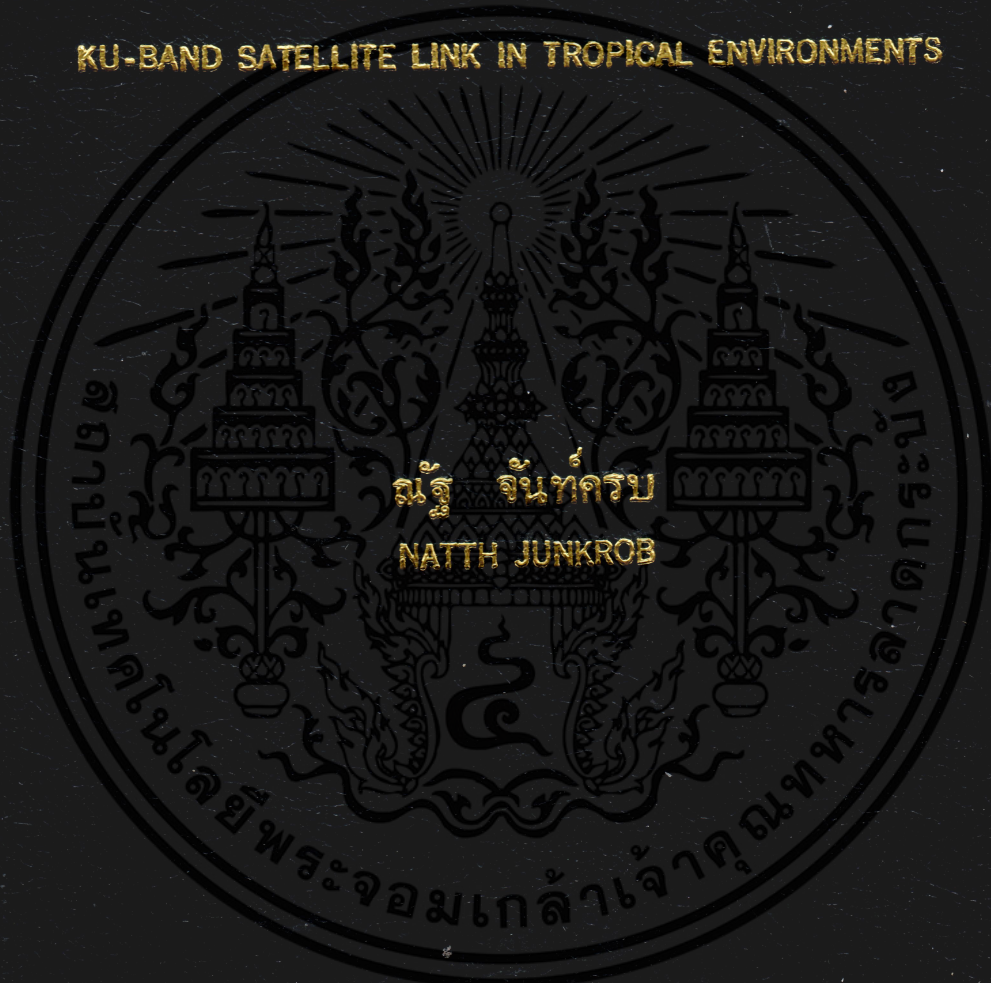


การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันและการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมย่าน KU-BAND ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น

STUDY OF DEPOLARIZATION AND ATTENUATION PHENOMENA ON KU-BAND SATELLITE LINK IN TROPICAL ENVIRONMENTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2544
ISBN 974-648-404-4

การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันและการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมย่าน Ku-band ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น

STUDY OF DEPOLARIZATION AND ATTENUATION PHENOMENA ON KU-BAND SATELLITE LINK IN TROPICAL ENVIRONMENTS



ณัฐ จันท์กรบ

NATTH JUNKROB

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 40798
วัน, เดือน, ปี 26 พ.ย. 2544

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-404-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF DEPOLARIZATION AND ATTENUATION PHENOMENA ON
KU-BAND SATELLITE LINK IN TROPICAL ENVIRONMENTS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2001

ISBN 974-648-404-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง โพลาริเซชัน และการลดทอน
ของสัญญาณดาวเทียมย่าน Ku-band ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น
STUDY OF DEPOLARIZATION AND ATTENUATION PHENOMENA
ON KU-BAND SATELLITE LINK IN TROPICAL ENVIRONMENTS

ชื่อนักศึกษา นายณัฐ จันท์ครบ
รหัสประจำตัว 39061093
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ณรงค์ เหมกรณ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์	
ผศ.ดร. ไกรสิน ส่วงวัฒนา	
รศ. นิภา สีลาธุจิ	
ผศ. อภินันท์ มัชฌานนท์	
รศ.ณรงค์ เหมกรณ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 24 กรกฎาคม 2544 เวลา 13.30-15.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... 13เดือน..... พ.ศ..... 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันและการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมย่าน Ku-band ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น
นักศึกษา	นายณัฐ จันท์ครบ
รหัสประจำตัว	39061093
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ธีรงค์ เหมกรณ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการศึกษาเรื่องการแยกแยะโพลาไรซ์เซชันไขว้ (XPD) และการลดทอนของสัญญาณในย่านความถี่ Ku-band จากดาวเทียมไทยคม 2 มุมเงย 59.6 องศา การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็นสองกรณี โดยกรณีแรกเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลระยะสั้น ซึ่งระดับ XPD ที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับการลดทอนในช่องสัญญาณเคมเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ CCIR DHW และ EUT ผลการทดลองพบว่าค่า XPD มีแนวโน้มเหมือนกับที่ทำนายด้วยแบบจำลอง EUT มากที่สุด และที่อัตราการตกของฝนสูงๆ ค่า XPD มีค่าต่ำกว่าแบบจำลองข้างต้นเท่ากับ 9.4 dB 5.75 dB และ 2.0 dB ตามลำดับ กรณีที่สองเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลระยะยาว ซึ่งค่าระดับการเกิด XPD และระดับการลดทอนของสัญญาณจะถูกรวบรวมเก็บเป็นสถิติ ในลักษณะการแจกแจงสะสมเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาที่ระดับ XPD และระดับการลดทอนของสัญญาณมีค่าเกินกว่าที่กำหนด โดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์เวลาของระดับ XPD ที่เกิดขึ้นต่ำกว่ากำหนดตลอดทั้งปี (P_y) เปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิดขึ้นต่ำกว่ากำหนดในเดือนที่รุนแรง (P_{WM}) ได้ความสัมพันธ์ในรูปของสัมประสิทธิ์เลขยกกำลัง $P_{MW} = aP_y^b$ ซึ่งในส่วนของผล XPD ได้สัมประสิทธิ์ a มีค่าเท่ากับ 10.984 และสัมประสิทธิ์ b มีค่าเท่ากับ 0.9869 ในส่วนของผลการลดทอนจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิดการลดทอนสูงเกินกว่ากำหนดในลักษณะเดียวกัน และได้สัมประสิทธิ์ a มีค่าเท่ากับ 2.5827 และสัมประสิทธิ์ b มีค่าเท่ากับ 0.9361 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำนายความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารดาวเทียมย่าน Ku-band สำหรับประเทศไทยและประเทศที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นอย่างเช่นประเทศในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้เป็นอย่างดี

Thesis Title	Study of Depolarization and Attenuation phenomena on Ku-band Satellite link in Tropical Environments
Student	Mr.Natth Junkrob
Student ID	39061093
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Narong Hemmakorn

ABSTRACT

This thesis studies of cross-polarization discrimination (XPD) and attenuation of Ku-band signal from THAICOM2 satellite in 59.6° elevation angle. The data in experiment was analyzed in two ways. First, the short term depolarization data was analyzed to define the relationship with co-channel attenuation, and compare with CCIR, DHW and EUT model. The results show the statistical relationships have a tendency as predicted by EUT model. In the higher rain rate, The XPD values are lower than the model 9.4, 5.75 and 2.0 dB, respectively. Secondly, the long-term depolarization and attenuation data is collected one-year statistical data in cumulative time percentage that exceeded. The time percentage of XPD occur not exceeded in whole year (P_y) and worst month (P_{WM}) have a power law relationship: $P_{WM} = aP_y^b$, which $a = 10.984$, $b = 0.9869$ for XPD and $a = 2.5827$, $b = 0.9361$ for attenuation. This data is good advantage to predict reliability of Ku-band satellite communication in Thailand and vicinity tropical area such as South East Asia zone.

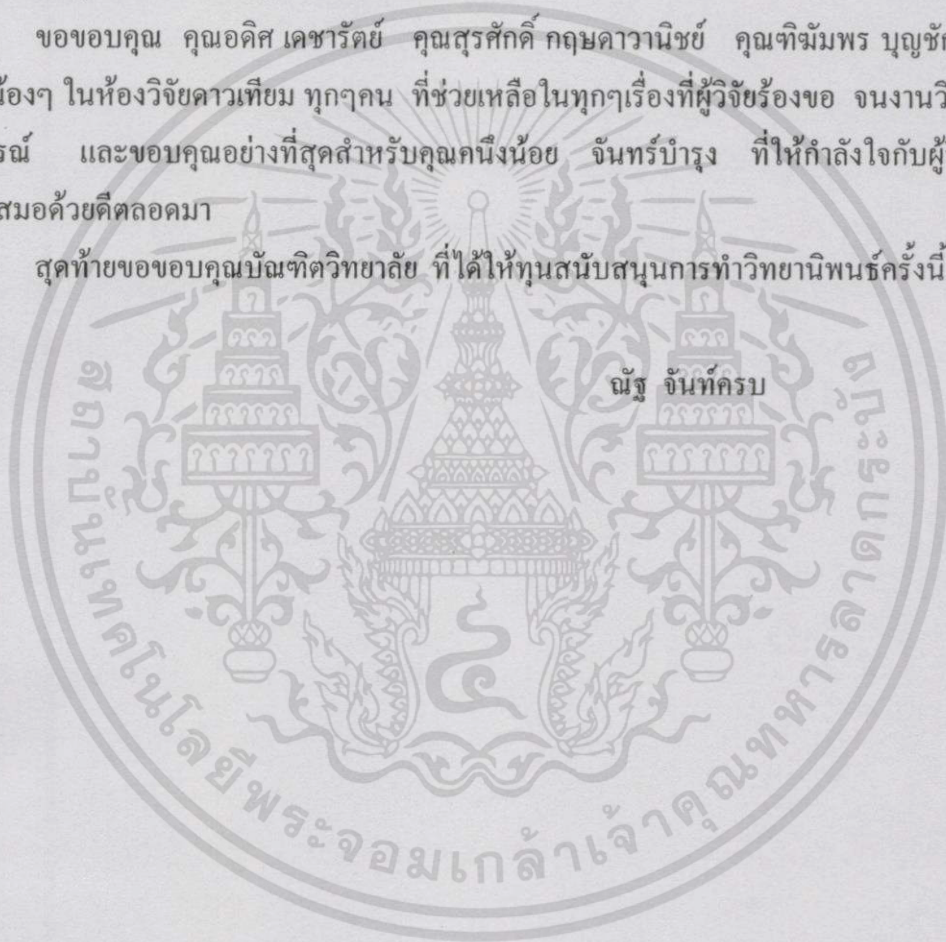
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเป็นอย่างดีจาก รศ. ณรงค์ เหมกรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และกราบขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Y. Moriya และ Prof. Dr. M. Yamada ผู้เชี่ยวชาญจาก JICA และ รศ. นิภา ลีสารุจิ ที่ช่วยเหลือแก้ไขและให้คำแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหาบางอย่าง ซึ่งมี ส่วนช่วยให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหาเหล่านั้น

ขอขอบคุณ คุณอดิศ เดชารัตย์ คุณสุรศักดิ์ กฤษดาวานิชย์ คุณจิฉิมพร บุญซั๊ก คุณจีว และน้องๆ ในห้องวิจัยความเทียม ทุกคน ที่ช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องที่ผู้วิจัยร้องขอ จนงานวิจัยสำเร็จ สมบูรณ์ และขอบคุณอย่างที่สุดสำหรับคุณคณิงน้อย จันทร์บำรุง ที่ให้กำลังใจกับผู้วิจัยอย่าง สม่ำเสมอด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การเปลี่ยนแปลง โพลาริแซชันเนื่องจากฝน.....	5
2.1 การเปลี่ยนโพลาริแซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	
2.1.1 บทนำ.....	5
2.1.2 การกำหนดโพลาริแซชันของคลื่น.....	5
2.1.3 การแยกแยะโพลาริแซชันไขว้(XPD)และการคัดแยกโพลาริแซชันไขว้ (XPI).....	8
2.1.4 พฤติกรรมระหว่างคลื่นกับสายอากาศ.....	9
2.1.5 สายอากาศกับการแยกแยะโพลาริแซชัน.....	12
2.1.6 ผลกระทบของสมรรถนะสายอากาศที่ไม่เป็นอุดมคติ.....	15
2.2 ผลกระทบจากคุณลักษณะของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน.....	20
2.2.1 ผลกระทบจากความแตกต่างทางกายภาพของตัวกลาง.....	20
2.3 คุณลักษณะและระบบการตกของฝน.....	24
2.3.1 กระบวนการเกิดน้ำฟ้า.....	24
2.3.2 ประเภทของน้ำฟ้า.....	26
2.3.3 มวลอากาศ.....	28
2.3.4 แนวปะทะ (Front).....	29
2.3.5 พายุหมุน.....	31

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.6 พายุฟ้าคะนอง.....	33
2.3.7 ร่องมรสุม (Monsoon trough).....	35
2.3.8 ฝนแบบสเตรติฟอรัม (Stratiform rain).....	37
2.3.9 ฝนแบบคอนเวนทีฟ (Convective rain).....	37
2.3.10. ฝนพายุไซโคลน (Cyclonic storm).....	37
2.4 ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉพาะของหยดฝน.....	38
2.4.1 ขนาดและรูปร่างของหยดฝน.....	38
2.4.2 ความเร็วปลายในการตกของหยดฝน.....	41
2.4.3 แนวการวางตัวของหยดฝน.....	41
2.5 การกระจายขนาดของหยดฝนที่อัตราการตกใดๆ.....	44
บทที่ 3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันเนื่องจากฝน.....	48
3.1 ทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันเนื่องจากฝน.....	48
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันกับการลดทอนสัญญาณอันเนื่องจากฝน.....	55
3.3 ระดับการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันกับมุมเงยสายอากาศและความถี่.....	59
3.4 แบบจำลองเชิงประจักษ์ของ CCIR SIM DHW และ EUT.....	61
3.4.1 แบบจำลอง CCIR.....	61
3.4.2 แบบจำลอง SIM.....	61
3.4.3 แบบจำลอง DHW.....	61
3.4.4 แบบจำลอง EUT.....	61
บทที่ 4 ผลการทำลองและอุปกรณ์การทดลอง.....	62
4.1 การวัดและระบบการวัด.....	62
4.1.1 จานสายอากาศและ LNB.....	62
4.1.2 เครื่องรับสัญญาณความถี่ชม.....	63
4.1.3 เครื่องบันทึกสัญญาณ.....	64
4.1.4 เครื่องวัดอัตราการตกของฝน.....	65

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 แนวทางการวิเคราะห์.....	65
4.2.1 มุมเงยของสายอากาศ.....	67
4.2.2 มุมเอียง โพลาริซเซชัน (Polarization tilt angle)	67
4.2.3 พารามิเตอร์องค์ประกอบอนุภาคฝน.....	68
4.3 ผลการทดลองวัดค่า XPD เทียบกับแบบจำลอง.....	69
4.3.1 เกิดจากตัวกลางที่เป็นเกร็ดน้ำแข็งในก้อนเมฆ.....	69
4.3.2 เกิดจากตัวกลางที่เป็นหยดฝนขณะเกิดฝนตก.....	69
4.4 ผลทางสถิติของระดับการเปลี่ยน โพลาริซเซชัน และการลดทอนของสัญญาณ.....	91
4.4.1 เพอร์เซ็นต์เวลาการเกิด XPD	91
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิด XPD ในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี.....	92
4.4.3 เพอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดการลดทอนของสัญญาณ.....	92
4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิดการลดทอนในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี.....	93
4.4.5 เพอร์เซ็นต์เวลาทั้งปีและในเดือนรุนแรงของการเกิดการลดทอนและ XPD	94
บทที่ 5 บทสรุป	95
5.1 กล่าวนำ.....	95
5.2 การเกิด XPD ช่วงขณะตามประเภทของฝน.....	95
5.3 ค่าสถิติตลอดทั้งปีของการลดทอนสัญญาณและค่า XPD.....	96
5.3.1 ค่าของระดับ XPD ที่เกิดขึ้นตลอดทั้งปีและเดือนที่รุนแรง.....	96
5.3.2 ระดับของการลดทอนสัญญาณตลอดทั้งปีและเดือนที่รุนแรง.....	96
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	97
บรรณานุกรม.....	98
ภาคผนวก	
ก. โปรแกรมมาโครที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	101
ข. บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของการกระจายขนาดในรูป Exponential ของหยดฝนสำหรับฝนแต่ละประเภทที่ เสนอ โดย Joss et. al.	46
2.2 ร้อยละของปริมาณของอนุภาคฝนที่มีขนาดในช่วงที่กำหนดต่อปริมาตรทั้งหมดที่อัตราการตก ค่าต่างๆ.....	47
4.1 พารามิเตอร์ของระบบการวัด.....	63



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การรบกวนข้ามช่องสื่อสารที่เกิดขึ้นในข่ายเชื่อมโยงสัญญาณดาวเทียมและภาคพื้นดิน.....	1
2.1 โพลาริเซชันแบบวงรี.....	6
2.2 การจำกัดความของเครื่องหมายอัตราส่วนตามแกน.....	7
2.3 การจำกัดความของโพลาริเซชันไขว้.....	8
2.4 โพลาริเซชันมิสมัทซ์เฟกเตอร์ m_p สำหรับสายอากาศแบบเชิงเส้นและคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบวงรี.....	12
2.5 XPD กับอัตราส่วนตามแกนของโพลาริเซชันแบบวงรีเมื่อ LHCP เป็นโพลาริเซชันร่วม.....	15
2.6 ค่าปริมาณ XPD กับอัตราส่วนตามแกนของสายอากาศในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงกลม.....	18
2.7 ค่าการตัดแยกโพลาริเซชันเทียบกับ XPD และอัตราส่วนตามแกนของสายอากาศในกรณีของโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น และมุมแนวการวางตัวถูกต้อง.....	19
2.8 ค่าการตัดแยกโพลาริเซชันเทียบกับ XPD และมุมแนวการวางตัวแปรเปลี่ยนไปกรณีของโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นและ $AR = 30$ dB.....	19
2.9 ลักษณะของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางบรรยากาศ.....	20
2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันเนื่องจากความแตกต่างการลดทอนระหว่างแกนหลักและแกนรองของหยดฝนสมมาตร.....	21
2.11 แสดงการเปลี่ยนโพลาริเซชันที่มีสาเหตุจากความแตกต่างการเลื่อนเฟส.....	22
2.12 แสดงผลของแนวเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับแนวแกนของหยดฝน.....	23
2.13 กระบวนการชนกันและรวมตัวกัน.....	25
2.14 กระบวนการเบอร์เจอร์อน.....	26
2.15 แนวปะทะอากาศอุ่น.....	30
2.16 แนวปะทะอากาศเย็น.....	30
2.17 วงจรชีวิตของคลื่นแนวปะทะอากาศ (Lifecycle of front wave).....	31
2.18 ตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของพายุหมุนที่เกิดขึ้นทั่วโลก.....	32
2.19 อัตราส่วนร้อยละของจำนวนพายุหมุนที่ก่อตัวในละติจูดต่างๆ.....	34
2.20 ขั้นตอนการเกิดพายุฟ้าคะนอง.....	35
2.21 การเกิดร่องมรสุมในประเทศไทย.....	36
2.22 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดต่างๆ กันที่ความเร็วปลายในการตกอย่างอิสระ.....	39
2.23 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดใหญ่ที่ตกอย่างอิสระในอากาศนิ่ง.....	39

สารบัญรูป(ต่อ)

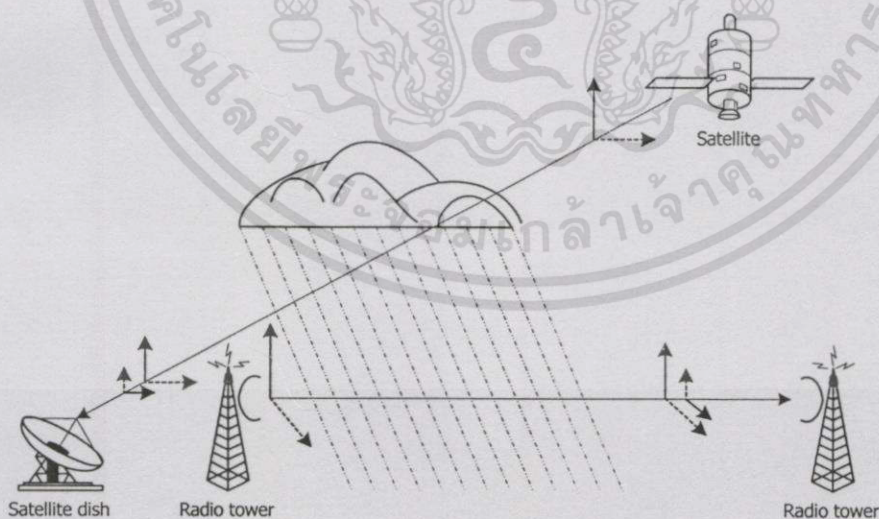
รูปที่	หน้า
2.24 รูปร่างหยดน้ำที่มีรัศมีต่างๆ คำนวณ โดย Pruppacher และ Pitter.....	40
2.25 รูปหน้าตัดด้านข้างของหยดน้ำทรงกลมแบนขั้ว.....	40
2.26 ความเร็วในการตกของหยดน้ำขนาดต่างๆ กันที่ความสูงตั้งแต่ 0.5 ถึง 20 เมตร.....	42
2.27 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงมุมเอียงเชิงกายภาพและแกนของหยดฝน.....	42
2.28 แบบจำลองเชิงเลขาคณิตของอนุภาคฝน 1 หยด.....	43
2.29 การกระจายของหยดฝนในอากาศที่อัตราการตกของฝนจาก 0.25 ถึง 150 mm /hr	45
2.30 ตัวอย่างการกระจายของขนาดหยดฝนที่อัตราการตกของฝนค่าต่างๆ.....	46
3.1 รูปโครงสร้างสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันเนื่องจากฝน.....	49
3.2 รายละเอียดของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในองค์ประกอบของแกน 1 และ 2	49
3.3 องค์ประกอบมวลรวมของการแปลงเมทริกซ์ T' ที่ใช้ในการอธิบาย การเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน.....	51
3.4 ค่าความแตกต่างการลดทอนและการเลื่อนเฟส.....	53
3.5 ค่า XPD ที่ขึ้นกับความถี่และมุมเงยสายอากาศสำหรับโพลาริเซชันแบบวงกลม.....	60
4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด.....	62
4.2 จานสายอากาศออฟเซ็ทพาราโบลาที่ใช้ Dual LNB.....	62
4.3 การคาไลเบรทและทรานเฟอร์ฟังก์ชันของเครื่องรับ.....	64
4.4 ระบบการบันทึกสัญญาณ.....	64
4.5 สัญญาณแต่ละโพลาริเซชันของดาวเทียมไทยคม 2	65
4.6 ปรัชญาการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันที่เป็นผลจากเกร็ดน้ำแข็ง.....	70
4.7 ปรัชญาการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันที่เป็นผลจากหยดฝน.....	71
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง XPD กับการลดทอนของสัญญาณ โดยเทียบกับแบบจำลอง CCIR EUT และ DHW ในขณะเกิดฝนตก.....	72-90
4.9 เปอร์เซนต์เวลาของการเกิด XPD ที่ต่ำกว่าระดับต่างๆ ตลอดทั้งปีและตลอดเดือนที่รุนแรง.....	91
4.10 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์เวลาการเกิด XPD ในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี.....	92
4.11 เปอร์เซนต์เวลาของการลดทอนที่สูงเกินกว่าระดับต่างๆ ตลอดทั้งปีและเดือนที่รุนแรง.....	93
4.12 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์เวลาการเกิดการลดทอนในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี.....	93
4.13 เปอร์เซนต์เวลาของการเกิด XPD และการลดทอนตลอดทั้งปี.....	94
4.14 เปอร์เซนต์เวลาของการเกิด XPD และการลดทอนในเดือนรุนแรง (ตุลาคม 2543).....	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ระบบการสื่อสารในปัจจุบันมักจะแบ่งตามลักษณะของตัวกลางคือ แบบใช้สาย และแบบไม่ใช้สาย โดยกรณีแรกนั้นได้พัฒนาสูงถึงขั้นใช้คลื่นแสงเป็นตัวพาหะผ่านเส้นใยนำแสง ส่วนกรณีหลังได้รับการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้งเช่นกันและทั้งหมดจะใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านบรรยากาศทั้งสองแบบได้รับการออกแบบระบบให้สอดคล้องกันเป็นโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก ในระบบสื่อสารที่ใช้วิธีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นข่ายเชื่อมโยงภาคพื้นดิน (terrestrial link) หรือ ข่ายเชื่อมโยงระหว่างภาคพื้นดินกับอวกาศ (earth-space link) ส่วนได้รับผลกระทบเนื่องจากฝนทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่นำกรรมวิธีการใช้ความถี่ที่ใช้เทคนิคการโพลาไรซ์คู่ (dual polarization frequency technique) เพื่อเพิ่มความจุช่องสัญญาณซึ่งนอกจากจะได้รับผลกระทบจากการลดทอนในแต่ละช่องสัญญาณแล้วยังก่อผลกระทบในลักษณะของสัญญาณไขว้แทรก (cross talk) หรือเกิดการรบกวนข้ามช่องสื่อสารระหว่างช่องสัญญาณที่มีโพลาไรซ์ตั้งฉากซึ่งกันและกัน รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างหนึ่งของการเกิดสัญญาณรบกวนข้ามช่องในข่ายเชื่อมโยงทั้งภาคพื้นดินและดาวเทียม



รูปที่ 1.1 การรบกวนข้ามช่องสื่อสารที่เกิดขึ้นในข่ายเชื่อมโยงสัญญาณดาวเทียมและภาคพื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เทคนิคโพลาริซซ์คู่ที่ตั้งฉากกันนั้น สัญญาณข่าวสารอิสระสองสัญญาณจะถูกส่งโดยใช้คลื่นความถี่เดียวกันจะแตกต่างกันตรงที่โพลาริซซ์เซชันของช่องสัญญาณนั้น ซึ่งจะกำหนดมุมโพลาริซซ์ให้ต่างกัน 90 องศา หรือตั้งฉากซึ่งกันและกัน เทคนิคนี้มักถูกใช้ในระบบสื่อสารดาวเทียมเพื่อให้ประสิทธิภาพการใช้งานแถบสเปกตรัมความถี่สูงสุด ในทางทฤษฎีแล้วทั้งสองช่องสัญญาณสามารถคัดแยกซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ แต่ในทางความเป็นจริงแล้ว ความไม่เป็นอุดมคติของสายอากาศทั้งบนดาวเทียมและสถานีภาคพื้นดินและผลจากการเบี่ยงเบนโพลาริซซ์เซชันบนวิถีการเดินทางของคลื่น เป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการรบกวนข้ามช่องสัญญาณสื่อสาร การรบกวนนี้เป็นผลจากพลังงานในช่องสัญญาณสื่อสารหนึ่งถูกถ่ายโอนมายังอีกช่องสัญญาณหนึ่งเนื่องจากการเบี่ยงเบนของโพลาริซซ์เซชัน ระดับความรุนแรงของการรบกวนขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของสัญญาณที่เปลี่ยนโพลาริซซ์เข้ามาเทียบกับระดับพลังงานของสัญญาณที่ต้องการในโพลาริซซ์นั้นๆ ซึ่งระดับสัญญาณที่ถ่ายโอนข้ามช่องมาหรือระดับสัญญาณโพลาริซซ์ข้ามขั้วนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ใช้งานและคุณสมบัติของตัวกลางตลอดแนววิถีการเดินทาง (propagation path) ในความถี่ย่าน Ku แล้ว ฝนและการกระเจิง (scattering) ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะเป็นสาเหตุหลักของการรบกวนนี้

ปกติแล้วในแต่ละขั้วเชื่อมโยงจะเกิดโพลาริซซ์ข้ามขั้วอยู่ตลอดเวลาแม้ว่าตลอดวิถีการแพร่กระจายจะไม่มีฝนตกก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของระบบสายอากาศ อุปกรณ์รับ-ส่ง และคุณลักษณะสมบัติของตัวกลาง ระดับสัญญาณโพลาริซซ์ข้ามขั้วที่เกิดขึ้นกรณีนี้มีน้อยมากและไม่กระทบต่อสมรรถนะของขั้วเชื่อมโยง แต่เมื่อเกิดฝนตกในวิถีการเดินทาง ฝนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริซซ์เซชันมากขึ้นจนเป็นปัญหาต่อขั้วเชื่อมโยงได้

การศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริซซ์เซชันอันเนื่องมาจากฝนนั้นได้รับความสนใจมาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1970 โดยลักษณะการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกและปัจจัยการเปลี่ยนโพลาริซซ์เซชันเนื่องจากฝน และ การศึกษาเชิงทดลองโดยการตรวจวัดปริมาณการเปลี่ยนโพลาริซซ์เซชันจากขั้วเชื่อมโยงจริงและวิเคราะห์ผลการวัดนั้นในรูปแบบข้อมูลเชิงสถิติและถูกพัฒนาสร้างเป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical model) เพื่อใช้ในการทำนายระดับปริมาณการเปลี่ยนโพลาริซซ์เซชันโดยอาศัยปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง ในหลายครั้งการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริซซ์เซชันได้ทำควบคู่ไปทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎีและการสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งตรวจสอบผลการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีและแบบจำลองกับผลการวัดในขั้วเชื่อมโยงจริงอีกครั้ง ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาได้แก่ Watson และ Arbabi (1973) ซึ่งได้วิเคราะห์การเปลี่ยนโพลาริซซ์เซชันอันเนื่องมาจากฝนในเชิงทฤษฎีและหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเปลี่ยนโพลาริซซ์เซชันกับปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมุมเอียงเชิงกายภาพของฝน นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดในขั้วเชื่อมโยงจริงด้วย

Brussaard (1976) ได้ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลของลมที่มีต่อแนวการวางตัวของหยดฝนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชัน โดยได้เสนอแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่อธิบายแนวการวางตัวของหยดฝนขณะกำลังตกและได้ทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันและมุมเอียงเชิงกายภาพไว้ แบบจำลองของ Brussaard ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยอื่นอีกหลายงานเช่น Uzunnoglu *et. al.* (1977) ซึ่งได้ศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันเนื่องจากฝนในเชิงทฤษฎีเช่นกัน โดยอาศัยแอมพลิจูดการกระเจิงและแบบจำลองเชิงเรขาคณิตซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการแพร่กระจายคลื่น แนวโพลาไรซ์เซชัน และแนวการวางตัวของหยดฝนเป็นปัจจัยในการวิเคราะห์

Chu (1982) ได้เสนอแบบจำลองกึ่งประจักษ์ (semi-empirical model) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันและการลดทอนสัญญาณ

Stuzman and Runyon (1984) ได้เสนอแบบจำลองในลักษณะเดียวกัน โดยได้เปรียบเทียบแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นที่เสนอโดย CCIR Disanyake *et. al.* และ Chu นอกจากนี้ยังเทียบผลการวิเคราะห์ตามแบบจำลองกับผลที่ได้จากการวัดในข่ายเชื่อมโยงจริงด้วย

Max M.J.L.van de Kamp (1999) ที่ Eindhoven University of Technology (EUT) ประเทศเนเธอร์แลนด์ ได้สรุปแนวคิดจากแบบจำลองที่ผ่านมาทั้งหมดแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริงในสถานที่ที่แตกต่างกัน 39 แห่ง แล้วปรับสมการใหม่ได้ผลที่ดีกว่าเดิม

งานวิจัยที่กล่าวมาเป็นเพียงบางตัวอย่างที่มีผู้ศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันที่มีสาเหตุเนื่องจากฝน ผลการวิจัยที่ผ่านมาโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบจำลองกึ่งประจักษ์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานออกแบบข่ายสื่อสารเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมกับภาคพื้นดิน เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายประกอบการออกแบบระบบในปัจจุบันตามข้อกำหนด ITU-R 730 แต่เนื่องจากผลการวิจัยดังกล่าวส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในแถบประเทศที่มีภูมิอากาศแบบอบอุ่น (temperate) อาทิเช่น อเมริกาเหนือ ยุโรป และญี่ปุ่น ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนเมื่อนำมาใช้ทำนายประกอบการออกแบบข่ายเชื่อมโยงระหว่างภาคพื้นดินกับดาวเทียมที่ใช้งานในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (tropical) อย่างเช่นประเทศไทยและภูมิภาคใกล้เคียง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการศึกษากการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชัน ในรูปของปริมาณการแยกแยะโพลาไรซ์เซชันไขว้ (Cross Polarization Discrimination: XPD) เทียบกับการลดทอนของสัญญาณในโพลาไรซ์เดิม (Co-polar Attenuation) ตามแนวทางของ DHW Chu Stuzman and Runyon และรวมทั้ง Max M.J.L.van de Kamp แต่เน้นเฉพาะที่แถบความถี่ย่าน Ku และสภาพภูมิอากาศแบบ tropical เพื่อเปรียบเทียบ ให้บังเกิดผลที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบใช้งานดาวเทียมสื่อสารย่าน Ku ในประเทศและภูมิภาคใกล้เคียงต่อไป

สำหรับวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย วิธีการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยมีดังนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเชิงทดลองให้เข้าใจถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียมที่มีสาเหตุเนื่องจากฝน

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ถึงระดับของการเกิดการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชัน ที่มีอิทธิพลต่อสัญญาณดาวเทียม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษากลไกการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันเนื่องจากฝน

1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของฝนและปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อปริมาณการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียม

1.3.3 ตรวจสอบระดับการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันเนื่องจากฝน และเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่างๆ โดยใช้ดาวเทียมไทยคม 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียม

1.4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหยดฝน

1.4.3 ตรวจสอบระดับการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียมไทยคม 2

1.4.4 วิเคราะห์ระดับการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันเทียบกับแบบจำลองต่างๆ ที่เคยตรวจวัดในภูมิภาคแบบอบอุ่น (temperate)

1.4.5 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลตลอดทั้งหาแนวทางแก้ไขป้องกัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบกลไกในการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียมและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ทราบความแตกต่างของผลกระทบของฝนในเขตร้อนชื้นที่มีต่อสัญญาณดาวเทียม

1.5.3 ได้ข้อมูลท้องถิ่นสำหรับการออกแบบขยายเชื่อมโยงดาวเทียมที่ใช้งานย่านความถี่ Ku สำหรับประเทศไทยโดยเฉพาะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทคือ บทที่1 บทนำ ซึ่งกล่าวถึงความจำเป็นของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย บทที่2 กล่าวถึงการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียม บทที่3 เป็นการวิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชัน บทที่4 เป็นผลการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียม โดยศึกษาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง CCIR SIM DHW EUT และบทที่5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันเนื่องจากฝน

2.1 การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1.1 บทนำ

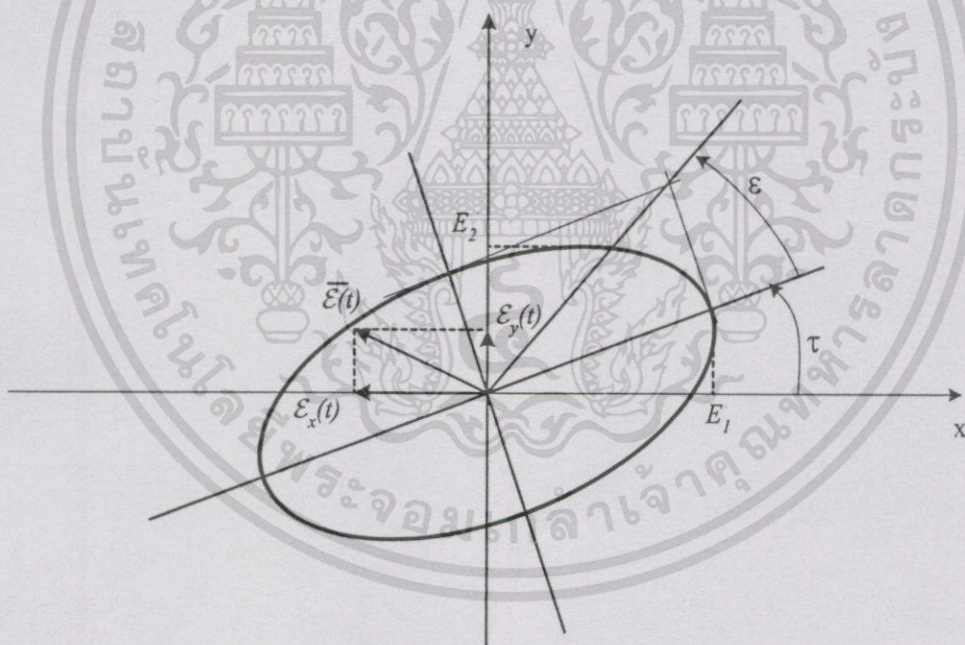
การเปลี่ยนโพลาริเซชันเกิดขึ้นเนื่องจากการตกของหยดฝนทรงกลมทำให้รูปทรงเปลี่ยนไป กลายเป็นรูปทรงกลมแบนขั้ว (oblate spheroid) และวางตัวเอียงในแนวเดียวกัน ผลกระทบที่มีต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเดินทางผ่านกลุ่มหยดฝนเหล่านี้จึงขึ้นอยู่กับ แนวทิศทางสนามไฟฟ้าของคลื่นที่กระทำกับแนวการวางตัวของกลุ่มหยดฝน การเปลี่ยนโพลาริเซชันเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างในการลดทอน และผลของความแตกต่างในการเลื่อนเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเดินทางผ่านแกนสมมาตรทั้งสองของหยดฝน ดังนั้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยนโพลาริเซชันขึ้นถ้าหากว่าโพลาริเซชัน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดกล่าว มีโพลาริเซชันเวกเตอร์ที่มีโปรเจกชันเฉพาะในแกนสมมาตรเดียว ในความถี่ที่สูงกว่า 15 GHz การเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝนจะมีสาเหตุหลักจากความแตกต่างของการลดทอน และที่ความถี่ต่ำกว่า 10 GHz จะมีสาเหตุหลักจากความแตกต่างของการเลื่อนเฟสของสัญญาณ ถึงแม้จะเป็นอย่างนั้นก็ตาม ปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝนกับการลดทอนของสัญญาณจะมีความสัมพันธ์กันในระดับสหสัมพันธ์ จึงมีงานวิจัยหลายงานที่ใช้ความสัมพันธ์นี้เป็นตัวเชื่อมโยงเพื่ออำนวยความสะดวกใช้งาน ในหัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายเบื้องหลังของคณิตศาสตร์ที่ต้องใช้ในการอธิบายผลกระทบจากคุณลักษณะตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านและสมรรถนะของสายอากาศต่อสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงภาคพื้นดิน - ดาวเทียม ในระบบโพลาริเซชัน สิ่งเหล่านี้จะทำให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะแปลข้อมูลการทดลองและรวมถึงการประเมินสมรรถนะของระบบ โดยการพิจารณาทั้งผลกระทบการเปลี่ยนโพลาริเซชันจากตัวกลาง และผลที่เกิดจากการกระทำของระบบสายอากาศ ซึ่งทั้งหมดที่จะกล่าวนี้ถูกนำเสนอโดย Stutzman (1977)

2.1.2 การกำหนดโพลาริเซชันของคลื่น

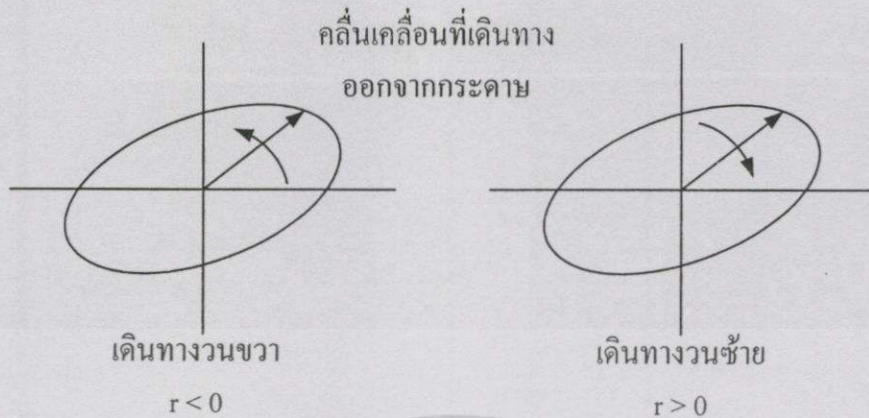
ในกรณีส่วนใหญ่แล้วเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบมักจะมีการเดินทาง (Trace) ในรูปของวงรีในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่น โพลาริเซชันของคลื่นจะถูกพิจารณาจากการกำหนดรูปร่างและแนวการวางตัวของวงรีตามลักษณะการหมุนของสนามเวกเตอร์ ในรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะทั่วไปของโพลาริเซชันแบบวงรี และความหมายตามคำจำกัดความที่ว่าไว้ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า $\vec{E}(t)$ เป็นผลขององค์ประกอบสัญญาณไซน์ ซึ่งมีแอมพลิจูดที่แตกต่างกันเป็น E_1 และ E_2 โดยมีความต่างเฟส δ ดังสมการ (2.1)

$$\begin{aligned}\vec{E}(t) &= E_x(t)\vec{a}_x + E_y(t)\vec{a}_y \\ &= E_1 \cos \omega t \vec{a}_x + E_2 \cos(\omega t + \delta) \vec{a}_y\end{aligned}\quad (2.1)$$

โดยที่ \vec{a}_x และ \vec{a}_y เป็นเวกเตอร์หน่วยในทิศทางแกน x และ y ตามลำดับ ω เป็นความถี่เชิงมุม และ t เป็นเวลา การอธิบายโพลาไรซ์เชิงซ้อนวงรีจะพิจารณาจากมุม τ ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนหลักของวงรีกับแกน x และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักกับแกนรองของวงรี อัตราส่วนนี้เป็นส่วนขนาดที่สำคัญของพารามิเตอร์ที่รู้จักดีในชื่อของอัตราส่วนตามแกน (Axial Ratio) และเป็นอัตราส่วนของขนาดสูงสุดต่อต่ำสุดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า เครื่องหมายของอัตราส่วนตามแกน ถูกกำหนดให้เป็นบวก (+) ถ้าการหมุนของเวกเตอร์เป็นไปในทิศทางมือซ้าย และมีค่าเป็นลบ (-) ถ้าการหมุนของเวกเตอร์เป็นไปในทิศทางขวามือดังรูป 2.2 ส่วนคลื่นที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นจะมีอัตราส่วนตามแกนเป็นอนันต์ คลื่นที่มีโพลาไรซ์เป็นวงกลมจะมีอัตราส่วนตามแกน $r = \pm 1$ ซึ่งเครื่องหมาย + และ - จะหมายถึงวงกลมหมุนซ้าย (LHCP) และวงกลมหมุนขวา (RHCP) ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 โพลาไรซ์เชิงซ้อนแบบวงรี



รูปที่ 2.2 การจำกัดความของเครื่องหมายอัตราส่วนตามแกน

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะกำหนดพารามิเตอร์อื่นช่วยดังนี้

$$\varepsilon = \cot^{-1} r ; -45^\circ \leq \varepsilon \leq 45^\circ \quad (2.2)$$

กำหนดให้พารามิเตอร์ ε และ τ มีความสัมพันธ์กับปริมาณที่สามารถอธิบายสนามได้ง่าย ดัง

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sin^{-1}(\sin 2\gamma \sin \delta) \quad (2.3)$$

$$\tau = \tan^{-1}(\tan 2\gamma \cos \delta) \quad (2.4)$$

$$y = \frac{\text{Max } y\text{-component of } \vec{E}}{\text{Max } x\text{-component of } \vec{E}} = \tan^{-1} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (2.5)$$

วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดโพลาไรซ์เซชันของคลื่นที่นำเสนอโดย Stutzman (1977) Stokes นำเสนออีกแบบหนึ่งซึ่งอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ของสูตรคำนวณทางเมตริก อีกวิธีหนึ่งจะใช้รูปแบบทรงกลม (Poincare sphere) ซึ่งเป็นการวาดโพลาไรซ์เซชันของลงไปยังจุดบนทรงกลมหนึ่งหน่วย การกำหนดสถานะของโพลาไรซ์เซชันจะใช้แฟกเตอร์โพลาไรซ์เซชันเชิงซ้อนฟังก์ชันเดียว รูปแบบการนำเสนอที่หลากหลายทั้งหมดนี้จะโยงไปสู่ความสัมพันธ์โดยตรงกับมุม ε และ τ หรือ δ และ γ

ถ้ากำหนดให้สภาวะ “1” และ “2” หมายถึง โพลาริซเซชันแบบวงกลมวนขวา (RHCP) และ โพลาริซเซชันแบบวงกลมวนซ้าย (LHCP) ตามลำดับแล้ว ค่า XPI จึงหมายถึงค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นที่ได้รับได้จากสายอากาศที่มีโพลาริซเซชัน RHCP ของคลื่นที่เดินทางโดยโพลาริซเซชันแบบ RHCP เทียบกับคลื่นที่เดินทางโดยโพลาริซเซชันแบบ LHCP XPI เป็นพารามิเตอร์ซึ่งเป็นที่รู้จักอยู่แพร่หลายในหมู่ของวิศวกรระบบ ซึ่งค่าเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดอัตราส่วน C/I ในช่องรับสัญญาณสื่อสารโดยตรง อย่างไรก็ตาม XPI ตามนิยามนี้ค่อนข้างยากต่อการวัด Watson และ Arbai (1973) ได้แสดงให้เห็นว่าค่า XPI และ XPD จะมีค่าเท่ากัน ถ้าหากว่า ตัวกลางหรือละอองหยดน้ำที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริซเซชันมีคุณลักษณะสมบัติที่สมมาตรกัน ซึ่งแบบจำลองทางกายภาพดังกล่าวถูกนำมาใช้งานสำหรับกรณีที่กำหนดให้หยดฝนและเกร็ดน้ำแข็งต้องมีรูปทรงที่สมมาตร จึงทำให้ได้ค่า $XPI = XPD$ ในทางทฤษฎี และโดยทางปฏิบัติแล้วจากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าทั้งสองนี้ ไม่มีสิ่งใดสื่อให้เห็นถึงความแตกต่างกัน ระหว่าง XPI และ XPD ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนโพลาริซเซชัน หรืออัตราส่วนโพลาริซเซชันไขว้ (Cross Polarization Ratio : CPR) ได้แก่ ลักษณะความเหมือนกันในการรับส่ง (reciprocal) ของ XPD นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อื่นๆที่ใช้อยู่ อาทิเช่น การแยกแยะสัญญาณไขว้แทรก (Crosstalk discrimination) การผิดเพี้ยนจากโพลาริซเซชันไขว้ (crosspolarization distortion) อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงโพลาริซเซชัน (depolarization ratio) และระดับของโพลาริซเซชันไขว้ (crosspolarization level) ปกติการศึกษาเรื่องต่างๆเหล่านี้จะมุ่งสู่การหาค่า XPD หรือ XPI การคัดแยก (Isolation) I เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการแยกให้เห็นอย่างเด่นชัดของคุณสมบัติการโพลาริซเซชันของคลื่น และพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถวัดได้โดยตรงจากเอาต์พุตของเครื่องรับโดยนิยามได้จาก (Stutzman 1977)

$$I = \frac{\text{Copolari zed channel output power}}{\text{Crosspolari zed channel output power}} \quad (2.8)$$

โดยทั่วไปแล้ว การคัดแยกนี้จะถูกนำมาพิจารณาในการหาสมรรถนะของสายอากาศของเครื่องรับ อุปกรณ์ที่ผลิตสัญญาณ และองค์ประกอบอื่นๆ ในลักษณะเช่นเดียวกันกับตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน เมื่อสมรรถนะเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงอุดมคติ และ ค่า XPD ของคลื่นมีค่าต่ำ ซึ่งหมายถึง จะเกิดระดับการเปลี่ยนโพลาริซเซชันที่สูงมาก ดังนั้นค่าของการคัดแยกนี้จึงมีค่าเท่ากับ XPD

2.1.4 พฤติกรรมระหว่างคลื่นกับสายอากาศ

ค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็นไปได้ (P_R) ที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุตของสายอากาศซึ่งรับจากความหนาแน่นของฟลักซ์ของคลื่นระนาบที่ตกกระทบอย่างสม่ำเสมอของโพลาริซเซชันใดๆ สามารถเขียนได้เป็นตามสมการ

$$P_R = S A_e m_p \quad (2.9)$$

โดยที่ A_e เป็นพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศในทิศทางคลื่นที่ตกกระทบ

m_p เป็นโพลาไรซ์เซชันมิสแมทซ์แฟคเตอร์

โดยแฟคเตอร์ m_p นี้เป็นตัวเลขจำนวนจริงมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเมทซ์ระหว่างโพลาไรซ์เซชันของคลื่นกับสายอากาศ โดยสถานะโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศรับถูกกำหนดให้เป็นเช่นเดียวกับสายอากาศส่ง แต่จะกลับกันที่ช่วงเวลา การกลับกันของเวลา (Time-reversal) จะเปลี่ยนทิศทางของการเดินทางของคลื่นแต่จะคงลักษณะของการหมุน (sense of rotation) และอัตราส่วนตามแกน ตัวอย่างเช่น คลื่นตกกระทบที่มีโพลาไรซ์เซชันเป็นแบบ RHCP จะเมทซ์กันอย่างสมบูรณ์แบบกับสายอากาศแบบ RHCP ซึ่งหมายความว่าสายอากาศจะดูดคลื่นพลังงานคลื่นได้สูงสุด และกรณีนี้ค่าแฟคเตอร์ m_p จะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ในทางตรงข้ามสายอากาศแบบ RHCP จะดูดคลื่นกำลังคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันแบบ LHCP ไม่ได้เลย และกรณีนี้ค่าแฟคเตอร์ m_p มีค่าเท่ากับ 0 โดยทั่วไปสมการของแฟคเตอร์ m_p จะนำไปสมมติเป็นตัวแปรช่วยสำหรับการคำนวณในโพลาไรซ์วงรีของทั้งสายอากาศและคลื่นได้เป็นตามสมการ

$$m_p(w, a) = \frac{1}{2} + \frac{4r_w r_a + (r_w^2 - 1)(r_a^2 - 1) \cos 2(\tau_a + \tau_w)}{2(r_w^2 + 1)(r_a^2 + 1)} \quad (2.10)$$

โดยที่ r_a = อัตราส่วนตามแกนของสายอากาศ

r_w = อัตราส่วนตามแกนของคลื่น

τ_a = มุมแกนหลักของสายอากาศ

τ_w = มุมแกนหลักของคลื่น

จากสมการ (2.10) สามารถพิจารณาเพื่อยืนยันสมการตามกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

2.1.4.1. กรณีสายอากาศ RHCP และรับคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชัน LHCP

จะได้ $r_a = -1$ และ $r_w = +1$

$$m_p = \frac{1}{2} + \frac{4(1)(-1) + (1-1)(1-1)}{2(1+1)(1+1)} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

2.1.4.2. กรณีสายอากาศแบบเชิงเส้น (LP) และรับคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันวงกลม (CP)

จะได้ $r_a = \infty$ และ $r_w = 1$

โดยการหารเศษและส่วนในเทอมที่สองของสมการ (2.10) ด้วย r_a^2 และจากนั้นจึงกำหนดลิมิตให้ค่า $r \rightarrow \infty$ ซึ่งทำให้ได้ค่า $m_p = \frac{1}{2}$ ซึ่งเป็นจริงอย่างชัดเจน

2.1.4.3. กรณีสายอากาศเชิงเส้น และรับคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันเชิงเส้น

จะได้ $r_a = \infty$ และ $r_w = \infty$

เมื่อหารเทอมเศษและส่วนด้วย r_a^2 และ r_w^2 โดยลิมิตให้ r_a และ $r_w \rightarrow \infty$ ทำให้ได้สมการเป็น

$$m_p = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2(\tau_a - \tau_w) \quad (2.11)$$

ซึ่งจะเห็นว่า $m_p = 1$ เมื่อแนวการวางตัวของโพลาไรซ์เซชันของคลื่นอยู่ในแนวเดียวกับแนวโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศและ $m_p = 0$ เมื่อการวางตัวของแนวโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกับคลื่นตั้งฉากซึ่งกันและกัน

2.1.4.4. กรณีสายอากาศเชิงเส้นและรับคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันแบบวงรี

จะได้ $r_a = \infty$ และ $r_w = r$

โดยการหารด้วย r_a^2 และกำหนดการลิมิตเช่นเดียวกันกับก่อนหน้านี้ ทำให้ได้สมการเป็น

$$m_p = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{(r^2 - 1) \cos 2(\tau_a - \tau_w)}{(r^2 + 1)} \quad (2.12)$$

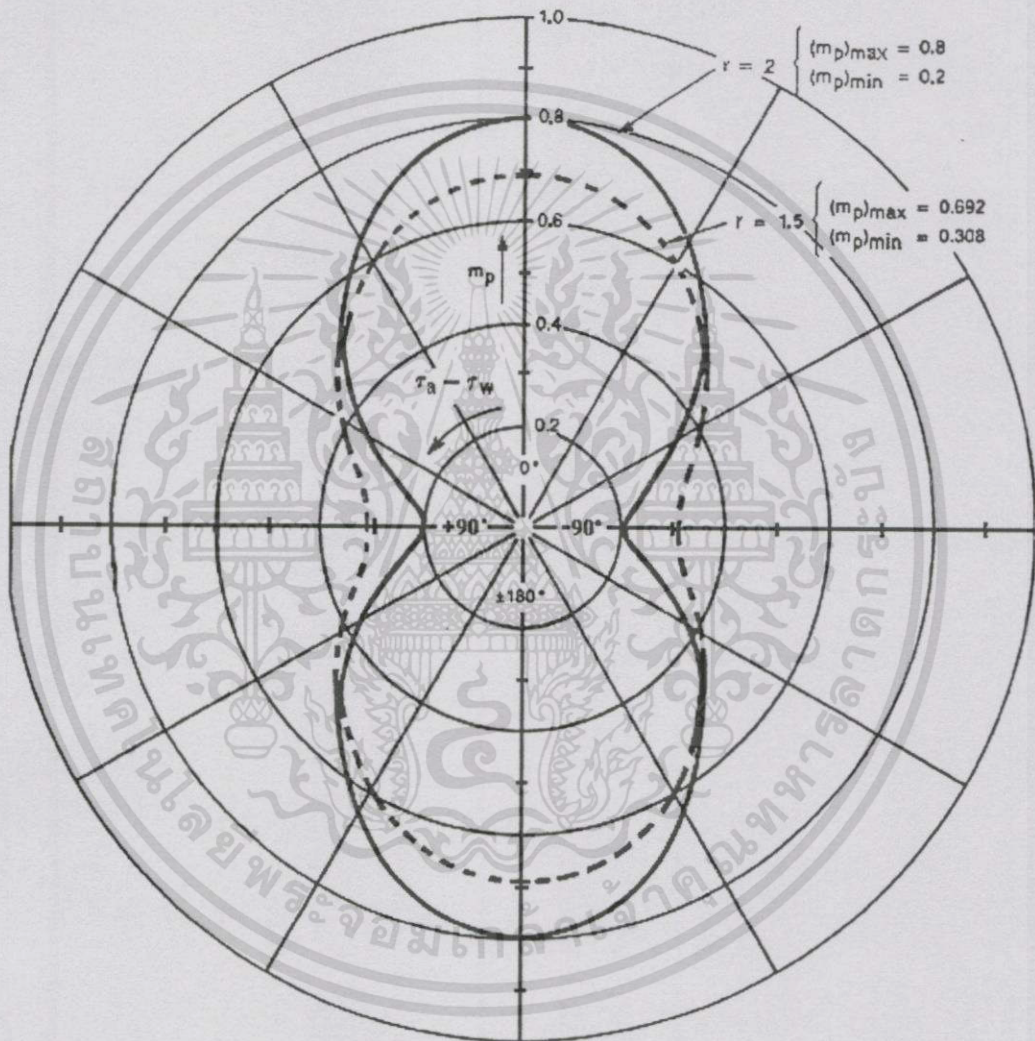
ในรูปที่ 2.4 เป็นโพลาร์กราฟของค่า m_p เทียบกับมุมแตกต่างระหว่าง $\tau_a - \tau_w$ สำหรับที่ ค่า $r = 1.5$ และ $r = 2$ ซึ่งจะเห็นว่า กรณีที่แนวโพลาไรซ์เซชันตั้งฉากกันจะได้ $(m_p)_{\max} = m_p$ โดยที่ $\tau_a = \tau_w$ และในกรณีที่ตั้งฉากกันจะได้ $(m_p)_{\max} = m_p$ โดยที่ $\tau_a = \tau_w + 90^\circ$ หรืออาจเขียนได้อีกแบบเป็น

$$r = \left[\frac{(m_p)_{\max}}{(m_p)_{\min}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเหล่านี้สามารถใช้พิจารณาเพื่อเป็นเทคนิคสำหรับการวัดอัตราส่วนตามแกนและแนวการวางตัวของคลื่นที่รับ เช่น ค่ากำลังของคลื่นที่รับโดยสายอากาศที่มีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (เช่น สายอากาศไดโพล) ที่วัดโดยการหมุนแกนสายอากาศไปราว 180° ซึ่งถ้าสมมุติให้เป็นสายอากาศเป็นสายอากาศอุดมคติแล้ว อัตราส่วนของกำลังที่รับได้สูงสุดต่อต่ำสุด จะเป็นค่ากำลังสองของอัตราส่วนตามแกนของคลื่น และค่ากำลังที่วัดได้มีค่าสูงสุดเมื่อแนวการวางตัวของคลื่นเป็นแนวเดียวกับแนวของสายอากาศ



รูปที่ 2.4 โพลาริเซชันมิสมแมทซ์แฟกเตอร์ m_p สำหรับสายอากาศแบบเชิงเส้นและคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบวงรี

2.1.5 สายอากาศกับการแยกแยะโพลาริเซชัน

จากสมการของโพลาริเซชันมิสมแมทซ์แฟกเตอร์ ทำให้เราสามารถเขียนคำจำกัดความของ XPD ได้มากกว่าเดิม ซึ่งให้ความหมายง่ายขึ้น โดยกรณีทั่วไปแล้ว คลื่นที่มีโพลาริเซชันที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน จะถูกกำหนดให้มีอัตราส่วนตามแกนในขนาดเท่าๆกันแต่เครื่องหมายตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน เช่น ตรงข้ามในการหมุนสำหรับโพลาไรซ์เซชันแบบวงกลม โพลาไรเซชันทั้งในแนวนอน แนวตั้ง และ LHCP หรือ RHCP ล้วนเป็นตัวอย่างเบื้องต้นของการใช้งานระบบการส่งโพลาไรซ์เซชันที่ตั้งฉากกัน ค่าโพลาไรซ์เซชันมิสแมทซ์แฟคเตอร์สำหรับคลื่นที่กำหนดให้ตกกระทบบนสายอากาศที่มีโพลาไรซ์เซชันแมทซ์กับแนวที่ตั้งฉากกับคลื่นที่ตกกระทบ จะมีค่าเป็นศูนย์

โดยมากแล้วมักแยกคลื่นออกเป็น 2 องค์ประกอบซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยจำแนกเป็น

1. องค์ประกอบคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันแมทซ์กับสายอากาศ
2. องค์ประกอบคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันตั้งฉากกับสายอากาศ

โดยทั่วไปสายอากาศจะขยายกำลังคลื่นที่มีองค์ประกอบแมทซ์กันได้สูงสุด และจะตัดคลื่นที่มีองค์ประกอบตั้งฉากออกได้หมดอย่างสมบูรณ์ ค่าของโพลาไรซ์เซชันมิสแมทซ์แฟคเตอร์ อาจถูกพิจารณาให้เป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของฟลักซ์ทั้งหมดที่กระทบลงบนสายอากาศ ซึ่งเกิดได้เมื่อองค์ประกอบคลื่นแมทซ์กับโพลาไรซ์เซชัน นั่นคือถ้ากำหนดให้โพลาไรซ์เซชันของคลื่นที่รับได้เป็น w' และโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศเป็น w ค่ากำลังคลื่นที่สายอากาศรับได้จะมีค่าเป็น

$$P = S A_e m_p(w', w) \quad (2.14)$$

และถ้าสายอากาศที่สองมีพื้นที่ประสิทธิภาพ A_e เท่ากันแต่มีโพลาไรซ์เซชันเป็น w_0 ซึ่งตั้งฉากกับ w จะสามารถรับกำลังของคลื่นได้เป็น

$$P_o = S A_e m_p(w', w_o) \quad (2.15)$$

เมื่อ XPD คืออัตราส่วนขององค์ประกอบคลื่นที่รับได้จากสองแนวที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ XPD ได้เป็น

$$XPD = 10 \log \left[\frac{m_p(w', w)}{m_p(w', w_o)} \right] \quad (2.16)$$

สมมุติว่าโพลาไรซ์เซชัน “W” เป็นหนึ่งในระบบที่ถูกออกแบบให้รับสัญญาณได้มากที่สุด หรือเป็นโพลาไรซ์เซชันร่วม (Copolarized) “W_o” จึงเป็นโพลาไรซ์เซชันที่ไขว้กับโพลาไรซ์ร่วม (Cross polarized)

ถ้าพิจารณาระบบที่เป็นโพลาไรซ์เซชันเชิงเส้นและให้สัญญาณโพลาไรซ์เซชันร่วม (w) เป็นโพลาไรซ์เซชันแนวนอน และให้ $\tau = \tau_w$ เป็นมุมคลื่นที่รับได้เทียบกับแนวระดับ สำหรับกรณีนี้เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.11) ทำให้ได้

$$m_p(w', w) = \cos^2 \tau \quad (2.17)$$

$$m_p(w', w_o) = \sin^2 \tau \quad (2.18)$$

$$XPD = 10 \log(\cot^2 \tau) \quad (2.19)$$

และถ้ากำหนดให้คลื่นมีโพลาไรซ์เซชันแบบวงรี มีอัตราส่วนตามแกน : $r'_w = r$ และให้โพลาไรซ์เซชันร่วมเป็น LHCP ในกรณีนี้จะได้ว่า $r_w = +1$ และ $r_{wo} = -1$

$$m_p(w', w) = \frac{1(r+1)^2}{2(r^2-1)} \quad (2.20)$$

$$m_p(w', w_o) = \frac{1(r-1)^2}{2(r^2+1)} \quad (2.21)$$

$$XPD = 20 \log \left[\frac{r+1}{r-1} \right] \quad (2.22)$$

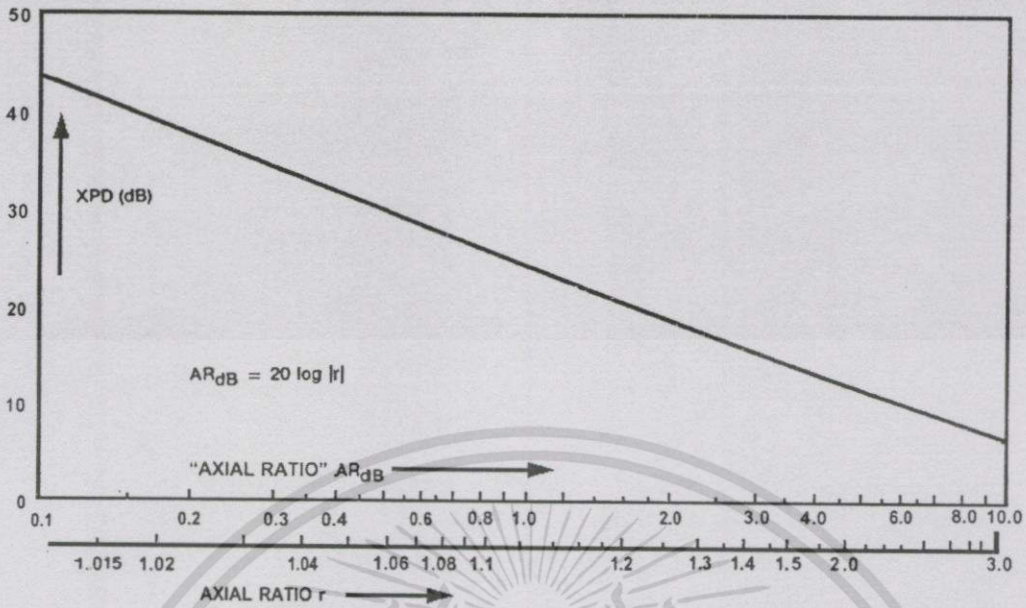
ค่า XPD ที่เทียบกับ r สำหรับคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันแบบวงรี แสดงในรูปที่ 2.5 และ เมื่อแปลงค่าอัตราส่วนตามแกนให้อยู่ในรูปหน่วย dB : AR_{dB} ดังแสดงในรูปซึ่งค่าในหน่วย dB นี้คิดได้จาก

$$AR_{dB} = 20 \log |r| \quad (2.23)$$

ในเทอมของพารามิเตอร์เหล่านี้ ค่าของ XPD จะประมาณว่ามีค่าใกล้เคียงกับ

$$XPD \cong 24.8 - 20 \log(AR_{dB}) \quad \text{สำหรับ } AR_{dB} < 10dB \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 XPD กับอัตราส่วนตามแกนของ โพลาริเซชันแบบวงรีเมื่อ LHCP เป็นโพลาริเซชันร่วม

2.1.6 ผลกระทบของสมรรถนะสายอากาศที่ไม่เป็นอุดมคติ

ค่า XPD ที่ได้อธิบายลักษณะสมบัติของโพลาริเซชันของคลื่นที่รับได้เทียบอ้างอิงกับสัญญาณโพลาริเซชันร่วม ค่า XPD จริงสามารถวัดได้จากสายอากาศที่เป็นอุดมคติ ซึ่งจะให้คุณสมบัติการแผ่อย่างแท้จริงกับโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ แต่โดยที่จริงแล้วสายอากาศไม่ได้เป็นไปตามอุดมคติ ความสามารถในการคัดแยกสัญญาณโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แบบ ทำให้การลดลงของสมรรถนะของระบบเกิดขึ้นได้จากกรณีนี้ ในหัวข้อนี้จะพูดถึงวิธีการบ่งชี้ปริมาณของสมรรถนะโพลาริเซชันของสายอากาศ และนำค่าสมรรถนะนี้มาพิจารณาแปรค่าในการวัดโพลาริเซชัน

การคัดแยกโพลาริเซชัน I ถูกกำหนดให้เป็นสัดส่วนระหว่างกำลังเอาต์พุตที่เป็นไปได้ในการรับสัญญาณที่พอร์ตโพลาริเซชันร่วม (P_c) กับ กำลังเอาต์พุตที่พอร์ตโพลาริเซชันไขว้ (P_x) ระดับโพลาริเซชันที่ข้ามไปยังพอร์ตโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ กำหนดให้เป็น α_c และ α_x ตามลำดับ เมื่อสายอากาศไม่เป็นอุดมคติ ค่าของ α_c และ α_x จึงไม่จำเป็นต้องตั้งฉากกัน และ α_c ก็ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับโพลาริเซชันร่วมเพียงอย่างเดียว นั่นคือ สัญญาณโพลาริเซชันที่รับได้ w' และความหนาแน่นของกำลังฟลักซ์ไฟฟ้า S_w สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.14) เป็น

$$I = 10 \log \frac{P_c}{P_x} = 10 \log \frac{S_w A_e m_p(w', a_c)}{S_w A_e m_p(w', a_x)}$$

$$I = 10 \log \frac{m_p(w', a_c)}{m_p(w', a_x)} \quad (2.25)$$

เพื่อความสะดวกและง่ายในการหาค่า XPD จากเทอมของ I ที่วัดได้ ค่ากำลังของคลื่นที่รับได้จากพอร์ต์โพลาริซั่มร่วมของสายอากาศ สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมขององค์ประกอบคลื่นโพลาริซั่มร่วม (w) และ โพลาริซั่มไขว้ (w_o) ที่แท้จริงได้เป็น

$$P_c = A_e [S_w m_p(w, a_c) + S_{w_o} m_p(w_o, a_c)] \quad (2.26)$$

และกำลังของโพลาริซั่มไขว้ เป็น

$$P_x = A_e [S_w m_p(w, a_x) + S_{w_o} m_p(w_o, a_x)] \quad (2.27)$$

โดยที่ S_w และ S_{w_o} เป็นกำลังของความหนาแน่นฟลักซ์ในโพลาริซั่มร่วมและโพลาริซั่มไขว้ที่แท้จริงตามลำดับ จึงเขียนสมการของ I ได้ใหม่เป็น

$$I = 10 \log \frac{S_w m_p(w, a_c) + S_{w_o} m_p(w_o, a_c)}{S_w m_p(w, a_x) + S_{w_o} m_p(w_o, a_x)} \quad (2.28)$$

โดยที่ $xpd = \frac{S_w}{S_{w_o}} = \log^{-1} \left[\frac{XPD}{10} \right]$ และเมื่อกำหนดให้แนวโพลาริซั่มร่วมของสายอากาศ
เมทซ์กันพอดีกับโพลาริซั่มร่วมของคลื่น จะได้

$$m_p(w_o, a_c) \ll m_p(w, a_c)$$

ดังนั้นจึงสามารถละเลยเทอมนี้ได้ และค่า I จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$I = 10 \log \frac{m_p(w, a_c)}{m_p(w, a_x) + m_p(w_o, a_x) / (xpd)} \quad (2.29)$$

เมื่อสายอากาศมีคุณสมบัติใกล้เคียงอุดมคติแล้วจะได้

$$m_p(w, a_c) = 1, \quad m_p(w_o, a_x) = 1, \quad m_p(w, a_x) = 0$$

ซึ่งจะทำให้ค่าปริมาณการคัดแยกโพลาริซ์เซชันเท่ากับปริมาณการแยกแยะโพลาริซ์เซชันไขว้ หรือ $I = XPD$ และอีกนัยหนึ่งคือเมื่อ XPD มีค่าสูงมากแล้วจะได้

$$I = 10 \log \left[\frac{m_p(w, a_c)}{m_p(w, a_x)} \right]$$

ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับสายอากาศเพียงอย่างเดียว

ในกรณีของโพลาริซ์เซชันแบบวงกลม สมการของการคัดแยกโพลาริซ์เซชัน สามารถเขียนได้เป็น

$$I = 10 \log \frac{\frac{1}{2} + \frac{r_c}{r_c^2 + 1}}{\frac{1}{2}(xpd^{-1} + 1) + \frac{r_x}{r_x + 1}(xpd^{-1} - 1)} \quad (2.30)$$

โดยที่ r_c และ r_x เป็นอัตราส่วนตามแกนของสายอากาศโพลาริซ์ร่วมและโพลาริซ์ไขว้ตามลำดับ ในรูปที่ 2.5 แสดงค่าของ I เทียบกับค่าของ XPD ที่ค่าอัตราส่วนตามแกนต่างๆ ซึ่งคิดในรูปของเดซิเบล (AR_{dB}) ค่าอัตราส่วนตามแกนของโพลาริซ์ร่วมและโพลาริซ์ไขว้ถูกทำให้มีค่าเท่ากัน โดยมีค่า I เป็นอิสระจากค่าของ r_x ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้จากการวัด

สำหรับในกรณีของโพลาริซ์แบบเชิงเส้นสามารถหาปริมาณการคัดแยกโพลาริซ์เซชันได้จากสมการ

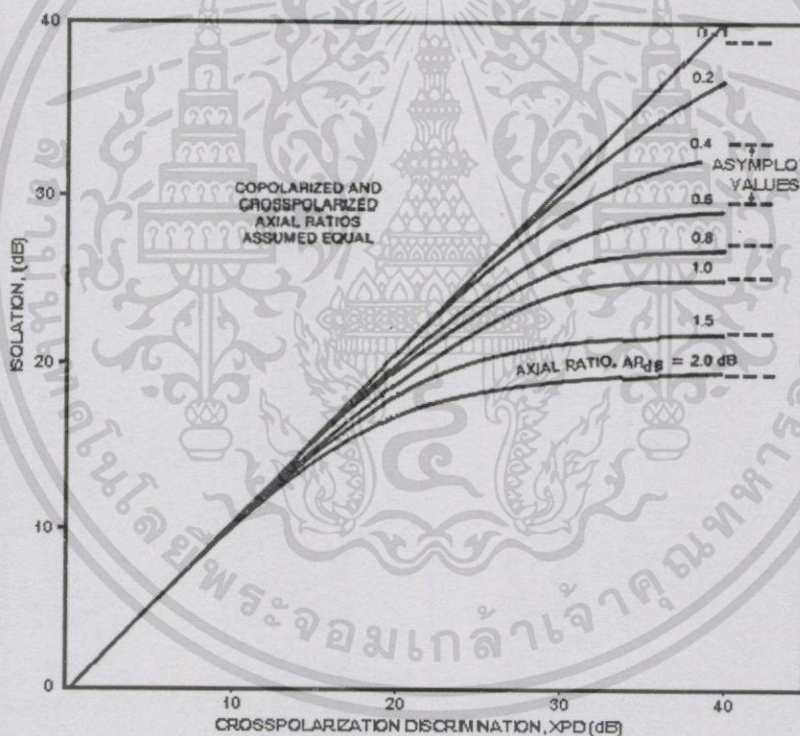
$$I = 10 \log \frac{1 + Q_c \cos 2\tau_c}{(1 + xpd^{-1}) - (1 - xpd^{-1})Q_x \cos 2(\tau_x - 90^\circ)} \quad (2.31)$$

โดยที่ $Q_c = \frac{(r_{c,x}^2 - 1)}{(r_{c,x}^2 + 1)}$

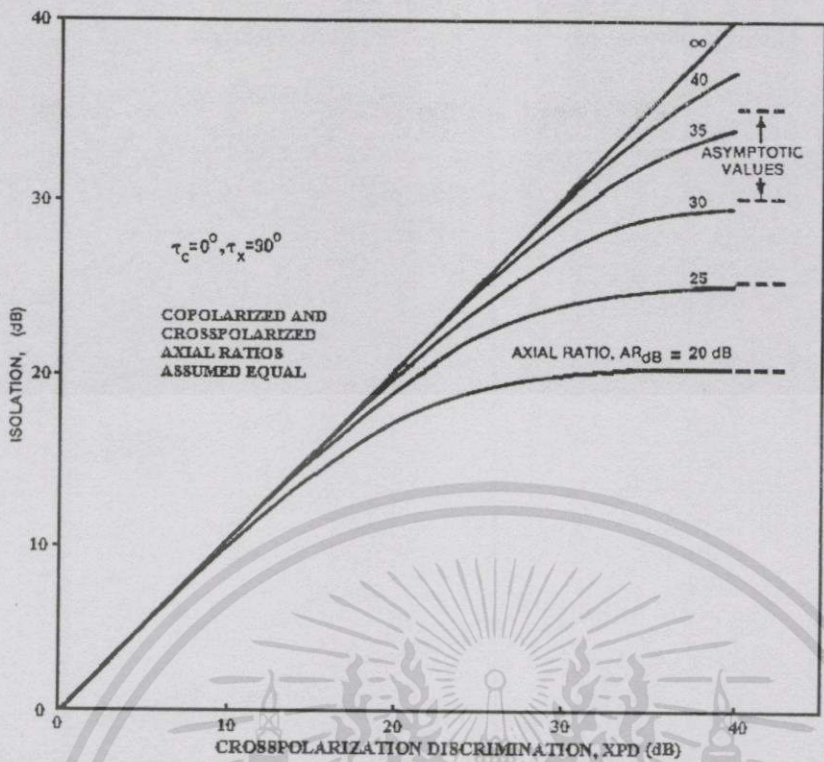
$\tau_{c,x}$ = มุมแนวแกนของโพลาริซ์ร่วมและโพลาริซ์ไขว้ของสายอากาศ

$r_{c,x}$ = อัตราส่วนตามแกนของสายอากาศโพลาริซ์ร่วมและโพลาริซ์ไขว้

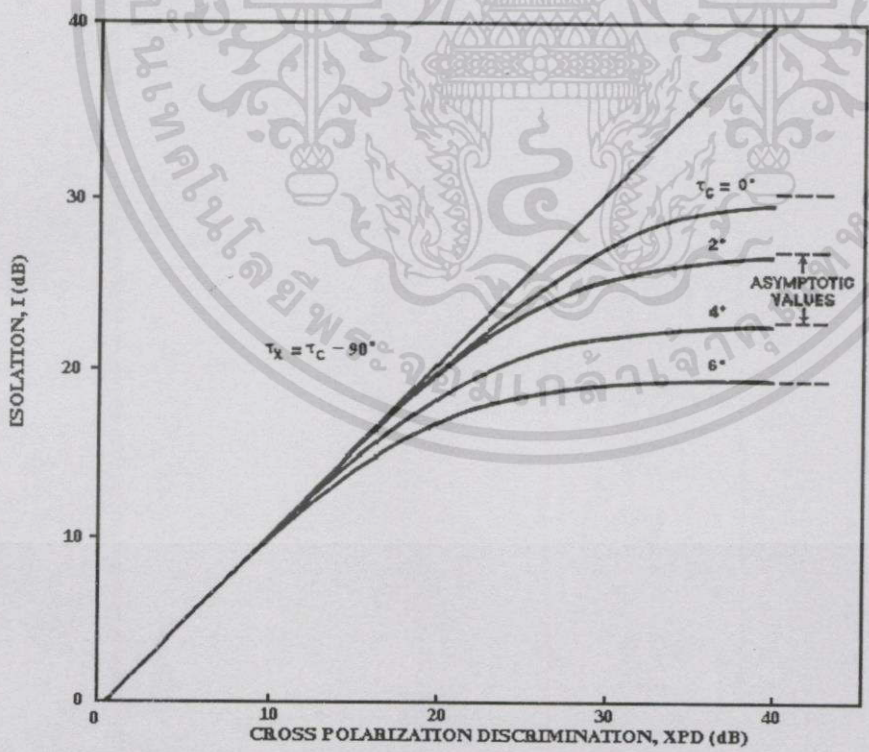
โดยทั่วไปแนวแกนของโพลาริซั่มจะถูกใช้เป็นแกนอ้างอิงให้กับแนวการวางตัวของสายอากาศ ซึ่งในรูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงให้เห็นค่าปริมาณการคัดแยกโพลาริซั่มเทียบกับปริมาณการแยกแยะโพลาริซั่มเชิงเส้นไขว้ สำหรับสายอากาศที่มีค่าอัตราส่วนตามแกนต่างๆ และมุมแนวการวางตัวที่ผิดไป (Misalignment angle) ค่าต่างๆ โดยรูปแรกเป็นรูปที่ใช้กับกรณีของมุมแนวการวางตัวถูกต้องสมบูรณ์ และแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนตามแกนเช่นเดียวกันกับกรณีของโพลาริซั่มแบบวงกลม อัตราส่วนตามแกนของโพลาริซั่มรวมและโพลาริซั่มไขว้จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วปริมาณการคัดแยกโพลาริซั่มเชิงเส้นจะไม่ขึ้นกับอัตราส่วนตามแกนของโพลาริซั่มรวม (τ_c) เมื่อมันมีค่าสูง (> 20 dB) ในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นผลกระทบของมุมแนวการวางตัวสำหรับกรณี $AR_{dB} = 30$ dB ซึ่งแนวแกนสายอากาศถูกกำหนดให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ($\tau_x = \tau_c - 90^\circ$) ซึ่งจะเห็นว่าแล้วปริมาณการคัดแยกโพลาริซั่มเชิงเส้นจะไม่ขึ้นกับ τ_c ที่ค่า $\tau_c < 10^\circ$



รูปที่ 2.6 ค่าปริมาณ XPD กับอัตราส่วนตามแกนของสายอากาศในกรณีของโพลาริซั่มแบบวงกลม



รูปที่ 2.7 ค่าการคัดแยกโพลาไรซ์เซชัน เทียบกับ XPD และ อัตราส่วนตามแกนของสายอากาศ ในกรณีของโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและมุมแนวการวางตัวถูกต้อง



รูปที่ 2.8 ค่าการคัดแยกโพลาไรซ์เซชัน เทียบกับ XPD และมุมแนวการวางตัวแปรเปลี่ยนไป กรณีของโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และ $AR_{dB} = 30$ dB

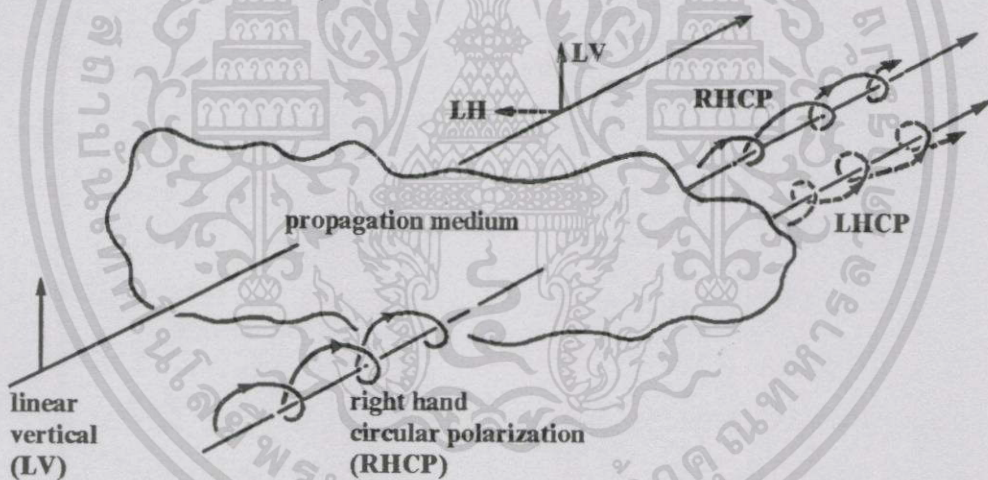
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลกระทบจากคุณลักษณะของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านบรรยากาศขณะเกิดฝนตก จะได้รับผลกระทบจากการลดทอนและการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชัน ซึ่งเป็นผลจากคุณลักษณะสมบัติของการสูญเสียและคุณสมบัติที่แตกต่างกันทางกายภาพ (Anisotropic) ของตัวกลางซึ่งเป็นกลุ่มหยดฝน ในที่นี้จะกล่าวถึงมูลเหตุของปรากฏการดังกล่าว ซึ่งอาจพิจารณาได้ดังนี้

2.2.1 ผลกระทบจากความแตกต่างทางกายภาพของตัวกลาง

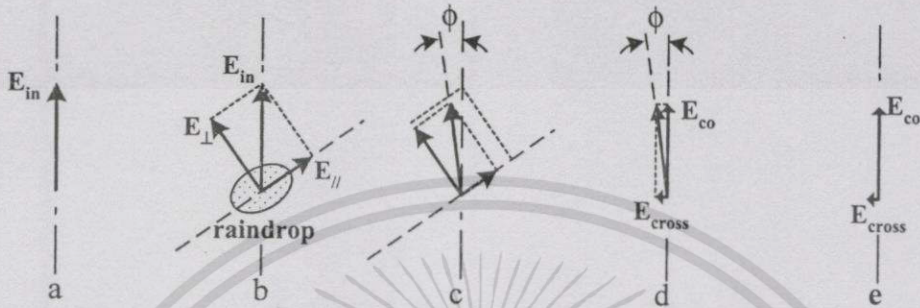
ในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงโพลาไรซ์เซชันที่สมบูรณ์แบบ 2 ชนิดคือ โพลาไรซ์เชิงเส้นแบบแนวตั้ง และโพลาไรซ์วงกลมแบบวนขวา (RHCP) เดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นกลุ่มหยดฝนแล้วผ่านออกไปอีกด้านหนึ่ง การเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้น โดยที่โพลาไรซ์เชิงเส้นแบบแนวตั้ง จะปรากฏมีองค์ประกอบที่ตั้งฉากหรือโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบแนวนอนร่วมอยู่ด้วย ส่วนโพลาไรซ์วงกลมวนขวา จะปรากฏมีองค์ประกอบโพลาไรซ์วงกลมวนซ้ายร่วมอยู่ด้วยเช่นกัน ค่า XPD ของโพลาไรซ์เดิมทั้งสองจะมีค่าลดลงอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชัน



รูปที่ 2.9 ลักษณะของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางบรรยากาศ

การเปลี่ยนโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้น มีสาเหตุจากคุณสมบัติแอนไอโซโทรปิกของตัวกลาง ที่คลื่นเดินทางผ่าน ซึ่งถ้าตัวกลางดังกล่าวถูกประกอบไปด้วยอนุภาคที่สมมาตรแล้ว เช่นหยดฝนที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์แบบ การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันของสัญญาณจะไม่เกิดขึ้น ดังเช่นในกรณีที่ฝนตกปรอยๆ หรือละอองหมอก ซึ่งกรณีเหล่านี้จะเกิดเพียงการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการดูดกลืนหรือการกระเจิงของคลื่นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากหยดฝนมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากทรงกลมซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากแรงที่กระทำโดยรอบขณะที่กำลังตกลงมา ทำให้รูปทรงกลายเป็นรูปทรงที่ไม่สมมาตรและมักจะโน้มเอียงออกไปจากแนวแกนระดับและแนวแกนตั้งฉากของแกน

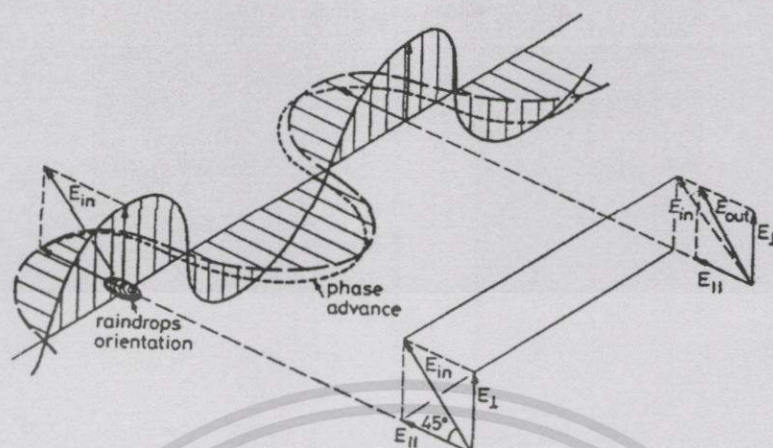
สมมาตร เนื่องจากลมกรร โขกในพายุฝน ขณะที่โพลาริซ์ของสัญญาณดาวเทียมก็จะไม่วางในแนวโพลาริซ์เดิม การเอียงออกจากแกนสมมาตรหยดฝนของสนามไฟฟ้าของคลื่นที่ผ่านเข้ามา นี้ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโพลาริซ์เซชัน ซึ่งมีสาเหตุจากผลของความแตกต่างในการลดทอนและการเลื่อนเฟสในระหว่างสองแกนสมมาตรของหยดฝน



รูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันเนื่องจากความแตกต่างการลดทอนระหว่างแกนหลักและแกนรองของหยดฝนสมมาตร

ในรูป 2.10 a สนามไฟฟ้าของคลื่นตรง E_{in} มีโพลาริซ์เซชันแนวตั้งและไม่มีองค์ประกอบในแนวนอน E_{in} นี้ถูกนำมาพิจารณาองค์ประกอบในแนวแกนหลักและแนวแกนรองของหยดฝนสมมาตร โดยกำหนดให้เป็นสนามไฟฟ้าที่ขนาน (E_{\parallel}) และสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉาก (E_{\perp}) กับแนวแกนหลักของหยดฝน ดังรูปที่ 2.10b ค่า E_{\parallel} จะถูกลดทอนมากกว่า E_{\perp} และยังผลให้สนามไฟฟ้าขาออก (E_{out}) เบี่ยงเบนทิศทางออกจากสนามไฟฟ้าขาเข้าด้วยมุม ϕ ดังรูป 2.10c ดังนั้นเมื่อนำ มาพิจารณาองค์ประกอบเทียบกับโพลาริซ์เซชันเดิม จะเห็นว่าจะเกิดองค์ประกอบ 2 องค์ประกอบคือ สนามไฟฟ้าในทิศทางแกนเดิม (E_{co}) และสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับแกนเดิม (E_{cross}) ดังรูป 2.10e นั้น แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันเกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างของการลดทอน ซึ่งเห็นได้จากสนามไฟฟ้า E ขณะนี้มีองค์ประกอบของสนามในแนวนอน

การเปลี่ยนโพลาริซ์เซชันของสัญญาณที่มีโพลาริซ์เชิงเส้นเนื่องจากผลความแตกต่างการลดทอนแสดงในรูปที่ 2.10 ในการที่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันอันเนื่องมาจากผลความแตกต่างการเลื่อนเฟส สามารถพิจารณาได้จากเวกเตอร์โพลาริซ์เชิงเส้นซึ่งถูกพิจารณาในรูปสัญญาณไซน์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน 2 สัญญาณ โดยมีมุมบวกและลบ 45° และตั้งฉากซึ่งกันและกันเดินทางผ่านหยดฝน เวกเตอร์สนามไฟฟ้าทั้งสองเวกเตอร์นี้ขนานกับแกนหลักและแกนรองของหยดฝนรูปทรงรี ซึ่งก่อนถึงหยดฝน ทั้ง 2 เวกเตอร์มีเฟสเดียวกัน แต่เมื่อผ่านออกจากหยดฝน เวกเตอร์หนึ่งมีเฟสล้ำหลังเมื่อเทียบกับอีกเวกเตอร์หนึ่ง เช่นเดียวกันกับกรณีผลต่างการลดทอน ผลของความแตกต่างการเลื่อนเฟสระหว่างสองแกนของหยดฝน ทำให้เกิดสาเหตุการเอียงของสนามไฟฟ้าไปจากแนวแกนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันที่มีสาเหตุจากความแตกต่างการเลื่อนเฟส

เวกเตอร์ของคลื่นตรง E_{in} มีมุม 45° กับแนวแกนหยดฝนรูปทรงรี และถูกพิจารณาเวกเตอร์ตามแนวแกนหลักและแกนรอง เป็น $E_{//}$ และ E_{\perp} ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้มีเฟสเดียวกัน เมื่อผ่านออกจากหยดฝน ระดับสัญญาณถูกกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เฟสของเวกเตอร์สัญญาณทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งสองแนวแกนมีค่าไม่เท่ากัน ความแตกต่างของการเลื่อนเฟสระหว่างสองแนวแกนนี้ เป็นสาเหตุให้เกิดมุมเอียงประสิทธิผลของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าขาออก (E_{out}) เมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าขาเข้า และถ้าพิจารณาย้อนกลับไปในทิศทางองค์ประกอบ E_{in} จะพบว่ามีองค์ประกอบเป็นสัญญาณในแนวโพลาไรซ์เดิม (E_{\parallel}) และองค์ประกอบในแนวตั้งฉากกับโพลาไรซ์เดิม (E_{cross})

ผลรวมทางเวกเตอร์จากทั้งผลความแตกต่างการลดทอนและความแตกต่างการเลื่อนเฟส จะเกิดจากผลที่คลื่นเดินทางผ่านหยดฝน ในกรณีของโพลาไรซ์เซชันแบบวงกลมสมบูรณ์แบบ (ซึ่งเกิดจากโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นสององค์ประกอบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันและมีมุมแตกต่างกัน 90°) จะถูกระทบอย่างมากจากผลต่างการเลื่อนเฟส ส่วนโพลาไรซ์เซชันแบบเชิงเส้น จะได้รับผลกระทบอย่างมากจากผลต่างการลดทอน

ผลกระทบจากผลต่างการลดทอนจะเป็นเหตุให้คลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้นสองแนวที่เดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นหยดฝนมีแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน และผลกระทบของการเลื่อนเฟสจะเป็นสาเหตุให้เฟสระหว่างสองคลื่นนี้เปลี่ยนแปลงไปจากที่ควรจะเป็น 90° เมื่อรวมผลจากความแตกต่างทั้งสองนี้จะเป็นสาเหตุให้คลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันแบบวงกลมกลายเป็นโพลาไรซ์เซชันแบบวงรี ซึ่งอาจพิจารณาเป็นโพลาไรซ์เซชันแบบวงกลมที่มีทิศทางตรงข้ามกันได้

โพลาริซ์เซชันแบบเชิงเส้นที่สมบูรณ์แบบจะไม่ได้รับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันเลย ถ้าสนามไฟฟ้าของคลื่นมีแนวการวางตัวตามแนวแกนสมมาตรของหยดฝน ซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีความหมายโพลาริซ์ในแนวตั้งฉากนั้นอยู่ จึงทำให้ไม่เกิดผลต่างการลดทอนของสัญญาณจากแนวแกนทั้งสองของหยดฝน สัญญาณจะได้รับเพียงผลกระทบที่ทำให้สัญญาณลดทอนลงและเฟสที่เลื่อนออกไปเท่านั้น แต่จะไม่มีผลให้เกิดการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปจากเดิม เมื่อแนวการวางตัวของเวกเตอร์คลื่นตรงในโพลาริซ์เซชันเชิงเส้นสมบูรณ์แบบหมุนออกจากแนวการวางตัวของแกนหยดฝน ขนาดของสนามเวกเตอร์ในองค์ประกอบตั้งฉากของคลื่นตรง รวมทั้งความแตกต่างการลดทอนและความแตกต่างการเลื่อนเฟสจะมีปริมาณขนาดเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่อคลื่นตรงทำมุม 45° กับแนวแกนสมมาตรกับหยดฝน ซึ่งเทียบเท่าได้กับสัญญาณที่มีโพลาริซ์เซชันแบบวงกลม จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันของสัญญาณที่มีโพลาริซ์เซชันแบบเชิงเส้น ปกติจะมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันของสัญญาณโพลาริซ์เซชันแบบวงกลม ยกเว้นที่มุมเอียง 45° ที่มีผลเท่ากันดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงผลของแนวเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ไปเทียบกับแนวแกนของหยดฝน

ในรูปที่ 2.12 (A) รูปทรงกลมสมบูรณ์แบบซึ่งแนวการวางตัวของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะไม่ก่อให้เกิดผลใดๆ ส่วนในรูปที่ 2.12 (B) ในรูป (i) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าถูกวางในแนวเดียวกันกับแกนสมมาตรของหยดฝน ซึ่งถ้าสมมติเป็นคลื่นโพลาริซ์เซชันแบบเชิงเส้นที่สมบูรณ์แบบ (ไม่มีองค์ประกอบในแนวตั้งฉากเลย) จะไม่เกิดผลจากความแตกต่างในสองแนวแกน จึงไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันของสัญญาณ ซึ่งในทำนองเดียวกันกับเมื่อแนวเวกเตอร์สนามไฟฟ้าวางในแนวเดียวกันกับแกนสมมาตรหลักของหยดฝนก็จะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (ii) เมื่อเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีทิศทางเอียงออกไป จะเริ่มปรากฏสนามไฟฟ้าในแนวแกนสมมาตรหลักของหยดฝน การเปลี่ยนแปลงโพลาริซ์เซชันของคลื่นจะเริ่มปรากฏขึ้น และรูป(iii) เมื่อเวกเตอร์สนามไฟฟ้าเอียง 45° องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวแกนทั้งสองของหยดฝนจะมีขนาดเท่ากัน ซึ่งนำไปสู่ผลกระทบความแตกต่างการลดทอนและการเลื่อนเฟสสูงสุด โพลาริซ์เซชันแบบวงกลมซึ่งมี

แอมพลิจูดของสองแนวแกนตั้งฉากเท่ากันเสมอ ก็จะได้รับผลกระทบเท่ากันกับกรณีนี้ในโพลาไรซ์ เซชันแบบเชิงเส้น

ปริมาณผลต่างการลดทอนและผลต่างการเลื่อนเฟส เมื่อคลื่นเดินทางผ่านกลุ่มหยดฝน จะขึ้นกับหลายปัจจัย รวมทั้งความถี่และอัตราการตกของฝน ระดับผลกระทบสูงสุดจะสังเกตเห็นเมื่อพื้นที่ตัดขวางของหยดฝนในทิศทางของคลื่นมีขนาดใหญ่ที่สุด เช่น เมื่อแนวแกนหลักที่สมมาตรของหยดฝนรูปทรงรีวางตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น

ถ้าหยดฝนถูกสมมุติให้การวางตัวของแนวแกนสมมาตรหลักทำมุม 90° กับทิศทางของคลื่น ค่าผลต่างการลดทอนและผลต่างการเลื่อนเฟสเทียบกับความถี่ที่อุณหภูมิ 20° และการกระจายของฝนเป็นแบบ L&P ผลต่างของการเลื่อนเฟสจะเป็นผลกระทบหลักต่อการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันของคลื่นในช่วงความถี่ต่ำกว่า 10 GHz และผลต่างของการลดทอนจะเป็นผลกระทบหลักในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 20 GHz ส่วนในช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง 10-20 GHz จะเป็นช่วงที่ผลต่างทั้งสองมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันในระดับที่ใกล้เคียงกัน

2.3 คุณลักษณะและระบบการตกของฝน

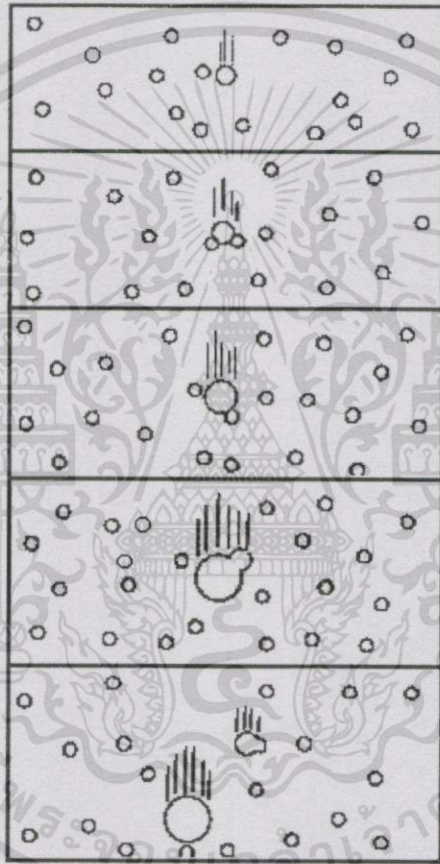
การลดทอนและการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันที่เป็นผลจากบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ จะถูกพิจารณาสาเหตุจากคุณลักษณะของฝนทั้งในเชิงมหภาคและจุลภาค คุณลักษณะเชิงมหภาคได้แก่ ขนาด การกระจายและการเคลื่อนที่ของกลุ่มฝน ความสูงระดับชั้นที่กลายเป็นน้ำ (melting layer) และปริมาณเกร็ดน้ำแข็งที่เกิดขึ้น คุณลักษณะเชิงจุลภาคได้แก่ การกระจายของขนาดหยดฝน ความหนาแน่นและความเป็นทรงกลมแบนขั้วของทั้งหยดฝนและเกร็ดน้ำแข็ง ผลกระทบโดยรวมจากทั้งสองคุณลักษณะนี้นำไปสู่ค่าการแจกแจงสะสมของค่าการลดทอน และค่าการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันเทียบกับเวลา ค่าช่วงเวลาของการจางหาย คาบเวลาการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชัน และค่าความลดทอนและการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันจำเพาะเทียบกับความถี่ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะและกระบวนการที่ก่อให้เกิดฝนขึ้นในภาพรวมดังนี้

2.3.1 กระบวนการเกิดน้ำฟ้า

น้ำฟ้า (precipitation) เกิดจากการรวมตัวของเม็ดเมฆ (cloud droplet) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก 0.1-0.2 มิลลิเมตร หรือ 10-20 ไมครอน จำนวนเป็นล้านเม็ด เพื่อกลายเป็นหยดฝนตกลงสู่พื้นดิน ฉะนั้นน้ำฟ้าจึงหมายถึงอนุภาคที่เป็นน้ำ หรือน้ำแข็งที่ตกจากฟ้าสู่พื้นดิน ได้แก่ ฝน หิมะ และลูกเห็บ การเกิดน้ำฟ้าพิจารณาจากสาเหตุและกระบวนการเกิดได้ดังนี้

2.3.1.1 กระบวนการรวมของหยดน้ำขนาดเล็ก (collision-coalescence process)

หยดน้ำในเมฆจะมีขนาดแตกต่างกันหลายขนาด หยดน้ำขนาดใหญ่จะมีอัตราความเร็วมากกว่าหยดน้ำขนาดเล็ก เมื่อวิ่งเข้าชนกัน ก็จะดึงหยดน้ำขนาดเล็กมารวมกันเป็นหยดเดียวกัน เมื่อมีขนาดใหญ่มากก็อาจแยกออกเป็นหยดน้ำขนาดกลาง มีการวิ่งชนกันกลายเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ขึ้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องเรื่อยๆ จนได้หยดฝนจำนวนมากตกลงมาจากเมฆ ลักษณะเช่นนี้จะเกิดจากเมฆที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0°C เป็นเมฆอุ่นจึงเรียกน้ำฟ้าที่เกิดจากเมฆชนิดนี้ว่า น้ำฟ้าจากเมฆอุ่น (warm-cloud precipitation) มักเกิดในแถบโซนร้อน



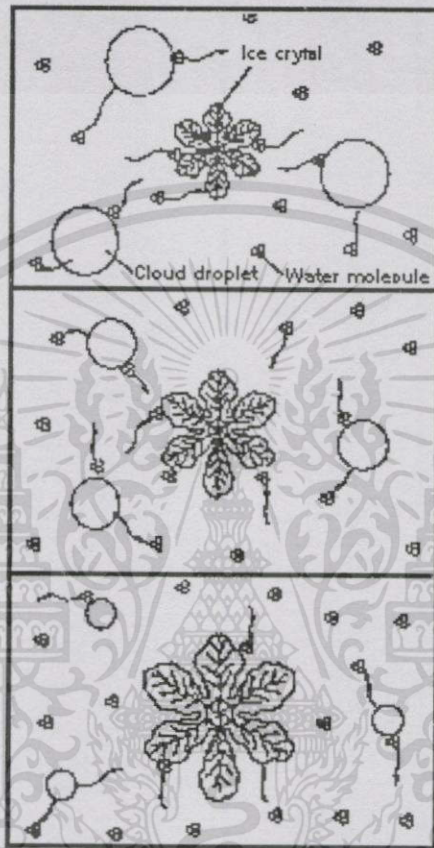
รูปที่ 2.13 กระบวนการชนกันและรวมตัวกันของหยดน้ำขนาดเล็ก

2.3.1.2 กระบวนการเบอร์เกอร์อน (Bergeron process)

กระบวนการนี้เกิดในเมฆเย็นซึ่งประกอบด้วยผลึกน้ำแข็ง น้ำที่มีความเย็นมากอาจมีอุณหภูมิต่ำกว่า -40°C เรียกว่าน้ำซูเปอร์คูล (supercool water) หยดน้ำซูเปอร์คูลนี้มีการรวมตัวกับผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้นๆ เนื่องจากความกดไอน้ำอิ่มตัวในน้ำแข็งมีค่าน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นอากาศอิ่มตัวจึงต้องมีการอิ่มตัวยิ่งขึ้น (supersaturate) ในน้ำแข็งหยดน้ำจึงมีการควบแน่นบนน้ำแข็งและทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ขณะเดียวกันหยดน้ำมีการระเหย ผลึกน้ำแข็งโตพอที่จะตกจากเมฆเป็นหิมะ แต่ถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศสูงกว่า 0°C ก็อาจตกเป็นฝนได้ การเกิดน้ำฟ้าแบบนี้เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมฆเย็น จึงเรียกว่าน้ำฟ้าจากเมฆเย็น (cold-cloud precipitation) มีนักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องในการค้นพบกระบวนการนี้ 3 ท่านคือ อัลเฟรด เวกเนอร์ (Alfred Wegener) ฟินเดเซน (Findeisen) และเบอร์เจอร์อน (Bergeron) บางครั้งจึงเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการเวกเนอร์-เบอร์เจอร์อน-ฟินเดเซน (Wegener-Bergeron-Findeisen process)



รูปที่ 2.14 กระบวนการเบอร์เจอร์อน

2.3.2 ประเภทของน้ำฟ้า

น้ำฟ้าในบริเวณละติจูดต่ำเช่น ประเทศไทยจะตรวจพบเฉพาะฝนและลูกเห็บเล็กน้อย ส่วนบริเวณละติจูดสูงนอกจากฝนและลูกเห็บแล้วยังตรวจพบหิมะ ฝน น้ำแข็งและอื่นๆอีกด้วย

2.3.2.1 ฝน (rain)

เป็นน้ำฟ้าที่อยู่ในสถานะเป็นของเหลว เป็นรูปหยดน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-7 มิลลิเมตร มีความเร็วมากกว่า 10 ฟุต/วินาที หยดฝนที่มีขนาดใหญ่จะเกิดจากเมฆ (cumuliform) ที่มีความหนาหลายกิโลเมตร สามารถแบ่งย่อยลงไปเป็น 3 ประเภทคือ ฝนชนิดเบา (light rain) ฝนชนิดปานกลาง (moderate rain) ฝนชนิดหนัก (heavy rain)

2.3.2.2 ฝนละออง (drizzle)

เป็นน้ำฟ้าที่ประกอบด้วยหยดขนาดเล็กมากอยู่ชิดกันอย่างมีระเบียบ ขนาดหยดมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร มักเกิดจากเมฆแผ่น(stratiform) ซึ่งหนาถึงสามร้อยเมตร ถ้ากระแสอากาศไหลขึ้นอ่อนมาก ฝนละอองก็จะตกลงถึงพื้นดิน และตกเป็นบริเวณกว้าง

2.3.2.3 ลูกเห็บ (hail)

เป็นก้อนน้ำแข็งมักจะไม่ใช่มองเห็นเป็นฝ้ายขาวๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-50 มิลลิเมตร หรือบางครั้งอาจมีขนาดใหญ่กว่านี้ ลูกเห็บที่ตกลงสู่พื้นดินเกิดจากเมฆคิวมูโลนิมบัสซึ่งมีขนาดใหญ่ก่อตัวสูงมาก ลูกเห็บมักเกิดขึ้นบ่อยในระหว่างพายุฟ้าคะนอง ลูกเห็บจะตกลงมาถึงพื้นดินต้องผ่านอากาศหลายกิโลเมตรที่อุณหภูมิอากาศสูงกว่า 0°C อาจทำให้ลูกเห็บละลายก่อนถึงพื้นดิน จึงไม่ค่อยตรวจพบลูกเห็บในระดับต่ำในบริเวณศูนย์สูตร

2.3.2.4 หิมะ (snow)

เป็นน้ำฟ้าที่อยู่ในรูปผลึกน้ำแข็ง (ice crystal) ส่วนมากมีรูปร่างเป็นกึ่งหรือแขนง หรือรูปดาว ผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยมเกิดจากการควบแน่นของไอน้ำในอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

ผลึกรูปกึ่งหรือแขนงปะปนกับผลึกที่ไม่เป็นรูปกึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -5°C ผลึกรวมเข้ากันเป็นก้อนเรียก เกล็ดหิมะ (snowflake)

2.3.2.5 เมล็ดหิมะ (snow grain)

เป็นเมล็ดน้ำแข็งขนาดเล็กมาก มีสีขาวทึบแสง อาจจะแบนหรือยาวเรียว ขนาดโดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร กระทั่งพื้นแข็งมักจะไม่วัดหรือแตกละเอียด ตกลงมาในปริมาณน้อยมาก ส่วนมากเกิดจากเมฆสเตรคัสหรือหมอก

2.3.2.6 สโนว์ เพลเลท (snow pellet)

เป็นเมล็ดน้ำแข็งสีขาว ทึบแสง เป็นรูปทรงกลม หรือรูปกรวย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-5 มิลลิเมตร เปราะร่วน โดยปกติถ้าอุณหภูมิของอากาศมีค่าประมาณ 0°C มักเกิดขึ้นในฝนชุก (shower) ร่วมกับเกล็ดหิมะหรือฝน

2.3.2.7 ไอซ์ เพลเลท (ice pellet)

เป็นก้อนน้ำแข็งโปร่งแสงหรือโปร่งใส รูปทรงกลม หรือรูปกรวย หรือไม่แน่นอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร มักกระดอนเมื่อกระทบกับพื้นแข็งและมีเสียงดังประกอบด้วยฝนที่กลายเป็นน้ำแข็ง หรือเกล็ดหิมะที่ละลายแล้วแข็งตัวใหม่ มักเกิดขึ้นใกล้ผิวโลกหรือก้อนกลมของหิมะที่มีชั้นบางๆของน้ำแข็งห่อหุ้มไว้

2.3.2.8 ไอซ์ ปริซึม (ice prism)

เป็นผลึกน้ำแข็งที่ไม่เป็นกึ่งก้าน แต่เป็นรูปเข็ม เป็นลำ เป็นแผ่นขนาดเล็กมากจนสามารถแขวนลอยในอากาศได้ ผลึกเหล่านี้อาจตกลงมาจากเมฆหรือจากท้องฟ้าที่ไม่มีเมฆก็ได้ สามารถมองเห็นได้เมื่อสะท้อนกับแสงอาทิตย์ แสงวาวแวบแบบผงเพชรจึงเรียกว่าฝุ่นเพชร (diamond dust) ปรากฏการณ์แบบนี้มักจะเกิดในแถบขั้วโลกขณะที่อุณหภูมิของอากาศต่ำลงมาก และมวลอากาศมีเสถียรภาพ

2.3.3 มวลอากาศ

มวลอากาศ (air mass) หมายถึงอากาศก้อนเดียวกันที่มีสมบัติเหมือนกับพื้นที่ที่ปกคลุมอยู่และอยู่ในระดับเดียวกัน ภายในมวลอากาศมีอุณหภูมิและความชื้นเดียวกัน มวลอากาศอาจมีขนาดใหญ่มากครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1,600 ตารางกิโลเมตร หนาหลายกิโลเมตร สิ่งที่ควบคุมสมบัติของมวลอากาศ ได้แก่ รังสีดวงอาทิตย์และลักษณะภูมิประเทศ มวลอากาศที่มีแหล่งกำเนิดเหนือทวีปจะมีสมบัติแตกต่างจากมวลอากาศเหนือมหาสมุทร มวลอากาศที่มีแหล่งกำเนิดในละติจูดกลางจะมีสมบัติแตกต่างจากมวลอากาศในละติจูดสูง บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ความกดอากาศต่ำ มวลอากาศจะลอยตัวสูงขึ้นเสมอ ทำให้มวลอากาศไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนในบริเวณนี้ ส่วนบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ความกดอากาศสูงมวลอากาศจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ จึงกล่าวได้ว่ามวลอากาศมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงแล้วจึงเคลื่อนตัวออกจากบริเวณเดิมเสมอ ในการแบ่งมวลอากาศจะแบ่งตามแหล่งกำเนิดในละติจูดนั้นเป็นชื่อของมวลอากาศแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ มวลอากาศขั้วโลก (Polar air mass:P) มวลอากาศอาร์กติกหรือแอนตาร์กติก (Arctic air mass or Antarctic air mass: A) มวลอากาศเขตร้อน (Tropical air mass:T) มวลอากาศแถบศูนย์สูตร (Equatorial air mass:E) และมีการแบ่งย่อยออกตามแหล่งกำเนิดเหนือมหาสมุทร (maritime air mass: m) เป็นมวลอากาศที่มีความชื้นสูง ส่วนมวลอากาศที่มีแหล่งกำเนิดเหนือทวีป (continental air mass: c) เป็นมวลอากาศแห้งเช่น มวลอากาศขั้วโลกเหนือมหาสมุทร: mP มวลอากาศเขตร้อนเหนือทวีป: cT เป็นต้น มวลอากาศมีการเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดเดิมเสมอ เมื่อเคลื่อนที่ไปบริเวณใหม่อุณหภูมิและความชื้นจะเปลี่ยนไปตามลักษณะของบริเวณใหม่ที่มวลอากาศปกคลุม ถ้ามวลอากาศเคลื่อนไปมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่มวลอากาศจะเคลื่อนที่ผ่าน และทำให้มวลอากาศบริเวณใหม่มีอุณหภูมิสูงตามไปด้วยเป็นมวลอากาศอุ่น(warm air mass:w) เมื่อมวลอากาศเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดไปยังบริเวณใหม่ มวลอากาศจะมีการเปลี่ยนตามลักษณะและภูมิประเทศของบริเวณใหม่ และต่อมากจะกลายเป็นมวลอากาศใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิมโดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มจากระดับต่ำๆ ก่อนแล้วมวลอากาศระดับสูงจะค่อยๆเปลี่ยนตามไป การเปลี่ยนแปลงของมวลอากาศจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ

ลักษณะและภูมิประเทศของบริเวณใหม่ และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของมวลอากาศเดิม กับอุณหภูมิของบริเวณใหม่

2.3.4 แนวปะทะ (Front)

หมายถึงบริเวณที่ติดต่อกันระหว่างมวลอากาศสองก้อน ซึ่งมีสมบัติต่างกัน เมื่อมวลอากาศเย็นและมวลอากาศอุ่นพบกันจะเกิดแนวปะทะระหว่างมวลอากาศทั้งสอง โดยปกติมวลอากาศอุ่นซึ่งเบาและมีความหนาแน่นน้อยกว่าจะอยู่เหนือมวลอากาศเย็น แนวปะทะมีความกว้างตั้งแต่ 60 กิโลเมตรขึ้นไป ส่วนใหญ่มีความกว้าง 150-400 กิโลเมตร แนวปะทะเกิดจากระบบลมทำให้มวลอากาศเย็นจากบริเวณหนึ่งเบียดตัวเข้าหามวลอากาศอุ่นจากอีกบริเวณหนึ่งเช่นเดียวกับลมทำให้แนวปะทะสลายตัวได้ แนวปะทะแบ่งเป็น 4 ประเภทคือ

2.3.4.1 แนวปะทะอากาศอุ่น (warm front)

เกิดขึ้นเมื่อมวลอากาศอุ่นเคลื่อนที่เข้าแทนที่มวลอากาศซึ่งเย็นกว่า แนวอากาศที่พบกันเรียกว่าแนวปะทะอากาศอุ่น มวลอากาศเย็นหนักและมีความหนาแน่นมากกว่าจะจมตัวอยู่เบื้องล่าง มวลอากาศอุ่นจึงยกตัวสูงขึ้นเหนืออากาศเย็นตามแนวปะทะซึ่งมีความลาดชันประมาณ 1:100 หมายความว่า การยกตัวสูงขึ้นของมวลอากาศอุ่นในแนวตั้ง 1 หน่วย ทุกๆระยะทางตามแนวนอน 100 หน่วย แนวปะทะอากาศอุ่นอาจมีความลาดชัน 1:80 ถึง 1:200 ก็ได้ อากาศมีเสถียรภาพจะเกิดเมฆแผ่น (stratiform cloud) หน้าแนวปะทะต่อเนื่องกันถึงระดับสูง ระดับสูงจะเป็นเซอร์รัสตกลงมาเป็นเซอร์รัสเตรตัส อัลโตสเตรตัส สเตรตัส และนิมโบสเตรตัสตามลำดับ ทำให้มีฝนเม็ดเล็กตกกระจายเป็นบริเวณกว้าง กินเวลานาน

2.3.4.2 แนวปะทะอากาศเย็น (cold front)

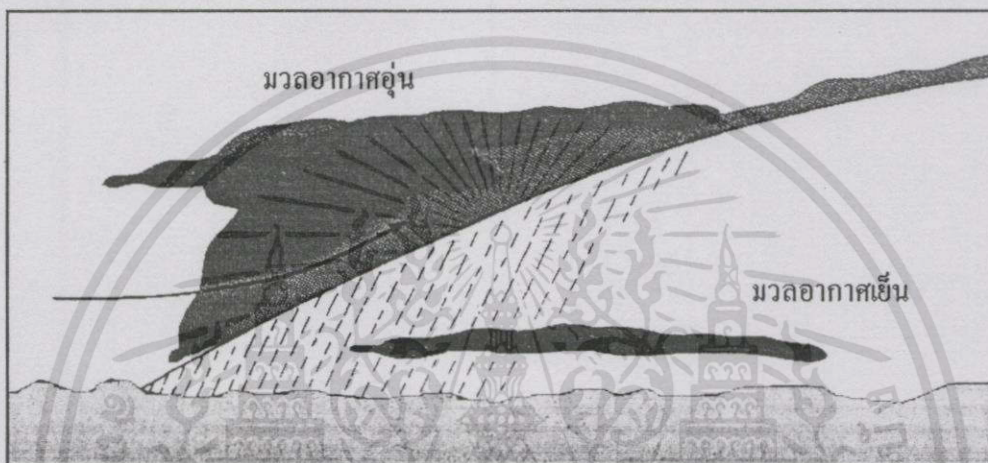
เกิดขึ้นเมื่อมวลอากาศเย็นเคลื่อนที่เข้าแทนที่มวลอากาศอุ่น มวลอากาศเย็นจะดันให้มวลอากาศอุ่นยกตัวสูงขึ้นตามแนวลาดเอียงของมวลอากาศเย็น แนวอากาศที่พบกันเรียกว่า แนวปะทะอากาศเย็นซึ่งมีความชันมากกว่าแนวปะทะอากาศอุ่นคือประมาณ 1:50 แนวปะทะอากาศเย็นอาจมีความลาดชัน 1:40 ถึง 1:80 ก็ได้ อากาศอุ่นที่ยกตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดเมฆก้อน (cumuliform cloud) ได้แก่ เมฆคิวมูลัส และคิวโมโลนิมบัส อาจทำให้แปรปรวน เกิดฝนตกหนักเป็นบริเวณแคบๆ กินเวลาสั้นๆ หรืออาจเกิดพายุฟ้าคะนองได้

2.3.4.3 แนวปะทะอากาศคงที่ (stationary front)

เกิดขึ้นเมื่อแนวปะทะอากาศไม่มีการเคลื่อนที่เป็นเวลานานหลายชั่วโมง หรือหลายวัน แล้วจึงสลายตัวไปหรือมีการเคลื่อนที่ใหม่อีกครั้งเป็นแนวที่มวลอากาศอุ่นมาพบกับมวลอากาศเย็น แต่ไม่มีการเคลื่อนที่เข้าแทนที่กัน แนวที่พบกันยังอยู่คงที่ จึงเรียกแนวปะทะอากาศคงที่

2.3.4.4 แนวปะทะอากาศรวม (occluded front)

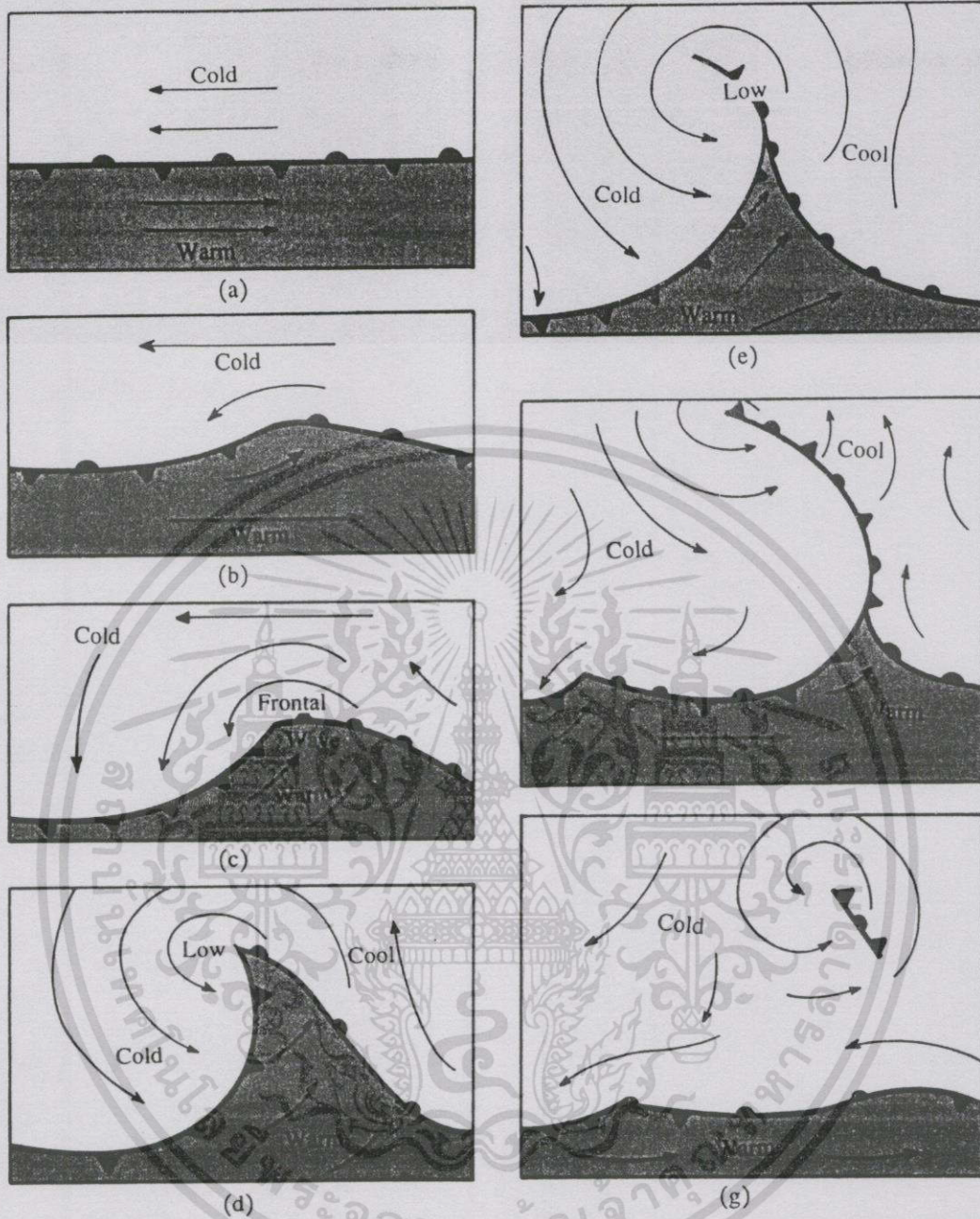
เกิดขึ้นเมื่อมีมวลอากาศมาพบกัน 3 แบบ คือมวลอากาศอุ่น มวลอากาศเย็น และมวลอากาศที่เย็นกว่าจะเกิดเป็นแนวปะทะอากาศรวมแบบเย็น และแนวปะทะอากาศรวมแบบอุ่น แนวปะทะอากาศรวมแบบเย็นเกิดขึ้นเมื่อมวลอากาศที่อยู่หลังแนวปะทะอากาศเย็น มีอุณหภูมิต่ำกว่ามวลอากาศที่อยู่ใต้แนวปะทะอากาศอุ่น ส่วนแนวปะทะอากาศรวมแบบอุ่นจะมีลักษณะต่างกันคือ มวลอากาศที่อยู่หลังแนวปะทะอากาศเย็นมีอุณหภูมิสูงกว่ามวลอากาศที่อยู่ใต้แนวปะทะอากาศอุ่น



รูปที่ 2.15 แนวปะทะอากาศเย็น



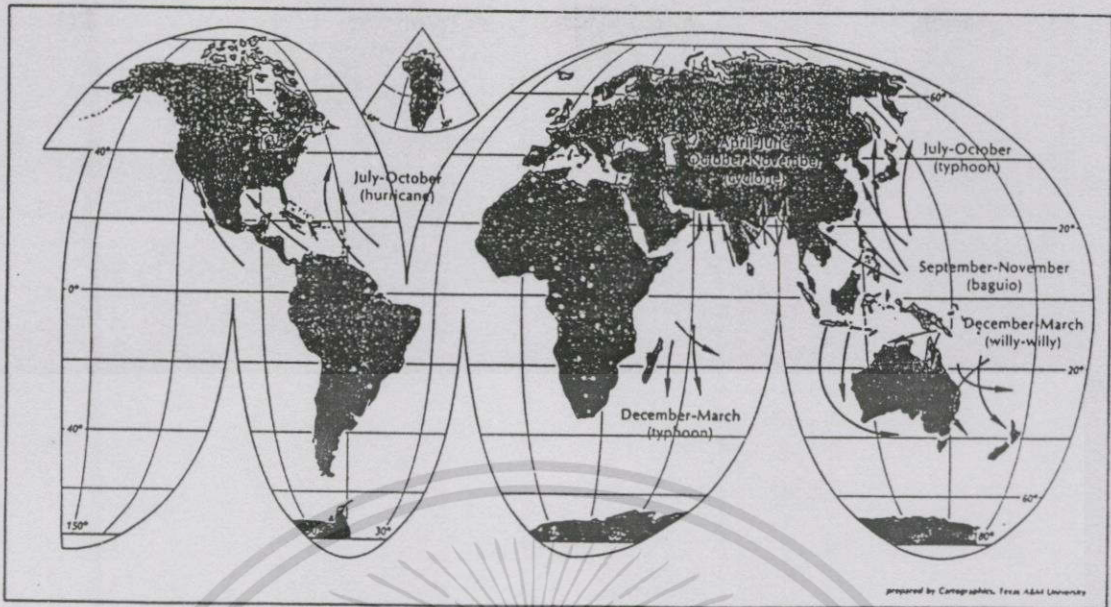
รูปที่ 2.16 แนวปะทะอากาศรวม



รูปที่ 2.17 วงจรชีวิตของคลื่นแนวปะทะอากาศ (life cycle of a frontal wave)

2.3.5 พายุหมุน

พายุหมุนมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณห่อความกดอากาศต่ำกำลังแรง ส่วนมากเกิดเหนือทะเล และมหาสมุทรใกล้เส้นศูนย์สูตรบริเวณละติจูด 23 องศาเหนือและใต้ มีอุณหภูมิผิวน้ำทะเลสูงกว่า 26°C ขึ้นไป และมีปริมาณไอน้ำสูง พายุนี้เกิดในทกมหาสมุทร ยกเว้นมหาสมุทรแอตแลนติกใต้ พายุหมุนทวนเข็มนาฬิกาในซีกโลกเหนือและตามเข็มนาฬิกาในซีกโลกใต้ องค์การอุตุนิยมวิทยาโลกได้จัดประเภทพายุหมุนตามความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางของพายุคือ



รูปที่ 2.18 ตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของพายุหมุนที่เกิดขึ้นทั่วโลก

2.3.5.1 พายุดีเปรสชัน (depression)

เป็นพายุหมุนที่มีกำลังอ่อน ที่มีความเร็วลมสูงสุดใกล้ศูนย์กลางไม่เกิน 33 นอต หรือ 63 กิโลเมตร/ชั่วโมง

2.3.5.2 พายุโซนร้อน (tropical storm)

เป็นพายุหมุนกำลังปานกลางที่มีความเร็วลมสูงสุดใกล้ศูนย์กลาง 34-63 นอต หรือ 1.18 กิโลเมตร/ชั่วโมง

2.3.5.3 พายุไต้ฝุ่น (typhoon)

เป็นพายุหมุนที่มีความรุนแรงที่สุด ที่มีความเร็วลมสูงสุดใกล้ศูนย์กลางมากกว่า 64 นอตขึ้นไป หรือ 118 กิโลเมตร/ชั่วโมงขึ้นไป

พายุหมุนที่เกิดในแต่ละบริเวณจะมีชื่อเรียกต่างกันได้แก่ พายุหมุนที่เกิดในบริเวณอ่าวเบงกอลและมหาสมุทรอินเดีย เรียกว่าไซโคลน (cyclone) ซึ่งจะเกิดในช่วงเมษายนถึงมิถุนายน หรือตุลาคมถึงพฤศจิกายน พายุหมุนที่เกิดในบริเวณมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือ ทะเลแคริบเบียน อ่าวเม็กซิโก และทะเลฝั่งตะวันตกของเม็กซิโก เรียกว่าเฮอริเคน (hurricane) ซึ่งจะเกิดในช่วงกรกฎาคมถึงตุลาคม พายุหมุนที่เกิดในบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์ เรียกว่าบาเกียว (baguio) ซึ่งเกิดในช่วงกันยายนถึงพฤศจิกายน พายุหมุนที่เกิดในบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือด้านตะวันตกเรียกว่าไต้ฝุ่น มหาสมุทรแปซิฟิกใต้และทะเลจีนใต้เรียกว่า ไต้ฝุ่นเช่นเดียวกัน ซึ่งเกิดในช่วงธันวาคมถึงมีนาคม พายุหมุนที่เกิดในบริเวณด้านเหนือและตะวันตกเฉียงเหนือของทวีปออสเตรเลีย เรียกว่า วิลลี วิลลี (willy-willy) ซึ่งเกิดในช่วงธันวาคมถึงมีนาคม

การก่อตัวของพายุหมุนส่วนมากเกิดจากคลื่นตะวันออก (easterly wave) หมายถึงบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตก ส่วนมากเกิดในละติจูดต่ำประมาณ 5-20 องศาเหนือและใต้ อยู่นอกเขตเส้นศูนย์สูตร และไม่เคยตรวจพบพายุหมุนเกิดที่เส้นศูนย์สูตรเลย ประมาณ 65 % ของพายุหมุนเกิดที่ละติจูด 10-20 องศาเหนือและใต้ ประมาณ 22 % เกิดที่ละติจูด 3-10 องศาเหนือและใต้ และประมาณ 18% เกิดที่เหนือละติจูด 20 องศาเหนือและใต้ ละติจูด 20 ใต้ บริเวณนี้เป็นบริเวณโซนร้อนจึงมักเรียกพายุหมุนโซนร้อน (tropical cyclone) หรือพายุหมุนเขตร้อน หรือไซโคลนในเขตร้อน

ลักษณะที่สำคัญของพายุหมุนบริเวณใจกลางพายุเป็นบริเวณเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-50 กิโลเมตร เรียกว่า ดาวพายุ เป็นเขตลมอ่อน อากาศค่อนข้างดี

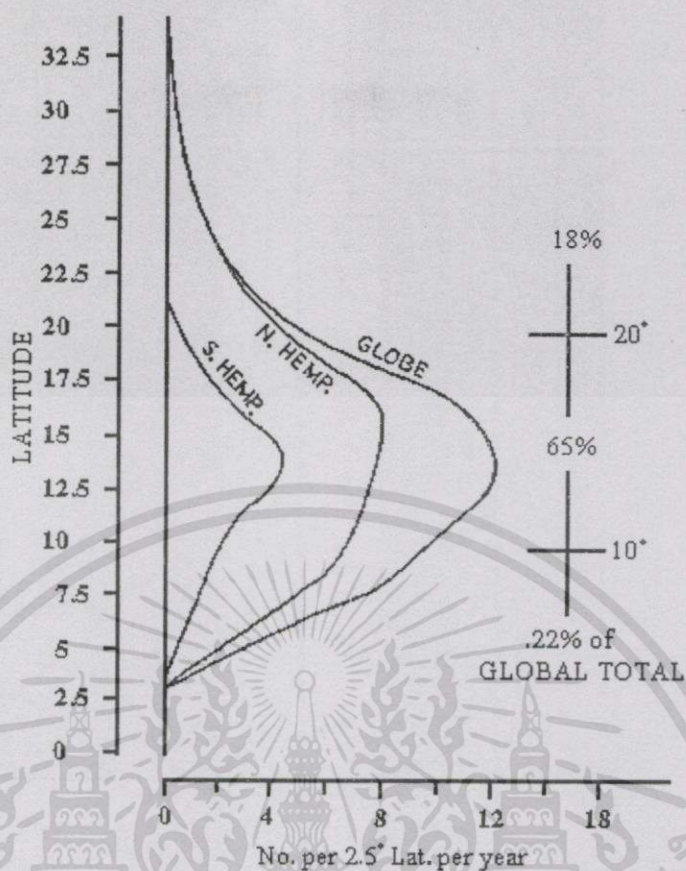
พายุหมุนที่มีความเร็วลมสูงสุดที่เรียกว่าได้ฝุ่นมีพลังงานมหาศาล ซึ่งเกิดจากพลังงานความร้อนแฝง ไอน้ำในทะเลเคลื่อนตัวเป็นน้ำก่อให้เกิดพายุฟ้าคะนอง ฝนตกหนัก ลมแรง คลื่นจัดและอุทกภัย พายุหมุนจะสลายตัวหรือลดความเร็วลมเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งทวีป-ภูเขา หรือพบกับมวลอากาศเย็น ทำให้พลังงานลดลงกลายเป็นพายุโซนร้อนหรือดีเปรสชัน

2.3.6 พายุฟ้าคะนอง

พายุฟ้าคะนอง (thunderstorm) เป็นลมกระโชกรุนแรงเริ่มก่อตัวจากเมฆคิวมูลัส (Cu) เมื่อเมฆคิวมูลัสก่อตัวสูงขึ้นเนื่องจากกระแสอากาศมีการขยายตัวขึ้นอย่างรุนแรงอากาศร้อนความชื้นสูงอากาศไร้เสถียรภาพแบบมีเงื่อนไข จึงทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นๆ และขยายตัวใหญ่ขึ้นกลายเป็นเมฆคิวมูนิมบัส (Cb) ซึ่งในที่สุดกลายเป็นเมฆที่ทำให้เกิดฟ้าแลบ ฟ้าร้อง และฟ้า การเกิดพายุฟ้าคะนองแบ่งเป็น 3 ชั้นคือ

2.3.6.1 ชั้นก่อตัว (cumulus stage)

เมฆคิวมูลัสก้อนเล็กเริ่มขยายตัวมีกระแสอากาศไหลขึ้นจากฐานเมฆ ด้วยอัตราเร็วประมาณ 26 ฟุต/นาทีก ภายในเมฆคิวมูลัสประกอบด้วยหยดน้ำขนาดเล็กมีการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นตกลงสู่เบื้องล่าง แต่กระแสอากาศทำให้หยดน้ำขนาดใหญ่แตกเป็นหยดน้ำขนาดเล็กอีกแล้วยกตัวขึ้นสู่เบื้องบน ภายในก้อนเมฆคิวมูลัสในระดับต่ำๆ จึงประกอบด้วยหยดน้ำ ส่วนระดับสูงถึงระดับจุดเยือกแข็ง (freezing level) จะประกอบด้วยเกร็ดน้ำแข็งและหิมะ ชั้นนี้กินเวลานานประมาณ 10-15 นาที



รูปที่ 2.19 อัตราส่วนร้อยละของจำนวนพายุหมุนที่ก่อตัวในละติจูดต่างๆ

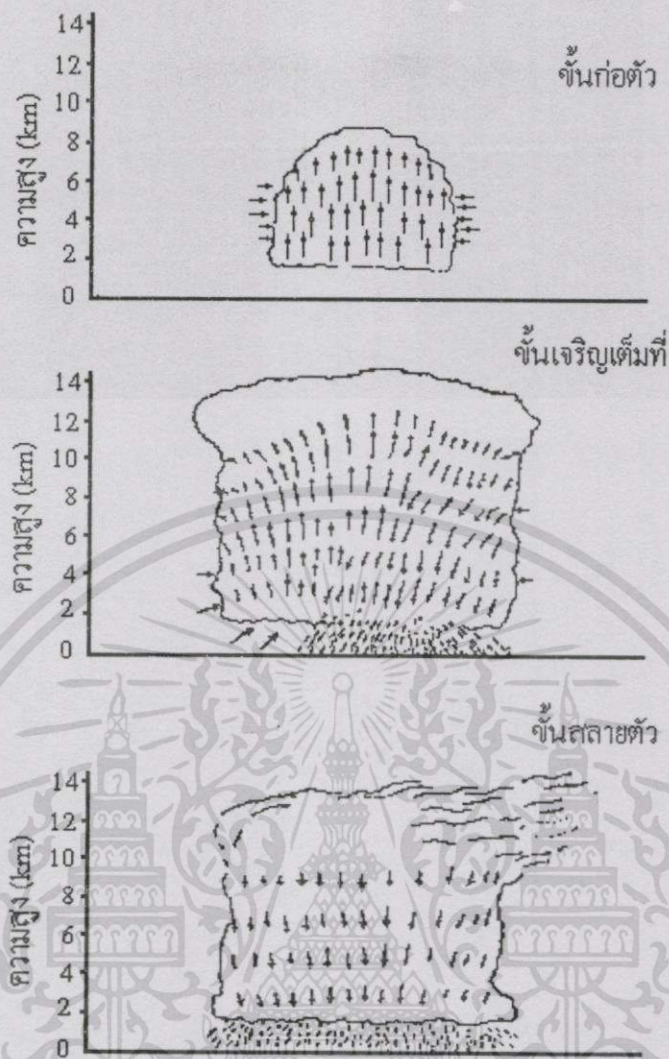
2.3.6.2 ขั้นสลายตัว (dissipating stage)

ภายในคิวมูโลนิมบัสเมฆ ไม่มีกระแสอากาศไหลขึ้น มีแต่กระแสอากาศไหลลงจากระดับต่ำถึงระดับสูง จนกระแสลมหยุดพัด ผ่นและหิมะหยุดตก พายุฟ้าคะนองค่อยๆ หดไปอูณหภูมิ ของก้อนเมฆก็ค่อยๆ ปรับเท่ากับบริเวณใกล้เคียง อูณหภูมิจะสูงขึ้น ทุกอย่างเข้าสู่สภาพปกติ กินเวลาประมาณ 30 นาที รวมเป็นเวลาของการเกิดพายุฟ้าคะนองนานประมาณ 1-2 ชั่วโมง

การเกิดพายุคะนองเกิดขึ้นได้ 3 ประเภทคือ พายุฟ้าคะนองเกิดจากมวลอากาศ พายุฟ้าคะนองเกิดจากแนวปะทะ และพายุฟ้าคะนองเกิดบริเวณภูเขา

พายุฟ้าคะนองเกิดจากมวลอากาศ เกิดขึ้นจากโลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ ทำให้พื้นดินรับความร้อนตาม อากาศเหนือพื้นดินจึงมีการยกตัวลอยสูงขึ้นเกิดเป็นเมฆคิวมูลัสและสามารถพัฒนากลายเป็นพายุฟ้าคะนองได้ ในตอนบ่ายและเย็น

พายุฟ้าคะนองเกิดจากแนวปะทะ อาจเกิดจากแนวปะทะอากาศเย็น หรือแนวปะทะอากาศอุ่นก็ได้ ถ้าเกิดจากแนวปะทะอากาศเย็นจะมีลักษณะมวลอากาศเย็นเคลื่อนที่เข้าไปได้มวลอากาศอุ่นยกตัวให้มวลอากาศอุ่นลอยสูงขึ้นและเย็นตัวลงกลายเป็นพายุฟ้าคะนองได้ ถ้าเกิดจากแนวปะทะ



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการเกิดพายุฟ้าคะนอง

อากาศอุ่นจะมีลักษณะมวลอากาศอุ่นเคลื่อนที่อยู่เหนือมวลอากาศเย็นทำให้มวลอากาศอุ่นลอยตัวสูงขึ้น เย็นตัวลงและขยายตัวออกกลายเป็นพายุฟ้าคะนองได้

พายุฟ้าคะนองเกิดบริเวณภูเขา เกิดจากการที่มวลอากาศยกตัวสูงขึ้นตามความลาดชันของภูเขา มวลอากาศจะเย็นลงและขยายตัวออก กลายเป็นพายุฟ้าคะนอง ซึ่งมีความร้ายแรงกว่า 2 แบบที่กล่าวคือ เมฆจะก่อตัวในแนวตั้งสูงมาก อากาศปั่นป่วนมาก

2.3.7 ร่องมรสุม(Monsoon trough)

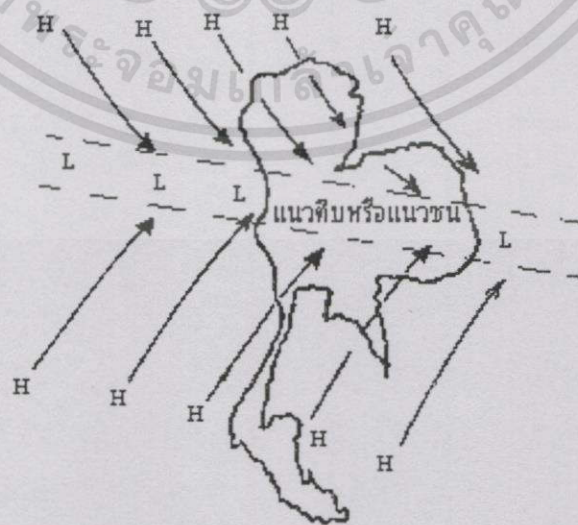
หมายถึงแนวความกดอากาศต่ำที่ทำให้เกิดฝน ซึ่งเป็นลักษณะอากาศของประเทศไทย แนวความกดอากาศต่ำนี้อยู่ในแนวตะวันตกและตะวันออก เป็นร่องที่อยู่ระหว่างความกดอากาศสูงทางเหนือและใต้ใกล้แถบศูนย์สูตร บางครั้งจึงเรียกว่า แนวปะทะแห่งเขตร้อน (Inter Tropical Convergence Zone หรือ ITCZ) จึงมีลมพัดจากบริเวณความกดอากาศสูงทางเหนือและใต้เข้าสู่ร่องมรสุม ร่องมรสุมมีการเปลี่ยนตำแหน่งตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเหนือร่องมรสุมก็จะเคลื่อนที่ตามไปทางเหนือด้วย ตรงกันข้ามเมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปทางใต้ร่องมรสุมก็จะเคลื่อนที่ตามไปทางใต้ด้วย การเคลื่อนที่ของร่องมรสุมจะไม่สูงเท่าละติจูดที่ดวงอาทิตย์อยู่ แต่ร่องมรสุมจะอยู่ใกล้แถบศูนย์สูตรตามหลังดวงอาทิตย์เสมอ การเคลื่อนที่ของร่องมรสุมทำให้บริเวณนั้นเปลี่ยนทิศการรับลมทันทีเช่น เมื่อร่องมรสุมเคลื่อนที่ไปทางเหนือ บริเวณนี้เคยรับลมเหนือจะเปลี่ยนไปเป็นรับลมใต้ทันที แต่ถ้าร่องมรสุมเคลื่อนที่ไปทางใต้ บริเวณนี้เคยรับลมใต้ก็เปลี่ยนมารับลมเหนือทันทีเช่นกัน จึงกล่าวได้ว่าร่องมรสุมเป็นสาเหตุการเปลี่ยนมรสุม

บริเวณความกดอากาศต่ำที่มีกระแสอากาศพัดเข้าหากันจากเหนือและใต้ ทำให้อากาศบริเวณนั้นถูกยกตัวลอยสูงขึ้น ขยายตัวออกและเย็นลงกลายเป็นเมฆและฝน บริเวณร่องมรสุมจึงมีเมฆมากและฝนตกชุก กระแสอากาศที่พัดเข้าหากันเรียกว่า แนวตีบ หรือแนวชนกันของกระแสลม ไม่ใช่แนวปะทะ เมื่อมีการชนกันส่วนหนึ่งจะรวมกันพัดไปทางแนวนอน อีกส่วนมีการยกตัวลอยสูงขึ้น เนื่องจากแนวชนกันนี้ไม่แน่นอนว่าจะเกิดที่ใดเวลาใด ขึ้นอยู่กับกระแสอากาศที่พัดสอบเข้าหากัน จำนวนไอน้ำและแนวชนกันนี้อยู่ยาวนานเพียงใดจะทำให้ฝนตกหนักและนานตามไปด้วย

สำหรับประเทศไทยร่องมรสุมเกิดจากการปะทะกันของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้เกิดกระแสอากาศไหลขึ้นข้างบน จึงเกิดฝนตกเป็นบริเวณกว้างหลายกิโลเมตรจากทิศตะวันตกไปตะวันออก และแนวเหนือได้กินบริเวณเป็นร้อยกิโลเมตร ถ้าแนวชนกันยิ่งแคบฝนจะตกหนักและมีฟ้าคะนองด้วย ถ้าร่องมรสุมเกิดอยู่ยาวนาน ฝนจะตกติดต่อกันอาจเกิดน้ำท่วมได้ ประเทศไทยมักจะได้รับฝนจากร่องมรสุมนี้มากและสม่ำเสมอ ร่องมรสุมเคลื่อนที่ตามซีกว่าการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ประมาณ 1 เดือน เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านภาคกลางของประเทศไทย จากใต้ไปทางเหนือในเดือนเมษายน ร่องมรสุมก็จะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณเดียวกันนี้ในเดือนพฤษภาคม และเมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านภาคกลางจากเหนือไปทางใต้ในเดือนสิงหาคม ร่องมรสุมก็จะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณนี้ในเดือนกันยายน



รูปที่ 2.21 การเกิดร่องมรสุมในประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางครั้งเพื่อสะดวกในการวิเคราะห์ตามระดับอัตราการตกของฝน อาจจำแนกประเภทของฝน ได้ดังนี้

2.3.8 ฝนแบบสเตรติฟอรัม (Stratiform rain)

ส่วนใหญ่ฝนลักษณะนี้เป็นฝนที่เกิดในบริเวณพื้นที่ละติจูดตอนกลาง จะซึ่งมีลักษณะการแผ่ ออกในแนวระดับกว้างแผ่ออกไปเป็นร้อยกิโลเมตร มีช่วงเวลากการตกเกินกว่า 1 ชั่วโมง และมีอัตราการ ตกของฝนประมาณ 25 mm/h (1 inc/hr) ฝนประเภทนี้มักเกิดในฤดูใบไม้ผลิ เนื่องจากเป็นช่วง ที่มีอุณหภูมิที่เย็นลงในระดับความสูงตั้งแต่ 4-6 กิโลเมตร สำหรับในระบบการสื่อสาร ฝน ประเภทสเตรติฟอรัมนี้ จะทำให้อัตราการตกของฝนเกิดขึ้นเป็นเวลายาวนาน ค่าของ link margin อาจจำเป็นต้องการเกินค่าการลดทอนที่สอดคล้องกับอัตราการตกของฝนนิ้วต่อชั่วโมง (25mm/hr)

2.3.9 ฝนแบบคอนเวนทิฟ (Convective Rain)

ฝนแบบคอนเวนทิฟเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของลมแนวตั้ง ยังผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายและ รวมตัวของเมฆฝนในแนวตั้ง การไหลของกลุ่มฝนนี้จะเกิดขึ้นในเซลล์ซึ่งแผ่กว้างในแนวระดับออกไปหลายกิโลเมตร เซลล์ของฝนจะขยายขึ้นในแนวตั้งมีความสูงมากกว่าระดับเฉลี่ยของชั้นน้ำแข็ง (freezing layer) เนื่องจากการสร้างผนังสูงของอากาศ (convective upwelling จากการเคลื่อนที่ของ แนวปะทะและการเคลื่อนไหวลาดไปของเซลล์ฝนไปตามแนวปะทะ จึงมักทำให้อัตราการตก ของฝนเกิดขึ้นสูงในช่วงเวลาหลายๆนาที่เท่านั้น

2.3.10 ฝนพายุไซโคลน (Cyclonic Storm)

พายุไซโคลนแถบโซนร้อนหรือพายุเฮอริเคน (Hurricanes) เป็นพายุที่มักพัดผ่านบริเวณคาบสมุทรตะวันออก (Eastern Seaboard) ในระหว่างเดือนสิงหาคม - ตุลาคม ของทุกๆปี พายุหมุนนี้ โดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์ฝนระหว่าง 50 - 200 กิโลเมตร เคลื่อนตัวด้วยความเร็ว ประมาณ 10 - 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ชั้น Melting layer ยกกระดับสูงขึ้นไปถึงประมาณ 8 กิโลเมตร และมีอัตราการตกของฝนสูง (มากกว่า 25 mm/hr)

2.4 ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉพาะของหยดฝน

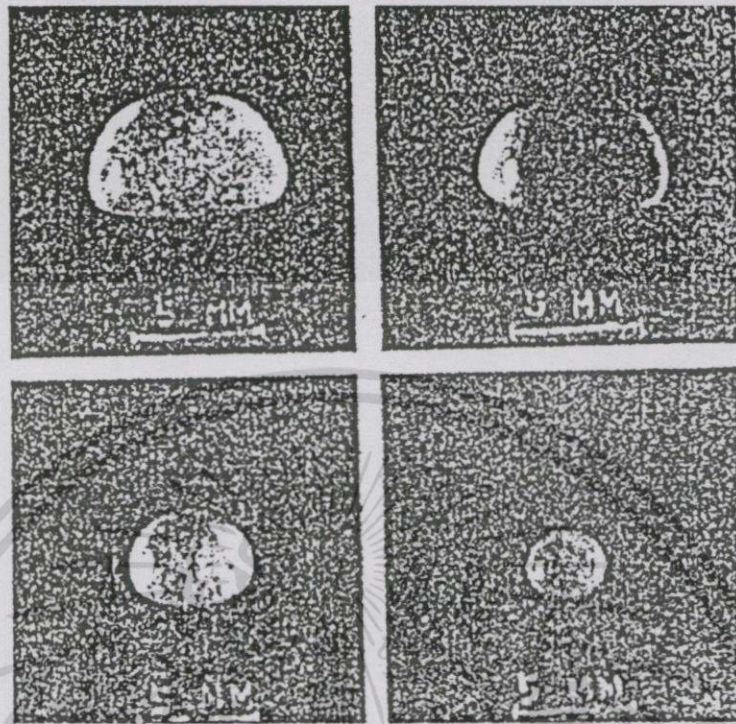
ที่อัตราการตกของฝนค่าใดๆ หยดฝนแต่ละหยดมีขนาดไม่เท่ากัน โดยที่การกระจายของขนาดและอัตราการตกจะมีความสัมพันธ์กัน ขนาดที่ต่างกันเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รูปร่างของแต่ละหยดฝนต่างกัน เมื่อพิจารณาพร้อมกับปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่นความเร็วและทิศทางลม จะส่งผลให้ความเร็วและแนวการวางตัวของหยดฝนแต่ละหยดแตกต่างกันด้วย เนื่องจากในสภาพบรรยากาศจริงปัจจัยแวดล้อมมีความผันแปรไม่แน่นอนตลอดเวลา ทำให้ลักษณะสมบัติทางกายภาพต่างๆของหยดฝนมีค่าไม่คงที่ด้วย แต่เพื่อความเข้าใจในสภาพโดยรวมจึงแยกพิจารณาได้ดังนี้

2.4.1 ขนาดและรูปร่างของหยดฝน

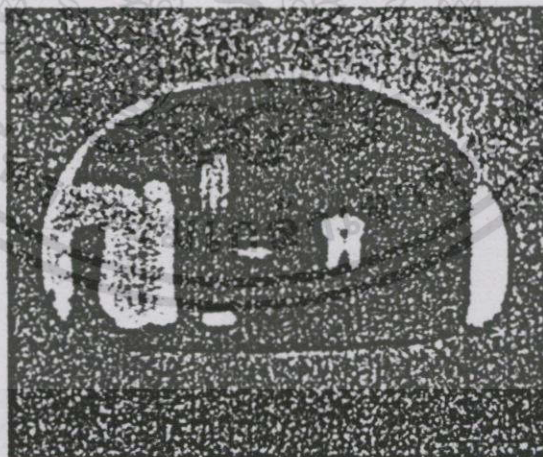
Magono (1954) ได้ศึกษารูปร่างของหยดน้ำที่ตกอย่างอิสระในอากาศนิ่ง (stagnant air) โดยการถ่ายภาพหยดน้ำขนาดต่างๆกัน ที่ถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระที่ระดับความสูง 12 เมตร ในอุโมงค์ลมแนวตั้ง (vertical wind tunnel) ซึ่งระดับความสูงนี้เพียงพอที่ความเร็วในการตกจะมีค่าเท่ากับความเร็วปลายในการตกอย่างอิสระของหยดน้ำ (Laws 1943) ผลการศึกษาพบว่าหยดน้ำขนาดต่างกันมีรูปร่างไม่เหมือนกัน รูปที่ 2.22 แสดงภาพถ่ายโดย Magono (1954) แสดงให้เห็นว่าหยดน้ำขนาดเล็กมีรูปร่างตัดด้านข้างค่อนข้างกลม และเมื่อขนาดหยดน้ำใหญ่ขึ้นรูปหน้าตัดด้านข้างจะรีมากขึ้น ประมาณรูปร่างหยดน้ำว่าเป็นรูปร่างทรงกลมแบนขั้ว (oblate spheroid) ที่ฐานหรือขั้วล่างของหยดค่อนข้างแบนราบ ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ถ่ายโดย Laws (1943) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยที่ตัวเลขแสดงขนาดที่กำกับรูปหยดน้ำแต่ละรูปเป็นรัศมีของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับหยดน้ำ (equivolume sphere radius)

การคำนวณรูปร่างที่แท้จริงของหยดฝนเป็นเรื่องที่ทำได้ลำบาก เนื่องจากต้องทราบค่าความดันภายในและภายนอกของหยดฝน Proppacher และ Piter (1971) ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเลขในการคำนวณสมการสมดุลของความดันนี้ได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความดันของผิววัตถุเกร็งและความดันภายนอกของหยดน้ำที่ตกอย่างอิสระ ผลการคำนวณรูปร่างของหยดน้ำที่มีขนาดต่างๆกันในทางทฤษฎีเป็นไปดังรูปที่ 2.24

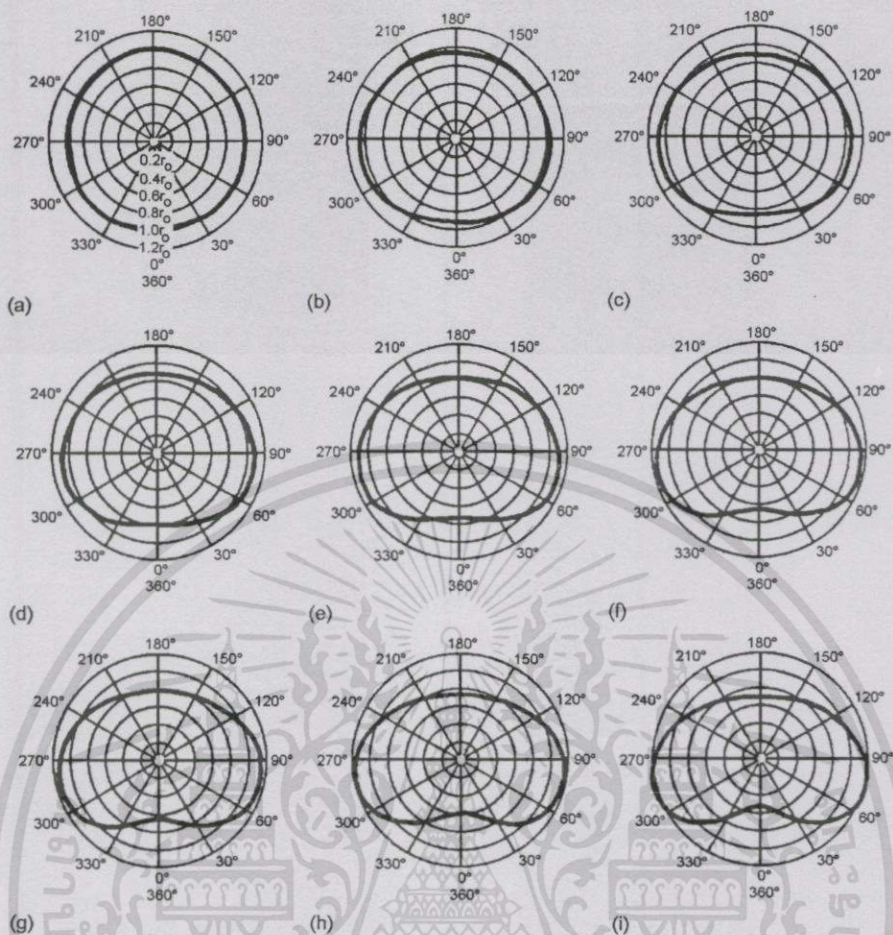
ในสภาพบรรยากาศจริงจางั้นจำนวนหยดฝนขนาดใหญ่จะมีอยู่น้อย ทำให้หยดฝนที่มีรูปร่างทรงกลมแบนขั้วและมีฐานแบนราบมากๆ จึงมีน้อยตามไปด้วย ดังนั้นจึงพอประมาณรูปร่างของหยดฝนว่าเป็นทรงกลมแบนขั้วแบบสมบูรณ์ (Absolutely oblate spheroid) ได้ โดยการประมาณเช่นนี้ ลักษณะความรีของรูปหน้าตัดด้านข้างสามารถแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความยาวครึ่งแกนรองต่อความยาวครึ่งแกนหลักของวงรี หรืออัตราส่วนระหว่าง c และ b ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยการนิยามความรีเช่นนี้ ความรีของหยดน้ำมีค่าน้อยกว่า 1 และหยดน้ำมีความรีมากถ้าอัตราส่วนระหว่าง c ต่อ b มีค่าน้อย



รูปที่ 2.22 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดต่างๆกันที่ความเร็วปลายในการตกอย่างอิสระ อ้างจาก Mogano (1954)

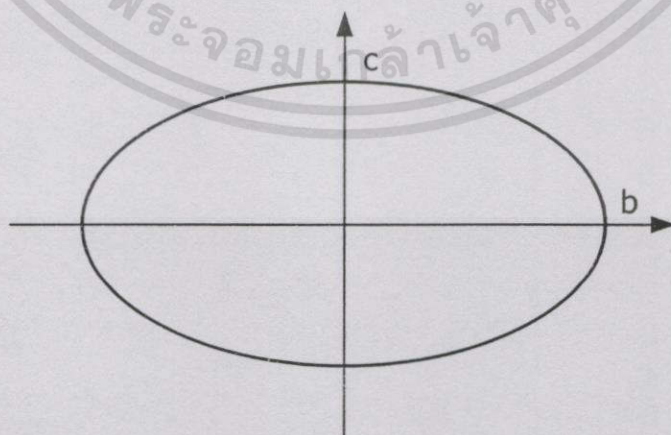


รูปที่ 2.23 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดใหญ่ที่ตกอย่างอิสระในอากาศนิ่ง อ้างจาก Laws(1941)



รูปที่ 2.24 รูปร่างหยดน้ำที่รัศมีต่างๆ จำนวน โดย Pruppacher และ pitter เกี่ยวกับหยดน้ำรัศมีทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับหยดน้ำรูปนั้น อ้างจาก Pruppacher and Pitter (1971) :

- (a) 0.11 cm; (b) 0.14 cm; (c) 0.18 cm; (d) 0.20 cm; (e) 0.25 cm; (f) 0.29 cm;
 (g) 0.30 cm; (h) 0.35 cm; (i) 0.40 cm



รูปที่ 2.25 รูปหน้าตัดด้านข้างของหยดน้ำทรงกลมแบนขี้

2.4.2 ความเร็วปลายในการตกของหยดฝน

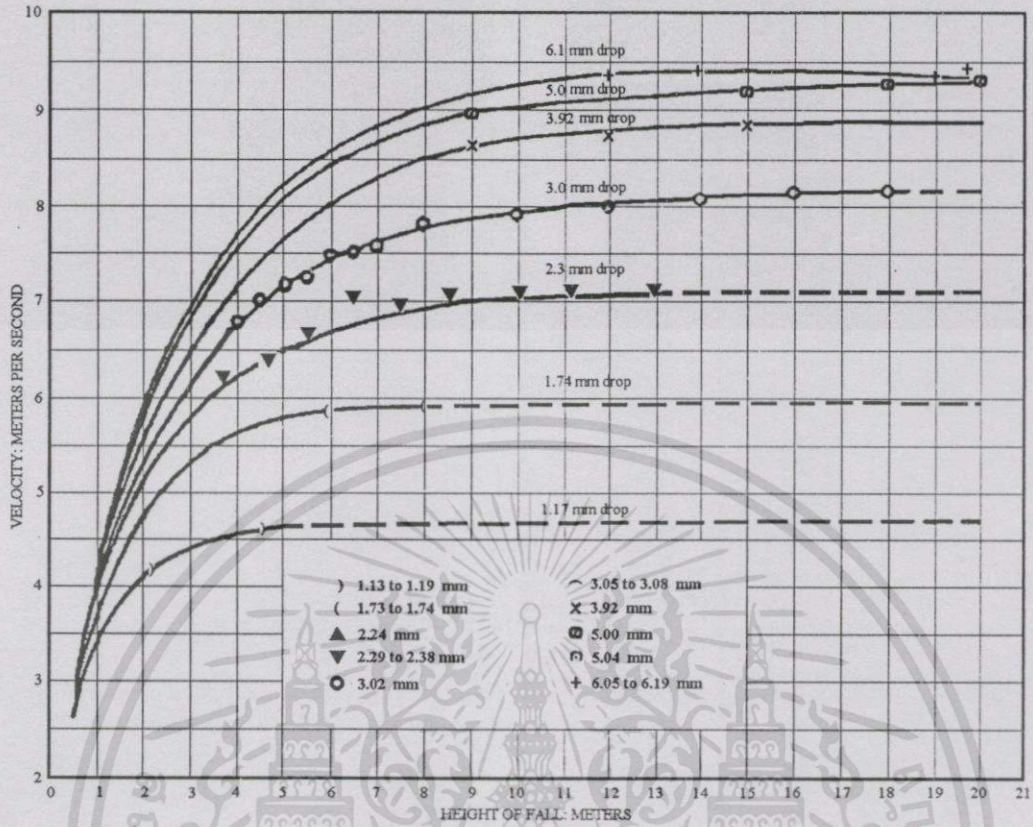
โดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่า ลมมีลักษณะเป็นชั้นที่ขนานกับแนวระดับ ดังนั้นองค์ประกอบของแรงในแนวตั้งที่กระทำต่อหยดฝนแต่ละหยดมีเพียงแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงต้านการเคลื่อนที่จากอากาศเท่านั้น เมื่อหยดฝนตกลงมาได้ในระดับหนึ่งแรงต้านจากอากาศจะเท่ากับแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก หยดฝนจะมีความเร็วในแนวตั้งคงที่ โดยเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วปลายในการตก หยดฝนที่มีขนาดต่างกัน นอกจากจะมีรูปร่างที่ต่างกันแล้วความเร็วปลายในการตกยังแตกต่างกันด้วย การศึกษาเกี่ยวกับความเร็วปลายในการตกของหยดฝนโดยการวัดความเร็วในการตกอย่างอิสระของหยดน้ำในอุโมงค์ลมแนวตั้ง (Laws, 1943) แสดงให้เห็นว่า เมื่อปล่อยหยดน้ำออกจากอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดหยด หรือกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นของหยดน้ำเป็นศูนย์ หยดน้ำขนาดใหญ่จะใช้ระยะทางในการเร่งความเร็วให้ถึงความเร็วปลายในการตกมากกว่าหยดน้ำขนาดเล็ก และหยดน้ำขนาดใหญ่จะมีความเร็วปลายในการตกมากกว่าหยดน้ำขนาดเล็กด้วย แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตกจะค่อยๆ ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งเป็นผลการทดลองโดย Laws (1943) ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับความสูงที่เพียงพอที่ทำให้หยดน้ำทุกขนาด มีความเร็วเท่ากับความเร็วปลายในการตกอยู่ที่ประมาณ 12 เมตร (Magono 1954) ความสูงของเมฆฝนจึงสูงมากเพียงพอที่จะทำให้ระยะทางส่วนใหญ่ที่หยดฝนเดินทางอยู่ในอากาศ หยดฝนมีความเร็วเท่ากับความเร็วปลายในการตก

2.4.3 แนวการวางตัวของหยดฝน

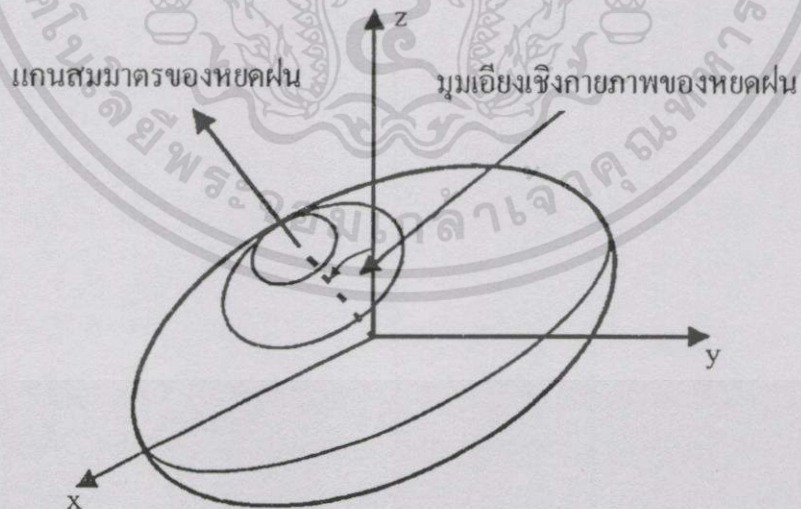
ขนาด รูปร่าง และความเร็วปลายในการตกของหยดฝนเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณน้ำฝนและอัตราการตกของฝน ซึ่งเป็นปัจจัยในการกำหนดค่าอัตราการสาดตอนของสัญญาณ ขณะที่อัตราการการเลื่อนเฟสถูกกำหนดจากอีกปัจจัยหนึ่งคือ แนวการวางตัวของหยดฝน โดยการประมาณว่าหยดฝนทุกหยดมีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนขั้วและให้แกนรองของวงรีเมื่อพิจารณาหยดฝนในแนวหน้าตัดด้านข้างที่แบ่งครึ่งเป็นแกนหยดฝน แนวการวางตัวของหยดฝนถูกกำหนดโดยมุมระหว่างแกนแนวตั้งท้องถิ่น (Local vertical) และแกนของหยดฝน โดยจะเรียกมุมนี้ว่า มุมเอียงเชิงกายภาพ (Physical canting angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.27

โดยอาศัยสมมุติฐานเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพของฝน (Brussard 1976) พบว่าแนวการวางตัวของหยดฝนตามรูปที่ 2.28 จะเป็นแนวเดียวกันกับทิศทางการไหลของอากาศโดยรอบ ดังนั้นในการหาแนวการวางตัวหรือมุมเอียงเชิงกายภาพของหยดฝนแต่ละหยด สามารถหาได้จากการหาทิศทาง การไหลสัมพัทธ์ของอากาศรอบๆ หยดฝน

PAPER, HYDROLOGY--1941

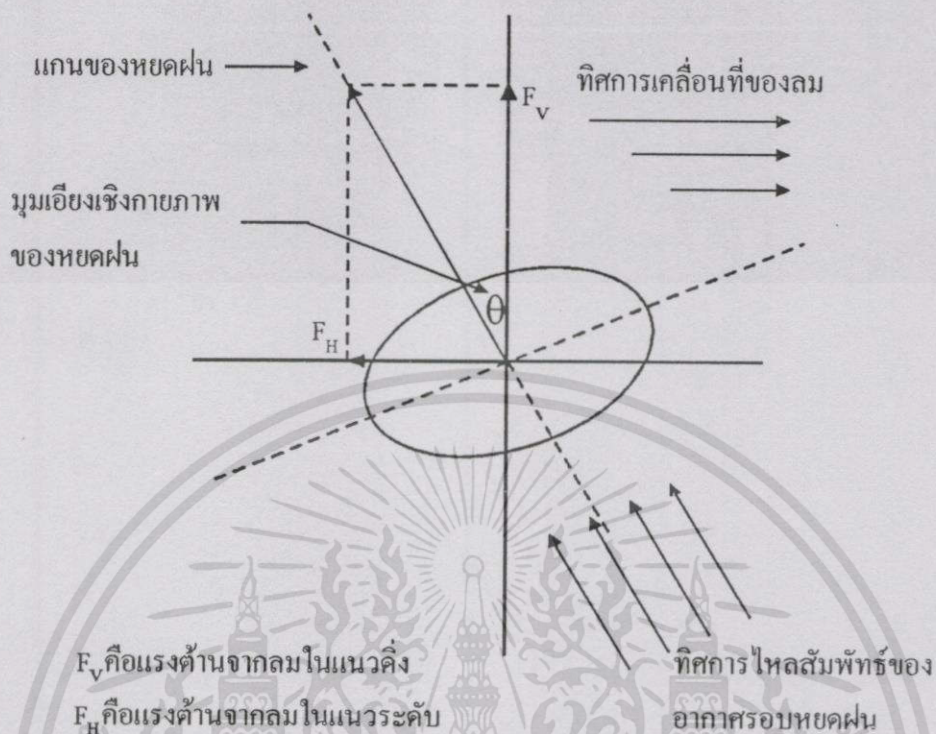


รูปที่ 2.26 ความเร็วในการตกของหยดน้ำขนาดต่างๆ กันที่ความสูง ตั้งแต่ 0.5 ถึง 20 เมตร
Laws (1943).



รูปที่ 2.27 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงมุมเอียงเชิงกายภาพและแกนสมมาตรของหยดฝน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของอนุภาคฝน 1 หยด

จากรูปที่ 2.28 กรณีที่ความเร็วของลมในแต่ละชั้นเท่ากันและทำให้หยดฝนมีความเร็วในแนวระดับเท่ากับความเร็วลมด้วย จะพบว่าทิศทางการไหลสัมพัทธ์ของอากาศรอบๆ หยดฝนจะมีเฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น ในกรณีนี้แนวการวางตัวของหยดฝนจะขนานกับแนวตั้ง หรือมุมเอียงเชิงกายภาพจะมีค่าเป็นศูนย์ แม้ว่าแนวการเคลื่อนที่ของหยดฝนจะเป็นวิถีโค้งก็ตาม มุมเอียงเชิงกายภาพของหยดฝนจะไม่เท่าศูนย์ เมื่อความเร็วลมในแต่ละชั้นมีค่าไม่เท่ากัน หรือเกิดความลาดของลมในแนวตั้ง (Vertical wind gradient) ซึ่งมีผลทำให้ทิศทางการไหลสัมพัทธ์ของอากาศรอบๆ หยดฝนเบนออกจากแนวตั้ง โดยทั่วไปแนวการวางตัวของหยดฝนจะเบนไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลม เนื่องจากความเร็วลมแนวระดับในบรรยากาศใกล้พื้นโลกมีค่าน้อยกว่าในระดับที่สูง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างลมกับผิวโลก (Brussaard 1976) ทำให้ความเร็วของหยดฝนในแนวระดับค่อยๆ ลดลง จึงเป็นสาเหตุให้แนวการวางตัวของหยดฝนเบนไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลมดังแสดงตามรูปที่ 2.28

2.5 การกระจายขนาดของหยดฝนที่อัตราการตกใด ๆ

หยดฝนที่อัตราการตกค่าใด ๆ จะมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งขนาดที่แตกต่างกันนี้ทำให้รูปร่างของหยดฝนมีลักษณะแตกต่างกันตามที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ผ่านมา และปริมาณของหยดฝนแต่ละขนาดที่กระจายอยู่ในการตกของฝนที่อัตราการตกค่าต่างๆต่อพื้นที่จะไม่เท่ากัน การศึกษาการเดินทางของคลื่นผ่านกลุ่มฝนนั้นมักจะใช้การกระจายของหยดฝนรูปแบบของ Laws และ Parsons (1943) และรูปแบบของ Marshall และ Palmer (1948)

ข้อมูลการกระจายขนาดของหยดฝนแบบ Laws และ Parsons แสดงอยู่ในรูปร้อยละของปริมาตรของหยดฝนที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนดต่อปริมาตรฝนทั้งหมด โดยแบ่งช่วงขนาดหยดฝนเป็น 28 ช่วง จากขนาด 0 ถึง 7 มิลลิเมตร ช่วงละ 0.25 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 2.1 ขนาดของหยดฝนที่ได้จาก Laws และ Parsons นี้ได้จากการทดลองวัดขนาดของเม็ดแป้ง (Pellet) ที่จับตัวแข็งเนื่องจากน้ำจากหยดฝนที่ตกลงมาบนถาดผงแป้ง แล้วอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองคำนวณหาขนาดของหยดฝนออกมา

Marshall และ Palmer ได้เสนอความสัมพันธ์ในรูป Exponential เพื่อใช้แสดงการกระจายขนาดของหยดฝนที่อัตราการตกค่าใด ๆ โดยกำหนดการกระจายขนาดในรูปของหยดฝนที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหยดฝนกับอัตราการตกแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$n(a)da = N_0 e^{-\Lambda a} da \quad \text{m}^3 \quad (2.32)$$

โดยที่

$$N_0 = 16 \times 10^3 \quad \text{m}^{-3} \text{mm}^{-1} \quad (2.33)$$

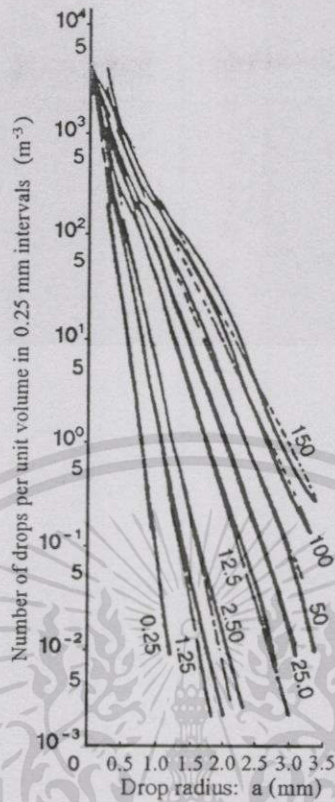
และ

$$\Lambda = 8.2R^{-0.21} \quad \text{mm}^{-1} \quad (2.34)$$

เมื่อ $n(a)da$ คือ จำนวนหยดฝนที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร R หมายถึง อัตราการตกของฝนในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง (mm/hr) และ a หมายถึงรัศมีกลางของหยดฝนในหน่วยมิลลิเมตรที่ประมาณว่าหยดฝนมีรูปร่างเป็นทรงกลม หรือหมายถึงรัศมีกลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับหยดฝนที่กำลังพิจารณา สำหรับ da ในสมการ (2.32) จะเป็นความกว้างของช่วงขนาดหยดฝนที่กำหนด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เมื่อพิจารณาหยดฝนที่มีรัศมี a ในช่วง da จะหมายถึงหยดฝนที่มีรัศมีตั้งแต่ $a - \frac{da}{2}$ จนถึง $a + \frac{da}{2}$

จำนวนหยดฝนขนาดต่างๆต่อหน่วยปริมาตรที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการตกของฝนแสดงในรูปที่

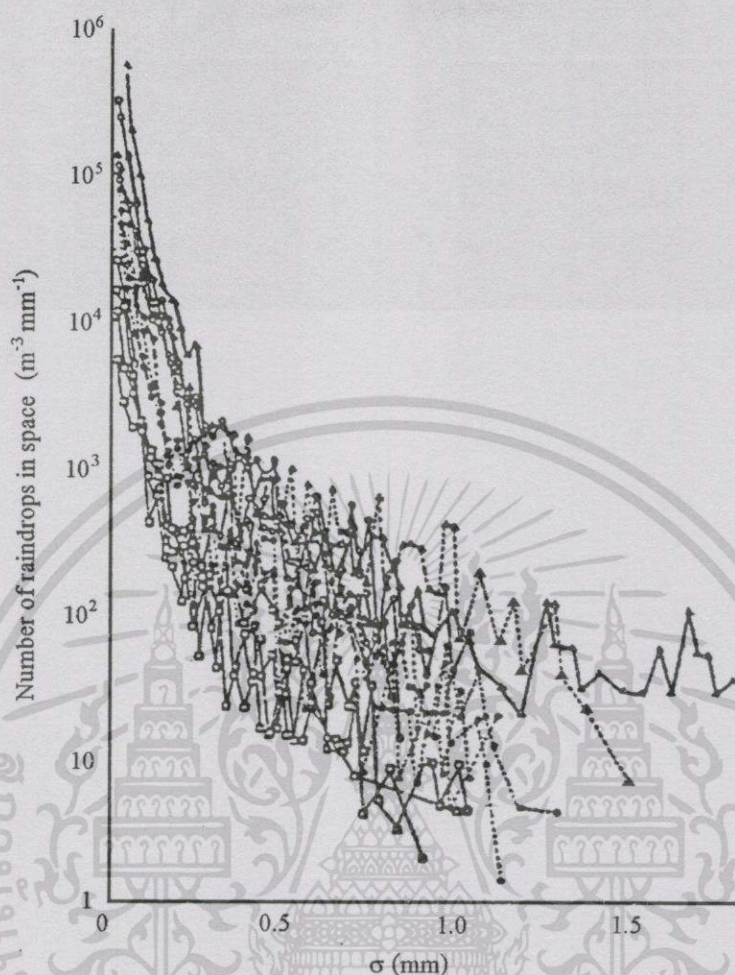
2.29



รูปที่ 2.29 การกระจายของหยดฝนในอากาศที่อัตราการตกของฝนจาก 0.25 ถึง 150 mm/hr
 --- วัด โดย Laws and Parsons (1943), -.-.- วัด โดย Marshall and Palmer (1948)

การกระจายของหยดฝนนอกจะขึ้นอยู่กับอัตราการตกของฝนแล้วยังขึ้นกับประเภทของฝนด้วย Joss *et. al.* (1968) ได้แสดงให้เห็นถึงการกระจายขนาดของหยดฝน 3 ลักษณะแบ่งตามประเภทของฝนคือ ฝนตกปรอยๆ (drizzle) ฝนตกกระจายเป็นพื้นที่กว้าง (Widespread) และฝนพายุฟ้าคะนอง (Thunderstorm) โดยที่ Joss *et. al.* (1968) ได้นำเสนอการกระจายของขนาดหยดฝนในรูป Exponential เช่นเดียวกับ Marshall และ Palmer แต่กำหนดพารามิเตอร์ให้ต่างกันออกไปสำหรับแต่ละประเภทของฝน ค่าพารามิเตอร์สำหรับฝนแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2.

สำหรับหยดฝนที่มีขนาดเล็ก (<0.1 mm) นั้นยากสำหรับการวัด ดังนั้นการกระจายแต่ละแบบที่กล่าวมา จึงไม่ครอบคลุมถึงขนาดของหยดฝนระดับนี้ เนื่องจากหยดฝนที่มีขนาดเล็กนั้นจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเดินทางของคลื่นที่ความถี่สูงๆ (>10 GHz) Ugai *et. al.* (1977) ได้ทำการทดลองวัดการกระจายของหยดฝนขนาดเล็ก โดยการวัดขนาดของหยดน้ำฝนที่ตกลงในอ่างน้ำมัน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งจำนวนหยดฝนขนาดเล็กที่วัดได้มีจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำไปพิจารณาผลกระทบในแง่ของการลดทอนที่ความถี่สูงๆได้



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการกระจายของขนาดหยดฝน ที่อัตราการตกของฝน $R = 46.4$ mm/hr (▲), 32.2 mm/hr (Δ), 5.6-7.1 mm/hr (○), 3.6 mm/hr (●), และ 0.3-1.1 mm/hr (□). (Ugai *et al.* 1977)

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของการกระจายขนาดในรูป Exponential ของหยดฝนสำหรับฝน แต่ละประเภทที่เสนอโดย Joss *et al.* (1968)

ประเภทของฝน	M_0 ($m^3 mm^{-1}$)	Λ (mm^{-1})
ฝนตกปรอยๆ (drizzle)	6×10^4	$11.4R^{-0.21}$
ฝนตกกระจายเป็นพื้นที่กว้าง (Widespread)	1.4×10^4	$8.2R^{-0.21}$
ฝนพายุฟ้าคะนอง (Thunderstorm)	2.8×10^4	$6R^{-0.21}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ร้อยละของปริมาณของอนุภาคฝนที่มีขนาดในช่วงที่กำหนดต่อปริมาณทั้งหมดที่
อัตราการตกค่าต่างๆ

ช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง กลางของหยดฝน (mm)	อัตราการตกของฝน (mm/hr)							
	0.254	1.27	2.54	12.7	25.4	50.8	101.6	152.4
	ปริมาณของหยดฝนต่อปริมาณทั้งหมด							
0.00-0.25	1.0	0.5	0.3	0.1	0	0	0	0
0.25-0.50	6.6	2.5	1.7	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1
0.50-0.75	20.4	7.9	5.3	1.8	1.3	1.0	0.9	0.8
0.75-1.00	27	16.0	10.7	3.9	2.5	2.0	1.7	1.0
1.00-1.25	23.1	21.1	17.1	7.6	5.1	3.4	2.9	2.5
1.25-1.50	13.7	18.9	18.3	11.0	7.5	5.4	3.9	3.4
1.50-1.75	5.5	12.4	14.5	13.5	10.9	7.1	4.9	4.2
1.75-2.00	2.0	8.1	11.6	14.1	11.8	9.2	6.2	5.1
2.00-2.25	1.0	5.4	7.4	11.3	12.1	10.7	7.7	6.6
2.25-2.50	0.5	3.2	4.7	9.6	11.2	10.6	8.4	6.9
2.50-2.75	0.2	1.7	3.2	7.7	8.7	10.3	8.7	7.0
2.75-3.00	0	0.9	2.0	5.9	6.9	8.4	9.4	8.2
3.00-3.25	0	0.6	1.3	4.2	5.9	7.2	9.0	9.5
3.25-3.50	0	0.4	0.7	2.6	5.0	6.2	8.3	8.8
3.50-3.75	0	0.2	0.4	1.7	3.2	4.7	6.7	7.3
3.75-4.00	0	0.2	0.4	1.3	2.1	3.8	4.9	6.7
4.00-4.25	0	0	0.2	1.0	1.4	2.9	4.1	5.2
4.25-4.50	0	0	0.2	0.8	1.2	1.9	3.4	4.4
4.50-4.75	0	0	0	0.4	0.9	1.4	2.4	3.3
4.75-5.00	0	0	0	0.4	0.7	1.0	1.7	2.0
5.00-5.25	0	0	0	0.2	0.4	0.8	1.3	1.6
5.25-5.50	0	0	0	0.2	0.3	0.6	1.0	1.3
5.50-5.75	0	0	0	0	0.2	0.5	0.7	0.9
5.75-6.00	0	0	0	0	0.2	0.3	0.5	0.7
6.00-6.25	0	0	0	0	0.1	0.2	0.5	0.5
6.25-6.50	0	0	0	0	0	0.2	0.5	0.5
6.50-6.75	0	0	0	0	0	0	0.2	0.5
6.75-7.00	0	0	0	0	0	0	0	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันเนื่องจากฝน

3.1 ทฤษฎีของการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันเนื่องจากฝน

การพิจารณาการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันเนื่องจากฝนสามารถพิจารณาได้เช่นกันกับการเกิดการลดทอน แต่จำเป็นต้องพิจารณาในรายละเอียดมากกว่าเนื่องจากหยดฝนถูกสมมุติให้เป็นทรงกลมแบนขั้ว (Oblate spheroid) ในรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้นที่เดินทางเข้าไปยังหยดฝนที่เป็นทรงกลมแบนขั้วซึ่งถูกวางตัวให้แกนสมมาตรเอียงทำมุม α กับทิศทางการเดินทางของคลื่นตกกระทบ (plane of incidence)

E_x และ E_y เป็นเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของสองโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งวางอยู่ตามแนวระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นและแต่ละโพลาไรซ์จะถูกนำมาพิจารณาเป็นสององค์ประกอบ คือ องค์ประกอบในระนาบของคลื่นตกกระทบ และองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ ซึ่งแนวที่ขนานกับสององค์ประกอบนี้ เราจะกำหนดให้เป็นแกนสมมาตรสองแกน คือ แกน 1 และ แกน 2 ดังแสดงในรูป ภาพฉายหน้าตัดของหยดฝนในระนาบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงรี โดยมีแกน 1 และ 2 เป็น แกนหลักและแกนรองของหยดฝนตามลำดับ ในรูปที่ 3.2 แสดงรูปทรงรีของหยดฝน และการแตกองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าไปเป็นแกนหลัก (1) และแกนรอง (2) ของหยดฝน

ผลรวมของขนาดของสนามไฟฟ้า ในทิศทางตามแกน 1 และ 2 (E_1 และ E_2) สามารถกำหนดได้เป็น

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

เมื่อ θ เป็นมุมเอียงของหยดฝน ซึ่งก็คือมุมระหว่าง แกน x และแกนหลัก 1 นั่นเอง คราวนี้มาลองพิจารณาช่วงบริเวณที่อุดมไปด้วยหยดฝนจำนวนมากและมีการกระจายวางตัวในแนวเดียวกันตามทฤษฎีของการกระเจิง (scattering theory) ผลกระทบจากตัวกระเจิงบนเส้นทางการเดินทางของคลื่น จะถูกนำไปคูณกับเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในรูปสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคือ

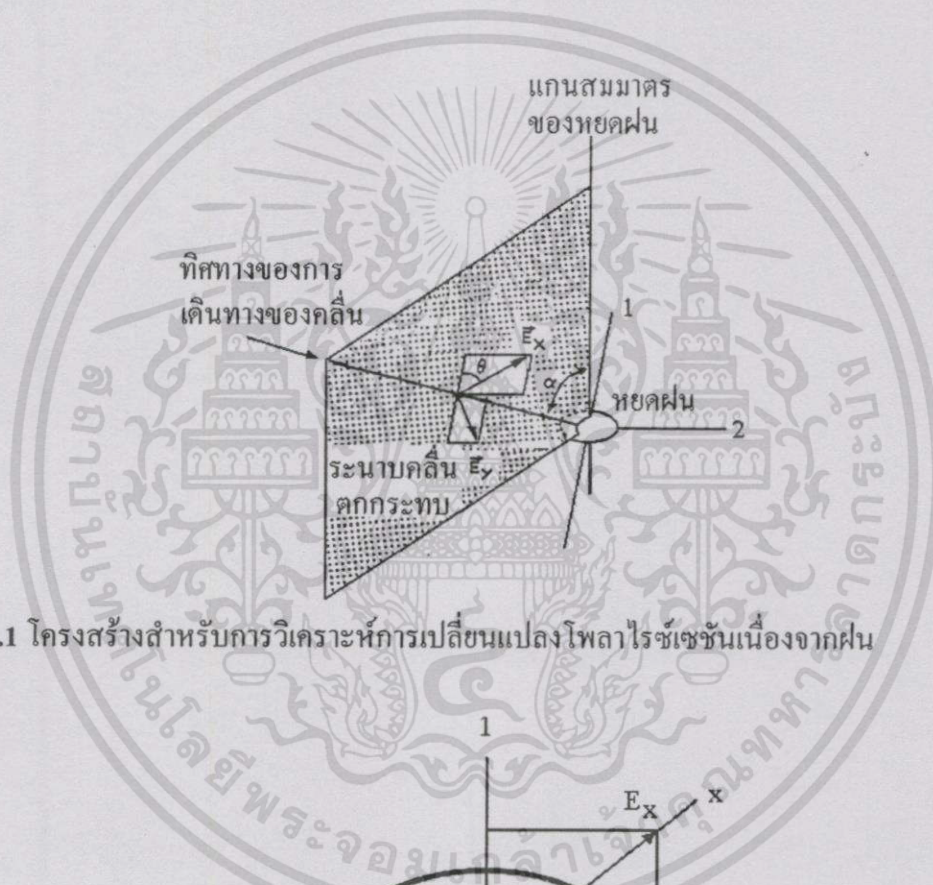
$$T = e^{-(a-j\phi)L} \quad (3-2)$$

โดยที่ L เป็นระยะทางที่คลื่นเดินทางผ่านบริเวณที่เกิดกระกระเจิง เทอมของตัวเลขยกกำลัง เป็นเทอมที่ทำให้เกิดการลดทอนของคลื่น ส่วน ϕ จะเป็นตัวที่ทำให้เฟสของคลื่นเกิดการล่าช้าออกไป การล่าช้าของเฟสนี้ก็คือ การหน่วงของเฟสในสนามในบรรยากาศทั่วไป โดยการแทนค่า a และ ϕ ซึ่งเป็นค่าการลดทอนในหน่วยเนเปอร์ต่อหน่วยความยาว และ เรเดียนต่อหน่วยความยาว เป็นค่าพารามิเตอร์ A และ Φ ที่ใช้งานกันทั่วไปโดยที่

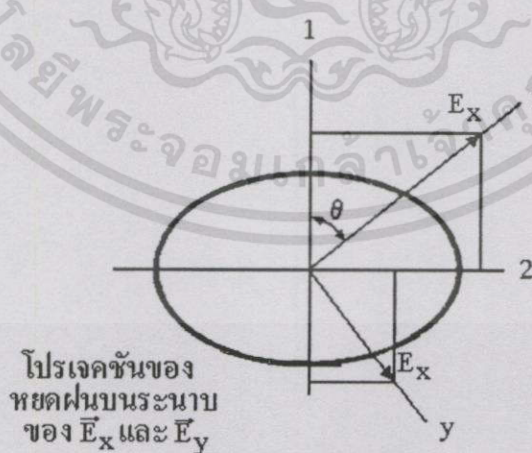
A : ค่าความลดทอนจำเพาะของกำลังความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าของคลื่น

$$\text{ในหน่วย dB / km} = 20 (\log e)a = 8.686a$$

Φ : ค่าความล่าช้าเฟสจำเพาะของคลื่นในหน่วยองศาต่อกิโลเมตร(180/m) ϕ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เชิงชั้นเนื่องจากฝน



รูปที่ 3.2 รายละเอียดของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในองค์ประกอบของแกน 1 และ 2

ในบริเวณที่อุดมไปด้วยหยดฝนรูปทรงกลมแบนขั้ว จะต้องกำหนดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็น 2 รูปแบบ คือ T_1 ซึ่งใช้สำหรับในองค์ประกอบแกนหลัก (1) และ T_2 ใช้กับสนามในองค์ประกอบรอง (2)

ถ้ากำหนดให้ สับสคริป i แทนความหมายของคลื่นตกกระทบบริเวณที่มีการกระเจิง และ s แทนความหมายของคลื่นที่ออกจากบริเวณกระเจิง เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} E_{1s} \\ E_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1i} \\ E_{2i} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} E_{1i} \\ E_{2i} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

การหมุนของพิกัด R ที่ได้จากสมการ (3.1) สามารถเขียนได้ในรูปสมการ

$$\begin{bmatrix} E_{1s} \\ E_{2s} \end{bmatrix} = R^{-1} T R \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix} = T' \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

เวกเตอร์สนามในบริเวณกระเจิงในทิศทางของแกน x และ แกน y เขียนได้เป็น (3.5)

ในรูป 3.3 แสดงให้เห็นถึงการแปลงของสามองค์ประกอบให้อยู่ในรูปของ T' ซึ่ง เมทริกซ์รวมของการแปลง T' สามารถหาได้จาก

$$T' = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} t_{xx} &= T_1 \cos^2 \theta + T_2 \sin^2 \theta \\ t_{yy} &= T_1 \sin^2 \theta + T_2 \cos^2 \theta \\ t_{xy} &= t_{yx} = \frac{1}{2} (T_2 - T_1) \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (3.6)$$

การหาค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้เสนอโดย Chu (1974) ซึ่งแสดงในเทอมของ A และ ϕ ค่าต่าง ๆ

ถ้าเรากำหนดให้คลื่นที่มีโพลาไรซ์เป็นเชิงเส้นในทิศทางแกน x เป็นคลื่นโพลาไรซ์ร่วม (Copolarized wave) เราจึงสามารถคำนวณค่า XPD ได้จาก

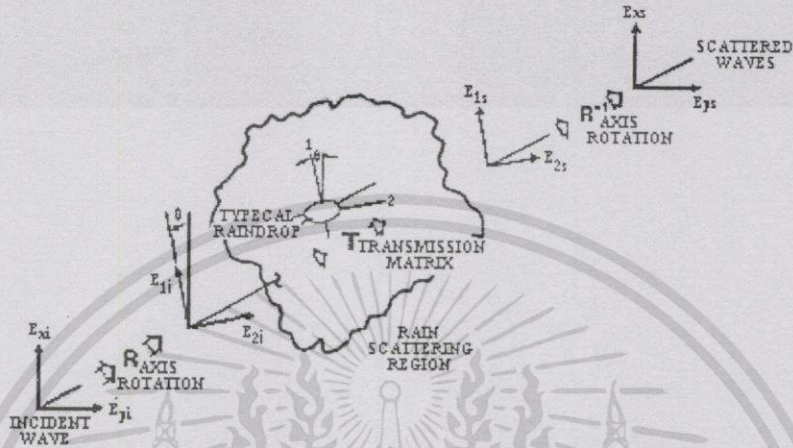
$$\begin{aligned} XPD &= 10 \log \frac{|E_{xs}|^2}{|E_{ys}|^2} \quad \text{เมื่อ } E_{y1} = 0 \\ &= 10 \log \frac{|t_{xx}|^2}{|t_{yx}|^2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$= 10 \log \frac{1 + y \tan^2 \theta}{(y - 1) \tan \theta}$$

$$y = \frac{T_2}{T_1} = e^{[-(a_2 - a_1)L + j(\phi_2 - \phi_1)L]}$$



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบมวลรวมของการแปลงเมทริกซ์ T' ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนโพลาไรซ์เนื่องจากฝน

และถ้ากำหนดให้ ทิศทางของ y เป็นโพราไรซ์ร่วม จะได้

$$XPD_y = 10 \log \frac{|E_{ys}|^2}{|E_{xs}|^2} \text{ เมื่อ } E_{xi} = 0$$

$$= 10 \log \frac{|t_{yy}|^2}{|t_{xy}|^2}$$

$$= 10 \log \frac{y + \tan^2 \theta}{(y - 1) \tan \theta} \tag{3.8}$$

ส่วนในกรณีของโพราไรซ์ แบบวงกลม Chu (1974) ได้ให้สมการไว้ดังนี้

$$XPD = 10 \log \left| \frac{t_{xx}}{t_{yx}} \right|_{\theta=45^\circ}^2$$

$$= 10 \log \frac{y + 1}{y - 1} \tag{3.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

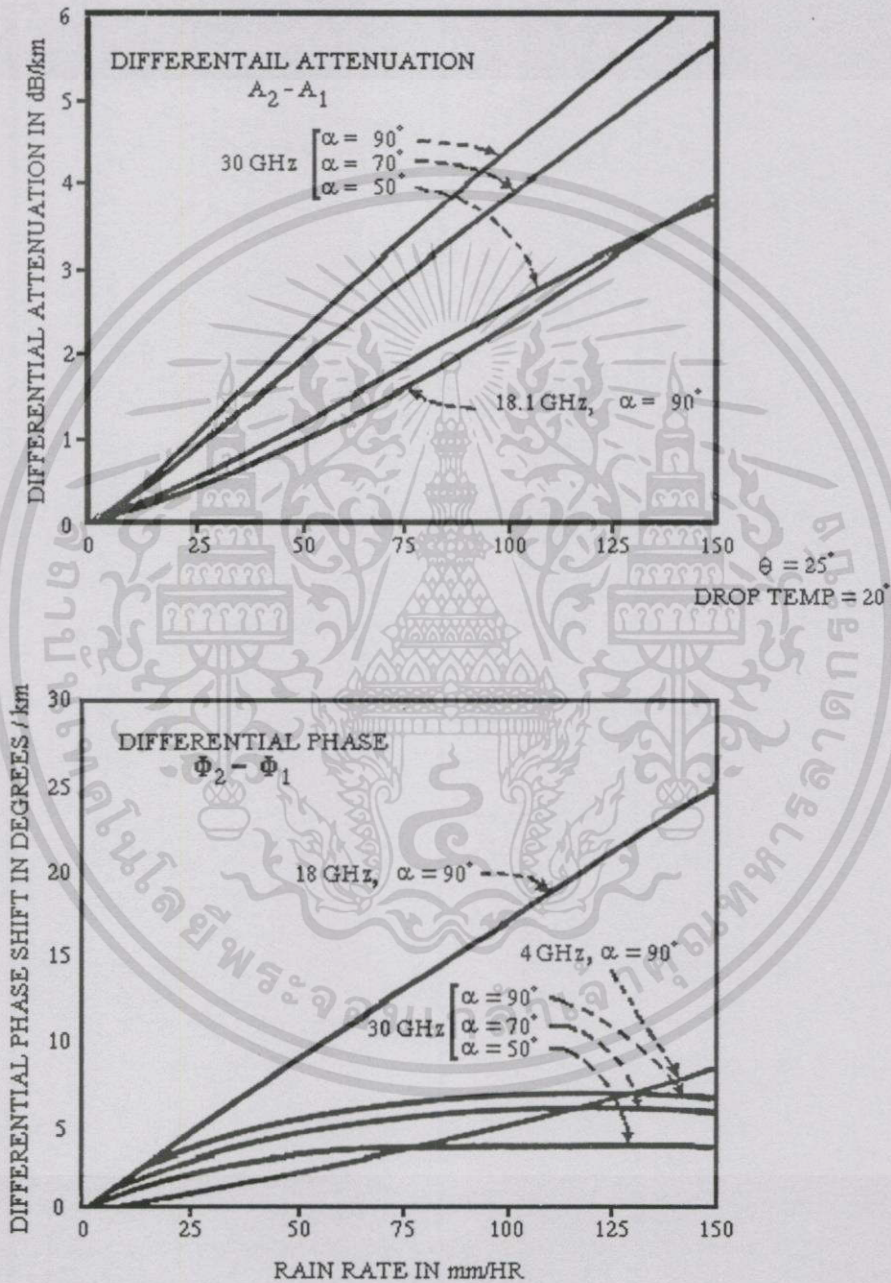
ซึ่งเป็นอิสระจากทิศทางการหมุนของคลื่น โพลาริซั่วม

ทั้งหมดที่ผ่านมาเราจะสมมุติให้ว่าหอคณทั้งหมคมมีขนาดเดียวกันและวางตัวในแนวเดียวกัน ซึ่งที่จริงในการจำลองจะต้องคิดการกระจายของขนาดและรูปร่างของหอคณ รวมทั้งการกระจายของมุมเอียงหอคณ ϕ และการลดทอนตลอดเส้นทางคลื่น a ทฤษฎีการกระเจิงสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ ผลกระทบจากการกระเจิงของหอคณเดี่ยวถูกนำมาคิดเป็นฟังก์ชันของบางพารามิเตอร์ (เช่น ขนาด) ดังนั้น การกระจายของพารามิเตอร์เหล่านี้ ของหอคณถูกใช้ในการคำนวณเพื่อหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (รวมทั้งค่าความลดทอนและความล่าช้าของเฟสจำเพาะ A และ ϕ) จะถูกนำมาใช้คำนวณตามหลักการนี้โดยให้เป็นฟังก์ชัน ของอัตราการตกของฝนในหลายๆงานวิจัยที่ผ่านมา การคำนวณในครั้งแรกซึ่งนำเสนอโดย chu (1974) watson และ Arbabi (1973a) จะให้หอคณแบบทรงกลมแบนขั้ว การกระจายของหอคณถูกสมมุติให้มีการกระจายที่รู้จักกันดีในชื่อของ การกระจายแบบ Law และ Pasons (Laws and Pasons distribution) และมีความเบี้ยวของทรงรี ในหอคณสอดคล้องโดยตรงกับขนาดของหอคณ ซึ่งยังมีขนาดใหญ่ความเพี้ยนจากทรงกลมยังมีมากขึ้น งานวิจัยต่อมาจะมีการพิจารณาที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้นโดยใช้หอคณรูปทรงที่เสนอโดย Pruppacher-Pitter (1971) โดย Oguchi (1977) ในรูป 3.4 (จาก Morrison *et. al.* 1973) ซึ่งเป็นตัวอย่างจากผลการคำนวณนี้ ซึ่งกราฟนี้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าความลดทอนและความต่างเฟสจำเพาะ ในระหว่างแนวแกนหลักกับแกนรองของหอคณ มุมระหว่างทิศทางการเดินทางของคลื่นกับแกนสมมาตรหอคณ (α) เป็นพารามิเตอร์และมุมเอียง (θ) ถูกเซตให้มีค่า 25° ค่าความแตกต่างของการลดทอนและเฟสซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ส่วนใหญ่ให้ความสนใจ ถูกนำมาใช้สำหรับหาค่า XPD ดังเช่นที่เห็นในกราฟ กรณีรุนแรงที่เกิดขึ้นสำหรับความแตกต่างการลดทอนและความต่างเฟสจะสอดคล้องกันที่ $\alpha = 90^\circ$ ในกรณีนี้หน้าตัดทรงรีของหอคณบนระนาบของสนามเวกเตอร์จะมีความเบี้ยวของทรงรีเกิดขึ้นสูงสุด ในกรณีนี้ค่า XPD แตกต่างจาก ค่าที่กำหนดในมุม $\alpha = 90^\circ$ สามารถหาได้จากสมการของ Chu (1974) ดังนี้

$$\begin{aligned} A_2 - A_1 &= \sin^2 \alpha (A_2 - A_1)_{\alpha=90^\circ} \\ \phi_2 - \phi_1 &= \sin^2 \alpha (\phi_2 - \phi_1)_{\alpha=90^\circ} \end{aligned} \quad (3.10)$$

การคิดการกระจายของ α และ θ นั้นยากกว่าการคิดจากขนาดและรูปร่างหอคณมาก ซึ่งตัวอย่างข้อมูลการกระจายของแนวการวางตัวและรูปร่าง ซึ่งเชื่อว่า ลม และการกระโชกของลม จะเป็นตัวกำหนดแนวการวางตัวของหอคณ ในกรณีที่ลมสงบ แกนสมมาตรที่กำหนดให้จะอยู่ในแนวตั้ง

องค์ประกอบในการวางตัวของหยดฝน ปกติจะถูกพิจารณาให้มีค่าคงที่เท่ากับ 90° สำหรับการสื่อสารประเภทแนวสายตา (line of sight) และเป็นฟังก์ชันของมุมเงยสำหรับการสื่อสารผ่านดาวเทียม ผลกระทบจากค่ามุม α ต่อ XPD นั้นเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับผลที่เกิดจากมุมเอียงหยดฝน จึงทำให้การกระจายของ α ไม่คุ้มค่าในการคำนวณ



รูปที่ 3.4 ค่าความแตกต่างการลดทอนและการเลื่อนเฟสที่เสนอ โดย Morrison et. al.(1973)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายของมุมเอียงหยดฝนซึ่งมีผลกระทบกับ XPD ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย Thomas (1971) นำเสนอการทดลองเพื่อหาการกระจายของมุมเอียงหยดฝนและพิสูจน์ให้เห็นว่าค่ามุมเฉลี่ยจะอยู่ที่ 15° นอกจากนี้เขายังนำเสนอด้วยว่า การกระทบของการข้ามโพลาริซันเนื่องจากมุมบวกและมุมลบนั้นอาจตัดทิ้งได้ ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจึงเกิดจากมุมที่เอียงไปอีกทางหรือที่เอียงไปข้างใดข้างหนึ่งจากผลที่ชัดเจนจากการทดลอง เขาให้ 25 % เป็นกรณีรุนแรงที่ไม่สมดุลของมุมเอียงหยดฝน ดังนั้นการทำนายกรณีรุนแรง XPD จะพิจารณาจาก 25% ของหยดฝน ณ ที่มุมเอียงหยดฝน 15° Chu (1974) ได้ใช้เหตุผลในการทำงานเหมือนกันแต่แสดงให้เห็นเด่นชัดด้วยมุมเอียงหยดฝนมีค่าเฉลี่ยกลางประมาณ 25° โดยที่มุมการรับประสิทธิผลที่ไม่สมดุลมีค่าประมาณ 14% Watson and Arbabi (1973b) ได้คำนวณค่า XPD เทียบกับอัตราการตกของฝนที่ความถี่ 11 GHz โดยกำหนดให้การกระจายของมุมเอียงหยดฝนเป็นแบบ Gaussian ที่ค่า $\text{mean} \neq 0$ และแนวการวางตัวของหยดฝนไม่เป็นสหสัมพันธ์ (Uncorrelated) ผลออกมาได้ค่าใกล้เคียงกับการสมมุติให้ค่ามุมเอียงหยดฝนคงที่เท่ากับค่า mean

การกระจายของทั้ง α และ θ สามารถนำมาคิดคำนวณโดยใช้การแปลงดังนี้ (Oguchi 1977)

$$\begin{bmatrix} a_1 - j\phi_1 \\ a_2 - j\phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + m_\theta m_\alpha & 1 - m_\theta m_\alpha \\ 1 - m_\theta m_\alpha & 1 + m_\theta m_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_1 - j\phi'_1 \\ a'_2 - j\phi'_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

เมื่อ a และ ϕ เป็นค่าคงที่การลดทอนและการเลื่อนเฟสประสิทธิผล และ a' กับ ϕ' เป็นค่าเดียวกันแต่คิดที่มุม $\alpha = 90^\circ$ ค่ามุมเอียงหยดฝนและมุมตกกระทบถูกสมมุติให้กระจายแบบสุ่มด้วยค่า mean θ และ variances σ_θ^2 และ σ_α^2 พหามิเตอร์สำหรับการแปลงแบบ Gaussian ดังนี้

$$\begin{aligned} m_\theta &= e^{-2\sigma_\theta^2} \\ m_\alpha &= \frac{1}{2} \left[1 + e^{-2\sigma_\alpha^2} \sin 2\alpha \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

โดย σ_θ และ σ_α เป็นค่าในหน่วยเรเดียน ค่ามุมเอียงประสิทธิผลที่ใช้ในสูตรสำหรับหาค่า XPD และอื่นๆ คือมุม θ และเมื่อแทนค่าคงที่การลดทอนและค่าคงที่การเลื่อนเฟสประสิทธิผล a และ ϕ ในสมการสำหรับหาค่า XPD (3.7) จะได้

$$\begin{aligned} y &= e^{-(a'_2 - a'_1)L + j(\phi'_2 - \phi'_1)L} \\ &\cong 1 - (a'_2 - a'_1)L + j(\phi'_2 - \phi'_1)L \end{aligned} \quad (3.13)$$

เมื่อใช้การประมาณค่าโดยอาศัยพื้นฐานค่า a' และ ϕ' ที่ทราบค่าอยู่แล้ว ทำให้ได้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$XPD = -20 \log \left\{ \frac{1}{2} m_0 m_\alpha L [(\Delta a')^2 + (\Delta \phi')^2]^{\frac{1}{2}} \sin 2\bar{\theta} \right\} \quad (3.14)$$

โดยที่

$$\Delta a' = a'_2 - a'_1$$

$$\Delta \phi' = \phi'_2 - \phi'_1$$

ค่านี้สามารถใช้ในการประมาณการได้ดีสำหรับช่วงความถี่ตั้งแต่ 4-50 GHz และอัตราการตกของฝนน้อยกว่า 150 mm/hr ถ้าหากว่าเราละเลยผลกระทบจากการกระจายของ α และสมมุติว่าหยดฝนถูกวางตัวอยู่ในแนวระดับในระนาบที่ตกกระทบบดิ่งที่นำเสนอโดย Nowland *et.al.* (1979) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha^2 &\ll 1 \\ \bar{\alpha} &= 90^\circ - \varepsilon \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่ ε เป็นมุมเงยสายอากาศ ดังนั้นค่า m_α ในสมการที่ 3.12 จึงมีค่าเป็น

$$m_\alpha = \cos^2 \varepsilon \quad (3.16)$$

ซึ่งเพื่อให้ง่ายต่อการประมาณค่า XPD ผลของสมการนี้ทำให้ได้

$$XPD = -20 \log \left[\frac{1}{2} m_0 L |\Delta k'| \cos^2 \varepsilon \sin 2\bar{\theta} \right] \quad (3.17)$$

โดยที่

$$|\Delta k'| = [(\Delta a')^2 + (\Delta \phi')^2]^{\frac{1}{2}}$$

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงโพลาริแซชันกับการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝน

ค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการสังเกตจากข้อมูลทางสถิติของการลดทอนและค่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงโพลาริแซชันของคลื่นในเส้นทางเดียวกัน สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$XPD \cong \tilde{a} - \tilde{b} \log(CPA) \quad (3.18)$$

จากหัวข้อที่ผ่านมา เราสามารถหาค่าการลดทอนของสัญญาณร่วมที่มีโพลาไรซ์ในทิศทางแนวแกน x ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} CPA &= -10 \log \frac{|E_{xs}|^2}{|E_{xi}|^2}; E_{yi} = 0 \\ &= -10 \log |t_{xx}|^2 \\ &= -10 \log |T_1 \cos^2 \theta + T_2 \sin^2 \theta| \\ &= -10 \log |T_1 (1 + (e^{-(\Delta\alpha - j\Delta\phi)} - 1) \sin^2 \theta)| \end{aligned} \quad (3.19)$$

เมื่อ $\Delta\alpha$ และ $\Delta\phi$ เป็นค่าตามสมการ (3.14) และเมื่อใช้ค่าโดยประมาณจากสมการ (3.13) จะสามารถกำหนดค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} CPA &\cong 20 \log [e^{(-a_1 L \cos^2 \theta - a_2 L \sin^2 \theta)}] \\ &= (A_1 \cos^2 \theta + A_2 \sin^2 \theta) L \end{aligned} \quad (3.20)$$

จากสมการนี้ถ้าเราสลับเปลี่ยนระหว่างสัปดาห์ 1 และ 2 ก็จะได้ค่าของ CPA_y การคำนวณในสมการข้างต้นจะใช้ได้เฉพาะในสมมุติฐานที่หยดฝนทุกหยดมีแนวการวางตัวในทิศทางเดียวกันเท่านั้น ภายใต้การกระจายของมุมการวางตัว α และ θ ซึ่งสามารถทำให้การหาค่า XPD ยากขึ้น เราอาจกำหนดสมการได้ใหม่เป็น

$$CPA_x = \frac{1}{2} [(A'_1 - A'_2) + m_\theta m_\alpha (A'_1 - A'_2) \cos 2\theta] L \quad (3.21)$$

โดยที่ A'_1 และ A'_2 เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนในหน่วย dB/km ที่มุม $\alpha = 90^\circ$ แต่ด้วยสมมุติฐานก่อนหน้านี้นี้ ซึ่งกำหนดให้ $\alpha = 90^\circ - \varepsilon$ และ $m_\alpha = \cos^2 \varepsilon$ ดังนั้น

$$CPA = \frac{1}{2} [(A'_1 + A'_2) + m_\theta (A'_1 - A'_2) \cos^2 \varepsilon \cos 2\theta] L \quad (3.22)$$

ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง XPD กับ CPA จะสมมุติให้ ค่า CPA, สัมประสิทธิ์การลดทอน A_1 กับ A_2 ขนาดของความแตกต่างค่าคงที่การเดินทางของคลื่นและระยะเส้นทางคลื่นประสิทธิภาพผล ทั้งหมดแปรเปลี่ยนในทิศทางตามความสัมพันธ์ของกฎการยกกำลัง (Power law relation) กับอัตราการตกประสิทธิภาพของฝน: R (Nowland et al. 1977) ดังนี้

$$CPA = a_0 R^{b_0} L \quad (3.23a)$$

$$A'_1 = a_1 R^{b_1} \quad (3.23b)$$

$$A'_2 = a_2 R^{b_2} \quad (3.23c)$$

$$L = uR^v \quad (3.23d)$$

$$|\Delta k| = cR^d \quad (3.23e)$$

แทนค่าสมการ (3.23a-e) ลงในสมการ (3.22) จะได้ค่าโดยประมาณของ a_0 และ b_0 ในเทอมของ a_1 , a_2 , b_1 และ b_2 ซึ่งสามารถหาได้ด้วยวิธีการถดถอย (Regression fitting) จากการคำนวณหาค่าคงที่การเดินทางของคลื่น ค่าพารามิเตอร์ u , v , c และ d สามารถหาได้จากทฤษฎีวิธีการถดถอยหรือความสัมพันธ์จากการสังเกต

ด้วยการแทนค่าสมการ (3.23d) และ (3.23e) ลงในสมการของ XPD ในสมการ (3.17) จะได้ XPD ในเทอมของอัตราตกของฝน : R และพารามิเตอร์สำหรับการถดถอยต่างๆ เช่นเดียวกัน ถ้าเราใช้สมการ (3.23d) ในสมการ (3.23a) ก็จะได้ค่า CPA ในเทอมของอัตราตกของฝน : R และพารามิเตอร์การถดถอยเช่นกัน

ดังนั้นเมื่อกำจัดเทอมของอัตราตกของฝนออกไป จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง XPD กับ CPA เป็น

$$XPD \cong \tilde{a} - \tilde{b} \log(CPA) \quad (3.24)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \tilde{a} &\cong 20 \left(\frac{d+v}{b_0+v} \right) \log(a_0 u) - 20 \log \left(\frac{1}{2} c m_0 \cos^2 \varepsilon \sin 2\bar{\theta} \right) \\ \tilde{b} &\cong 20 \left(\frac{d+v}{b_0+v} \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

ในย่านความถี่ช่วง 11-14 GHz ค่า $b_0 = d$ ทำให้สามารถจัดสมการได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \tilde{a} &\cong -20 \log \left(\frac{1}{2a_0} c m_0 \cos^2 \varepsilon \sin 2\bar{\theta} \right) \\ \tilde{b} &\cong 20 \end{aligned} \quad (3.26)$$

ที่ผ่านมาเราสมมุติให้คลื่นมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นในทิศทางแกน x สำหรับคลื่นที่มีโพลาไรซ์ในทิศทางแกน y ค่าสับสคริป 1 และ 2 ในสมการ a_0 และ b_0 จะถูกสลับที่กัน และ ในกรณีของโพลาไรซ์แบบวงกลม θ จะถูกเซตไว้ที่ 45° ซึ่งทำให้ค่า XPD มีค่าต่ำกว่าโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CCIR ได้ปรับปรุงพัฒนาการคำนวณดังกล่าวข้างต้นให้สะดวกต่อการใช้งานโดยนำเสนอครั้งแรกใน CCIR Report 564-1 (CCIR 1978) และปรับปรุงแก้ไขต่อมาใน Report 564-3 (CCIR 1986) โดยสูตรคำนวณสำหรับ CCIR จะกำหนดค่าบางพารามิเตอร์ดังนี้

$$d \cong b_0$$

$$\frac{cm_0}{2a_0} \cong [f(\text{GHz})]^{-3/2} \quad (3.27)$$

โดยที่ $\theta \cong \tau$ เป็นมุมเอียงโพลาริซชันของคลื่นเมื่อเทียบกับแนวระดับ ซึ่งทำให้ค่า XPD โดยประมาณของ CCIR สามารถเขียนได้เป็น

$$XPD = 30 \log[f(\text{GHz})] - 40 \log(\cos \varepsilon) - 10 \log[1 - 0.484(1 + \cos(4\tau))] - 20 \log(CPA) + 0.0052\sigma_\phi^2 \quad (3.28)$$

โดยที่ σ_ϕ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประสิทธิผลของการกระจายมุมเอียงหยดฝน ในหน่วย องศา

Chu (1982) ได้นำเสนอแบบจำลองกึ่งประจักษ์ (Semi-Empirical Model) สำหรับการเปลี่ยนแปลงโพลาริซชันเทียบกับการลดทอน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ตลอดจนช่วงความถี่ที่กว้าง, มุมเอียงโพลาริซชันและมุมเงยสายอากาศ โดยค่า XPD ของโพลาริซชันแบบวงกลมในหน่วย dB หาได้จาก

$$XPD_c = 11.5 + 20 \log f - 20 \log(CPA) - 40 \log(\cos \varepsilon) \quad (3.29)$$

โดยที่ f เป็นความถี่ในหน่วย GHz CPA เป็นค่าการลดทอนในโพลาริซชันเดิมในหน่วย dB และ ε เป็นมุมเงยสายอากาศ และสมการสำหรับหาค่า XPD สำหรับโพลาริซชันแบบเชิงเส้น ในหน่วย dB สามารถหาได้จาก

$$XPD_L = 11.5 + 20 \log f - 20 \log(CPA) - 40 \log(\cos \tau) - 10 \log \frac{1}{2}(1 - 0.978 \cos 4\tau) - 0.075(CPA) \cos^2 \varepsilon \cos 2\tau \quad (3.30)$$

โดยที่ τ เป็นค่ามุมเอียงของโพลาริซชันซึ่งวัดเทียบกับแนวระดับ

ซึ่งจะเห็นว่าในสมการของ Chu ทั้งสองสมการมีเทอมที่ขึ้นกับความถี่ คือ $20 \log f$ ซึ่งไม่สอดคล้องกับที่นำเสนอโดย CCIR (3.28) ที่ใช้ $30 \log f$ ซึ่งเป็นข้อขัดแย้งกันเล็กน้อยระหว่างสูตรสองสูตรในย่านความถี่ที่ใกล้เคียงกับ 12 GHz แต่ว่าสูตรทั้งสองให้ผลที่สอดคล้องกับข้อมูลเป็นอย่างดี ณ ที่ความถี่ 19 และ 20 GHz

Max M.J.L. van de Kamp (1995) แห่งมหาวิทยาลัย Eindhoven University of Technology (EUT) ประเทศเนเธอร์แลนด์ ได้สรุปแนวคิดจากแบบจำลองที่ผ่านมาซึ่งอยู่ในรูปสมการ (3.31)

$$XPD = S + C \log f + I(\delta, \sigma_\phi) - D \log \cos \varepsilon + 0.0053 \delta_s^2 - V(f) \log CPA \quad (3.31)$$

เมื่อนำมาประมวลเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจากสถานที่ต่างกัน 39 แห่ง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง XPD กับ การลดทอนของสัญญาณสามารถกำหนดได้ดังสมการ (3.32)

$$XPD = 5.1 + 23 \log f - 40 \log \cos \varepsilon - 20 \log |\sin 2\delta| - 0.0775 \cos^2 \varepsilon \cos 2\delta A - 17.8 \log A \quad (3.32)$$

โดยที่ใช้งานในช่วงข้อมูลของพารามิเตอร์ต่างๆเป็นดังนี้

$$11 \text{GHz} < f < 30 \text{GHz} \quad ; 3^\circ < \varepsilon < 50^\circ \\ 4^\circ < \delta \pm 90^\circ < 86^\circ ; \quad 1 \text{dB} < CPA < 25 \text{dB}$$

3.3 ระดับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันกับมุมเงยสายอากาศและความถี่ จากสมการของ XPD ใน (3-17)

$$XPD = -20 \log \left[\frac{1}{2} m_0 L |\Delta k'| \cos^2 \varepsilon \sin 2\theta \right] \quad (3.33)$$

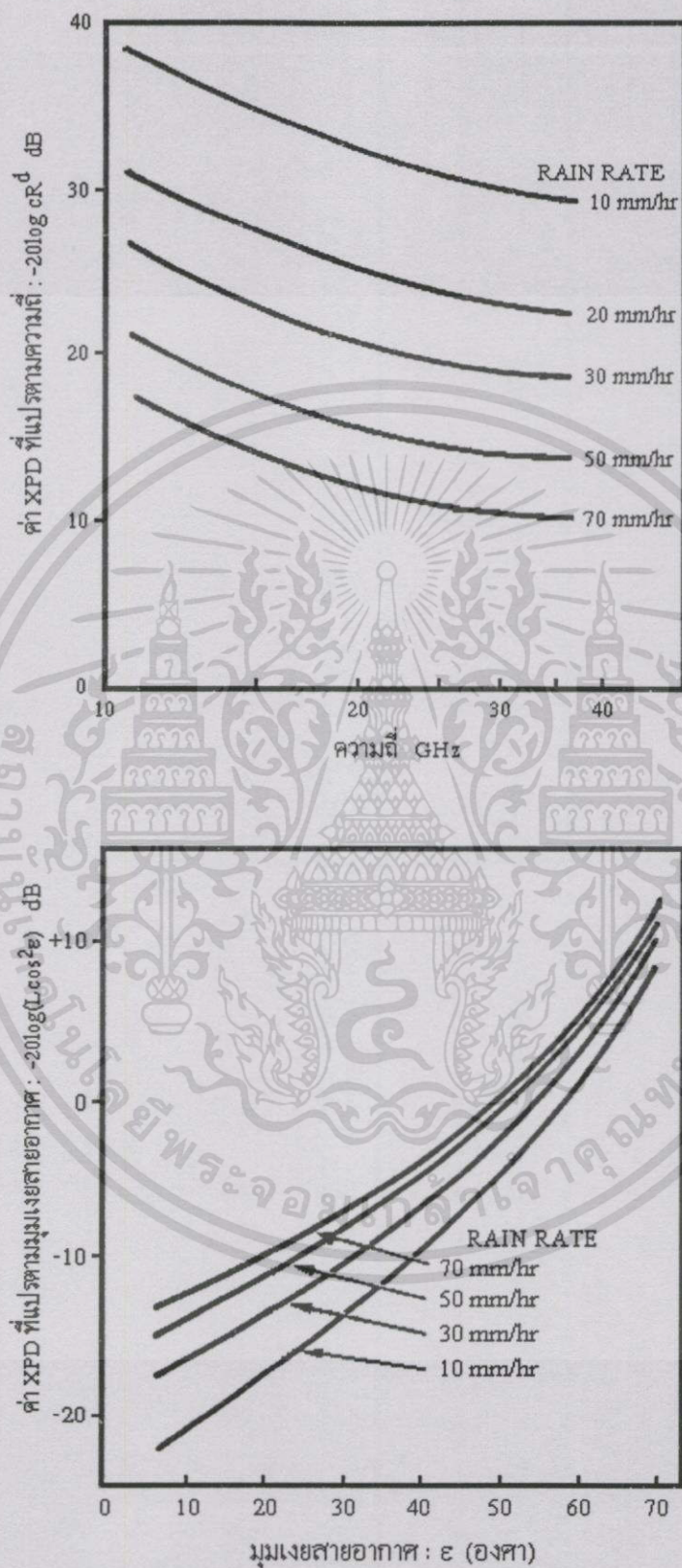
สามารถเขียนใหม่ให้ชัดเจนในเทอมที่ขึ้นกับมุมเงยสายอากาศและความถี่ โดยเฉพาะในกรณีของโพลาไรซ์แบบวงกลม ที่สอดคล้องกับค่า XPD ต่ำสุด ที่ $\theta = 45^\circ$ ดังนี้

$$XPD = -20 \log(L \cos^2 \varepsilon) - 20 \log |\Delta k'| - 20 \log \left(\frac{m_0}{2} \right) \quad (3.34)$$

ซึ่งเมื่อใช้ความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันที่นำเสนอโดย Nowland et al. (1977) คือ

$$L = [7.41 \times 10^{-3} R^{0.766} + (0.232 - 1.8 \times 10^{-9} \times R) \sin \varepsilon]^{-1} \\ |\Delta k'| \cong C(f) R^{d(f)} \quad (3.35)$$

จะเห็นว่าเทอมแรกของสมการ (3.35) เป็นเทอมที่ปรากฏค่า XPD ที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการตกของฝนและมุมเงยสายอากาศ ส่วนเทอมที่สองเป็นเทอมที่ XPD เป็นฟังก์ชันของอัตราการตกของฝนกับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยที่เทอมท้ายสุดจะถูกพิจารณาเป็นค่าคงที่หรือบางทีอาจให้เป็นฟังก์ชันของอัตราการตกของฝน ซึ่งที่ $m_0 = 0.8$ ค่าเทอมสุดท้ายนี้จะมีค่าเท่ากับ 8 dB



รูปที่ 3.5 ค่า XPD ที่ขึ้นกับความถี่และมมเงยสายอากาศสำหรับโพลาริเซชันแบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 แบบจำลองเชิงประจักษ์ของ CCIR SIM DHW และ EUT

ดั่งที่กล่าวมาข้างต้นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

3.4.1 แบบจำลองของ CCIR

$$XPD = 30 \log(f) - 10 \log \left\{ \frac{1}{2} [1 - \cos(4\delta)] e^{-0.0024\sigma_m^2} \right\} - 40 \log(\cos \epsilon) + 0.0053\sigma_0^2 - V \log A \quad (3.36)$$

โดยที่

$$V = \begin{cases} 20, & 8 \leq f \leq 15 \text{ GHz} \\ 23, & 15 \leq f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases} \quad (3.37)$$

3.4.2 แบบจำลอง SIM

$$XPD = 9.5 + 17.3 \log(f) - 42 \log(\cos \epsilon) + 10 \log \left\{ \frac{1}{2} [1 - \cos(4\sigma)] e^{-0.0024\sigma_m^2} \right\} + 0.0053\sigma_0^2 - 20 \log(F_0) - 19 \log(A) \quad (3.38)$$

3.4.3 แบบจำลองของ DHW

$$XPD = 8.16 + 21 \log(f) - 20 \log(\sin(2\delta)) - 40 \log(\cos \epsilon) + 0.0053\sigma_0^2 - 20 \log(A) \quad (3.39)$$

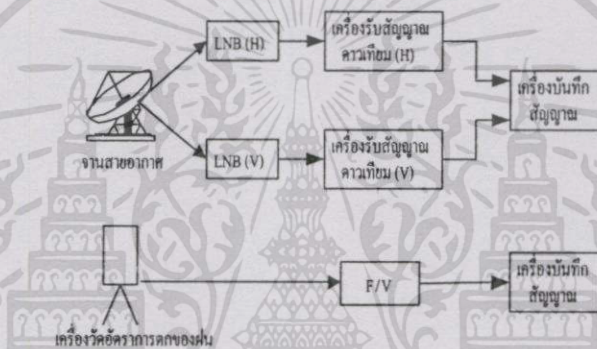
3.4.4 แบบจำลองของ EUT

$$XPD = 5.1 + 23 \log f - 40 \log \cos \epsilon - 20 \log |\sin 2\delta| - 0.0775 \cos^2 \epsilon \cos 2\delta A - 17.8 \log A \quad (3.40)$$

ผลการทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

4.1 การวัดและระบบการวัด

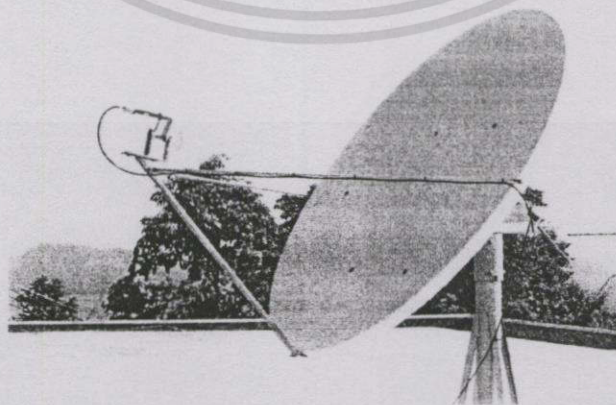
ระบบการวัดค่าการแยกแยะโพลาไรซ์เซชันไขว้ในนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเราได้ทำการทดลองวัด XPD ของสัญญาณโพลาไรซ์แนวตั้ง (XPD_v) จากทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียม ไทยคม 2 โดยใช้จานขนาด 0.5 เมตร และ LNB คู่ โดย LNB ตัวแรกจะรับสัญญาณจากโพลาไรซ์แนวตั้ง ระดับสัญญาณที่รับได้จึงเป็นค่าของ E₀₀ ส่วน LNB ตัวที่สอง จะรับสัญญาณจากโพลาไรซ์แนวอนที่ความถี่เดียวกัน ระดับสัญญาณที่รับได้จึงเป็นค่าของ E_{cross} แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด

4.1.1 จานสายอากาศและ LNB

จานสายอากาศที่ใช้ในการทดลองเป็นจานสายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เมตร ซึ่งมีอัตราขยาย 34.5 dB โดยติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณ LNB 1 คู่ ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 จานสายอากาศออฟเซตพาราโบลา ที่ใช้ Dual LNB

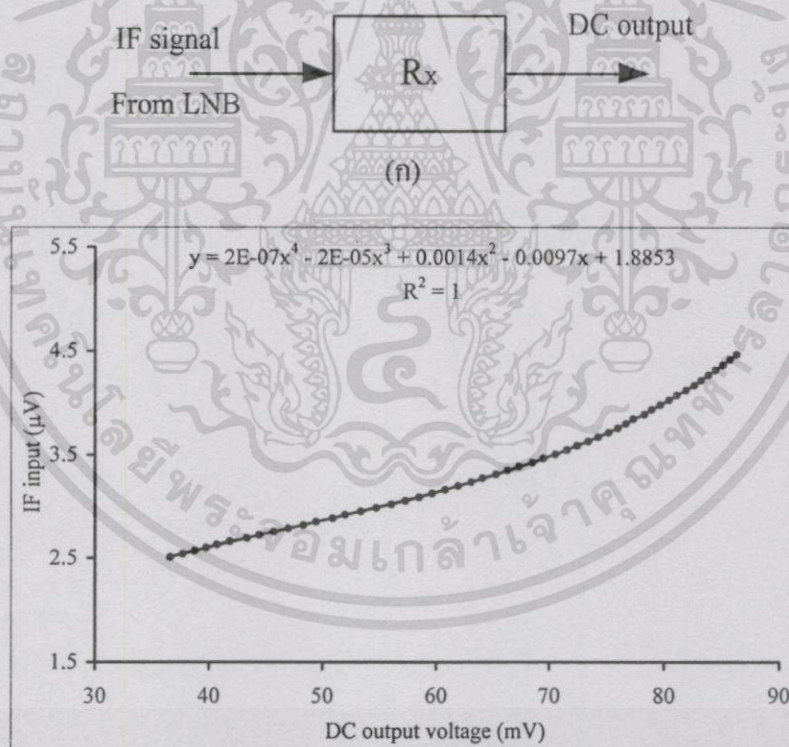
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบการวัด

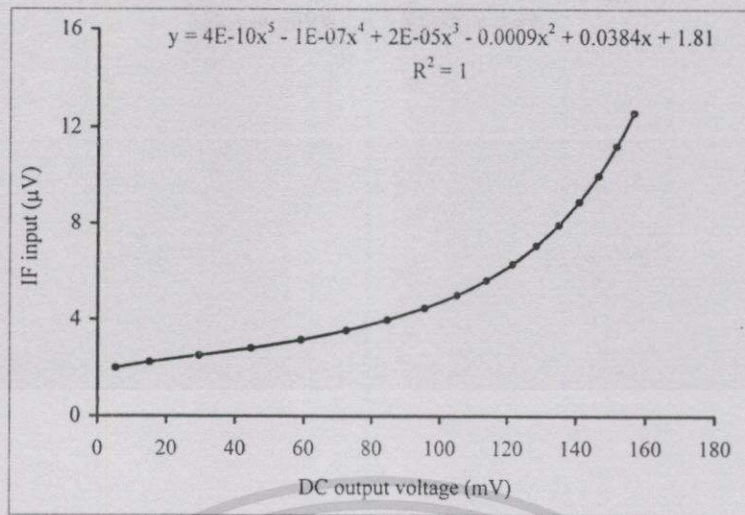
ดาวเทียม	ไทยคม 2 (78.5 °E)
ความถี่ที่ใช้	12.594 GHz
ระบบจานสายอากาศ	0.5 เมตร ϕ (อัตราขยาย 34.5 dB) โพลาริซ์เซชันคู่,
มุมมอง	59.6 องศา

4.1.2 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

ในการทดลองนี้จะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบอนาล็อกจำนวน 2 เครื่อง เพื่อรับสัญญาณจาก LNB จากทั้งสองแนวของโพลาริซ์เซชัน (E_{∞} กับ E_{cross}) ระดับสัญญาณที่รับได้จะปรากฏออกมาในรูปของระดับแรงดันไฟฟ้าตรง ซึ่งจะถูกนำไปบันทึกในเครื่องบันทึกสัญญาณ ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของเครื่องรับได้จากการคาลิเบรทด้วยเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ และผลของการถดถอยจะได้สมการของระดับสัญญาณ ดังสมการ (4.1) และ (4.2) และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การคาลิเบรท และทรานเฟอร์ฟังก์ชันของเครื่องรับ



(ค) สมการคาลิเบรทของสัญญาณโพลาริซเซชันร่วม (E_{co})

รูปที่ 4.3 (ต่อ)

$$E_{co} = 4 \times 10^{-10} x^5 - 1 \times 10^{-7} x^4 + 2 \times 10^{-5} x^3 - 0.0009 x^2 + 0.0384 x + 1.81 \quad (4.1)$$

$$E_{cross} = 2 \times 10^{-7} x^4 - 2 \times 10^{-5} x^3 + 0.0014 x^2 - 0.0097 x + 1.8853 \quad (4.2)$$

4.1.3 เครื่องบันทึกสัญญาณ

การบันทึกระดับสัญญาณจะบันทึกข้อมูลด้วยระบบดิจิทัล ซึ่งประกอบด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (data acquisition) HP 3307A คอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์ Benchlink[®] โดยกำหนดให้ระบบสุ่มสัญญาณวินาทีละ 2 ครั้ง (0.5 Hz) ข้อมูลที่ได้ถูกจัดเก็บเป็นแฟ้มในคอมพิวเตอร์และนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Excel[®]

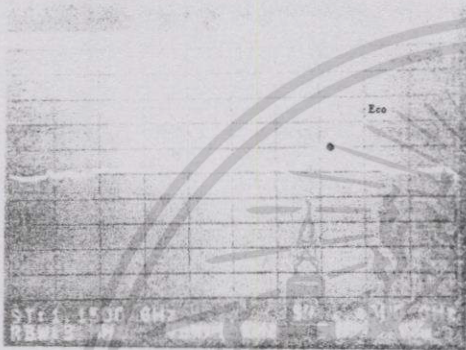


รูปที่ 4.4 ระบบการบันทึกสัญญาณ

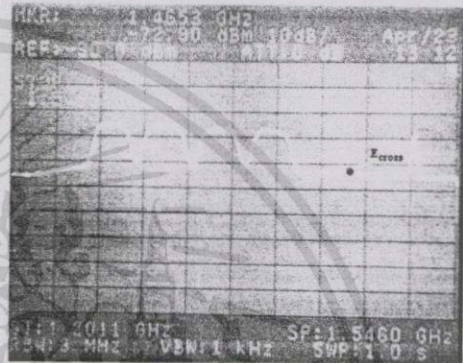
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 เครื่องวัดอัตราการตกของฝน

การวัดอัตราการตกของฝนจะใช้ เครื่องวัดอัตราการตกของฝนแบบนับหยด (water drop count) ซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว โดยใช้หลักการให้น้ำฝนหยดผ่านช่องน้ำมันที่มีอุปกรณ์เซ็นเซอร์ทางแสงติดตั้งอยู่ เมื่อหยดน้ำผ่านน้ำมันได้ 1 หยด วงจรเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับอยู่จะให้สัญญาณทางไฟฟ้าออกมา 1 พัลส์ ซึ่งน้ำ 1 หยคนี้จะมีขนาดเท่ากับ 0.0083 มม. สัญญาณพัลส์ของหยดฝนนี้จะถูกแปลงเป็นข้อมูลทางดิจิทัลบันทึกเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมกับระดับสัญญาณดาวเทียม



(ก.) ระดับสัญญาณในโพลาริแกรมร่วม



(ข.) ระดับสัญญาณของพลาไรซ์ไขว้

รูปที่ 4.5 สัญญาณแต่ละโพลาริซ์ของดาวเทียมไทยคม 2

4.2 แนวทางการวิเคราะห์

การวิเคราะห์การเกิด XPD ที่เป็นผลจากฝน จะพิจารณาจาก นิยามของ XPI ตามสมการ (2.8) ได้ดังนี้

$$XPI = XPD = 10 \log \left[\frac{m_p(w, a_c)}{m_p(w, a_x)} \right] = 10 \log \frac{P_c}{P_x} \quad (4.3)$$

โดยที่ $P_c = A_c S_w m_p(w, a_c)$ และ $P_x = A_x S_w m_p(w, a_x)$ ซึ่งในกรณีที่บรรยากาศปลอดฝน (clear sky) ค่า XPD เกิดขึ้นจากสมการนี้ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณลักษณะของสายอากาศ และสภาพแวดล้อมของบรรยากาศทั่วไป คือ

$$XPD = 10 \log \frac{A_c S_w m_p(w, a_c)}{A_x S_w m_p(w, a_x)} = XPD_{clear\ sky} = 10 \log \frac{P_c}{P_{x(clear\ sky)}} \quad (4.4)$$

ในขณะที่เกิดฝนตก ค่าของกำลังคลื่นที่รับได้จากโพลาริซ์เซชันไขว้จะเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องจากการเปลี่ยนโพลาริซ์ของคลื่นที่เดินทางผ่านกลุ่มหยดฝน ซึ่งอาจเขียนสมการ XPD ที่เกิดจากการเปลี่ยนโพลาริซ์ของคลื่นเนื่องจากฝนและเกิดจากสภาพแวดล้อมขณะปลอดฝนรวมกันได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$XPD = 10 \log \frac{P_c}{P_{x(\text{clear sky})} + P_{x(\text{rain})}} \quad (4.5)$$

หรือ

$$XPD = 20 \log \frac{E_{co}}{E_{\text{clear sky}} + E_{\text{rain}}} = 20 \log \frac{E_{co}}{E_{\text{cross}(total)}} \quad (4.6)$$

ซึ่งค่าระดับสัญญาณรวมของ E_{cross} เกิดจากรวมของสัญญาณในสภาวะปลอดฝนกับระดับสัญญาณขณะเกิดฝนตก ดังนั้นในขณะที่เกิดฝนตก จึงสามารถหาค่า E_{cross} เฉพาะที่มีสาเหตุเกิดจากฝนได้จากสมการ

$$E_{\text{cross}(rain)} = E_{\text{cross}(total)} - E_{\text{clear sky}} \quad (4.7)$$

ดังนั้นสมการ XPD ที่มีสาเหตุเนื่องจากฝนจึงสามารถเขียนได้เป็นดังสมการ (4.8)

$$XPD_{\text{rain}} = 20 \log \frac{E_{co}}{E_{\text{cross}(rain)}} = 20 \log \frac{E_{co}}{\Delta E_{\text{cross}}} \quad (4.8)$$

โดยที่

$$\Delta E_{\text{cross}} = E_{\text{cross}(raining)} - E_{\text{cross}(clear sky)}$$

เป็นระดับของสัญญาณความแตกต่างในโพลาริเซชันไวก์ระหว่างขณะฝนตกกับก่อนฝนตก ดังนั้นในการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งต้องการศึกษาระดับการเกิด XPD ที่มีสาเหตุเนื่องจากการตกของฝนและเพื่อให้ค่าที่ได้เป็นระดับขนาดของ XPD จึงพิจารณาเทอมต่างๆเหล่านี้เฉพาะส่วนของขนาดระดับสัญญาณโดยไม่คิดเครื่องหมายดังสมการ (4.9)

$$XPD_{\text{rain}} = 20 \log \left| \frac{E_{co}}{\Delta E_{\text{cross}}} \right| \quad \text{dB} \quad (4.9)$$

โดยที่ E_{co} คือระดับสัญญาณที่รับได้จากโพลาริเซชันแนวตั้ง

ΔE_{cross} คือระดับความแตกต่างของสัญญาณที่รับได้จากโพลาริเซชันแนวอนระหว่างสภาวะปกติกับสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชัน

เนื่องจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับหลายพารามิเตอร์ดังที่กล่าวมาแล้วจากบทที่ผ่านมา ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเหล่านี้สามารถที่จะคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 มุมเงยของสายอากาศ : ϵ

ค่ามุมเงยของสายอากาศเป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างทิศทางที่ชี้ไปยังดาวเทียมกับแนวระนาบของพื้นโลก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\epsilon = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \beta \cos \phi - 0.1508}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta \cos^2 \phi}} \right) \quad (4.10)$$

โดยที่ β เป็นมุมแตกต่างระหว่างเส้นแวงของดาวเทียมกับสถานีรับ

ϕ เป็นเส้นรุ้งของสถานีรับ

ดังนั้นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังซึ่งอยู่ที่บริเวณเส้นรุ้งที่ 13.76 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 100.8 องศาตะวันออก ค่ามุมเงยของสายอากาศ จึงมีค่าเท่ากับ 59.6 องศา

4.2.2 มุมเอียงโพลาริซเซชัน (Polarization tilt angle : τ)

เนื่องจากข้อกำหนดโพลาริซเซชันของสัญญาณดาวเทียมจะพิจารณาเทียบกับแนวเส้นศูนย์สูตร โดยแนวโพลาริซเซชันที่ตั้งฉากกับเส้นศูนย์สูตรจะกำหนดให้เป็นโพลาริซเซชันแนวตั้ง (Vertical Polarization) ส่วนโพลาริซเซชันที่ขนานกับเส้นศูนย์สูตรจะกำหนดให้เป็นโพลาริซเซชันแนวนอน (Horizontal Polarization) ดังนั้น โพลาริซเซชันของสายอากาศรับจะแมตช์ตรงกับโพลาริซเซชันของสัญญาณดาวเทียมก็ต่อเมื่อตำแหน่งของจตุรัสสัญญาณตั้งอยู่บนเส้นศูนย์สูตรและอยู่ได้ตำแหน่งดาวเทียมเท่านั้น ในกรณีที่จตุรัสสัญญาณดาวเทียมอยู่ที่ตำแหน่งต่างไปจากนี้ จะทำให้ต้องปรับมุมเอียงโพลาริซเซชันของสายอากาศให้แมตช์ตรงกับโพลาริซเซชันของสัญญาณดาวเทียม ซึ่งค่ามุมเอียงของโพลาริซเซชันนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{\sin(\beta)} \right) \quad (4.11)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาตามตำแหน่งสถานีรับกับดาวเทียมจะได้

$$\tau = \tan^{-1} \left(\frac{\tan 13.76^\circ}{\sin(100.8^\circ - 78.5^\circ)} \right) = 32.836^\circ$$

และเนื่องจากค่ามุมเอียงโพลาไรซ์เซชันตามแบบจำลองต่างๆนี้ถูกวัดเทียบกับแนวระดับ ดังนั้นค่าของมุมเอียงโพลาไรซ์เซชันที่ใช้จึงมีค่าเท่ากับ $\tau_H = 90 - \tau$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันของคลื่นเป็นผลกระทบจากแนวโพลาไรซ์เซชันที่กระทำกับมุมเอียงของอนุภาคฝน(δ) ซึ่งค่าของมุมนี้คำนวณได้จาก

$$\delta = \begin{cases} |\tau - \langle \theta \rangle|; & \text{โพลาไรซ์แบบเชิงเส้น} \\ 45^\circ & ; \text{โพลาไรซ์แบบวงกลม} \end{cases} \quad (4.12)$$

โดยที่ $\langle \theta \rangle$ เป็นมุมเอียงหยดฝนโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในการตกของฝนครั้งที่กำลังพิจารณานั้นๆ

4.2.3 พารามิเตอร์องค์ประกอบอนุภาคฝน

เนื่องจากยังไม่เคยมีการวัดพารามิเตอร์องค์ประกอบอนุภาคฝนในประเทศไทยมาก่อน เราจึงใช้พารามิเตอร์ที่ศึกษาโดย Stuzman (1984) ซึ่งกำหนดให้มุมเอียงของหยดฝนโดยเฉลี่ย $\langle \theta \rangle = 0^\circ$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมเอียงหยดฝน $\sigma_\theta = 12^\circ$ และค่าความเบี่ยงจากทรงกลมของรูปทรงหยดฝน $F_0 = 0.65$ เป็นพารามิเตอร์มาตรฐานตั้งต้น โดยกำหนดให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าเฉลี่ยมุมเอียงหยดฝน $\sigma_m = 3^\circ$ ตามคำแนะนำของ Chu (1974) ดังนั้นจากพารามิเตอร์ที่กล่าวมา จึงสามารถคำนวณหาปริมาณการแยกแยะโพลาไรซ์เซชันไขว้ที่เกิดจากดาวเทียมไทยคม 2 ได้ดังนี้

แบบจำลอง CCIR

$$\begin{aligned} XPD = & 44.83782 - 10 \log \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - 0.54224 e^{-0.0024 \sigma_m^2} \right] \right\} \\ & + 0.0053 \sigma_\theta^2 - 20 \log A \end{aligned} \quad (4.13)$$

แบบจำลองของ DHW

$$\begin{aligned} XPD = & 31.26344 - 20 \log(\sin(2\delta)) - 40 \log(\cos \varepsilon) \\ & + 0.0053 \sigma_\theta^2 - 20 \log(A) \end{aligned} \quad (4.14)$$

แบบจำลองของ EUT

$$XPD = 42.23658 - 20 \log|\sin 2\delta| - 0.01985 \cos 2\delta A - 17.8 \log A \quad (4.15)$$

รายละเอียดซอฟต์แวร์การคำนวณตามสมการในแบบจำลอง ซึ่งถูกเขียนเป็นมาโครด้วยภาษา Visual Basic เพื่อการคำนวณวิเคราะห์ใน โปรแกรม Excel แสดงในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองวัดค่า XPD เทียบกับแบบจำลอง

ผลของการเปลี่ยน โพลาริเซชันของสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากการทดลองวัด ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่างๆดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยเมื่อพิจารณาการเกิดการเปลี่ยนแปลง โพลาริเซชันของสัญญาณดาวเทียมที่ได้จะพบเห็นผลที่เกิดจากสาเหตุสองประการคือ

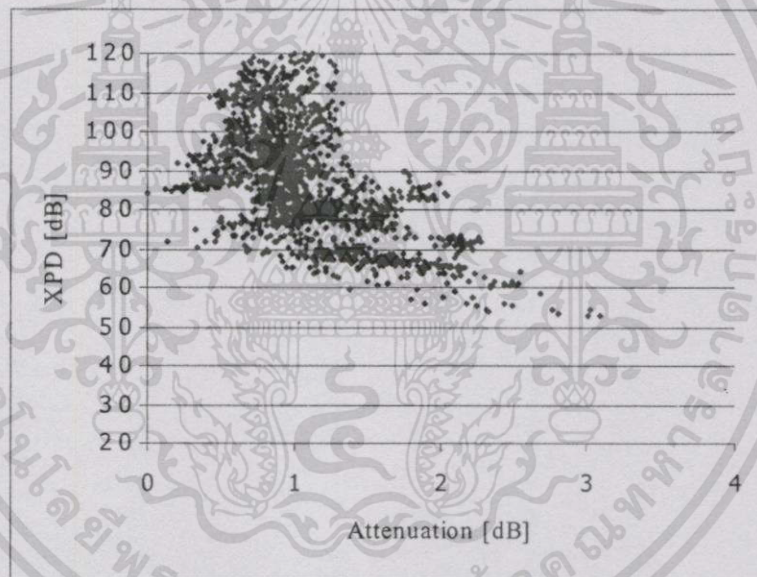
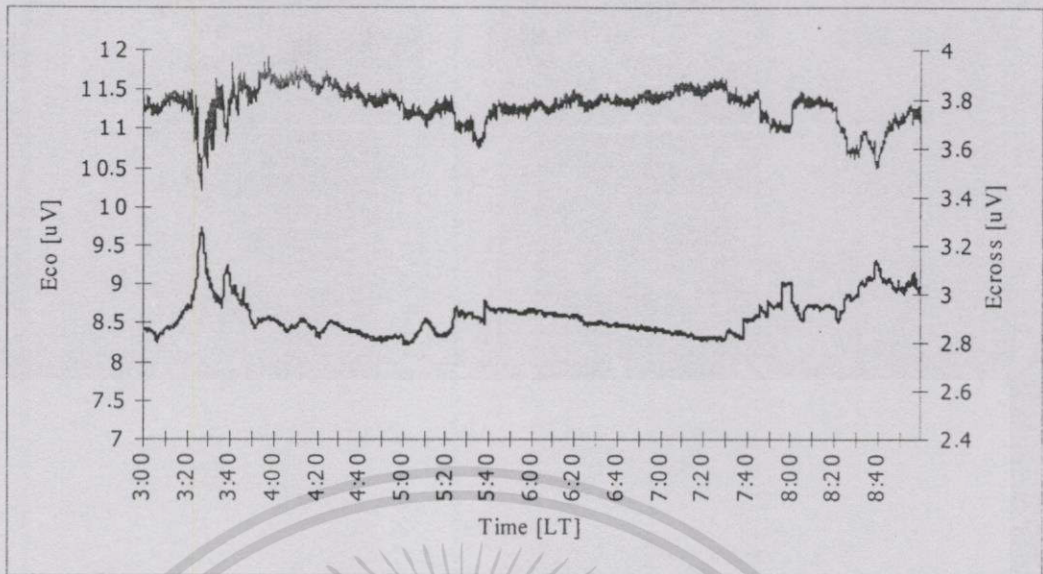
4.3.1 เกิดจากตัวกลางที่เป็นเกร็ดน้ำแข็งในก้อนเมฆ

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า XPD ที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนี้ จะมีปรากฏการณ์เพิ่มขึ้นของคลื่นในโพลาริเซชันไขว้สูง แต่การลดทอนของคลื่นในโพลาริเซชันร่วมจะเกิดขึ้นน้อย โดยทั่วไปแล้ว การเกิด XPD จากสาเหตุนี้จะมีการลดทอนของสัญญาณในโพลาริเซชันร่วมไม่เกิน 2 dB ซึ่งดังตัวอย่างการเกิด XPD ในวันที่ 22 เดือนกันยายน พ.ศ. 2543 ในรูปที่ 4.6

4.3.2 เกิดจากตัวกลางที่เป็นหยดฝนขณะเกิดฝนตก

การเปลี่ยนแปลง โพลาริเซชันของสัญญาณที่มีสาเหตุจากหยดฝน จะมีความสัมพันธ์กับการลดทอนที่เกิดขึ้นของสัญญาณในโพลาริเซชันร่วม ซึ่งในรูปที่ 4.7 เป็นตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง โพลาริเซชันอันเนื่องมาฝนในวันที่ 10 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2543

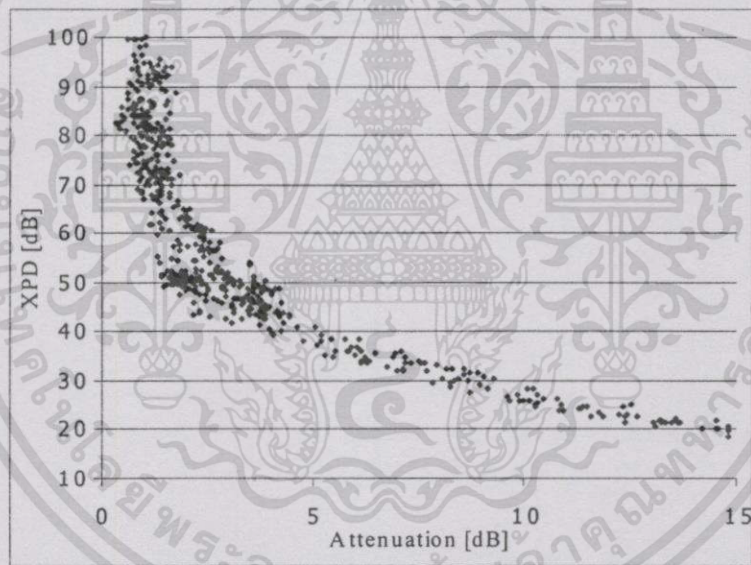
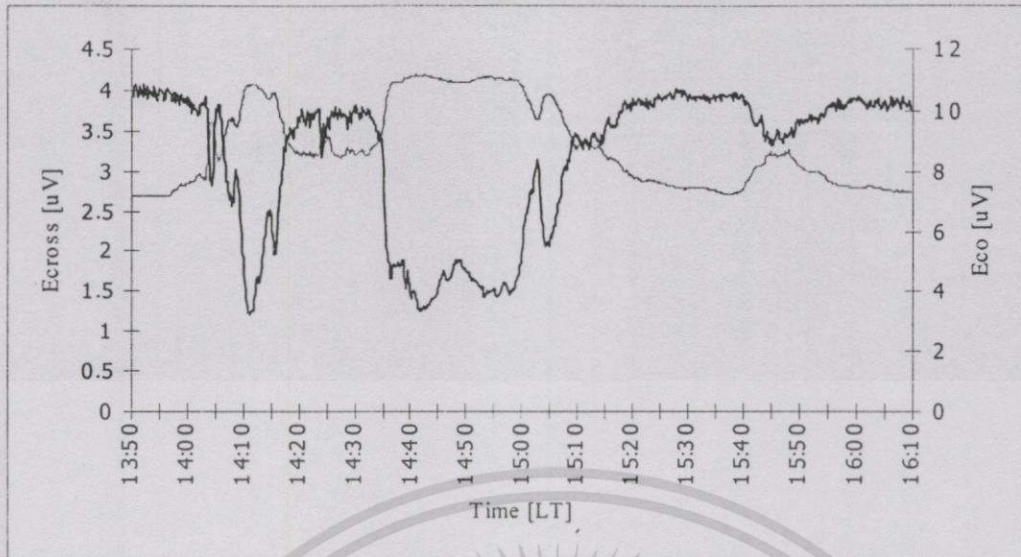
ซึ่งสิ่งที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจศึกษาก็คือการเปลี่ยนแปลง โพลาริเซชันของสัญญาณอันเนื่องมาฝน โดยจะทำการศึกษาระดับของการเกิดเทียบกับแบบจำลองต่างๆที่เคยมีผู้ศึกษาบ้างแล้วในเขตพื้นที่ที่มีภูมิอากาศแบบ Temperate ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองของ CCIR Chu SIM DHW และ EUT ซึ่งในแบบจำลองของ Chu และ SIM นั้นจะให้ผลใกล้เคียงกับแบบจำลองของ CCIR ดังนั้นในที่นี้จึงนำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่แตกต่างกันออกไปเพียง 3 แบบจำลองคือแบบจำลอง CCIR DHW และ EUT รายละเอียดผลการทดลองที่ได้จากการทดลองและประมวลผลแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นว่าค่าระดับการเปลี่ยน โพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองนั้นส่วนใหญ่มีแนวโน้มว่าจะเป็นไปตามแบบจำลองของ EUT ดังนั้นเมื่อใช้ระดับของแบบจำลอง EUT นี้เป็นระดับอ้างอิง จะพบว่า การเปลี่ยนแปลง โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งของการเกิดฝนตกแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ 1.) การตกของฝนที่ทำให้ระดับการเกิด XPD สูงกว่าแบบจำลองอ้างอิง ซึ่งมักจะเกิดในตอนต้นของฤดูพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน 2.) การตกของฝนที่ทำให้ระดับการเกิด XPD ใกล้เคียงกับแบบจำลองอ้างอิง ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะพบโดยทั่วไปเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะช่วงกลางฤดูตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงตุลาคม และ 3.) การตกของฝนที่ทำให้ระดับการเกิด XPD ต่ำกว่าแบบจำลองอ้างอิง ปรากฏการณ์ลักษณะนี้พบเห็นได้ไม่มากนักและมักจะเกิดขึ้นในบางช่วงของกลางฤดูและปลายฤดู



รูปที่ 4.6 ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันที่เป็นผลจากเกร็ดน้ำแข็ง

(ก) ค่าระดับสัญญาณ โพลาริเซชันร่วมกับ โพลาริเซชันไขว้

(ข) ความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างอิสระต่อกันระหว่างค่า XPD กับการลดทอนในโพลาริเซชันร่วม

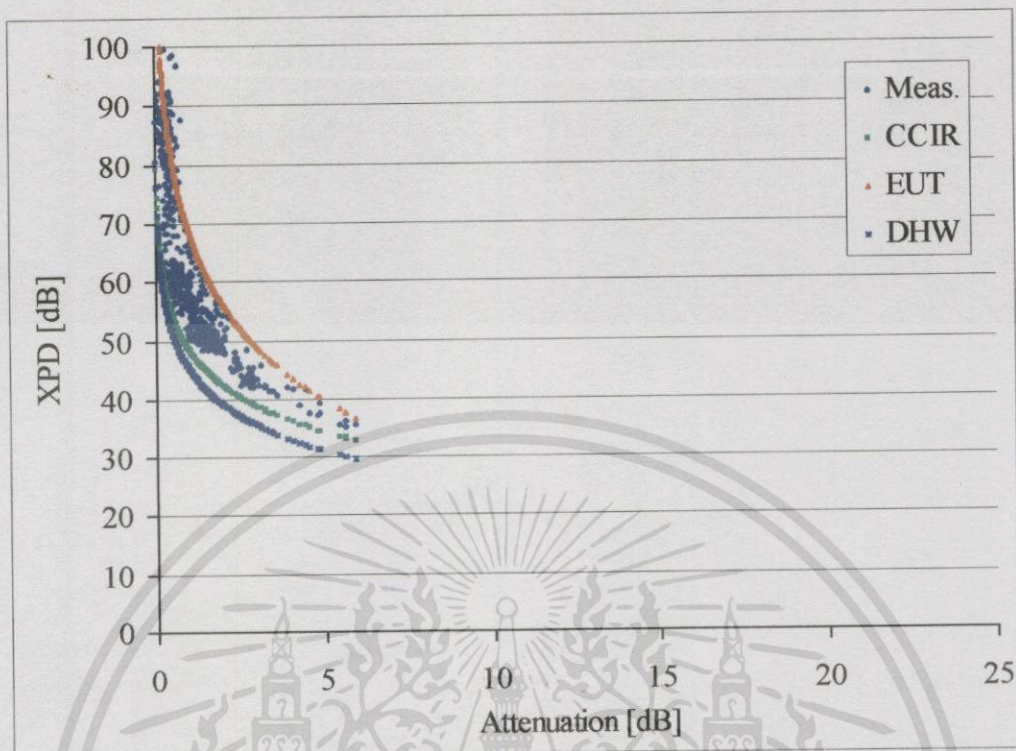


รูปที่ 4.7 ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันที่เป็นผลจากหยดฝน

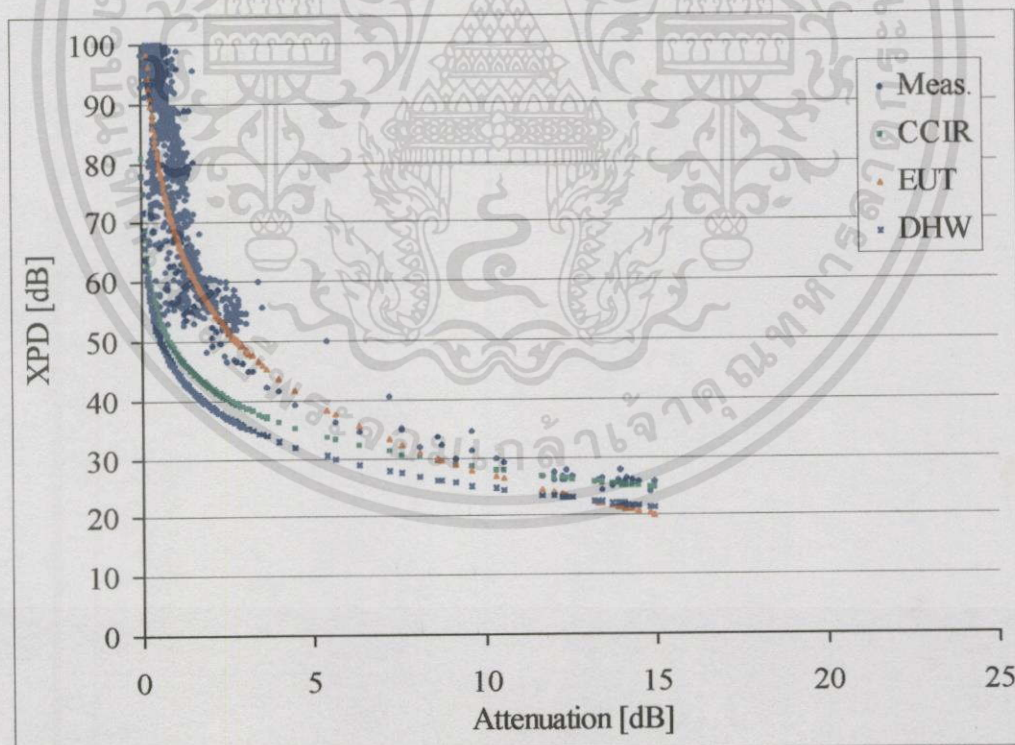
(ก) ค่าระดับสัญญาณโพลาไรซ์เซชันร่วมกับโพลาไรซ์เซชันไขว้

(ข) ความสัมพันธ์กันระหว่างค่า XPD กับการลดทอนในโพลาไรซ์เซชันร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



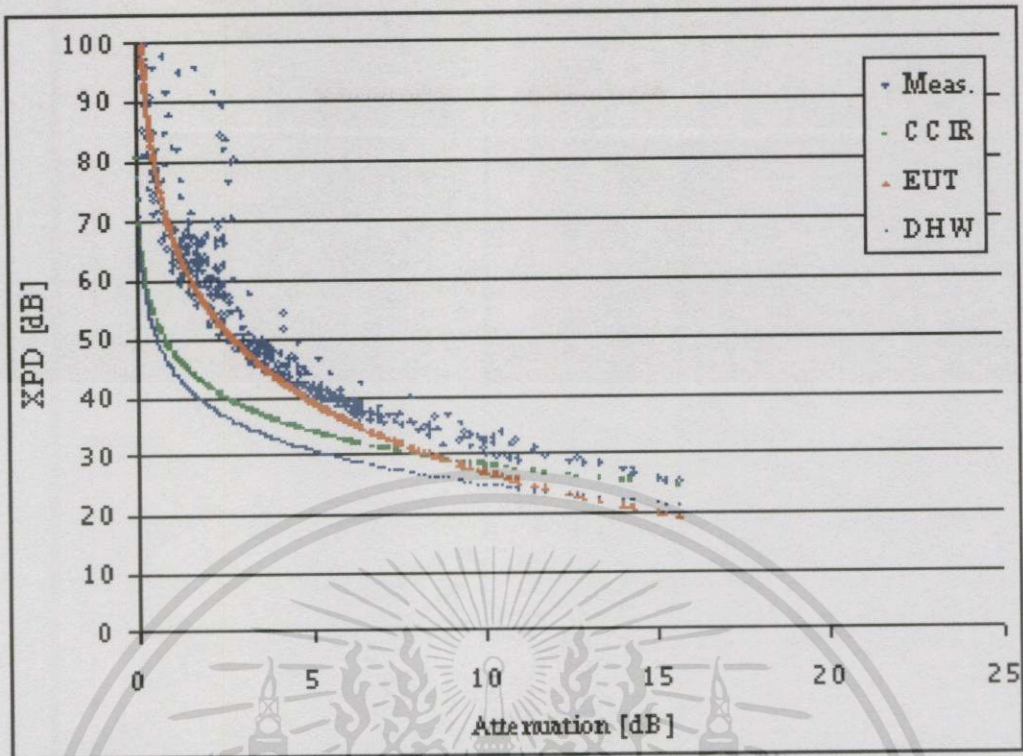
(ก) 11 เมษายน 2543



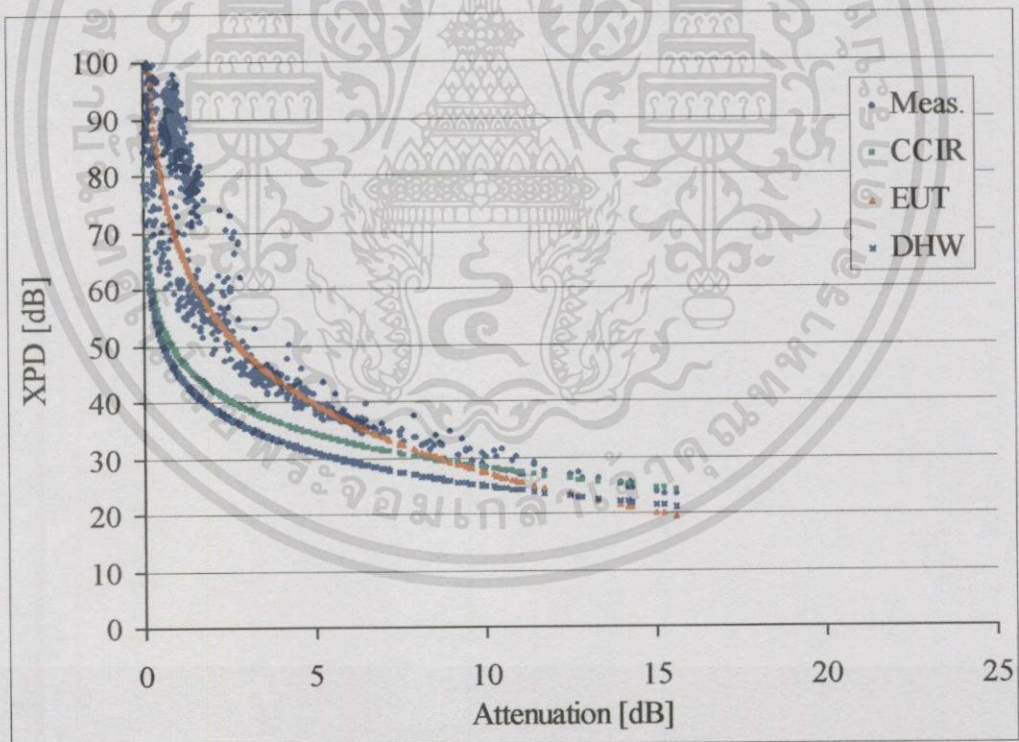
(ข) 13 เมษายน 2543

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง XPD กับการลดทอนของสัญญาณ โดยเทียบกับแบบจำลอง CCIR EUT และ DHW ในขณะเกิดฝนตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



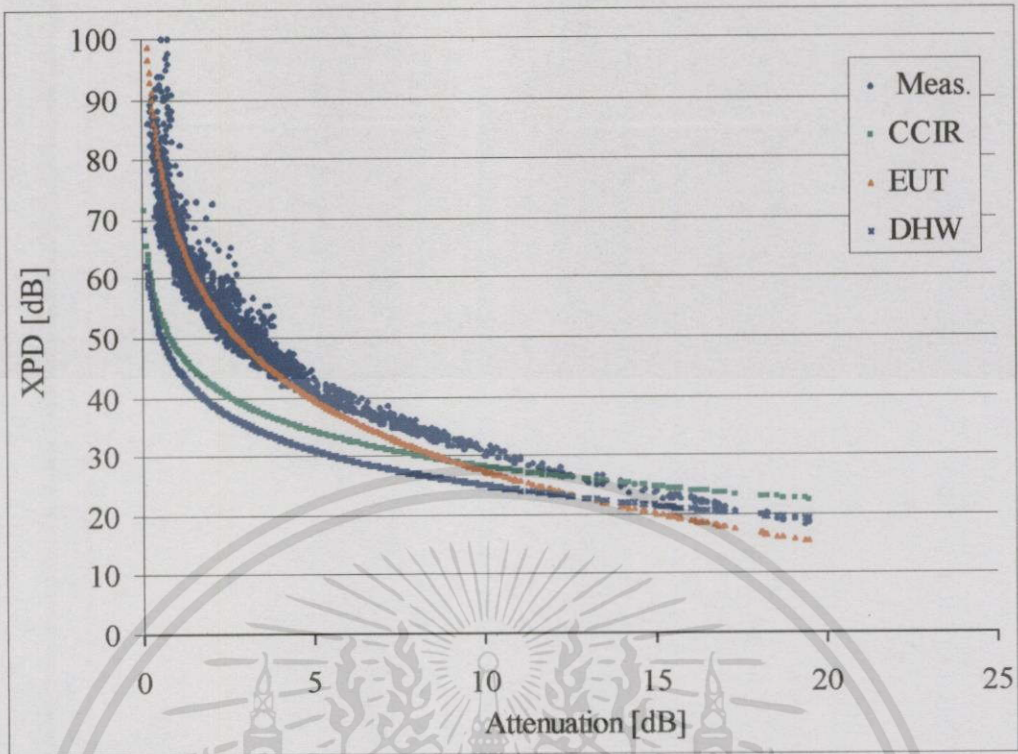
(ค) 14 เมษายน 2543 เวลา 15.20 น.



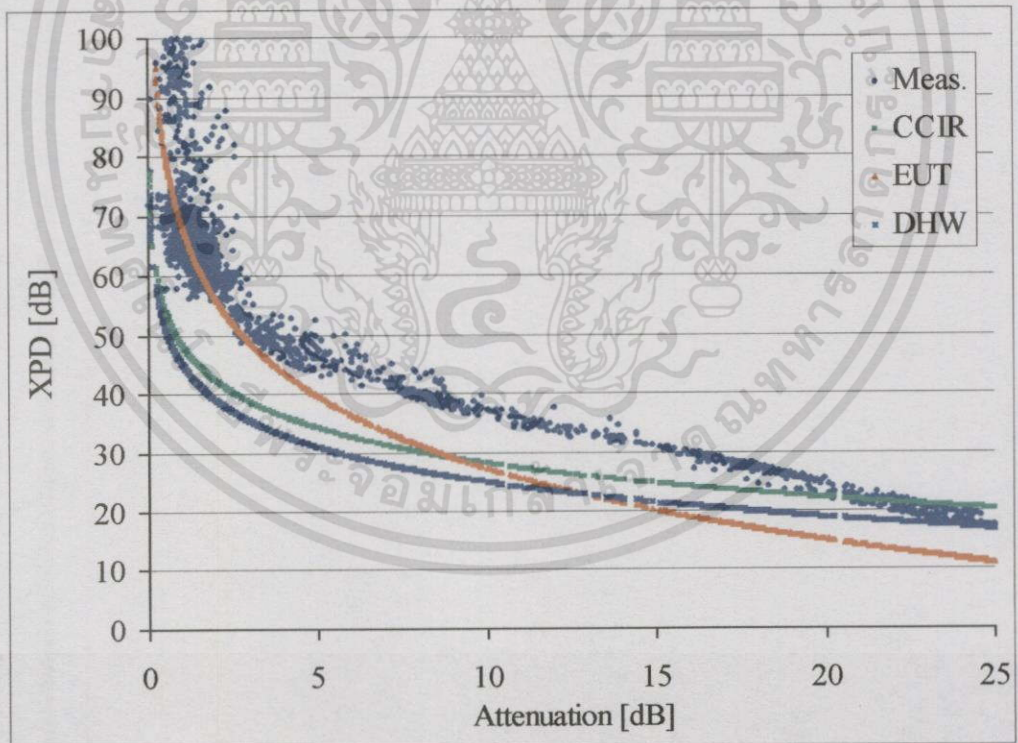
(ง) 14 เมษายน 2543 เวลา 19.40 น.

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



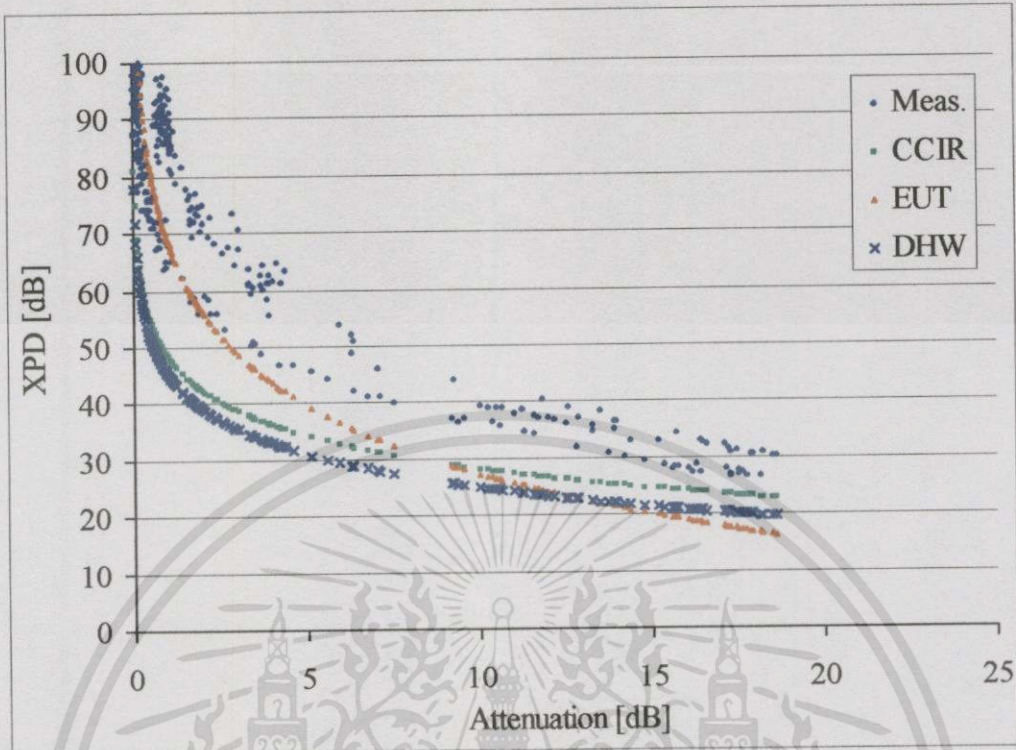
(จ) 15 เมษายน 2543



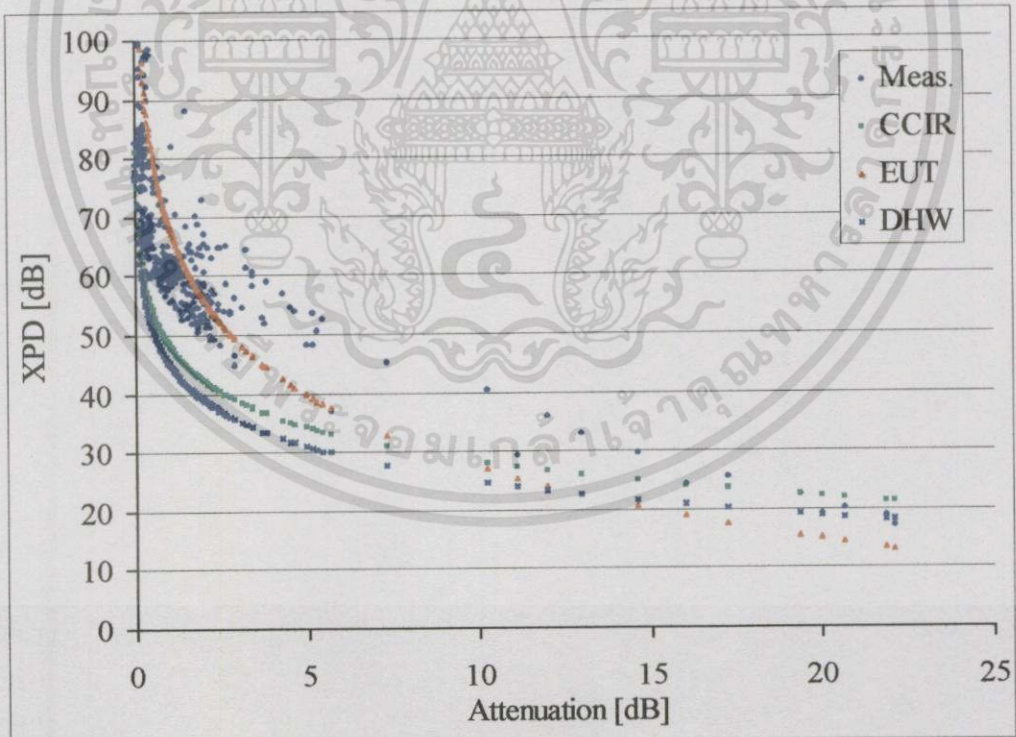
(ค) 4 พฤษภาคม 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



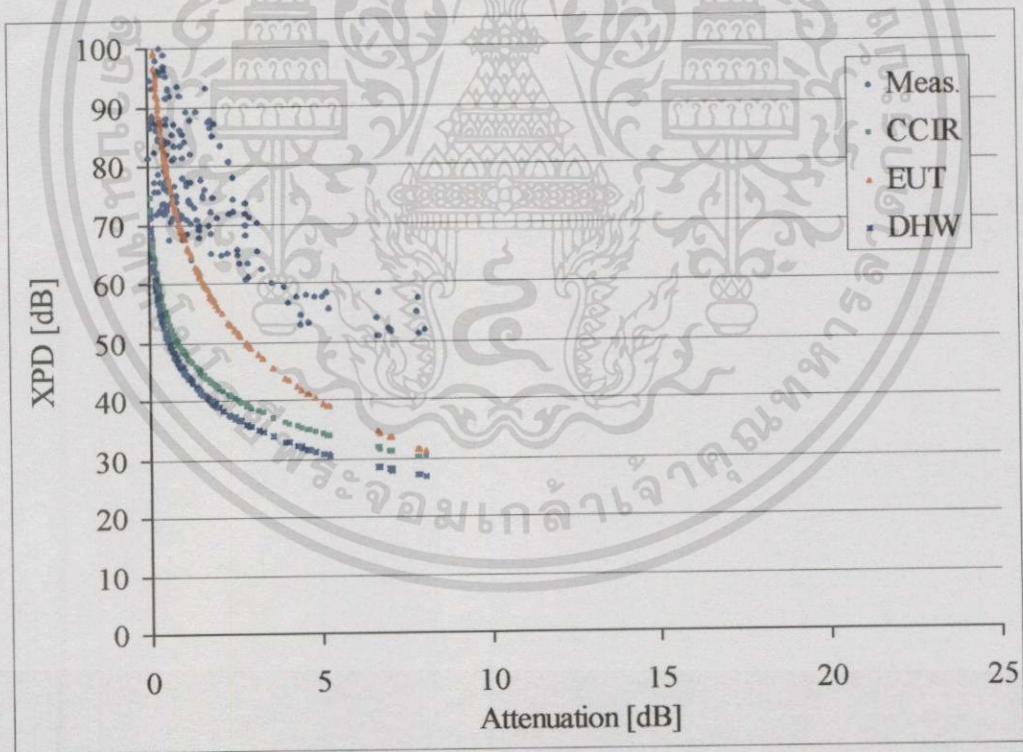
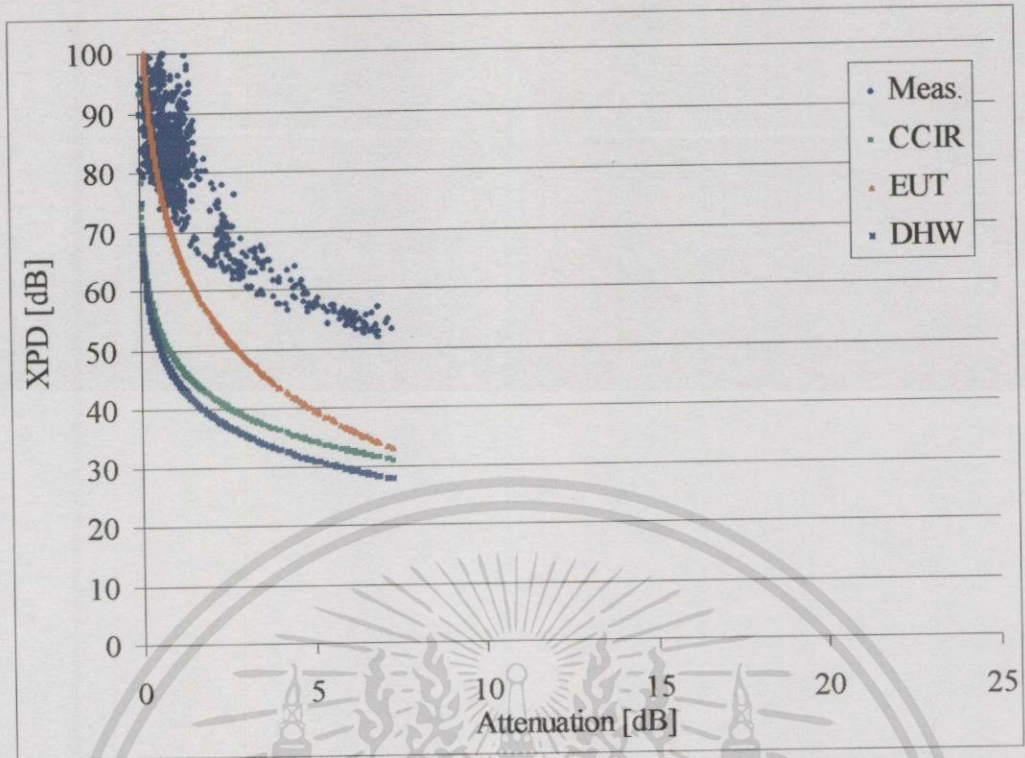
(ข) 14 พฤษภาคม 2543 เวลา 15.20 น.



(ช) 14 พฤษภาคม 2543 เวลา 20.30 น.

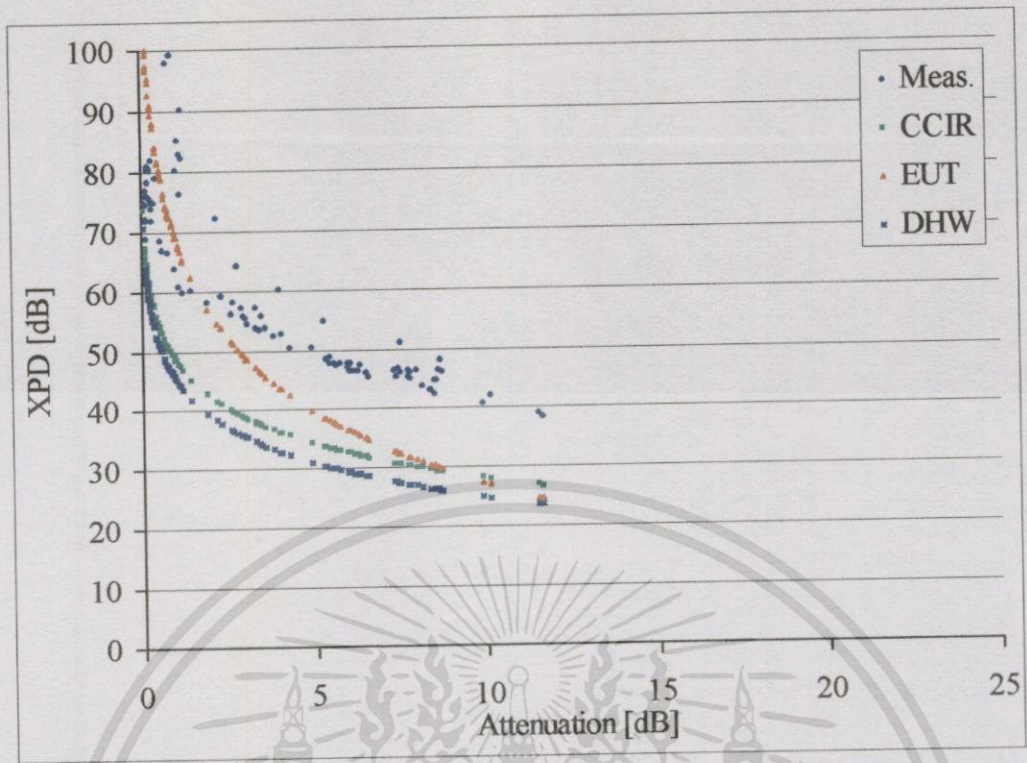
รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

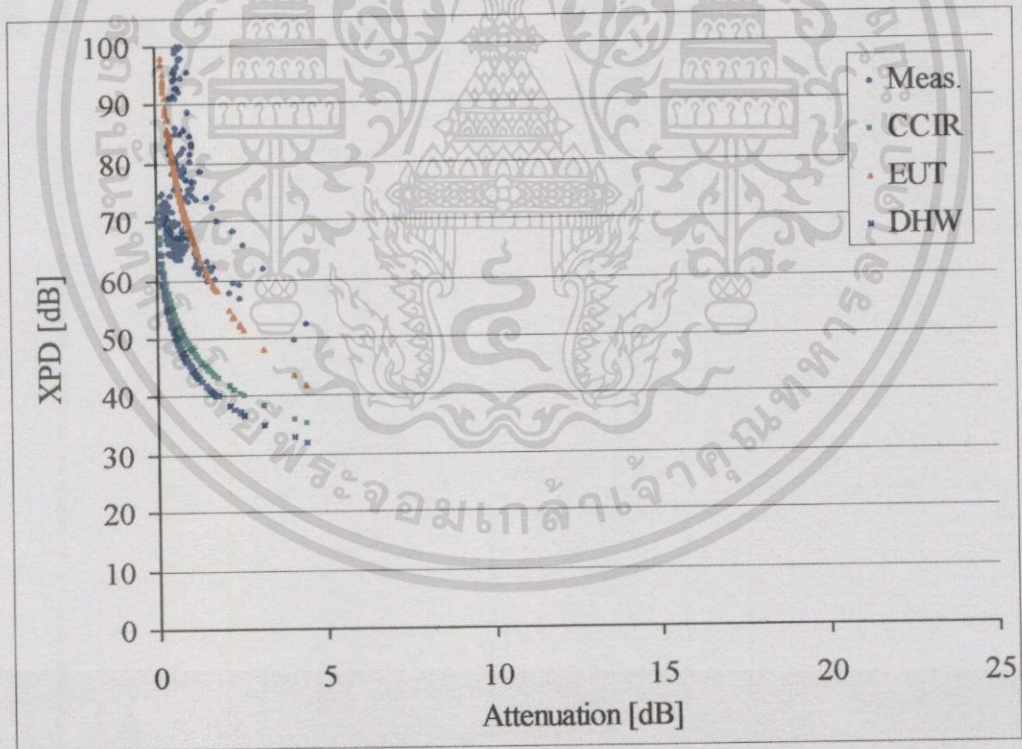


รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



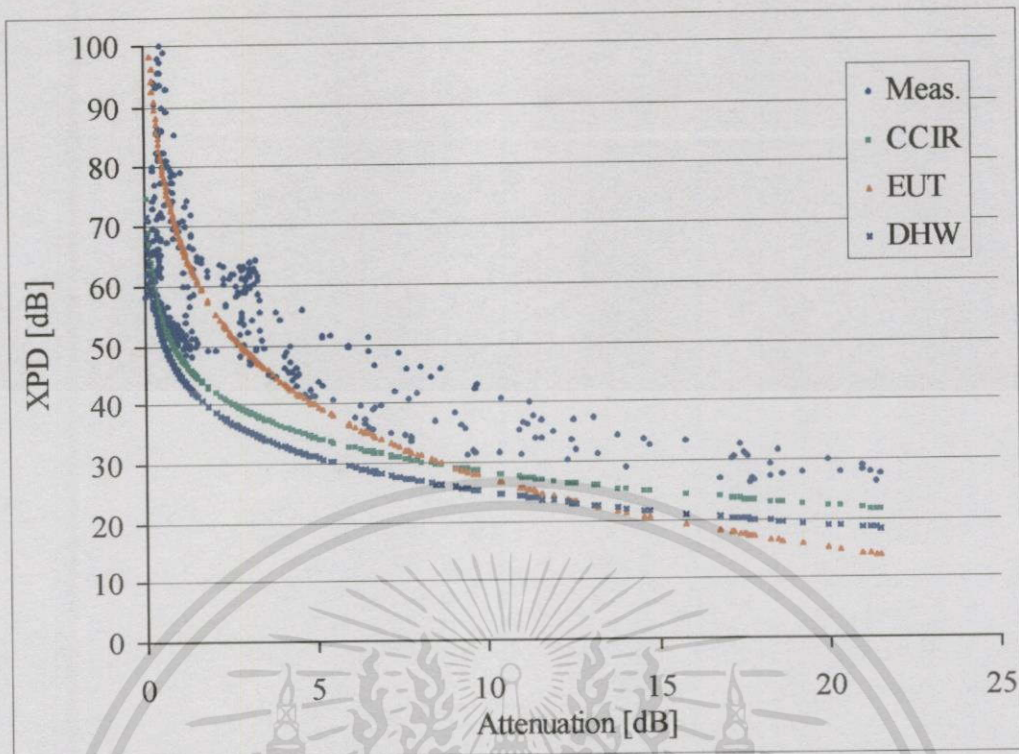
(ก) 16 พฤษภาคม 2543 เวลา 8.10 น.



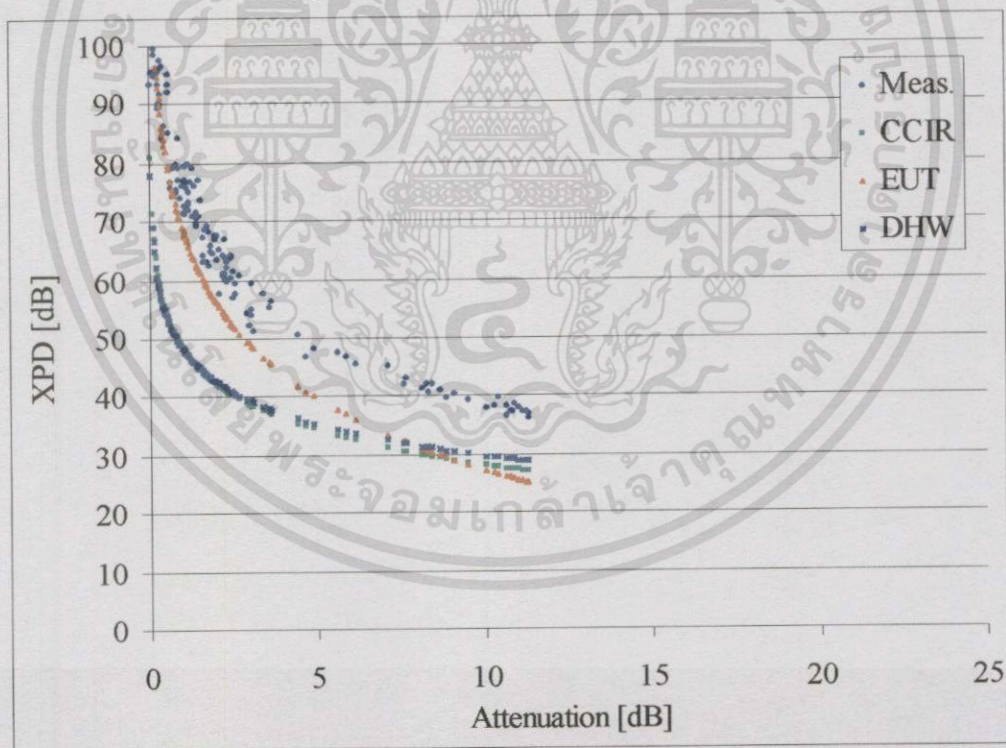
(ข) 16 พฤษภาคม 2543 เวลา 15.04 น.

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



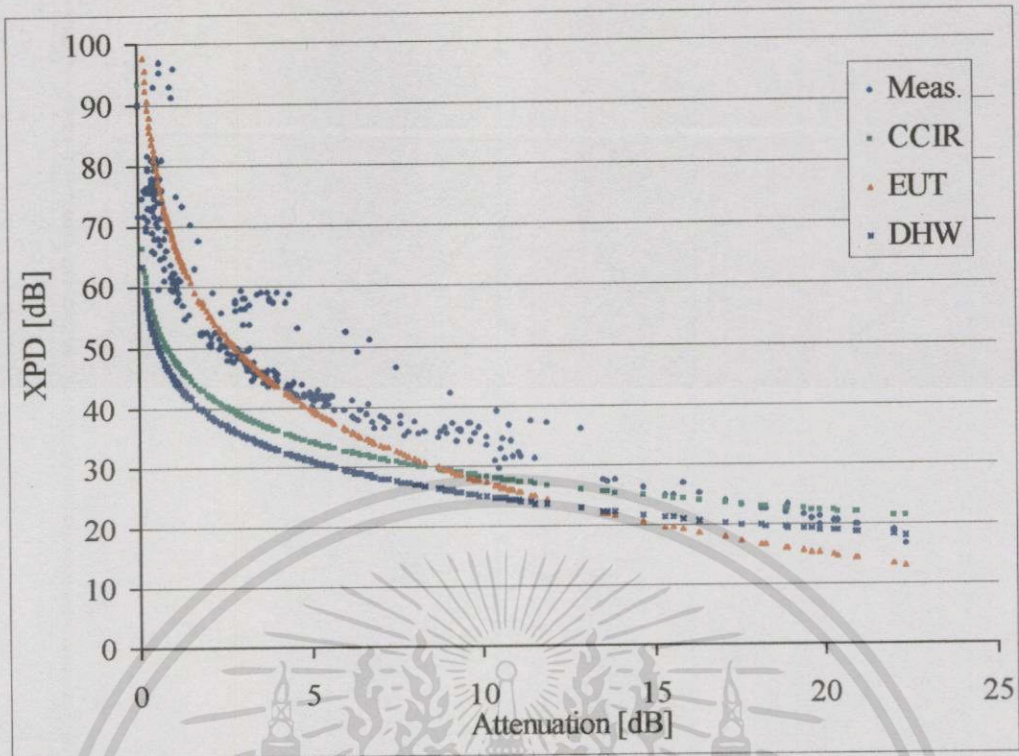
(จ) 16 พฤษภาคม 2543 เวลา 21.45 น.



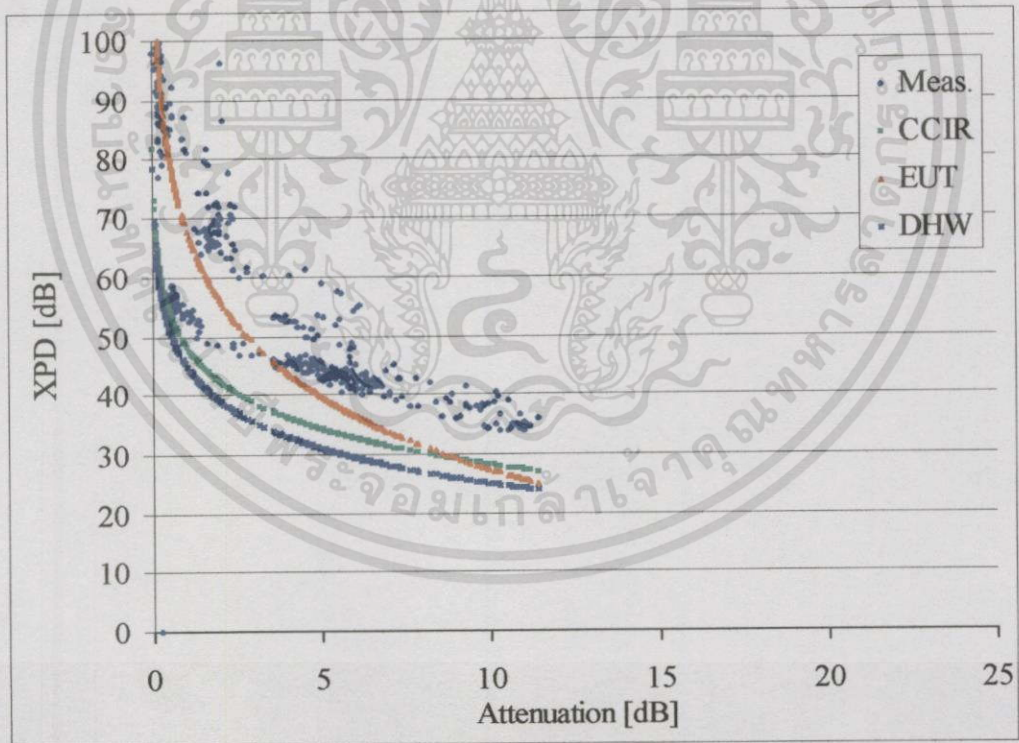
(จ) 27 พฤษภาคม 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



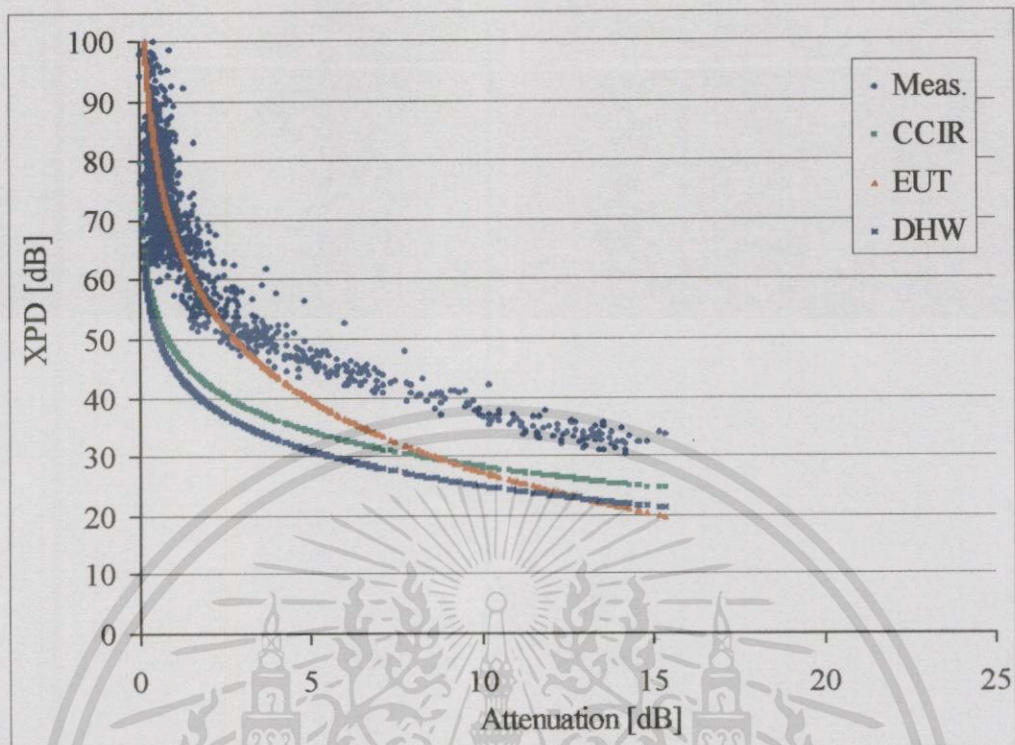
(ณ) 31 พฤษภาคม 2543



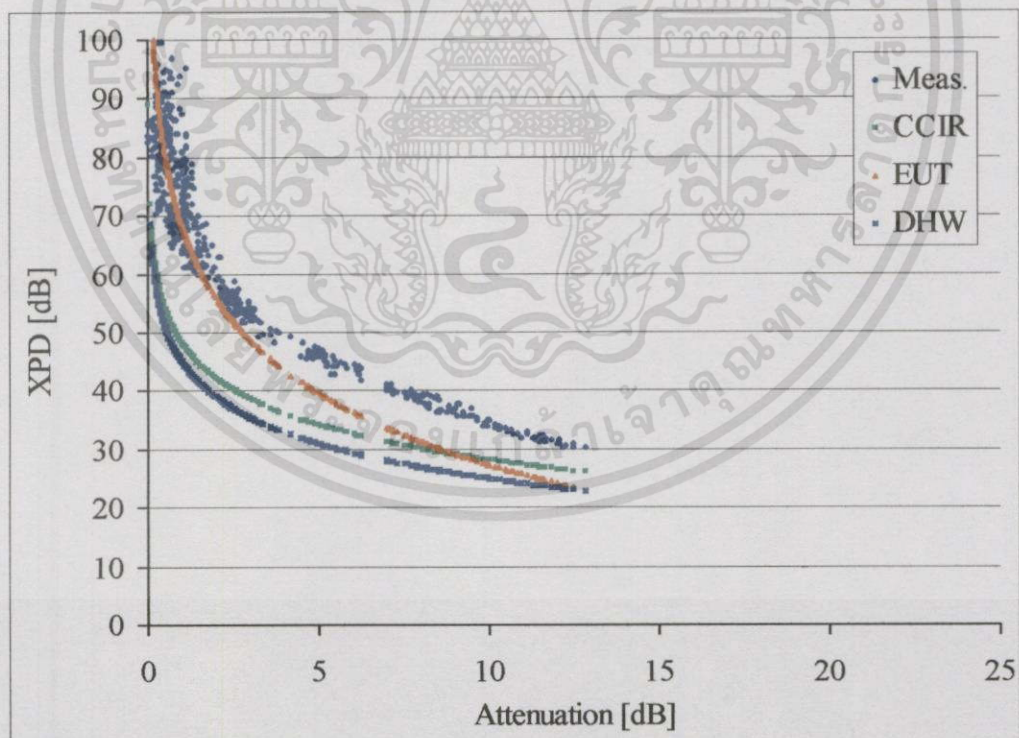
(ณ) 3 มิถุนายน 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



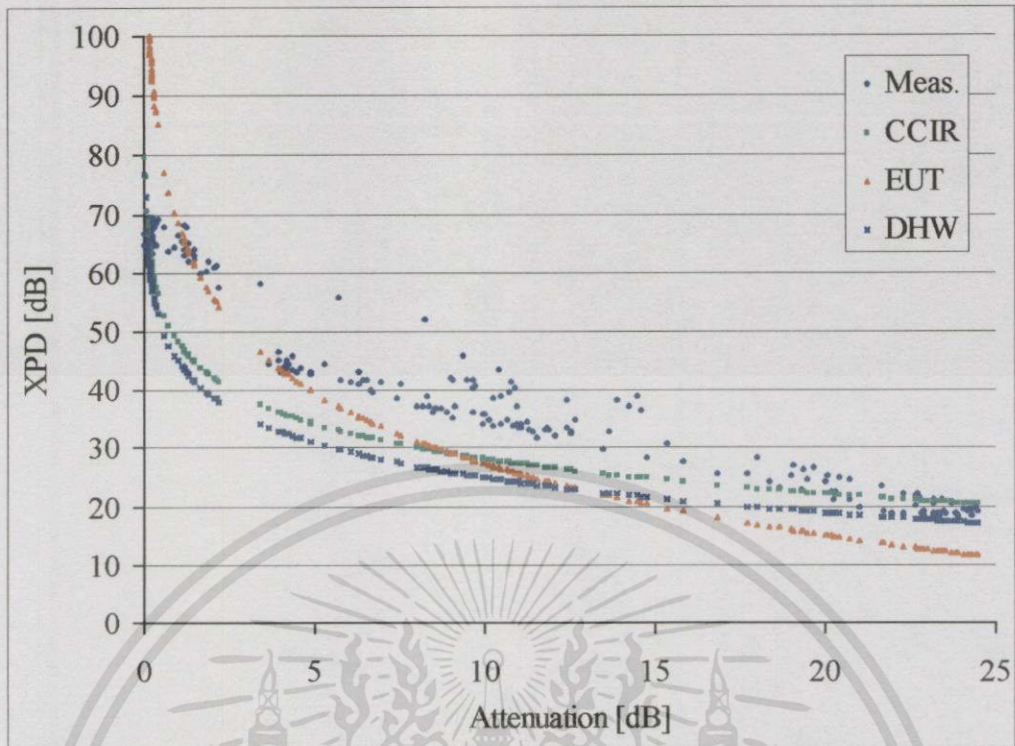
(ค) 4 มิถุนายน 2543 เวลา 17.15 น.



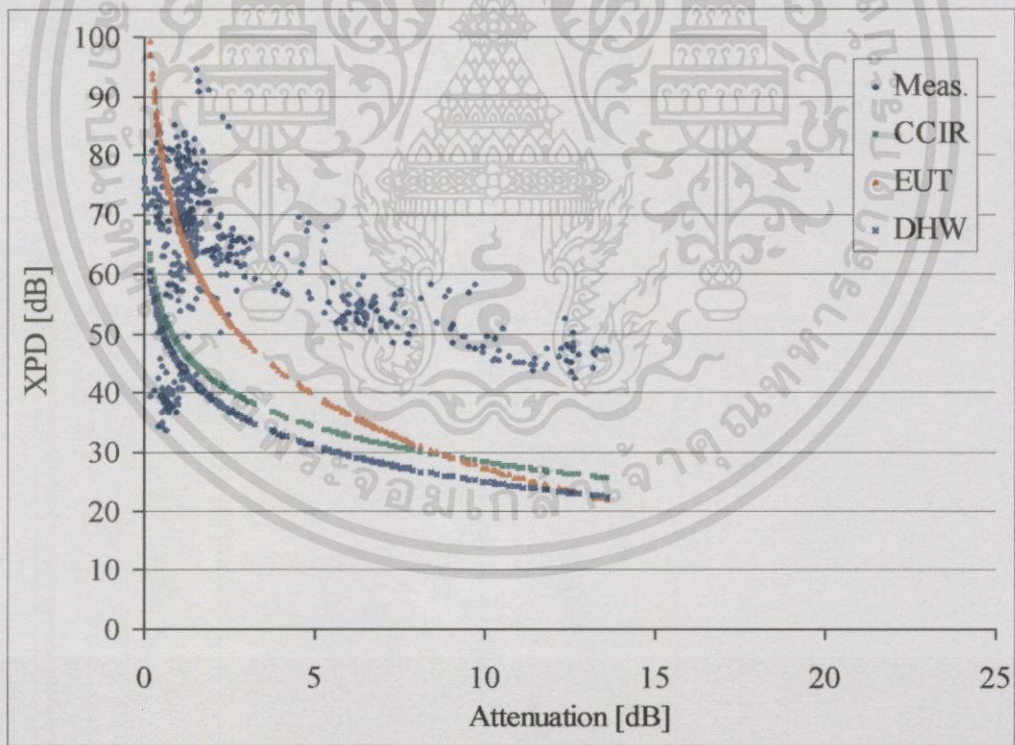
(ค) 4 มิถุนายน 2543 เวลา 21.45 น.

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



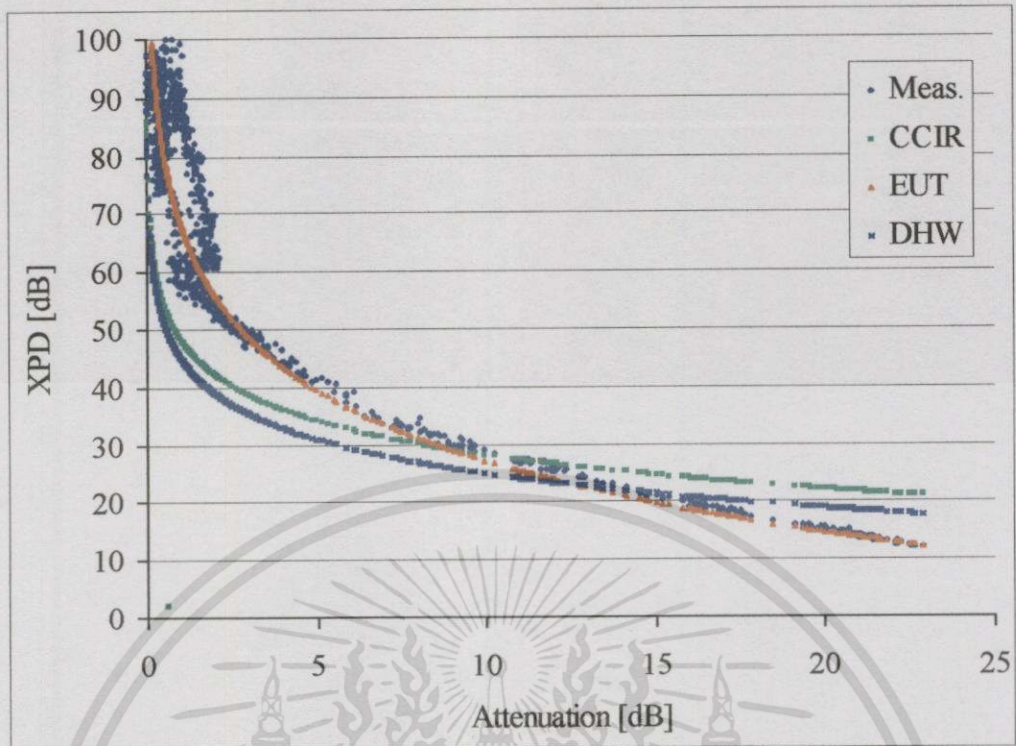
(ก) 5 มิถุนายน 2543



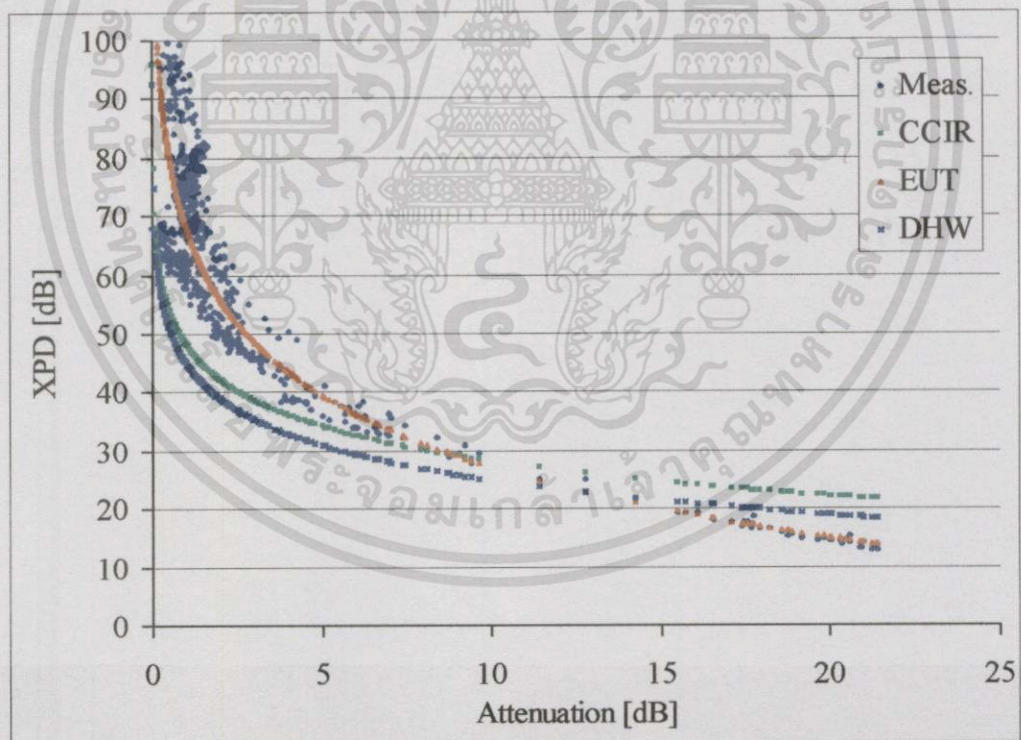
(ท) 21 มิถุนายน 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



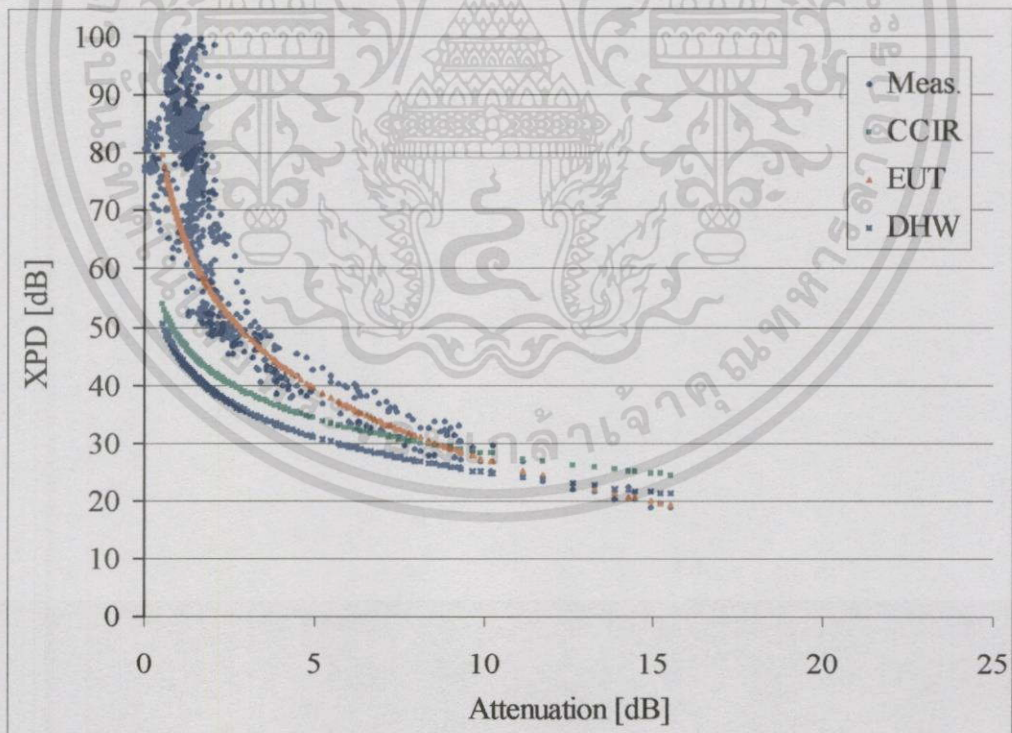
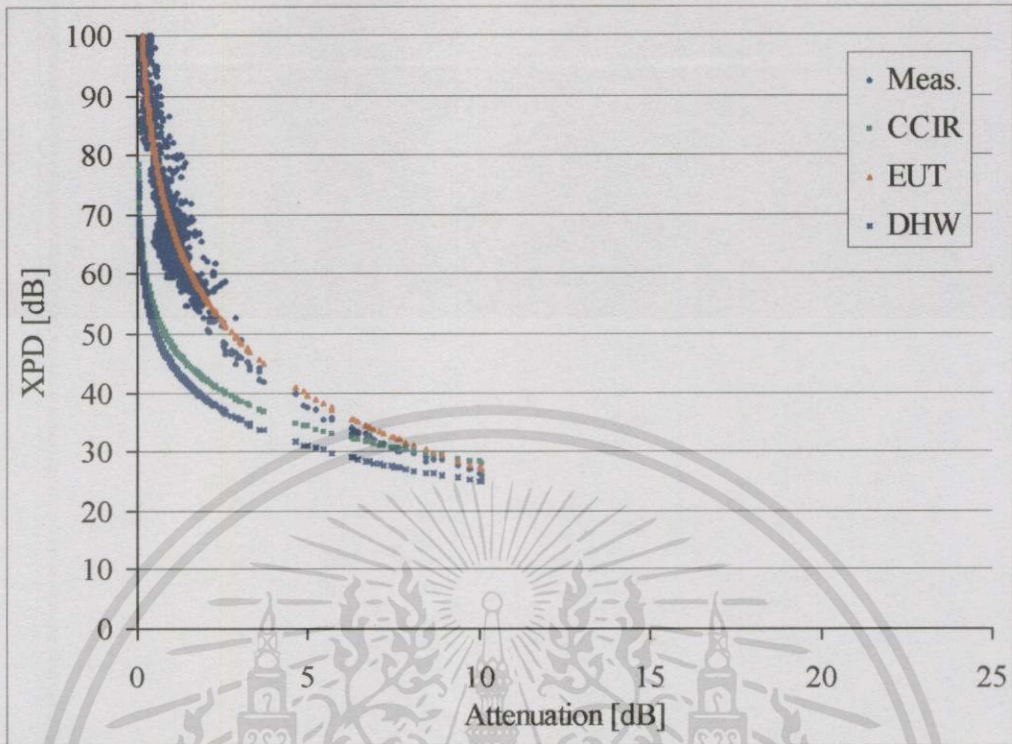
(ข) 18 สิงหาคม 2543



(น) 19 สิงหาคม 2543

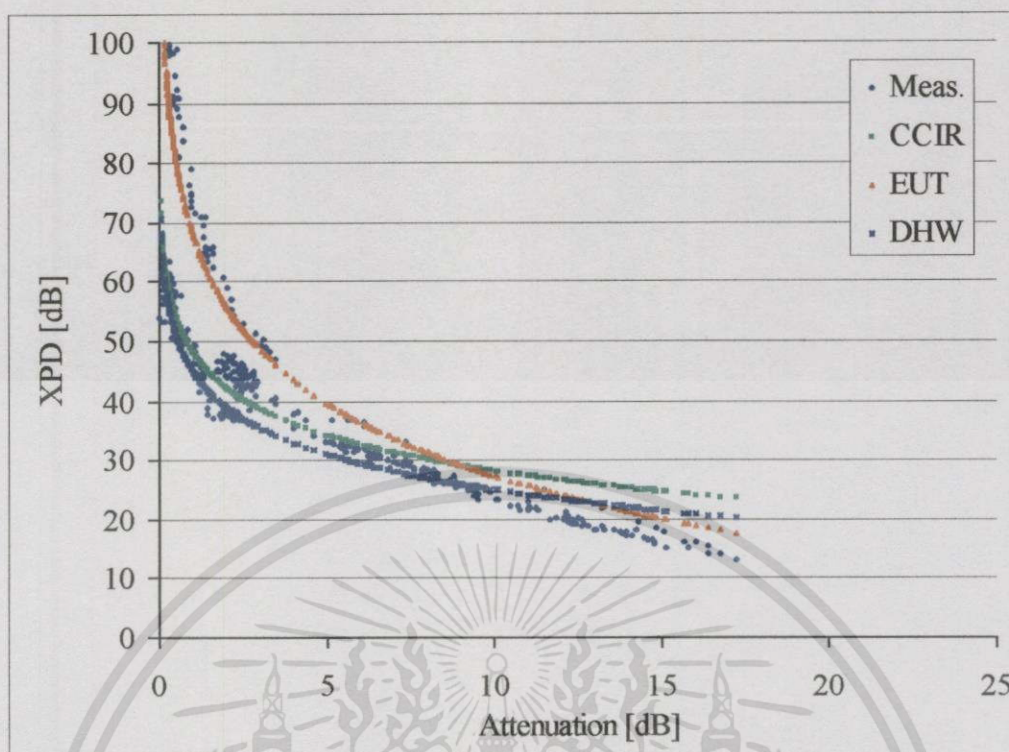
รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

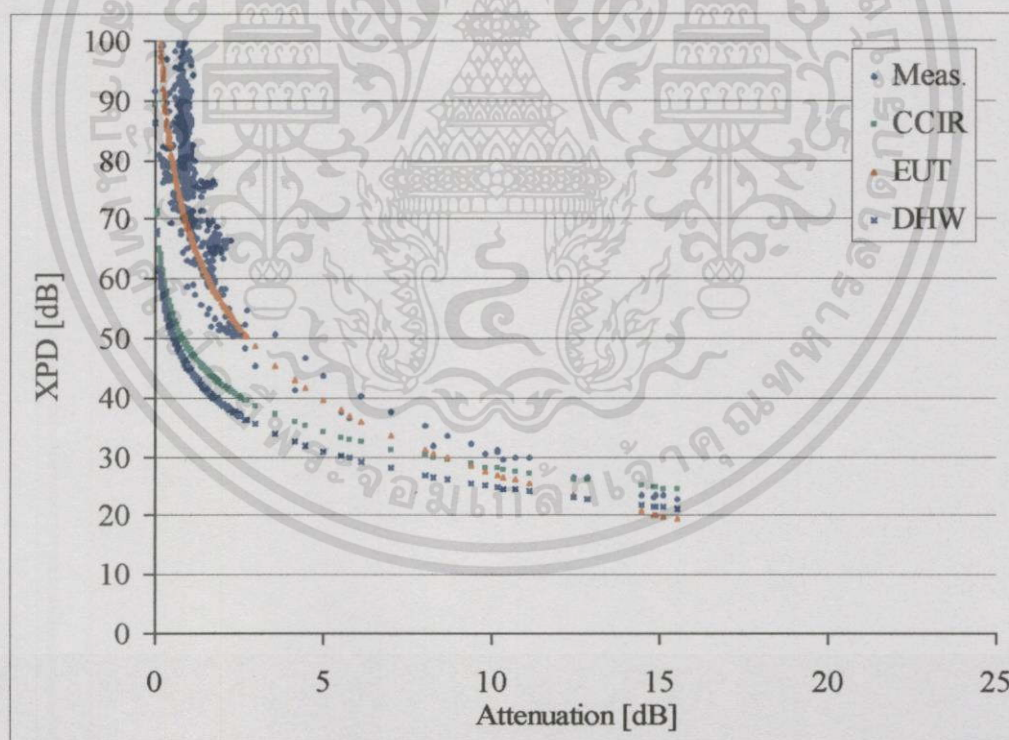


รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



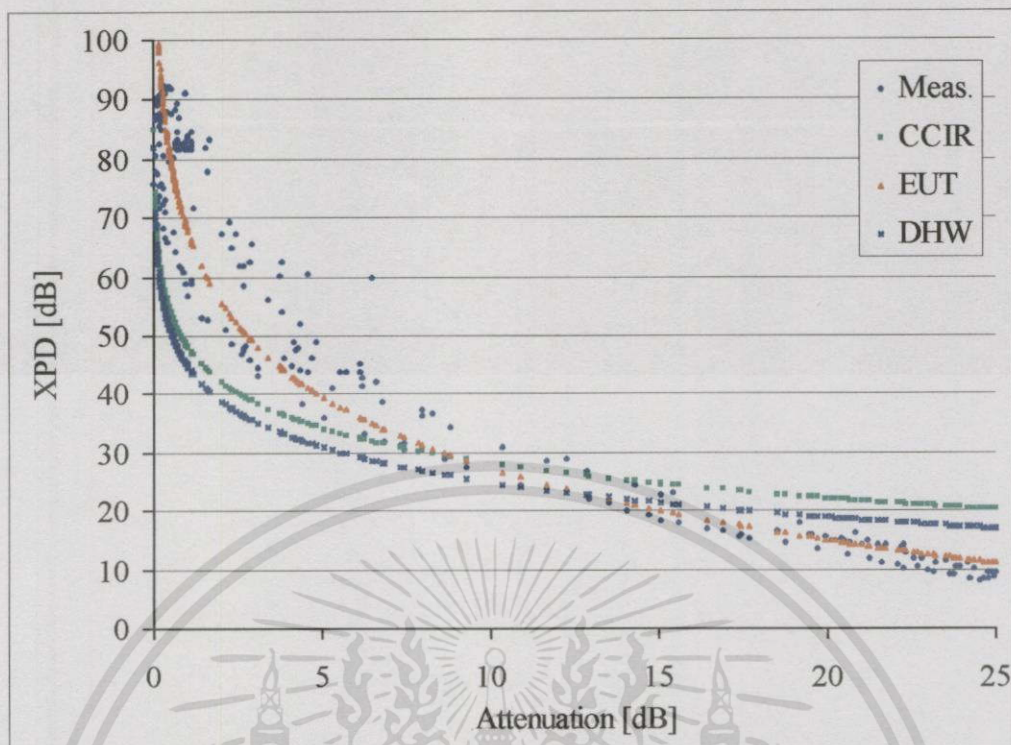
(ก) 29 สิงหาคม 2543



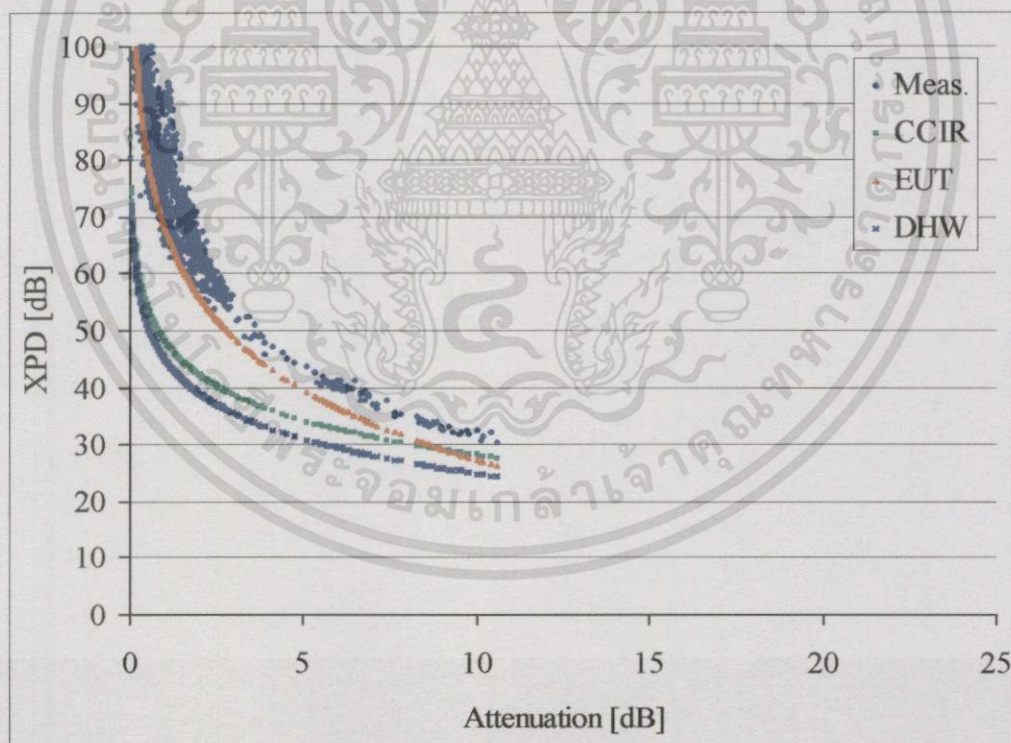
(ข) 31 สิงหาคม 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



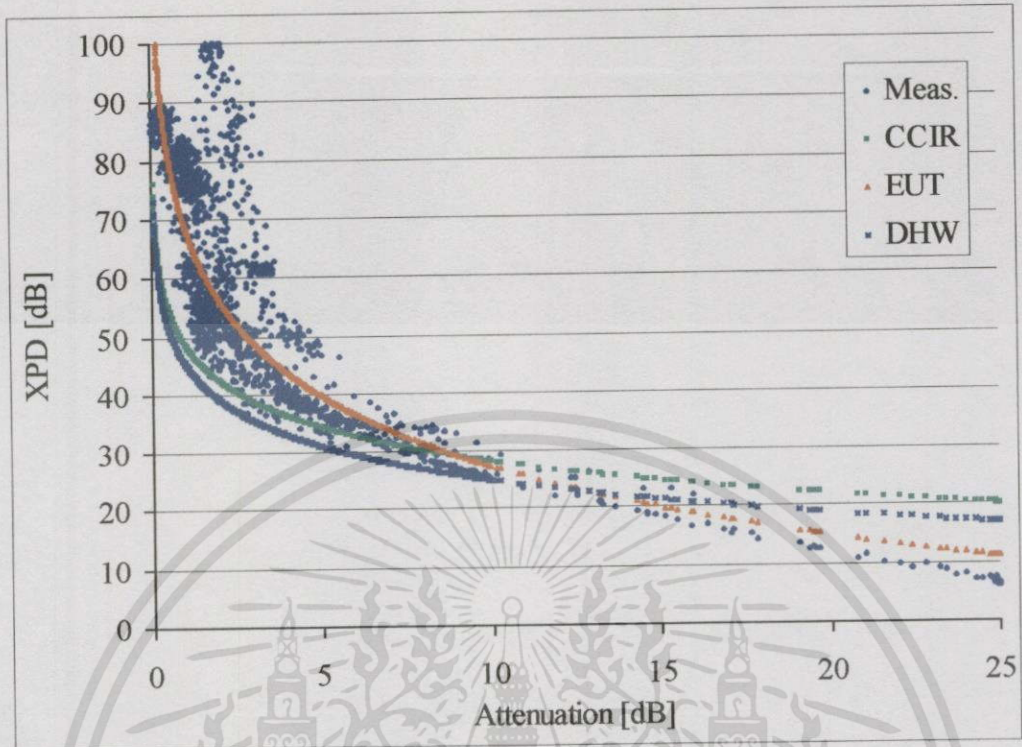
(จ) 24 กันยายน 2543



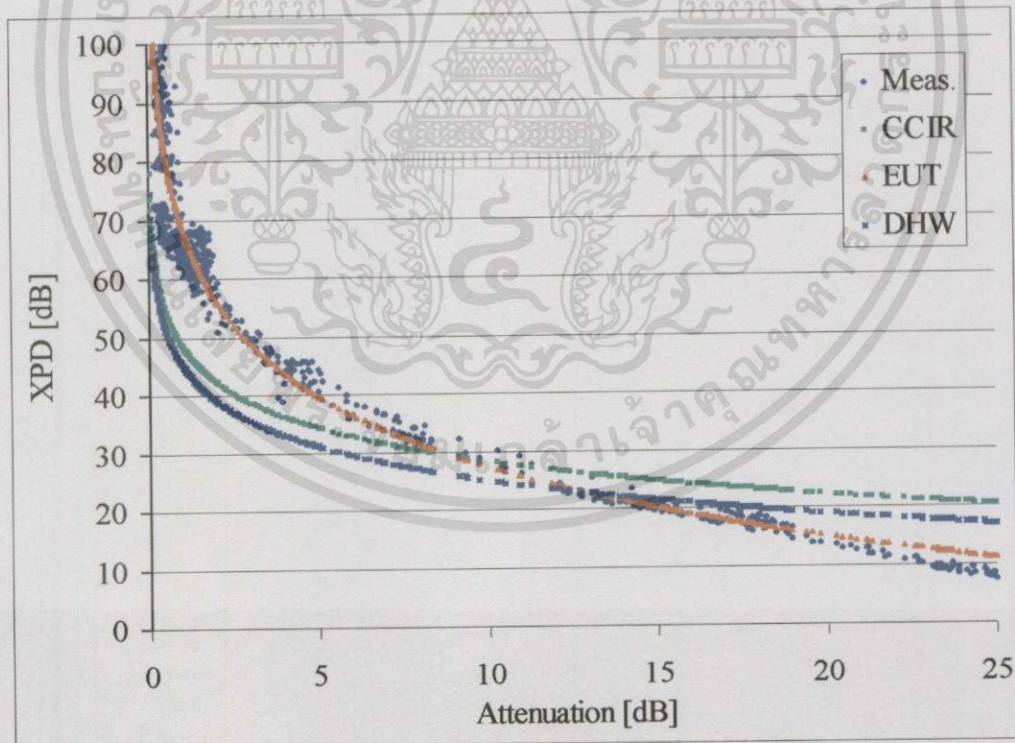
(ฉ) 27 กันยายน 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



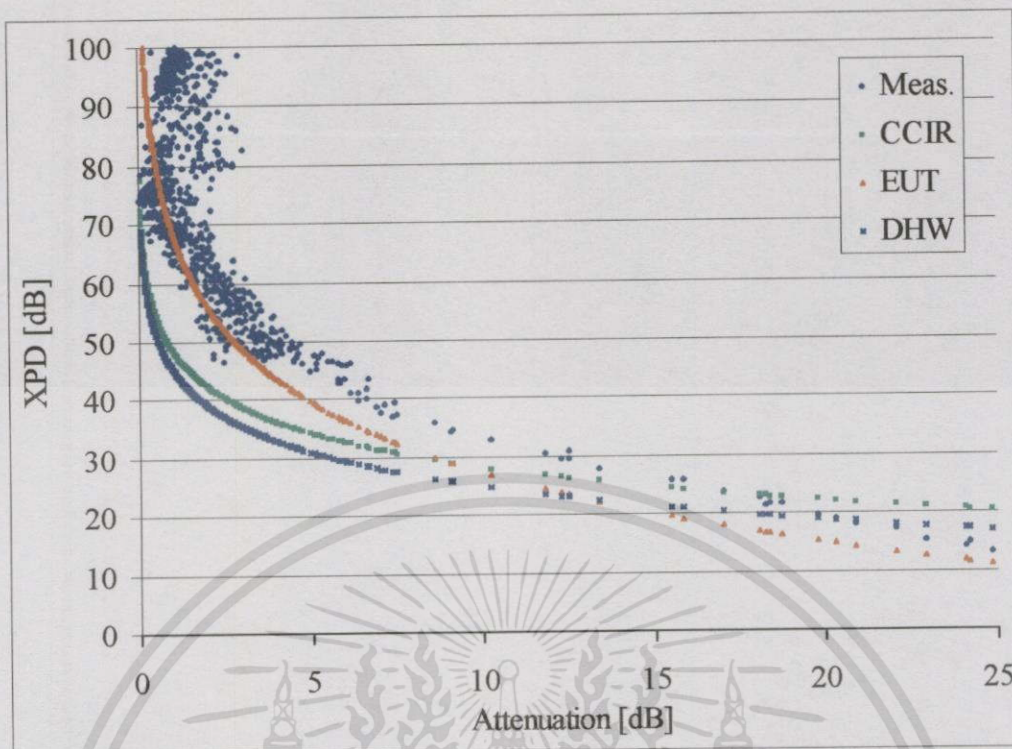
(ก) 3 ตุลาคม 2543



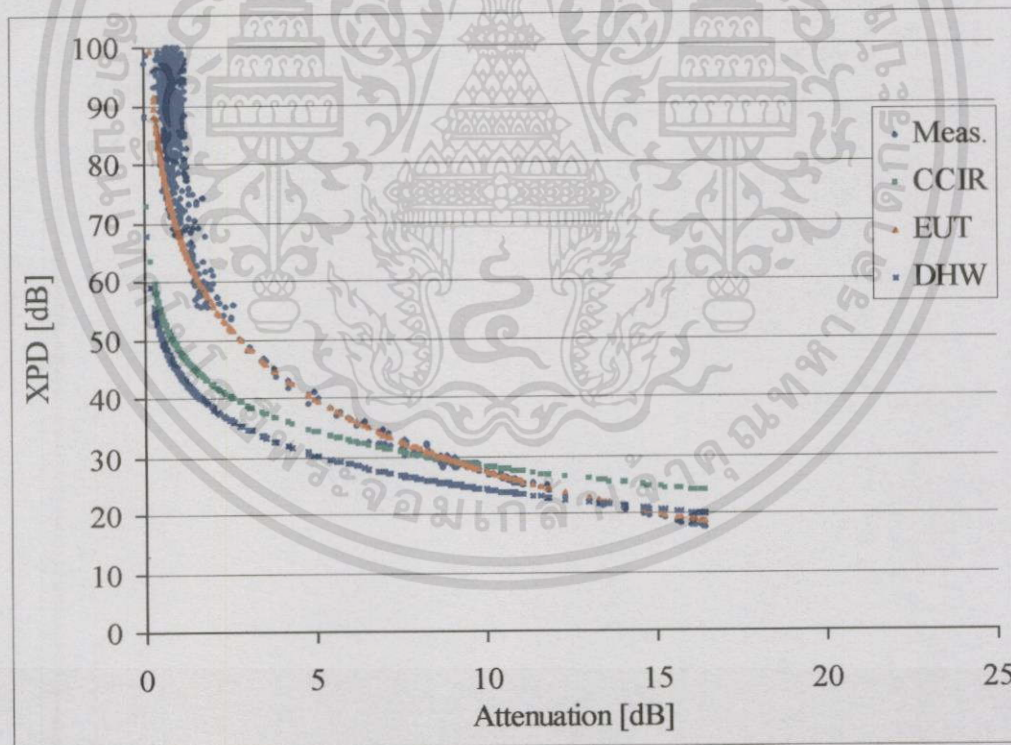
(ม) 4 ตุลาคม 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



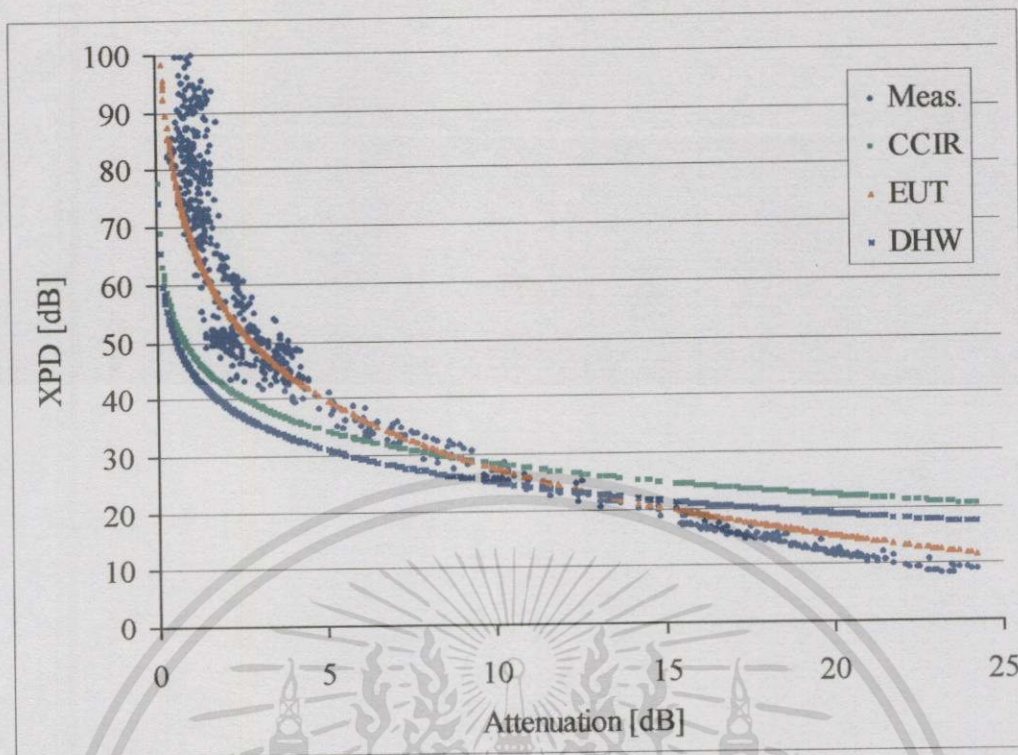
(ข) 7 ตุลาคม 2543



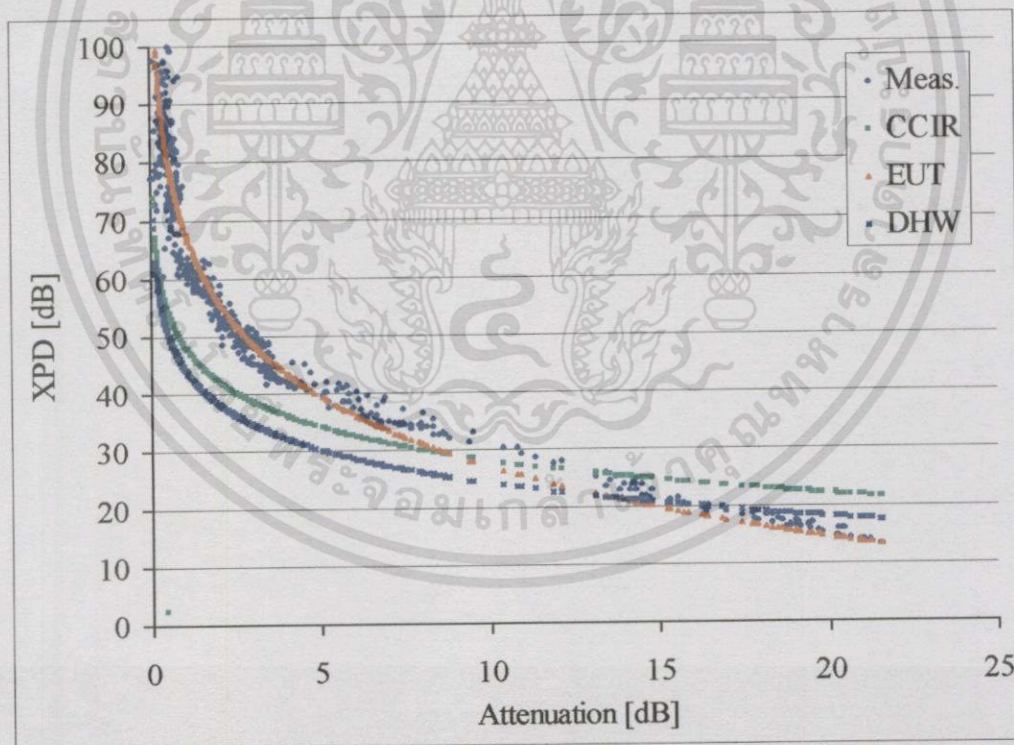
(ร) 8 ตุลาคม 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



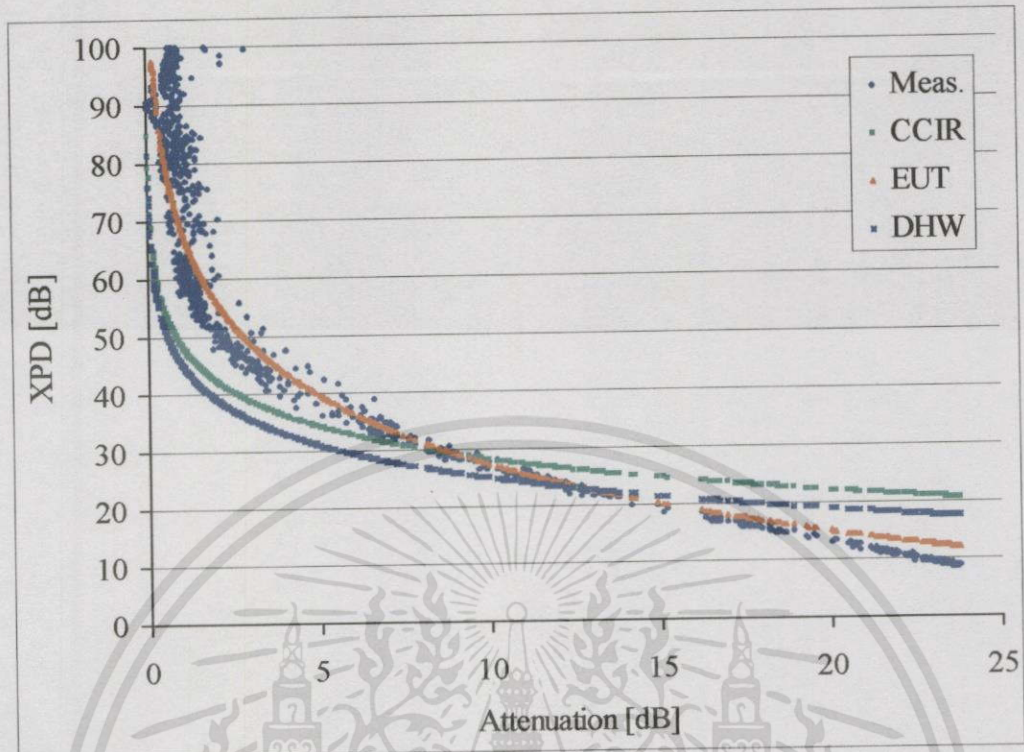
(ก) 10 ตุลาคม 2543



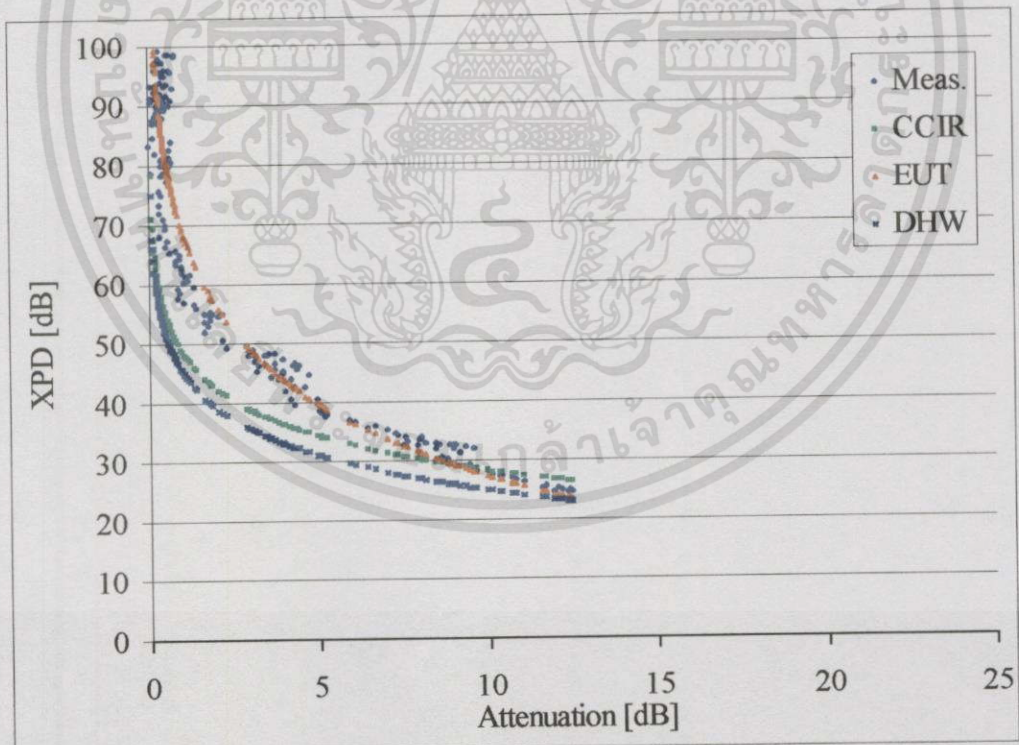
(ข) 13 ตุลาคม 2543

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



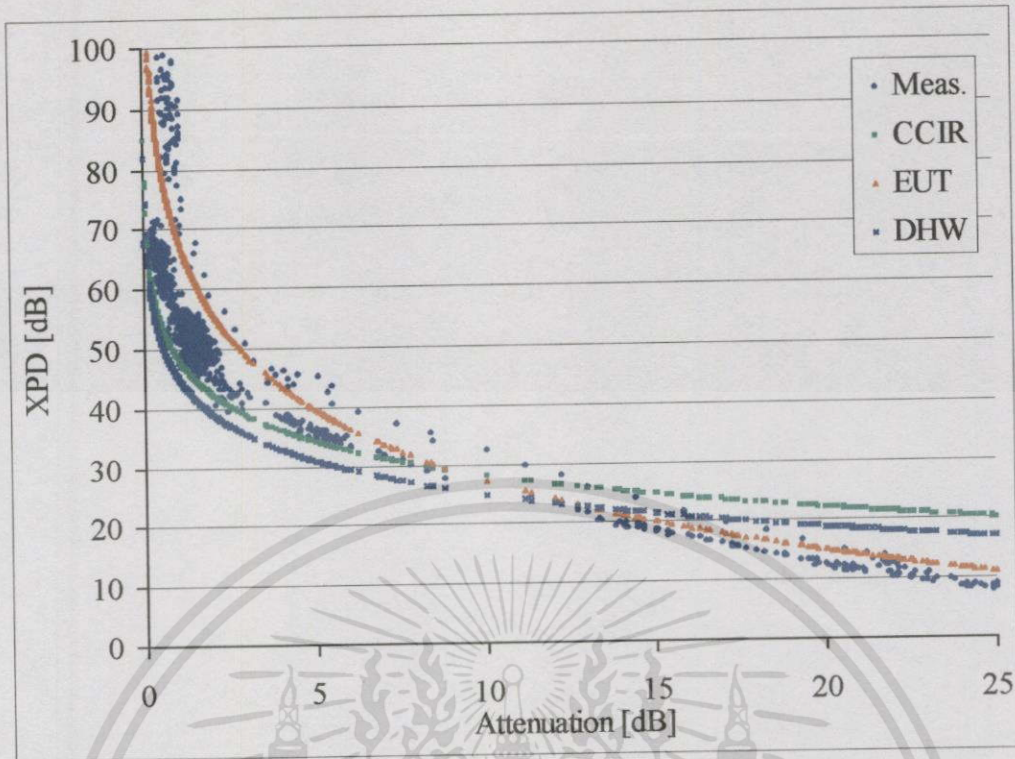
(ค) 14 ตุลาคม 2543



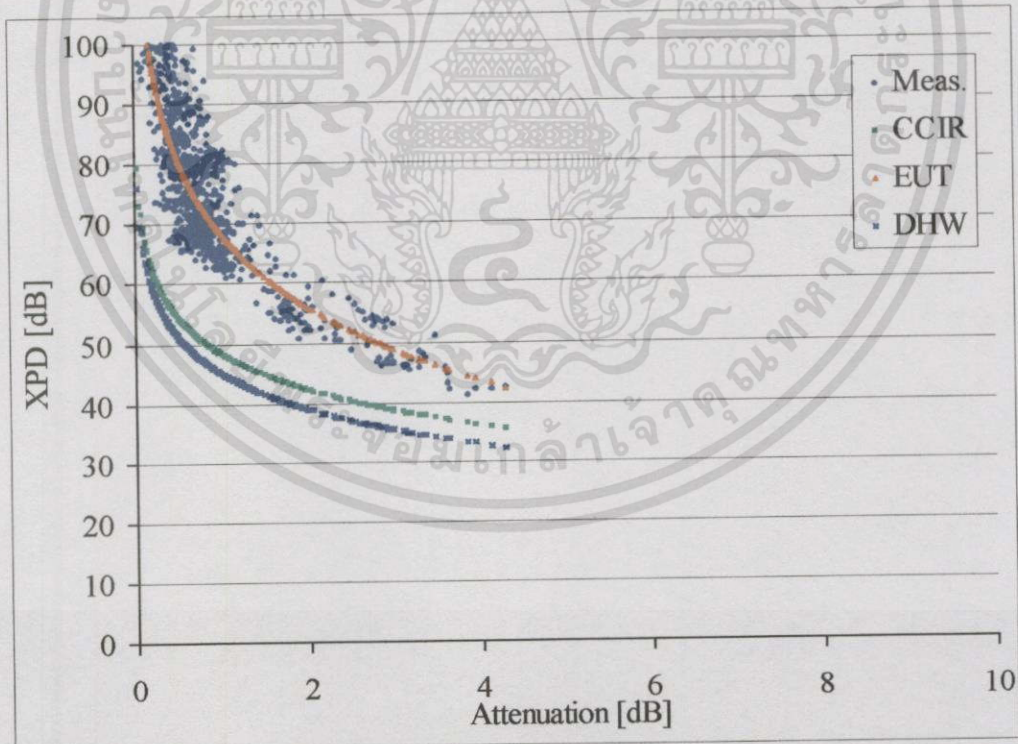
(ข) 15 ตุลาคม 2543 เวลา 23.02 น.

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 15 ตุลาคม 2543 เวลา 05.15 น.



(ข) 16 ตุลาคม 2543 เวลา 07.50 น.

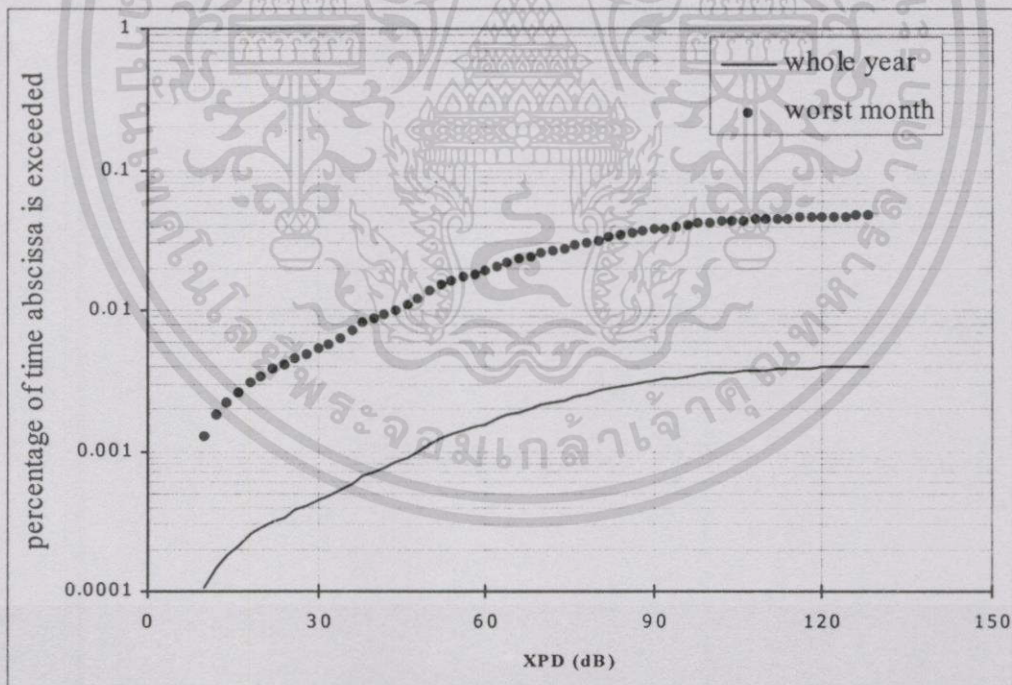
รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลทางสถิติของระดับการเปลี่ยนโพลาริเซชันและการลดทอนของสัญญาณ

4.4.1 เปอร์เซนต์เวลาของการเกิด XPD

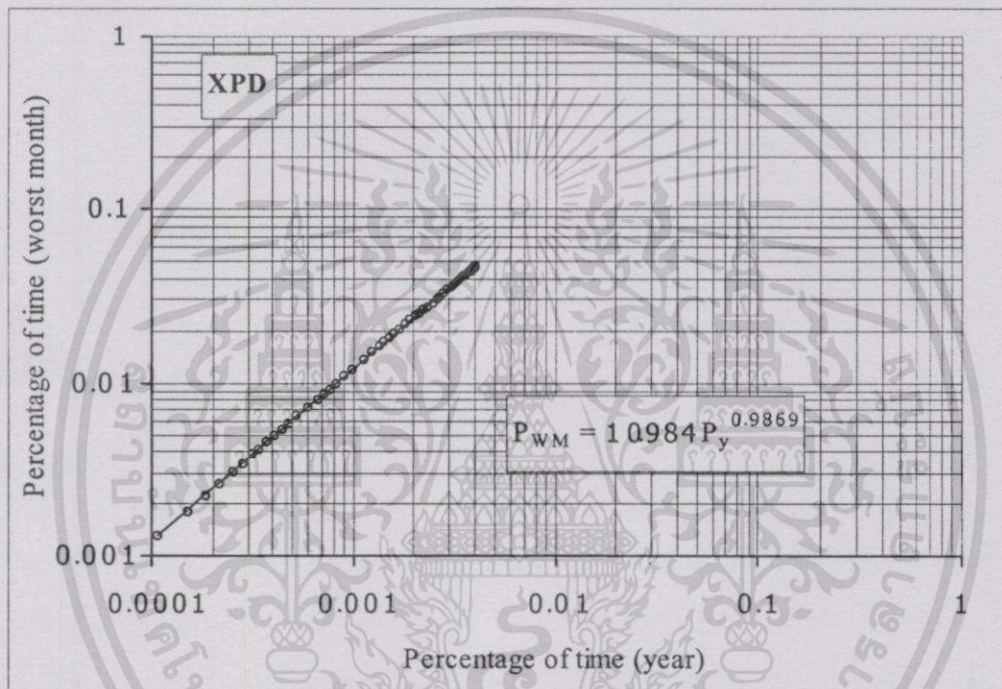
ค่าของเปอร์เซนต์เวลาของการเกิด XPD ได้จากการคิดคำนวณค่าเวลาที่เกิด XPD ในแต่ละระดับ โดยกำหนดความละเอียดของแต่ละช่วงระดับเป็น 2 dB จำนวนครั้งที่ได้จากการเกิด XPD ในแต่ละระดับรวมตลอดทั้งปีจะถูกคูณด้วยอัตราส่วนของการวัดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 Hz หรือ 2 วินาที เพื่อที่จะคำนวณแปลงให้อยู่ในรูปของเวลาที่เกิดขึ้น โดยรวมทั้งปีของแต่ละระดับ ซึ่งเมื่อนำค่าเวลาแต่ละช่วงเหล่านี้มาคำนวณหาค่าความถี่สะสมแล้วจะได้เป็นจำนวนเวลาทั้งหมดที่เกิด XPD ต่ำเกินกว่าระดับนั้นๆ และเมื่อนำตัวเลขที่ได้นี้เทียบกับเวลาตลอดทั้งปี จะได้เป็นเปอร์เซนต์เวลาที่ XPD เกิดขึ้นต่ำเกินกว่าระดับนั้นในเวลานั้นปี กรณีเดียวกันเมื่อนำเฉพาะข้อมูลที่เกิดขึ้นในเดือนที่มีการเกิดบ่อยและหนักซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบสื่อสารความถี่มากที่สุด (Worst month) มาคิดคำนวณ จะได้เป็นเปอร์เซนต์เวลาของการเกิดในเดือนที่มีสภาพเป็นกรณีรุนแรง (Worst case) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในระยะเวลา ตลอดปี 2543 จะมีเดือนที่มีสภาพรุนแรงคือเดือน ตุลาคม ซึ่งเป็นเดือนที่มีฝนตกบ่อยและหนักที่สุด และก่อผลกระทบต่อระบบสื่อสารความถี่มากที่สุด รายละเอียดดังแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เปอร์เซนต์เวลาของการเกิด XPD ที่ต่ำเกินกว่าระดับต่างๆ ตลอดทั้งปีและ ตลอดเดือนที่รุนแรง

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิด XPD ในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี

ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิด XPD ระหว่างเดือนที่รุนแรงกับเวลาตลอดทั้งปี จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับความวิกฤติของระบบสื่อสารที่มีโอกาสเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อเทียบกับระดับปกติทั่วไป ซึ่งความสัมพันธ์นี้หาได้จากการนำเอาค่า XPD ที่ระดับเดียวกันของข้อมูลเปอร์เซ็นต์เวลาทั้งปีกับข้อมูลเปอร์เซ็นต์เวลาเดือนรุนแรงมาประมวลด้วยวิธีการถดถอย โดยใช้ความสัมพันธ์ในรูปของการยกกำลัง (Power law) ตามรูปแบบการนำเสนอของ Fukuchi (1985) ซึ่งได้สัมพันธ์เปอร์เซ็นต์เวลาเท่ากับ 10.984 และสัมประสิทธิ์ของเลขยกกำลังเท่ากับ 0.9869 ดังแสดงในรูปที่ 4.10



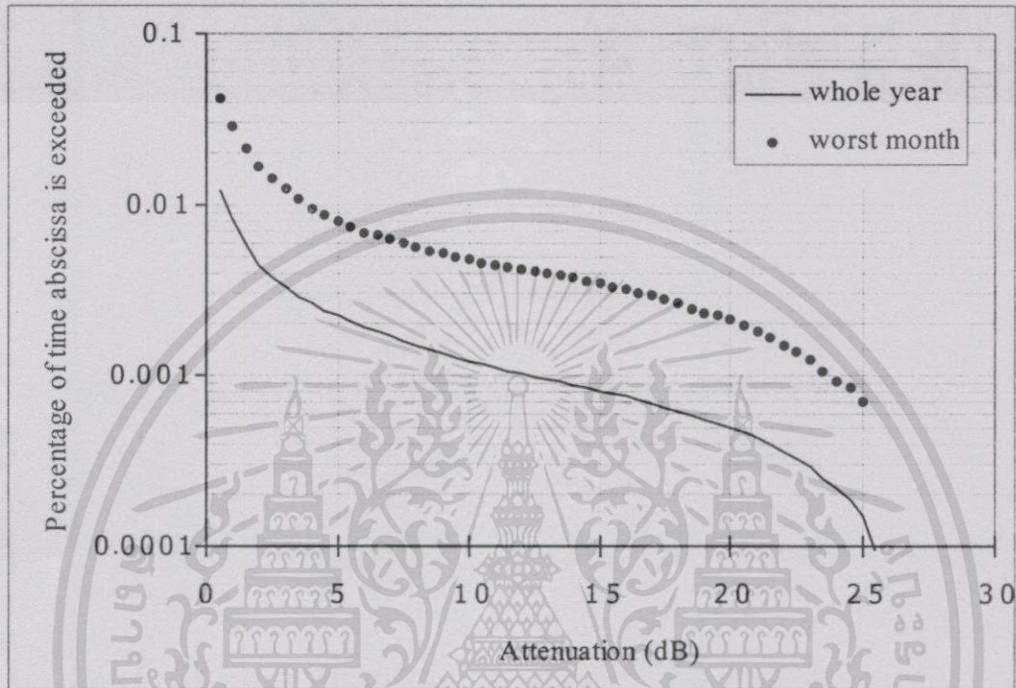
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิด XPD ในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี

4.4.3 เปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดการลดทอนของสัญญาณ

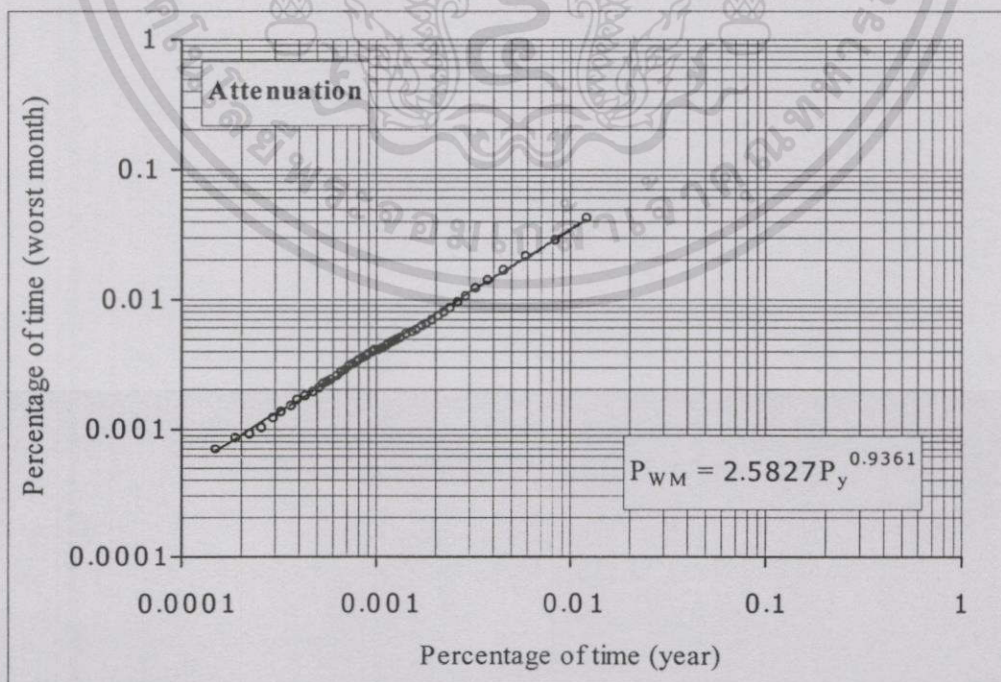
ค่าเปอร์เซ็นต์เวลาของการลดทอนสัญญาณที่เกิดขึ้นเกินกว่าค่าในแต่ละระดับในเดือนตุลาคมซึ่งเป็นเดือนที่มีฝนตกหนักและบ่อยที่สุด เมื่อเทียบกับที่เกิดตลอดทั้งปีในแต่ละระดับ โดยกำหนดความละเอียดของแต่ละช่วงระดับเป็น 0.5 dB และคิดคำนวณเช่นเดียวกันกับการเกิด XPD แต่ในการนับสถิติการเกิดสะสม จะคิดสะสมระดับการเกิดการลดทอนที่เกิดขึ้นสูงมากเกินกว่าระดับที่กำหนดในแต่ละระดับ แล้วจึงนำมาคิดคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เวลา ซึ่งรายละเอียดผลการคำนวณแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 4.11

4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิดการลดทอนในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี

จากกราฟในรูปที่ 4.10 เมื่อนำมาเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตลอดเดือนที่รุนแรงกับตลอดทั้งปีตามรูปแบบการนำเสนอของ Fukuchi (1985) จะได้สัมประสิทธิ์เปอร์เซ็นต์เวลาเท่ากับ 2.5827 และสัมประสิทธิ์ของเลขยกกำลังเท่ากับ 0.9361 ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 เปอร์เซนต์เวลาของการลดทอนที่สูงเกินกว่าระดับต่างๆ ตลอดทั้งปี และเดือนที่รุนแรง

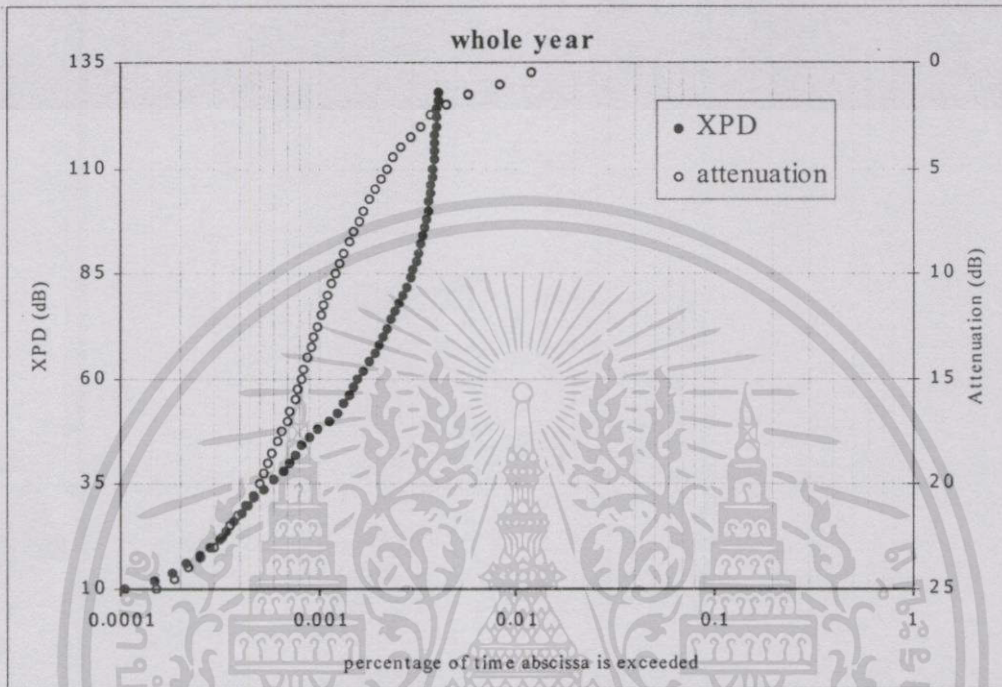


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิดการลดทอนในเดือนรุนแรงกับเวลาทั้งปี

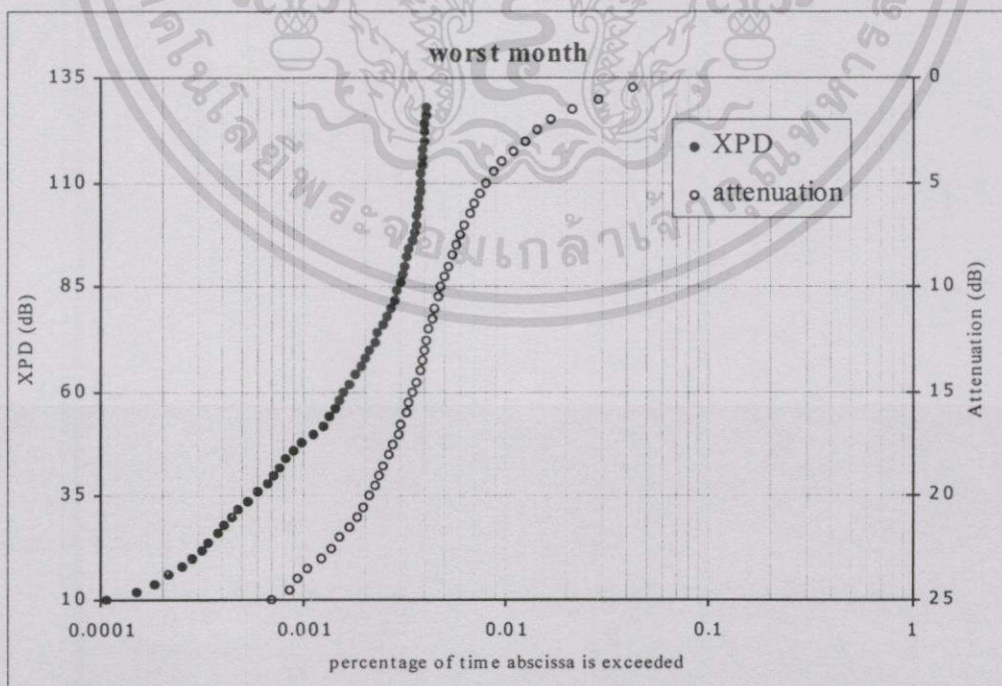
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 เปอร์เซ็นต์เวลาที่ปีและในเดือนรุนแรงของการเกิดการลดทอนและ XPD

ค่าเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิด XPD และการลดทอนสัญญาณในภาพรวมเพื่อให้ประโยชน์ในการใช้ทำนายค่าความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารดาวเทียม แสดงในรูปที่ 4.13 สำหรับข้อมูลตลอดทั้งปี และในรูปที่ 4.14 สำหรับข้อมูลในเดือนรุนแรง (ตุลาคม 2543)



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิด XPD และการลดทอนตลอดทั้งปี



รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิด XPD และการลดทอนในเดือนรุนแรง (ตุลาคม 2543)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 กล่าวนำ

การพิจารณาค่าระดับการเกิด XPD ในงานวิจัยนี้ มุ่งสนใจที่ระดับการเกิด XPD ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นองค์รวมตามความหมายในนิยาม ซึ่งมีได้แยกออกมาว่าการเกิด XPD นั้นๆมีสาเหตุจากเกร็ดน้ำแข็งในก้อนเมฆหรือเกิดจากกลุ่มหยดฝนที่กำลังตกลงมา ดังนั้นผลที่ได้จึงเป็นค่า XPD ที่มีสาเหตุจากทั้งสองประการรวมกันอยู่ ซึ่งการพิจารณาจะอยู่บนพื้นฐานแนวความคิดว่าไม่ว่าจะมีสาเหตุจากสิ่งใดก็ตามล้วนก่อปัญหาการรบกวนข้ามช่องสื่อสารได้ทั้งสิ้น ซึ่งจากผลการทดลองสามารถพิจารณาข้อสรุปต่างๆได้ดังนี้

5.2 การเกิด XPD ชั่วขณะตามประเภทของฝน

ความสัมพันธ์ของ XPD กับการลดทอนของสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาที่ฝนตกในแต่ละครั้งนั้นมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับแบบจำลอง แต่จะสอดคล้องกับแบบจำลอง EUT มากที่สุด ซึ่ง Max M.J.L. van de Kamp จาก Eindhoven University of Technology (EUT) นำเสนอโดยช่วงที่มีอัตราการลดทอนของสัญญาณสูง ค่าของ XPD โดยเฉลี่ยแล้วจะมีค่าต่ำกว่าแบบจำลอง โดยมีค่าต่ำกว่าแบบจำลอง EUT ประมาณ 2 dB ต่ำกว่าแบบจำลอง DHW ประมาณ 5.57 dB และต่ำกว่าแบบจำลอง CCIR ประมาณ 9.4 dB ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของหยดฝนที่ระดับการตกสูงๆในพื้นที่ภูมิอากาศร้อนแบบร้อนชื้นนั้นมีค่าแตกต่างจากภูมิภาคอื่น โดยขนาดของหยดฝนที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณมากกว่าปกติ ทำให้หยดฝนส่วนใหญ่มีความเป็นทรงกลมแบนหัวสูงกว่า จึงทำให้ความแตกต่างของการลดทอนและการเลื่อนเฟสของคลื่นที่ผ่านกลุ่มหยดฝนเหล่านี้มีค่าสูง ซึ่งผลย่อมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันสูงและทำให้ระดับ XPD ลดต่ำลง

ลักษณะพิเศษของพื้นที่ประเทศไทย มีฝนตกเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดผ่านนอกเหนือจากอิทธิพลจากระดับความกดอากาศต่ำเคลื่อนที่ขึ้นลงจากแนวเส้นศูนย์สูตร ซึ่งทิศทางของลมมรสุมนี้มีอิทธิพลต่อแนวการวางตัวของมุมเอียงหยดฝน ในทิศทางของงานสายอากาศที่ชี้ไปยังดาวเทียมไทยคม 2 ณ ตำแหน่ง 78.5 องศา นั้น จะมองเห็นความเปลี่ยนแปลงของ XPD เนื่องจากมุมเอียงหยดฝนสูงสุด ดังนั้นในขณะที่เกิดฝนตกเนื่องจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรง จะมองเห็นหยดฝนมีขนาดค่อนข้างกลม ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันจึงเกิดขึ้นน้อย ระดับของ XPD จึงมีค่าสูง ในทางตรงข้ามถ้าฝนที่ตกเป็นฝนที่เกิดจากมรสุมนี้อ่อนแรงลงและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอิทธิพลจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นมวลอากาศเย็นมีความกดอากาศสูงจากประเทศจีน พัดเข้ามา ลมจะมีทิศทางพัดมาจากด้านหลังของงานสายอากาศ การมองเห็นขนาดของหยดฝน จะเห็นมีความเป็นวงรีสูง การเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันจึงเกิดขึ้นมีค่ามากเนื่องจากผลต่างของการลดทอนและการเลื่อนเฟส ระดับของ XPD จึงมีค่าต่ำ ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก เช่น XPD ในวันที่ 29 สิงหาคม 2543 เป็นต้น ฝนที่ตกในลักษณะนี้มักมีจุดสังเกตคือไม่ปรากฏมีปรากฏการณ์ Scintillation ของสัญญาณดาวเทียมขึ้นก่อนการตกของฝนเกิดขึ้น

5.3 ค่าสถิติตลอดทั้งปีของการลดทอนสัญญาณและค่า XPD

5.3.1 ค่าของระดับ XPD ที่เกิดขึ้นตลอดทั้งปีและเดือนที่รุนแรง

ค่าสถิติ XPD ได้นำเสนออยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เวลา ซึ่งเป็นข้อมูลที่สะดวกนำไปใช้ประโยชน์ ประกอบการออกแบบระบบสื่อสารดาวเทียม ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลรายปี และข้อมูลในเดือนที่รุนแรงคือเดือนตุลาคม ความสัมพันธ์ระหว่างสถิติของ XPD ในเดือนที่รุนแรงกับ XPD รายปี มีความสัมพันธ์กันตามรูปของเลขยกกำลังด้วยสมการ $P_{WM} = 10.984 P_y^{0.9869}$ ซึ่งสัมพันธ์กันเกือบเป็นเชิงเส้น โดยมีความชันของเปอร์เซ็นต์เวลาในเดือนรุนแรงเป็น 10.984 เท่าของเปอร์เซ็นต์เวลาทั้งปี

สภาพที่เกิด XPD รุนแรงของการสื่อสารดาวเทียม เมื่อคิดที่ XPD ต่ำเกินกว่า 22 dB ตาม COST 205 (1985) แล้วค่าระดับของสภาพรุนแรงจะเกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 0.000318366 ของเวลาทั้งปี หรือคิดเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง 47 นาทีต่อปี โดยเกิดขึ้นในเดือนรุนแรงหรือเดือนตุลาคมเป็นร้อยละ 0.003873457 ของเวลาทั้งเดือนหรือคิดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 47 นาทีเช่นกัน ซึ่งหมายความว่าสภาพรุนแรงที่เกิดขึ้นทั้งหมดเกิดขึ้นในเดือนตุลาคม

5.3.2 ระดับของการลดทอนสัญญาณตลอดทั้งปีและเดือนที่รุนแรง

สถิติของระดับการลดทอนทั้งปี ถูกคิดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เวลาเช่นเดียวกับค่าสถิติ XPD ความสัมพันธ์ระหว่างสถิติเวลาการเกิดของการลดทอนในเดือนที่รุนแรงกับรายปี มีความสัมพันธ์กันตามรูปของเลขยกกำลังด้วยสมการ $P_{WM} = 2.5827 P_y^{0.9361}$ ซึ่งสัมพันธ์กันเกือบเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน โดยมีความชันของเปอร์เซ็นต์เวลาในเดือนรุนแรงเป็น 2.5827 เท่าของเปอร์เซ็นต์เวลาทั้งปี

การใช้งานในการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารดาวเทียมจากข้อมูลสถิติการลดทอนสัญญาณ สามารถทำได้โดยพิจารณากำหนดระดับสัญญาณต่ำสุดที่สามารถเชื่อถือได้ว่าระบบยังสามารถทำงานได้อยู่ แล้วจึงพิจารณาการลดทอนของสัญญาณที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกินระดับที่กำหนด เช่น หากการลดทอนสัญญาณที่สามารถยอมรับได้ อยู่ที่ระดับ 15 dB ค่าระยะเวลาที่เกิดการลดทอนที่เกิดขึ้นเกินกว่า 15 dB คิดเป็นร้อยละ 0.000812881 ของเวลาทั้งปี หรือคิดเป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง 7 นาทีในหนึ่งปี และเกิดขึ้นเป็นร้อยละ 0.003449074 ของเวลาในเดือนที่รุนแรง หรือคิดเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที ในเดือนตุลาคม ซึ่งหมายความว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอนที่เกินกว่า 15 dB จะเกิดขึ้นในเดือนซึ่งวิกฤติที่สุดคือเดือนตุลาคมจำนวน 34.87 % ที่เหลือเกิดขึ้นในเดือนอื่นๆซึ่งไม่วิกฤติและส่งผลร้ายต่อความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารดาวเทียม

5.4 ข้อเสนอแนะ

สมการความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิดการลดทอนและ XPD ในเดือนที่รุนแรงเทียบกับเปอร์เซ็นต์เวลาทั้งปีที่ได้นี้เป็นข้อมูลที่วัดในปี 2543 เพียงปีเดียว ซึ่งเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น จึงควรประมวลผลด้วยข้อมูลที่ยาวนานครอบคลุมวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ ซึ่งไม่ควรน้อยกว่า 5 ปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Allnutt, J. E. 1989. **Satellite-to-Ground Radiowave Propagation**. London. : Prter Peregrinus Ltd. ISBN: 0-86341-157-6.
- Brussaard, G. 1976. "A meteorological model for rain-induced cross Polarization." **IEEE trans. Antennas Propagat.** AP-24(8) : 5-11.
- Brussaard, G. and Rogers, D. V. 1990. "Propagation Considerations in satellite Communication Systems." **Proc. IEEE.** 78(7) :1547-1551.
- Brussaard, G. and Watson, P. A. 1995. **Atmosphereic Modelling and Millimetre Wave Propagation**. London : Chapman & Hall. ISBN: 0-412-56230-8.
- CCIR. 1978. "Propagation Data Required for Space Telecommunications systems." Report 564-1 in **Vol.5 Reccommendations and Reports of the CCIR-1978**. Geneva : International Telecommunications Union.
- CCIR. 1986. "Propagation Data and Prediction Methodes Required for Earth-Space Telecommunication systems." Report 564-3 in **Vol.5 Recommendations and Report of the CCIR-1986**. Geneva : International Telecommunications union.
- Chu, T. S. 1974. "Rain-Induced cross-Polarization at centimeter and Millimeter Wave lengths." **Bell syst. tech. Jrnl.** 58(8) : 1557-1579.
- Chu, T. S. 1982. "A Semi-Empirical Formulla for Microwavelengths Depolarization Versus Rain Attenuation on Earth-space Paths." **IEEE Trans. On Communica-tions.** com-30(12) : 2550-2554.
- COST 205. 1985. "Influence of the atmoshere on radio propagation on satellite Earth paths at frequencies above 10 GHz." **Commission of the European Communities report EUR 9923** : ISBN 92-825-5412-0.
- Dissanayake, A. W. Haworth, D. P. and Watson, P. A. 1980. "Analytical Model for Cross-Polarisation on earth-space paths for the frequency rang 9-30 GHz." **Ann. Telecommun.** 35(12) : 398-404.
- Fukuchi, H. Kozu, T. and Tsuchiya, S. 1985. "Worst Month Statistics of Attenuation and XPD on Earth-Space Path." **IEEE Trans.** AP-33(4) : 390-396.
- Goddard, J. W. F. 1996. "Nature of Precipitation and cloud." Ch.7 in **Propagation of Radio waves**. London. : IEE. Michael Faraday House. ISBN: 0-85296-819-1.

- John, D. K. and Christos, N. V. 1996. "Predictive Analysis of the Interference on a Dual Polarized Satellite System Due to Cross-Polarization and Differential Rain Attenuation (Gamma Case)." **IEICE Trans. Commun.** E79-B(4) : 587-594.
- Joss, J. Thams, J. C. and Waldvogel, A. 1968. "The Variation of Raindrop Size Distri -butions at Locarno." **Proc. Int. Conf. Cloud phys.** Toronto. : 369-373.
- Laws, J. O. and Parsons, D. A. 1943. "The Relation of Raindrop size to Intensity." **Trans. Am. Geophys. Union.** 24(8) : 452-460.
- Louis, J. Ippolito. 1986. **Radiowave Propagation in Satellite Communications.** NewYork : Van Nostrand Reinhold Company Inc. ISBN: 0-442-24011-2.
- Magono, C. 1954. "On the Shape of water drops falling in stagnant air." **Jrnl. Meteorology.** 11 (8) : 77-79.
- Marshall, J. S. and Palmer, W. M. 1948. "The distribution of Raindrops With size." **Jrnl. Meteorology.** 5(7) : 165-166.
- Max, M. J. L. Van de Kamp. 1999. "Depolarisation due to Rain: the XPD-CPA Relation." **Proc. IEEE.** : 400-402.
- Max, M. J. L. Van de Kamp. Smits, E. J. M. Herbrn, M. H. A. J. and Brussaard, G. 1994. "Experimental Verification of Existing Rian Depolarisation Models" **A.E.U.** 48(3) : 173-174.
- Morrison, J. A. Cross, M.J. and Chu, T. S. 1973. "Rain-Induced Differential Attenuation and Differentail phase shift at Microwave Frequencies." **BSTJ.** 52(4) : 599-604.
- Now land, W. L. olsen and shkarafsky, I. P. 1977. "Theoretical Relationship Between Rain Depolarization and Attenuation." **Electronics Letters.** 13(22) : 676-677.
- Oguchi, T. 1977. " Scattering Proerties of Pruppacher and Pitter form raindrops and Cross Polarization Due to Rain : Calculations at 11, 13,19.3 and 34.8GHz." **Radio Science.** 12 (3) : 41-51.
- Oguchi, T. and Yamada, M. 1981. "Frequency Characteristics of Attenuation, Phase shift and Cross-Polarization due to Rain within Communication Bands: Calculations at 4, 6, 11, and 14 GHz Bands for Intelsat satellite Communication System." **Jrnl. Radio Research Lab.** 28(2) : 97-131.
- Oguchi, T 1983. "Electromagnetic Wave Propagation and Scattering in Rain and Other Hydrometeors." **Proc. IEEE.** 71(9) : 1029-1078.

- Ornado, L. and Tallone, F. 1997. "Dual Polarised Propagation Channel: Theoretical Model and Experimental Results." **Proc.IEE. 10th Int. Conf. on Antennas and Propagation.** April : 2.363-2.366.
- Pruppacher, H. R. and Pitter, R. L. 1971. "A Semi-empirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops." **J. Atmos. Science.** 28(5) : 86-94.
- Stutzman, W. L. 1977. "Mathematical Formulations and Definitions for Dual Polarized Reception of a Wave Passing Through a Depolarizing Medium (A Polarization Primer)." Virginia Nasa Contract : NAS5-22577.
- Stutzman, W. L., and Run yon, D. L. 1984. "The relationship of rain-induced cross-polarisation to attenuation for 10 to 30 GHz Earth - space radio links." **IEEE Trans.** 32(6) : 705-710.
- Thomas, D. T. 1971. "Cross-Polarization Distortion in Micro wave Radio Transmission Due to Rain." **Radio Science.** 6(10) : 833-839.
- Ugai, S. Kato, K. Nishijima, M. Kam T. and Tazaki, K. 1977. "Fine structure of rain fall." **Ann. Telecommun.** 32(6) : 422-429.
- Uzunoglu, N. K. and Holt, A. R. 1977. "The scattering of electromagnetic radiation from dielectric scatterers." **J. Phys. A: Math. Gen.** 10(8) : 413-424.
- Vasseur, H. Amaya, C. and Vanhoenacker, D. 1997. "System Implications of Rain and Ice Depolarisation in Ka-Band Satellite Communications." **Proc. IEE. 10th Int.Conf. on Antennas and Propagation.** April : 2.115-2.118.
- Watson, P. A. and Arbabi, M. 1973a. "Cross-Polarization at Microwave Frequencies." **Proc. IEEE.** 120(4) : 413-418.
- Watson, P. A. and Arbabi, M. 1973b. "Cross-Polarization Isolation and Discrimination." **Electronics Letters.** 9(22) : 516-519.

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมมาโครที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 มาโครสำหรับการเฉลี่ยข้อมูลและการคาลิเบรทระดับสัญญาณ

```

Sub AvgCal()
' test1 มาโคร
' บันทึกมาโคร 8/3/01 โดย Natth Junkrob
Range("E1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "time"
'Range("j1").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = "Min Ecross"
Range("G1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Eco AVG [uV]"
Range("F1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Ecross AVG [uV]"
'Range("k1").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = "Max Eco"
'Eco Coefficient
co1 = 4.42448635878495E-10: co2 = 1.30430306970514E-07: co3 = 1.63708337447044E-05:
co4 = 8.68727442583764E-04
co5 = 3.83782765317041E-02: co6 = 1.81000166332111
'Ecross Coefficient
cr1 = 1.558368748324E-07: cr2 = 2.47051753718384E-05: cr3 = 1.43033765167314E-03: cr4
= 9.67012467237669E-03
cr5 = 1.88526965669616
lindx = 2
For i = 2 To 999999 'Process to Average Ecross and Eco to 10 sec interval
Cells(lindx, "e").Value = Cells(i, "a").Value 'time stamp
tmpEcr = 0
tmpEco = 0
' lindx = 2
cnt = 1
For j = 1 To 19
tmpEcr = tmpEcr + Cells(i, "b")
tmpEco = tmpEco + Cells(i, "c")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i = i + 1
If Cells(i, "b").Value <> "" Then cnt = cnt + 1
Next j
If cnt <> 20 Then
    Range("j2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MIN(C[-4])"
    Cells(1, "d") = Cells(2, "j")
    Range("k2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=max(C[-4])"
    Cells(2, "d") = Cells(2, "k")
    Range("d1").Select
    Call AttXPD
End
End If
Acr = tmpEcr * 1000 / cnt
Aco = tmpEco * 1000 / cnt
'Acr = tmpEcr * 1000 / 20
'Aco = tmpEco * 1000 / 20
CalEco = co1 * (Aco ^ 5) - co2 * (Aco ^ 4) + co3 * (Aco ^ 3) - co4 * (Aco ^ 2) + co5 * Aco
+ co6
CalEcr = cr1 * (Acr ^ 4) - cr2 * (Acr ^ 3) + cr3 * (Acr ^ 2) - cr4 * Acr + cr5
Cells(lindx, "f").Value = CalEcr
Cells(lindx, "g").Value = CalEco
'Cells(lindx, "f").Select
'Cells(lindx, "h").Value = 20 * Log(CalEco)
lindx = lindx + 1
If Cells(i, "a").Value = "" Then
i = 999999
End If
Next i
Range("j2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MIN(C[-4])"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Cells(1, "d") = Cells(2, "j")
Range("k2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=max(C[-4])"
Cells(2, "d") = Cells(2, "k")
Range("d1").Select
Call AttXPD
'MsgBox ("stop for checking cnt=" & cnt)
End Sub

```

ก.2 มาโครสำหรับการคำนวณระดับการลดทอนและระดับ XPD

```

Sub AttXPD()
Range("h1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "ATT"
Range("i1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "XPD"
a = InputBox("Clear Sky Min Ecross Floor level [uV]", Ecross)
b = InputBox("Clear Sky Max Eco Floor level [uV]", Eco)
If a = "" Then End
If b = "" Then End
Range("j2:k2").Delete
i = 2
Do While Cells(i, "f").Value <> ""
c = Cells(i, "f") - a
If c < 0 Then c = 0.00001
Cells(i, "h").Value = -20 * Log((Cells(i, "g").Value / b))
Cells(i, "i").Value = 20 * Log((Cells(i, "g") / c))
i = i + 1
Loop
End Sub

```

ก.3 มาโครสำหรับการคำนวณระดับ XPD ตามแบบจำลอง

ก.3.1 แบบจำลอง CCIR

Sub CCIR()

Range("j1").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "CCIR"

a = InputBox("มุมเอียงโพลาไรซ์", "CCIR Model")

b = InputBox("ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของมุมเอียงหยดฝน")

c = InputBox("ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมเอียงหยดฝน")

If a = "" Then End

If b = "" Then End

If c = "" Then End

a = a * 3.141592654 / 180

'b = b * 3.141592654 / 180

'c = c * 3.141592654 / 180

'de = Exp(-0.0024 * b ^ 2)

'dc = Cos(4 * a)

'd1 = 10 * Log((0.5 * (1 - dc * de)))

d = 10 * Log((0.5 * (1 - Cos(4 * a) * Exp(-0.0024 * b ^ 2))))

e = 0.0053 * c ^ 2

'f = 20 * Log(Cells(i, "h"))

i = 2

Do While Cells(i, "h").Value < ""

Att = Cells(i, "h").Value

AdB = 20 * (Log(Att) / Log(10))

Cells(i, "j").Value = 32.98627586 - d + 11.83282019 + e - AdB

i = i + 1

Loop

End Sub

ก.3.2 แบบจำลอง SIM

Sub SIM()

Range("k1").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "SIM"

a = InputBox("มุมเอียง โพลาริซ", "SIM Model")

b = InputBox("ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของมุมเอียงหอคณ")

c = InputBox("ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมเอียงหอคณ")

f0 = InputBox("ค่าตัวแปร F0")

If a = "" Then End

If b = "" Then End

If c = "" Then End

If f0 = "" Then End

a = a * 3.141592654 / 180

'b = b * 3.141592654 / 180

'c = c * 3.141592654 / 180

'de = Exp(-0.0024 * b ^ 2)

'dc = Cos(4 * a)

'd1 = 10 * Log((0.5 * (1 - dc * de)))

d = 10 * Log((0.5 * (1 - Cos(4 * a) * Exp(-0.0024 * b ^ 2))))

e = 0.0053 * c ^ 2

f = 20 * (Log(f0) / Log(10))

'f = 20 * Log(Cells(i, "h"))

i = 2

Do While Cells(i, "h").Value <> ""

Att = Cells(i, "h").Value

AdB = 19 * (Log(Att) / Log(10))

Cells(i, "k").Value = 9.5 + 19.02208575 - (-12.4244612) - d + e - f - AdB

i = i + 1

Loop

End Sub

ก.3.3 แบบจำลอง DHW

Sub DHW()

Range("I1").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "DHW"

a = InputBox("มุมเอียง โพลาริซ", "DHW Model")

'b = InputBox("ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของมุมเอียงหอคณ")

c = InputBox("ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมเอียงหอคณ")

'f0 = InputBox("ค่าตัวแปร F0")

If a = "" Then End

'If b = "" Then End

If c = "" Then End

'If f0 = "" Then End

a = a * 3.141592654 / 180

'b = b * 3.141592654 / 180

'c = c * 3.141592654 / 180

d = 20 * (Log(Sin(2 * a)) / Log(10))

e = 0.0053 * c ^ 2

i = 2

Do While Cells(i, "h").Value <> ""

Att = Cells(i, "h").Value

AdB = 20 * (Log(Att) / Log(10))

Cells(i, "l").Value = 8.16 + 23.0903931 - d - (-11.83282019) + e - AdB

i = i + 1

Loop

End Sub

ก.3.4 แบบจำลอง CHU

Sub Chu()

Range("n1").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "Chu"

a = InputBox("มุมเอียง โพลาริซ", "Chu Model")

b = InputBox("ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของมุมเอียงหอคณ")

If a = "" Then End

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If b = "" Then End
a = a * 3.141592654 / 180
'b = b * 3.141592654 / 180
'c = c * 3.141592654 / 180
d = 10 * Log((0.5 * (1 - Cos(4 * a) * Exp(-0.0024 * b ^ 2))))
Da = 0.38410525 * Cos(2 * a)
i = 2
Do While Cells(i, "h").Value <> ""
Att = Cells(i, "h").Value
AdB = 20 * (Log(Att) / Log(10))
XPDcp = 11.5 + 21.99085057 - (-11.83282019) - AdB
XPDlp = XPDcp - d - AdB * Da / 2
Cells(i, "n").Value = XPDlp
i = i + 1
Loop
End Sub

```

ก.3.5 แบบจำลอง EUT

```

Sub EUT()
Range("m1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "EUT"
a = InputBox("มุมเอียงโพลาไรซ์", "EUT Model")
If a = "" Then End
a = a * 3.141592654 / 180
b = 20 * (Log(Abs(Sin(2 * a))) / Log(10))
'c = 0.075 * (Cos(a) ^ 2
i = 2
Do While Cells(i, "h").Value <> ""
Cells(i, "m").Value = 5.1 + 25.28947816 - (-11.83282019) - b - 0.019205262 * Cos(2 * a) * Cells
(i, "h").Value - 17.8 * (Log(Cells(i, "h").Value / Log(10)))
i = i + 1
Loop
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 มาโครสำหรับการคำนวณค่าสถิติการเกิดการลดทอนและ XPD

```

Sub HistXPD()
'Do
'q = InputBox("เปิดไฟล์ TXPD.XLS TATT.XLS และ ไฟล์ที่จะหา Histogram หรือยัง? Y/N", "
ถามครับถาม      ตอบ Y หรือ N นะครับ")
'If q = "n" Then End
'Loop While q <> "y"
fname = InputBox("โปรดใส่ชื่อไฟล์ ที่จะหาHistogram ครับ")
'หา คอถัมปี ของวันสุดท้ายที่ทำไว้
Windows("tatt").Activate
catt = 1
Do While Cells(1, catt) <> ""
catt = catt + 1
Loop
Windows("txpd").Activate
cxpd = 1
Do While Cells(1, cxpd) <> ""
cxpd = cxpd + 1
Loop
Windows(fname).Activate
Range("aa1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "binAtt"
Range("aa2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0.5"
Range("aa3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
Range("aa2:aa3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("aa2:aa61"), Type:=xlFillDefault
'Range("aa2:aa61").Select
Range("z1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "binXPD"
Range("z2").Select

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "10"
```

```
Range("z3").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "12"
```

```
Range("z2:z3").Select
```

```
Selection.AutoFill Destination:=Range("z2:z61"), Type:=xlFillDefault
```

```
'Range("z2:z61").Select
```

```
'Find Histogram by using sendkey stroke method for ATT
```

```
AppActivate Title:="Microsoft Excel"
```

```
'SendKeys "%" & "t" & "d" & "h"
```

```
'SendKeys "{enter}"
```

```
SendKeys "%", True
```

```
SendKeys "{right 5}" & "{UP 2}"
```

```
SendKeys "{enter}" & "h" & "{enter}"
```

```
SendKeys "$h$2:$h$65536" & "{tab}" & "$aa$2:$aa$61"
```

```
SendKeys "{tab}" & "O" & "{tab 5}" & "$ac$1" & "{enter}", True
```

```
Range("ad2", "ad62").Select
```

```
Selection.Copy
```

```
Windows("tatt").Activate
```

```
Cells(2, catt).Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
```

```
False, Transpose:=False
```

```
Application.CutCopyMode = False
```

```
Cells(1, catt).Value = fname
```

```
Windows(fname).Activate
```

```
'Find Histogram by using sendkey stroke method for XPD
```

```
AppActivate Title:="Microsoft Excel"
```

```
'SendKeys "%" & "t" & "d" & "h"
```

```
'SendKeys "{enter}"
```

```
SendKeys "%", True
```

```
SendKeys "{right 5}" & "{UP 2}"
```

```
SendKeys "{enter}" & "h" & "{enter}"
```

```
SendKeys "$o$2:$o$65536" & "{tab}" & "$z$2:$z$61"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SendKeys "{tab}" & "O" & "{tab 5}" & "$af$1" & "{enter}", True
Range("ag2", "ag62").Select
Selection.Copy
Windows("txpd").Activate
Cells(2, cxd).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
    False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Cells(1, cxd).Value = fname
Windows(fname).Close True
End Sub

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์เซชันของสัญญาณดาวเทียมไทยคม 2 ย่านความถี่ Ku-band อันเนื่องจากการตกของฝน Depolarization due to rain in Ku-band of THAICOM 2 satellite path

ฉัฐ จันทร์ครบ สุรศักดิ์ กฤษณาวิชัย ณรงค์ เหมกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สำนักวิชาการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อ. ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทร (02) 326-6100 ต่อ 2543 โทรสาร 326-9086 E-mail : khnarong@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดลองวัดการแยกแยะโพลาไรซ์ไว้ไว้เทียบกับการลดทอนของสัญญาณโพลาไรซ์ร่วม ที่มีสาเหตุเนื่องจากการตกของฝนของสัญญาณดาวเทียมไทยคม 2 โดยการทดลองวัดที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เส้นแวงที่ 100.8° E เส้นรุ้งที่ 13.76° N มุมเงย 59.6° ผลการทดลองตลอดระยะเวลา 4 เดือน พบว่าค่า XPD ค่าสุดที่ 18.27 dB ที่การลดทอน 9.4 dB และอัตราการตกของฝน 90 มม./ชม. ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้ม เหมือนกับทำนายด้วยแบบจำลอง CCIR, SIM และ DHW โดยมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองข้างต้น 4, 4.7 และ 2.27 dB ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับสเกลลอของอัตราการตกของฝน โดยลดลงด้วยอัตรา 25 dB/decade

Abstract

The paper presents the result of experiment of cross-polarization discrimination (XPD) of received signal from THAICOM 2 versus co-polar attenuation caused by rain. Our experiment was conducted at KMITL, longitude 100.8° E, latitude 13.76° N and slant angle 59.6°. During 4-month of experiments, the results show that minimum of XPD is 18.27 dB at attenuation 9.4 dB and rain rate 90 mm/hr.. The statistical relationships have a tendency as predicted by CCIR, SIM and DHW lower than the model 4, 4.7 and 2.27 dB, respectively. Not only that, the linearity relationship between XPD and rain rate in logarithm scale can also be found with 25 dB/decade decrease.

1. บทนำ

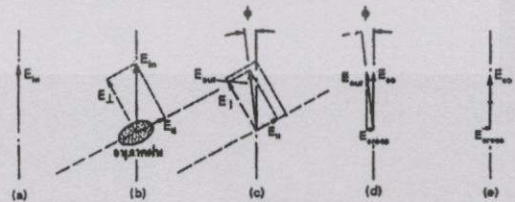
ในสถานะที่ความต้องการด้านการสื่อสารเติบโตอย่างรวดเร็ว ความต้องการที่จะเพิ่มสัญญาณสื่อสารโดยไม่เพิ่มแถบความถี่ ได้อยู่มาประยุกต์ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข่ายเชื่อมโยงระหว่างภาคพื้นดินกับอวกาศ (Earth-Space link) ได้นำเอากรรมวิธีการนำความถี่มาใช้ซ้ำ โดยใช้เทคนิคโพลาไรซ์คู่ (dual polarization frequency reuse technique) เพื่อเพิ่มความจุของสัญญาณ เทคนิคนี้สามารถใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าหากว่า

โพลาไรซ์ของคลื่นทั้งคู่แพร่กระจายอย่างอุดมคติ และ ตัวกลางที่แพร่กระจายผ่านนั้น ไม่ก่อให้เกิดการเบี่ยงเบนโพลาไรซ์ แต่ในทางความเป็นจริงแล้ว คลื่นที่ส่งลงมาจากดาวเทียมถึงสถานีภาคพื้นดินนั้น จะต้องผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆ มากมาย ชั้นบรรยากาศเหล่านี้จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อการเดินทางของคลื่น แตกต่างกันไป

ดาวเทียมไทยคมถูกนำขึ้นสู่วงโคจรตั้งแต่ปี 2536 มีทรานสปอนเดอร์ใช้งานทั้ง C-band และ Ku-band ฝนเป็นศัตรูสำคัญที่มีผลกระทบต่อย่าน Ku-band โดยตรง ซึ่งผลดังกล่าวอาจพิจารณาการกระทบในรูปแบบการเกิดปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณ (amplitude scintillation), การลดทอน และการเปลี่ยนโพลาไรซ์ของคลื่นกรณีแรกและกรณีที่สอง ศึกษาค้นคว้ามาบ้างแล้ว [1] ส่วนในกรณีการเปลี่ยนโพลาไรซ์นั้น ไม่ค่อยมีการศึกษามากนักในสภาพแวดล้อมในประเทศไทย

2. ทฤษฎีและหลักการ

การที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหหลายค่า (anisotropy) แล้วทำให้แนวโพลาไรซ์ของสัญญาณที่รับได้ไม่ตรงกับโพลาไรซ์เดิมซึ่งเกิดจากความแตกต่างของค่าคงที่การเดินทางของคลื่นในแนวและแนวโพลาไรซ์ ซึ่งจำนวนกันได้ 2 สาเหตุ คือ (1) การเกิดผลต่างการลดทอน (2) การเกิดผลต่างการเลื่อนเฟส ส่วนสาเหตุใดจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนโพลาไรซ์ ขึ้นอยู่กับความถี่ใช้งาน โดยเฉพาะที่ย่านความถี่ Ku-band จะมีสาเหตุมาจากการเกิดผลต่างการเลื่อนเฟส เป็นสำคัญ [2] โพลาไรซ์ที่เบี่ยงเบนไปจากเดิมนี สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบคือ องค์ประกอบร่วมกับโพลาไรซ์เดิม (E_{\parallel}) กับองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับโพลาไรซ์เดิม (E_{\perp}) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปลี่ยนโพลาไรซ์เนื่องจากอนุภาคฝนที่ไม่เป็นทรงกลม

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

ค่า E_{cross} ที่เกิดขึ้นนี้ เป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการยิ่งก็มากก็ยิ่งก่อให้เกิดการรบกวน (interference) ข้ามช่องมากตามไปด้วย เราจึงอาจพิจารณาการรบกวนข้ามช่องได้จากความสามารถในการแยกแยะโพลาไรซ์ไขว้ (Cross polarization discrimination : XPD) ซึ่งนิยามได้จาก[3]

$$XPD = 20 \log \left| \frac{E_{co}}{E_{cross}} \right| \quad (1)$$

ค่า XPD ที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากฝนนั้น มีสาเหตุจากหลายพารามิเตอร์ ได้แก่ ความถี่ใช้งาน (f), มุมเงยของจานดาวอากาศ (e), มุมเอียงของโพลาไรซ์เชิงเส้น (τ), มุมเอียงแกนอนุภาคฝนโดยเฉลี่ย (mean canting angle : θ), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมเอียงแกนอนุภาคฝน (σ_θ), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมุมเอียงแกนอนุภาคเฉลี่ยครั้งต่อครั้ง (σ_τ) และรูปทรงของอนุภาคฝน (F) จากการศึกษาก่อนของ Chu[5], Stutzman and Runyon [6], Dissanyake[7], ได้พบว่าค่าของ XPD โดยเฉลี่ยจะสัมพันธ์กับการลดทอนของสัญญาณ โพลาไรซ์ร่วมกับแนวดิน (Co-polar attenuation : A) โดย Chu ได้เสนอแบบจำลองกึ่งประจักษ์ (Semi-Empirical model) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง XPD กับ A, Stutzman and Runyon เสนอแบบจำลองลักษณะเดียวกันชื่อ simple isolation model (SIM) โดยเปรียบเทียบแบบจำลองของตนเองกับแบบจำลองที่นำเสนอโดย CCIR, Dissanyake และ Chu รวมทั้งวิเคราะห์เปรียบเทียบที่วัดกับข้อมูลจริงด้วย แต่แบบจำลองที่กล่าวมาจะไร้สมการ XPD ในรูปของการลดทอน A ดังนี้

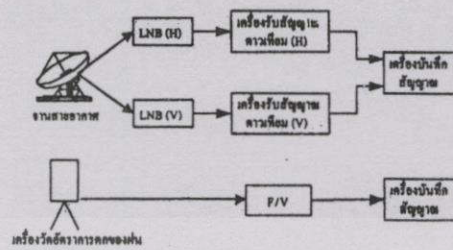
$$XPD = U - V \log A \quad (2)$$

พารามิเตอร์แต่ละตัวในสมการที่ (2) เป็นค่าในหน่วย dB โดยค่าคงที่ V มักแปรตามค่าความถี่ และไม่ขึ้นกับมุมเอียงของอนุภาคฝน ส่วนค่าคงที่ U จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และมุมเอียงของอนุภาคฝน โดยมีค่าทำนองนั้น คืออาศัยการคำนวณทฤษฎีประกอบกับ ข้อมูลการทดลอง ดังแบบจำลองที่กล่าวมา

3. อุปกรณ์และการทดลอง

เราได้ทำการทดลองวัด XPD ของสัญญาณโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง (XPD_v) จากทรานสพอนเดอร์ของดาวเทียม ไทยคม 2 โดยใช้จานขนาด 0.5 เมตร และ LNB คู่ โดย LNB ตัวแรกจะรับสัญญาณจากโพลาไรซ์แนวตั้ง ระดับสัญญาณที่รับได้จึงเป็นค่าของ E_{co} ส่วน LNB ตัวที่สองจะรับสัญญาณจากโพลาไรซ์แนวอนที่ความถี่เดียวกัน ระดับสัญญาณที่รับได้จึงเป็นค่าของ E_{cross} แสดงดังรูปที่ 2 และรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

เครื่องวัดอัตราการตกของฝน เป็นเครื่องวัดแบบตอบสนองเร็ว (Quick response type) สัญญาณพัลส์ของหยดน้ำฝน ถูกแปลงเป็นค่าระดับแรงเคลื่อนด้วยวงจร Frequency to Voltage converter ระดับแรงเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการตกของฝนนี้จะถูกบันทึกในเครื่อง



รูปที่ 2 บล็อกโคเซอร์ของระบบการวัด

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบการวัด

ความถี่	ไทยคม 2 (78.5 °E)
ความถี่ที่ใช้	12,594 GHz
ระบบจานดาวอากาศ	0.5 เมตร ϕ (อัตราขยาย 34.5 dB) โพลาไรซ์แนวตั้ง (Ver.&Hor.)
มุมเงย	59.6 องศา

บันทึกแบบกระตมกรฟต่อเนื่องพร้อมๆกับ ระดับสัญญาณความถี่ในสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนโพลาไรซ์อันเนื่องจากฝนขึ้น เราสามารถคำนวณหาค่า XPD ได้จากสมการ

$$XPD = 20 \log \left| \frac{E_{co}}{\Delta E_{cross}} \right| \text{ dB} \quad (3)$$

โดยที่ E_{co} คือระดับสัญญาณที่รับได้จากโพลาไรซ์แนวตั้ง, ΔE_{cross} คือ ระดับความแตกต่างของสัญญาณที่รับได้จากโพลาไรซ์แนวอนระหว่างสภาวะปกติกับสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนโพลาไรซ์

เนื่องจากการเกิดการเปลี่ยนโพลาไรซ์ ขึ้นอยู่กับหลายพารามิเตอร์ แต่ละพารามิเตอร์สามารถคำนวณได้ดังนี้

3.1 มุมเงยของดาวอากาศ

$$e = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \beta \cos \phi - 0.1508}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta \cos^2 \phi}} \right) \quad (4)$$

โดยที่ β เป็นมุมแตกต่างระหว่างเส้นแนวของความถี่กับสถานีรับ, ϕ เป็นเส้นรุ้งของสถานีรับ ดังนั้นที่สถานีฯ ลาดกระบัง ซึ่งอยู่ที่เส้นรุ้ง 13.76 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 100.8 องศาตะวันออก มุมเงยของดาวอากาศ จึงมีค่าเท่ากับ 59.6 องศา

3.2 มุมเอียงโพลาไรซ์ชัน (Polarization tilt angle : τ)

$$\tau = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{\sin(\beta)} \right) \quad (5)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนโพลาไรซ์มีผลกระทบจากมุมเอียงโพลาไรซ์ชันที่กระทำกับมุมเอียงของอนุภาคฝน (θ) ซึ่งค่าของมุมนี้คำนวณได้จาก

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

$$\delta = \begin{cases} \tau - (\theta); & \text{โพลาริซ์แบบเชิงเส้น} \\ 45^\circ; & \text{โพลาริซ์แบบวงกลม} \end{cases} \quad (6)$$

3.3 พารามิเตอร์องค์ประกอบอนุภาคฝน

เนื่องจากยังไม่ค่อยมีการวัดพารามิเตอร์องค์ประกอบอนุภาคฝนในประเทศไทยมาก่อน เราจึงใช้พารามิเตอร์ที่ศึกษาโดย Stuzman[7]: $\langle \theta \rangle = 0^\circ$, $\sigma_\theta = 12^\circ$ และ $F_0 = 0.65$ เป็นพารามิเตอร์มาตรฐานตั้งต้น และ $\sigma_m = 3^\circ$ ตามคำแนะนำของ Chu ดังนั้นจากพารามิเตอร์ที่กล่าวมาสามารถคำนวณหาปริมาณการแยกแยะโพลาริซ์ชั้นไอวี่ที่เกิดจากควมเทียมไทยคม 2 ได้ดังนี้

แบบจำลอง CCIR[8]

$$XPD = 30 \log(f) - 10 \log \left\{ \frac{1}{2} [1 - \cos(4\delta)] e^{-0.0024\sigma_m^2} \right\} - 40 \log(\cos \epsilon) + 0.0053\sigma_m^2 - V \log A \quad (7)$$

เมื่อ

$$V = \begin{cases} 20, & 8 \leq f \leq 15 \text{ GHz} \\ 23, & 15 \leq f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases}$$

ดังนั้น

$$XPD = 46.35140886 - 20 \log(A) \quad (8)$$

แบบจำลอง SIM

$$XPD = 9.5 + 17.3 \log(f) - 42 \log(\cos \epsilon) - 10 \log \left\{ \frac{1}{2} [1 - \cos(4\sigma)] e^{-0.0024\sigma_m^2} \right\} + 0.0053\sigma_m^2 - 20 \log(F_0) - 19 \log(A) \quad (9)$$

ดังนั้น

$$XPD = 46.25419095 - 19 \log(A) \quad (10)$$

แบบจำลอง DHW

$$XPD = 8.16 + 21 \log(f) - 20 \log(\sin(2\delta)) - 40 \log(\cos \epsilon) + 0.0053\sigma_m^2 - 20 \log(A) \quad (11)$$

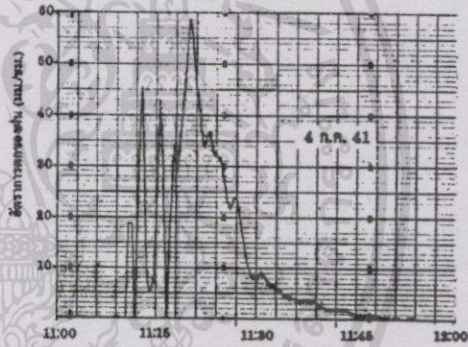
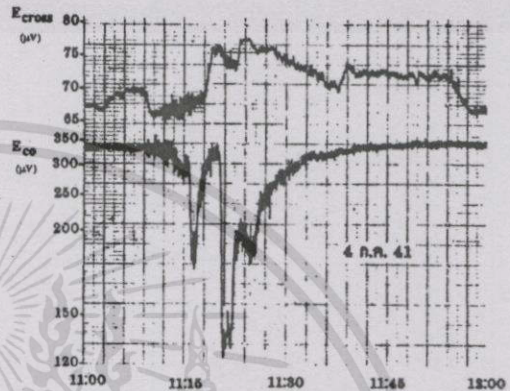
ดังนั้น

$$XPD = 44.60214437 - 20 \log(A) \quad (12)$$

4. ผลการทดลอง

ผลการวัดการเปลี่ยนโพลาริซ์ตลอดระยะเวลา 4 เดือน (เมษายน-กรกฎาคม 41) พบว่าค่า E_{cross} จะเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกๆ ของฝน ขณะที่ E_{co} ลดลงเนื่องจากการลดทอน อัตราการเพิ่มขึ้นของ E_{cross} จะต่ำลงเมื่อฝนตกมากขึ้น หรือการลดทอนมากขึ้น รูปที่ 3 เป็นตัวอย่างระดับสัญญาณ E_{cross} กับ E_{co} ที่วัดได้เมื่อวันที่ 4 ก.ค. 2541 เวลา 11:30 น. ในขณะที่เกิดฝน

ตกสูงสุดด้วยอัตรา 58 มม./ชม. และค่า XPD เกิดขึ้น 21.27 dB ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง เราได้ทำการวิเคราะห์ค่า XPD เทียบกับการลดทอนทั้งสิ้น 64 ตัวอย่าง ค่า XPD ค่าที่ต่ำสุด 18.27 dB ที่การลดทอนของโพลาริซ์เดิม 9.4 dB และอัตราการของฝน 90 มม./ชม.



รูปที่ 3 ตัวอย่าง XPD การลดทอนเทียบกับอัตราการตกของฝน

4.1 การเปลี่ยนแปลง XPD เทียบกับการลดทอน A

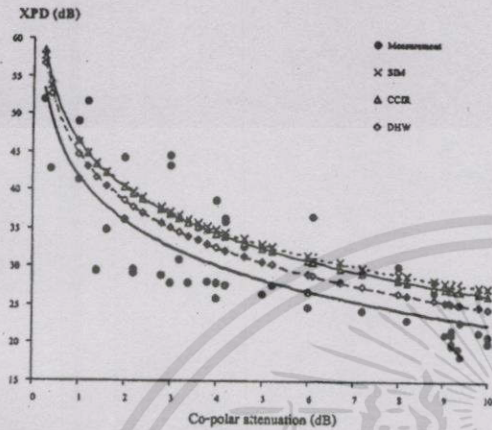
ค่า XPD ที่วัดได้จากการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า XPD ที่เป็นฟังก์ชันของ A ด้วยแบบจำลอง CCIR, SIM และ DHW ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าการกระจายของข้อมูล XPD จากการทดลองมีเส้นแนวโน้มเหมือนกับที่ทำนายด้วยแบบจำลอง แต่ค่ากว่าประมาณ 4 dB และมีความโก่งเคี้ยวของ DHW โดยแตกต่างกันประมาณ 2 dB

4.2 การเปลี่ยนแปลงของ XPD เทียบกับอัตราการตกของฝน

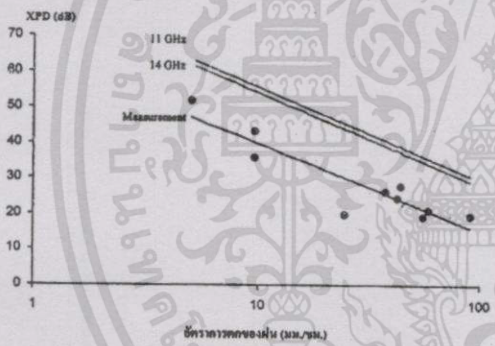
ค่า XPD ที่วัดได้จากการทดลอง เรายังนำมาวิเคราะห์เทียบกับอัตราการตกของฝนพบว่า ค่า XPD จะต่ำลงเมื่ออัตราการตกของฝนมากขึ้น ความสัมพันธ์ของทั้งสองปริมาณจะเป็นเชิงเส้นเมื่อ อัตราการตกของฝนอยู่ในสเกลลอ็ก โดยลดลงด้วยอัตรา 25 dB/decade ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจาก[9] ซึ่งคำนวณที่มุมขย 30 องศา และไร้อนุภาคฝน

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

แบบ Pruppacher-Peter ค่าที่ได้ต่างกันประมาณ 15 dB แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง CCIR, SIM และ DHW



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของ XPD เทียบกับอัตราการตกของฝนที่ได้จากการทดลองและคำนวณ ที่ 11, 14 GHz[9]

4.3 ค่า XPD ในสภาพเลวร้าย (worst-case)

ค่า XPD ในสภาพเลวร้าย คิดที่ XPD น้อยกว่า 22 dB[10] เกิดขึ้น 12 ครั้ง รวมเวลาประมาณ 10 นาที คิดเป็น 0.07% ของเวลาที่ทำการทดลองหรือ 18.75%ของจำนวนครั้งทั้งหมด

5. สรุปผลการทดลอง

ค่า XPD ทั้งหมดที่นำเสนอเป็นค่า XPD เฉพาะที่มีสาเหตุจากการตกของฝนเท่านั้น ไม่รวม XPD ที่เกิดจากการกระบวนกรกั้นตัวของหยดน้ำ, เกล็ดน้ำแข็ง และอื่นๆ ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับที่ทำนายด้วยแบบจำลอง CCIR, SIM และ DHW แล้วจะใกล้เคียงกับแบบจำลอง DHW มากที่สุด และค่า XPD จะลดลงเป็นสัดส่วนกับอัตราการ

ตกของฝนในสเกลล็อก ด้วยอัตรา 25 dB/decade เนื่องจากช่วงเวลาในการวัดเริ่มจากเมฆจนถึงกรกฎาคม ซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูร้อนถึงต้นฤดูฝน ปริมาณฝนอาจจะยังคงไม่มากเพียงพอสรุปค่า XPD ในสภาพเลวร้ายได้อย่างถูกต้องและค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ข้อมูลอาจเกิดได้จากการขาดข้อมูลพารามิเตอร์องค์ประกอบอนุภาคฝนที่แท้จริง และความไม่แม่นยำของอุปกรณ์สายอากาศ

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ กฤษณาภิรัช, "การศึกษาและการวิเคราะห์สัญญาณดาวเทียมย่าน Ku", วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
- [2] G. Brassard, P.A. Watson, "Depolarization by rain", *Atmospheric Modeling and Millimeter Wave Propagation*, pp. 213-233, Chapman & Hall, London, 1995
- [3] Allnutt, J.E., "Depolarization effects", *Satellite-to-ground radiowave propagation*, pp. 249-318, Peter Penegrinus, 1989
- [4] T.S. Chu, "A Semi-empirical formula for microwave depolarization versus rain attenuation on earth-space paths", *IEEE Trans. Commun.*, vol. Com-30, pp.2550-2554, Dec 1982
- [5] N.L. Stutzman, D.L. Runyon, "The Relationship of Rain-Induced Cross-Polarization Discrimination to Attenuation for 10 to 30 GHz Earth-Space Radio Links", *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. AP-32, pp.705-710, July, 1984
- [6] A.W. Dissanyake, D.P. Haworth, and P.A. Watson, "Analytical model for cross-polarization on earth-space radio paths for frequency range 9-30 GHz", *Ann. Telecommun.*, Vol. 35, pp.398-404, 1980
- [7] W.L. Stutzman, "A review of theoretical modeling of millimeter wave propagation through precipitation", *Interim Rep. For NASA under Contract NAS3-22577*, May 1980
- [8] CCIR, "Cross-polarization due to the atmosphere", *CCIR Study Group Rep. 722 XVth Plenary Assembly*, Vol. V, pp. 185-193, Int Telecommun., Union, Geneva, 1982
- [9] Ajayi, G.O., Owolabi, I.E. and Adimula, I.A., "Rain induced depolarisation from 1 GHz to 300 GHz in tropical environment", *Int. J. Infrared Millimeter Wave*, Vol. 8, pp.177-197, Feb ,1987
- [10] COST 205 : Influence of the atmosphere on radio propagation on satellite Earth paths at frequencies above 10 GHz", *Commission of the European Communities report EUR 9923*, ISBN 92 825 54120, 1985

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐ จันทร์ครบ ภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่บ้านเลขที่ 23 หมู่บ้านนกรเรียน ต.สะเดา อ.พลับพลาชัย (ประโคนชัย) จ.บุรีรัมย์ เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2509 ปัจจุบันอายุ 35 ปี จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ ได้รับปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.) ในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ.2532

เริ่มเข้าทำงานครั้งแรกในตำแหน่งครูปฏิบัติการ ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ในปี พ.ศ. 2531 และได้รับการบรรจุแต่งตั้งเป็นอาจารย์ประจำตั้งแต่ พ.ศ. 2532 เป็นต้นมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 219/777 หมู่ที่ 12 หมู่บ้านพงษ์ศิริชัย 1 ถนนเพชรเกษม ตำบล อ้อมน้อย อำเภอ กระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร

