่ย	นกชนิดหนึ่งมีเสียงร้องไพเราะ	มาเก๊า
Tapah	ตาปาห์	ปลาน้ำจืดชนิดหนึ่ง	มาเลเซีย
Mitag	มิแทก	ชื่อสตรี (ภาษาพื้นเมืองของชาวเกาะ)	ไมโครนีเชีย
Hagibis	ฮาภิบิส	รวดเร็ว ว่องไว	ฟิลิปปินส์
Noguri	โนกูรี	สุนัขพันธุ์ราคุน	สาธารณรัฐเกาหลี
Rammasun	รามสูร	ชื่อยักษ์ในเทพนิยาย/เทพเจ้าแห่งฟ้าร้องฟ้าผ่า	ไทย
Chataan	ชาทาอาน	ฝน (ภาษาพื้นเมืองชาวเกาะมารีน่า ในมหาสมุทรแปซิฟิก)	สหรัฐอเมริกา
Halong	หาลอง	ชื่ออ่าวแห่งหนึ่งในเวียดนาม	เวียดนาม

ตารางที่ ก.4 ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก
ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 3

ชื่อพายุ		ความหมาย	ที่มา (ประเทศ)
Nakri	นากรี	ชื่อของดอกไม้ชนิดหนึ่ง	กัมพูชา
Fengshen	ฟงเฉิน	เทพเจ้าแห่งลม	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Kalmaegi	คัลเมจึ	นกนางนวล (สัญลักษณ์แห่งท้องทะเล)	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนเกาหลี
Fung-wong	ฟองวอง	ชื่อยอดเขาแห่งหนึ่ง	ฮ่องกง
Kammuri	คัมมูรี	มงกุฏ	ญี่ปุ่น
Phanfone	พันฝน	สัตว์	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนลาว

Vongfong	ห้วงฟง	แมลงชนิดหนึ่ง	มาเก๊า
Rusa	รูซา	กวาง	มาเลเซีย
Sinlaku	ซินลากอ	เทพสตรีในนิยาย	ไมโครนีเชีย
Hagupit	ฮาคุปีต	เลียนดี	ฟิลิปปินส์
Changmi	ชังมี	กุกุลาบ	สาธารณรัฐเกาหลี
Mekkhala	เมขลา	เทพธิดาในเทพนิยาย/เทพธิดาแห่งฟ้าแลบ	ไทย
Higos	ฮีโกส	ชื่อพืชชนิดหนึ่ง (ภาษาพื้นเมืองของหมู่เกาะมารีน่า ในมหาสมุทรแปซิฟิก)	สหรัฐอเมริกา
Bavi	บาหวี	ชื่อภูเขาทางตอนเหนือของเวียดนาม	เวียดนาม
Maysak	ไม้สัก	ต้นไม้ชนิดหนึ่ง	กัมพูชา
Haishen	ไห่เฉิน	เทพเจ้าแห่งท้องทะเล	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Pongsona	พงโซนา	ดอกไม้ชนิดหนึ่ง	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนเกาหลี
Yanyan	ยันยัน	ชื่อของสาวน้อย	ฮ่องกง
Kujira	คฺุจึระ	ปลาวาฬ	ญี่ปุ่น
Chan-hom	จันท์หอม	ชื่อต้นไม้ชนิดหนึ่ง	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนลาว
Linha	หลินฟ้า	ดอกบัว	มาเก๊า
Nangka	นังกา	ผลไม้ชนิดหนึ่ง	มาเลเซีย
Soudelor	เซาเคโดร์	ชื่อหัวหน้าเผ่าในเทพนิยายของชาว Pohnpei	ไมโครนีเชีย
Imbudo	อิมบูโด	พายุวงช้าง	ฟิลิปปินส์
Koni	โคนี	หงส์ส่งเสียงร้อง	สาธารณรัฐเกาหลี
Morakot	มรกต	หัวหน้าลิงในเทพนิยาย	ไทย
Etau	เอตา	เมฆพายุ (ภาษาพื้นเมืองชาวเกาะ Palauan)	สหรัฐอเมริกา
Vamco	หว่ามก้อ	ชื่อแม่น้ำทางตอนใต้ของเวียดนาม	เวียดนาม

ตารางที่ ก.5 ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก
ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 4

ชื่อพายุ	ความหมาย	ที่มา (ประเทศ)	
Krovanh	กระวาน	ต้นไม้ชนิดหนึ่ง	กัมพูชา
Dujuan	ตู้เจียน	ดอกไม้ชนิดหนึ่ง	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Maemi	เมมิ	สัตว์ชนิดหนึ่งมักส่งเสียงร้องในฤดูร้อนเวลาเกิดพายุ	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนเกาหลี

Choi-wan	ชอยวัน	เมฆซึ่งมีสีสรรสวยงาม	ฮ่องกง
Koppu	คอปปู	ปล่องภูเขาไฟ หลุม หรือแกว	ญี่ปุ่น
Ketsana	กฤษณา	ต้นไม้ชนิดหนึ่ง	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
Parma	ป่าหมา	ชื่ออาหารชนิดหนึ่ง (ประกอบด้วยเนื้อสะโพก ตับ และเห็ด)	มาเก๊า
Melor	เมอโลร์	ดอกมะลิ	มาเลเซีย
Nepartak	เนพาร์ทัก	นักรบผู้มีชื่อเสียง	ไมโครนีเชีย
Lupit	ลูปีต	ความทารุณ โหดร้าย	ฟิลิปปินส์
Sudal	ซูดาล	ตัวนาก	สาธารณรัฐเกาหลี
Nida	นิดา	ชื่อสตรี	ไทย
Omais	โอไมส์	การเคลื่อนที่ไปรอบๆ (ภาษาพื้นเมืองของหมู่เกาะ Palauan)	สหรัฐอเมริกา
Conson	โกนชิน	สถานที่ในประวัติศาสตร์ของเวียดนาม	เวียดนาม
Chanthu	จันทุ	ดอกไม้ชนิดหนึ่ง	กัมพูชา
Dianmu	เตียนหมู่	เจ้าแม่แห่งสายฟ้า	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Mindulle	มินดอลเล	ดอกไม้ชนิดหนึ่ง ดอกเล็กๆ สีเหลือง บานในฤดูใบไม้ผลิ แสดงถึงจิตใจที่อ่อนโยนและบริสุทธิ์ ของหญิงสาวชาวเกาหลี	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนเกาหลี
Tingting	เต็งเตง	ชื่อของสาวน้อย	ฮ่องกง
Kompasu	คอมปาซุ	วงเวียน	ญี่ปุ่น
Namtheun	น้ำเทิน	แม่น้ำ	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
Malou	หมาไหล	หินโมรา	มาเก๊า
Meranti	เมอร์รันตี	ต้นไม้ชนิดหนึ่ง	มาเลเซีย
Rananim	รานานิมี	คำทักทาย/สวัสดิ์ ในภาษาพื้นเมืองของชาว Chuukese	ไมโครนีเชีย
Malakas	มาลากัส	แข็งแกร่ง เต็มไปด้วยพลัง	ฟิลิปปินส์
Megi	เมกี	ปลา	สาธารณรัฐเกาหลี
Chaba	ชบา	ชื่อดอกไม้ชนิดหนึ่ง	ไทย
Aere	แอรี	เมฆ (ภาษาพื้นเมืองชาว Marshalese)	สหรัฐอเมริกา
Songda	ซงดา	ชื่อแม่น้ำทางตะวันตกเฉียงเหนือของเวียดนาม	เวียดนาม

ตารางที่ ก.6 ความหมาย และที่มาของชื่อพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัว ณ บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิก
ด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ กลุ่มที่ 5

ชื่อพายุ		ความหมาย	ที่มา (ประเทศ)
Sarika	สาริกา	นกชนิดหนึ่งมีเสียงไพเราะ	กัมพูชา
Haima	ไหหมา	ม้าน้ำ	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Meari	มิเอะริ	เสียงสะท้อน (หมายถึง ทันทีที่เกิดพายุ คำประกาศ เดือนก็จะแจ้งไปสู่ประเทศสมาชิกทันที)	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนเกาหลี
Ma-on	หมางอัน	อานม้า	ฮ่องกง
Tokage	โทคาเงะ	สัตว์เลื้อยคลานจำพวกจิ้งจก หรือตุ๊กแก	ญี่ปุ่น
Nock-ten	นกกะเต็น	นก	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนลาว
Muifa	หมู่ยี่ฟ้า	ชื่อดอกไม้ชนิดหนึ่ง	มาเก๊า
Merbok	เมอร์บุค	นกชนิดหนึ่ง	มาเลเซีย
Nanmadol	นันมาดอล	ซากประวัติศาสตร์ที่มีชื่อเสียงของชาว Pohnpoi หรือ "เวนิซแห่งแปซิฟิก"	ไมโครนีเชีย
Talas	ตาลัส	แหลมคม	ฟิลิปปินส์
Noru	โนรู	กว้าง	สาธารณรัฐเกาหลี
Kulap	กุหลาบ	ดอกกุหลาบ	ไทย
Roke	โรเค	ชื่อของผู้ชาย (ภาษาพื้นเมืองของหมู่เกาะมารีน่า ในมหาสมุทรแปซิฟิก)	สหรัฐอเมริกา
Sonca	เซินกา	นกชนิดหนึ่ง	เวียดนาม
Nesat	เนสาด	ชาวประมง	กัมพูชา
Haitang	ไห่ถ่าง	ผลไม้ชนิดหนึ่ง	สาธารณรัฐประชาชนจีน
Nalgae	นาลเก	ปีก (หมายถึงการโอบบิน เคลื่อนที่ เคลื่อนไหวอย่างมีอิสระ)	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนเกาหลี
Banyan	บันยัน	ต้นไม้ชนิดหนึ่ง	ฮ่องกง
Washi	วาชิ	ชื่อหมู่ดาว/นกอินทรี	ญี่ปุ่น
Matsa	มัทยา	ปลาเทศเมีย	สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนลาว
Sanvu	ซันหู่	หินปะการัง	มาเก๊า
Mawar	มาวาร์	กุหลาบ	มาเลเซีย
Guchol	กูโชล	เครื่องเทศชนิดหนึ่ง	ไมโครนีเชีย
Talim	ตาลิม	แหลมคม ด้านคมของใบมีด	ฟิลิปปินส์
Nabi	นาบี	ผีเสื้อ	สาธารณรัฐเกาหลี

Khanun	ขนุน	ชื่อผลไม้ชนิดหนึ่ง	ไทย
Vicente	วีเซนเต	เมฆ (ภาษาพื้นเมืองชาว Chamarro)	สหรัฐอเมริกา
Saola	ซาวลา	ชื่อสัตว์ชนิดหนึ่งที่เพิ่งค้นพบในเวียดนาม	เวียดนาม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

สถิติพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนตัวผ่านภาคต่างๆ ของประเทศไทย ในคาบ 54 ปี (พ.ศ.2494-2547)

ประเทศไทย ตั้งอยู่ระหว่างบริเวณแหล่งกำเนิดของพายุหมุนเขตร้อนทั้งสองด้าน ด้านตะวันออกคือ มหาสมุทรแปซิฟิกและทะเลจีนใต้ ส่วนด้านตะวันตกคือ อ่าวเบงกอลและทะเลอันดามัน โดยปกติประเทศไทยจะมีพายุเคลื่อนผ่านเข้ามาโดยเฉลี่ยประมาณ 3 - 4 ลูกต่อปี บริเวณที่พายุมีโอกาสเคลื่อนผ่านเข้ามามากที่สุดคือ ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะทางตอนบนของภาค ในระยะต้นปีระหว่างเดือนมกราคมถึงมีนาคมเป็นช่วงที่ประเทศไทยปลอดจากอิทธิพลของพายุ ต่อมาเดือนเมษายนเป็นเดือนแรกของปีที่พายุเริ่มเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยทางภาคใต้ แต่มีโอกาสน้อยและเคยเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวในรอบ 54 ปี สำหรับสถิติพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนตัวผ่านภาคต่างๆ ของประเทศไทย สามารถพิจารณาได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ ข.1 สถิติพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนตัวผ่านภาคต่างๆ ของประเทศไทยคาบ 54 ปี (พ.ศ. 2494-2547)

ภาค	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวม
เหนือ	-	-	-	-	5	2	9	17	23	15	1	-	72
ตะวันออกเฉียงเหนือ	-	-	-	-	1	6	4	17	28	22	4	-	82
กลาง	-	-	-	-	2	1	1	-	7	9	2	-	22
ตะวันออก	-	-	-	-	1	1	1	-	3	12	2	-	20
ใต้	-	-	-	1	-	-	-	-	3	14	24	8	50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

สถิติของพายุหมุนเขตร้อนที่อาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าได้ กรณีติดตั้งสถานีเรดาร์ ณ จังหวัดนครศรีธรรมราช

การคาดหมายของพายุหมุนเขตร้อนซึ่งเคยเกิดขึ้นบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ ที่อาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าที่ติดตั้ง ณ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยกำหนดให้ตำแหน่งของพายุห่างจากสถานีเรดาร์ภายในระยะไม่เกิน 1500 กิโลเมตร สำหรับภายในเวลา 53 ปี (พ.ศ. 2495-2547) ที่ผ่านมา พายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัวและอาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์ดังกล่าวได้ พิจารณาได้จากตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ ค.1 พายุที่เคยเกิดขึ้นบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกด้านตะวันตกตอนบนและทะเลจีนใต้ และอาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าที่ติดตั้ง ณ จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้

Year	Month	Date	Name	Latitude	Longitude	Speed (kt)
2495	10	15-17-18	SHEREEY-2495	12.60729°N	100.12360°E	40
2499	11	12-13-14	Storm4-2499	9.81417° N	102.92620° E	60
2501	10	19-21	Storm66-2501	10.66068° N	101.18840° E	40
	12	20-23	Storm10-2501	8.24374° N	103.90610° E	40
2502	10	01-04-06	Storm12-2502	12.57966° N	101.56870° E	40
2503	11	26-27-28	Storm14-2503	8.24509° N	103.70180° E	40
2504	04	11-13	Storm15-2504	7.81375° N	104.34540° E	40
	05	07-08-09	Storm16-2504	10.49321° N	102.49490° E	40
2505	10	25-26	Tropical Storm	7.90° N	101.50° E	50
	10-11	25-01	HARRIET-2505	10.00° N	103.40° E	30
	12	01-03	Tropical Depression	6.80° N	109.50° E	30
2506	11	04-06	Storm26-2506	8.88938° N	102.65640° E	40
2507	10	14-15-16	Storm27-2507	12.56470° N	101.49940° E	40
	11	12-18-20	KATE-2507	10.78349° N	102.27400° E	60
	11-12	30-01	Storm28-2507	8.85004° N	101.81000° E	40
	12	09-13-15	Storm29-2507	6.68152° N	104.74460° E	40

2508	09	15-16	Storm31-2508	11.33381° N	99.55883° E	40
	09	16-17	Storm32-2508	11.58054° N	100.50750° E	40
	09	18-19-21	Storm33-2508	12.35585° N	101.81290° E	40
	12	18-19-21	Tropical Storm	7.90° N	105.90° E	40
2509	11	27-29	Storm38-2509	7.33211° N	103.47730° E	40
	12	08-10-13	Storm39-2509	4.98583° N	108.06400° E	40
2510	10	03-04-07	Storm41-2510	10.67945° N	102.79490° E	40
2511	10	17-21-23	RESTER-2511	10.09266° N	103.79650° E	60
	11	25-28-29	NINA-2511	7.63418° N	105.03230° E	40
2512	10	28-29	Storm45-2512	7.58836° N	103.80710° E	40
	10-11	30-01	Storm68-2512	7.85129° N	102.88550° E	40
	10-11	31-04	Storm46-2512	8.67255° N	104.15480° E	40
2513	10-11	27-30-01	LOUISE-2513	11.31473° N	102.14890° E	40
	11-12	26-28-02	RUTH-2513	8.26468° N	104.63790° E	60
2514	11	15-16	Tropical Storm	5.50° N	109.50° E	45
2515	11-12	30-02-05	Typhoon	7.50° N	105.20° E	80
2516	11	09-11-12	Tropical Depression	10.50° N	103.40° E	25
	11	14-17-18	Tropical Depression	9.70° N	104.40° E	20
2517	10	08-12	Storm56-2517	10.99700° N	102.55360° E	40
	11	02-03-04	NORA-2517	7.17154° N	104.92840° E	60
	12	22-25-26	KIT-2517	7.69231° N	103.40450° E	40
2519	12	01-03-09	SALLY-2519	7.49931° N	104.07870° E	80
2520	11	10-11	Storm58-2520	10.04087° N	103.69030° E	40
2521	11	11	Storm60-2521	8.01178° N	104.34340° E	40
2523	05	14-20	Storm62-2523	13.31550° N	100.41680° E	40
	11	13-18	Storm64-2523	12.26892° N	101.86980° E	40
2528	10	10-12	TD10-2528	12.3° N	102.7° E	53
	11	19-26	Tropical Depression	6.80° N	108.10° E	25
	12	16-21-22	Tropical Depression	6.80° N	106.60° E	30

2532	11	01-10	GAY-2532	7.10° N	103.70° E	25
2534	10	25-26-27	TD4-2534	9.00° N	103.50° E	30
2535	10	12-25-29	ANGELA-2535	10.30° N	104.40° E	15
	11	08-14-22	FORREST-2535	7.70° N	105.40° E	55
2536	12	01-14-16	Tropical Storm	7.60° N	106.10° E	35
2539	10	24-29-31	Tropical Depression	7.50° N	103.70° E	25
	10-11	29-16-18	Tropical Depression	9.40° N	105.00° E	25
	12	12-13-21	Tropical Depression	4.20° N	105.50° E	20
2540	10-11	25-02-09	LINDA-2540	9.20° N	104.60° E	55
2541	11	11-15-23	CHIP-2541	9.00° N	103.00° E	30
	12	08-11-13	Tropical Storm	8.20° N	105.10° E	35
2542	11-12	29-02-05	Tropical Depression	7.00° N	105.20° E	25
2543	11	03	TD5-2543	9.00° N	100.5° E	30
2544	11	18-23	Tropical Depression	5.40° N	107.20° E	25
2546	10	21-28	Tropical Depression	9.10° N	101.40° E	25
2547	11	21-25-26	MUIFA-2547	8.70° N	103.50° E	40

สำหรับตัวเลขที่เป็นตัวหนาในช่อง **Date** และ **Month** ของตารางที่ ค.1 จะแสดงวันและเดือนที่เกิดพายุหมุนเขตร้อน และอาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าที่ติดตั้ง ณ จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้ ดังนั้นตารางสรุปจำนวนพายุที่เคยเกิดขึ้นในช่วงเวลาครึ่งเดือนแรกและครึ่งเดือนหลังของพายุที่เคยเกิดขึ้นในแต่ละเดือน ในคาบเวลา 53 ปี (พ.ศ. 2495-2547) ที่ผ่านมาสามารถพิจารณาได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ ค.2 จำนวนพายุหมุนเขตร้อนที่อาจจะตรวจจับด้วยระบบเรดาร์เหนือขอบฟ้าได้ในช่วงเวลาครึ่งเดือนแรกและครึ่งเดือนหลัง ของพายุที่เคยเกิดขึ้นในแต่ละเดือน

เดือน	เม.ย.		พ.ค.		ก.ย.		ต.ค.		พ.ย.		ธ.ค.	
อัตราการเกิดพายุ	1.64%		3.28%		4.92%		27.87%		40.98%		21.31%	
ช่วงเดือน	แรก	หลัง	แรก	หลัง	แรก	หลัง	แรก	หลัง	แรก	หลัง	แรก	หลัง
จำนวนพายุ	1	0	1	1	0	3	5	12	13	12	9	4

ภาคผนวก ง

ข้อมูลอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุที่ใช้ในการทดลองตรวจวัด คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ

รายการอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนแสดงแยกเป็นรายการอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ ยกเว้นสายอากาศที่ใช้ในการทดลองจะแยกแสดงเป็นรายการสุดท้าย เนื่องจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีลักษณะสมบัติเหมือนกัน รายการอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุทั้งหมดมีดังนี้

1. อุปกรณ์ภาคส่ง

1.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.1 ซึ่งมีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณคลื่นพาห์ และทำหน้าที่กล้ำสัญญาณที่สร้างขึ้นกับสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดและควบคุมสัญญาณมอดูเลต



รูปที่ ง.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

ข้อมูลเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- | | |
|-------------------------------|-------------------|
| ก. ตราอักษร | : Agilent |
| รุ่น | : E4421B |
| ข. ความถี่ | : 250 kHz–3.0 GHz |
| ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง | : 21 MHz |
| ค. กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง | : 15 dBm |

1.2 เครื่องกำเนิดและควบคุมสัญญาณมอดูเลต

เครื่องกำเนิดและควบคุมสัญญาณมอดูเลตที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.2 ซึ่งมีหน้าที่ในการสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมเพื่อกล้ำกับสัญญาณคลื่นพาห้ที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตามรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.2 เครื่องกำเนิดและควบคุมสัญญาณมอดูเลต

ข้อมูลเครื่องกำเนิดและควบคุมสัญญาณมอดูเลตที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- ก. ควบคุมการทำงานโดยการโปรแกรมลงบอร์ด FPGA
- ข. ความกว้างพัลส์ : ปรับได้เฉพาะจำนวนเต็มตั้งแต่
1 μ Sec - 999 Sec
- ค. ระยะห่างระหว่างพัลส์ : ปรับได้เฉพาะจำนวนเต็มตั้งแต่
1 μ Sec - 999 Sec

1.3 เครื่องขยายกำลังต่ำ

เครื่องขยายกำลังต่ำที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.3



(ก) ลักษณะวงจร



(ข) วงจรที่บรรจุในกล่องแล้ว

รูปที่ ง.3 เครื่องขยายกำลังต่ำ

ข้อมูลเครื่องขยายกำลังต่ำที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| ก. ตราอักษร | : RF Engineered Solutions |
| รุ่น | : HF10-0130 |
| ข. ความถี่ | : 0.5-32 MHz |
| ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง | : 21 MHz |
| ค. กำลังขาออกสูงสุด | : 10 W |
| กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง | : 4 W |

1.4 เครื่องขยายกำลังสูง

เครื่องขยายกำลังสูงที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.4



(ก) ลักษณะวงจร



(ข) วงจรที่บรรจุในกล่องแล้ว

รูปที่ ง.4 เครื่องขยายกำลังสูง

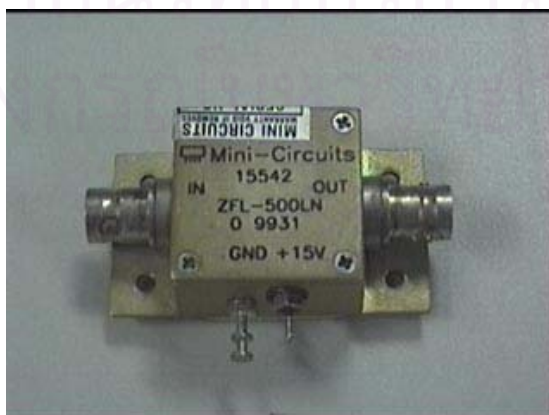
เครื่องขยายกำลังสูงที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนทั้งหมด 2 ชุดที่เหมือนกัน ซึ่งแต่ละชุดมีข้อมูลดังนี้

- | | |
|----------------------------|--------------|
| ก. ตราอักษร | : RF Gain |
| รุ่น | : IS300-1050 |
| ข. ความถี่ | : 10-50 MHz |
| ค. ความต้องการกำลังขาเข้า | : 2 W |
| ง. กำลังขาออกสูงสุด | : 300 W |
| กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง | : 200 W |

2. อุปกรณ์ภาครับ

2.1 เครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ

เครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.5



รูปที่ ง.5 เครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ

ข้อมูลเครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ก. ตราอักษร	: Mini-Circuits
รุ่น	: ZFL- 500LN
ข. ความถี่	: 100 kHz-500 MHz
ค. อัตราขยาย	: 24 dB
ง. กำลังขาออกสูงสุด	: 3.16 mW (5 dBm)

2.2 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.6



รูปที่ ง.6 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

ข้อมูลเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ก. ตราอักษร	: Anritsu
รุ่น	: MS2683A
ข. ความถี่	: 9 kHz-7.8 GHz
ค. กำลังขารับสูงสุด	: 30 dBm

3. สายอากาศ

ตำแหน่งการติดตั้งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับของระบบเรดาร์ที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ ง.7



รูปที่ ๗.๗ ตำแหน่งการติดตั้งของสายอากาศส่งและ
สายอากาศรับของระบบเรดาร์

ชุดสายอากาศส่งและสายอากาศรับจากรูปที่ ๗.๗ สามารถแยกพิจารณาได้ดังรูปที่
๗.๘ และ ๗.๙ ตามลำดับดังนี้



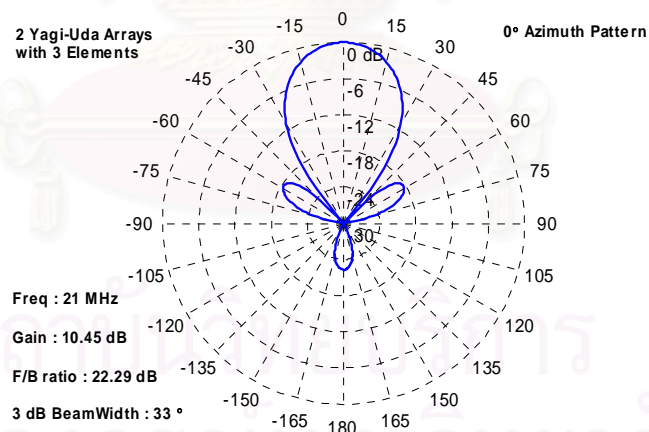
รูปที่ ๗.๘ ชุดสายอากาศส่ง



รูปที่ ง.9 ชุดสายอากาศรับ

สายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากพายุหมุนเขตร้อนเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับจำนวน 2 ชุด ของสายอากาศยาก็-อูดะ 3 องค์ประกอบ ดังรูปที่ ง.8 และ ง.9 โดยมีลักษณะสมบัติของสายอากาศเป็นดังนี้

ก. แบบรูปการแผ่พลังงาน แสดงดังรูป ง.10



รูปที่ ง.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

- ข. ความกว้างลำ : 33°
- ค. อัตราขยาย : 10.45 dB
- ง. อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) : 1.25

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประเสริฐ จันวดี เกิดวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2523 ตำบลคลองหอยโข่ง อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย