

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ



นายธีรศักดิ์ อนันตกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

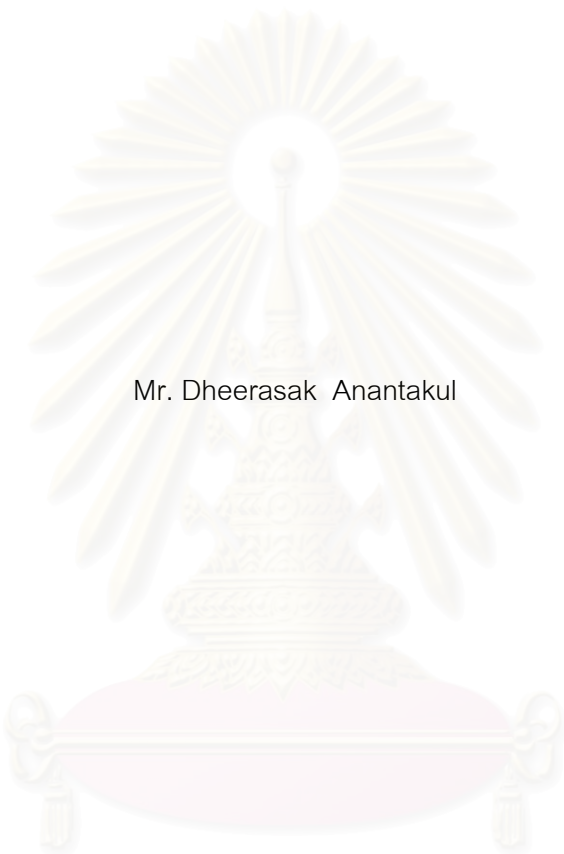
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1540-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A MODEL FOR RADIO WAVE PROPAGATION BY SCATTERING FROM  
METEOR TRAILS IN THE LOW LATITUDE REGION



Mr. Dheerasak Anantakul

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2001

ISBN 974-03-1540-2



ธีรศักดิ์ อนันตกุล: แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ. (A MODEL FOR RADIO WAVE PROPAGATION BY SCATTERING FROM METEOR TRAILS IN THE LOW LATITUDE REGION) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร, 132 หน้า, ISBN 974-03-1540-2

ลำของอิเล็กตรอนที่เรียกว่ารอยทางเดินของดาวตกซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกด้วยความเร็วสูง เสียดสีกับโมเลกุลของอากาศและเกิดการไอออไนซ์ขึ้นนั้น สามารถกระเจิงคลื่นวิทยุได้ ความสามารถในการกระเจิงคลื่นวิทยุได้นี้นำมาใช้เป็นประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูลได้ เนื่องจากปัญหาการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกเป็นปัญหาที่ซับซ้อนทั้งในส่วนสมบัติทางไฟฟ้าของรอยทางเดินและในส่วนเรขาคณิตของการกระเจิง ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากความสามารถในการกระเจิงคลื่นวิทยุได้ของรอยทางเดินจึงจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่ดีเพื่อทำนายลักษณะสมบัติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกทั้งในเชิงเดี่ยวหรือลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินรอยเดี่ยวและเชิงสถิติ ในส่วนลักษณะสมบัติเชิงเดี่ยววิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ซึ่งพิจารณารอยทางเดินของดาวตกว่าเป็นลำอิเล็กตรอนทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์หลายชั้นวางซ้อนอยู่บนแกนเดียวกันและมีลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแนวรัศมีเป็นแบบเกาส์เพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงได้โดยไม่เกิดปัญหาความไม่ต่อเนื่องของผลดังเช่นกรณีที่ทำด้วยแบบจำลองแบบประมาณ 2 แบบจำลองคือ แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนระยะสื่อสารและแนวการวางตัวของรอยทางเดิน ผลการศึกษาพบว่าผลการวิเคราะห์ในกรณีการเปลี่ยนระยะสื่อสารมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองแบบประมาณ ขณะที่กรณีการเปลี่ยนแนวการวางตัวของรอยทางเดินนั้น ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีส่วนที่ไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองแบบประมาณ

เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ และการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบสามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวได้ใกล้เคียงกับการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจริง งานวิจัยนี้จึงได้จัดสร้างข่ายเชื่อมโยงขึ้นเพื่อทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ผลการเปรียบเทียบลักษณะของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบกับลักษณะของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยสามารถหาผลการวิเคราะห์ที่ให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลทั้งสองส่วนมากกว่า 0.8 ได้ นอกจากนี้ข้อมูลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงทดสอบยังนำมาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองเชิงสถิติด้วยแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ และผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงจึงสามารถใช้เป็นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำได้

ภาควิชา .....วิศวกรรมไฟฟ้า ปลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา .....วิศวกรรมไฟฟ้า ปลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา ..... 2544

## 4071802821: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS: METEOR TRAIL / METEOR BURST COMMUNICATION / RADIO WAVE SCATTERING / PROPAGATION MODEL / FULL WAVE ANALYSIS

DHEERASAK ANANTAKUL: THESIS TITLE (A MODEL FOR RADIO WAVE PROPAGATION BY SCATTERING FROM METEOR TRAILS IN THE LOW LATITUDE REGION) THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, 132 pp. ISBN 974-03-1540-2

Electron columns called meteor trails formed when meteoroids entering the earth, rubbing with the air molecules, and producing ionized particles can scatter radio waves. The capability in scattering radio waves can be used for data communication. Complexity of the problem of radio wave scattering from a meteor trail is due to both the electrical properties of the trail and the scattering geometry. Thus use of the radio wave scattering capability of meteor trails needs good models for prediction of propagation characteristics for both the single trail scattering and the statistical aspects. For the single trail scattering characteristics, this dissertation proposes the stratified trail model in conjunction with the full wave analysis in order to analyze the scattering characteristics. The stratified trail model treats a meteor trail as many infinitely long electron columns lying on the same axis and the radial electron distribution is Gaussian. Using the full wave analysis, the radio wave scattering characteristics can be analyzed with no discontinuity as that of the two approximate models: the underdense and the overdense models. This dissertation also studies the effects in changing the communication range and the trail orientation by using this full wave treatment. It is found that results in the case of changing the communication range agree well with those from approximate models while the case of changing the trail orientation shows some disagreements.

In order to verify the validity of the stratified model and the full wave analysis in determining the characteristics of the scattered wave, experimental links are built in this work for measuring the radio wave scattering from meteor trails. The results from the analysis and the measured data agree well with each other. Results from the analysis and the measured data have correlation coefficients better than 0.8. The measured data from the experimental links are also used in forming the statistical model. It can be concluded that the outcome of this work can be used as a propagation model for the radio wave scattering from meteor trails in the low latitude region.

Department ..Electrical Engineering..... Student's signature .....

Field of study ..Electrical Engineering..... Advisor's signature .....

Academic year ..2001.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยापัทฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธี อักษรกิตติ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรพัฒน์ ศิริสมบุญธรรมาภ ที่ได้กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้ให้ความสนับสนุนทางการเงินแก่ผู้วิจัย และทุนวิจัยอีกส่วนหนึ่งผู้วิจัยได้รับจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ปัญหาทางคณิตศาสตร์ ขอขอบคุณ คุณถาวร สุวรรณกิจ และคุณพัฒนเกียรติ ณ นคร ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบคุณ คุณผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำสายอากาศและการทดลองตรวจวัดสัญญาณ ณ ต่างจังหวัดตลอดมา และขอขอบคุณน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการติดตั้งสายอากาศ และดำเนินการส่งและรับคลื่นวิทยุทุกครั้ง นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ที่พักและที่ติดตั้งสถานีปลายทางต่างจังหวัด ดังนี้

- อาจารย์พีระพงษ์ และอาจารย์มนตรีทิพย์ภา อุฑารสกุล ที่จังหวัดนครราชสีมา
- คุณพ่อและคุณแม่ของอาจารย์มนตรีทิพย์ภา ที่จังหวัดอุดรธานี
- คุณธีระศักดิ์ คุณพรทิพย์ สังข์ชู และคุณศรีสมร รัตนจินดา ที่จังหวัดชุมพร
- คุณผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ และคุณพ่อและคุณแม่ของคุณผดุงศักดิ์ ที่จังหวัดยะลา
- คุณฉลาด เสนดี อดีตผู้อำนวยการกองวิศวกรรมระบบสื่อสารการบินอากาศ บริษัทวิทยุการบิน จำกัด ที่ประสานงานเรื่องที่พักและที่ติดตั้งสถานีปลายทางที่ศูนย์ควบคุมการจราจรทางอากาศ จังหวัดเชียงใหม่
- คุณสมพร และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่สถานีเรดาร์ฝนหลวง อำเภออมก๋อยจังหวัดเชียงใหม่
- คุณณรงค์ และคุณมยุรี จารุศรีวรรณมา ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา
- คุณณรงค์ชัย ลิ่มเศรษฐการ เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 2 ภาคใต้ ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พี่ๆ และญาติทุกท่านซึ่งสนับสนุนทั้งร่างกายและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญรูป .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	7
ขอบเขตของการวิจัย .....	7
คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย .....	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย .....	8
วิธีดำเนินการวิจัย .....	8
ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิจัย .....	8
บทที่ 2 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก .....	10
2.1 ลักษณะสมบัติทั่วไปของข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก .....	11
2.1.1 เรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยง .....	11
2.1.2 ลักษณะสมบัติทั่วไปของระบบสื่อสารผ่านดาวตก .....	13
2.1.3 การประยุกต์ใช้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก .....	15
2.2 กลไกการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก .....	16
2.2.1 การกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ .....	16
2.2.2 การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง .....	17
2.3 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก .....	18
2.3.1 แหล่งเทหวัตถุดาวตก ปรางค์การณดาวตกและการก่อตัวเป็น .....	18
รอยทางเดิน	



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดิน ของดาวตก	..... 21
2.4 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตก	..... 24
2.4.1 การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน	..... 25
2.4.2 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล	..... 26
2.4.3 ผลของพิกัดที่ตั้งและแนวการวางตัวของสายเชื่อมโยงต่อลักษณะ สมบัติเชิงสถิติระยะยาว	..... 27
2.5 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตก	..... 28
2.5.1 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่กระเจิง จากรอยทางเดินของดาวตก	..... 29
2.5.2 การแจกแจงความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิง จากรอยทางเดินของดาวตก	..... 30
บทที่ 3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก รอยเดี่ยว	..... 31
3.1 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดิน ความหนาแน่นสูง	..... 32
3.1.1 แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตก	..... 32
3.1.2 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ	..... 34
3.1.3 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง	..... 38
3.1.4 ขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดิน ความหนาแน่นสูง	..... 39
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ	... 42
3.2.1 แบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ	..... 43



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2	เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตก ..... 45
3.2.3	เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพจน์ ..... 47
3.2.4	เมทริกซ์การสะท้อนของทรงกระบอกเป็นชั้นๆ ..... 51
3.2.5	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของรอยทางเดินของดาวตก ..... 53
3.3	ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตรอยเดี่ยว ..... 56
3.3.1	การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณรับตามเวลา ..... 57
3.3.2	ความยาวนานของสัญญาณ ..... 68
บทที่ 4	การตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ..... 72
4.1	ข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก..... 72
4.1.1	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อุดรธานี ..... 74
4.1.2	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร ..... 75
4.1.3	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา ..... 76
4.1.4	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – เชียงใหม่ ..... 77
4.1.5	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อมก๋อย (เชียงใหม่) ..... 78
4.1.6	ข่ายเชื่อมโยงสงขลา – ฉะเชิงเทรา ..... 79
4.1.7	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราช ..... 80
4.1.8	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมา ..... 81
4.2	อุปกรณ์ การปรับเทียบอุปกรณ์ และการวิเคราะห์ห้บกำลังเบื้องต้น ..... 83
4.2.1	ผังอุปกรณ์ ..... 83
4.2.2	การปรับเทียบอุปกรณ์ ..... 85
4.2.3	การวิเคราะห์ห้บกำลังเบื้องต้น ..... 87
4.3	ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จาก ..... 88
	การตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์
4.3.1	กรรมวิธีเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ ..... 88
4.3.2	ผลเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ ..... 89
4.4	สถิติการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ..... 96

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก	96
4.4.2 การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก	98
4.4.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในรอบ 1 วัน	99
4.4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกตามฤดูกาล	101
บทที่ 5 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่การกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก	102
5.1 ขอบเขต และลักษณะของแบบจำลอง	102
5.1.1 ขอบเขตของแบบจำลอง	103
5.1.2 ลักษณะของแบบจำลอง	104
5.2 กรรมวิธีสร้างแบบจำลองและแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ	105
5.2.1 แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกรวยเดี่ยว	105
5.2.2 แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ	107
5.3 การทดสอบแบบจำลอง	110
5.3.1 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราช เดือนกันยายน 2544	111
5.3.2 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมา เดือนกุมภาพันธ์ 2545	112
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	114
สรุปผลการวิจัย	114
ข้อเสนอแนะ	117

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง .....	119
ภาคผนวก ก. สำเนาหนังสืออนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุและเครื่องวิทยุคมนาคม .....	123
ภาคผนวก ข. ข้อมูลอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิง ....	127
จากรอยทางเดินของดาวตก	
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	132



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของระบบสื่อสารประเภทต่างๆ .....	1 5
ตาราง 2.2 ฝนดาวตกที่สำคัญในรอบ 1 ปี .....	2 0
ตาราง 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวล ปริมาณ รัศมี ระดับความสว่างเชิงทัศน .....	22
และความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ของดาวตก	
ตาราง 4.1 วันเวลาที่ตรวจวัดสัญญาณ .....	8 2
ตาราง 5.1 ค่าปัจจัยเวลา .....	109
ตาราง 5.2 ค่าปัจจัยเดือน .....	110



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 เสาคณิตของเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก .....	12
รูป 2.2 โลกและเทหวัตถุดาวตกในระบบสุริยะ .....	19
รูป 2.3 กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน .....	25
รูป 2.4 กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล .....	27
รูป 3.1 แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตก .....	34
รูป 3.2 เสาคณิตของการกระเจิงกลับ .....	35
รูป 3.3 เสาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้า .....	37
รูป 3.4 ลักษณะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก .....	40
รูป 3.5 คลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านรอยทางเดินทรงกระบอก 2 ชั้น .....	43
รูป 3.6 คลื่นตกกระทบทำมุมใดๆ กับแกนของรอยทางเดิน .....	45
รูป 3.7 เสาคณิตของรอยทางเดินของดาวตก .....	46
รูป 3.8 แบบจำลองคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาและออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์ .....	48
รูป 3.9 เสาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้ากรณีโพลาไรเซชันเป็นแนวระดับ .....	58
รูป 3.10 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีเรดาร์ .....	59
รูป 3.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีการกระเจิงไปข้างหน้า ( $\phi' = 64^\circ$ ) .....	59
รูป 3.12 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ระยะสื่อสารต่างๆ .....	64
รูป 3.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น TE ที่ตกกระทบรอยทางเดินขนาด $10^{13}$ e/m .....	65
ที่แนวการวางตัวค่าต่างๆ สำหรับชายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสาร 400 กิโลเมตร	
รูป 3.14 สัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดเมื่อรอยทางเดินมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ....	67
และแนวการวางตัวต่างกัน สำหรับชายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสาร 400 กิโลเมตร	
รูป 3.15 องค์ประกอบของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีระยะสื่อสารเท่ากับ 400 กิโลเมตร ...	67
$q = 10^{13}$ e/m และ $\beta = 30^\circ$	
รูป 3.16 ความยาวนานของคลื่นกระเจิงเมื่อเสาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ .....	69
รูป 3.17 เลขดัชนี $b$ ของค่าปัจจัยการเพิ่มความยาวนานของสัญญาณที่ความหนาแน่น .....	71
อิเล็กตรอนเชิงเส้นค่าต่างๆ	

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูป 4.1	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อุดรธานี ..	74
รูป 4.2	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร .....	75
รูป 4.3	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา .....	76
รูป 4.4	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – เชียงใหม่ .	77
รูป 4.5	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง .....	78
	กรุงเทพฯ – อมก๋อย (เชียงใหม่)	
รูป 4.6	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงสงขลา – ฉะเชิงเทรา ..	79
รูป 4.7	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง .....	80
	กรุงเทพฯ - นครศรีธรรมราช	
รูป 4.8	แผนที่ พิกัด ระยะเวลาสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง .....	81
	กรุงเทพฯ - นครราชสีมา	
รูป 4.9	ผังอุปกรณ์ภาคส่ง .....	83
รูป 4.10	ผังอุปกรณ์ภาครับ .....	84
รูป 4.11	ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง .....	85
รูป 4.12	ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ .....	86
รูป 4.13	แผนผังการแปลงภาพสัญญาณวีดิทัศน์เป็นข้อมูลเชิงเลข .....	88
รูป 4.14	ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำปกติ .....	90
รูป 4.15	ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่มีแอมพลิจูด .....	91
	เริ่มต้นสูงเป็นพิเศษ	
รูป 4.16	ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงปกติ .....	92
รูป 4.17	ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีช่วงการเพิ่ม .....	93
	สัญญาณนาน	
รูป 4.18	ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีการแกว่งของ .....	94
	สัญญาณ	
รูป 4.19	ตัวอย่างสัญญาณที่มีลักษณะไม่เหมือนกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจาก .....	95
	รอยทางเดินความหนาแน่นต่ำหรือรอยทางเดินความหนาแน่นสูง	
รูป 4.20	การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก .....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูป 4.21 การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ..... 98

รูป 4.22 อัตราการเข้ามาของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน .....100  
มีระดับมากกว่า -123 dBm ในรอบ 1 วันของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพร

รูป 4.23 การเปลี่ยนแปลงอัตราการเข้ามาของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิง ..... 101  
จากรอยทางเดินมีระดับมากกว่า -123 dBm ณ เวลา 0 นาฬิกา ในรอบ 1 ปี  
สำหรับข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสาร 400 กิโลเมตร

รูป 5.1 กรรมวิธีสร้างแบบจำลองเชิงสถิติ ..... 108

รูป 5.2 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ..... 112  
มีระดับมากกว่า -123 dBm ในรอบ 1 วันของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ -  
นครศรีธรรมราช

รูป 5.3 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ..... 113  
มีระดับมากกว่า -123 dBm ในรอบ 1 วันของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ -  
นครราชสีมา

รูป ก.1 สำเนาหนังสืออนุญาตฉบับที่ 1 ..... 124

รูป ก.2 สำเนาหนังสืออนุญาตฉบับที่ 2 ..... 125

รูป ก.3 สำเนาหนังสืออนุญาตฉบับที่ 3 ..... 126

รูป ข.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ ..... 127

รูป ข.2 วงจรขยายกำลังต่ำ ..... 128

รูป ข.3 วงจรขยายกำลังสูง ..... 128

รูป ข.4 วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ ..... 129

รูป ข.5 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ ..... 130

รูป ข.6 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง ..... 130

รูป ข.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ..... 131



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอวกาศไม่ได้มีแต่ดาวต่างๆ รวมถึงดาวหางและดาวเคราะห์น้อยเท่านั้น แต่มีสะเก็ดดาวหรือเทหวัตถุขนาดเล็กรวมอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก เมื่อเทหวัตถุขนาดเล็กเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในสนามโน้มถ่วงของโลกจะถูกดึงดูดให้พุ่งเข้าสู่โลกเกิดเป็นดาวตก ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างเทหวัตถุดาวตกกับอากาศทำให้อะตอมที่ผิวของเทหวัตถุดาวตกหลุดออกและปะทะกับโมเลกุลของอากาศโดยรอบ พลังงานจากการปะทะกันทำให้อะตอมและโมเลกุลเหล่านี้แตกตัวเป็นประจุ กลุ่มประจุที่เกิดขึ้นเรียงตัวเป็นแนวยาวตามเส้นทางที่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่ไป กลุ่ม-ประจุเหล่านี้เรียกว่า รอยทางเดินของดาวตก (**meteor trails**) รอยทางเดินที่เกิดขึ้นสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ความสามารถในการสะท้อนคลื่นวิทยุของรอยทางเดินจึงนำมาใช้เป็นประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูล นอกจากนี้ยังอาจนำมาใช้เพื่อศึกษาสภาพบรรยากาศชั้นบน (**upper atmosphere**) หรือแม้แต่ศึกษาเกี่ยวกับดาวตกในเชิงดาราศาสตร์เองด้วยก็ได้ โดยทั่วไปการใช้ประโยชน์ในการศึกษาสภาพบรรยากาศชั้นบนและการศึกษาเชิงดาราศาสตร์นี้กำหนดให้สาย-อากาศส่งและรับคลื่นวิทยุอยู่ในตำแหน่งเดียวกันหรือมีเรขาคณิตแบบเรดาร์เอกสถิต (**monostatic radar**) ซึ่งต่อไปจะเรียกโดยย่อว่า เรขาคณิตแบบเรดาร์ ขณะที่การใช้ประโยชน์ในเชิงการสื่อสารข้อมูลจำเป็นต้องให้สายอากาศส่งและรับคลื่นวิทยุอยู่ห่างกันหรือมีเรขาคณิตแบบเรดาร์ทวิสถิต (**bistatic radar**) หรือเรียกอีกอย่างว่าแบบกระเจิงไปข้างหน้า (**forward scattering**) ตามลักษณะการประยุกต์ใช้ที่อยู่แล้ว แต่ไม่ว่าการประยุกต์ใช้จะเป็นลักษณะใด เราก็จำเป็นต้องเข้าใจในลักษณะสมบัติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกทั้งในเชิงเดี่ยว (ลักษณะสมบัติการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินรอยเดี่ยว) และในเชิงสถิติ เพื่อที่การประยุกต์ใช้นั้นจะได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

เมื่อพิจารณาภาพรวมของการวิจัยและการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากความสามารถในการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก พบว่าการวิจัยและการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่กระทำในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป ซึ่งล้วนแล้วแต่มีพิกัดละติจูดสูงกว่าประเทศไทยทั้งสิ้น ทำให้ข้อมูลหรือสถิติเกี่ยวกับการรับคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำมีอยู่น้อย ขณะที่พิกัดละติจูดมีผลต่อลักษณะสมบัติการสะท้อนทั้งในเชิงเดี่ยวและในเชิงสถิติ ทั้งนี้เพราะที่พิกัดละติจูดต่างกัน การกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุ

ดาวตกรวมถึงอัตราเร็วสัมพัทธ์และทิศทางที่ดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกก็แตกต่างกันด้วยเช่นกัน ผลต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติทำให้อัตราการมาถึง (**arrival rate**) ของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อ ข่ายเชื่อมโยงมีค่าต่างกัน ซึ่งทำให้ลักษณะสมบัติเชิงสถิติอื่นๆ เช่น การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุด การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน (**diurnal variation**) และการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (**seasonal variation**) แตกต่างกันด้วย ขณะที่ในเชิงเดี่ยวอัตราเร็วสัมพัทธ์และทิศทางที่ดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกที่ต่างกันส่งผลให้คลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินมีลักษณะต่างกััน ดังนั้นการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการตรวจวัดภายในประเทศไทยทั้งหมดจึงเป็นงานที่ให้ข้อมูลในซีกโลกเหนือย่านละติจูดต่ำเพิ่มขึ้น แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งได้เปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดจึงถือเป็นแบบจำลองสำหรับซีกโลกเหนือย่านละติจูดต่ำด้วย

การศึกษาในเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยว ที่ผ่านมานั้นแบ่งเป็น 2 แนวทางคือ การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติการแพร่กระจายโดยอาศัยแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น และการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ (**full wave analysis**) กรรมวิธีวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบต่างก็ต้องอาศัยการจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินที่เกิดขึ้น เนื่องจากเทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่เร็วมากเมื่อเทียบกับอัตราการแพร่ของประจุของรอยทางเดิน ทำให้อัตราการมาถึงของรอยทางเดินมีลักษณะเป็นลำประจุขนาดยาวแต่มีพื้นที่หน้าตัดแคบจนประมาณได้ว่ารอยทางเดินของดาวตกมีลักษณะเป็นลำประจุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมที่มีความยาวเป็นอนันต์ การพิจารณาลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตกให้มีลักษณะดังแบบจำลองนี้นิยมใช้ทั้งในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและในการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ จากแบบจำลองลักษณะทางกายภาพดังกล่าวทำให้การบ่งบอกขนาดรอยทางเดินกำหนดเป็น ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น (**electron line density**) ในหน่วยจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยความยาว (**e/m**) โดยรอยทางเดินขนาดเล็กที่สุดที่สามารถตรวจจับได้ด้วยคลื่นวิทยุมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นประมาณ  $10^{10}$  e/m ขณะที่รอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นตั้งแต่ประมาณ  $10^{14}$  e/m ขึ้นไปจะเป็นรอยทางเดินที่สามารถสังเกตได้ด้วยตา โดยมีระดับความสว่างเชิงทัศน (**visual magnitude**) เท่ากับ 5 (Sugar, 1964)

งานวิจัยเชิงทฤษฎีงานแรกๆ ที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวที่ครอบคลุมขนาดของรอยทางเดินของดาวตกมากที่สุดคืองานของ Kaiser และ Closs (1952) งานดังกล่าววิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบโดยกำหนดให้

เรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบเรดาร์ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าน้อย ผลที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยการรวมผลการกระเจิงคลื่นวิทยุอย่างอิสระจากกลุ่มประจุทรงกระบอก ขณะที่เมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่ามาก ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์การ-สะท้อนคลื่นวิทยุจากทรงกระบอกโลหะ Kaiser และ Closs (1952) เรียกกรรมวิธีวิเคราะห์โดย-อาศัยการรวมผลการกระเจิงและการสะท้อนจากทรงกระบอกโลหะว่าแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ (underdense model) และแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง (overdense model) ตามลำดับ

Eshleman (1955) ได้วิเคราะห์ปัญหาการสะท้อนคลื่นวิทยุจากกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีรูปทรงต่างกัน 3 แบบคือ กลุ่มอิเล็กตรอนทรงกลม กลุ่มอิเล็กตรอนทรงกระบอก และแผ่นอิเล็กตรอน ในลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองความหนาแน่นสูงและเสนอผลการวิเคราะห์ในรูปแบบสัมประสิทธิ์การสะท้อน นอกจากนี้ Eshleman ยังได้แสดงขอบเขตระหว่างการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกลุ่มอิเล็กตรอนความหนาแน่นต่ำและสูงไว้ด้วย

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงนั้น Manning (1953) ได้เสนอผลการวิเคราะห์จากการรวมผลของการหักเหคลื่นวิทยุเนื่องจากกลุ่มอิเล็กตรอนที่อยู่นอกรัศมีที่ถือเป็นรัศมีของทรงกระบอกโลหะหรือที่เรียกว่ารัศมีวิกฤต (critical radius) ของรอยทางเดิน ผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้แสดงถึงแอมพลิจูดที่ต่ำกว่าผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ไม่ได้รวมผลของการหักเหจากกลุ่มอิเล็กตรอนที่อยู่นอกรัศมีวิกฤต อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นี้ยังคงกำหนดให้เรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบเรดาร์อยู่ Hines และ Forsyth (1957) วิเคราะห์ปัญหาการ-สะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีเรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบการ-กระเจิงไปข้างหน้า ด้วยกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต (geometrical optics; GO) แต่การ-วิเคราะห์ดังกล่าวไม่ได้รวมผลของการหักเหไว้ด้วย การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติการสะท้อนในกรณีเรขาคณิตของการสะท้อนแบบการกระเจิงไปข้างหน้าที่รวมผลของการหักเหเป็นของ Manning (1959) ซึ่งเป็นการขยายงานจากการวิเคราะห์ในกรณีเรดาร์ (Manning, 1953) แม้ว่าจะได้มีการ-พัฒนาแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเช่น การคำนึงถึงผลของการหักเหคลื่นวิทยุจากอิเล็กตรอนที่อยู่นอกรัศมีวิกฤตดังที่กล่าวข้างต้น แต่ปัญหาหลักของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทั้ง 2 แบบนี้คือความไม่ต่อเนื่องของผลการ-วิเคราะห์ กล่าวคือลักษณะของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการ-วิเคราะห์จะเปลี่ยนแปลงอย่าง

ทันทีทันใดจากลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากลำอิเล็กตรอนทรงกระบอกมาเป็นลักษณะของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากท่อโลหะทรงกระบอกที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นซึ่งเป็นค่าขอบเขตระหว่างแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ขณะที่คลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกจริงโดยเฉพาะรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นอยู่ในระดับปานกลาง ( $10^{13} - 10^{16}$  e/m) ซึ่งเรียกว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นในย่านการเปลี่ยนผ่าน (transition region) มีลักษณะร่วมกันระหว่างผลการวิเคราะห์ทั้งสอง (Poulter and Baggaley, 1978) การที่แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงไม่สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจริง โดยเฉพาะรอยทางเดินในย่านการเปลี่ยนผ่านนั้นอาจจะทำให้การแปลความหมายลักษณะของคลื่นวิทยุที่รับได้ในการประยุกต์ใช้บางประเภท เช่น การวิเคราะห์การกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนของบรรยากาศชั้นบน เกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกจริงในงานวิจัยนี้จึงเน้นที่การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินด้วยกรรมวิธีเชิงคลื่นเต็มรูปแบบซึ่งไม่เกิดปัญหาความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวข้างต้น

Brysk และ Buchanan (1965) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติการสะท้อนคลื่น-วิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกในรูปภาคตัดขวางการกระเจิง (scattering cross section) ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ พบว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำให้ผลใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าน้อยกว่า  $10^{13}$  e/m ขณะที่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจะได้แอมพลิจูดมากกว่าการวิเคราะห์เชิงคลื่น การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบโดย Brysk และ Buchanan (1965) นั้นอาศัยสมการคลื่นสเกลาร์ ดังนั้นผลที่ได้จึงไม่อยู่ขึ้นกับโพลาไรเซชันหรือแนวการวางตัวของสนาม-ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับแกนของรอยทางเดิน

Jones และ Collins (1974) วิเคราะห์ลักษณะสมบัติการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกโดยแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่สนามไฟฟ้าขนานและกรณีที่สนามไฟฟ้า ตั้งฉากกับแนวแกนของรอยทางเดิน ผลการวิเคราะห์กรณีขนานสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Brysk และ Buchanan (1965) ขณะที่ผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ตั้งฉากแสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดของคลื่นที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่ากรณีขนานโดยที่มีรอยทางเดินของดาวตก 2 ขนาดที่ให้ แอมพลิจูดของคลื่นสูงเป็นพิเศษ และเรียกปรากฏการณ์ที่คลื่นสะท้อนมี



แอมพลิจูดสูงเป็นพิเศษนี้ว่า เรโซแนนซ์ยักษ์ (giant resonance) ซึ่งขัดแย้งกับผลการวิเคราะห์โดย Poulter และ Baggaley (1977) ที่วิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวใหม่และแสดงผลการวิเคราะห์ว่าอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดสูงสุดของกรณีตั้งฉากต่อกรณีขนานมีค่าประมาณ 2 เท่านั้น นอกจากนี้ Poulter และ Baggaley (1977) ยังได้แสดงลักษณะสมบัติวิภาคของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกจากการวิเคราะห์อีกด้วย

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบดังที่กล่าวมานั้นเป็นการวิเคราะห์ที่กำหนดให้เรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบเรดาร์เท่านั้น Keitel (1955) ได้วิเคราะห์ปัญหานี้ในกรณีที่เรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบการกระเจิงไปข้างหน้า อย่างไรก็ตามเรขาคณิตของการสะท้อนในงานของ Keitel (1955) ยังคงกำหนดให้คลื่นวิทยุตกกระทบบนรอยทางเดินในลักษณะตั้งฉาก Wait (1955) แสดงการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นที่กระเจิงจากกลุ่มอิเล็กตรอนทรงกระบอกโดยกำหนดให้เรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบการกระเจิงไปข้างหน้า แต่ได้จำกัดให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีลักษณะการแจกแจงแบบคงตัว (uniform distribution) ตลอดลำอิเล็กตรอนเท่านั้น ซึ่งต่างจากรอยทางเดินของดาวตกที่ถือว่ามีลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเป็นแบบคงตัวตามแนวแกนของรอยทางเดินเท่านั้น ขณะที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวหน้าตัดของรอยทางเดินมีลักษณะการแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) (Sugar, 1964) ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการแพร่ของอิเล็กตรอนของรอยทางเดิน งานวิจัยที่ศึกษาลักษณะสมบัติการแพร่-กระจายคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกในลักษณะที่เรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบการกระเจิงไปข้างหน้า มีเพียงงานของ Jones และ Jones (1990b) ซึ่งแสดงกรรมวิธีวิเคราะห์แต่ไม่ได้แสดงผลการวิเคราะห์ไว้

เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตก รอยเดียวโดยไม่จำกัดว่าเรขาคณิตของการสะท้อนเป็นแบบเรดาร์หรือแบบการกระเจิงไปข้างหน้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้กรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบทั้งนี้เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความต่อเนื่องตลอดช่วงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้วิเคราะห์ ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ (stratified trail) ซึ่งจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินว่าเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีรูปทรงเป็นท่อทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมหลายชั้นวางซ้อนอยู่บนแกนเดียวกัน โดยที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของท่อแต่ละชั้นมีลักษณะคงตัวภายในชั้นแต่ต่างจากชั้นอื่นๆ ระดับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของท่อแต่ละชั้นจะลดหลั่นจากชั้นที่อยู่ใต้อันบนไปยังชั้นที่อยู่บนสุดในลักษณะคล้ายการแจกแจงแบบเกาส์ การจำลองรอยทางเดินของดาวตกใน

ลักษณะเป็นขั้นๆ ดังที่กล่าวไว้เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ทั้งนี้เพราะมีผลเฉลยของปัญหาการสะท้อนคลื่นวิทยุจากกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกที่มีความหนาแน่นคงตัวแล้ว ผลเฉลยหรือลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินเป็นขั้นๆ สามารถหาได้จากการใช้ระเบียบวิธีวนซ้ำ (recursive method) (Chew, 1995; Kong, 1975) จากรอยทางเดินขั้นที่อยู่ในที่สูงสุดกลับออกมาถึงขั้นที่อยู่นอกที่สุด

เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองและการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีดังกล่าวสามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวได้ใกล้เคียงกับการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจริง งานวิจัยนี้จึงได้จัดสร้างข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกขึ้นเพื่อตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตก ผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นขั้นๆ ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจะเปรียบเทียบกับทั้งผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง และจากการตรวจวัดคลื่นวิทยุโดยอาศัยข่ายเชื่อมโยงที่จัดสร้างขึ้น การเปรียบเทียบทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวจะแยกแสดงบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ

ส่วนประกอบอีกส่วนหนึ่งของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยสะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกคือส่วนแบบจำลองในเชิงสถิติ แบบจำลองส่วนนี้อาศัยข้อมูลการตรวจวัดทั้งหมดจากข่ายเชื่อมโยงที่จัดสร้างขึ้น ทั้งนี้เพราะไม่ปรากฏว่ามีข้อมูลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกในประเทศไทยรวมทั้งในบริเวณอื่นที่อยู่ในซีกโลกเหนืออย่างละเอียดถี่ดามาก่อน เนื่องจากข่ายเชื่อมโยงที่จัดสร้างขึ้นไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าปัจจัยบางประการที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกได้ ดังนั้นค่าปัจจัยเหล่านี้จึงถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่โดยอาศัยข้อสมมติที่สอดคล้องกับเรขาคณิตของการสะท้อนคลื่นวิทยุ เช่น กำหนดให้ตำแหน่งสะท้อนคลื่นวิทยุเกิดขึ้นที่ระดับความสูงจากพื้นโลก 95 กิโลเมตรที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับซึ่งเป็นจุดตัดของแนวโค้งของสายอากาศทั้งสองตัว การกำหนดเช่นนี้ทำให้ค่าปัจจัยอื่นๆ เช่น อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นค่าคงที่ตามไปด้วย ลักษณะสมบัติเชิงสถิติต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน และการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลจะได้มาจากการคำนวณโดยเปรียบเทียบค่าปัจจัยต่างๆ กับข้อมูลอ้างอิงของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพรที่ใช้เป็นข่ายอ้างอิงโดยอาศัยข้อสมมติดังกล่าวข้างต้น

เมื่อรวมการวิเคราะห์ในเชิงเดียวและในเชิงสถิติเข้าด้วยกันจะทำให้ได้แบบจำลองซึ่งสามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกในซีกโลกเหนืออย่างละเอียดถี่ด่า สำหรับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และลำดับขั้นในการนำเสนอผลการวิจัยจะกล่าวโดยสรุปอีกครั้งตามลำดับดังนี้

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ

### ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก เช่น กลไกในการก่อตัวและความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตก เป็นต้น และศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกโดยตรง
2. ศึกษาแบบจำลองเชิงสถิติเกี่ยวกับเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก เช่น ลักษณะการแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตก ลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นและอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยง เป็นต้น
3. พัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยความรู้เชิงทฤษฎีจากข้อ 1 และข้อ 2 ประกอบกับลักษณะสมบัติทั้งในเชิงเดี่ยวและในเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัด

### คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย

#### ภาษาไทย

รอยทางเดินของดาวตก การสื่อสารผ่านดาวตก การกระเจิงคลื่นวิทยุ แบบจำลองการ-  
แพร่กระจาย การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ

#### ภาษาอังกฤษ

meteor trail, meteor burst communication, radio wave scattering, propagation model, full wave analysis



### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. สามารถทำนายลักษณะสมบัติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ระหว่างคู่สถานีใดๆ ได้
2. สามารถใช้แบบจำลองออกแบบข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกสำหรับประเทศไทยและประเทศในเขตเดียวกันได้

### วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเชิงทฤษฎีที่เกี่ยวกับเทหวัตถุดาวตก รอยทางเดินของดาวตก การกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก และแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก
2. ออกแบบและจัดสร้างข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกเพื่อใช้ในการศึกษา
3. ตรวจสอบวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยข่ายเชื่อมโยงที่จัดสร้างขึ้น
4. วิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกับแบบจำลองอื่น
5. พัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองโดยอาศัยทฤษฎีและข้อมูลจากการตรวจวัด
6. สรุปรงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

### ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาเป็น 6 บทด้วยกัน บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย บทที่ 2 แสดงลักษณะทั่วไปของการ-กระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินดาวตก โดยกล่าวถึงลักษณะสมบัติของข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกใน หัวข้อย่อยแรก และกล่าวถึงกลไกในการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาว-ตกในหัวข้อย่อยถัดมา ในหัวข้อย่อยที่ 3 กล่าวถึงลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก ขณะที่หัวข้อย่อยที่ 4 และ 5 บรรยายเกี่ยวกับลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวและระยะสั้นของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกตามลำดับการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกล่าวถึงในบทที่ 3 โดยในหัวข้อย่อยแรกจะกล่าวเกี่ยวกับการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองที่มีอยู่ในปัจจุบันคือ แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

ขณะที่หัวข้อย่อยที่ 2 เสนอการจำลองรอยทางเดินในลักษณะเป็นชั้นๆ และใช้กรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบเพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในหัวข้อย่อยที่ 3 ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการตรวจวัดและผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ข้อมูลเกี่ยวกับข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในการตรวจวัด การติดตั้งและเปรียบเทียบอุปกรณ์จะแสดงใน 2 หัวข้อย่อยแรก ส่วนผลการตรวจวัดในรูปลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกรวยเดี่ยวแสดงในหัวข้อย่อยที่ 3 ขณะที่หัวข้อย่อยสุดท้ายเป็นการแสดงสถิติที่ได้จากการตรวจวัด การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดจากบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับจะกล่าวในบทที่ 5 ส่วนบทที่ 6 จะเป็นบทสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ในแต่ละวันมีเทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกเป็นจำนวนมาก เทหวัตถุดาวตกเหล่านี้มีความเร็วสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างเทหวัตถุดาวตกกับโมเลกุลของอากาศทำให้เทหวัตถุดาวตกและโมเลกุลของอากาศแตกตัวเป็นอนุภาคมีประจุ กลุ่มประจุที่เกิดขึ้นนี้เรียงตัวเป็นแนวยาวตามเส้นทางที่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่ไปและเรียกว่า รอยทางเดินของดาวตก (meteor trails) รอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ดังนั้นจึงใช้ประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูลได้ การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะประจุที่เรียงตัวกันเป็นรอยทางเดินจะแพร่ออกทำให้ความหนาแน่นประจุลดลงจนกระทั่งไม่สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ช่องสัญญาณในการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจึงมีลักษณะสมบัติขาดตอนเป็นพักๆ โดยทั่วไปช่องสัญญาณนี้มีระยะเวลาปรากฏอยู่ในหลักร้อยมิลลิ-วินาที แต่เนื่องจากปริมาณรอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นมีเป็นจำนวนมาก การสื่อสารข้อมูลปริมาณมากๆ จึงสามารถทำได้ถ้าจัดระเบียบวิธีสื่อสารให้เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของช่อง-สัญญาณ แม้ว่ารอยทางเดินของดาวตกจะเกิดขึ้นตลอดเวลาและมีอยู่เป็นจำนวนมากบนท้องฟ้า แต่ไม่ใช่ รอยทางเดินของดาวตกทุกรอยจะสามารถใช้ประโยชน์ในการรับส่งสัญญาณได้ รอย-ทางเดินที่สามารถใช้เป็นประโยชน์ในการรับส่งสัญญาณจะต้องมีขนาดตำแหน่งปรากฏ และแนว-การวางตัวที่เหมาะสม รายละเอียดในเรื่องนี้รวมถึงลักษณะสมบัติทั่วไปเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการสะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกซึ่งรวมถึงลักษณะสมบัติในเชิงสถิติด้วยจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้

หัวข้อแรกจะกล่าวถึงลักษณะสมบัติทั่วไปของข่ายเชื่อมโยงที่อาศัยการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก โดยแบ่งเนื้อหาเป็น 3 ส่วน ได้แก่ส่วนที่เกี่ยวกับเรขาคณิตของข่าย-เชื่อมโยงซึ่งจะแสดงเรขาคณิตของการสะท้อนคลื่นวิทยุรวมถึงแนวการวางตัวของรอยทางเดินที่เหมาะสมในการสะท้อนคลื่นวิทยุ ส่วนที่เกี่ยวกับลักษณะสมบัติของระบบสื่อสาร เช่นขนาดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณรับ เวลารอคอยรอยทางเดิน เป็นต้น และส่วนที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก หัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงกลไกในการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก 2 กลไก ซึ่งมีขนาดของรอยทางเดินเป็นปัจจัยในการแบ่งประเภท ภายหลังจากที่ได้กล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวกับข่ายเชื่อมโยงและการสะท้อนคลื่นวิทยุใน 2 หัวข้อแรกแล้ว หัวข้อที่ 3 จะย้อนกลับมากล่าวถึงลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอย

ทางเดินของดาว-ตก โดยลักษณะสมบัติที่จะกล่าวถึงได้แก่ ขนาดของเทหวัตถุดาวตก ความเร็วในการพุ่งเข้าสู่โลก ความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินและความยาวของรอยทางเดินเป็นต้น นอกจากนี้จะกล่าวถึงแหล่งเทหวัตถุดาวตก ปฏิกฏการณดาวตก และการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตกในหัวข้อนี้ด้วย หัวข้อที่ 4 และ 5 จะกล่าวถึงลักษณะสมบัติในเชิงสถิติโดยแบ่งเป็นลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวและระยะสั้นตามลำดับ ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณและลักษณะของสัญญาณที่ได้รับจากการสะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตก ขณะที่ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นจะพิจารณาที่ลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของสัญญาณในคาบสั้นๆ ที่ถือว่าปริมาณรอยทางเดินของดาวตกมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา รายละเอียดในแต่ละเรื่องซึ่งแยกเป็นหัวข้อตามที่แสดงไว้ข้างต้นมีดังนี้

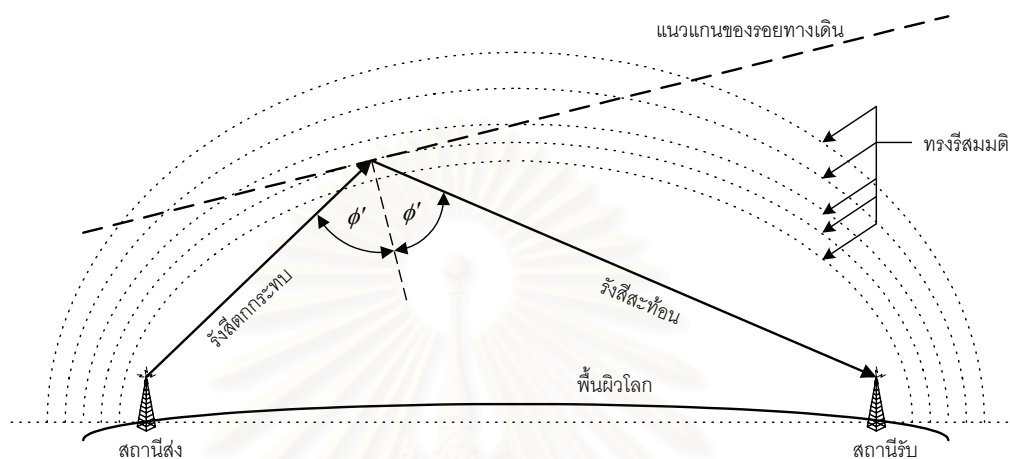
## 2.1 ลักษณะสมบัติทั่วไปของข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก

ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกคือข่ายเชื่อมโยงที่รับส่งสัญญาณระหว่างกันโดยอาศัยการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก ช่องสัญญาณสื่อสารผ่านดาวตกจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นวิทยุจากสายอากาศส่งสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกที่มีขนาดและแนวการวางตัวที่เหมาะสมกลับมายังสายอากาศรับ และช่องสัญญาณจะสิ้นสุดลงเมื่อความหนาแน่นประจุของรอยทางเดินลดลงเนื่องจากการแพร่จันคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศรับมีระดับสัญญาณต่ำกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) เนื่องจากช่องสัญญาณของการสื่อสารผ่านดาวตกมีลักษณะสมบัติขาดตอนเป็นพักๆ (intermittent) โดยมีความยาวนาน (duration) ของช่อง-สัญญาณอยู่ในหลักร้อยมิลลิวินาที ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกจึงมีลักษณะเฉพาะตัว หัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะดังกล่าวโดยแบ่งเป็นลักษณะทางกายภาพซึ่งจะกล่าวถึงเรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยงและแนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตกที่เหมาะสมกับการสะท้อนสัญญาณ และลักษณะสมบัติของระบบสื่อสารผ่านดาวตกโดยจะเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบสื่อสารผ่านดาวตกกับระบบสื่อสารประเภทอื่นไว้ด้วย

### 2.1.1 เรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยง

รอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นบนท้องฟ้าเหนือสถานีส่งและสถานีรับของระบบสื่อสารผ่านดาวตกมีเป็นจำนวนมาก แต่ไม่ใช่ว่ารอยทางเดินของดาวตกทุกรอยที่จะสามารถสะท้อนคลื่นระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับได้ รอยทางเดินของดาวตกที่จะสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุ

ที่ส่งจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับได้ดีจะต้องวางตัวในแนวสัมผัสกับผิวทรงรีสมมติที่มีสายอากาศส่งและสายอากาศรับอยู่ที่จุดโฟกัสทั้งสองของทรงรีดังรูป 2.1



รูป 2.1 เรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก

รอยทางเดินของดาวตกเกิดขึ้นที่ระดับความสูงประมาณ 80 – 120 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ดังนั้นระยะสื่อสารสูงสุดของระบบสื่อสารผ่านดาวตกจึงอยู่ที่ประมาณ 2000 กิโลเมตร ขณะที่ระยะสื่อสารต่ำที่สุดไม่ควรจะต่ำกว่า 200 กิโลเมตร ทั้งนี้เพราะที่ระยะสื่อสารใกล้มากเกินไปปริมาณรอยทางเดินของดาวตกที่เหมาะสมกับการสะท้อนสัญญาณจะลดลง และความยาวนานของสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินก็จะสั้นลงด้วย รายละเอียดในเรื่องนี้จะกล่าวถึงในบทที่ 3 ซึ่งเป็นบทที่วิเคราะห์ลักษณะสมบัติการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก นอกจากนี้ที่ระยะสื่อสารใกล้เกินไป อาจเกิดการจางหายของสัญญาณจากคลื่นหลายวิถี (**multipath fading**) โดยสายอากาศรับอาจรับคลื่นที่แพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศจากสายอากาศส่งได้โดยตรง แม้ว่าจะไม่ใช่ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกที่ระยะใกล้กว่า 200 กิโลเมตรเพื่อวัตถุประสงค์ในการสื่อสารข้อมูล แต่ในกรณีที่ต้องการข้อมูลเพื่อวัตถุประสงค์อื่น เช่น การศึกษาบรรยากาศ ชั้นบน (**upper atmosphere**) หรือการศึกษาดาวตกในประเด็นทางด้านดาราศาสตร์ เป็นต้น อาจใช้เรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยงในลักษณะเรดาร์หรือเรดาร์ทวิสถิติ (**bistatic radar**) ได้ ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงมีเรขาคณิตแบบเรดาร์ (เรดาร์เอกสถิติ (**monostatic radar**)) ตำแหน่งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับหรือตำแหน่งโฟกัสทั้งสองของทรงรีสมมติก็จะเป็นตำแหน่งเดียวกัน ทรงรีสมมติในรูป 2.1 ก็จะเป็นทรงกลม รอยทางเดินที่มีแนวการวางตัวที่เหมาะสมก็ต้องสัมผัสกับผิวทรงกลมนั่นเอง



### 2.1.2 ลักษณะสมบัติทั่วไปของระบบสื่อสารผ่านดาวตก

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกมีขอบเขตในการปฏิบัติงานและสมรรถนะที่จำกัดโดยธรรมชาติของตัวระบบเอง การใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวตกจึงจำเป็นต้องรู้ถึงขอบเขตการปฏิบัติงานและสมรรถนะของระบบเพื่อที่จะได้สามารถประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวตกได้อย่างเหมาะสม หัวข้อนี้จะกล่าวถึงขอบเขตและสมรรถนะที่สำคัญของระบบสื่อสารผ่านดาวตก โดยจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้

#### ก. ความถี่ปฏิบัติการ

รอยทางเดินของดาวตกมีความหนาแน่นประจุมากกว่าความหนาแน่นประจุของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ ทำให้ความถี่ปฏิบัติการของระบบสื่อสารผ่านดาวตกสูงกว่าความถี่ปฏิบัติการของระบบสื่อสารความถี่สูง (HF) ความถี่ปฏิบัติการปกติของระบบสื่อสารผ่านดาวตกอยู่ในช่วง 30 – 100 MHz แต่ระบบสื่อสารผ่านดาวตกโดยทั่วไปใช้ความถี่ไม่เกิน 60 MHz (Glover, 1991; Weitzen and Ralston, 1988) คลื่นวิทยุอาจสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกที่ความถี่ปฏิบัติการสูงกว่านี้ได้ถ้าความหนาแน่นประจุสูงพอ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วคลื่นวิทยุที่ความถี่สูงกว่าระดับสัญญาณวิทยุเอฟเอ็มเป็นต้นไปจะทะลุชั้นบรรยากาศและไม่สะท้อนกลับมายังพื้นโลกอีก ส่วนที่ความถี่ต่ำกว่านี้ การสะท้อนคลื่นวิทยุอาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศมากขึ้นรวมถึงอาจเกิดการรบกวนจากการสะท้อนคลื่นวิทยุจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วย จึงไม่เหมาะที่จะรับส่งสัญญาณโดยอาศัยการสะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกที่ความถี่ต่ำกว่า 30 MHz ย่านความถี่ปฏิบัติการของระบบสื่อสารผ่านดาวตก เหมาะที่จะใช้สายอากาศชนิดเส้นลวด เช่น สายอากาศไดโพล และสายอากาศยาคี-อูตะ เป็นต้น ในการรับส่งสัญญาณระหว่างกัน แต่การเลือกใช้สายอากาศประเภทใดจะขึ้นอยู่กับลักษณะการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารผ่านดาวตกเป็นสำคัญ

#### ข. กำลังส่ง

กำลังส่งที่เหมาะสมในการรับส่งสัญญาณโดยการสะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความไวของเครื่องรับ ระดับสัญญาณรบกวนที่ภาครับ และความจำเป็นตามลักษณะการใช้งานหรือตามระเบียบวิธีสื่อสารที่ได้ออกแบบไว้ เป็นต้น แต่โดยทั่วไปกำลังส่งไม่ควรน้อยกว่า 100 วัตต์ ถ้าเป็นข่ายเชื่อมโยงสำหรับการสื่อสารโดยปกติจะใช้กำลังส่งตั้งแต่ 300 วัตต์ขึ้นไปจนถึงหลายกิโลวัตต์ แต่ถ้าเป็นเรดาร์ที่ใช้ศึกษาการสะท้อนสัญญาณจากรอยทางเดินของดาวตกก็มักใช้กำลังส่งสูงกว่านี้

### ค. กำลังรับ

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกเป็นระบบสื่อสารที่จัดอยู่ในกลุ่มระบบสัญญาณอ่อน โดยทั่วไป กำลังรับสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกจะมีค่าต่ำกว่า  $-110$  dBm ดังนั้น สถานีที่ตั้งสถานีรับจึงควรเป็นสถานที่เงียบสงบทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีสัญญาณรบกวนรบกวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

### ง. เขตคลุมสัญญาณ

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกมีเขตคลุมสัญญาณ (footprint) ประมาณ  $5 \times 25$  ตารางกิโลเมตร (Schanker, 1990) ซึ่งถือว่ามีพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณน้อยมาก ข้อดีของเขตคลุมสัญญาณที่มีขนาดเล็กนี้ทำให้สามารถใช้กรรมวิธีนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (frequency reuse) ในการประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่มีสถานีหลายสถานีในระบบ แต่ขณะเดียวกันเขตคลุมสัญญาณขนาดเล็กนี้จะทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลชุดเดียวกันให้ถึงผู้รับในบริเวณกว้างได้พร้อมกัน

### จ. เวลารอคอย

เวลารอคอย (waiting time) ในระบบสื่อสารผ่านดาวตกมี 2 ความหมายคือ เวลารอคอยรอยทางเดิน (trail waiting time) และเวลารอคอยข่าวสาร (message waiting time) เวลารอ-คอยรอยทางเดินหมายถึงระยะเวลาระหว่างการเกิดรอยทางเดินที่สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับหรือระยะเวลาระหว่างการรับสัญญาณ 2 ครั้งติดกันนั่นเอง โดยทั่วไปเวลารอคอยรอยทางเดินจะมีค่าในหลักสิบวินาทีถึงนาที ขึ้นอยู่กับกำลังส่ง ความไวของเครื่องรับและระดับสัญญาณรบกวนที่ภาครับ ขณะที่เวลารอคอยข่าวสารเป็นเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการส่งข่าวสาร 1 กลุ่มข้อมูล (packet) เวลารอคอยข่าวสารนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การเลือกใช้ระเบียบวิธีสื่อสาร ความยาวของกลุ่มข้อมูล เป็นต้น

### ฉ. วิสัยสามารถ

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกโดยทั่วไป ซึ่งใช้สายอากาศต้นเดียวหรือสายอากาศแฉกลำดับขนาดไม่ใหญ่มากนักและใช้ระเบียบวิธีสื่อสารที่มีอัตราข้อมูลคงที่ จะมีสมรรถนะในรูปของวิสัยสามารถ (throughput) ไม่เกิน 600 บิตต่อวินาที (Schanker, 1990) แต่ใน



ระบบสื่อสารผ่านดาวตกลมัยใหม่ที่ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบปรับค่าคลื่นได้และใช้อัตราข้อมูลแบบปรับเปลี่ยนได้จะสามารถมีวิสัยสามารถเกินกว่า 1 กิโลบิตต่อวินาทีได้ (Mawrey and Weitzen, 1995)

ลักษณะของระบบสื่อสารผ่านดาวตกในด้านขอบเขตและสมรรถนะของระบบที่กล่าวถึงข้างต้นจะช่วยเลือกการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวตกได้อย่างเหมาะสม ข้อมูลในส่วนที่สามารถเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารอื่น และข้อมูลเพิ่มเติมในเรื่องค่าใช้จ่ายและความเชื่อถือได้ของระบบจะแสดงเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารอื่นๆ ในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของระบบสื่อสารประเภทต่างๆ (อ้างจาก Schanker, 1990)

ระบบ	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ	ความถี่ปฏิบัติการ	ระยะสื่อสาร	วิสัยสามารถ	ความเชื่อถือได้
เครือข่ายสายส่งโทรศัพท์	สูงมากสำหรับผู้ประกอบการ	ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน	300 - 3000 Hz	ขึ้นอยู่กับการวางเครือข่าย	9600 บิตต่อวินาที	สูงมาก
วิทยุความถี่สูง (HF Radio)	ปานกลาง	ต่ำถึงปานกลาง	3 - 30 MHz	ปกติได้ไกลถึง 6000 กิโลเมตร	300 บิตต่อวินาที	ต่ำถึงปานกลาง
วิทยุความถี่สูงมาก (VHF Radio)	ต่ำถึงปานกลาง	ต่ำ	30 - 300 MHz	50 - 200 กิโลเมตร	9600 บิตต่อวินาที	-
ดาวเทียม	สูง	สูง	ปกติมากกว่า 3 GHz	10000 กิโลเมตร	สูงมาก	สูง
ไมโครเวฟ	สูงมาก	สูงมาก	มากกว่า 1.2 GHz	ขึ้นอยู่กับการวางเครือข่าย	สูง	ปานกลาง
ระบบสื่อสารผ่านดาวตก	ปานกลาง	ต่ำถึงปานกลาง	30 - 60 MHz	2000 กิโลเมตร	50 - 600 บิตต่อวินาที	สูง

### 2.1.3 การประยุกต์ใช้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก

แนวทางในการประยุกต์ใช้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกแบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ การใช้ประโยชน์ในเชิงการศึกษาสภาพบรรยากาศชั้นบนและการศึกษาเกี่ยวกับดาวตก และการใช้ประโยชน์ในเชิงการสื่อสารข้อมูล การใช้ประโยชน์ในเชิงการศึกษานั้นอาศัยการแปลความหมายจากสัญญาณรับที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกมาเป็นข้อมูลที่ต้องการ เช่น ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของบรรยากาศชั้นบน หรือความเร็วและทิศทางเคลื่อนที่ของดาวตก เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในเชิงการสื่อสารข้อมูลนั้น ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกไม่เหมาะกับการสื่อสารที่ต้องการความต่อเนื่องและความจุของช่องสัญญาณสูงอย่างการส่ง

สัญญาณเสียงโทรศัพท์หรือสัญญาณภาพวิดีโอ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะมีลักษณะสมบัติขาดตอน เป็นพัคๆ ประกอบกับมีวิสัยสามารถไม่สูง แต่ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกจะเหมาะกับการสื่อสาร ข้อมูลที่ไม่ต้องการลักษณะสมบัติแบบเวลาจริง (real time) เช่น ระบบสำรองข้อมูล หรือ ระบบ- ฝ้าตรวจระยะไกล (remote monitoring) ตัวอย่างของระบบฝ้าตรวจระยะไกลอาจเป็นเครือข่ายระบบฝ้าตรวจข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา (Hoff, 1988) ระบบฝ้าตรวจระดับน้ำตามลำน้ำต่างๆ (Abou-Zeid, El-Sherbini, and El-Soudani, 1989) และระบบฝ้าตรวจท่อส่งน้ำมันหรือท่อส่งก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งในกรณีหลายกรณีระบบเหล่านี้มีสถานีดูข่ายอยู่ในแหล่งทุรกันดาร ไม่สะดวกต่อการไปเก็บข้อมูลถึงที่และไม้คุ้มค่าต่อการลงทุนวางระบบสื่อสารด้วยสาย การใช้ระบบสื่อสารผ่านดาวตกจึงนับเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่ง สำหรับปัญหาเรื่องแหล่งพลังงานในการดำเนินการระบบสื่อสารนั้นอาจแก้ไขได้ด้วยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์

## 2.2 กลไกการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก

คลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกกลับมายังสายอากาศรับไม่ได้เป็นผลมาจากการสะท้อนทั้งหมด กลไกการแผ่พลังงานกลับจากรอยทางเดินจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นประจุของรอยทางเดินซึ่งแสดงในรูปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในรอยทางเดินต่อหน่วยความยาว ความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่อหน่วยความยาวนี้เรียกว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของรอยทางเดินและมีหน่วยเป็นจำนวนอิเล็กตรอนต่อเมตร ( $e/m$ ) แม้ว่าในธรรมชาติความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นจะเป็นค่าต่อเนื่องไม่สามารถแบ่งประเภทได้อย่างชัดเจน แต่โดยทั่วไปรอยทาง-เดินของดาวตกจะถูกแบ่งตามความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นให้เป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง โดยเกณฑ์ในการแบ่งประเภทรอยทางเดินจะมาจากกลไกในการแผ่พลังงานกลับซึ่งจำแนกได้คร่าวๆ ดังนี้

### 2.2.1 การกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

ค่าสภาพยอมประสิทธิผล (effective permittivity) ของรอยทางเดินของดาวตกจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของรอยทางเดิน ในกรณีที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าน้อย ค่าสภาพยอมประสิทธิผลจะยังมีค่าเป็นบวกอยู่ กลไกการแผ่พลังงานกลับจะเกิดจากการ-กระเจิงคลื่นวิทยุอย่างอิสระโดยอิเล็กตรอนแต่ละตัวในรอยทางเดิน พลังงานคลื่นวิทยุทั้งหมดที่สายอากาศรับได้จึงเป็นผลรวมของการกระเจิงอย่างอิสระโดยอิเล็กตรอนทุกตัวในรอยทางเดิน (Sugar, 1964) รอยทางเดินของดาวตกที่จัดว่าเป็นรอยทางเดินความ

หนาแน่นต่ำคือรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นน้อยกว่า  $10^{14}$  e/m รอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นสูงกว่านี้จะถือว่าเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นสูงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

## 2.2.2 การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

กรณีที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าสูงขึ้นจนทำให้ค่าสภาพยอมประสิทธิผลของรอยทางเดินมีค่าเป็นลบ กลไกการแผ่พลังงานกลับจากรอยทางเดินจะเป็นการสะท้อนเช่นเดียวกับการสะท้อนคลื่นวิทยุของทรงกระบอกโลหะ ลักษณะการสะท้อนคลื่นเช่นนี้เหมือนกับการสะท้อนคลื่นของวิทยุย่านความถี่สูง (HF) ของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Sugar, 1964) รอยทางเดินที่เกิดขึ้นจะขยายตัวเนื่องจากการแพร่ของอิเล็กตรอนในรอยทางเดิน ทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนน้อยลง เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนลดลงจนสภาพยอมประสิทธิผลของรอยทางเดินความหนาแน่นสูงมีค่าไม่เป็นลบ กลไกการแผ่พลังงานกลับแบบการสะท้อนคลื่นของทรงกระบอกโลหะก็จะสิ้นสุดลง รอยทางเดินความหนาแน่นสูงก็จะกลายเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะลดลงเรื่อยๆ จนเท่ากับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของบรรยากาศแวดล้อมรอยทางเดิน ซึ่งจะถือว่ารอยทางเดินสิ้นสุดลง

การจำแนกกลไกการแผ่พลังงานกลับและประเภทของรอยทางเดินดังที่แสดงข้างต้นนั้นเป็นการแบ่งประเภทอย่างคร่าวๆ เท่านั้น ทั้งนี้เพราะการแผ่พลังงานกลับจากรอยทางเดินตามธรรมชาติจะเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ไม่ได้เปลี่ยนจากการกระเจิงอย่างอิสระโดยอิเล็กตรอนในรอยทางเดินมาสู่การสะท้อนคลื่นวิทยุแบบทรงกระบอกโลหะในทันทีทันใด

การกล่าวถึงกลไกการแผ่พลังงานกลับจากรอยทางเดินที่ผ่านมาจะใช้คำว่า การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดิน แต่เนื่องจากจำนวนรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำมีมากกว่าจำนวนรอยทางเดินความหนาแน่นสูงอยู่มาก ดังนั้นกลไกการแผ่พลังงานกลับจากรอยทางเดินส่วนใหญ่จึงเป็นการกระเจิง การกล่าวถึงการแผ่พลังงานกลับนับจากนี้ไปจะใช้คำว่า การกระเจิงแทนทั้งการกระเจิงและการสะท้อน เว้นแต่จะต้องการเจาะจงว่าเป็นการสะท้อนเท่านั้น รายละเอียดเกี่ยวกับปริมาณของรอยทางเดินรวมถึงสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของเทหวัตถุดาวตก และรอยทางเดินของดาวตกจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

## 2.3 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกนอกจากเรขาคณิตของชายเชื่อมโยง แนวการวางตัวของรอยทางเดิน และลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ภาคส่งและรับแล้ว ยังมีส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งก็คือสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก เช่น มวล และความเร็วในการพุ่งเข้าสู่โลก เป็นต้น ลักษณะสมบัติเหล่านี้มีผลต่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นและอัตราเร็วในการแพร่ของรอยทางเดิน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตกที่จะกล่าวในหัวข้อนี้ นอกจากมวลและความเร็วในการพุ่งเข้าสู่โลกแล้ว ยังมีความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดิน ความยาว รัศมีเริ่มต้นและการแพร่ของรอยทางเดิน แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงสมบัติทางกายภาพเหล่านี้ จะกล่าวถึงแหล่งของเทหวัตถุดาวตกและการก่อตัวเป็นรอยทางเดินก่อน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

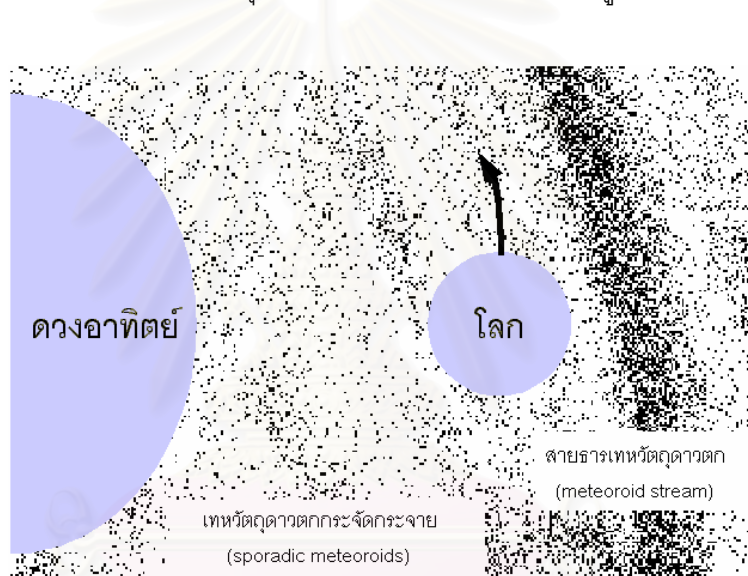
### 2.3.1 แหล่งเทหวัตถุดาวตก ปรากฏการณ์ดาวตกและการก่อตัวเป็นรอยทางเดิน

ในระบบสุริยะ ไม่ได้มีเพียงดวงอาทิตย์เป็นศูนย์กลางและดาวเคราะห์ทั้ง 9 ดวงกับดวงจันทร์บริวารโคจรโดยรอบเท่านั้น แต่ยังมีเทหวัตถุอีกมากมายทั้งดาวหาง ดาวเคราะห์น้อย โคจรอยู่รอบดวงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน นอกจากดาวเคราะห์ ดาวหาง และดาวขนาดเล็กต่างๆ แล้ว ยังมีสะเก็ดดาวหรือเทหวัตถุขนาดเล็กจนไม่สามารถเรียกว่าดาวได้อีกเป็นจำนวนมากรวมอยู่ด้วย เทหวัตถุขนาดเล็กเหล่านี้มีขนาดในระดับเดียวกับหรือเล็กกว่าเม็ดทราย เมื่อเทหวัตถุขนาดเล็กเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในสนามโน้มถ่วงของโลกพวกมันจะถูกดึงดูดให้พุ่งเข้าสู่โลก เทหวัตถุขนาดเล็กที่พุ่งเข้าสู่โลกก็คือดาวตกนั่นเอง เทหวัตถุขนาดเล็กที่ล่องลอยอยู่ในอวกาศก่อนที่จะพุ่งเข้าสู่โลกเป็นดาวตกเรียกว่า เทหวัตถุดาวตก (**meteoroids**) แหล่งเทหวัตถุดาวตกและปรากฏการณ์ดาวตกรวมถึงการก่อตัวเป็นรอยทางเดินจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้

#### ก. แหล่งเทหวัตถุดาวตก

เทหวัตถุดาวตกเป็นส่วนหนึ่งของระบบสุริยะเช่นเดียวกับโลก ดาวเคราะห์อื่นๆ ดาวหาง และดาวเคราะห์น้อย เทหวัตถุดาวตกเหล่านี้โดยส่วนใหญ่จึงโคจรรอบดวงอาทิตย์ในทิศทางเดียวกับการโคจรของโลกและสมาชิกอื่นๆ ของระบบสุริยะ การกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกตลอดแนวโคจรของโลกค่อนข้างสม่ำเสมอแม้ไม่อาจถือได้ว่าลักษณะการแจกแจงเป็นแบบเอกรูป (**uniform distribution**) เทหวัตถุดาวตกที่มีการกระจายความหนาแน่นในลักษณะนี้เรียกว่า เทหวัตถุดาวตกกระจัดกระจาย (**sporadic meteoroids**) ดาวตก

ที่เกิดจากเทหวัตถุดาวตกกระจัดกระจายนั้นเรียกว่าดาวตกกระจัดกระจาย (sporadic meteors) ดาวตกกระจัดกระจายจะปรากฏให้เห็นในท้องฟ้ายามค่ำคืนในลักษณะที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่า จะปรากฏเมื่อใด ณ ตำแหน่งใด หากอาศัยแหล่งกำเนิดและการกระจายตำแหน่งปรากฏบนท้องฟ้าเป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทของดาวตก นอกจากดาวตกกระจัดกระจายที่กล่าวถึงแล้ว ยังมีดาวตกอีกประเภทหนึ่งคือ ฝนดาวตก (meteor showers) ฝนดาวตกนั้นเกิดจากสายธารของเทหวัตถุดาวตก (meteoroid streams) ซึ่งเป็นเศษซากที่เหลือจากการโคจรผ่านไปของดาวหาง โลกจะเคลื่อนที่ผ่านวงโคจรของดาวหางที่ตำแหน่งและเวลาเดิมทุกปี ดังนั้นจึงสามารถสังเกตพบฝนดาวตกได้ ณ ตำแหน่งปรากฏและเวลาเดิมทุกปีเช่นกัน การโคจรของโลกและเทหวัตถุดาวตกทั้ง 2 ประเภทแสดงดังรูป 2.2



รูป 2.2 โลกและเทหวัตถุดาวตกในระบบสุริยะ

ในบางครั้งที่มีปริมาณดาวตกในช่วงที่เกิดฝนดาวตกมีมาก ฝนดาวตกก็จะถูกเรียกว่าพายุฝนดาวตก (meteor storms) โดยเหตุที่คาบการโคจรของดาวหางนานกว่าคาบการโคจรของโลกมาก ดังนั้นปริมาณดาวตกของฝนดาวตกที่เกิดจากดาวหางแต่ละดวงจะมากที่สุดในปีที่ดาวหางดวงนั้นเพิ่งโคจรผ่านไป ดังเช่น ดาวหางเทมเปิล-ทัตเทิล ที่เป็นแหล่งกำเนิดของฝนดาวตกลีโอนิดส์มีคาบการโคจร 33 ปี ทำให้ฝนดาวตกลีโอนิดส์ซึ่งเกิดในช่วงระหว่างวันที่ 14 ถึง 20 พฤศจิกายนของทุกปี มีปริมาณดาวตกมากที่สุดในทุก 33 ปีด้วย ครั้งสุดท้ายที่ดาวหางเทมเปิล-ทัตเทิลโคจรมาใกล้กับแนวโคจรของโลกตรงกับปี พ.ศ. 2541 รายชื่อกลุ่มฝนดาวตกที่สำคัญในรอบ 1 ปีรวมถึงความยาวนานที่เกิดฝนดาวตกและอัตราการตกที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า มีสรุปในตาราง 2.2



ตาราง 2.2 ฝนดาวตกที่สำคัญในรอบ 1 ปี (อ้างอิง Sugar, 1964)

ชื่อของฝนดาวตก	ช่วงเวลาที่เกิดฝนดาวตกมากที่สุด	อัตราสูงสุดที่สามารถเห็นได้ (ดวง/ชั่วโมง)
ควอดแดรนต์ิดส์ (Quadrantids)	1 - 4 มกราคม (3 มกราคม)*	30
พิณ (Lyrids)	20 - 23 เมษายน (21 เมษายน)	5
อีต้า คนแบกหม้อน้ำ ( $\eta$ Aquarids)	2 - 6 พฤษภาคม (4 พฤษภาคม)	5
เดลต้า คนแบกหม้อน้ำ ( $\delta$ Aquarids)	15 กรกฎาคม - 15 สิงหาคม	10
เพอร์ซิดส์ (Perseids)	29 กรกฎาคม - 17 สิงหาคม (12 สิงหาคม)	37
นายพราน (Orionids)	18 - 26 ตุลาคม (22 ตุลาคม)	13
สิงโต (Leonids)	15 - 19 พฤศจิกายน (17 พฤศจิกายน)	6
คนคู่ (Germinids)	7 - 15 ธันวาคม (14 ธันวาคม)	55
หมี (Ursids)	17 - 24 ธันวาคม (22 ธันวาคม)	15

\* หมายถึง UTC Date of maximum

แม้ว่าในช่วงที่มีปรากฏการณ์ฝนดาวตกจะมีอัตราการเกิดดาวตกมากกว่าอัตราการเกิดดาวตกกระจัดกระจาย แต่ระบบสื่อสารผ่านดาวตกก็ยังคงจำเป็นต้องปฏิบัติงานบนฐานของดาวตกกระจัดกระจาย ทั้งนี้เพราะระยะเวลาในการเกิดฝนดาวตกที่ค่อนข้างสั้นประกอบกับตำแหน่งปรากฏบนท้องฟ้าที่คงที่ซึ่งอาจไม่ได้อยู่ในแนวที่เหมาะสมกับชายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกก็ได้

#### ข. ปรากฏการณ์ดาวตกและการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตก

เทหวัตถุดาวตกที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในสนามโน้มถ่วงของโลก จะถูกดึงดูดให้พุ่งเข้าสู่โลกกลายเป็นดาวตก กระบวนการเกิดดาวตกนับตั้งแต่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในสนามโน้มถ่วงของโลกนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ดาวตก เนื่องจากเทหวัตถุดาวตกกระจายอยู่ทั่วไปตลอดแนวโคจรของโลกและเทหวัตถุดาวตกเหล่านี้พุ่งเข้าสู่โลกตลอดเวลา ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ดาวตกตลอดเวลาเช่นกัน ขนาดของดาวตกนั้นขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตก การกล่าวถึงดาวตกกระจัดกระจายและฝนดาวตกในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการกล่าวถึงดาวตกที่มีขนาดใหญ่คือสังเกตได้ด้วยตาเปล่าเท่านั้น ดาวตกที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าจะต้องมีมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตกมากพอที่จะทำให้การเผาไหม้เนื่องจากการเสียดสีกับบรรยากาศสามารถเห็น

เป็นลำแสงวาบหรือที่เรียกว่าผีพุ่งได้ (fireballs) ได้ กรณีที่ดาวตกมีขนาดใหญ่มากจนเผาไหม้ไม่หมดในชั้นบรรยากาศ ดาวตกก็จะตกถึงพื้นโลก ดาวตกที่ตกถึงพื้นโลกนี้เรียกว่า อุกกาบาต (meteorites) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเทหวัตถุดาวตกกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ดาวตกส่วนมากโดยเฉพาะดาวตกที่เป็นประโยชน์แก่การสะท้อนคลื่นวิทยุเป็นดาวตกขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาแม้จะใช้อุปกรณ์ช่วยในการสังเกตแล้วก็ตาม ดาวตกขนาดเล็กเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นกลุ่มประจุที่เรียงตัวเป็นทางยาวหรือที่เรียกว่ารอยทางเดินของดาวตกดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นของบทนี้แล้วนั่นเอง

กลไกในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตกนั้นเริ่มต้นจากการที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกด้วยความเร็วสูงมาก ความร้อนเนื่องจากการเสียดสีกับบรรยากาศจะระเหิดเทหวัตถุดาวตกหรือทำให้อะตอมที่ผิวเทหวัตถุดาวตกแตกตัวจากเทหวัตถุดาวตกนั่นเอง อะตอมที่หลุดออกจากผิวเทหวัตถุดาวตกซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของเทหวัตถุดาวตกจะชนกับโมเลกุลของอากาศโดยรอบซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคมีประจุขึ้น โมเลกุลจะแตกตัวเป็นทางยาวตามแนวการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตก กลุ่มประจุเหล่านี้ก็คือรอยทางเดินของดาวตก ประจุที่เกิดขึ้นจะแพร่ออกทำให้รูปทรงของรอยทางเดินของดาวตกไม่ได้เป็นทรงกระบอกตรง แต่จะเป็นพาราโบลอยด์ที่มีเทหวัตถุดาวตกอยู่ตรงจุดยอดของพาราโบลอยด์นั่นเอง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกโดยทั่วไปจะพิจารณาให้รูปทรงของรอยทางเดินเป็นทรงกระบอกตรงทั้งนี้เพราะความเร็วในการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกสูงกว่าอัตราการแพร่ออกของประจุอยู่มาก ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกและสมบัติทางกายภาพอื่นๆ จะกล่าวในหัวข้อถัดไปนี้

### 2.3.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก

ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตกที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ได้แก่ มวลและการแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตก ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก ความสูงของการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตก ความยาวของรอยทางเดินของดาวตก รัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินของดาวตก และการแพร่ของรอยทางเดินของดาวตก รายละเอียดในแต่ละเรื่องนั้นจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้



ก. มวลและการแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตก

มวลของเทหวัตถุดาวตกเป็นตัวกำหนดขนาดของดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลก โดยขนาดดาวตกสามารถพิจารณาได้ทั้งในเชิงทัศนศาสตร์และเชิงคลื่นวิทยุ ขนาดในเชิงทัศนศาสตร์นั้นกำหนดในรูปของระดับความสว่างเชิงทัศน ส่วนขนาดในเชิงคลื่นวิทยุกำหนดในรูปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของเทหวัตถุดาวตกและขนาดทั้งในเชิงทัศนศาสตร์และเชิงคลื่นวิทยุแสดงในตาราง 2.3 การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ถ้าพิจารณาเฉพาะเทหวัตถุดาวตกกระจัดกระจาย จำนวนของเทหวัตถุดาวตกจะเป็นแปรผกผันกับมวลในลักษณะที่ประมาณได้ว่า ถ้ากำหนดมวลของเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 1 เป็น 1/10 เท่าของมวลของเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 2 จำนวนเทหวัตถุดาวตกที่มีมวลมากกว่าเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 1 จะเป็น 10 เท่าของจำนวนเทหวัตถุดาวตกที่มีมวลมากกว่าเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 2 ตัวอย่างเช่น ดาวตกที่มีมวลมากกว่า  $10^{-4}$  กรัมจะมีจำนวนเป็น 10 เท่าของดาวตกที่มีมวลมากกว่า  $10^{-3}$  กรัม เป็นต้น (Sugar, 1964) จำนวนดาวตกแต่ละขนาดแสดงในตาราง 2.3 ด้วยเช่นกัน

ตาราง 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวล ปริมาณ รัศมี ระดับความสว่างเชิงทัศน

และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของดาวตก (อ้างจาก Sugar, 1964)

มวล (g)	จำนวนเทหวัตถุดาวตกที่มีมวลมากกว่าที่กำหนดที่เข้าสู่โลกในแต่ละวัน	รัศมี	ระดับความสว่างเชิงทัศน	ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ( $e^-/m$ )	หมายเหตุ
$10^4$	10	8 cm	-12.5	-	มวลของดาวตกมากพอที่จะตกถึงพื้นโลก
$10^3$	$10^2$	4 cm	-10.0	-	
$10^2$	$10^3$	2 cm	-7.5	-	
10	$10^4$	0.8 cm	-5.0	$10^{18}$	
1	$10^5$	0.4 cm	-2.5	$10^{17}$	
$10^{-1}$	$10^6$	0.2 cm	0.0	$10^{16}$	
$10^{-2}$	$10^7$	0.08 cm	2.5	$10^{15}$	
$10^{-3}$	$10^8$	0.04 cm	5.0	$10^{14}$	
$10^{-4}$	$10^9$	0.02 cm	7.5	$10^{13}$	
$10^{-5}$	$10^{10}$	80 microns	10.0	$10^{12}$	
$10^{-6}$	$10^{11}$	40 microns	12.5	$10^{11}$	
$10^{-7}$	$10^{12}$	20 microns	15.0	$10^{10}$	ขนาดเล็กที่สุดโดยประมาณที่เรดาร์ตรวจจับได้
$10^{-8}$	-	8 microns	17.5	-	

### ข. ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก

ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่เข้าสู่โลกมีค่าอยู่ระหว่าง  $11.3 - 72$  กิโลเมตรต่อวินาที (Sugar, 1964) โดยขอบเขตล่างเป็นความเร็วหลุดพ้นของวัตถุที่เคลื่อนที่ออกจากโลก ขณะที่ขอบเขตบนเป็นผลรวมระหว่างความเร็วในการโคจรของโลกกับความเร็วหลุดพ้นจากระบบสุริยะ การที่เทหวัตถุดาวตกจะพุ่งเข้าสู่โลกด้วยความเร็วเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่นความเร็วในการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกในอวกาศเอง ทิศทางและตำแหน่งที่พุ่งเข้าสู่โลก เป็นต้น เนื่องจากตำแหน่งที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกมีผลต่อความเร็วของดาวตก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า เวลาท้องถิ่นมีผลต่อการพุ่งเข้าสู่โลกของดาวตก

### ค. ความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตก

การก่อตัวเป็นรอยทางเดินเกิดขึ้นเมื่อพลังงานความร้อนจากการเสียดสีกับบรรยากาศมีค่ามากเพียงพอ ดังนั้นความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินจึงขึ้นอยู่กับทั้งความหนาแน่นของบรรยากาศและความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่ บรรยากาศที่มีความหนาแน่นเพียงพอที่จะก่อให้เกิดรอยทางเดินจะอยู่ที่ระดับต่ำกว่า  $120$  กิโลเมตร และโดยปกติเทหวัตถุดาวตกจะแตกตัวหมดที่ระดับสูงกว่า  $80$  กิโลเมตร (Sugar, 1964)

### ง. ความยาวของรอยทางเดินของดาวตก

ความยาวของรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตกเป็นหลัก อย่างไรก็ตามความเร็วและแนวการพุ่งเข้าสู่โลกจะมีผลต่อความยาวของรอยทางเดินด้วย ทั้งนี้ก็เพราะความเร็วและแนวการพุ่งเข้าสู่โลกจะเป็นตัวกำหนดอัตราการแตกตัว โดยทั่วไปความยาวของรอยทางเดินของดาวตกกระจายจะอยู่ที่ประมาณ  $15$  กิโลเมตร (Sugar, 1964)

### จ. รัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินของดาวตก

เมื่อรอยทางเดินของดาวตกก่อตัว ประจุที่เกิดขึ้นจะแพร่ออกในทันทีทันใดจากนั้นอัตราการแพร่จะช้าลงเนื่องจากการชนกันระหว่างประจุ ระยะที่ประจุแพร่ออกอย่างรวดเร็วในช่วงแรกถือว่าเป็นรัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดิน ค่ารัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นประจุของบรรยากาศที่แวดล้อมรอยทางเดิน ดังนั้นรอยทางเดินที่ก่อตัวที่ความสูงมากจึงมีรัศมีเริ่มต้นมากกว่ารอยทางเดินที่ก่อตัวที่ความสูงต่ำกว่า ค่าเฉลี่ยของรัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินจะอยู่ระหว่าง  $0 - 4.35$  เมตร (Sugar, 1964) ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของรอย

ทางเดิน การวิเคราะห์การกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจึงมักจำลองให้รอยทางเดินเป็น ทรงกระบอกตรงที่มีความยาวเป็นอนันต์

#### ฉ. การแพร่ของรอยทางเดินของดาวตก

รอยทางเดินของดาวตกจะขยายตัวออกเนื่องจากการแพร่ของประจุในรอยทางเดินโดย อัตราการแพร่จะแสดงในรูปพื้นที่ที่รอยทางเดินขยายตัวออกในหนึ่งหน่วยเวลา อัตราการแพร่นี้ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) มีหน่วยเป็น  $m^2/s$  ถ้าไม่รวม การแพร่อย่างทันทีทันใดในช่วงที่รอยทางเดินก่อตัว สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ  $1 - 140 m^2/s$  (Sugar, 1964) โดยรอยทางเดินที่อยู่สูงจากพื้นโลกมากจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่มากขึ้นนี้เพราะความหนาแน่นประจุในบรรยากาศแวดล้อมรอยทางเดินมีค่าน้อยนั่นเอง

## 2.4 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

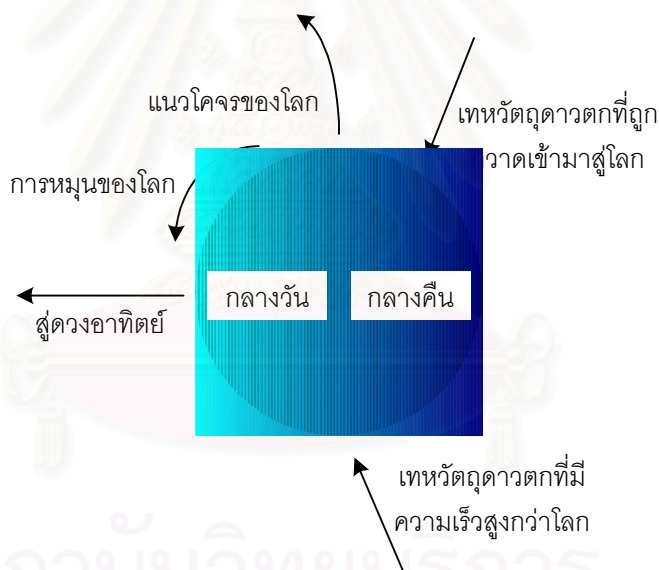
คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในแต่ละครั้งจะมีแอมพลิจูด ความยาวนาน และรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้จำนวนคลื่นวิทยุที่สามารถรับได้ในเวลาต่างกันก็ไม่เท่า-กันอีกด้วย การให้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกเพื่อวัตถุประสงค์ในด้านการสื่อสาร ข้อมูลหรือเพื่อการศึกษาในเรื่องใดๆ ก็ตามจึงจำเป็นต้องรู้ลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเพื่อที่จะสามารถออกแบบข่ายเชื่อมโยงหรือแปลความหมาย จากคลื่นวิทยุที่กระเจิงกลับมาได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภทคือ ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวและลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้น ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวเป็นลักษณะสมบัติเชิงสถิติที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของสัญญาณรับในคาบเวลาที่นานพอที่จะเห็นจำนวนและลักษณะของสัญญาณรับมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นจะพิจารณาการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของสัญญาณในคาบสั้นๆ ที่สามารถประมาณได้ว่าจำนวนสัญญาณรับมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การพิจารณาลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นโดยทั่วไปจะพิจารณาการรับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ในช่วงไม่เกิน 1 ชั่วโมง ถ้าระยะเวลาที่สังเกตสัญญาณเกินกว่านี้จะพบว่าอัตราการรับสัญญาณได้จะเริ่มเปลี่ยนไปซึ่งจะเป็นเรื่องของลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้

กลไกหลักที่ทำให้อัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเปลี่ยนแปลงไปก็คือการหมุนรอบตัวเองของโลก และการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ การหมุนรอบตัวเองของ

โลกทำให้อัตราการรับสัญญาณที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนโลก ณ เวลาต่างๆ ในรอบ 1 วันมีค่าไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน (**diurnal variation**) ขณะที่การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (**seasonal variation**) รายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลตลอดจนปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 แบบจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้

#### 2.4.1 การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน

การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันเป็นผลมาจากการหมุนรอบตัวเองของโลก เราสามารถอธิบายกลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้โดยอาศัยแผนภาพการหมุนรอบตัวเองของโลกและการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เมื่อมองจากอวกาศมายังขั้วโลกเหนือดังรูป 2.3



รูป 2.3 กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน

เนื่องจากเทหวัตถุดาวตกส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับโลก แต่มีอัตราเร็วช้ากว่าการเคลื่อนที่ของโลก เมื่อพิจารณาจากรูป 2.3 จะเห็นได้ว่า ส่วนของโลกในด้านเดียวกันกับทิศการโคจรของโลกหรือที่เรียกว่าด้านหน้าของโลกจะกวาดเทหวัตถุดาวตกเข้ามายังโลก เทหวัตถุที่จะเข้ามายังส่วนของโลกในด้านตรงข้ามจะต้องเป็นเทหวัตถุที่มีอัตราเร็วสูงกว่าโลก ดังนั้นด้านหน้าของโลกจึงมีจำนวนดาวตกสูงกว่าด้านหลังของโลก เมื่อพิจารณาประกอบกับการหมุนรอบตัวเองของโลกจะเห็นได้ว่า ด้านหน้าของโลกก็คือเวลาที่ท้องถื่นในช่วงเช้านั่นเอง ขณะที่ด้านหลังของโลกก็คือเวลาที่ท้องถื่นในช่วงเย็น หากประมาณว่าการแจกแจงความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกมี

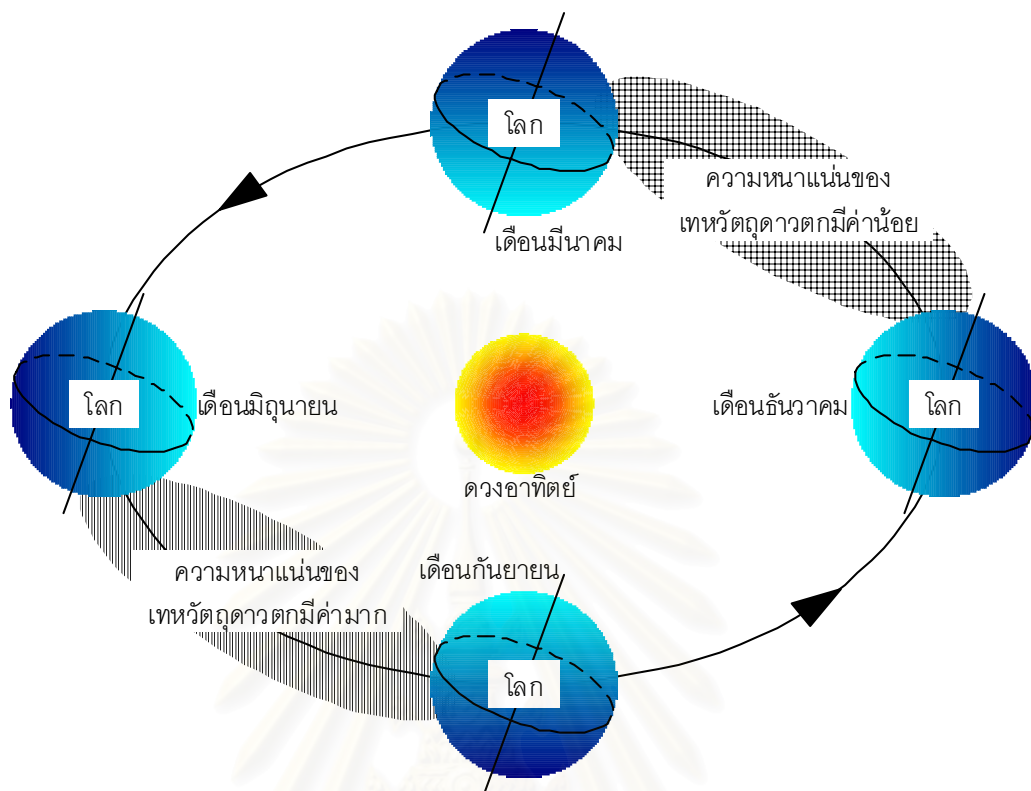
ลักษณะคงตัว จำนวนเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนโลกในรอบ 1 วันก็จะมี การ-เปลี่ยนแปลงในลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์ กล่าวคือจำนวนเทหวัตถุดาวตกจะเพิ่มจากรดับเฉลี่ยในเวลาเที่ยงคืนจนถึงระดับสูงสุดในเวลา 6 นาฬิกาและจะลดลงอย่างต่อเนื่องผ่านระดับเฉลี่ยในเวลาเที่ยงวันจนถึงระดับต่ำสุดในเวลา 18 นาฬิกาและจากนั้นจะเพิ่มอีกครั้งจนถึงระดับเฉลี่ยในเวลาเที่ยงคืน (Schilling, 1993) กลไกนี้เป็นสาเหตุให้จำนวนดาวตกที่สังเกตได้ด้วยตาในช่วงรุ่งสางมากกว่าในช่วงหัวค่ำด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงจำนวนเทหวัตถุ ดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้อัตราการรับสัญญาณได้ในรอบ 1 วันของข่าย เชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้เช่นกัน นอกเหนือจากจำนวนดาว ตกหรืออัตราการรับสัญญาณได้แล้ว ความเร็วของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกจะมีการ เปลี่ยนแปลงในลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์เช่นกัน ทั้งนี้เพราะในช่วงเช้าโลกจะกวาดเทหวัตถุ ดาวตกเข้ามาสู่โลกทำให้ความเร็วของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกในช่วงเช้ามากกว่าในช่วงหัวค่ำซึ่ง โลกจะเคลื่อนที่หนีเทหวัตถุดาวตก ความเร็วของเทหวัตถุดาวตกที่ไม่เท่ากันนี้ส่งผลให้ความสูงใน การก่อตัวเป็นรอยทางเดินและอัตราการแพร่ไม่เท่ากันและทำให้อายุความยาวนานของสัญญาณก็ จะไม่เท่ากันด้วย

เมื่อพิจารณาเฉพาะอัตราการรับสัญญาณได้ อัตราส่วนระหว่างอัตราการรับสัญญาณ ได้มากที่สุดต่ออัตราการรับสัญญาณได้น้อยที่สุดในแต่ละวันจะอยู่ที่ประมาณ 4:1 โดยช่วงที่รับ สัญญาณได้มากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวันอาจเลื่อนไปจากเวลา 6 และ 18 นาฬิกาทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อผล ของภูมิประเทศและลักษณะการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว

#### 2.4.2 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

การกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกมีลักษณะไม่สม่ำเสมอตลอดแนวการโคจร ของโลก กล่าวคือความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกจะจัดกระจายมีค่ามากที่สุดในช่วง เดือนมิถุนายนจนถึงเดือนกันยายน และมีค่าน้อยที่สุดในระหว่างเดือนมกราคมจนถึงเดือนมีนาคม (Schilling, 1993) ดังรูป 2.4 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลจึงมีลักษณะคล้ายรูปไซน์ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน นอกจากนี้โลกยังโคจรผ่านสายธารเทหวัตถุดาวตกที่ สำคัญในช่วงครึ่งปีหลังมากกว่าในช่วงครึ่งปีแรกซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนของอัตราการรับสัญญาณ ในช่วงครึ่งปีหลังต่ออัตราการรับสัญญาณในช่วงครึ่งปีแรกเพิ่มขึ้นด้วย





รูป 2.4 กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

### 2.4.3 ผลของพิกัดที่ตั้งและแนวการวางตัวของขั้วเชื่อมโยงต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว

การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่กล่าวถึงใน 2 หัวข้อที่ผ่านมาเป็นลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในภาพรวมเท่านั้น รายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 แบบจะมีลักษณะที่เป็นแบบเฉพาะตัวของขั้วเชื่อมโยงแต่ละขั้วซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดละติจูดที่ตั้งสถานีส่งและสถานีรับ และแนวการวางตัวของขั้วเชื่อมโยง ในส่วนพิกัดละติจูดของขั้วเชื่อมโยงจะมีผลสำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่โลกหมุนรอบตัวเอง ความเร็วเชิงเส้นของตำแหน่งที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีค่ามากกว่าตำแหน่งที่ใกล้ขั้วโลก ดังนั้นความเร็วปรากฏของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกในละติจูดต่างกันจึงไม่เท่ากัน กลไกดังกล่าวทำให้อัตราสูงสุดต่ออัตราต่ำสุดของลักษณะสมบัติต่างๆ ในรอบ 1 วันที่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรมีค่ามากกว่าที่บริเวณใกล้ขั้วโลก ผลประการที่สองเกี่ยวเนื่องกับการที่แกนโลกเอียง (แกนโลกวางตัวไม่ตั้งฉากกับระนาบการโคจร) ทำให้ด้านหน้าของโลกไม่ได้อยู่บนเส้นศูนย์สูตรตลอดเวลา โดยในช่วงครึ่งปีหลังซีกโลกเหนือจะเป็น



ด้านหน้าของโลก ขณะที่ในครึ่งปีแรกซีกโลกใต้จะเป็นด้านหน้าของโลก ดังรูป 2.4 ผลดังกล่าว ประกอบกับลักษณะการกระจายเทหวัตถุดาวตกที่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวโคจรของโลกทำให้อัตราสูงสุดต่ออัตราต่ำสุดของลักษณะสมบัติต่างๆ ในรอบ 1 ปีที่ละติจูดต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน

นอกเหนือจากพิกัดละติจูดแล้ว แนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงก็มีผลต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว โดยเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับตำแหน่งปรากฏรอยทางเดินของดาวตกเมื่อเทียบกับแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยรูป 2.3 ประกอบ เมื่อพิจารณาจากรูป 2.3 จะเห็นได้ว่า ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนโลก ณ เวลาที่ยังคืน เทหวัตถุดาวตกจะพุ่งเข้าสู่โลกทางด้านทิศตะวันออกมากกว่าทิศตะวันตก ขณะที่เวลาที่ยังวัน เทหวัตถุดาวตกจะพุ่งเข้าสู่โลกทางด้านทิศตะวันตกมากกว่าทิศตะวันออก กลไกดังกล่าวทำให้บริเวณจุดร้อน (hot spot) หรือตำแหน่งปรากฏหลักของรอยทางเดินของดาวตกเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ในแต่ละช่วงของวัน ซึ่งผลดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง

โดยสรุปแล้วลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเกิดจากกลไกหลายประการซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโลก การวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวจึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาเรขาคณิตที่ซับซ้อนของการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกที่สัมพันธ์กับโลก และต้องอาศัยฐานข้อมูลหรือแบบจำลองการกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกในอวกาศที่ถูกต้องอีกด้วย เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงสำหรับข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายมากที่สุด

## 2.5 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะแสดงให้เห็นว่า ข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายมีรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุในแต่ละเวลาเป็นเท่าไร และที่เวลานั้นคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีแอมพลิจูดและความยาวนานเฉลี่ยเป็นเท่าไร แต่ไม่ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของสัญญาณเป็นอย่างไร การแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญมากโดยเฉพาะกับระบบสื่อสารผ่านดาวตกที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราข้อมูลได้แบบทันทีทันใด การทราบลักษณะการแจกแจงดังกล่าวจะมีส่วนช่วยในการออกแบบระเบียบวิธีสื่อสารของข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกเป็นอย่างมาก เนื่องจากแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งกระเจิงคลื่นวิทยุและขนาดของรอยทางเดินซึ่งขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตก ขณะที่ความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่

ดังนั้นจึงสามารถหาลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกได้ถ้าทราบลักษณะการแจกแจงตำแหน่งกระเจิงคลื่นวิทยุ การแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตกและสัมประสิทธิ์การแพร่ อย่างไรก็ตามทั้งตำแหน่งกระเจิงและสัมประสิทธิ์การแพร่จะขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายปัจจัยเช่น ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกและความหนาแน่นประจุของบรรยากาศแวดล้อมรอยทางเดิน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวด้วย เพื่อที่จะตัดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว การพิจารณาการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจึงต้องพิจารณาในคาบเวลาแคบๆ ที่ถือได้ว่ายังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว โดยทั่วไปถือว่คาบเวลาดังกล่าวไม่เกิน 1 ชั่วโมง ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นทั้งในส่วนของแอมพลิจูดและความยาวนานที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะแนวทางในการวิเคราะห์เท่านั้น โดยจะไม่แสดงลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานไว้ เนื่องจากการวิเคราะห์ดังกล่าวเกี่ยวข้องกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินแต่ละรอยซึ่งจะวิเคราะห์ในบทถัดไป

### 2.5.1 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

แอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับทั้งปัจจัยคงที่และปัจจัยที่แปรเปลี่ยนได้ โดยปัจจัยคงที่ได้แก่ลักษณะสมบัติต่างๆ ของระบบสื่อสาร เช่น กำลังส่ง เป็นต้น ขณะที่ปัจจัยที่แปรเปลี่ยนได้แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ด้วยกันคือ ตำแหน่งที่กระเจิงสัญญาณและแนวการวางตัวของรอยทางเดิน และขนาดของรอยทางเดิน โดยตำแหน่งกระเจิงสัญญาณและแนวการวางตัวของรอยทางเดินนั้นจะเป็นตัวกำหนดค่าให้กับค่าปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ มุมกระเจิง และโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง เป็นต้น ขณะที่ขนาดของรอยทางเดินจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการกระเจิงคลื่นวิทยุของรอยทางเดิน การวิเคราะห์การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดโดยละเอียดจำเป็นต้องรู้ลักษณะการแจกแจงทั้ง 2 ส่วน ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรสุ่มเป็นจำนวนมาก การวิเคราะห์หาการแจกแจงแอมพลิจูดโดยทั่วไปจึงกำหนดให้ปัจจัยที่เกี่ยวกับตำแหน่งกระเจิงสัญญาณทุกตัวเป็นค่าคงที่โดยมักจะถือว่าการกระเจิงสัญญาณเกิดที่ตำแหน่งบนท้องฟ้าที่อยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ดังนั้นแอมพลิจูดของสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับขนาดของรอยทางเดินเพียงอย่างเดียว ลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดจึงหาได้จากลักษณะการแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตก อย่างไรก็ตามสมรรถนะของเครื่องคำนวณในปัจจุบันทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีตัวแปรสุ่มหลายตัวพร้อม

กันได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์หาการแจกแจงแอมพลิจูดโดยการเปลี่ยนการพิจารณาปัจจัยบางปัจจัยจากค่าคงที่มาเป็นตัวแปรสุ่มมากขึ้น

### 2.5.2 การแจกแจงความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีนิยามที่แตกต่างกัน 2 นิยาม นิยามแรกเป็นนิยามที่ใช้ในระบบสื่อสาร ได้ให้ความหมายของความยาวนานว่าเป็น เวลาที่ระดับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีค่าสูงกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ขณะที่นิยามที่สองซึ่งใช้ในงานวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแบ่งย่อยเป็นนิยามสำหรับรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง รายละเอียดเกี่ยวกับเรื่องนี้จะกล่าวในบทถัดไป

การวิเคราะห์ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยเฉพาะในงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะสมบัติของสัญญาณรับโดยตรงมักจะพิจารณาให้สัญญาณรับทุกสัญญาณมีลักษณะแบบสัญญาณที่กระเจิงมาจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ กล่าวคือ มีลักษณะแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล การแจกแจงความยาวนานของสัญญาณตามนิยามที่ 1 จะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวการเสื่อมสลาย (decay constant) หรือเวลาที่สัญญาณรับมีแอมพลิจูดเหลือร้อยละ 37 ของแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งเป็นความยาวนานตามนิยามที่ 2 สำหรับรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ปกติแล้วการวิเคราะห์การแจกแจงของความยาวนานตามนิยามที่ 1 จะกำหนดให้ค่าคงตัวการเสื่อมสลายของรอยทางเดินมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากค่าคงตัวการเสื่อมสลายจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินอีกทีหนึ่ง การวิเคราะห์การแจกแจงความยาวนานโดยละเอียดจึงต้องทราบการแจกแจงลักษณะสมบัติอื่นๆ ย้อนกลับขึ้นไปด้วย

### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียว

คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวแต่ละรอยนั้นมีลักษณะสมบัติแตกต่างกัน เนื่องจากปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อการกระเจิงมีค่าต่างกัน ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ความหนาแน่น อิเล็กตรอนเชิงเส้นของรอยทางเดิน ความถี่ปฏิบัติการ แนวการวางตัวของรอยทางเดิน และแนวการวางตัวของชายเชื่อมโยง เป็นต้น การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวโดยละเอียดจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ นอกเหนือจากปัจจัยที่กล่าวถึงนี้แล้ว สิ่งสำคัญอีกประการที่มีผลต่อการวิเคราะห์ก็คือแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ โดยแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์แบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือแบบจำลองเชิงประจักษ์ แบบจำลองเชิงสัดส่วน และแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ สำหรับแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ ต้องอาศัยแบบจำลองทางกายภาพที่กล่าวถึงองค์ประกอบและรูปร่างของรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวตั้งแต่รอยทางเดินเริ่มก่อตัวขึ้นจนกระทั่งสลายตัวไป ประกอบกับข้อมูลเรขาคณิตของการกระเจิง แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ที่ใช้กันแพร่หลายมีด้วยกัน 2 แบบจำลองคือ แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง โดยขอบเขตระหว่างแบบจำลองทั้ง 2 แบบนั้นกำหนดไว้ที่ค่าความหนาแน่นเชิงเส้นของอิเล็กตรอนของรอยทางเดินค่าหนึ่ง

แม้ว่าการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองจะทำได้สะดวกและรวดเร็ว แต่แบบจำลองแต่ละแบบก็มีข้อจำกัดและขอบเขตในการใช้งาน ในกรณีแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงนั้นมีข้อจำกัดตรงความไม่ต่อเนื่องในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินทั้ง 2 ประเภท วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวโดยจำลองรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวในลักษณะคล้ายคลึงกับที่ใช้ในแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ กล่าวคือจำลองรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวเป็นกลุ่มประจุที่เรียงตัวกันเป็นท่อทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์ แต่ท่อทรงกระบอกที่กำหนดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีลักษณะเป็นท่อหลายชั้นเรียงตัวบนแกนเดียวกัน โดยที่แต่ละชั้นมีความหนาแน่นประจุที่ตลอดภายในชั้นแต่ต่างจากชั้นอื่นๆ การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดียวในบทนี้จะกระทำทั้งในกรณีกระเจิงกลับและกรณีกระเจิงไปข้างหน้า ก่อนที่

จะเข้าสู่การวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ หัวข้อแรกของบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง จากนั้นจึงจะเข้าสู่การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นขั้นๆ ในหัวข้อที่สอง ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจะแสดงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงในหัวข้อสุดท้าย โดยเน้นที่การแปรค่าปัจจัย 3 ประการคือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของรอยทางเดิน มุมกระเจิง และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน

### 3.1 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดิน

#### ความหนาแน่นสูง

แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเป็นแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในงานวิเคราะห์สมรรถนะของชาย-เชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก แบบจำลองทั้งสองพัฒนาโดยอาศัยแบบจำลองทางกายภาพซึ่งกล่าวถึงรูปทรงและองค์ประกอบของรอยทางเดิน รายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองทางกายภาพตลอดจนถึงการพัฒนาเป็นแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง และขอบเขตระหว่างแบบจำลองทั้งสองจำแนกเป็นหัวข้อดังนี้

#### 3.1.1 แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตก

รอยทางเดินของดาวตกนั้นเกิดขึ้นเมื่อเทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลกด้วยความเร็วสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเทหวัตถุดาวตกและโมเลกุลของอากาศก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุอิสระ ประจุอิสระเหล่านี้คือรอยทางเดินของดาวตกนั่นเอง ขณะที่รอยทางเดินของดาวตกเริ่มก่อตัว ประจุอิสระที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกันหนาแน่นตามแนวการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตก จากนั้นประจุจะแพร่ออกทำให้ความหนาแน่นประจุอิสระน้อยลงจนกระทั่งเท่ากับความหนาแน่นประจุอิสระของบรรยากาศแวดล้อมรอยทางเดิน ซึ่งถือเป็นการสิ้นสุดลงของรอยทางเดินของดาวตก นอกจากกลไกการก่อตัวของรอยทางเดินที่กล่าวถึงข้างต้นในการสร้างแบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตกยังอาศัยข้อสมมติที่สำคัญ 4 ประการดังนี้



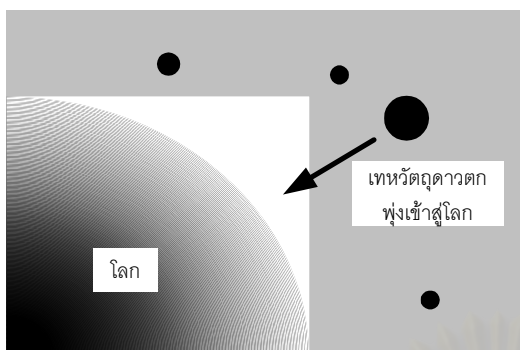
1. แนวการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกเป็นเส้นตรง ดังนั้นรอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Sugar, 1964) โดยมีแนวการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกเป็นแนวแกนของรอยทางเดิน
2. ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกอยู่ระหว่าง  $11.3 - 72 \text{ km/s}$  (Sugar, 1964) ขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าอยู่ระหว่าง  $1 - 140 \text{ m}^2/\text{s}$  (Sugar, 1964) ดังนั้นความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกจึงมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอัตราการขยายตัวเนื่องจากการแพร่ ทำให้สามารถประมาณได้ว่ารอยทางเดินของดาวตกเมื่อเริ่มก่อตัวมีลักษณะเป็นกลุ่มประจุเรียงตัวตามแนวแกนของรอยทางเดิน โดยที่การแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวแกนของรอยทางเดินเป็นแบบคงตัว
3. ระยะทางที่เทหวัตถุดาวตกแตกตัวเป็นประจุอิสระมีค่ามาก กล่าวคือรอยทางเดินของดาวตกมีความยาวปกติอยู่ในหลักของสิบกิโลเมตร (Sugar, 1964) ซึ่งถือว่ามีค่ามากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นวิทยุในย่านปฏิบัติการสื่อสารผ่านดาวตก ดังนั้นจึงประมาณได้ว่ารอยทางเดินของดาวตกมีความยาวเป็นอนันต์
4. ประจุที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่อย่างอิสระ ดังนั้นผลลัพธ์ของการแพร่จึงเป็นการแพร่ในแนวรัศมีและการแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวรัศมีนี้จะมีลักษณะเป็นแบบเกาส์

จากกลไกการก่อตัวของรอยทางเดินของดาวตกและข้อสมมติดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถกล่าวได้ว่า

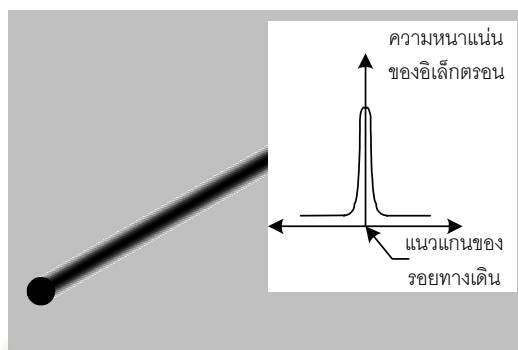
รอยทางเดินของดาวตกมีลักษณะเป็นกลุ่มประจุอิสระที่เรียงตัวกันเป็นทรงกระบอกตรง หน้าตัดวงกลม มีความยาวเป็นอนันต์ และมีรัศมีเริ่มต้นเป็นศูนย์ โดยที่การแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวแกนของรอยทางเดินมีลักษณะคงตัว (**uniform distribution**) ซึ่งสามารถแสดงปริมาณด้วยค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น (**electron line density:  $q$** ) ขณะที่การแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวหน้าตัดหรือแนวรัศมีเป็นแบบเกาส์ (**Gaussian distribution**) และสามารถแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (**diffusion coefficient:  $D$** ) รอยทางเดินของดาวตกจะสิ้นสุดลงเมื่อความหนาแน่นประจุลดลงจนเท่ากับความหนาแน่นประจุอิสระของบรรยากาศรอบรอยทางเดิน

แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตกนับตั้งแต่รอยทางเดินเริ่มก่อตัวขึ้นจนกระทั่งรอยทางเดินแพร่หายไป ในบรรยากาศสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูป 3.1

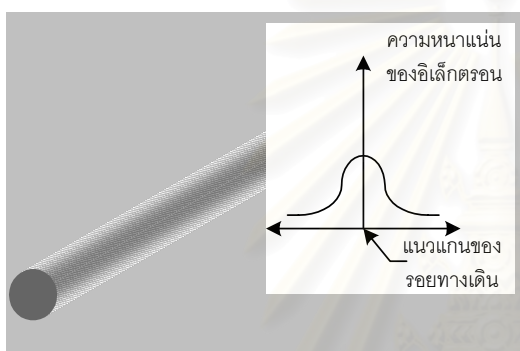




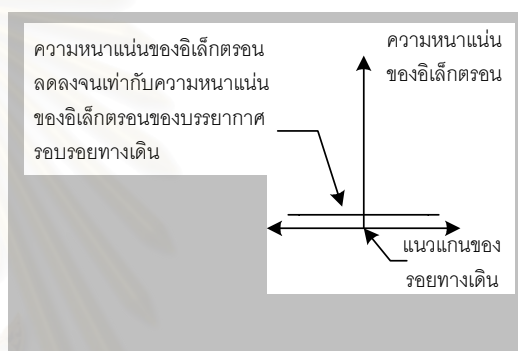
ก. เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก  
(รอยทางเดินยังไม่ก่อตัว)



ข. รอยทางเดินเริ่มก่อตัว



ค. รอยทางเดินแผ่ร้อออก



ง. รอยทางเดินสิ้นสุดลง

รูป 3.1 แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตก

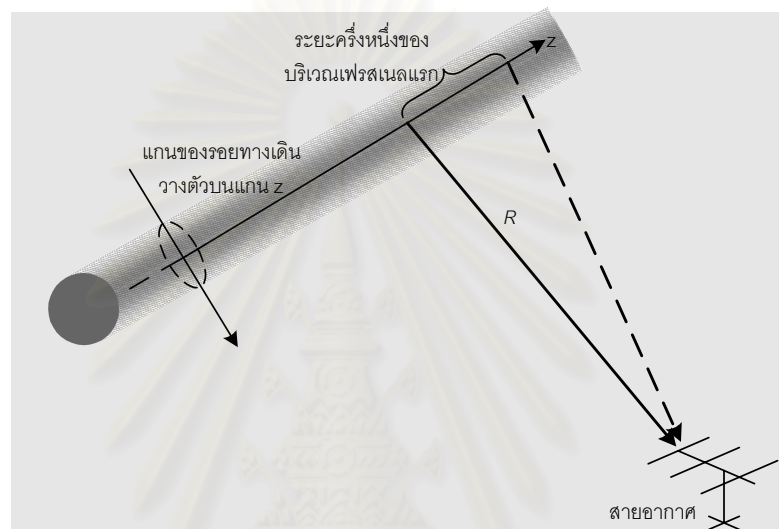
แบบจำลองดังกล่าวข้างต้นกล่าวเพียงลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินเท่านั้น การประยุกต์เพื่อใช้พัฒนาแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงสำหรับวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน จำเป็นต้องกำหนดเรขาคณิตของการกระเจิงขึ้นมา ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงในหัวข้อถัดไปคือหัวข้อแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ สำหรับแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงนั้นก็อาจอาศัยเรขาคณิตของการกระเจิงในลักษณะเดียวกับแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

### 3.1.2 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

รอยทางเดินความหนาแน่นต่ำเป็นรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นประจุน้อยจนประมาณได้ว่าพลังงานคลื่นวิทยุเกือบทั้งหมดสามารถแพร่กระจายผ่านรอยทางเดินโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลง ขณะที่พลังงานคลื่นวิทยุในส่วนที่กระเจิงกลับมาถึงสายอากาศรับจะเป็นผลรวมของการกระเจิงอย่างอิสระ (**independent scattering**) โดยอิเล็กตรอนแต่ละตัวในรอยทางเดิน อย่างไรก็ตามพลังงานคลื่นวิทยุเกือบทั้งหมดที่กระเจิงกลับมาถึงสายอากาศรับจะเป็น

ผลรวมของการกระเจิงกลับอย่างอิสระโดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในระยะครึ่งหนึ่งของบริเวณเฟรสเนลแรกเท่านั้น ผลรวมของการกระเจิงจึงสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสนามกระเจิงจากอิเล็กตรอนแต่ละตัวในระยะดังกล่าวดังนี้

พิจารณากรณีการกระเจิงกลับหรือกรณีเรดาร์ กำหนดให้แกนของรอยทางเดินวางตัวอยู่บนแกน  $z$  ในระบบพิกัดทรงกระบอกดังรูป 3.2



รูป 3.2 เรขาคณิตของการกระเจิงกลับ

เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างสนามกระเจิงจากอิเล็กตรอนหนึ่งตัวต่อสนามตกกระทบมีค่าดังสมการ (Manning and Eshleman, 1958)

$$\frac{E^s}{E^i} = \frac{r_e}{R} \quad (3.1)$$

โดยที่  $r_e$  คือรัศมีของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $2.82 \times 10^{-15}$  m.

และ  $R$  คือระยะจากอิเล็กตรอนถึงจุดสังเกต

ดังนั้นผลรวมของสนามกระเจิงจึงสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{E^s}{E^i} &= \frac{r_e}{R} \int_V N \exp(j2kR') dV \\ (3.2) \end{aligned}$$

$$= \frac{r_e}{R} \int_0^{\sqrt{\frac{R\lambda}{2}}} \int_0^\infty \int_0^\pi 2N \exp(j2kR') d\phi r dr dz$$

โดยที่  $\sqrt{\frac{R\lambda}{2}}$  คือระยะครึ่งหนึ่งของบริเวณเฟรสเนลแรกในกรณีเรดาร์

และ  $N$  คือความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิเล็กตรอน เป็นฟังก์ชันการแจกแจงแบบเกาส์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น  $q$  ในหน่วยจำนวนอิเล็กตรอนต่อเมตร (e/m) ดังสมการ (Mckinley, 1961; Poulter and Baggaley, 1977)

$$N = \frac{q}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \quad (3.3)$$

โดยที่  $D$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนในรอยทางเดิน

$t$  คือเวลา

$r$  คือระยะในแนวรัศมีจากแกนของรอยทางเดิน

และ  $a^2 = r_0^2 + 4Dt$  เมื่อ  $r_0$  คือรัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดิน ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับศูนย์

แทนสมการ (3.3) ลงในสมการ (3.2) ผลรวมสนามกระเจิงต่อสนามตกกระทบตามสมการ (3.2) จึงเท่ากับ (Eshleman, 1955)

$$\frac{E^s}{E^i} = r_e q \sqrt{\frac{\lambda}{2R}} \exp\left(-\frac{16\pi^2 Dt}{\lambda^2}\right) \quad (3.4)$$

สมการ (3.4) เป็นรูปหนึ่งของแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่มีเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ ถ้ากำหนดให้สายอากาศในรูป 3.2 มีอัตราขยายเท่ากับ  $G$  แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำในรูปอัตราส่วนระหว่างกำลังรับต่อกำลังส่งจะแสดงได้ดังนี้

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G^2 \lambda^3 r_e^2 q^2}{32\pi^2 R^3} \exp\left(-\frac{32\pi^2 Dt}{\lambda^2}\right) \quad (3.5)$$

ในกรณีที่การกระเจิงเป็นแบบการกระเจิงไปข้างหน้าดังรูป 3.3 แบบจำลองรอยทางเดิน ความหนาแน่นต่ำในรูปอัตราส่วนระหว่างสนามกระเจิงต่อสนามตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างกำลังรับต่อกำลังส่งจะเปลี่ยนไปตามลำดับดังนี้

$$\frac{E^s}{E^i} = \frac{r_e q \sin \alpha}{R_R} \sqrt{\frac{\lambda R_T R_R}{(R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)}} \exp\left(-\frac{16\pi^2 Dt}{\lambda^2 \sec^2 \phi'}\right) \quad (3.6)$$

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^3 r_e^2 q^2 \sin^2 \alpha}{16\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)} \exp\left(-\frac{32\pi^2 Dt}{\lambda^2 \sec^2 \phi'}\right) \quad (3.7)$$

โดยที่  $R_T$  และ  $R_R$  คือระยะจากสายอากาศส่งไปยังตำแหน่งกระเจิงและระยะจากตำแหน่งกระเจิงมายังสายอากาศรับตามลำดับ

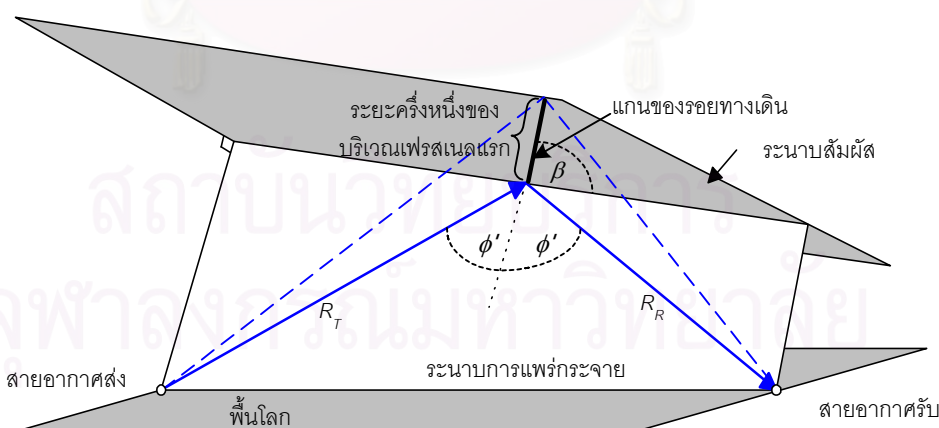
$\alpha$  คือมุมระหว่างเวกเตอร์สนามตกกระทบและแนว  $R_R$  ซึ่งมีค่าเป็น  $90^\circ$  ในกรณีเรดาร์

$\beta$  คือแนวการวางตัวของรอยทางเดินซึ่งวัดเป็นมุมระหว่างแนวแกนของรอยทางเดินกับ

รอยตัดระหว่างระนาบสัมผัสและระนาบการแพร่กระจาย ดังรูป 3.3

$\phi'$  คือค่าครึ่งหนึ่งของมุมกระเจิงหรือมุมระหว่างแนว  $R_T$  และ  $R_R$

และ  $G_T$  และ  $G_R$  คืออัตรายบายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับตามลำดับ



รูป 3.3 เรขาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้า

ขอบเขตการใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำนั้นจำกัดอยู่ที่ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นค่าหนึ่ง ถ้าหากความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเกินค่าดังกล่าว การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะเปลี่ยนมาใช้แบบจำลอง

รอยทางเดินความหนาแน่นสูงแทน ขอบเขตการใช้งานระหว่างแบบจำลองทั้งสองจะกล่าวถึง ภายหลังจากกล่าวถึงแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงซึ่งเป็นหัวข้อถัดไป

### 3.1.3 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าสูงถึงระดับหนึ่ง สภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงตัว ไดอิเล็กทริกของตัวกลางจะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าศูนย์ คลื่นวิทยุจะไม่สามารถแพร่กระจายผ่าน ตัวกลางนี้ไปได้ แต่จะสะท้อนกลับเหมือนการสะท้อนคลื่นของผิวสะท้อนที่เป็นโลหะ รอยทางเดิน ความหนาแน่นสูงเป็นรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากจนประมาณได้ว่า ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินภายในบริเวณรัศมีค่าหนึ่งมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกในรัศมีดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าศูนย์ รัศมีดังกล่าวนี้เรียกว่ารัศมีวิกฤต (critical radius) คลื่นวิทยุที่ตกกระทบรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจะทะลุผ่านรอย ทางเดินส่วนที่อยู่นอกรัศมีวิกฤตและเมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายจนถึงรัศมีวิกฤตจะสะท้อนกลับใน ลักษณะเดียวกับ การสะท้อนคลื่นของทรงกระบอกโลหะ แบบจำลองลักษณะทางกายภาพ ของรอยทางเดิน ความหนาแน่นสูงจึงเป็น ทรงกระบอกโลหะหน้าตัดวงกลม มีความยาวเป็น อนันต์ และมีรัศมีเท่า-กับค่ารัศมีวิกฤต รัศมีวิกฤตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการแพร่ ของอิเล็กตรอนใน รอยทางเดิน โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกซึ่งความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่า สูง เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนตลอดแนวหน้าตัดลดลงมาถึงระดับหนึ่งค่ารัศมีวิกฤตจะลด ตามมาด้วย จนกระทั่งรัศมีวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินมีค่า ไม่มากพอที่จะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์) รอยทางเดินความหนาแน่นสูง ก็เปลี่ยนเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

ค่ารัศมีวิกฤตหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กทริกกับความหนาแน่น เชนปริมาตรของอิเล็กตรอนของรอยทางเดิน (สมการ(3.3)) โดยกำหนดให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก มีค่าเท่ากับศูนย์แล้วแก้สมการหาค่ารัศมีออกมา ซึ่งจะได้จะได้ค่ารัศมีวิกฤตดังนี้ (Sugar, 1964)

$$r_c = \left[ 4Dt \ln \left( \frac{r_e q \lambda^2 \sec^2 \phi'}{4\pi^2 Dt} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$



โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงรังสีและเรขาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้าดังรูป 3.3 อัตราส่วนระหว่างสนามกระเจิงต่อสนามตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างกำลังรับต่อกำลังส่ง แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{E^s}{E^i} = \frac{\sin \alpha}{R_R \sqrt{2\lambda}} \sqrt{\frac{\lambda R_T R_R}{(R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)}} \left[ \frac{4Dt}{\sec^2 \phi'} \ln \left( \frac{r_e q \lambda^2 \sec^2 \phi'}{4\pi^2 Dt} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.9)$$

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^2 \sin^2 \alpha}{32\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)} \left[ \frac{4Dt}{\sec^2 \phi'} \ln \left( \frac{r_e q \lambda^2 \sec^2 \phi'}{4\pi^2 Dt} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

ในกรณีเรดาร์ สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นต้นเดียวกันดังนั้น  $G_T = G_R$  นอกจากนี้ระยะ  $R_T$  จะมีค่าเท่ากับระยะ  $R_R$  มุม  $\phi'$  และมุม  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  และ  $0^\circ$  ตามลำดับ สมการ (3-9) และ (3-10) สามารถจัดให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นเหมือนกับกรณีแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ แต่จะไม่แสดงในที่นี้

### 3.1.4 ขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

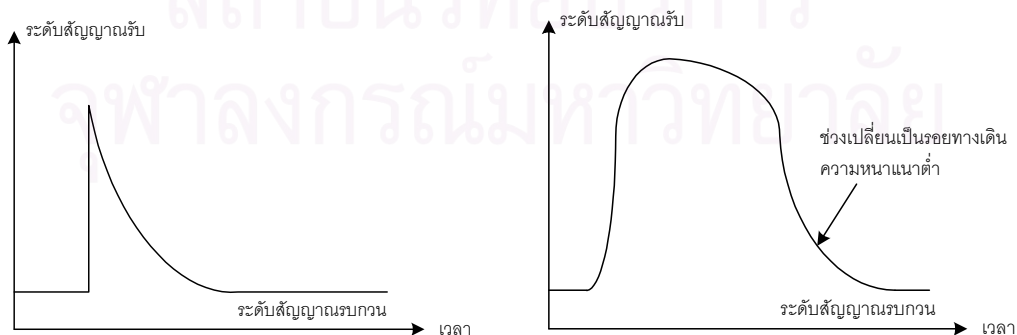
เมื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำจะพบว่า ระดับสัญญาณจะพุ่งขึ้นถึงจุดสูงสุดในทันทีที่รอยทางเดินก่อตัว จากนั้นระดับสัญญาณจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจนกระทั่งระดับสัญญาณเท่ากับระดับสัญญาณรบกวน ดังรูป 3.4 ก. ขณะที่ถ้าหากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจะพบว่าระดับสัญญาณจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดและจะลดระดับลงตามการขยายและหดตัวของทรงกระบอกโลหะ (ค่ารัศมีวิกฤตเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจากนั้นจะลดลงจนเป็นศูนย์) ตามลำดับ เมื่อรัศมีวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ รอยทางเดินของดาวตกจะกลายเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ระดับสัญญาณจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจนกระทั่งระดับสัญญาณเท่ากับระดับสัญญาณรบกวน ดังรูป 3.4 ข.

สัญญาณที่รับได้จากการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าน้อยมาก ( $q \leq 10^{13}$  e/m) และจะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่ามาก ( $q \geq 10^{16}$  e/m)

ขณะที่ถ้าหากความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าระหว่าง 2 ค่าดังกล่าวข้างต้น สัญญาณรับจะมีลักษณะผสมกันระหว่างสัญญาณรับจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความ-หนาแน่นสูง อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสัญญาณและจำแนกประเภทของรอยทางเดินจึงได้มีการกำหนดความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่าง รอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ซึ่งค่าขอบเขตดังกล่าวกำหนดจากนิยาม 2 นิยามดังนี้คือ

**นิยามที่ 1** ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง คือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ทำให้แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณรับที่วิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทั้งสองมีค่าเท่ากัน ซึ่งถ้าหากอาศัยนิยามนี้ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดินทั้งสองประเภทจะมีค่าเท่ากับ  $0.75 \times 10^{14}$  e/m (Sugar, 1964)

**นิยามที่ 2** ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง คือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ทำให้ความยาวนานของสัญญาณที่วิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทั้งสองมีค่าเท่ากัน โดยที่ความ-ยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำมีค่าเท่ากับเวลาที่สัญญาณลดระดับลงจนมีค่าเป็นร้อยละ 37 ( $=\exp(-1)$ ) ของระดับสัญญาณสูงสุด ขณะที่ความยาวนานของสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงมีค่าเท่ากับเวลาที่วัดมีวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์(เวลาที่รอยทางเดินไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นสูงไว้ได้) ถ้าหากอาศัยนิยามนี้ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นค่าขอบเขตระหว่างรอยทางเดินทั้งสองประเภทจะมีค่าเท่ากับ  $0.885 \times 10^{14}$  e/m (Manning, 1959)



ก. ลักษณะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

ข. ลักษณะสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

รูป 3.4 ลักษณะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

แม้ว่าค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดินทั้งสองประเภทจะกำหนดได้จากนิยามทั้งสองนิยามข้างต้น แต่โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นเชิงเส้นที่นิยมใช้เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง โดยเฉพาะในงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสัญญาณในเชิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเท่ากับ  $10^{14}$  e/m

แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่กล่าวมาทั้งสองแบบนี้เป็นแบบจำลองแบบประมาณที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผล-ตรวจวัดมากในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำสำหรับรอยทาง-เดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นน้อยกว่า  $10^{13}$  e/m และในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยแบบ-จำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงสำหรับรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น มากกว่า  $10^{16}$  e/m สำหรับรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นอยู่ระหว่าง  $10^{13}$  ถึง  $10^{16}$  e/m ซึ่งเรียกว่ารอยทางเดินในย่านการเปลี่ยนผ่าน (transition region) นั้น ผลการตรวจวัดสัญญาณแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองแบบประมาณทั้งสองแบบไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับ ผลการตรวจวัดแม้ว่าจะได้มีการปรับปรุงแบบจำลองในบางส่วน เช่นการรวมผลของ การหักเหคลื่นวิทยุเนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่นอกรัศมีวิกฤตของรอยทางเดินความหนาแน่นสูง แล้วก็ตาม ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของสัญญาณรับคือโพลาไรเซชันหรือแบบแผนของคลื่น (TM หรือ TE) ผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่า คลื่นวิทยุที่มีสนามไฟฟ้าขนานหรือตั้งฉากกับแกนของรอยทางเดินจะให้ลักษณะสมบัติการกระเจิงที่ต่างกัน ขณะที่การวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองแบบประมาณไม่ได้คำนึงแนวการวางตัวของสนามไฟฟ้าเมื่อเทียบกับรอย-ทางเดิน นอกจากนี้ผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นอีกว่า แอมพลิจูดและความยาวนานของสัญญาณรับไม่ได้แปรตามมุม  $\phi'$  ในลักษณะที่กำหนดในแบบจำลองแบบประมาณ ทำให้ผลการวิเคราะห์กรณีการกระเจิงไปข้างหน้าไม่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอกิจกรรมวิเคราะห์เชิง-คลื่นเต็มรูปแบบเพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนี้เป็นการแก้ปัญหาค่าขอบเขตระหว่างสนามตกกระทบ สนาม-กระเจิง และสนามที่แพร่กระจายเข้าไปในรอยทางเดินโดยตรง จึงทำให้ไม่มีข้อจำกัดอันเนื่องมา-จากข้อสมมติที่ใช้ในแบบจำลองแบบประมาณ แนวทางการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองแบบประมาณจะแสดงในสองหัวข้อถัดไป

### 3.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ

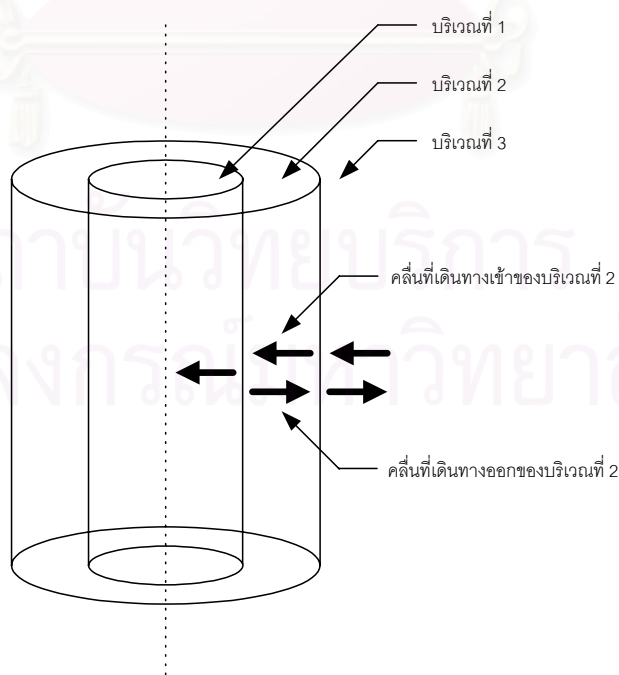
กรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบเป็นกรรมวิธีที่หาผลเฉลย (สนามไฟฟ้ากระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก) จากสมการแมกซ์เวลล์โดยตรง ด้วยการแก้ปัญหาค่าขอบเขตระหว่างสนามภายนอกรอยทางเดินหรือสนามตกกระทบและสนามกระเจิง กับสนามภายในรอยทางเดิน โดยอาศัยแบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตกที่เหมาะสม แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ กล่าวคือ รอยทางเดินของดาวตกเป็นกลุ่มประจุที่เรียงตัวกันเป็นทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม มีความยาวเป็นอนันต์ โดยที่ลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวแกนของรอยทางเดินเป็นแบบคงตัว ขณะที่ลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวรัศมีเป็นแบบเกาส์ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนี้จะกำหนดให้การแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวรัศมีมีลักษณะไม่ต่อเนื่องแต่จะแปรค่าในลักษณะขั้นบันได ดังนั้นรอยทางเดินของดาวตกจึงมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกหลายชั้นเรียงตัวบนแกนเดียวกัน โดยที่แต่ละชั้นมีความหนาแน่นประจุคงที่ตลอดภายในชั้นแต่ต่างจากชั้นอื่นๆ แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินในลักษณะนี้เรียกว่า แบบจำลองรอยทางเดินของดาวตกเป็นชั้นๆ หรือเรียกโดยย่อว่า แบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ

กรรมวิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จะเริ่มจากการหาผลเฉลยในรูปเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของรอยทางเดินที่สมมติให้เป็นทรงกระบอกเอกพันธ์ จากนั้นจึงนำผลเฉลยดังกล่าวมาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีวนซ้ำเพื่อหาผลเฉลยของปัญหาการกระเจิงคลื่นวิทยุจากท่อทรงกระบอกหรือรอยทางเดินเป็นชั้นๆ เรขาคณิตของการกระเจิงที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนี้จะยึดรอยทางเดินเป็นหลัก กล่าวคือกำหนดให้แกนของรอยทางเดินวางตัวอยู่บนแกน  $z$  และความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆ จะกำหนดในรูปของมุม  $\theta$  และมุม  $\phi$  ในระบบพิกัดทรงกระบอก เรขาคณิตที่ยึดรอยทางเดินของดาวตกเป็นหลักนี้เรียกว่า เรขาคณิตของรอยทางเดิน ซึ่งต่างจากเรขาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้าทีกล่าวถึงในหัวข้อที่แล้วที่ถือเอารังสีของสนามตกกระทบและสนามกระเจิงเป็นหลัก เรขาคณิตในลักษณะนี้นั้นเรียกว่า เรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยง เรขาคณิตของรอยทางเดินและความสัมพันธ์กับเรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยงจะแสดงในหัวข้อย่อยถัดไปหลังจากกล่าวถึงแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ในหัวข้อย่อยแรก จากนั้นจึงจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก โดยจะแสดง

การวิเคราะห์ในกรณีปัญหาการกระเจิงคลื่นวิทยุโดยทรงกระบอกเอกพันธ์ก่อนในหัวข้อย่อยที่สาม และจะใช้ระเบียบวิธีวนซ้ำเพื่อหาผลเฉลยสำหรับทรงกระบอกหรือรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ในหัวข้อย่อยถัดไป สำหรับผลเฉลยในรูปอัตราส่วนระหว่างสนามตกกระทบและสนามกระเจิง และสัมประสิทธิ์การสะท้อนสัญญาณของรอยทางเดินของดาวตกจะกล่าวถึงในหัวข้อย่อยสุดท้าย

### 3.2.1 แบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ

แบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ นั้นจำลองรอยทางเดินของดาวตกในลักษณะเดียวกับแบบจำลองทางกายภาพที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว แต่ต่างกันตรงที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินในแนวรัศมีจะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จึงมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกหลายชั้นเรียงตัวบนแกนเดียวกัน โดยที่แต่ละชั้นมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนคงตัวแต่ต่างจากชั้นอื่นๆ รอยทางเดินแต่ละชั้นจึงมีสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน พลังงานคลื่นวิทยุที่ตกกระทบรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จะทะลุผ่านเข้าไปในรอยทางเดินส่วนหนึ่ง ขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับออกมา คลื่นที่ทะลุผ่านก็จะตกกระทบกับรอยทางเดินในชั้นถัดไปซึ่งก็จะเกิดการทะลุผ่านและสะท้อนกลับอีกเช่นกัน กลไกเช่นนี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ จนถึงรอยทางเดินชั้นในสุด ดังแสดงตามแบบจำลองรูป 3.5 ซึ่งสมมติให้รอยทางเดินเป็นทรงกระบอก 2 ชั้น ดังนั้นบริเวณที่มีคลื่นวิทยุจึงแบ่งได้เป็น 3 บริเวณดังรูป บริเวณที่ 1 และ 2 คือชั้นแต่ละชั้นของรอยทางเดิน และบริเวณสุดท้ายเป็นส่วนของบรรยากาศรอบรอยทางเดิน



รูป 3.5 คลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านรอยทางเดินทรงกระบอก 2 ชั้น



แม้ว่าจะมีคลื่นตกกระทบเดินทางเข้ารอยทางเดินแต่เพียงอย่างเดียว แต่คลื่นสะท้อนที่รอยต่อระหว่างบริเวณจะเปรียบเหมือนกับคลื่นที่เดินทางออกจากรอยทางเดิน บริเวณแต่ละบริเวณจึงประกอบด้วยคลื่น 2 ประเภทคือ คลื่นที่เดินทางเข้า (incoming wave) และคลื่นที่เดินทางออก (outgoing wave) ยกเว้นบริเวณในสุดที่มีแต่คลื่นที่เดินทางเข้าเท่านั้น การวิเคราะห์ทรงกระบอกเอกพันธ์เพื่อหาผลเฉลยสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการวนซ้ำในขั้นตอนการวิเคราะห์ทรงกระบอกเป็นชั้นๆ จึงจำเป็นต้องทำทั้ง 2 กรณี คือ กรณีคลื่นที่เดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์ และกรณีคลื่นที่เดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์ แบบจำลองคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าทรงกระบอกเอกพันธ์ และแบบจำลองคลื่นวิทยุที่เดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์จะกล่าวถึงในหัวข้อย่อยที่ 3 เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพันธ์

นอกเหนือจากความแตกต่างในเรื่องความต่อเนื่องของการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแนวรัศมีแล้ว สิ่งที่แบบจำลองนี้ได้เพิ่มขึ้นมาอีกประการหนึ่งเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบก็คือการยอมให้อิเล็กตรอนในรอยทางเดินมีการชนกันเล็กน้อยด้วยค่าความถี่การชน  $\nu$  การชนนี้จะไม่ส่งผลให้ลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวรัศมีเปลี่ยนแปลง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินตามแนวรัศมีมีลักษณะเป็นแบบแก๊สเนื่องจากข้อสมมติที่ว่า การแพร่ของรอยทางเดินเกิดจากการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอน ข้อสมมติดังกล่าวยังคงใช้อยู่ในแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ดังนั้นแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จึงยังคงลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวรัศมีเป็นแบบแก๊สอยู่ เพียงแต่การแจกแจงดังกล่าวไม่ต่อเนื่อง แต่จะมีค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเท่ากับค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่คำนวณได้จากรัศมีที่เป็นตัวแทนของชั้นนั้นๆ ซึ่งรัศมีที่เป็นตัวแทนของชั้นจะเท่ากับความยาวจากแกนของรอยทางเดินถึงกึ่งกลางของชั้น ดังนั้นความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินของดาวตกตามแนวรัศมีจึงมีค่าดังสมการ (Mckinley, 1961; Poulter and Baggaley, 1977)

$$N_i(r_i, t) = \frac{q}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{a^2}\right) \quad (3.11)$$

โดยที่ ดัชนี “ $i$ ” แสดงลำดับที่ของชั้นนับจากชั้นในที่สุด

จากความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิเล็กตรอนตามสมการ (3.11) ประกอบกับค่าความถี่การชน  $\nu$  จะสามารถแสดงค่าคงตัวไดอิเล็กทริกในแต่ละชั้น “ $\kappa_i$ ” ของรอยทางเดินได้ดังสมการ

$$\kappa_i = 1 - \frac{e^2 N_i(r_i, t)}{\omega^2 m_e \epsilon_0 (1 + j\nu/\omega)} \quad (3.12)$$

โดยที่  $e$  และ  $m_e$  คือประจุและมวลของอิเล็กตรอนตามลำดับ

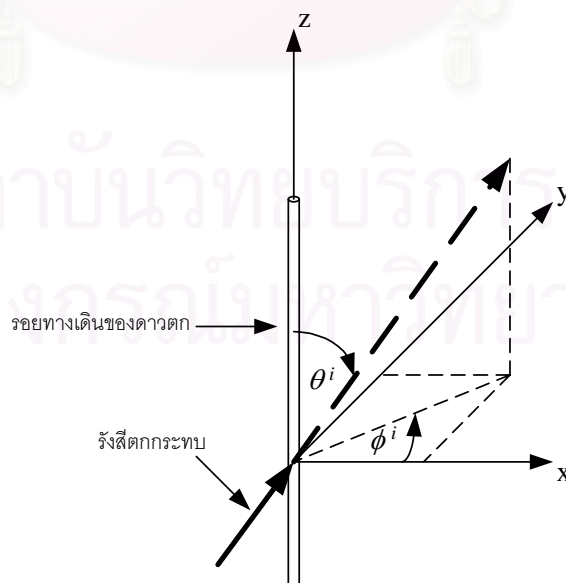
$\omega$  คือความถี่เชิงมุม

และ  $\epsilon_0$  คือค่าสภาพยอมของอากาศว่าง

เครื่องหมายของความถี่การชนจะขึ้นอยู่กับการเลือกแสดงฟังก์ชันเวลาของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กว่าเป็น  $\exp(j\omega t)$  หรือ  $\exp(-j\omega t)$  ถ้าเป็น  $\exp(j\omega t)$  เครื่องหมายของความถี่การชนจะเป็น “-” ทำให้พจน์  $(1 + j\nu/\omega)$  กลายเป็น  $(1 - j\nu/\omega)$  แต่ถ้าใช้ฟังก์ชันเวลาเป็น  $\exp(-j\omega t)$  อย่างที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เครื่องหมายของความถี่การชนจะเป็น “+” (Poulter and Baggaley, 1977) ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกก็จะแสดงได้ดังสมการ (3.12)

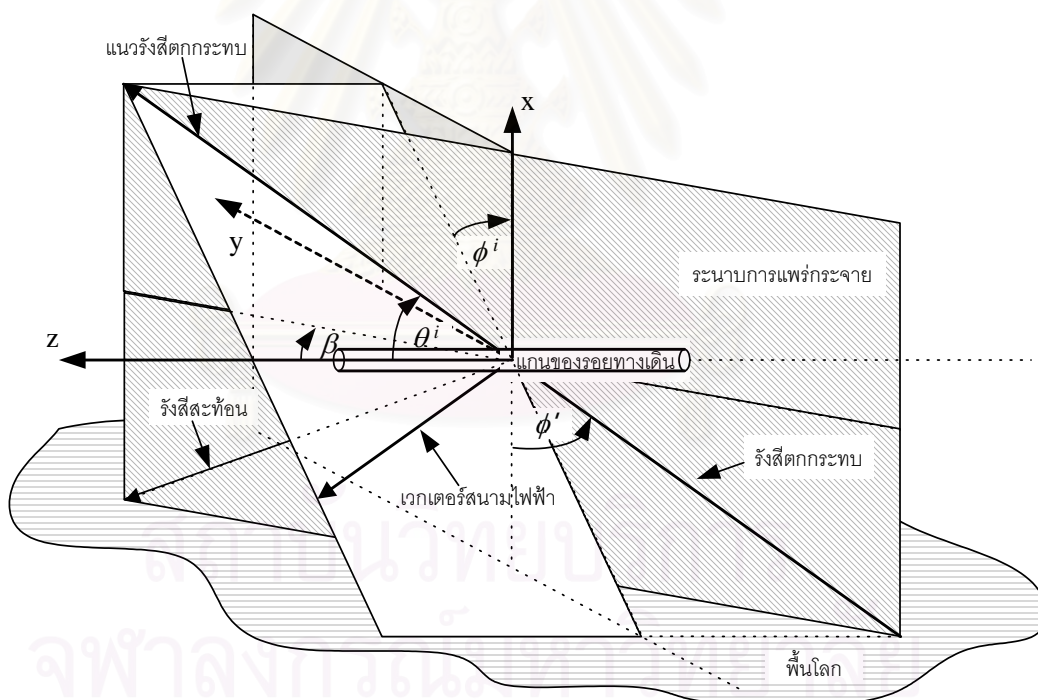
### 3.2.2 เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตก

เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตกเป็นเรขาคณิตที่ยี่ดรอยทางเดินเป็นหลัก กล่าวคือ กำหนดให้แกนของรอยทางเดินวางตัวอยู่บนแกน  $z$  ของระบบพิกัดทรงกระบอก คลื่นที่ตกกระทบรอยทางเดินจะเดินทางมาจากทิศใดๆ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบแสดงได้ด้วยมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  ตามระบบพิกัดทรงกระบอกดังรูป 3.6



รูป 3.6 คลื่นตกกระทบทำมุมใดๆ กับแกนของรอยทางเดิน

การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนั้นต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแนวการวางตัวของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและแกนของรอยทางเดิน ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  แต่เนื่องจากมุมกระเจิง ( $2\phi'$ ) และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน ( $\beta$ ) ซึ่งได้นิยามไว้ในหัวข้อที่แล้ว เป็นมุมที่สื่อลักษณะทางกายภาพของชายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกได้เข้าใจง่ายกว่ามุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  ดังนั้นค่าของมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  ที่จะใช้ในการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจะแสดงในรูปของมุม  $\phi'$  และมุม  $\beta$  นอกจากนี้การแสดงผลของมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  ในรูปของมุม  $\phi'$  และมุม  $\beta$  ก็จะทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงได้โดยสะดวกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  กับมุม  $\phi'$  และมุม  $\beta$  สามารถแสดงได้โดยอาศัยเรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตกดังรูป 3.7



รูป 3.7 เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตก

จากรูป 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  กับมุม  $\phi'$  และมุม  $\beta$  สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\cos \theta^i = \cos \beta \sin \phi' \quad (3.13)$$

$$\tan \phi^i = \sin \beta \sin \phi' \quad (3.14)$$

สำหรับคลื่นกระเจิงนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์สนามกระเจิงกับแกนของรอยทางเดินสามารถแสดงได้ด้วยมุม  $\theta^s$  และมุม  $\phi^s$  โดยที่มุม  $\theta^s$  และมุม  $\phi^s$  มีความสัมพันธ์กับมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  ดังนี้

$$\theta^s = \theta^i \quad (3.15)$$

$$\phi^s = \pi - \phi^i \quad (3.16)$$

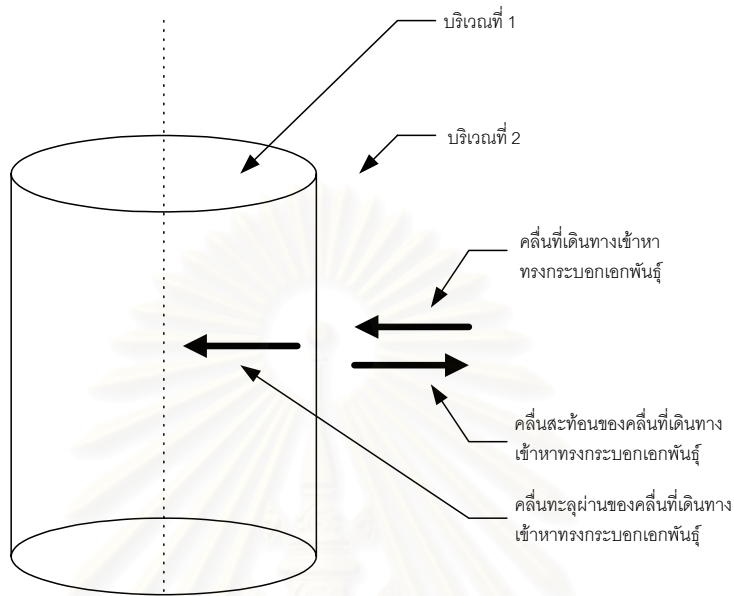
เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตกที่แสดงตามรูป 3.7 เป็นกรณีทั่วไปที่สุดของคลื่นในแบบแผน TM (transverse magnetic) กล่าวคือ ไม่จำกัดทิศทางที่คลื่นจะตกกระทบรอยทางเดิน นอกจากจะกำหนดให้เวกเตอร์สนามแม่เหล็กวางตัวอยู่ในระนาบ  $xy$  ซึ่งตั้งฉากกับรอยทางเดินหรือแกน  $z$  (ในกรณีที่คลื่นตกกระทบเป็นคลื่นในแบบแผน TE (transverse electric) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะวางตัวอยู่ในระนาบ  $xy$  แทน) ถ้าหากแนวการวางตัวของรอยทางเดินตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจายหรือมุม  $\beta$  เท่ากับ  $90^\circ$  มุม  $\theta^i$  จะมีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  ด้วยซึ่งหมายความว่าคลื่นตกกระทบและคลื่นกระเจิงจะตั้งฉากกับรอยทางเดิน และถ้าหากมุม  $\phi^i$  เท่ากับ  $0^\circ$  ด้วย มุม  $\phi^s$  ก็จะเท่ากับ  $180^\circ$  ซึ่งก็จะเป็นกรณีการกระเจิงกลับโดยตกกระทบแบบตั้งฉากหรือกรณีเรดาร์นั่นเอง

ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาและความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $\theta^i, \phi^i, \theta^s$ , และ  $\phi^s$  ตามเรขาคณิตของรอยทางเดินกับมุม  $\phi'$  และ  $\beta$  ตามเรขาคณิตของชายเชื่อมโยงดังสมการ (3.13) – (3.16) จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหาการกระเจิงคลื่นวิทยุจากทรงกระบอกเอกพจน์ในรูปของเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านในหัวข้อถัดไป

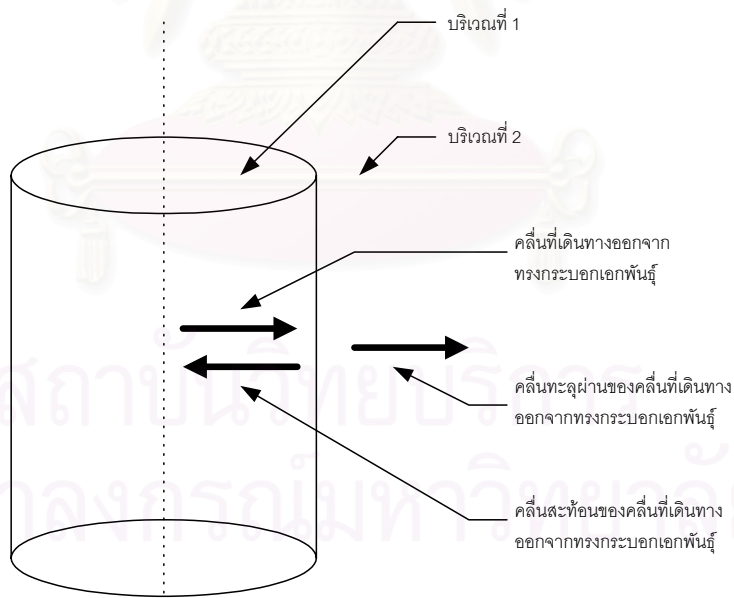
### 3.2.3 เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพจน์

เมื่อคลื่นวิทยุตกกระทบทรงกระบอกเป็นชั้นๆ ทรงกระบอกแต่ละชั้นจะประกอบด้วยคลื่น 2 ประเภท คือ คลื่นที่เดินทางเข้า และคลื่นที่เดินทางออก ยกเว้นทรงกระบอกชั้นในสุดที่มีแต่คลื่นที่เดินทางเข้าเท่านั้น การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากทรงกระบอกเป็นชั้นๆ จำเป็นต้องรู้ลักษณะสมบัติสะท้อนและส่งผ่านคลื่นวิทยุทั้งในกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าและคลื่นที่เดินทางออกก่อน ซึ่งลักษณะสมบัติสะท้อนและส่งผ่านของทั้งสองกรณีสามารถหาได้โดย

อาศัยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาและเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์  
 พันธุ์ดังรูป 3.8 ก. และ 3.8 ข. ตามลำดับ



ก. กรณีคลื่นวิทยุเดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์



ข. กรณีคลื่นวิทยุเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์

รูป 3.8 แบบจำลองคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาและออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์



พิจารณากรณีคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์ คลื่นระนาบใดๆ ที่เดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์สามารถแสดงได้ในรูปคลื่นระนาบ 2 คลื่นที่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแกนของทรงกระบอก คลื่นระนาบดังกล่าวเรียกว่าคลื่น TM (transverse magnetic) และคลื่น TE (transverse electric) ตามลำดับ ถ้าหากคลื่นระนาบตกกระทบทรงกระบอกในทิศทางใดๆ ซึ่งแสดงได้ด้วยมุม  $\theta^i$  และมุม  $\phi^i$  ดังรูป 3.6 เมื่อกำหนดให้พจน์การแปรผันตามเวลาของคลื่นเป็น  $\exp(-j\omega t)$  องค์ประกอบในแนวแกน  $z$  ของคลื่นตกกระทบ คลื่นกระเจิง และคลื่นภายใน (คลื่นที่ทะลุผ่านไปในทรงกระบอก) ของคลื่นในแบบแผน TM จะแสดงได้ด้วยสมการตามลำดับดังนี้ (Balanis, 1989; Chew, 1995)

$$E_z^i = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_o \sin \theta^i e^{jk_z z} j^m J_m(k_{r_2} r) e^{jm(\phi - \phi^i)} \quad (3.17)$$

$$E_z^s = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m e^{jk_z z} j^m H_m^{(1)}(k_{r_2} r) e^{jm(\phi - \phi^i)} \quad (3.18)$$

$$E_z^e = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m e^{jk_z z} j^m J_m(k_{r_1} r) e^{jm(\phi - \phi^i)} \quad (3.19)$$

โดยที่  $E_o$  คือแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ

$k_z$  และ  $k_{r_i}$  คือองค์ประกอบในแนวแกน  $z$  และในแนวที่ตั้งฉากกับ  $z$  ของเวกเตอร์ค่าคงตัวการแพร่กระจาย  $\vec{k}$  โดยที่ดัชนี "i" ของ  $k_{r_i}$  แสดงลำดับที่ของบริเวณที่พิจารณา ดังรูป 3.8

$J_m(k_{r_i} r)$  และ  $H_m^{(1)}(k_{r_i} r)$  เป็นฟังก์ชันเบสเซลอันดับ  $m$  และฟังก์ชันแองเกลชันนิตที่ 1 อันดับ  $m$  ตามลำดับ

และ  $R_m$  และ  $T_m$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแบบแผนที่  $m$  ตามลำดับ

สำหรับกรณีคลื่นในแบบแผน TE องค์ประกอบในแนวแกน  $z$  มีแต่สนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการในลักษณะเดียวกับสมการ (3.17) – (3.19) เมื่อพิจารณาคลื่นทั้ง 2 แบบแผนพร้อมกัน องค์ประกอบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับแกน  $z$  จะหาได้จากสมการตามลำดับต่อไปนี้

$$H_t = \frac{1}{k^2 - k_z^2} [j\omega\varepsilon(\hat{z} \times \nabla_t E_z) + jk_z \nabla_t H_z] \quad (3.20)$$

$$E_t = \frac{1}{k^2 - k_z^2} [jk_z \nabla_t E_z - j\omega\mu(\hat{z} \times \nabla_t H_z)] \quad (3.21)$$

โดยที่ ดัชนี “t” แทนความหมายว่าเป็นองค์ประกอบในแนวตั้งฉาก (transverse)

$\omega$ ,  $\varepsilon$  และ  $\mu$  คือ ความถี่เชิงมุม สภาพยอม และความซึมซาบได้ตามลำดับ

$$\text{และ } \nabla_t = \hat{r} \frac{\partial}{\partial r} + \hat{\phi} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi}$$

จากสมการ (3.20) และ (3.21) เห็นได้ว่าจะเกิดการเชื่อมโยง (coupling) กันระหว่าง คลื่น TM และคลื่น TE ยกเว้นในกรณีที่คลื่นตกกระทบในแนวตั้งฉากกับทรงกระบอก ( $\theta' = 90^\circ$ ) เนื่องจากความเป็นทวิภาวะ (duality) การแสดงสมการของทั้งคลื่น TM และคลื่น TE จึงสามารถทำได้พร้อมกันในรูปแบบสมการเมทริกซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นในแต่ละแบบแผนก็จะอยู่ในรูปเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านตามลำดับ

เงื่อนไขขอบเขตของสนามในแนว  $z$  และในแนว  $\phi$  ในรูปสมการเมทริกซ์ก็จะสามารถแสดงได้ดังสมการตามลำดับต่อไปนี้

$$\left[ J_m(k_{r_2} r_b) \mathbf{I} + H_m^{(1)}(k_{r_2} r_b) \mathbf{R}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 = \left[ J_m(k_{r_1} r_b) \mathbf{T}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 \quad (3.22)$$

$$\left[ \mathbf{J}'_m(k_{r_2} r_b) + \mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r_2} r_b) \mathbf{R}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 = \left[ \mathbf{J}'_m(k_{r_1} r_b) \mathbf{T}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 \quad (3.23)$$

โดยที่  $\mathbf{A}_2$  คือแอมพลิจูดของคลื่นในบริเวณที่ 2

$\mathbf{I}$  คือเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด  $2 \times 2$

$\mathbf{R}_{m21}$  และ  $\mathbf{T}_{m21}$  คือเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านตามลำดับ

และ  $\mathbf{J}'_m(k_{r_i} r)$  มีนิยามดังนี้

$$\mathbf{J}'_m(k_{r_i} r) = \frac{1}{k_{r_i}^2} \begin{bmatrix} j\omega\varepsilon_i k_{r_i} J'_m(k_{r_i} r) & -\frac{mk_z}{r} J_m(k_{r_i} r) \\ -\frac{mk_z}{r} J_m(k_{r_i} r) & -j\omega\mu_i k_{r_i} J'_m(k_{r_i} r) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

โดยที่  $J'_m(k_{r_i}r)$  คืออนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซลที่เทียบกับอาร์กิวเมนต์ของฟังก์ชัน สำหรับ  $\mathbf{H}_m^{(1)}(k_{r_i}r)$  ก็จะสามารถนิยามได้ในลักษณะเดียวกับ  $\mathbf{J}'_m(k_{r_i}r)$

โดยการจัดรูปสมการ (3.22) และ (3.23) เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพจน์ในกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าทรงกระบอกจะแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_{m21} = \mathbf{D}^{-1} [J_m(k_{r_1}r_b)\mathbf{J}'_m(k_{r_2}r_b) - J_m(k_{r_2}r_b)\mathbf{J}'_m(k_{r_1}r_b)] \quad (3.25)$$

$$\mathbf{T}_{m21} = \mathbf{D}^{-1} \left[ H_m^{(1)}(k_{r_2}r_b)\mathbf{J}'_m(k_{r_2}r_b) - J_m(k_{r_2}r_b)\mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r_2}r_b) \right] \quad (3.26)$$

โดยที่

$$\mathbf{D} = \left[ H_m^{(1)}(k_{r_2}r_b)\mathbf{J}'_m(k_{r_1}r_b) - J_m(k_{r_1}r_b)\mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r_2}r_b) \right] \quad (3.27)$$

สำหรับกรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพจน์ เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของกรณีดังกล่าวมีค่าดังสมการ

$$\mathbf{R}_{m12} = \mathbf{D}^{-1} \left[ H_m^{(1)}(k_{r_1}r_b)\mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r_2}r_b) - H_m^{(1)}(k_{r_2}r_b)\mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r_1}r_b) \right] \quad (3.28)$$

$$\mathbf{T}_{m12} = \mathbf{D}^{-1} \left[ H_m^{(1)}(k_{r_1}r_b)\mathbf{J}'_m(k_{r_1}r_b) - J_m(k_{r_1}r_b)\mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r_1}r_b) \right] \quad (3.29)$$

เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพจน์ทั้งในกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอกและกรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกจะนำไปใช้ในกระบวนการวนซ้ำเพื่อหาเมทริกซ์การสะท้อนของทรงกระบอกเป็นชั้นๆ ในหัวข้อย่อยถัดไป

### 3.2.4 เมทริกซ์การสะท้อนของทรงกระบอกเป็นชั้นๆ

การวิเคราะห์หาผลเฉลยหรือลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายผ่านทรงกระบอกเป็นชั้นๆ จะกระทำในกรณีเดียวคือ การวิเคราะห์หาเมทริกซ์การสะท้อนในกรณีคลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอก เนื่องจากเป็นกรณีเดียวกับการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกชั้นตอนในการวิเคราะห์มีดังนี้

ในขั้นแรก พิจารณากรณีที่มีทรงกระบอกแบ่งเป็น 2 ชั้น บริเวณที่มีคลื่นวิทยุจะมี 3 บริเวณ ดังรูป 3.5 แอมพลิจูดของคลื่นที่เดินทางเข้าของบริเวณที่ 2 ( $A_2$ ) จะเท่ากับผลรวมของคลื่นที่ส่งผ่านมาจากคลื่นที่เดินทางเข้าของบริเวณที่ 3 ( $T_{m32}A_3$ ) กับคลื่นสะท้อนของคลื่นที่เดินทางออกของบริเวณที่ 2 ( $R_{m23}R_{m21}A_2$ ) ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$A_2 = T_{m32}A_3 + R_{m23}R_{m21}A_2 \quad (3.30)$$

หรือ

$$A_2 = [I - R_{m23}R_{m21}]^{-1}T_{m32}A_3 \quad (3.31)$$

พิจารณาบริเวณที่ 3 ซึ่งเป็นบริเวณภายนอกทรงกระบอก คลื่นสะท้อนทั้งหมดหรือคลื่นที่เดินทางออกจากทรงกระบอกจะมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างคลื่นส่งผ่านของคลื่นที่เดินทางออกของบริเวณที่ 2 และคลื่นสะท้อนของคลื่นตกกระทบหรือคลื่นสะท้อนของคลื่นที่เดินทางเข้าของบริเวณที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$R_{m32}^{to}A_3 = R_{m32}A_3 + T_{m23}R_{m21}A_2 \quad (3.32)$$

โดยที่ ดัชนีบน "to" ของเมทริกซ์การสะท้อนเป็นตัวบ่งชี้ว่าเมทริกซ์การสะท้อนนั้นเป็นเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมด

เมื่อแทนค่า  $A_2$  จากสมการ (3.31) ลงในสมการ (3.32) แล้วจัดรูปใหม่ เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดซึ่งแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากทรงกระบอก 2 ชั้นจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R_{m32}^{to} = R_{m32} + T_{m23}R_{m21}[I - R_{m23}R_{m21}]^{-1}T_{m32} \quad (3.33)$$

ถ้าหากเพิ่มชั้นของทรงกระบอกอีก 1 ชั้นระหว่างบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 คลื่นที่เดินทางออกของบริเวณที่ 2 จะต้องเปลี่ยนเป็นคลื่นที่เดินทางออกทั้งหมดของบริเวณที่ 2 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า  $R_{m21}$  จะต้องเปลี่ยนเป็น  $R_{m21}^{to}$  ในกรณีที่เพิ่มจำนวนชั้นของทรงกระบอกไป

เป็น  $n-1$  ชั้น หรือ  $n$  บริเวณ เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่  $i$  ก็จะสามารถเขียนได้ในลักษณะเดียวกับสมการ (3.33) ดังนี้

$$\mathbf{R}_{m(i,i-1)}^{to} = \mathbf{R}_{m(i,i-1)} + \mathbf{T}_{m(i-1,i)} \mathbf{R}_{m(i-1,i-2)}^{to} [\mathbf{I} - \mathbf{R}_{m(i-1,i)} \mathbf{R}_{m(i-1,i-2)}^{to}]^{-1} \mathbf{T}_{m(i,i-1)} \quad (3.34)$$

ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากทรงกระบอก  $n-1$  ชั้นนั้นแสดงในรูปเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่  $n$  ซึ่งเมทริกซ์ดังกล่าวสามารถหาได้โดยเริ่มจากทรงกระบอกชั้นในสุดหรือบริเวณที่ 1 เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณนี้มีค่าเป็น  $\mathbf{0}$  ( $\mathbf{R}_{m10}^{to} = \mathbf{0}$ ) และใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (3.34) วนซ้ำหาเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่อยู่ถัดออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งได้เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่  $n$  ตามต้องการ

### 3.2.5 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของรอยทางเดินของดาวตก

ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยจำลองรอยทางเดินเป็นทรงกระบอกหลายชั้น เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณนอกสุดเป็นเมทริกซ์เดียวที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการแสดงสมการต่อไป ที่มีเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณนอกสุดเป็นส่วนประกอบ จะละเลขดัชนีที่บ่งบอกบริเวณไว้ เมทริกซ์การสะท้อนดังกล่าวจึงสามารถเขียนในรูปที่แสดงสมาชิกทั้ง 4 ตัวได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} R_m^{11} & R_m^{12} \\ R_m^{21} & R_m^{22} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

ดังนั้นองค์ประกอบในแนวแกน  $z$  ของสนามไฟฟ้ากระเจิงและสนามแม่เหล็กกระเจิงในแบบแผนที่  $m$  จึงสามารถแสดงได้ดังนี้



$$E_{zm}^s = j^m e^{jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^i)} H_m^{(1)}(k_r r) R_m^E \quad (3.36)$$

$$H_{zm}^s = j^m e^{jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^i)} H_m^{(1)}(k_r r) R_m^H \quad (3.37)$$

โดยที่  $R_m^E$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $z$  และ  $R_m^H$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนขององค์ประกอบสนามเหล็กในแนวแกน  $z$  ทั้ง  $R_m^E$  และ  $R_m^H$  มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$R_m^E = R_m^{11} E_o \sin \theta^i + R_m^{12} H_o \sin \theta^i \quad (3.38)$$

$$R_m^H = R_m^{21} E_o \sin \theta^i + R_m^{22} H_o \sin \theta^i \quad (3.39)$$

โดยที่  $E_o$  และ  $H_o$  คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบและสนามแม่เหล็กตกกระทบตามลำดับ

และ  $\theta^i$  คือมุมตกกระทบซึ่งนิยามตามรูป 3.6

สำหรับองค์ประกอบในแนว  $r$  และ  $\phi$  ของทั้งสนามไฟฟ้ากระเจิงและสนามแม่เหล็กกระเจิงก็จะสามารถหาได้โดยอาศัยสมการ (3.20) และ (3.21)

ในการหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นวิทยุของรอยทางเดินของดาวตกจะใช้เพียงองค์ประกอบทั้งสามองค์ประกอบ ( $E_r^s$ ,  $E_\phi^s$  และ  $E_z^s$ ) ของสนามไฟฟ้ากระเจิงเท่านั้น เนื่องจากระยะทางจากรอยทางเดินของดาวตกกลับมาถึงสายอากาศรับหรือจุดสังเกตมีค่ามาก องค์ประกอบของสนามไฟฟ้ากระเจิงในแนว  $r$  และ  $\phi$  ในรูปของสนามไฟฟ้ากระเจิงและสนามแม่เหล็กกระเจิงในแนว  $z$  จะประมาณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_r^s = -\frac{\cos \theta^i}{\sin \theta^i} E_z^s \quad (3.40)$$

$$E_\phi^s = \frac{1}{c \varepsilon_o \sin \theta^i} H_z^s \quad (3.41)$$

โดยที่  $c$  คือความเร็วของแสง

และ  $\varepsilon_o$  คือสภาพยอมของอวกาศว่าง

นิยามสัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสนามกระเจิงและสนามตกกระทบเป็นดังสมการต่อไปนี้ (Poulter and Baggaley, 1977)

$$g = \sqrt{\frac{\pi k_r r}{2}} \left| \frac{E^s}{E^i} \right| \quad (3.42)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจะแสดงได้ในรูปองค์ประกอบทั้ง 4 องค์ประกอบของเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณภายนอกรอยทางเดิน โดยการจัดรูปสมการ (3.42) ใหม่โดยอาศัยสมการ (3.35) – (3.41) ดังนี้

$$g = \left\{ \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{jm(\phi-\phi')} \left( R_m^{11} \cos \chi + \frac{R_m^{12}}{\eta_0} \sin \chi \right) \right]^2 + \eta_0^2 \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{jm(\phi-\phi')} \left( R_m^{21} \cos \chi + \frac{R_m^{22}}{\eta_0} \sin \chi \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.43)$$

โดยที่  $\eta_0$  คืออิมพีแดนซ์ของอวกาศว่าง

และ  $\chi$  คือมุมระหว่างเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบและรอยตัดระหว่างระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ที่ชี้ทิศการแพร่กระจายกับแกนของรอยทางเดิน และระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบและสนามแม่เหล็กตกกระทบ

ในกรณีที่มุม  $\chi$  เท่ากับ  $0^\circ$  คลื่นที่ตกกระทบก็จะเป็นคลื่นในแบบแผน TM เท่านั้น เรขาคณิตของการกระเจิงจะแสดงได้ดังรูป 3.7 ส่วนในกรณีที่มุม  $\chi$  เท่ากับ  $90^\circ$  คลื่นที่ตกกระทบก็จะเป็นคลื่นในแบบแผน TE

แม้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะสามารถแสดงในรูปทั่วไปได้ดังสมการ (3.43) แต่ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในหัวข้อถัดไปจะแยกวิเคราะห์เป็นกรณีคลื่นตกกระทบเป็นคลื่น TM และคลื่น TE โดยจะแปรค่าปัจจัย 3 ประการคือ ความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เส้นของรอยทางเดิน ( $q$ ) มุมกระเจิง ( $\phi'$ ) และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน ( $\beta$ ) ผลการวิเคราะห์โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนี้จะแสดง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาด้วย

### 3.3 ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตรอยเดียว

ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตรอยเดียวที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้จะแสดงในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (3.43) โดยกำหนดให้คลื่นตกกระทบเป็นคลื่นในแบบแผน TM และแบบแผน TE เท่านั้นเนื่องจากคลื่นที่มีโพลาไรเซชันอื่นๆ (สนามไฟฟ้าทำมุมใดๆ กับแกนของรอยทางเดินของดาวตก) จะสามารถวิเคราะห์ที่ได้โดยแยกองค์ประกอบของคลื่นดังกล่าวให้เป็นคลื่นในแบบแผน TM และแบบแผน TE ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามสมการ (3.43) นำเสนอในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับ  $(ka)^2$  โดยที่  $a^2$  มีค่าเป็นสัดส่วนตรงกับเวลาตามที่นิยามในหน้า 36 ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับ  $(ka)^2$  จึงมีค่าเสมือนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับเวลา ซึ่งสามารถแปลงเป็นผลตอบทางเวลาของสัญญาณรับ (ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงที่เวลาใดๆ) ได้ ถ้ากำหนดความถี่และสัมประสิทธิ์การแพร่ให้แก่ปริมาณ  $(ka)^2$  การแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับ  $(ka)^2$  นอกเหนือจากจะแสดงให้เห็นลักษณะของสัญญาณรับหรือ การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณตามเวลาแล้ว ยังจะสามารถหาค่าความยาวนานของสัญญาณรับได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความยาวนานของสัญญาณรับจะพิจารณาแยกต่างหากจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณตามเวลา

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะพิจารณาที่ผลของการแปรค่าปัจจัย 3 ประการ ได้แก่ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ( $q$ ) มุมกระเจิง ( $\phi'$ ) และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน ( $\beta$ ) โดยที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่จะใช้วิเคราะห์จะมีค่าระหว่าง  $10^{13}$  ถึง  $10^{16}$  e/m ซึ่งเป็นค่าในย่านการเปลี่ยนผ่านจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำไปเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ผลการวิเคราะห์โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์ เชิงคลื่นเต็มรูปแบบทั้งในส่วนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณรับตามเวลาและการวิเคราะห์ความยาวนานของสัญญาณจะแสดงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ผลการวิเคราะห์ทั้งสองส่วนจะแยกกล่าวในแต่ละหัวข้อดังนี้

### 3.3.1 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณรับตามเวลา

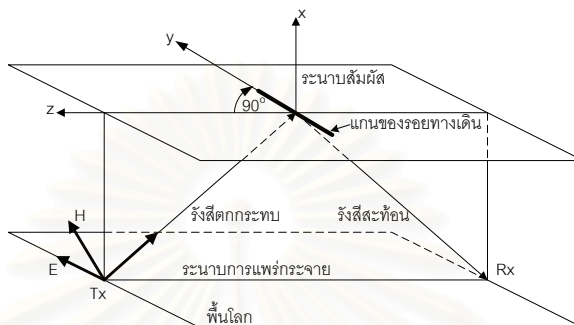
การแสดงลักษณะของสัญญาณรับตามเวลาจะแสดงโดยให้เวลาในรูปของ  $(ka)^2$  มีค่าอย่างต่ำเท่ากับ 16 เมื่อกำหนดให้รัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินมีค่าเป็นศูนย์ สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ  $6 \text{ m}^2/\text{s}$  สำหรับชายเชื่อมโยงที่ใช้ความถี่ประมาณ 50 เมกะเฮิรตซ์ ค่า  $(ka)^2$  เท่ากับ 16 ดังกล่าวจะเทียบเท่ากับเวลาจริงประมาณหลายร้อยมิลลิวินาที ซึ่งเป็นขนาดของความยาวนานปกติของรอยทางเดิน

ลักษณะของสัญญาณรับตามเวลาที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ตามการแปรค่าปัจจัยทั้ง 3 ประการดังนี้ ในส่วนแรกจะวิเคราะห์ถึงผลของการแปรค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ( $q$ ) ซึ่งจะนำเสนอทั้งกรณีเรดาร์และกรณีการกระเจิงไปข้างหน้า โดยในกรณีการกระเจิงไปข้างหน้าจะกำหนดให้มุม  $\phi'$  มีค่าเท่ากับ  $64^\circ$  และมุม  $\beta$  เท่ากับ  $90^\circ$  และ  $0^\circ$  เมื่อคลื่นตกกระทบเป็นคลื่น TM และคลื่น TE ตามลำดับ สำหรับส่วนที่ 2 จะวิเคราะห์ผลของการแปรค่ามุมกระเจิง ( $\phi'$ ) โดยค่ามุมกระเจิงจะแสดงในรูประยะทางการแพร่กระจายเมื่อกำหนดให้ตำแหน่งกระเจิงเกิดขึ้นในบริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ความสูงเหนือพื้นโลกประมาณ 95 กิโลเมตร และในที่สุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผลของการแปรค่าแนวการวางตัวของรอยทางเดิน ( $\beta$ ) ซึ่งก็จะกำหนดให้มุม  $\phi'$  มีค่าเท่ากับ  $64^\circ$  อีกเช่นกัน รายละเอียดของการวิเคราะห์ทั้งสามส่วนมีดังนี้

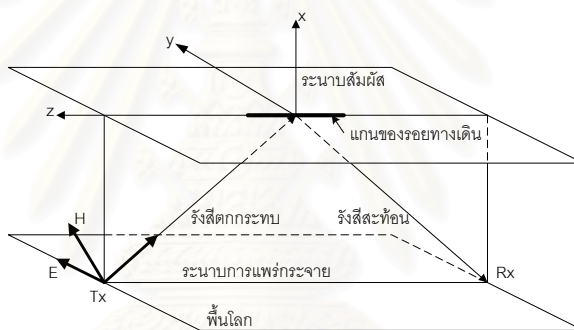
#### ก. ผลของการแปรค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น

ผลของการแปรค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นจะนำเสนอทั้งในกรณีเรดาร์และกรณีการกระเจิงไปข้างหน้า สำหรับกรณีเรดาร์ ผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จะแสดงเปรียบเทียบกับทั้งผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบที่มีผู้วิเคราะห์ไว้แล้ว และผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ขณะที่ในกรณีการกระเจิงไปข้างหน้าจะเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองเท่านั้น เนื่องจากไม่มีผลที่วิเคราะห์โดยกรรมวิธีอื่นให้เปรียบเทียบ ในกรณีการกระเจิงไปข้างหน้านี้ จะกำหนดให้มุม  $\phi'$  มีค่าเท่ากับ  $64^\circ$  ซึ่งถ้าหากในสถานการณ์จริงตำแหน่งกระเจิงเกิดขึ้นในบริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับที่ความสูงเหนือพื้นโลกประมาณ 95 กิโลเมตร ระยะทางตามแนวพื้นราบที่ทำให้มุม  $\phi'$  มีค่าดังกล่าวจะมีค่าประมาณ 400 กิโลเมตร ขณะที่มุม  $\beta$  จะกำหนดให้เป็น  $90^\circ$  สำหรับคลื่น TM และเป็น  $0^\circ$  สำหรับคลื่น TE โดยที่

โพลาไรเซชันของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นแนวระดับ ดังรูป 3.9 ก. และ 3.9 ข. ตามลำดับ การกำหนดในลักษณะเช่นนี้ ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงผลของการสูญเสียเนื่องจากการไม่เข้าคู่ของโพลาไรเซชันของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ( $\alpha = 90^\circ$ ) ผลการวิเคราะห์กรณีเรดาร์และกรณีการกระเจิงไปข้างหน้าแสดง ดังรูป 3.10 และรูป 3.11 ตามลำดับดังนี้



ก. คลื่น **TM** ตกกระทบรอยทางเดินที่ตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย



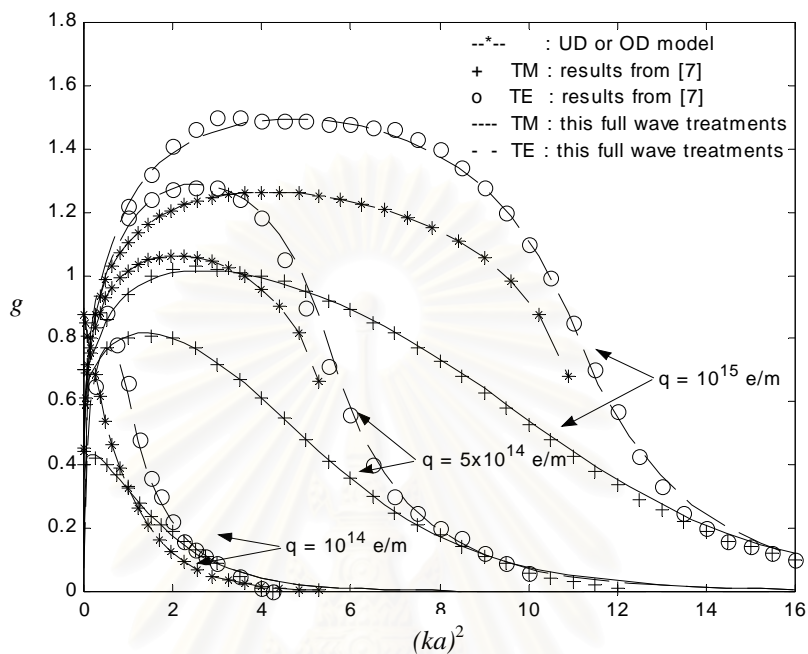
ข. คลื่น **TE** ตกกระทบรอยทางเดินที่ขนานกับระนาบการแพร่กระจาย

รูป 3.9 เราคาดคะเนของการกระเจิงไปข้างหน้ากรณีโพลาไรเซชันเป็นแนวระดับ

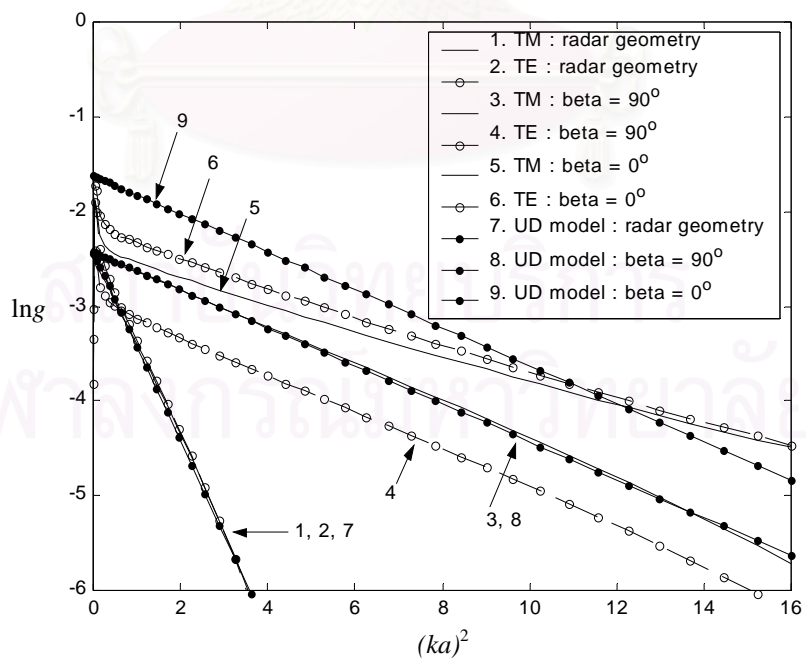
ในกรณีเรดาร์ ผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดย Poulter and Baggaley (1978) มาก ผลการวิเคราะห์ทั้งสองแสดงให้เห็นว่า คลื่นในแบบแผน **TM** และแบบแผน **TE** ที่ตก-กระทบรอยทางเดินจะให้ลักษณะสมบัติการกระเจิงสัญญาณที่ต่างกัน ลักษณะดังกล่าวนี้จะไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง (ผลการวิเคราะห์ด้วยการใช้แบบจำลองในรูป 3.10 กรณีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ  $10^{14}$  e/m ใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ส่วนกรณีที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ  $5 \times 10^{14}$  และ  $10^{15}$  e/m ใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง) ลักษณะความแตกต่างระหว่างกรณีคลื่น



TM และคลื่น TE เป็นผลจากการเกิดเรโซแนนซ์ในกรณีคลื่น TE ทำให้แอมพลิจูดของคลื่น กระเจิงสูงกว่ากรณีคลื่น TM

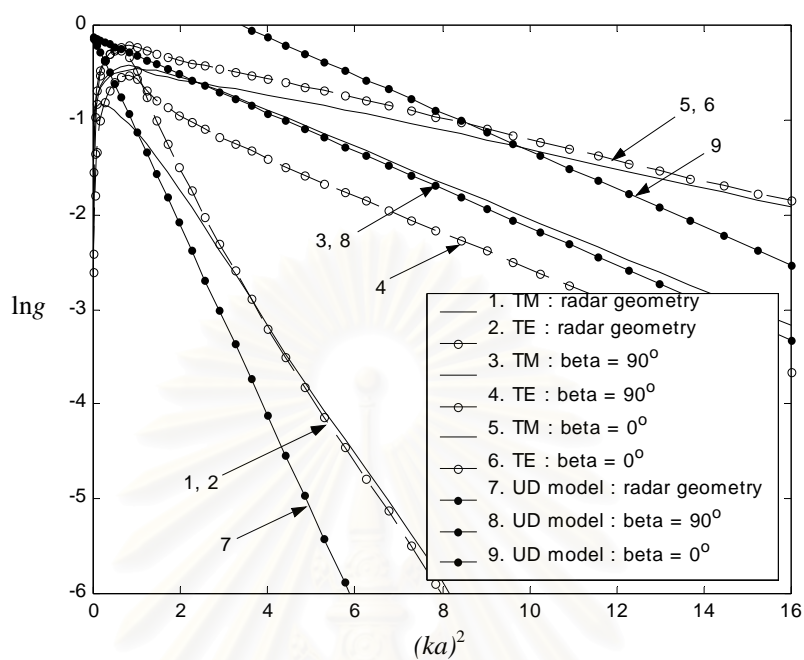


รูป 3.10 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีเรดาร์

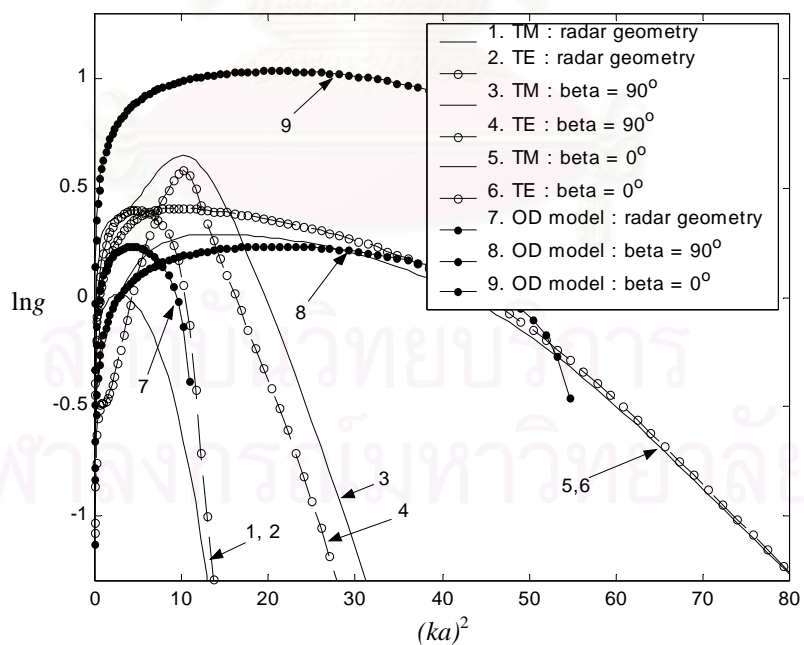


ก. ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น  $q = 10^{13}$  e/m

รูป 3.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีการกระเจิงไปข้างหน้า ( $\phi' = 64^\circ$ )



ข. ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น  $q = 10^{14}$  e/m



ค. ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น  $q = 10^{15}$  e/m

รูป 3.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีการกระเจิงไปข้างหน้า ( $\phi' = 64^\circ$ )

ผลการวิเคราะห์กรณีการกระเจิงไปข้างหน้าดังรูป 3.11 แบ่งเป็นกรณีตามค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์กรณีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ  $10^{13}$  e/m และ  $10^{14}$  e/m (รูป 3.11 ก. และ 3.11 ข.) ใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ส่วนผลการวิเคราะห์กรณีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเท่ากับ  $10^{15}$  e/m (รูป 3.11 ค.) ใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง แกนตั้งของรูปทั้ง 3 รูป แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนในรูป  $\ln g$  แทนค่า  $g$  โดยตรงเพื่อเน้นลักษณะการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลของสัญญาณกระเจิงในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเมื่อแสดงในรูป  $\ln g$  จะเห็นเป็นเส้นตรง โดยเฉพาะเมื่อเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ ความชันของเส้นตรงดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ  $-1$  ผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินทั้งสองแบบแสดงให้เห็นว่าเรขาคณิตแบบการกระเจิงไปข้างหน้าทำให้สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีความยาวนานเพิ่มขึ้นเท่ากันไม่ว่ารอยทางเดินของดาวตกจะวางตัวเช่นไรซึ่งสังเกตได้จาก สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ขนานกันไม่ว่ามุม  $\beta$  จะเป็นเท่าไร โดยอัตราการเพิ่มความยาวนานจะมีค่าเท่ากับ  $\sec^2 \phi'$  สำหรับแนวการวางตัวของรอยทางเดินจะมีผลต่อแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นกระเจิงซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทั้งสามรูปแสดงให้เห็นว่า กรณีที่รอยทางเดินวางตัวขนานกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta=0^\circ$ ) แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นกระเจิงจะมีค่ามากที่สุดและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อค่า  $\beta$  มากขึ้น จนกระทั่งแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นกระเจิงมีค่าน้อยที่สุดเมื่อรอยทางเดิน วางตัวตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta=90^\circ$ ) ซึ่งจะเท่ากับกรณีที่เรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ด้วย

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างกรณีการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองกับการวิเคราะห์ด้วยกรณีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบพบว่า ในกรณีที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเท่ากับ  $10^{13}$  e/m (รูป 3.11 ก.) ซึ่งจัดอยู่ในจำพวกรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ การวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากในกรณีที่การกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ โดยเฉพาะผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองความหนาแน่นต่ำและผลการวิเคราะห์คลื่น TM สำหรับผลการวิเคราะห์คลื่น TE มีความแตกต่างในช่วงแรกของการกระเจิง กล่าวคือแอมพลิจูดจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของเรโซแนนซ์ สำหรับกรณีการกระเจิงไปข้างหน้าเมื่อรอยทางเดินวางตัวตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองยังคงใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์คลื่น TM อยู่มาก ขณะที่คลื่น TE มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียเนื่องจากการไม่เข้าสู่ของโพลาริเซชัน ( $\alpha \neq 90^\circ$ ) ผลของการสูญเสียเนื่องจากการไม่เข้าสู่ของโพลาริเซชันนี้จะปรากฏในกรณีที่รอยทางเดินวางตัวขนานกับระนาบการแพร่กระจาย

ด้วยเช่นกันซึ่งสังเกตได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีคลื่น **TM** มีค่าน้อยกว่ากรณีคลื่น **TE** ความสูญเสียเนื่องจากการไม่เข้าสู่ของโพลาริเซชันเป็นผลเนื่องจากเรขาคณิตของการกระเจิง ดังนั้นจึงปรากฏผล ดังกล่าวไม่ว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นจะเป็นเท่าไร ซึ่งสังเกตได้จากกรณีที่รอยทางเดินวางตัวตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta=90^\circ$ ) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีคลื่น **TM** จะมากกว่ากรณีคลื่น **TE** (รูป 3.11 ก. - ค. เส้น 3 สูงกว่า เส้น 4) ขณะที่กรณีรอยทางเดินวางตัวขนานกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta=0^\circ$ ) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีคลื่น **TE** จะมากกว่ากรณีคลื่น **TM** (รูป 3.11 ก. - ค. เส้น 6 สูงกว่า เส้น 5) จุดที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งสำหรับกรณีรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ (รูป 3.11 ก.) คือผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองจะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบกรณี **TM** ที่เรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์และแบบการกระเจิงไปข้างหน้า โดยที่ รอยทางเดินวางตัวตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจายเท่านั้น เนื่องจากเรขาคณิตทั้ง 2 แบบดังกล่าว คลื่นตกกระทบรอยทางเดินในลักษณะที่รังสีตกกระทบตั้งฉากกับแกนของรอยทางเดิน ซึ่งส่งผลให้ไม่เกิดเรโซแนนซ์ในกรณีคลื่น **TM** ขณะที่การ-การกระเจิงไปข้างหน้าโดยที่ รอยทางเดินวางตัวทำมุมใดๆ กับระนาบการแพร่กระจาย คลื่นจะตก-กระทบไม่ตั้งฉากกับแกนของรอยทางเดิน ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์จะปรากฏในกรณีคลื่น **TM** ด้วย นอกจากนี้จะพบว่าการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ ความยาวนานของสัญญาณกรณีที่รอยทางเดินวางตัวขนานกับระนาบการแพร่กระจายจะมากกว่ากรณีที่รอยทาง-เดินวางตัวตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย (ความชันของเส้น 5 และ 6 น้อยกว่าความชันของเส้น 3 และ 4) ซึ่งต่างกับการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองที่ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินจะมีค่าเท่ากันไม่ว่ารอยทางเดินจะวางตัวในลักษณะเช่นไร ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเพิ่มขึ้นพบว่าการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลอง รอยทางเดินความหนาแน่นต่ำจะให้ผลไม่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบดังรูป 3.11 ข. ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์กรณีที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเท่ากับ  $10^{14}$  e/m ผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการกระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงในช่วงแรกก่อนที่สัญญาณจะลดแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงถัดมา อย่างไรก็ตามอัตราการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะไม่เท่ากับที่วิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ โดยเฉพาะในกรณีเรดาร์ที่ความชันของเส้น  $\ln g$  จะไม่เท่ากับ  $-1$  เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเพิ่มขึ้นเป็น  $10^{15}$  e/m การ-วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองให้ผลไม่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่น

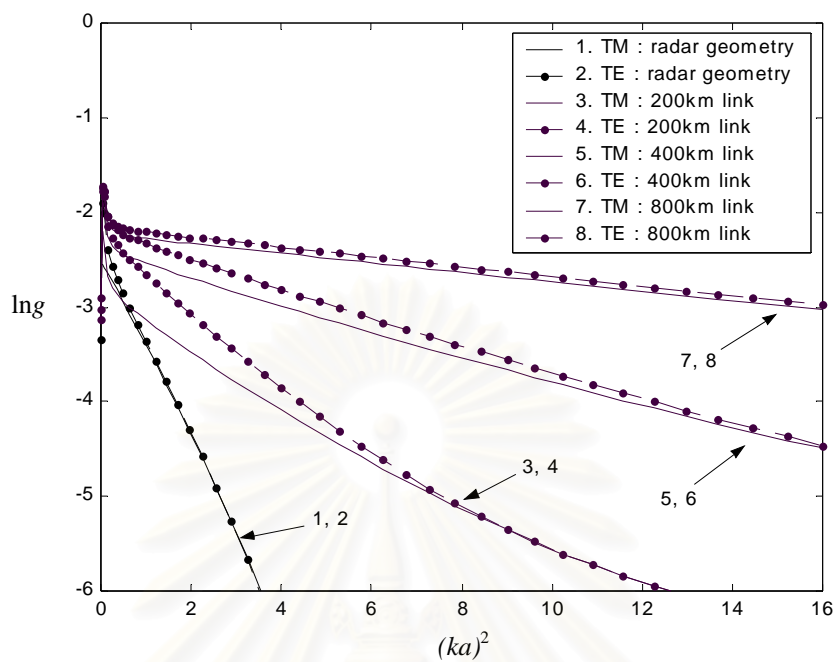
เต็ม-รูปแบบไม่ว่าจะใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำหรือแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ผลเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบและการวิเคราะห์ด้วยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงแสดงดังรูป 3.11ค. สำหรับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำไม่ได้แสดงเปรียบเทียบไว้ ณ ที่นี้ เนื่องจากเริ่มปรากฏความแตกต่างกับผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบตั้งแต่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเท่ากับ  $10^{14}$  e/m แล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแตกต่างในเรื่องความชันของเส้น  $\ln g$  และความแตกต่างในช่วงเริ่มต้นของการกระเจิงซึ่งการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจะพบลักษณะการกระเจิงแบบรอยทางเดินความหนาแน่นสูงอยู่ด้วย

#### ข. ผลของการแปรค่ามุมกระเจิง

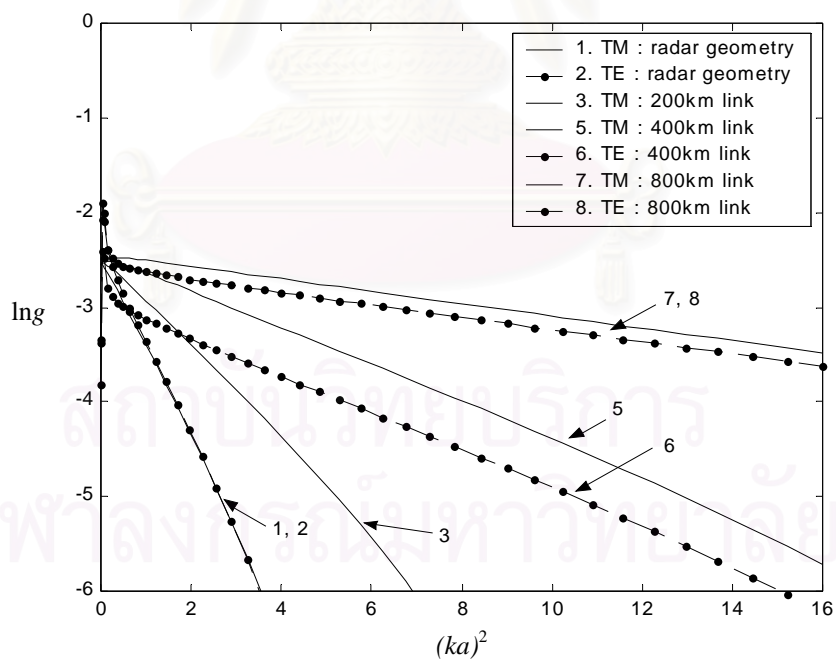
มุมกระเจิงหรือมุมระหว่างรังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนขึ้นอยู่กักระยะสื่อสารหรือระยะระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ กับตำแหน่งกระเจิงสัญญาณ ถ้าหากสมมติว่าตำแหน่งกระเจิงเกิดขึ้น ณ บริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ระดับความสูงเหนือพื้นโลกคงที่ค่าหนึ่ง ค่ามุมกระเจิงก็จะขึ้นอยู่กักระยะสื่อสารแต่เพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์ผลของมุมกระเจิงที่มีต่อลักษณะสมบัติของสัญญาณรับที่จะกล่าวถึงจะอาศัยข้อสมมตินี้ โดยกำหนดให้ตำแหน่งกระเจิงเกิดขึ้นที่ความสูง 95 กิโลเมตร ข้อสมมติดังกล่าวเป็นข้อสมมติที่สอดคล้องกับการทดลองรับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก เนื่องจากในการทดลองกำหนดให้แนวตั้งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับชี้ไปยังบริเวณดังกล่าว รายละเอียดของการทดลองจะกล่าวถึงในบทถัดไป การวิเคราะห์ผลของการแปรค่ามุมกระเจิงจะนำเสนอในรูปการแปรระยะสื่อสาร 4 ระยะคือ 0, 200, 400 และ 800 กิโลเมตร โดยระยะสื่อสาร 0 กิโลเมตรก็คือเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์นั่นเอง ผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น เท่ากับ  $10^{13}$  e/m แสดงแยกเป็นกรณีรอยทางเดินขนานกับระนาบการแพร่กระจายและตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจายดังรูป 3.12 ก. และรูป 3.12 ข. ตามลำดับ

จากรูป 3.12 ก. และ 3.12 ข. เห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อระยะสื่อสารเพิ่มมากขึ้น ( $\phi'$  มากขึ้น) ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินจะมากขึ้นด้วยแต่อัตราการเพิ่มขึ้นของความยาวนานไม่ได้เท่ากับ  $\sec^2 \phi'$  เหมือนในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง กรณีที่คลื่นตก-กระทบตั้งฉากกับรอยทางเดิน ( $\beta=90^\circ$ ) ไม่พบปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในคลื่น TM ดังรูป 3.12 ข. เหมือนดังเช่นกรณีเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ ขณะที่แนวการวางตัวของรอยทางเดินแนวอื่นๆ ( $\beta \neq 90^\circ$ ) จะพบปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ทั้งในคลื่น TM และคลื่น TE





ก. รอยทางเดินขนานกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta = 0^\circ$ )



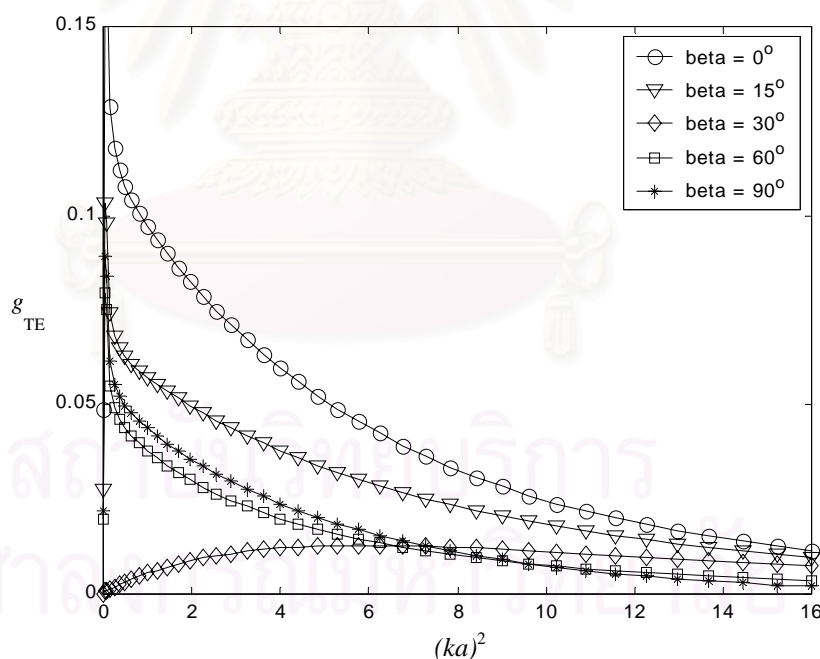
ข. รอยทางเดินตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta = 90^\circ$ )

รูป 3.12 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ระยะสี่เสาต่างๆ

สิ่งที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งในกรณี  $\beta=90^\circ$  คือ ที่ระยะสื่อสาร 200 กิโลเมตร คลื่นกระเจิงของคลื่น TE จะมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เพราะเรขาคณิตของการกระเจิงในลักษณะดังกล่าว จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากการไม่เข้าคู่ของโพลาริเซชันอย่างมาก ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Kietel (1955) ซึ่งแสดงจุดศูนย์ที่มุม  $90^\circ$  ในแผนภาพเชิงขั้วของสัมประสิทธิ์การสะท้อน เรขาคณิตของการกระเจิงในลักษณะอื่นอาจทำให้เกิดการหายไปของคลื่นกระเจิงเพราะการสูญเสียเนื่องจากการไม่เข้าคู่ของโพลาริเซชันได้เช่นกันซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณีแต่ละกรณีไป

#### ค. ผลของการแปรค่าแนวการวางตัวของรอยทางเดิน

การวิเคราะห์ผลของการแปรค่าแนวการวางตัวของรอยทางเดินจะนำเสนอในกรณีที่ระยะสื่อสารเท่ากับ 400 กิโลเมตร ( $\phi'=64^\circ$ ) โดยผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังรูป 3.13 เป็นผลการวิเคราะห์กรณีคลื่น TE ตกกระทบบรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเท่ากับ  $10^{13}$  e/m



รูป 3.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น TE ที่ตกกระทบบรอยทางเดินขนาด  $10^{13}$  e/m ที่แนวการวางตัวค่าต่างๆ สำหรับชายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสาร 400 กิโลเมตร

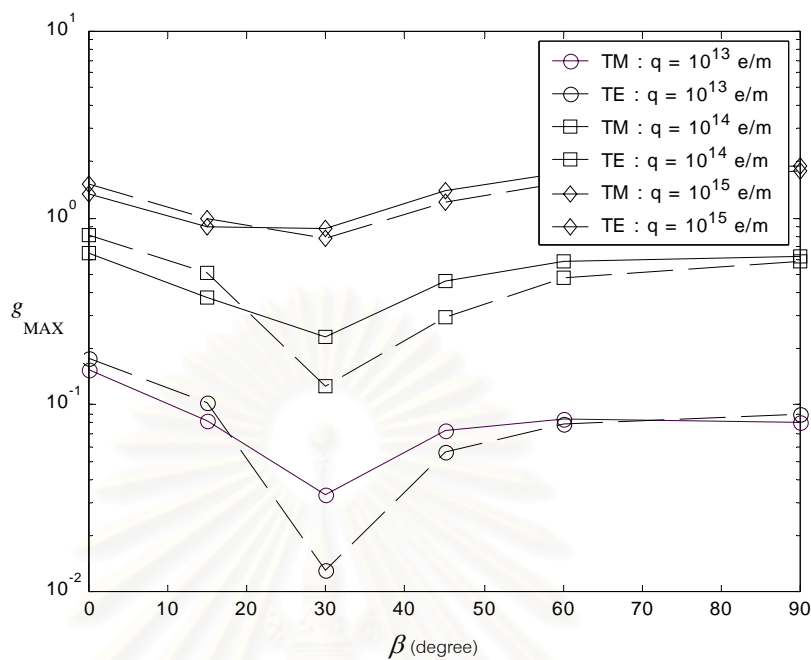
เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่ากรณีที่รอยทางเดินวางตัวขนานกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta=0^\circ$ ) สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่ามากที่สุด และเมื่อ  $\beta$  มีค่ามากขึ้น

สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่าลดลงจนน้อยที่สุดที่  $\beta=30^\circ$  หลังจากนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อ  $\beta$  มีค่ามากขึ้น ผลที่ได้นี้ขัดแย้งกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำซึ่งแสดงให้เห็นว่าคลื่นกระเจิงจะมีแอมพลิจูดลดลงเมื่อ  $\beta$  มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะระยะเฟสเนลแรกมีค่าลดลงเมื่อ  $\beta$  มีค่ามากขึ้นตามความสัมพันธ์ระหว่างระยะเฟสเนลแรก  $F$  และมุม  $\beta$  ดังนี้

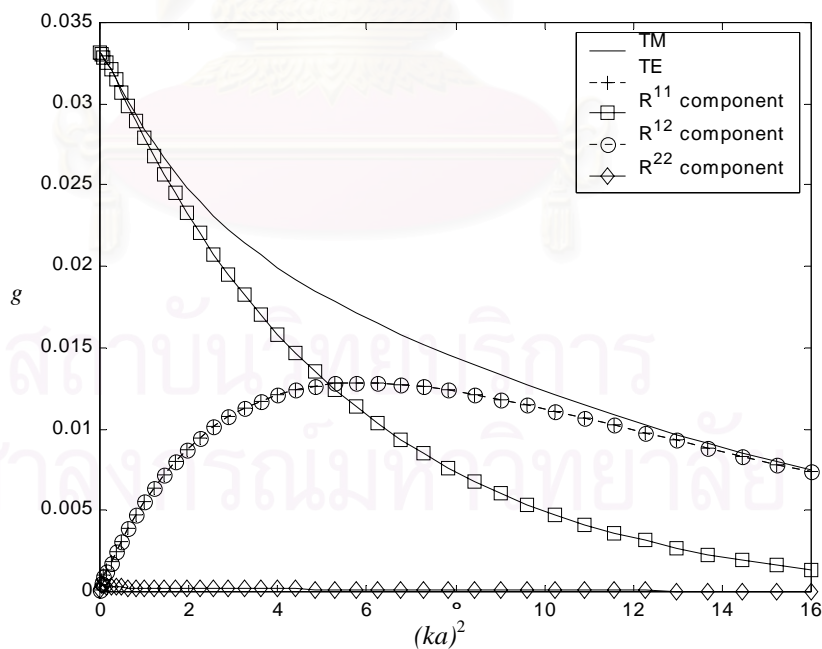
$$F = 2 \left[ \frac{\lambda R_T R_R}{(R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.44)$$

การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในกรณีคลื่น **TM** และกรณีความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นค่าอื่นๆ ให้ผลในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่าน้อยที่สุดที่  $\beta=30^\circ$  และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อ  $\beta$  มีค่าห่างจาก  $30^\circ$  มากขึ้น ดังรูป 3.14 ซึ่งแสดงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกขนาดและแนวการวางตัวต่างๆ กัน สำหรับ ข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสาร 400 กิโลเมตร การที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ  $\beta=30^\circ$  เป็นผลมาจากการสูญเสียเนื่องจากการไม่เข้าสู่ของโพลาริเซชัน เช่นเดียวกับกรณีการกระเจิงคลื่น **TE** ที่ระยะสื่อสาร 200 กิโลเมตร และ  $\beta=90^\circ$  ดังรูป 3.12 ข. (ในการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ การไม่เข้าสู่ของโพลาริเซชันเกิดขึ้นเมื่อมุมระหว่าง  $\phi^s$  และ  $\phi^i$  ซึ่งคำนวณมาจาก  $\phi'$  และ  $\beta$  มีค่าเข้าใกล้  $90^\circ$  ส่วนการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองการไม่เข้าสู่ของโพลาริเซชันแสดงด้วยมุม  $\alpha$  ที่มีค่าเข้าใกล้  $90^\circ$ ) อย่างไรก็ตามในกรณีที่ระยะสื่อสารเท่ากับ 400 กิโลเมตร และ  $\beta=30^\circ$  นี้คลื่น **TE** กระเจิงจะไม่หายไปหมดเหมือนกรณีการ-กระเจิงคลื่น **TE** ที่ระยะสื่อสารเท่ากับ 200 กิโลเมตร และ  $\beta=90^\circ$  ทั้งนี้เนื่องจากยังมีองค์ประกอบที่เป็นผลจากการเชื่อมโยง ( $R^{12}$  และ  $R^{21}$  ในสมการ (3.35)) อยู่ด้วยดังรูป 3.15 ซึ่งต่างจากกรณี  $\beta=90^\circ$  คลื่นจะตกกระทบตั้งฉากกับแกนของรอยทางเดิน ดังนั้นจึงไม่มีองค์ประกอบเนื่องจากการเชื่อมโยง

ความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $\phi^s$  และ  $\phi^i$  ที่ตำแหน่งกระเจิงอื่นจะแปรไปตามมุม  $\phi'$  และ  $\beta$  ซึ่งอาจทำให้ผลของการแปรค่า  $\beta$  ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะต่างไปจากกรณีที่วิเคราะห์ที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ  $\beta=30^\circ$  ทั้งนี้เพราะแนวการวางตัวของรอยทางเดินที่ทำให้เกิดการไม่เข้าสู่ของโพลาริเซชันที่เรขาคณิตนั้นๆ ต่างกับเรขาคณิตในกรณีที่วิเคราะห์นั่นเอง



รูป 3.14 สัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดเมื่อรอยทางเดินมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นและแนวการวางตัวต่างกัน สำหรับขั้วเชื่อมโยงที่มีระยะสี่สาร 400 กิโลเมตร



รูป 3.15 องค์ประกอบของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณีที่มีระยะสี่สารเท่ากับ 400 กิโลเมตร  $q = 10^{13}$  e/m และ  $\beta = 30^\circ$

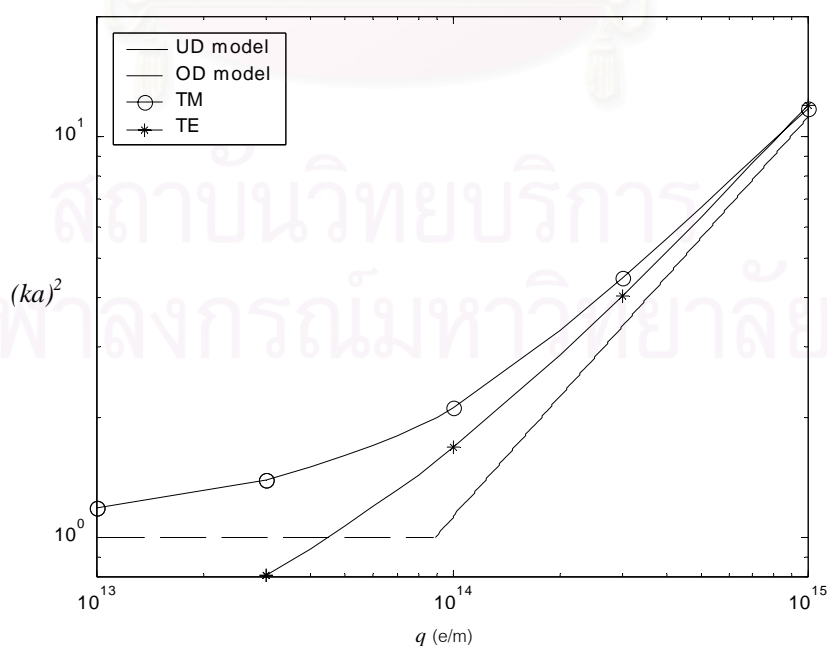
### 3.3.2 ความยาวนานของสัญญาณ

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับ  $(ka)^2$  ดังรูป 3.11 และรูป 3.12 แสดงให้เห็นว่าความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะมากขึ้นเมื่อระยะ สื่อสารหรือมุมกระเจิง  $\phi'$  มีค่ามากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่น-ต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง จะเห็นได้ว่าความยาวนานของคลื่นกระเจิงจะแปรตามค่ามุม  $\phi'$  เพียงอย่างเดียว โดยความยาวนานของคลื่นกระเจิงซึ่งมีค่าตามนิยามในหน้า 40 จะเพิ่มขึ้นตามค่าปัจจัย  $\sec^2 \phi'$  อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบแสดงให้เห็นว่าความยาวนานของคลื่นกระเจิงกรณีที่แนวการวางตัวของรอยทางเดินขนานกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta=0^\circ$ ) มีค่ามากกว่ากรณีที่แนวการวางตัวของรอยทางเดินตั้ง-ฉากกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta=90^\circ$ ) ซึ่งหมายความว่าความยาวนานของคลื่นกระเจิงไม่ได้ขึ้นอยู่กับ  $\phi'$  เพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับแนวการวางตัวของรอยทางเดินหรือมุม  $\beta$  ด้วย ผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนี้สอดคล้องกับผลการตรวจวัดสัญญาณและผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงแบบดัดแปลงของ Manning (1959) ซึ่งเพิ่มผลของการหักเหอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนที่อยู่นอกออร์บิทัล ปรากฏ แบบ-จำลองความหนาแน่นสูงแบบดัดแปลงของ Manning (1959) กับการแปรค่า  $\beta$  ที่มีต่อความยาวนานของสัญญาณด้วยการปรับค่าปัจจัย  $\sec^2 \phi'$  เป็น  $\sec^b \phi'$  โดยเลขดัชนี  $b$  มีค่าเท่ากับ 2 ในกรณีที่  $\beta=0^\circ$  และจะลดลงเมื่อ  $\beta$  มีค่าเพิ่มขึ้นจน  $b$  มีค่าเท่ากับ 0.3 เมื่อ  $\beta=90^\circ$  อย่างไรก็ตามแบบจำลองแบบดัดแปลงของ Manning สามารถประยุกต์ใช้สำหรับกรณีรอยทางเดินความ-หนาแน่นสูงเท่านั้น ผลของการแปรค่า  $\beta$  ที่มีต่อความยาวนานของสัญญาณในกรณีรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ไม่มีแบบจำลองใดนำเสนอไว้

กรณีที่วิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงที่ได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีขอบเขตที่ชัดเจนระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ดังนั้นการศึกษาผลของการแปรค่ามุม  $\phi'$  และ  $\beta$  ที่มีต่อความยาวนานของสัญญาณโดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจึงต้องกำหนดนิยามของความยาวนานของสัญญาณก่อน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดนิยามความยาวนานของสัญญาณในลักษณะเดียวกับนิยามความยาวนานของสัญญาณของรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ กล่าวคือ ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีค่าเท่ากับเวลาหรือค่า  $(ka)^2$  ที่สัญญาณลดระดับลงจนมีค่าเป็นร้อยละ 37 ( $=\exp(-1)$ ) ของระดับสัญญาณสูงสุด ผลศึกษา



การเปลี่ยนแปลงความยาวนานของสัญญาณจะนำเสนอลักษณะเดียวกับที่นำเสนอในแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงแบบดัดแปลงของ **Manning** กล่าวคือ พิจารณาที่ค่าปัจจัย  $\sec^b \phi'$  โดยที่ผลของการแปรค่า  $\beta$  จะแสดงในรูปการแปรค่าเลขดัชนี  $b$  การหาค่าปัจจัยการเพิ่มความยาวนานของสัญญาณ  $\sec^b \phi'$  ทำได้โดยการเปรียบเทียบความยาวนานของสัญญาณกรณีเรขาคณิตแบบการกระเจิงไปข้างหน้าที่ต้องการกับความยาวนานของสัญญาณกรณีเรขาคณิตแบบเรดาร์โดยความยาวนานของสัญญาณกรณีเรขาคณิตแบบเรดาร์เมื่อวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิง-คลื่นเต็มรูปแบบแสดงเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความ-หนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงในรูป **3.16** ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า กรณีรอยทางเดินของดาวตกมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมาก ผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบทั้งกรณีคลื่น **TM** และคลื่น **TE** มีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ขณะที่เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าน้อยผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบกรณีคลื่น **TM** เท่านั้นที่ใกล้เคียงกับผล-การวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองความหนาแน่นต่ำ ส่วนกรณีคลื่น **TE** แอมพลิจูดที่สูงขึ้นเนื่อง-จากผลของเรโซแนนซ์ทำให้ค่าความยาวนานของสัญญาณตามนิยามมีค่าน้อยกว่ากรณีคลื่น **TM** และกรณีวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ



รูป 3.16 ความยาวนานของคลื่นกระเจิงเมื่อเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์

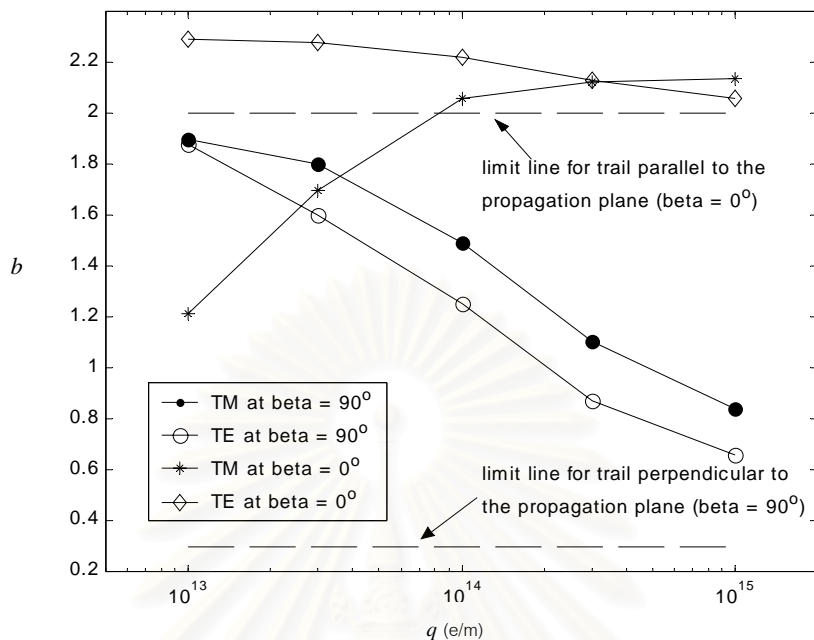
ค่าปัจจัย  $\sec^b \phi'$  สามารถหาได้โดยเปรียบเทียบความยาวนานของสัญญาณที่  
เรขาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้าที่ต้องการกับความยาวนานของสัญญาณกรณีเรดาร์ที่แสดง  
ดังรูป 3.16 โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tau_{fwd} = \tau_{bwd} \sec^b \phi' \quad (3.45)$$

โดย  $\tau_{fwd}$  และ  $\tau_{bwd}$  คือความยาวนานของคลื่นกระเจิงกรณีที่เราเรขาคณิตของการกระเจิงเป็น  
แบบการกระเจิงไปข้างหน้าและแบบเรดาร์ตามลำดับ

ในกรณีที่ระยะสื่อสารเท่ากับ 400 กิโลเมตรหรือมุม  $\phi'$  เท่ากับ  $64^\circ$  เลขดัชนี  $b$  ของ  
ค่าปัจจัย  $\sec^b \phi'$  ที่ได้จากการวิเคราะห์กรณี  $\beta=0^\circ$  และ  $90^\circ$  จะมีค่าดังรูป 3.17 จาก  
รูปจะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ทั้งกรณีคลื่น TM และคลื่น TE ที่  $\beta=90^\circ$  เลขดัชนี  $b$  จะมี  
ค่าเข้าใกล้ 2 เมื่อ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของรอยทางเดินมีค่าน้อยและเลขดัชนี  $b$   
จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของรอยทางเดินมีค่ามากขึ้น โดยเลขดัชนี  $b$   
กรณีคลื่น TE มีค่าน้อยกว่ากรณีคลื่น TM เนื่องจากผลของเรโซแนนซ์ทำให้ค่าความยาวนาน  
ของสัญญาณตามนิยามในกรณีคลื่น TE มีค่าน้อยกว่ากรณีคลื่น TM เมื่อ  $\beta=0^\circ$  คลื่น  
กระเจิงจะระยะเวลาปรากฏนานขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์หาเลขดัชนี  $b$  ในกรณีคลื่น  
TM ที่กระเจิงจากรอยทางเดินที่มี ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นน้อยจะมีค่าต่ำกว่ากรณี  
ที่  $\beta=90^\circ$  ทั้งนี้เป็นเพราะที่  $\beta=0^\circ$  ผลของเรโซแนนซ์ก็จะปรากฏในคลื่น TM ด้วยเช่นกัน

ผลการวิเคราะห์ดังรูป 3.17 แสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าปัจจัย  $\sec^b \phi'$  เพื่อแสดงการ  
เพิ่มขึ้นของความยาวนานของสัญญาณจะเหมาะกับกรณี  $\beta=90^\circ$  เท่านั้น ซึ่งกรณีดังกล่าวเป็น  
กรณีที่ ไม่ปรากฏเรโซแนนซ์ในคลื่น TM เนื่องจากคลื่นตกกระทบตั้งฉากกับรอยทางเดิน  
ขณะที่กรณี  $\beta$  ค่าอื่นๆ เลขดัชนี  $b$  ที่วิเคราะห์ได้อาจมีค่าน้อยกว่ากรณี  $\beta=90^\circ$  แม้ว่า  
ระยะเวลาปรากฏจะมากกว่ากรณี  $\beta=90^\circ$  ก็ตาม ดังนั้นค่าปัจจัยการเพิ่มขึ้นของความยาวนาน  
ของสัญญาณจึงควรได้รับการปรับปรุงเพื่อให้สามารถแสดงผลที่สอดคล้องกับระยะเวลาปรากฏ  
สัญญาณมากขึ้น



รูป 3.17 เลขดัชนี  $b$  ของค่าปัจจัยการเพิ่มความยาวนานของสัญญาณ ที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นค่าต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในบทนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก เพื่อที่จะนำไปใช้สร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกต่อไป รายละเอียดเกี่ยวกับการตรวจวัดสัญญาณทั้งหมดจะกล่าวในบทที่ 4 ซึ่งเป็นบทถัดไป

## บทที่ 4

### การตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

การตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ ประการแรกเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก และนำลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในบทที่ 3 และประการที่ 2 เพื่อรวบรวมผลการตรวจวัดไว้เป็นข้อมูลเชิงสถิติสำหรับการประยุกต์ใช้ต่างๆ เช่น การสร้างแบบจำลองการกระเจิงคลื่นวิทยุสำหรับประเทศไทย เป็นต้น ในการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก จำเป็นที่จะต้องสร้างข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกขึ้น ทั้งนี้เพราะยังไม่เคยมีข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกในประเทศไทย ข่ายเชื่อมโยงที่ได้จัด-สร้างขึ้นมาอยู่ด้วยกันหลายข่าย โดยมีสถานีที่กรุงเทพมหานคร เป็นสถานีปลายทางหลัก และมีสถานีปลายทางอื่นๆ กระจายอยู่ในหลายจังหวัด แม้ว่าจะมีสถานีปลายทางอยู่ในหลายจังหวัดแต่ด้วยข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ ทำให้รูปลักษณะการรับส่งสัญญาณมีเพียงแบบเดียว คือ การสื่อสารแบบจุดถึงจุดทางเดียว นอกจากข่ายเชื่อมโยงที่ได้จัดสร้างขึ้นมาแล้วยังได้มีการทดลองรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจากสถานีวิทยุโทรทัศน์ที่ออกอากาศโดยใช้ความถี่ในย่านความถี่สูงมากแถบต่ำด้วย รายละเอียดต่างๆ ของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในการตรวจวัดจะแยกกล่าวเป็น 2 หัวข้อคือ ในหัวข้อแรกจะกล่าวถึงข้อมูลทั่วไปของข่ายเชื่อมโยง เช่น ความถี่ปฏิบัติการ พิกัดที่ตั้งของข่ายเชื่อมโยง เป็นต้น ส่วนอุปกรณ์ การติดตั้ง การปรับเทียบ และการวิเคราะห์ทั้งบกำลังเบื้องต้นจะแสดงในหัวข้อที่ 2 สำหรับผลการตรวจวัดสัญญาณจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3 และ 4 โดยแยกนำเสนอใน 2 ลักษณะตามวัตถุประสงค์ของการตรวจวัด กล่าวคือ ในหัวข้อที่ 3 จะแสดงลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากบทที่ 3 สำหรับหัวข้อที่ 4 จะนำเสนอสถิติที่น่าสนใจจากการตรวจวัดสัญญาณ รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

#### 4.1 ข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จัดสร้างขึ้นมาทุกข่ายมีรูปลักษณะ (configuration) การรับส่งสัญญาณลักษณะเดียวคือ เป็นการสื่อสารแบบจุดถึงจุดทางเดียว (simplex point-to-point communication) โดยมีสถานี

ปลายทาง (**terminal**) สถานีหนึ่งทำหน้าที่เป็นสถานีส่งและอีกสถานีเป็นสถานีรับ ข่ายทุก  
 ข่ายที่จัดสร้างขึ้นเองจะมีสถานีปลายทางหลักอยู่ในกรุงเทพมหานคร ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขณะที่อีกสถานีหนึ่งอยู่ในต่างจังหวัด โดยปกติสถานีปลายทางใน  
 กรุงเทพมหานครจะถูกกำหนดให้เป็นสถานีส่งและสถานีปลายทางในต่างจังหวัดเป็นสถานีรับ  
 ทั้งนี้เพราะระดับสัญญาณรบกวนน้อยกว่าในกรุงเทพมหานคร เนื่องจากย่านความถี่ที่เหมาะสม  
 สำหรับการใช้งานข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกเป็นย่านความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้  
 อย่างเสรีในประเทศไทย ดังนั้นการตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกด้วยการ  
 ทดลองส่งและรับคลื่นวิทยุโดยอาศัยข่าย-เชื่อมโยงที่จัดสร้างขึ้นจึงต้องขออนุญาตจาก  
 กรมไปรษณีย์โทรเลข ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ดูแลรับผิดชอบการใช้ทรัพยากรความถี่วิทยุในประเทศ  
 ไทยในปัจจุบัน สำหรับความถี่ที่ได้รับอนุญาตจาก กรมไปรษณีย์โทรเลขให้ใช้ในการทดลอง  
 ตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีด้วยกัน 5 ความถี่ ข้อมูลความถี่และ  
 ข้อกำหนดอื่นๆ เกี่ยวกับการอนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุในการ-ทดลองตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิง  
 จากรอยทางเดินของดาวตก เช่น ขนาดกำลังส่ง ความกว้าง-แถบ (**bandwidth**) และ  
 ระยะเวลาที่ได้รับอนุญาต เป็นต้น แสดงในหนังสืออนุญาตจากกรม-ไปรษณีย์โทรเลข โดยสำเนา  
 หนังสืออนุญาตทุกฉบับได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก. แล้ว

ข่ายเชื่อมโยงที่ได้จัดสร้างขึ้นมีอยู่ด้วยกัน 8 ข่าย ดังนี้

1. ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - อุดรธานี
2. ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพร
3. ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ยะลา
4. ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - เชียงใหม่
5. ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - อมก๋อย (เชียงใหม่)
6. ข่ายเชื่อมโยงสงขลา - ฉะเชิงเทรา
7. ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครศรีธรรมราช
8. ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครราชสีมา

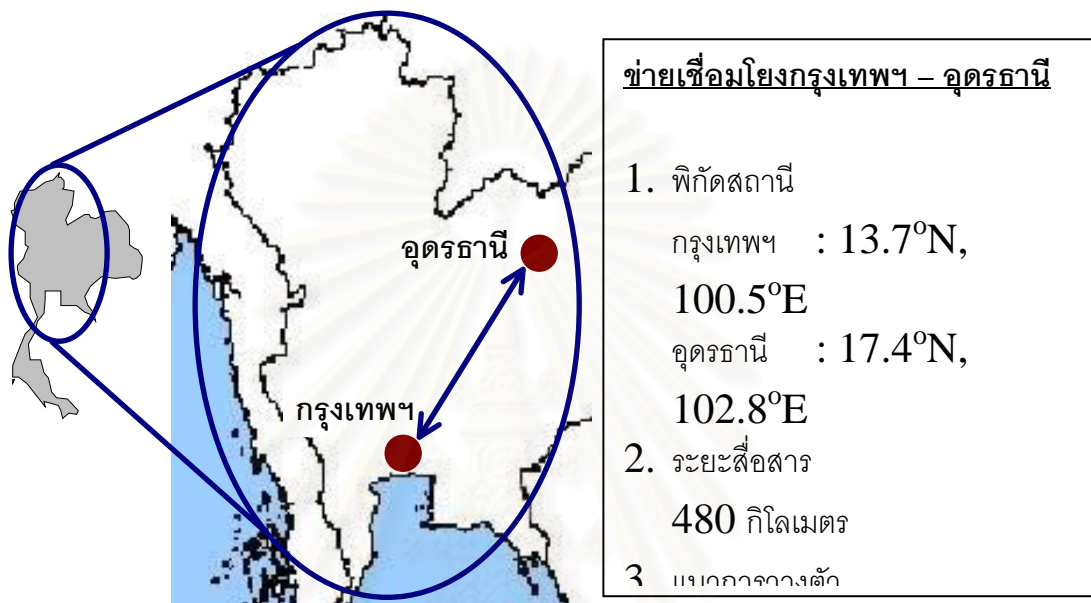
ข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายจะมีข้อมูลประจำข่ายที่แตกต่างกันออกไป โดยข้อมูลเหล่านี้ได้แก่  
 พิกัดที่ตั้งสถานีส่งและสถานีรับ ระยะสื่อสาร แนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง (วัดเป็นมุมจาก  
 แนวเหนือ - ได้ตามเข็มนาฬิกาโดยมีสถานีที่มีชื่อขึ้นก่อนของข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายเป็นจุด  
 ศูนย์กลาง) ความถี่ปฏิบัติการ กำลังส่ง โฟลาไรเซชัน อัตราขยาย แบบรูปการแผ่พลังงาน และ  
 มุมเงยของสาย-อากาศส่งและสายอากาศรับ ซึ่งข้อมูลต่างๆ ของข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายมีดังนี้



#### 4.1.1 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อุตรดิตถ์

ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อุตรดิตถ์มีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.1



รูป 4.1 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของ  
ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อุตรดิตถ์

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 49.1 MHz

ค. กำลังส่ง 80 วัตต์

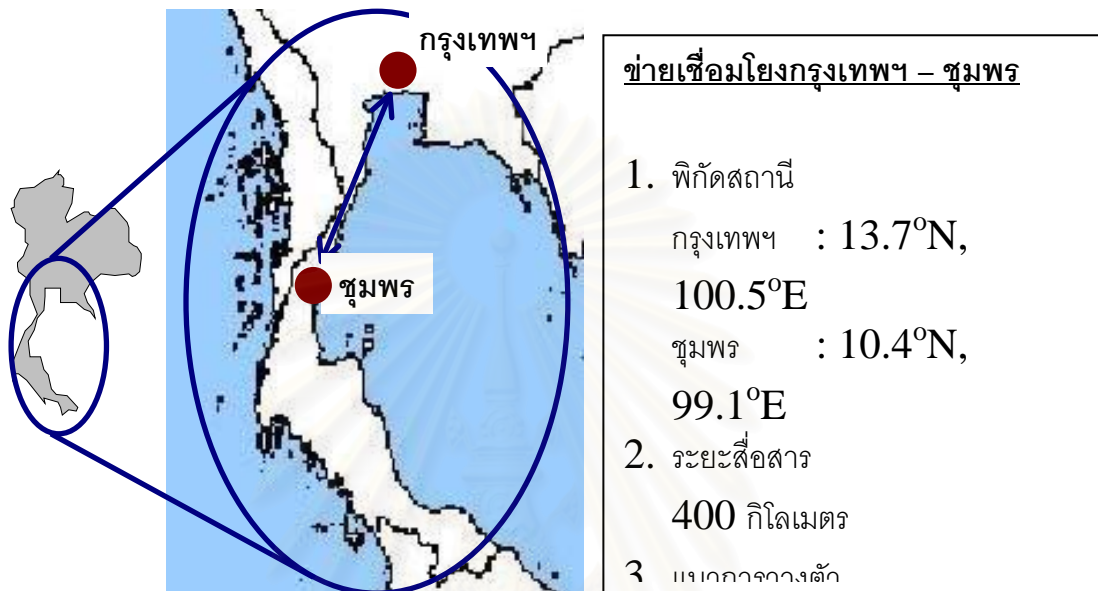
ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาก็ – อุตะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $21^\circ$
- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาก็ – อุตะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $21^\circ$

#### 4.1.2 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร

ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพรมีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.2



รูป 4.2 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของ  
ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 49.1 MHz

ค. กำลังส่ง 80 วัตต์

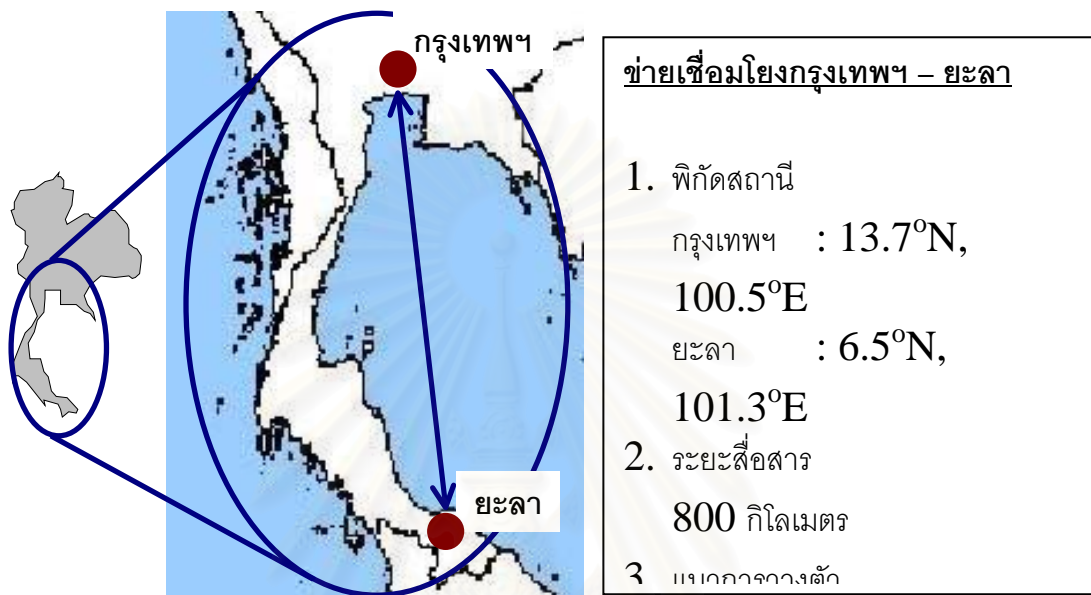
ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาก็ – อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาไรเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 25°
- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาก็ – อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาไรเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 25°

### 4.1.3 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ยะลา

ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ยะลามีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.3



รูป 4.3 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของ  
ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ยะลา

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 49.1 MHz

ค. กำลังส่ง 80 วัตต์

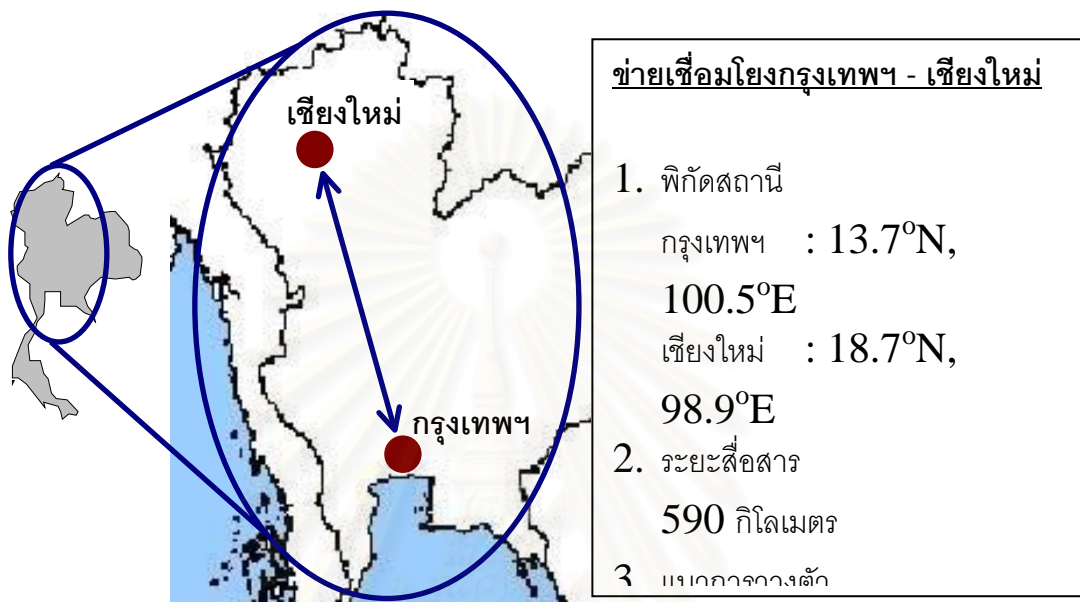
ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาก็ - อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาไรเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $13^\circ$
- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาก็ - อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาไรเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $13^\circ$

#### 4.1.4 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - เชียงใหม่

ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - เชียงใหม่มีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.4



รูป 4.4 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของ  
ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - เชียงใหม่

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 49.1 MHz

ค. กำลังส่ง 80 วัตต์

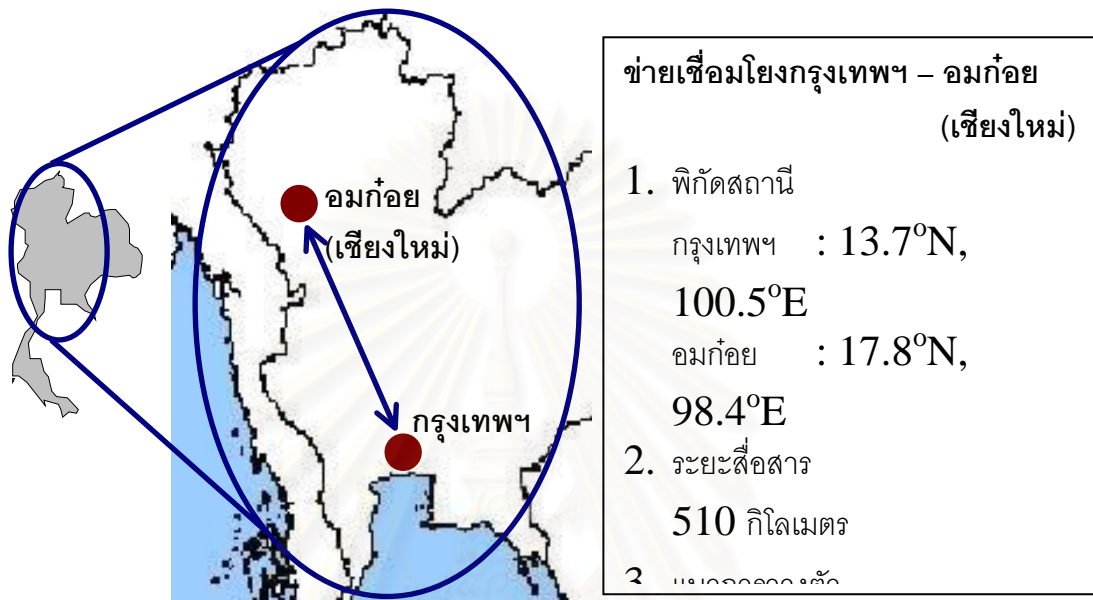
ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาก็ - อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $18^\circ$
- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาก็ - อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $18^\circ$

#### 4.1.5 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อมก๋อย (เชียงใหม่)

ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อมก๋อย (เชียงใหม่) มีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.5



รูป 4.5 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของ  
ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อมก๋อย (เชียงใหม่)

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 49.1 MHz

ค. กำลังส่ง 80 วัตต์

ง. สายอากาศและการติดตั้ง

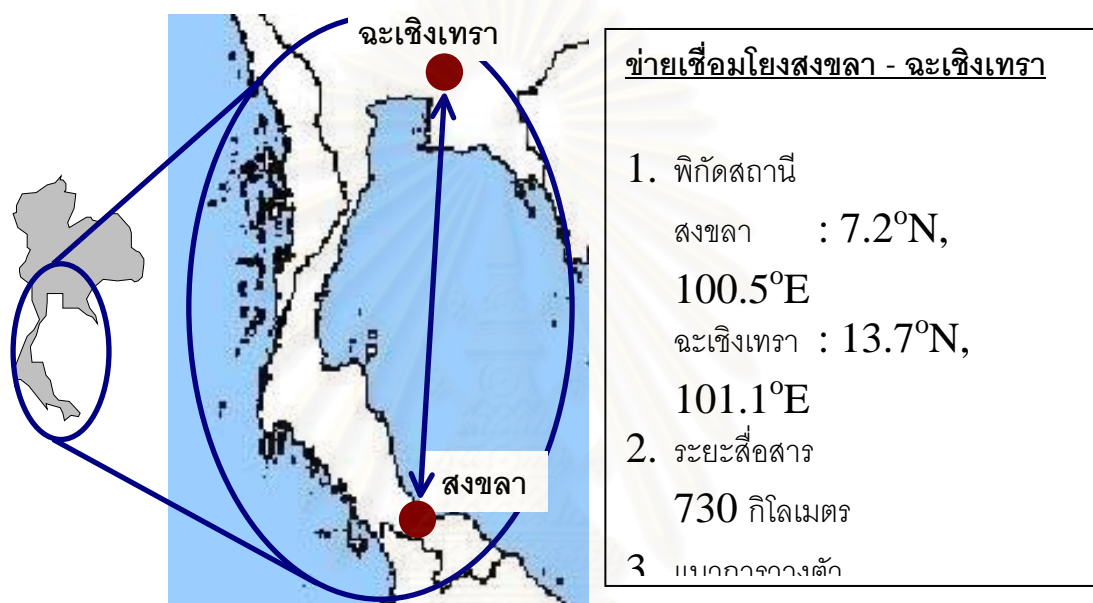
- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาก็ – อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $20^\circ$
- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาก็ – อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $20^\circ$



#### 4.1.6 ข่ายเชื่อมโยงสงขลา - ฉะเชิงเทรา

ข่ายเชื่อมโยงสงขลา - ฉะเชิงเทราเป็นข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวที่รับสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีวิทยุโทรทัศน์ โดยสถานีส่งเป็นสถานีวิทยุโทรทัศน์ช่อง 3 จังหวัดสงขลา ซึ่งออกอากาศโดยใช้สัญญาณช่อง 2 ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงสงขลา - ฉะเชิงเทรามีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.6



รูป 4.6 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของ  
ข่ายเชื่อมโยงสงขลา - ฉะเชิงเทรา

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 48.25 MHz

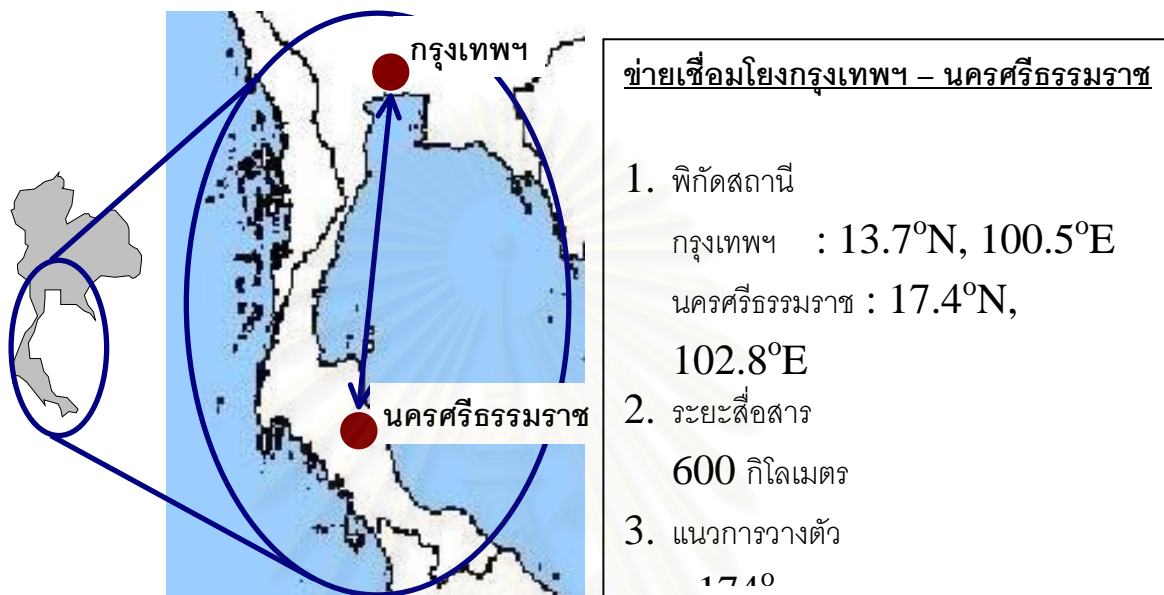
ค. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาก็ - อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $15^\circ$

#### 4.1.7 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราช

ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราชมีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.7



รูป 4.7 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราช

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 45.55 MHz

ค. กำลังส่ง 200 วัตต์

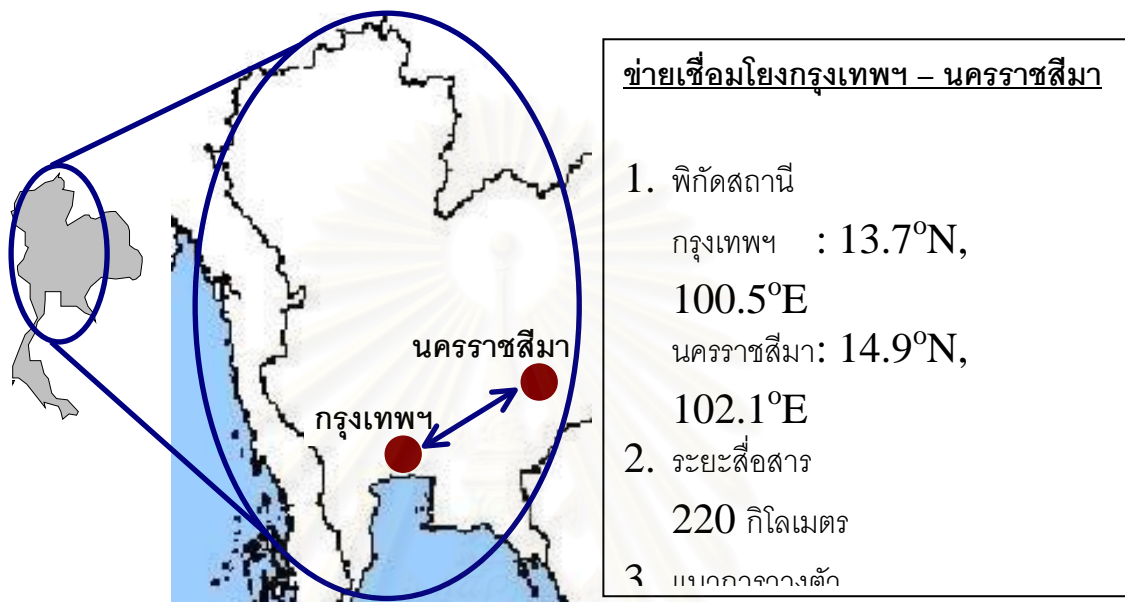
ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาก็ – อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 18°
- สายอากาศรับตัวที่ 1 เป็นสายอากาศยาก็ – อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 18°
- สายอากาศรับตัวที่ 2 เป็นสายอากาศยาก็ – อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวตั้ง และมีมุมเงย 18°

#### 4.1.8 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครราชสีมา

ข้อมูลเบื้องต้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครราชสีมา มีดังนี้

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 4.8



รูป 4.8 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของ  
ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครราชสีมา

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 45.55 MHz

ค. กำลังส่ง 200 วัตต์

ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาก็ - อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาไรเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $24^\circ$
- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาก็ - อุดะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi ติดตั้งโดยให้โพลาไรเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย  $24^\circ$  หรือ  $90^\circ$

การทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยข่ายเชื่อมโยงที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นดำเนินการในวันเวลาต่างกัน วันเวลาที่ทดลองตรวจวัดสัญญาณทั้งหมดสรุปไว้ในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 วันเวลาที่ตรวจวัดสัญญาณ

ครั้งที่	ข่ายเชื่อมโยง	วันเวลาที่ตรวจวัดสัญญาณ
1	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อุดรธานี	กรกฎาคม 2542
2	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร	กันยายน 2542
3	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร	พฤศจิกายน 2542
4	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร	มกราคม 2543
5	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา	สิงหาคม 2543
6	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา	มกราคม 2544
7	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – เชียงใหม่	กุมภาพันธ์ 2544
8	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – อมก๋อย	กุมภาพันธ์ 2544
9	ข่ายเชื่อมโยงสงขลา – ฉะเชิงเทรา	มีนาคม 2544
10	ข่ายเชื่อมโยงสงขลา – ฉะเชิงเทรา	สิงหาคม 2544
11	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราช	กันยายน 2544
12	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราช	ตุลาคม 2544
13	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมา	มกราคม 2545
14	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมา	กุมภาพันธ์ 2545

การทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันเกือบทั้งหมดในการทดลองทุกครั้ง รายการอุปกรณ์ การติดตั้ง และการปรับเทียบอุปกรณ์จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป นอกจากนี้ในหัวข้อดังกล่าวจะแสดงการวิเคราะห์ห้วงกำลัง (power budget) เบื้องต้นซึ่งเป็นกรรมวิธีประเมินกำลังรับสัญญาณก่อนที่จะจัดสร้างข่ายเชื่อมโยงและตรวจวัดสัญญาณไว้ด้วย

## 4.2 อุปกรณ์ การเปรียบเทียบอุปกรณ์ และการวิเคราะห์ห้บกำลังเบื้องต้น

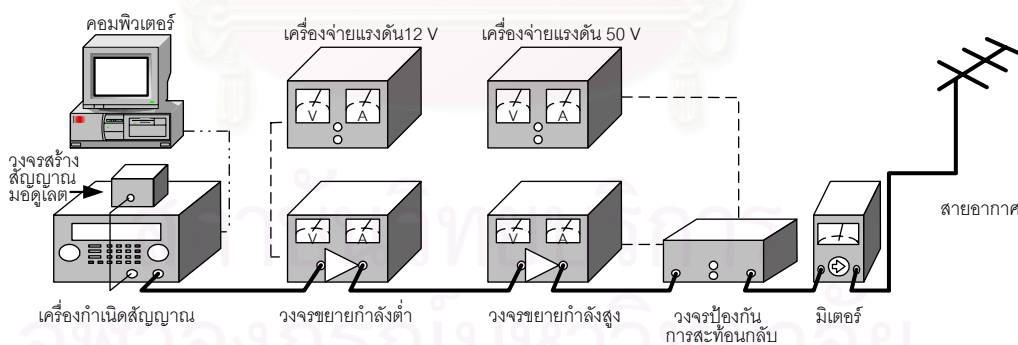
อุปกรณ์ที่ใช้ในข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกัน ยกเว้นสายอากาศที่ใช้ในสถานีปลายทางต่างจังหวัดจะสร้างขึ้นเพื่อใช้งานเฉพาะที่สถานีนั่นๆ อย่างไรก็ตามสายอากาศของสถานีปลายทางแต่ละสถานีสร้างขึ้นโดยใช้ต้นแบบเดียวกันจึงประมาณได้ว่าสายอากาศทุกตัวมีลักษณะสมบัติเหมือนกันทำให้สามารถเปรียบเทียบอุปกรณ์ได้สะดวก รายละเอียดเกี่ยวกับการติดตั้งอุปกรณ์และการเปรียบเทียบตลอดจนถึงการวิเคราะห์ห้บกำลังเบื้องต้นมีดังหัวข้อต่อไปนี้

### 4.2.1 ผังอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแบ่งเป็น 2 ภาคคือ อุปกรณ์ภาคส่งและอุปกรณ์ภาครับ ผังอุปกรณ์และการทำงานของอุปกรณ์แต่ละภาคเป็นดังนี้

#### ก. อุปกรณ์ภาคส่ง

อุปกรณ์ภาคส่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ วงจรมอดูเลตสัญญาณ เครื่องขยายสัญญาณ สายอากาศ และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่นเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น การจัดวางชุดอุปกรณ์ภาคส่งมีลักษณะดังรูป 4.9



รูป 4.9 ผังอุปกรณ์ภาคส่ง

เส้นทางเดินของสัญญาณตามผังอุปกรณ์ภาคส่งเริ่มจากเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งจ่ายสัญญาณกำลัง 10 มิลลิวัตต์ (10 dBm) มาป้อนวงจรรขยายกำลังต่ำ สัญญาณที่ออกจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นสัญญาณที่มอดูเลตสัญญาณเสียง 2 ความถี่แบบเอฟเอ็ม วงจรรขยายกำลังต่ำจะขยายสัญญาณเป็น 2 วัตต์เพื่อป้อนวงจรรขยายกำลังสูงขนาด 200 วัตต์ต่อไป สัญญาณขาออกจากวงจรรขยายกำลังสูงจะผ่านวงจรรป้องกันการสะท้อนกลับซึ่งจะวัดแรงดัน

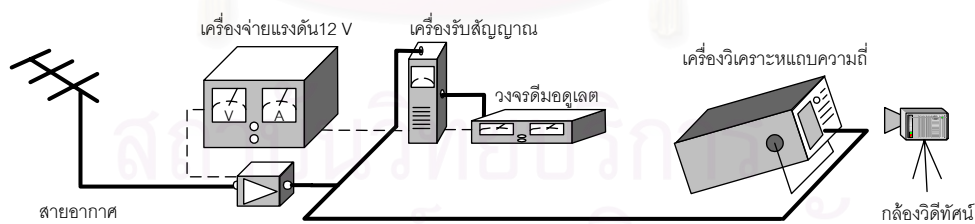


สะท้อนกลับจากสายอากาศ ถ้าแรงดันมีค่าเกินกว่าที่กำหนดจะตัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงทำให้ วงจรขยายกำลังสูงหยุดทำงานอันเป็นการป้องกันไม่ให่วงจรขยายกำลังสูง เสียหาย สัญญาณที่ออกจากวงจขยายกำลังสูงจะผ่านมิเตอร์วัดกำลังเพื่อวัดกำลังก่อนที่จะจ่าย ให้กับสายอากาศ วัฏจักรทำงานของอุปกรณ์ภาคส่งกำหนดไว้ที่ร้อยละ 33 ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ความ ร้อนสะสมที่วงจขยายกำลังสูงมีมากเกินไปซึ่งอาจทำให่วงจรเสียหายได้ โดยจังหวะการทำงาน ของอุปกรณ์ ภาคส่งจะเป็นจังหวะส่งสัญญาณ 1 นาที่สลับกับจังหวะพัก 2 นาที่ จังหวะการ ทำงานนี้ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณผ่านทางสายเชื่อมอุปกรณ์ ต่อพ่วง (GPIB)

ในการทดลองที่ใช้กำลังส่ง 80 วัตต์ วงจขยายกำลังสูงจะเป็นคนละวงจกับวงจขยาย กำลังสูง 200 วัตต์ โดยวงจขนาด 80 วัตต์ต้องการแรงดันขับเคลื่อน 12 โวลต์ และสามารถ ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้เครื่องจ่ายแรงดัน 50 โวลต์และคอมพิวเตอร์ควบคุม จังหวะ การทำงานของอุปกรณ์ภาคส่ง ข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัวในภาคความถี่วิทยุของภาคส่ง จะแสดงในภาคผนวก ข.

#### ข. อุปกรณ์ภาครับ

อุปกรณ์ภาครับประกอบด้วยสายอากาศ วงจขยายสัญญาณรบกวนต่ำ เครื่องรับ สัญญาณ วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ กล้องวิดีโอทัศน์ และเครื่องจ่าย แรง-ดัน 12 โวลต์ การจัดวางชุดอุปกรณ์ภาคส่งมีลักษณะดังรูป 4.10



รูป 4.10 ผังอุปกรณ์ภาครับ

สัญญาณที่เข้ามายังสายอากาศรับจะถูกขยายโดยวงจขยายสัญญาณรบกวนต่ำจากนั้น สัญญาณส่วนหนึ่งจะจ่ายให้กับเครื่องรับสัญญาณและวงจรมอดูเลตสัญญาณ ขณะที่สัญญาณ อีกส่วนหนึ่งจะจ่ายให้กับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ เครื่องรับสัญญาณและวงจรมอดูเลตจะทำ หน้าที่ตรวจสอบว่าสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณที่ส่งมาจากทางภาคส่งหรือไม่ สำหรับลักษณะ ของสัญญาณรับจะถูกบันทึกโดยใช้กล้องวิดีโอทัศน์ จากนั้นภาพสัญญาณรับจากกล้องวิดีโอทัศน์จะถูก

แปลงเป็นภาพนิ่งเพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสัญญาณรับต่อไป ข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัวในภาคความถี่วิทยุของภาครับจะแสดงในภาคผนวก ข.

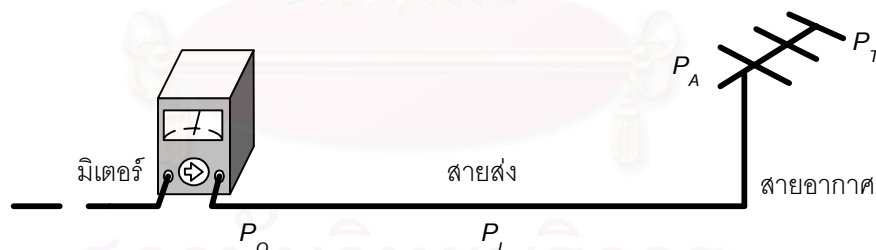
การเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณรับที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจำเป็นต้องทราบกำลังสัญญาณที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งและกำลังรับสัญญาณที่สายอากาศรับรับได้ แต่เนื่องจากมิเตอร์วัดกำลังที่ภาคส่งและเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่ภาครับไม่ได้แสดงกำลังสัญญาณ ณ จุดดังกล่าวโดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยหรือหักล้างกำลังสัญญาณที่ถูกลดทอนลงเพราะการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (insertion loss) หรือเพิ่มขึ้นเนื่องจากวงจรขยายกำลัง โดยการปรับเทียบอุปกรณ์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.2 การปรับเทียบอุปกรณ์

การปรับเทียบอุปกรณ์ทั้งภาคส่งและภาครับมีรายละเอียดดังนี้

##### ก. การปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง

มิเตอร์วัดกำลังสัญญาณส่งอยู่ ณ ตำแหน่งขาออกของวงจรป้องกันการสะท้อนกลับดังรูป 4.9 ดังนั้นการปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่งจึงมีเพียงการชดเชยการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของสายส่งและการสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสายอากาศดังแผนผังรูป 4.11



$$P_T = P_O - P_L - P_A \quad (dB)$$

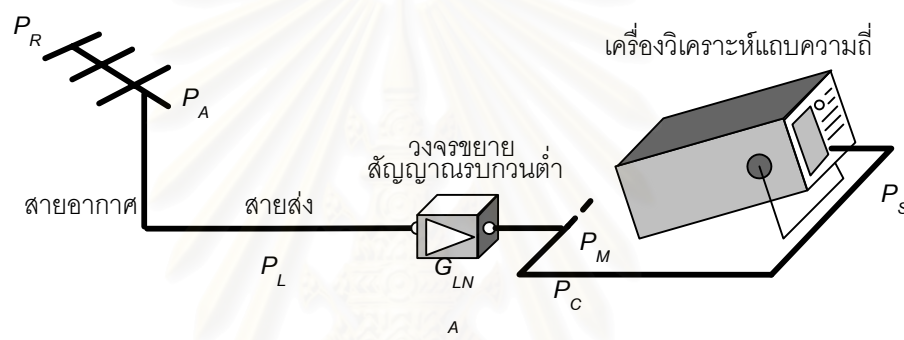
รูป 4.11 ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง

$P_O, P_L, P_A$  และ  $P_T$  ในรูป 4.11 หมายถึงกำลังที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดกำลัง กำลังสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของสายส่ง กำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศ และกำลังสัญญาณที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งตามลำดับ สำหรับกำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศจะคำนวณมาจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนซึ่งแสดงในรูป

ร้อยละของกำลังสัญญาณที่จ่ายให้กับสายอากาศ โดยค่าการสูญเสียนี้คำนวณมาจากอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (voltage standing wave ratio : VSWR) อีกทอดหนึ่ง

#### ข. การปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ

กำลังรับที่อ่านได้เป็นกำลังรับสัญญาณที่ขาเข้าของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ การหากำลังสัญญาณที่สายอากาศรับได้จึงต้องชดเชยการสูญเสียในสายส่งและตัวแบ่งกำลังสัญญาณ รวมถึงการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศและการไม่เข้าคู่จากการต่อขานาน ผังการปรับเทียบอุปกรณ์แสดงดังรูป 4.12



$$P_R = P_S + P_C + P_M - G_{LNA} + P_L + P_A \quad (\text{dB})$$

รูป 4.12 ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ

$P_S, P_L, P_A, P_M, P_C, G$  และ  $P_R$  ในรูป 4.12 หมายถึงกำลังที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ กำลังสูญเสียในสายส่ง กำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศ กำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนจากการต่อขานาน กำลังสูญเสียของตัวแบ่งกำลังสัญญาณและหัวต่ออื่นๆ อัตราขยายของวงจรมายายสัญญาณรบกวนต่ำ และกำลังรับที่สายอากาศรับได้ ตามลำดับ

ประโยชน์อีกประการหนึ่งของการปรับเทียบอุปกรณ์นอกเหนือจากการหากำลังสัญญาณที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งและกำลังที่สายอากาศรับได้แล้วก็คือการประมาณกำลังรับที่ขาเข้าของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกสถานที่ตั้งสถานีรับสัญญาณ การประมาณกำลังรับสามารถทำได้โดยอาศัยวิเคราะห์หงบกำลังเบื้องต้นดังนี้

### 4.2.3 การวิเคราะห์หึ่งบกำลังเบื้องต้น

ปัจจัยหลักในการเลือกสถานีรับสัญญาณอยู่ที่กำลังรับจะต้องมีค่ามากกว่ากำลังสัญญาณรบกวนไม่น้อยกว่าค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (SNR) ที่กำหนดไว้ โดยกำลังสัญญาณรบกวนจำเป็นที่จะต้องได้ข้อมูลจากสถานที่จริง ขณะที่กำลังรับสัญญาณประมาณจากการวิเคราะห์หึ่งบกำลังเบื้องต้นดังนี้

พิจารณาข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกว่าเป็นระบบเรดาร์ทวิสติก (bistatic radar) ที่มีรอยทางเดินของดาวตกเป็นตัวกระเจิง (scatterer) กำลังสัญญาณที่สายอากาศรับรับได้จึงสามารถหาได้โดยอาศัยสมการเรดาร์ดังนี้

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

โดยที่  $P_T$ ,  $P_R$ ,  $G_T$ ,  $G_R$ ,  $R_T$  และ  $R_R$  คือกำลังที่สายอากาศส่ง กำลังที่สายอากาศรับ อัตราขยายของสายอากาศส่ง อัตราขยายของสายอากาศรับตามลำดับ ระยะทางจากตัวกระเจิงมายังสายอากาศส่งและสายอากาศรับตามลำดับ

$\lambda$  คือความยาวคลื่นปฏิบัติการ

และ  $\sigma$  คือภาคตัดขวางเรดาร์ทวิสติก (bistatic radar cross section) ของรอยทางเดิน

ภาคตัดขวางเรดาร์ทวิสติกของรอยทางเดินสำหรับความถี่ปฏิบัติการในย่านที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 31.4 – 57.0 dB โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 51.4 dB

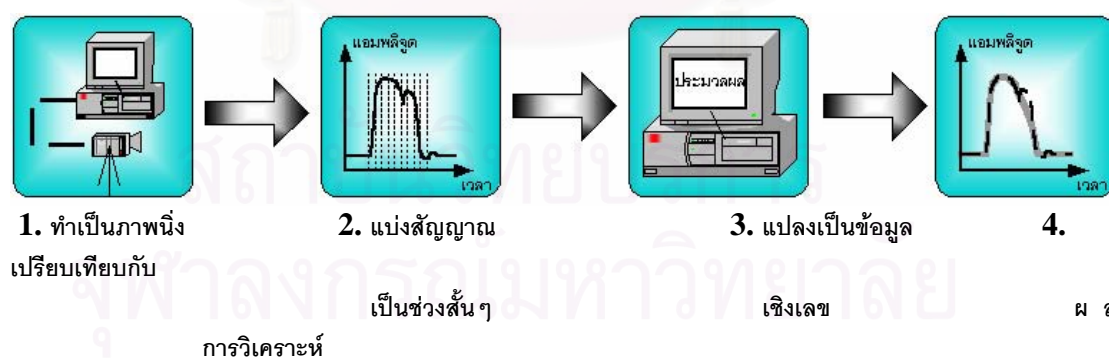
กำลังสัญญาณรับที่คำนวณได้ตามสมการ (4.1) จะนำไปใช้หากำลังที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ตามกรรมวิธีการเปรียบเทียบอุปกรณ์ในหัวข้อที่ผ่านมา ค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่วัดจากสถานที่จริง ประกอบกับค่ากำลังที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่คำนวณได้ และความไวของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่จะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจว่าสถานีที่นั้นสามารถใช้เป็นสถานีรับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกได้หรือไม่

### 4.3 ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในบทที่ 3 จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจากชายเชื่อมโยงต่างๆ เพื่อตรวจสอบกรรมวิธีวิเคราะห์ และแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ว่าสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับลักษณะของสัญญาณจริงเพียงใด การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์จะต้องแปลงภาพสัญญาณที่บันทึกด้วยกล้องวิดีโอที่บันทึกเป็นข้อมูลเชิงเลขในรูปแบบที่สามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ กรรมวิธีการแปลงเพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันได้จะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.3.1 ขณะที่ผลเปรียบเทียบสัญญาณจะนำเสนอในหัวข้อ 4.3.2

#### 4.3.1 กรรมวิธีเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกับสัญญาณรับเพื่อดูว่าผลการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับสัญญาณรับจริงเพียงใด ทำโดยการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทั้งสอง โดยการเปรียบเทียบจะต้องแปลงภาพของสัญญาณรับที่บันทึกด้วยกล้องวิดีโอที่บันทึกเป็นข้อมูลเชิงเลข ซึ่งกรรมวิธีการแปลงดังกล่าวแสดงเป็นขั้นตอนดังรูป 4.13



รูป 4.13 แผนผังการแปลงภาพสัญญาณวิดีโอที่บันทึกเป็นข้อมูลเชิงเลข

การแปลงภาพที่บันทึกด้วยกล้องวิดีโอที่บันทึกเป็นข้อมูลเชิงเลขทำโดยต่อสัญญาณจากกล้องวิดีโอที่บันทึกเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วใช้โปรแกรมจับภาพวิดีโอที่บันทึกแปลงให้เป็นภาพนิ่ง จากนั้นจะแบ่งรูปสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจากภาพนิ่งที่ได้เป็นช่วงเวลาสั้นๆ แล้ว



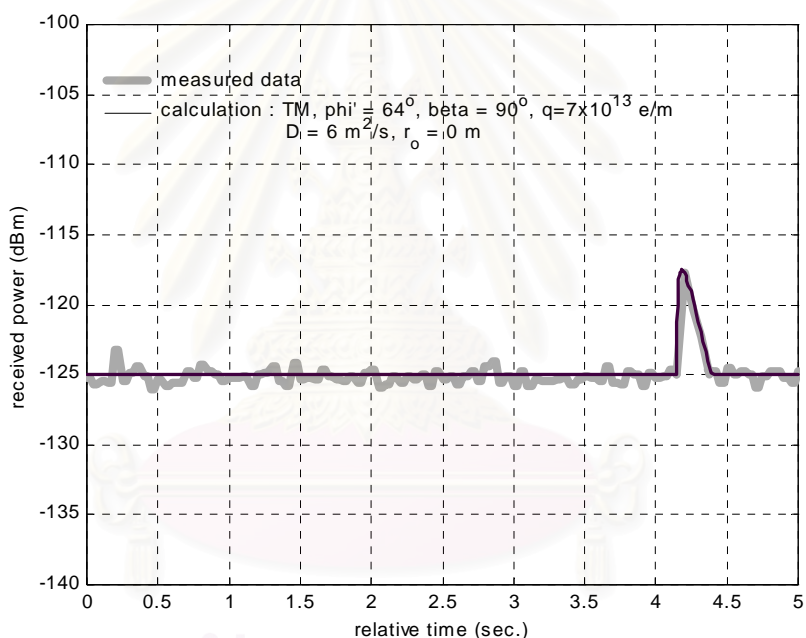
บันทึกเวลาและแอมพลิจูดของสัญญาณทุกช่วง ข้อมูลแอมพลิจูดที่บันทึกจะนำไปปรับเทียบตามกรรมวิธีปรับเทียบอุปกรณ์ที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งข้อมูลกำลังสัญญาณชุดสุดท้ายนี้จะเป็นข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะต้องแปลงจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนให้อยู่ในรูปกำลังสัญญาณโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่างๆ ของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในการทดลองตรวจวัด เช่น กำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เป็นต้น ข้อมูลในรูปกำลังสัญญาณทั้งจากการตรวจวัดและการวิเคราะห์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งกันและกันที่กล่าวข้างต้น ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดแต่ละ-รูปจะถูกเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่แปรเปลี่ยนค่าปัจจัยต่างๆ หลายชุดเพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับลักษณะสัญญาณจริงมากที่สุด โดยค่าปัจจัยที่แปรเปลี่ยนได้แต่ละชุดประกอบด้วยมุมกระเจิง ( $\phi'$ ) แนวการวางตัวของรอยทางเดิน ( $\beta$ ) และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ( $q$ ) อย่างไรก็ตามมุมกระเจิงของข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายจะถูกกำหนดให้คงที่ โดยอาศัยข้อสมมติที่ว่าตำแหน่งกระเจิงเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับและอยู่สูงจากพื้นโลก 95 กิโลเมตร ข้อสมมติดังกล่าวเป็นข้อสมมติที่สอดคล้องกับการทดลอง เนื่องจากในการทดลองกำหนดให้แนวตั้งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับชี้ไปยังบริเวณดังกล่าว ผลเปรียบเทียบระหว่างลักษณะคลื่นวิทยุที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการตรวจวัดมากที่สุดแสดงในหัวข้อถัดไป

#### 4.3.2 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์

การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจากไม่ทราบค่าปัจจัยของการกระเจิงสัญญาณจริงหลายประการ เช่น มุมกระเจิงซึ่งเกี่ยวข้องกับระยะสื่อสารและตำแหน่งกระเจิง แนวการวางตัวของรอยทางเดิน และสัมประสิทธิ์การแพร่ของรอยทางเดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการแปรค่าปัจจัยโดยอาศัยข้อสมมติที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาประกอบกับกำหนดค่า ปัจจัย บางค่าให้เป็นค่าคงตัวให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับลักษณะสัญญาณที่ได้จากการ-ตรวจวัดจำนวนหนึ่ง (สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และสัญญาณที่ได้จากการ-ตรวจวัดมากกว่า 0.8) ขณะที่สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดอีกจำนวนหนึ่งมีลักษณะไม่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ใดๆ ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการ-วิเคราะห์สามารถแบ่งได้เป็น 6 กลุ่ม โดยตัวอย่างทั้ง 6 กลุ่มที่ได้จากข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพรเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์มีดังนี้

ก. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำปกติ

สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำแบบปกติจะมีลักษณะดังรูป 4.14 กล่าวคือ สัญญาณจะมีแอมพลิจูดสูงสุดเกือบจะทันทีที่รอยทางเดินก่อตัวขึ้น หลังจากที่มีสัญญาณมีแอมพลิจูดสูงสุดแล้วสัญญาณจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งเห็นเป็นเส้นตรงบนแกนที่เป็นมาตราส่วนแบบลอการิทึม ค่าปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงประกอบไว้ในรูป โดยค่าปัจจัยในแถวบนอันได้แก่ แบบแผนของคลื่น มุมกระเจิง ( $\phi'$ ) แนวการวางตัวของรอยทางเดิน ( $\beta$ ) และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ( $q$ ) เป็นค่าปัจจัยที่ถือเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ ขณะที่ค่าปัจจัยในแถวล่างคือ สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D$ ) และรัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดิน ( $r_0$ ) กำหนดเป็นค่าคงที่โดยในการวิเคราะห์กำหนดให้  $D = 6 \text{ m}^2/\text{s}$  และ  $r_0 = 0 \text{ m}$

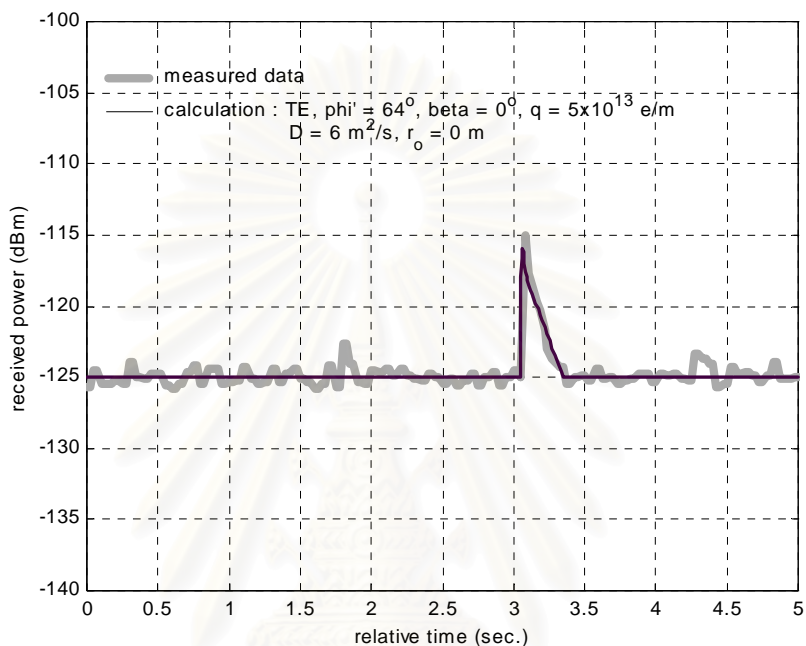


รูป 4.14 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำปกติ

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรูป 4.14 มีค่าเท่ากับ 0.93 โดยทั่วไปข้อแตกต่างระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์จะอยู่ที่ช่วงเริ่มต้นของการกระเจิง โดยแอมพลิจูดของสัญญาณจริงจะเพิ่มถึงจุดสูงสุดช้ากว่าผลการวิเคราะห์ ดังนั้นถ้าพิจารณาเฉพาะช่วงการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะพบว่าสามารถหาผลการวิเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับสัญญาณจริงมาก ดังกรณีตัวอย่างรูป 4.14 ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉพาะช่วงที่สัญญาณลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเท่ากับ 0.995

ข. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่มีแอมพลิจูดเริ่มต้นสูงเป็นพิเศษ

สัญญาณที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำบางสัญญาณมีแอมพลิจูดในช่วงเริ่มต้นของการกระเจิงสูงเป็นพิเศษจากนั้นสัญญาณจะลดระดับลงอย่างรวดเร็วก่อนที่จะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจนกระทั่งจางหายไปดังรูป 4.15

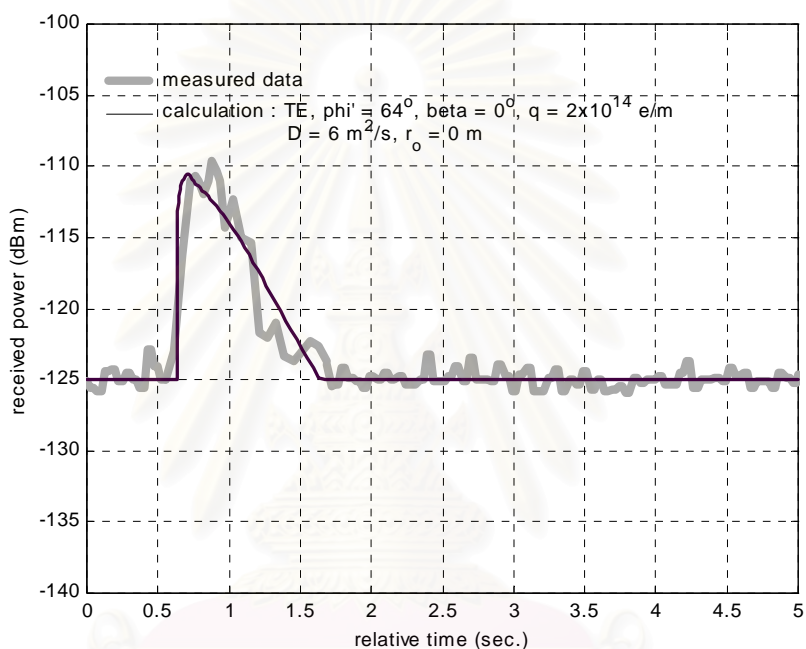


รูป 4.15 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่มีแอมพลิจูดเริ่มต้นสูงเป็นพิเศษ

แอมพลิจูดที่เพิ่มสูงขึ้นนี้เป็นผลจากเรโซแนนซ์ในช่วงเริ่มต้นของการกระเจิง สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำโดยทั่วไปมีผลของเรโซแนนซ์ปรากฏร่วมอยู่ด้วย แต่ลักษณะดังกล่าวไม่ชัดเจนเท่าตัวอย่างสัญญาณรูป 4.15 ซึ่งพบได้น้อยครั้งมาก ทั้งนี้เพราะผลของเรโซแนนซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติของสัญญาณรับจะเด่นชัดในกรณีคลื่นที่ตกกระทบรอยทางเดินของดาวตกไม่มีองค์ประกอบของคลื่น TM ที่ตกกระทบในลักษณะตั้งฉากกับรอยทางเดิน โดยที่รอยทางเดินต้องมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นน้อยมากๆ ด้วย แม้ว่าสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่เห็นปรากฏการณ์เรโซแนนซ์อย่างชัดเจนจะมีอยู่น้อย แต่สัญญาณที่มีลักษณะดังกล่าวจะสามารถหาผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้สูงมาก ดังกรณีตัวอย่างรูป 4.15 ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์เท่ากับ 0.99

ค. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงปกติ

สัญญาณรับที่มีแอมพลิจูดสูงขึ้นจะมีแนวโน้มของลักษณะการเพิ่มระดับสัญญาณอย่างรวดเร็วในช่วงแรก สัญญาณจะไม่ลดระดับลงอย่างทันทีทันใดแต่จะเพิ่มในอัตราที่ช้าลงจนถึงระดับสูงสุด จากนั้นสัญญาณจึงจะลดระดับลงดังรูป 4.16 สัญญาณที่มีลักษณะดังกล่าวข้างต้นเป็นสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง



รูป 4.16 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงปกติ

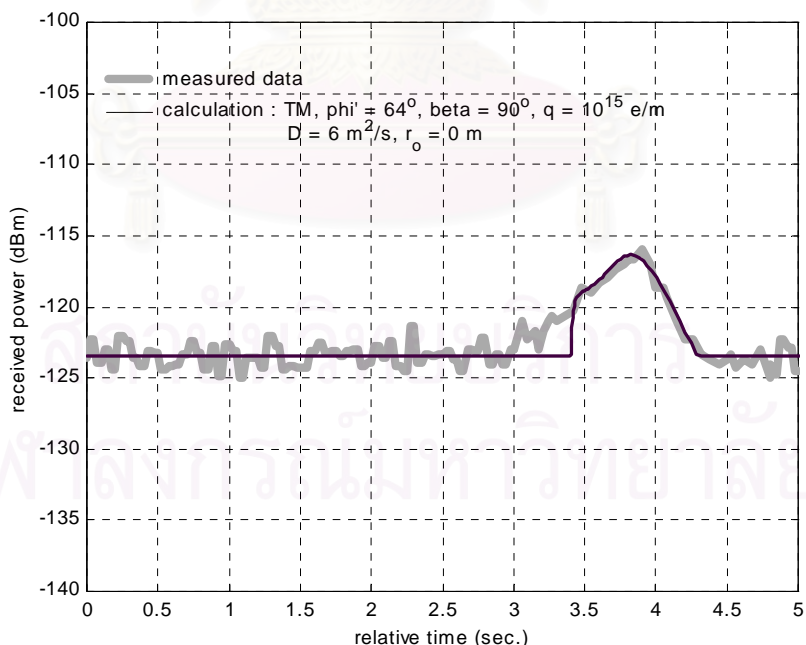
โดยทั่วไปสัญญาณขนาดใหญ่หรือสัญญาณที่มีแอมพลิจูดมากจะมีอัตราการลดระดับสัญญาณช้ากว่าสัญญาณขนาดเล็กหรือสัญญาณที่มีแอมพลิจูดน้อย (สำหรับชายเชื่อมโยง กรุงเทพฯ – ชุมพร ค่าเฉลี่ยของความชันเมื่อแสดงสัญญาณบนแกนที่ใช้มาตราส่วนลอการิทึมกรณีสัญญาณที่มีแอมพลิจูดน้อยกว่า  $-117$  dBm เท่ากับ  $-23$  dB/s ขณะที่สัญญาณที่มีแอมพลิจูดมากกว่า  $-117$  dBm เท่ากับ  $-15$  dB/s) ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในหัวข้อ 3.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นอยู่ในย่านการเปลี่ยนผ่านจะมีลักษณะการลดระดับสัญญาณแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวกับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำแต่มีอัตราการลดระดับสัญญาณช้ากว่า ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะไม่ปรากฏเมื่อวิเคราะห์ด้วย

แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่อัตราการลดระดับสัญญาณขึ้นอยู่กับขนาดของมุมกระเจิง ( $\phi'$ ) แต่เพียงอย่างเดียว

สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงโดยทั่วไปจะสามารถหาผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้ไม่สูงเท่ากับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ทั้งนี้เพราะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจะมีการแกว่งของสัญญาณมากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความยาวนานมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์สำหรับกรณีตัวอย่างรูป 4.16 เท่ากับ 0.89 และเมื่อพิจารณาที่แนวโน้มการเพิ่มและลดระดับสัญญาณจะพบว่าผลการวิเคราะห์จะแตกต่างกับสัญญาณจริงมากที่สุดในช่วงเริ่มต้นการกระเจิงมากที่สุดเช่นเดียวกับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

ง. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีช่วงการเพิ่มสัญญาณนาน

สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจำนวนหนึ่งที่มีช่วงการเพิ่มระดับสัญญาณนานและมีอัตราการลดระดับสัญญาณที่ช้าทำให้สัญญาณมีลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูป 4.17



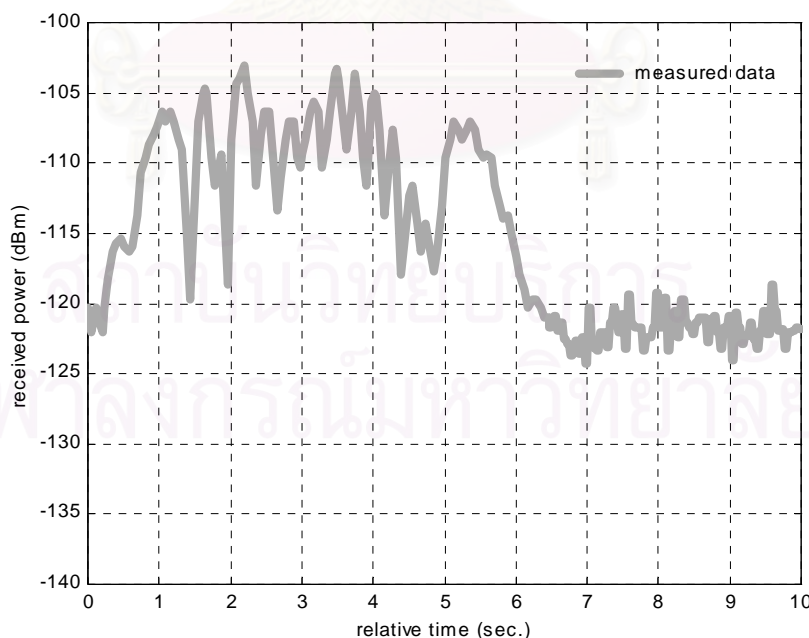
รูป 4.17 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีช่วงการเพิ่มสัญญาณนาน



สัญญาณที่มีลักษณะดังกล่าวน่าจะเป็นสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมาก แต่ขณะเดียวกันการกระเจิงเกิดในลักษณะที่ต่างจากข้อสมมติมากเช่นกัน เช่น ตำแหน่งกระเจิงอยู่ห่างจากบริเวณกึ่งกลางระหว่างสถานีส่งและสถานีรับ ซึ่งเป็นบริเวณแนวโค้งของสายอากาศทำให้อัตราขยายน้อยกว่าที่ควรจะเป็น เป็นต้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์สำหรับกรณีตัวอย่างรูป 4.17 นี้เท่ากับ 0.92

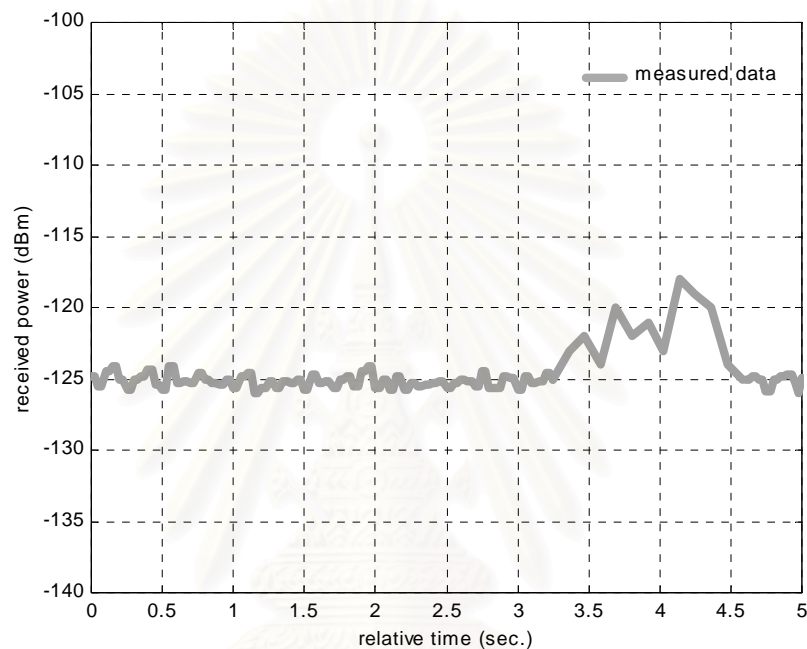
#### จ. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีการแกว่งของสัญญาณ

สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นสูงชันจะมีความยาวนานมากขึ้นด้วย โดยสัญญาณที่มีความยาวนานมากๆ ทุกสัญญาณมีลักษณะไม่เรียบเหมือนกับลักษณะสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความแปรปรวนของอิเล็กตรอนของบรรยากาศชั้นบนทำให้การแพร่ของอิเล็กตรอนของรอยทางเดินมีลักษณะผิดปกติจนส่งผลให้รอยทางเดินของดาวตกโดยเฉพาะรอยทางเดินที่มีขนาดใหญ่หรือมีความยาวนานมากๆ มีรูปทรงไม่เป็นทรงกระบอกตรง สัญญาณที่กระเจิงมายังสายอากาศรับจะเกิดการแกว่งเนื่องจากคลื่นหลายวิถี ดังรูป 4.18 สำหรับชายเชื่อมโยกรุงเทฯ - ชุมพรพบว่าสัญญาณที่มีความยาวนานมากกว่า 2.0 วินาทีที่มีลักษณะการแกว่งเนื่องจากคลื่นหลายวิถีทั้งสิ้น



รูป 4.18 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีการแกว่งของสัญญาณ

ด. สัญญาณที่มีลักษณะไม่เหมือนกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำหรือรอยทางเดินความหนาแน่นสูง  
สัญญาณรับอีกลักษณะหนึ่งมีรูปร่างไม่เหมือนกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำหรือรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ลักษณะของสัญญาณรับดังกล่าวมีหลากหลาย ตัวอย่างของสัญญาณรับที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้แสดงดังรูป 4.19



รูป 4.19 ตัวอย่างสัญญาณที่มีลักษณะไม่เหมือนกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำหรือรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

สาเหตุที่ทำให้ลักษณะของสัญญาณที่ไม่เหมือนกับทั้งสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูงต่างจากผลการวิเคราะห์มากไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่เชื่อกันว่าจะเกิดจากรูปทรงของรอยทางเดินหรือการกระจายความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ของรอยทางเดินมีลักษณะต่างจากแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์มาก เมื่อพิจารณาเฉพาะความยาวนานของสัญญาณในกลุ่มนี้พบว่า สัญญาณดังกล่าวเกือบทั้งหมดมีความยาวนานมากกว่า 0.2 วินาทีซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ (ข้อมูลเกี่ยวกับความยาวนานของสัญญาณแสดงในหัวข้อถัดไป) ดังนั้นจึงอาจประมาณได้ว่าสัญญาณในกลุ่มนี้เป็นสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงทั้งหมด

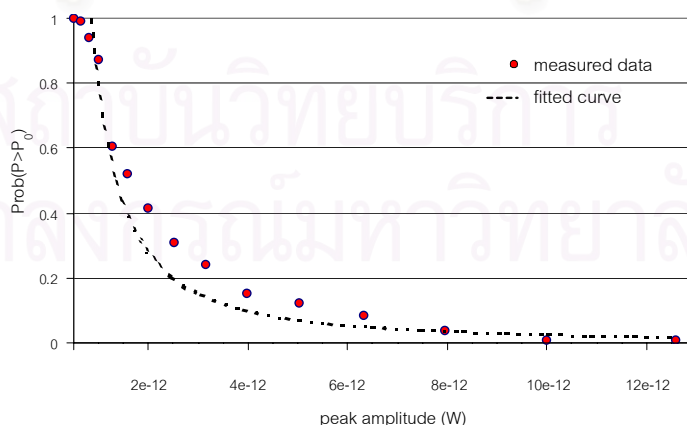
การพิจารณาลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดโดยการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์และแบ่งลักษณะสัญญาณเป็น 6 ประเภทดังที่กล่าวมานั้นเป็นการพิจารณาสัญญาณในเชิงคุณภาพเท่านั้นสำหรับการพิจารณาในเชิงปริมาณหรือพิจารณาในรูปสถิติต่างๆ จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.4 สถิติการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

สถิติการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้มีทั้งสถิติระยะสั้นในรูปของการกระจายแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก และสถิติระยะยาวในรูปของการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ข้อมูลสถิติทุกรูปแบบที่จะนำเสนอแยกเว้นการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลจะเป็น ข้อมูลที่ได้จากการขยายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพรซึ่งเป็นข้อมูลหลักที่ใช้ประกอบการสร้างแบบจำลอง ขณะที่สถิติการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากทุกชายเชื่อมโยงสถิติทั้ง 4 รูปแบบแยกแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 4.4.1 การกระจายแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ลักษณะการกระจายแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแสดงในรูปความน่าจะเป็นที่จะพบคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าที่กำหนดดังรูป 4.20 โดยข้อมูลดังรูป 4.20 นี้เป็นข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองตรวจวัดโดยอาศัยชายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร



รูป 4.20 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

จากข้อสมมติที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกประกอบกับการกำหนดให้ค่าปัจจัยบางประการที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าคงที่ ทำให้แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นกระเจิงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ซึ่งความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นนี้ขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตก ดังนั้นลักษณะการกระจายแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจึงสามารถหาได้จากลักษณะการกระจายมวลของเทหวัตถุดาวตกที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.3.2 การกระจายแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Prob}(P > P_0) = cP_0^{-a} \quad (4.2)$$

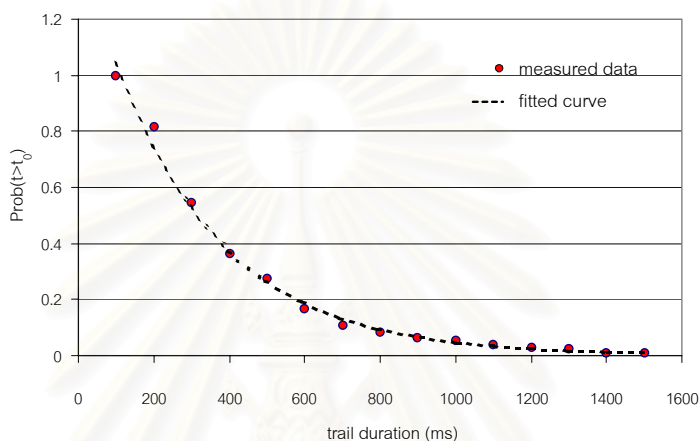
โดยที่  $\text{Prob}(p > p_0)$  หมายถึงความน่าจะเป็นที่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีแอมพลิจูดสูงสุดมากกว่า  $p_0$   
และ  $c$  และ  $a$  เป็นค่าคงที่ใดๆ

เนื่องจากผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกและผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบที่กล่าวในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าต่ำมากและสูงมากตามลำดับ ดังนั้นเมื่ออาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงมาช่วยวิเคราะห์จะได้ว่า ค่าคงที่  $a$  จะมีค่าระหว่าง 0.5 - 2 โดย  $a$  มีค่าเท่ากับ 0.5 เมื่อมีแต่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำแต่เพียงอย่างเดียวและ  $a$  จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมากขึ้นจน  $a$  มีค่าเป็น 2 เมื่อมีแต่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความ-หนาแน่นสูง

เส้นประในรูป 4.20 เป็นเส้นโค้งเข้ารูป (fitted curve) ของกลุ่มจุดข้อมูลจากการตรวจวัดที่สอดคล้องกับสมการ (4.2) โดยค่า  $a$  ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.5 แสดงให้เห็นว่ามีจำนวนคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงอยู่มากซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณอัตราส่วนจำนวนรอยทางเดินความหนาแน่นสูงต่อจำนวนรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่ใกล้เคียงกับ 1 โดยการแบ่งประเภทรอยทางเดินนั้นอาศัยนิยามที่ 2 ซึ่งกล่าวถึงในหัวข้อ 3.1.4

#### 4.4.2 การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแสดงในลักษณะเดียวกับการกระจายแอมพลิจูดสูงสุด กล่าวคือ แสดงในรูปของความน่าจะเป็นที่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีความยาวนานมากกว่าค่าที่กำหนด ลักษณะการแจกแจงดังกล่าวแสดงดังรูป 4.21



รูป 4.21 การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

นิยามความยาวนานที่ใช้ในการหาลักษณะการแจกแจงความยาวนานที่ได้จากการตรวจวัดนี้เป็นนิยามที่ใช้ในระบบสื่อสารซึ่งให้ความหมายของความยาวนานว่าเป็นเวลาที่ระดับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีค่าสูงกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนซึ่งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่ใช้ในข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพรกำหนดไว้ที่  $-123 \text{ dBm}$  (สูงกว่าระดับสัญญาณรบกวนปกติ  $2 \text{ dB}$ ) เมื่อวิเคราะห์หาการแจกแจงความยาวนานในลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์หาการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุด พบว่าการแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของ ดาวตกสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\text{Prob}(t > t_0) = \exp\left(-\frac{at_0}{\tau}\right) \quad (4.3)$$

โดยที่  $\text{Prob}(t > t_0)$  หมายถึงความน่าจะเป็นที่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีความยาวนานมากกว่า  $t_0$

$\tau$  เป็นเวลาที่รอยทางเดินมีแอมพลิจูดเป็นร้อยละ 37 ของแอมพลิจูดสูง

และ  $a$  เป็นค่าคงที่ใดๆ



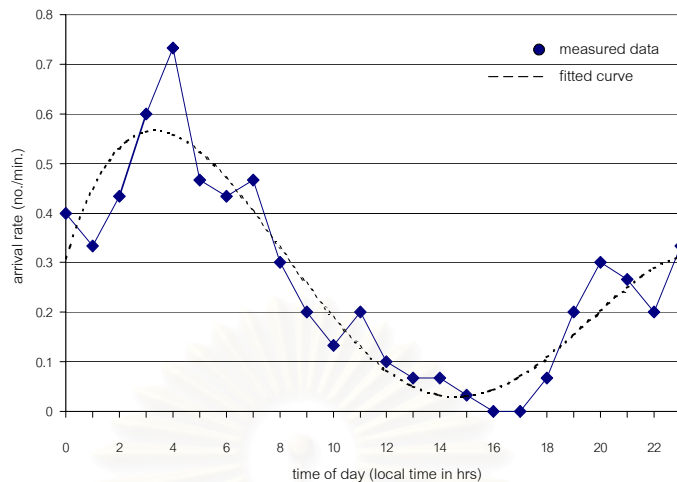
เส้นประในรูป 4.21 เป็นเส้นโค้งเข้ารูปลูกของกลุ่มจุดข้อมูลจากการตรวจวัดที่สอดคล้องกับสมการ (4.3) โดยค่า  $a$  ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.3 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า  $a$  ที่ได้จากเส้นโค้งเข้ารูปลูกการกระจายแอมพลิจูดสูงสุดในหัวข้อที่ผ่านมา

#### 4.4.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ในรอบ 1 วัน

ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวทั้งในส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้และการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไปจะแสดงในรูปค่าเฉลี่ยอัตราการมาถึง (arrival rate) ของรอยทางเดินของดาวตกที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุ ซึ่งจำนวนรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุก็คือจำนวนครั้งที่สถานีรับสามารถรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกได้นั่นเอง ค่าเฉลี่ยอัตราการมาถึงนี้จึงมีค่าเท่ากับจำนวนครั้งที่สถานีรับสามารถรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยหน่วยเวลาที่ใช้ในการแสดงอัตราการมาถึงนี้คือนาที เนื่องจากอัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดกำลังส่ง ระดับจุดเริ่ม-เปลี่ยนที่ภาครับ ระยะสื่อสาร เป็นต้น การแสดงอัตราการมาถึงจึงต้องบ่งบอกค่าปัจจัยเหล่านี้กำกับไว้ด้วย

นอกเหนือจากค่าปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบสื่อสารแล้ว พิกัดละติจูดของชายเชื่อมโยงนับเป็นปัจจัยสำคัญที่จะมีผลต่ออัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุ ทั้งนี้เพราะการกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกไม่ได้มีลักษณะคงตัวตลอดแนวจากขั้วโลกเหนือถึงขั้วโลกใต้ ดังนั้นจึงต้องบ่งบอกพิกัดละติจูดของชายเชื่อมโยงไว้ด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปพิกัดละติจูดอาจบ่งบอกเป็นบริเวณโดยถือว่าการกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกมีลักษณะคงตัวในบริเวณละติจูดแคบๆ สำหรับประเทศไทยอาจถือได้ว่าการแจกแจงความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกทั่วทุกภูมิภาคของประเทศมีลักษณะคงตัวสำหรับบริเวณละติจูดต่ำ ทั้งนี้เพราะภูมิภาคทุกภูมิภาคของประเทศไทยอยู่ในซีกโลกเหนือระหว่างเส้นศูนย์สูตรและเส้น **Tropic of Cancer** ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณละติจูดต่ำและมีระยะสื่อสารไกลที่สุดในแนวเหนือ - ใต้น้อยกว่า 2,000 กิโลเมตร

อัตราการมาถึงของรอยทางเดินของดาวตกที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุในรอบ 1 วันโดยอาศัยชายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพรแสดงดังรูป 4.22

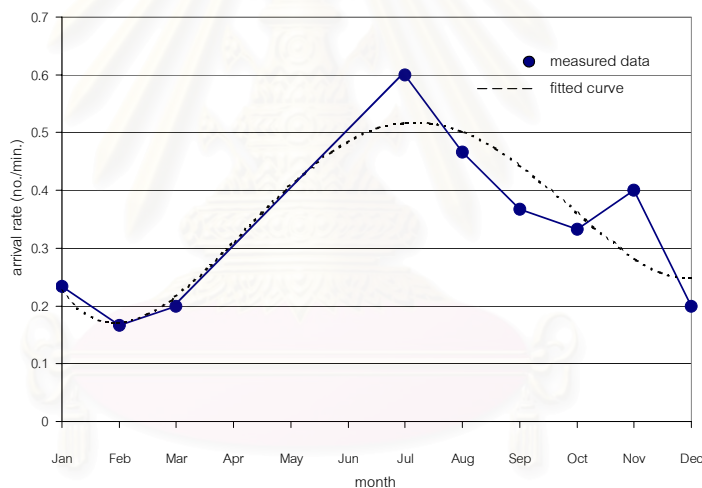


รูป 4.22 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า  $-123$  dBm ในรอบ 1 วันของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร

ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพรเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ใช้กำลังส่งต่ำเป็นเหตุให้อัตราการมาถึงของรอยทางเดินมีค่าน้อย โดยค่าที่คำนวณได้น้อยกว่า 1 รอยทางเดินต่อนาที นอกจากนี้ผลการตรวจวัดยังแสดงให้เห็นว่าในช่วง 16 – 17 นาฬิกาเป็นช่วงที่อัตราการมาถึงมีค่าต่ำมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความยาวนานดังกล่าวเป็นช่วงที่ระดับสัญญาณรบกวนที่ภาครับมีค่าสูงใกล้เคียงกับระดับจุดเริ่มเปลี่ยน ทำให้ไม่สามารถแยกสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกออกจากสัญญาณรบกวนได้ อย่างไรก็ตามการนำค่าอัตราการมาถึงของรอยทางเดินไปใช้งานจะใช้ค่าที่ได้จากเส้นโค้งเข้ารูปของกลุ่มจุดข้อมูลซึ่งแสดงเป็นเส้นประในรูป 4.22 เมื่อพิจารณาจากเส้นโค้งเข้ารูปนี้จะเห็นได้ว่าอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุในรอบ 1 วันมีลักษณะคล้ายรูปสัญญาณไซน์โดยมีค่าสูงที่สุดที่เวลาประมาณ 3 นาฬิกาซึ่งเลื่อนขึ้นจากค่าที่กล่าวในหัวข้อ 2.4.1 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและมีค่าต่ำที่สุดที่เวลาประมาณ 15 นาฬิกาซึ่งเลื่อนขึ้นจากค่าที่กล่าวในหัวข้อ 2.4.1 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเช่นกัน สาเหตุที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันต่างไปจากทฤษฎี 3 ชั่วโมงน่าจะเป็นเพราะลักษณะการกระจายทิศทางที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกสัมพันธ์กับแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงทำให้อัตราการพุ่งเข้ามีลักษณะดังรูป 4.22 ขณะที่ทฤษฎีที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.4.1 พิจารณาเฉพาะจำนวนเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกเมื่อประมาณว่าการกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกมีลักษณะคงตัว โดยไม่คำนึงถึงความสามารถของการกระเจิงคลื่นวิทยุของเทหวัตถุเหล่านั้น

#### 4.4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ตามฤดูกาล

การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุตามฤดูกาลแสดงดังรูป 4.23 โดยข้อมูลที่ใช้ในรูปเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงหลายข่าย ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะสื่อสารและกำลังส่ง ต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่ภายใต้ค่าปัจจัยฐานเดียวกันก่อน ค่าปัจจัยฐานที่ใช้เปรียบเทียบข้อมูลคือค่า-ปัจจัยต่างๆ ของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพร แม้ว่าจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงหลายข่ายในการแสดงการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลแล้วก็ตาม แต่ข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมดก็ยังไม่ครบรอบ 1 ปี ดังนั้นอัตราการมาถึงในเดือนที่ไม่มีข้อมูลจากการตรวจวัดจึงประมาณโดยอาศัยเส้นโค้งเข้ารูปลูกุ่มจุดข้อมูลที่มีอยู่ อัตราการมาถึงที่ได้จากการตรวจวัดและเส้นโค้งเข้ารูปลูกุ่มจุดข้อมูลที่มีอยู่



รูป 4.23 การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินมีระดับมากกว่า  $-123$  dBm ณ เวลา 0 นาฬิกา ในรอบ 1 ปี สำหรับข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสาร 400 กิโลเมตร

ข้อมูลเชิงสถิติทั้ง 4 รูปแบบที่แสดงในหัวข้อนี้จะใช้เป็นข้อมูลฐานในการทำนายลักษณะสมบัติเชิงสถิติของการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองขณะที่ลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเพียงเดี่ยวนั้นจะวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นขั้นๆ รายละเอียดในเรื่องนี้จะกล่าวในบทถัดไป

## บทที่ 5

### แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่การกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ผลเปรียบเทียบระหว่างลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การศึกษาลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบสามารถแสดงลักษณะสมบัติการกระเจิงได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจริง โดยเฉพาะรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เส้นอยู่ในบริเวณการเปลี่ยนผ่าน ขณะที่แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงได้ แบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ และกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ ประกอบกับข้อมูลเชิงสถิติจึงเหมาะที่จะประกอบกันเป็นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่สามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านพิกัดละติจูดที่เป็นแหล่งข้อมูลเชิงสถิตินั้นได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีโดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในบทที่ 3 และผลการตรวจวัดที่กล่าวถึงในบทที่ 4 โดยขอบเขตและลักษณะของแบบจำลอง กรรมวิธีพัฒนาแบบจำลองและตัวแบบจำลอง การทดสอบแบบจำลอง และการประยุกต์ใช้แบบจำลองจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้

#### 5.1 ขอบเขต และลักษณะของแบบจำลอง

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ประกอบขึ้นจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของการกระเจิงและข้อมูลการตรวจวัดมีพื้นฐานมาจากข้อสมมติที่ใช้ในการวิเคราะห์ กล่าวคือสมมติให้ค่าปัจจัยบางประการเป็นค่าคงตัว ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงจึงมีเพียงความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เส้น แบบแผนของคลื่นและแนวการวางตัวของรอยทางเดิน การสมมติในลักษณะดังกล่าวอาจทำให้การแปลความหมายจากลักษณะของคลื่นกระเจิงในงานประยุกต์ที่ต้องทราบลักษณะสมบัติที่แท้จริงเช่น การศึกษาทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าสู่โลกของดาวตก หรือการศึกษาอื่นๆ ในเชิงดาราศาสตร์เกี่ยวกับดาวตก เกิดความผิดพลาดได้ อย่างไรก็ตามข้อสมมตินี้ไม่น่าจะมีผลต่อลักษณะสมบัติที่จำเป็นในการวิเคราะห์สมรรถนะของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ประโยชน์ในเชิงการสื่อสารข้อมูล แม้ว่า

กรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบที่ใช้ร่วมกับแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จะสามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกได้ในทุกลักษณะหากทราบค่าปัจจัยทุกตัว แต่จากข้อสมมติที่ใช้ทำให้ต้องจำกัดขอบเขตและลักษณะของแบบจำลองที่ประกอบขึ้นจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติคลื่นกระเจิงและข้อมูลการตรวจวัดไว้ดังนี้

### 5.1.1 ขอบเขตของแบบจำลอง

พิจารณาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดและข้อสมมติที่ใช้วิเคราะห์ขอบเขตของแบบจำลองจึงถูกจำกัดไว้ดังนี้

1. ข้อมูลการตรวจวัดที่ใช้ในแบบจำลองเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากชายเชื่อมโยงหลายชายในเวลาที่แตกต่างกัน โดยชายเชื่อมโยงแต่ละชายมีลักษณะสมบัติพื้นฐาน เช่น ระยะสื่อสารและแนวการวางตัวของชายเชื่อมโยงต่างกันด้วย ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวที่ใช้ในแบบจำลองจึงได้มาจากการเปรียบเทียบข้อมูลเหล่านี้โดยอาศัยแนวคิดจากแบบจำลองเชิงสัดสวน (Weitzen, 1986) ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงผลของแนวการวางตัวของชายเชื่อมโยงต่อตำแหน่งปรากฏและแนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตก ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงและข้อมูลจากการตรวจวัดนี้จึงเป็นแบบจำลองสำหรับชายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกที่อยู่ในซีกโลกเหนือ บริเวณละติจูดต่ำ โดยไม่ได้คำนึงถึงแนวการวางตัวของชายเชื่อมโยง แม้ว่าแนวการวางตัวนี้จะมีผลต่อตำแหน่งปรากฏและแนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตกดังที่กล่าวในข้างต้นแล้วก็ตาม
2. ค่าปัจจัยบางประการเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่และพิกัดของตำแหน่งกระเจิงซึ่งจะเป็นตัวที่กำหนดค่ามุมกระเจิง เป็นต้น เป็นปริมาณที่ไม่ทราบค่าที่แน่นอน การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจึงอาศัยข้อสมมติในการกำหนดค่าปัจจัยดังกล่าว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงและข้อมูลจากการตรวจวัดนี้จึงไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้ความสามารถในการกระเจิงคลื่นวิทยุของรอยทางเดินของดาวตกบางประการที่ต้องอาศัยการแปลความหมายจากลักษณะของคลื่นกระเจิง เช่น การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับใช้วิเคราะห์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของบรรยากาศชั้นบน เป็นต้น เพราะอาจเกิดความผิดพลาดในการแปลความหมายได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้ทำนายลักษณะสมบัติบางประการใน



เชิงการสื่อสารข้อมูลได้ เช่น ลักษณะการแจกแจงความยาวนานของคลื่นกระเจิง เป็นต้น

### 5.1.2 ลักษณะของแบบจำลอง

แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติคลื่นกระเจิงและข้อมูลจากการตรวจวัดนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแบบจำลองที่สามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำตลอดช่วงเวลาในรอบ 1 ปี ดังนั้นแบบจำลองจึงประกอบด้วย 2 ส่วนดังนี้

ก. แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก รอยเดียว

แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก รอยเดียวนี้เป็นแบบจำลองที่แสดงกำลังรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก แบบจำลองนี้ขยายมาจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงด้วยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ที่ใช้ร่วมกับกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ เกี่ยวกับระบบสื่อสาร เช่น อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ กำลังส่ง เป็นต้น ร่วมด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับของคลื่นกระเจิงและสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบที่กล่าวในบทที่ 3 จะแสดงในหัวข้อถัดไป

จุดเด่นของแบบจำลองนี้อยู่ที่ความต่อเนื่องในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติคลื่นกระเจิงที่ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้น ทำให้สามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์อยู่ในย่านการเปลี่ยนผ่านได้ดีกว่าการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงซึ่งที่ไม่มีความต่อเนื่องในการวิเคราะห์ไม่ว่าจะใช้เกณฑ์ใดในการกำหนดขอบเขตระหว่างแบบจำลองทั้งสอง ผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบสื่อสารผ่านดาวตก (Dheerasak Anantakul and Chatchai Waiyapattanakorn, 2000) แสดงให้เห็นว่าลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินและประโยชน์ต่อช่องสัญญาณ ไม่ได้มาจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำตามที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ เป็นเหตุผลที่ช่วยเสริมให้แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น

ข. แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก  
แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิตินี้เป็นแบบจำลองที่แสดงลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกของข่ายเชื่อมโยงใดๆ ที่อยู่ในซีกโลกเหนือ บริเวณละติจูดต่ำ แบบจำลองนี้อาศัยข้อมูลลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เส้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร ณ เดือนพฤศจิกายน เวลา 0.00 – 1.00 นาฬิกาเป็นข้อมูลอ้างอิง การหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติของข่ายเชื่อมโยงใดๆ ที่เดือนและเวลาต่างๆ ทำโดยการปรับเทียบค่าปัจจัยของระบบสื่อสาร ประกอบกับการปรับเทียบอัตราการมาถึงไปยังเดือนและเวลาที่ต้องการ ดังนั้นแบบจำลองเชิงสถิตินี้จึงอาศัยแนวคิดในลักษณะเดียวกับแบบจำลองเชิงสัดส่วน แต่การหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติอื่นๆ อาศัยลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เส้นแทนที่จะเป็นลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดเหมือนดังแบบจำลองอื่นที่สมมติให้ลักษณะสมบัติเชิงเดียวเป็นแบบผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำทั้งหมด โดยไม่คำนึงถึงค่าความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์เส้น

กรรมวิธีสร้างแบบจำลองและตัวแบบทั้ง 2 ส่วนตามลักษณะที่กล่าวมานั้น มีรายละเอียดดังนี้

## 5.2 กรรมวิธีสร้างแบบจำลองและแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ

แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในเชิงเดี่ยวอาศัยพื้นฐานจากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ ส่วนแบบจำลองในเชิงสถิติอาศัยพื้นฐานจากการปรับเทียบค่าปัจจัยต่างๆ กับข้อมูลอ้างอิง รายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองทั้งสองส่วนแยกแสดงตามหัวข้อดังนี้

### 5.2.1 แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก รอยเดี่ยว

แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกรอยเดี่ยวเป็นแบบจำลองที่แสดงกำลังรับคลื่นกระเจิงโดยพิจารณาค่าปัจจัยต่างๆ ของระบบสื่อสารไว้ด้วย แบบจำลองนี้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับและสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่วิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองรอยทางเดินเป็นขั้นๆ ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในบทที่ 3 ซึ่งแสดงได้ด้วยชุดสมการต่อไปนี้

กำลังรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตรอยเดี่ยวแสดงได้ด้วยสมการ (4.1) ซึ่งนำมาแสดงใหม่ดังนี้

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^3 R_T^2 R_R^2} \sigma \quad (5.1)$$

โดยที่  $P_T$ ,  $P_R$ ,  $G_T$ ,  $G_R$ ,  $R_T$  และ  $R_R$  คือกำลังที่สายอากาศส่ง กำลังที่สายอากาศรับ อัตราขยายของสายอากาศส่ง อัตราขยายของสายอากาศรับตามลำดับ ระยะทางจากตัวกระเจิงมายังสายอากาศส่งและสายอากาศรับตามลำดับ

$\lambda$  คือความยาวคลื่นปฏิบัติการ

และ  $\sigma$  คือภาคตัดขวางเรดาร์ทวิสถิต (bistatic radar cross section) ของรอยทางเดิน

ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสนามกระเจิงและสนามตกกระทบดังนี้ (Balanis, 1989)

$$\sigma = \lim_{R_R \rightarrow \infty} 4\pi R_R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (5.2)$$

เมื่อ  $E^s$  และ  $E^i$  คือสนามกระเจิงและสนามตกกระทบตามลำดับ โดยสนามทั้งสองมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $g$  ดังสมการ

$$\frac{|E^s|}{|E^i|} = \sqrt{\frac{2}{\pi k R_R}} g \quad (5.3)$$

โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $g$  เป็นผลที่ได้จากตัวกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ ดังที่กล่าวในบทที่ 3 และมีค่าดังสมการ (3.43)

ผลการวิเคราะห์ที่ใช้เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากชายเชื่อมต่อทอดสอบที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.3.2 ได้มาจากความสัมพันธ์ตามชุดสมการข้างต้น แม้ว่าแบบจำลองนี้จะมีจุดเด่นในเรื่องความต่อเนื่องในการวิเคราะห์และให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับลักษณะของคลื่นกระเจิงที่รับได้มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง แต่แบบจำลองนี้ใช้เวลาคำนวณนานกว่ามาก อย่างไรก็ตาม

จุดด้อยนี้สามารถชดเชยได้ด้วยการคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามสมการ (3.43) ว่างล่วงหน้าและเก็บเป็นฐานข้อมูลไว้ เนื่องจากสมการดังกล่าวนั้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเวลาในรูป  $(ka)^2$  จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คำนวณได้เป็นอิสระ ไม่ขึ้นกับความถี่ปฏิบัติการและค่าปัจจัยอื่นๆ ของระบบสื่อสาร

### 5.2.2 แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน

#### ของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ

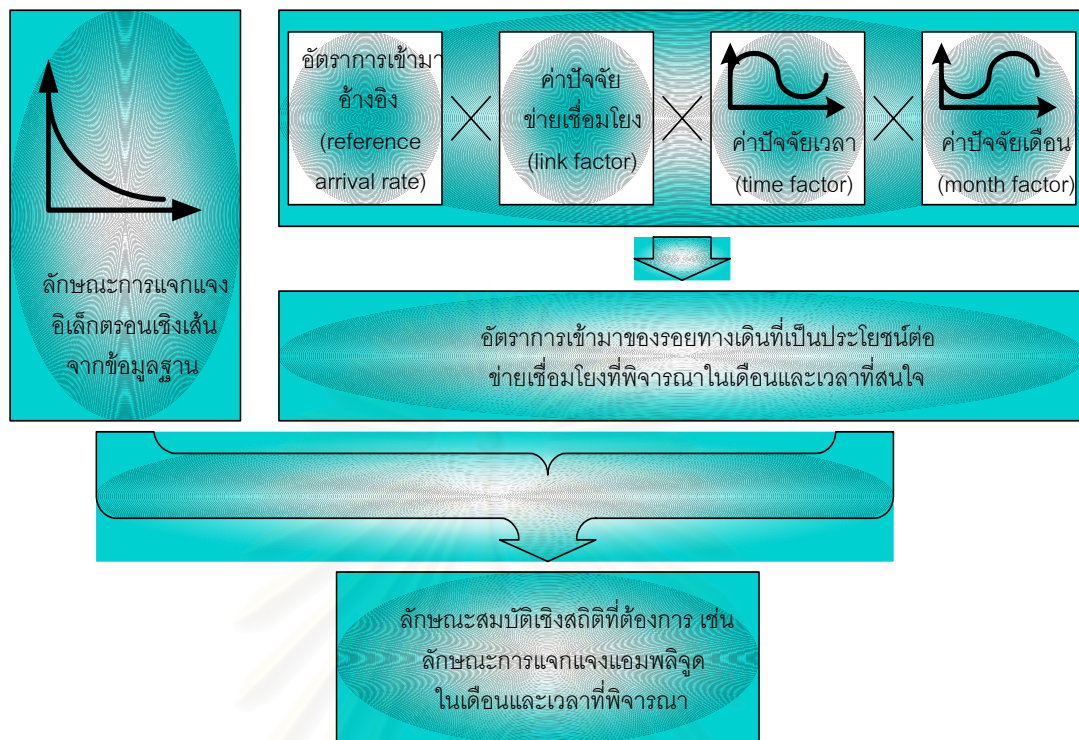
แบบจำลองเชิงสถิตินี้เป็นแบบจำลองที่แสดงลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในบริเวณละติจูดต่ำโดยอาศัยข้อสมมติว่าลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นในรูปการแจกแจงความหนาแน่นอเล็กตรอนเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะพิจารณาในเวลาและเดือนใด โดยลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงนี้ได้มาจากข้อมูลชุดเดียวกับที่ใช้วิเคราะห์หาลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดและลักษณะการแจกแจงความยาวนานที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.1 และ 4.4.2 ตามลำดับ ขณะที่อัตรา การมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงคำนวณโดยเปรียบเทียบกับอัตรา การมาถึงอ้างอิง (reference arrival rate) ซึ่งเป็นอัตราการมาถึงในเวลา 0.00 – 1.00 นาฬิกาเดือนพฤศจิกายนของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร ค่าปัจจัยที่ใช้เปรียบเทียบมี 3 ประการคือ ค่าปัจจัยข่ายเชื่อมโยง (link factor) ค่าปัจจัยเวลา (time factor) และค่า ปัจจัยเดือน (month factor) อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่าย เชื่อมโยงที่พิจารณาในเดือนและเวลาที่สนใจแสดงด้วยสมการดังนี้

$$AR = AR_R \times L \times T \times M \quad (5.4)$$

โดยที่  $AR$  และ  $AR_R$  เป็นอัตราการมาถึงที่พิจารณาและอัตราการมาถึงอ้างอิงตามลำดับ และ  $L$ ,  $T$  และ  $M$  เป็นค่าปัจจัยข่ายเชื่อมโยง ค่าปัจจัยเวลา และค่าปัจจัยเดือนตามลำดับ

จากอัตราการมาถึงรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาในเดือนและเวลาที่สนใจ และลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอเล็กตรอนเชิงเส้นที่ได้ สามารถนำไปใช้หา ลักษณะสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการเช่น ลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดได้ ตามแผนภาพกรรมวิธี สร้างแบบจำลองเชิงสถิติดังรูป 5.1





รูป 5.1 กรรมวิธีสร้างแบบจำลองเชิงสถิติ

รายละเอียดเกี่ยวกับค่าปัจจัยทั้ง 3 ประการที่แสดงในแบบจำลองมีดังนี้

ค่าปัจจัยข่ายเชื่อมโยงเป็นค่าที่ปรับเทียบค่าปัจจัยต่างๆ ของระบบสื่อสารเช่นกำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จากข่ายเชื่อมโยงอ้างอิงมาสู่ข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณา โดยค่าปัจจัยข่ายเชื่อมโยงมีค่าดังนี้

$$L = \frac{P_T G_T G_R T_R' f'^3 R'^3}{P_T' G_T' G_R' T_R f^3 R^3} \quad (5.5)$$

โดยที่  $P_T$ ,  $G_T$ ,  $G_R$ ,  $T_R$ ,  $f$  และ  $R$  หมายถึง กำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศส่ง อัตราขยายของสายอากาศรับ ระดับกำลังต่ำสุดที่ภาครับสามารถรับได้ ความถี่ปฏิบัติการ

และระยะจากสายอากาศถึงตำแหน่งกระเจิง (จุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ระดับความสูงเหนือพื้นโลก 95 กิโลเมตร) ตามลำดับ เครื่องหมาย “ ' ” บนค่าปัจจัยแต่ละตัวแสดงว่าค่าปัจจัยนั้นเป็นค่าปัจจัยของข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง



ค่าปัจจัยเวลาและค่าปัจจัยเดือนเป็นค่าที่ได้จากเส้นโค้งเข้ารูปของรูป 4.22 และรูป 4.23 แสดงสรุปไว้ในตาราง 5.1 และตาราง 5.2 ตามลำดับ โดยจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้แสดง การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันดังรูป 4.22 มีมากกว่า 200 ตัวอย่างข้อมูล ขณะที่ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ แสดงการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลดังรูป 4.23 มีมากกว่า 160 ตัวอย่างข้อมูล

ตาราง 5.1 ค่าปัจจัยเวลา

เวลา	ค่าปัจจัยเวลา ( $T$ )
0.00 – 1.00	1.00
1.00 – 2.00	1.50
2.00 – 3.00	1.77
3.00 – 4.00	1.90
4.00 – 5.00	1.87
5.00 – 6.00	1.77
6.00 – 7.00	1.60
7.00 – 8.00	1.33
8.00 – 9.00	1.10
9.00 – 10.00	0.87
10.00 – 11.00	0.63
11.00 – 12.00	0.43
12.00 – 13.00	0.30
13.00 – 14.00	0.17
14.00 – 15.00	0.13
15.00 – 16.00	0.13
16.00 – 17.00	0.17
17.00 – 18.00	0.27
18.00 – 19.00	0.37
19.00 – 20.00	0.50
20.00 – 21.00	0.67
21.00 – 22.00	0.83
22.00 – 23.00	0.97
23.00 – 0.00	1.00

ตาราง 5.2 ค่าปัจจัยเดือน

เวลา	ค่าปัจจัยเดือน ( $M$ )
มกราคม	0.82
กุมภาพันธ์	0.61
มีนาคม	0.71
เมษายน	1.07
พฤษภาคม	1.43
มิถุนายน	1.71
กรกฎาคม	1.86
สิงหาคม	1.79
กันยายน	1.61
ตุลาคม	1.29
พฤศจิกายน	1.00
ธันวาคม	0.89

ค่าปัจจัยเวลาและค่าปัจจัยเดือนตามตาราง 5.1 และ 5.2 เป็นค่าที่คำนวณจากข้อมูลการตรวจวัดในงานวิจัยนี้เท่านั้น ค่าดังกล่าวจึงอาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการตรวจวัดเพิ่มขึ้น

แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกทั้งในส่วนแบบจำลองเชิงเดี่ยวและแบบจำลองเชิงสถิติที่ได้ สามารถใช้เป็นแบบจำลองสำหรับย่านละติจูดต่ำ (ซีกโลกเหนือ) ได้เนื่องจากลักษณะของคลื่นกระเจิงที่วิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบมีความใกล้เคียงกับลักษณะคลื่นกระเจิงที่รับได้จากการตรวจวัด และลักษณะสมบัติเชิงสถิติที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงก็เป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในประเทศไทยซึ่งมีพื้นที่ทั้งประเทศอยู่ในซีกโลกเหนือ ย่านละติจูดต่ำ เพื่อที่จะทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองทั้งสองส่วนจำเป็นต้องมีการทดสอบการใช้งานแบบจำลองรายละเอียดของ การทดสอบแบบจำลองกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 5.3 การทดสอบแบบจำลอง

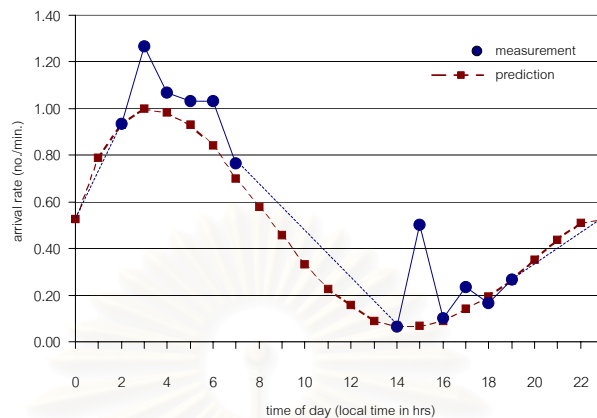
การทดสอบแบบจำลองในส่วนแบบจำลองเชิงเดี่ยวหรือแบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวกระทำโดยเปรียบเทียบลักษณะของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการวิเคราะห์กับคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัด เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบ

ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลจากการตรวจวัดที่แสดงในหัวข้อ 4.3.2 ส่วนการทดสอบแบบจำลองเชิงสถิติจะทำโดยเปรียบเทียบอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อชายเชื่อมโยงในรอบ 1 วันที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยสมการ (5.4) และ (5.5) ประกอบกับค่าปัจจัยเวลาและค่าปัจจัยเดือนที่แสดงในตาราง 5.1 และ 5.2 กับสถิติที่ได้จากการตรวจวัด โดยการตรวจวัดครั้งที่น่ามาใช้ทดสอบแบบจำลองคือการตรวจวัดครั้งที่ 11 (การตรวจวัดโดยใช้ชายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครศรีธรรมราช เดือนกันยายน 2544) และครั้งที่ 14 (การตรวจวัดโดยใช้ชายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครราชสีมา เดือนกุมภาพันธ์ 2545) ตามตาราง 4.1 การตรวจวัดทั้ง 2 ครั้งดังกล่าวนี้เป็นครั้งที่ไม่ได้นำผลการตรวจวัดมารวมกับผลการตรวจวัดครั้งอื่นๆ เพื่อหาค่าปัจจัยเดือน ทั้งนี้เพราะมีผลการตรวจวัดในเดือนดังกล่าวแล้ว

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองและผลการตรวจวัดในส่วนแบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตรอยเดี่ยวได้ผลในลักษณะเดียวกันกับการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดที่แสดงในหัวข้อ 4.3.2 กล่าวคือสามารถหาผลการวิเคราะห์ที่ให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดที่จำแนกโดยการสังเกตได้ว่าเป็นคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการแกว่ง (คลื่นวิทยุในกลุ่ม ก. - ง. ตามหัวข้อ 4.3.2) ได้มากกว่า 0.8 ทั้งสองชาย จึงไม่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในที่นี้ ขณะที่ผลการทดสอบแบบจำลองเชิงสถิติแยกแสดงตามชายเชื่อมโยงที่ใช้ทดสอบดังนี้

### 5.3.1 ชายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครศรีธรรมราช เดือนกันยายน 2544

การทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยชายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครศรีธรรมราช ในเดือนกันยายน พ.ศ. 2544 ดำเนินการในระหว่างวันที่ 22 - 24 โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง คือ เวลา 2.00 - 8.00 นาฬิกา และ 14.00 - 20.00 นาฬิกา สถิติในรูปของค่าเฉลี่ยของอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อชายเชื่อมโยงจากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองเชิงสถิติแสดงดังรูป 5.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์เฉพาะในช่วงที่มีข้อมูลการตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 0.95 แม้ว่าผลการตรวจวัดจากชายเชื่อมโยงจะมีไม่ครบ 24 ชั่วโมง แต่จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงสถิติดังสมการ (5.4) และ (5.5) สามารถแสดงลักษณะสมบัติเชิงสถิติได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด

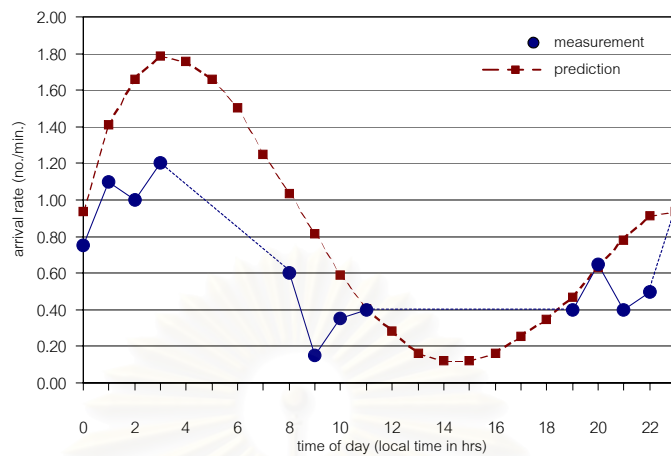


รูป 5.2 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า  $-123$  dBm ในรอบ 1 วันของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราช

เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจากรข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราชดังรูป 5.2 กับผลการตรวจวัดจากรข่ายเชื่อมโยงอ้าอิง (ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร) ดังรูป 4.22 จะเห็นได้ว่า อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองเป็นพิเศษที่เวลาประมาณ 3.00 – 5.00 นาฬิกาใกล้เคียงกันทั้งสองข่าย จากการตรวจสอบกำหนดการเกิดฝนดาวตก ไม่พบว่ามีฝนดาวตกในวันและเวลาดังกล่าว อัตราการมาถึงที่สูงเป็นพิเศษนี้จึงอาจเป็นลักษณะสมบัติตามธรรมชาติของการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาว-ตก สาเหตุประการหนึ่งที่น่าจะเป็นได้ของลักษณะสมบัตินี้คือ ดาวตกอาจพุ่งเข้าสู่โลกด้วยทิศทางที่เหมาะสมต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุมากที่สุดในเวลาดังกล่าว รายละเอียดในเรื่องนี้จำเป็นต้องศึกษาต่อไปในอนาคต

### 5.3.2 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมา เดือนกุมภาพันธ์ 2545

การทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมา ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545 ดำเนินการในระหว่างวันที่ 12 – 14 โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ช่วง คือ เวลา 0.00 – 4.00 นาฬิกา 8.00 – 12.00 นาฬิกา และ 19.00 – 23.00 นาฬิกา ค่าเฉลี่ยของอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงจากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองเชิงสถิติแสดงดังรูป 5.3 ผลคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์เฉพาะในช่วงที่มีข้อมูลการตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 0.85



รูป 5.3 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินมีระดับมากกว่า  $-123$  dBm ในรอบ 1 วันของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมา

เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราชดังรูป 5.2 กับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมาดังรูป 5.3 จะเห็นได้ว่าอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์แก่ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครศรีธรรมราชมีแนวโน้มที่จะมากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง ขณะที่กรณีข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – นครราชสีมาอัตราการมาถึงดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองอย่างเห็นได้ชัด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเปรียบเทียบอัตราการมาถึงตามกรรมวิธีที่ใช้ในแบบจำลองเชิงสถิติไม่ได้คำนึงถึงตำแหน่งกระเจิงสัญญาณและแนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตกจริง ขณะที่ข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสารน้อยกว่า 400 กิโลเมตรจะได้รับผลกระทบเนื่องจากจุดบอดในการกระเจิงคลื่นวิทยุซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการเช่น แนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตกที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น มีบริเวณกว้างกว่าข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะสื่อสารไกล (Brown, 1985; Weitzen, 1987; 1989; 1992)

เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสมบัติการกระเจิง เช่น โฟลาไรเซชันของคลื่นตกกระทบ คลื่นกระเจิง และสายอากาศรับ แนวการวางตัวของรอยทางเดิน มุมกระเจิง เป็นต้น การพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงตำแหน่งกระเจิงคลื่นวิทยุจริง ซึ่งเป็นเหตุให้ปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวมีค่าไม่คงที่ตามข้อสมมติที่ใช้ในแบบจำลอง การคำนึงถึงตำแหน่งกระเจิงคลื่นวิทยุจริงควรจะต้องมีแบบจำลองที่ดีเกี่ยวกับการโคจรและการกระจายความหนาแน่นของเทวดูดาวตกในอวกาศ รวมถึงอุปกรณ์การตรวจวัดที่สามารถให้ข้อมูลตำแหน่งกระเจิงและแนวการวางตัวของรอยทางเดินได้ ซึ่งเป็นเรื่องที่ต้องพัฒนาต่อไป



## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

ความสามารถในการกระเจิงคลื่นวิทยุของรอยทางเดินของดาวตคนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น ใช้เพื่อการสื่อสารข้อมูล หรือเพื่อศึกษาบรรยากาศชั้นบน เป็นต้น การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากความสามารถดังกล่าวจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่ดีในการทำนายลักษณะสมบัติเชิงเดี่ยวหรือลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยว และลักษณะสมบัติเชิงสถิติ เพื่อให้การประยุกต์ใช้นั้นเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในส่วนลักษณะสมบัติการกระเจิงเชิงเดี่ยว ปัญหาที่พบจากงานวิจัยที่ผ่านมาคือ ความไม่ต่อเนื่องในการแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวระหว่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองแบบประมาณ 2 แบบจำลองคือ แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ขณะที่คลื่นกระเจิงส่วนใหญ่ที่รับได้เป็นคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นอยู่ในย่านการเปลี่ยนผ่านจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำสู่อรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ซึ่งรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นในย่านดังกล่าวมีลักษณะสมบัติการกระเจิงร่วมกันระหว่างลักษณะที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองแบบประมาณทั้ง 2 แบบที่กล่าวข้างต้น เพื่อแก้ปัญหาความไม่ต่อเนื่องดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ซึ่งพิจารณารอยทางเดินของดาวตกว่าเป็นลำดับอิเล็กตรอนทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์หลายชั้นวางซ้อนอยู่บนแกนเดียวกันและมีลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแนวรัศมีเป็นแบบเกาส์เพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกด้วยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ

กรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบเป็นกรรมวิธีที่หาสนามกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจากสมการแมกซ์เวลล์โดยตรง ด้วยการแก้ปัญหาค่าขอบเขตระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอกรอยทางเดินซึ่งประกอบด้วยสนามตกกระทบและสนามกระเจิง กับสนามไฟฟ้าภายในรอยทางเดินผลเฉลยในเบื้องต้นจะอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของรอยทางเดินที่สมมติให้เป็นทรงกระบอกเอกพันธ์ จากนั้นจึงนำผลเฉลยดังกล่าวมาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีวนซ้ำเพื่อหาผลเฉลยของปัญหาการกระเจิงจากรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ต่อไป

เนื่องจากคลื่นวิทยุที่ตกกระทบบอยทางเดินแบ่งได้เป็น 2 แบบแผนคือคลื่น TM หรือคลื่นที่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับแกนของรอยทางเดิน และคลื่น TE หรือคลื่นที่มีเวกเตอร์สนาม-ไฟฟ้าตั้งฉากกับแกนของรอยทางเดิน ความเป็นทวิภาวะของคลื่นทั้งสองแบบแผนทำให้สามารถแสดงสมการของคลื่น TM และคลื่น TE พร้อมกันในรูปเมทริกซ์ สมการในรูปเมทริกซ์นี้สามารถแยกแยะองค์ประกอบของคลื่นกระเจิงเป็นองค์ประกอบที่ไม่มีการเชื่อมโยงและองค์ประกอบที่เกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างคลื่นทั้ง 2 แบบแผนได้ โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินเป็นชั้นๆ ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตรอยเดี่ยวโดยแปรค่าปัจจัยหลักสามประการที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงคือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น มุมกระเจิง และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน ผลของการแปรความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นต่อลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบสามารถแก้ปัญหาความไม่ ต่อเนื่องของผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองแบบประมาณทั้ง 2 แบบจำลองได้ นอกจากนี้การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงที่ ต่างกันเมื่อคลื่นตกกระทบบมีแบบแผนต่างกัน ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวไม่ปรากฏเมื่อวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบประมาณ เมื่อเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบกับผลที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำพบว่า ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำจะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบในกรณีคลื่น TM ตกกระทบบรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นน้อยกว่า  $10^{13}$  e/m ในลักษณะที่ตั้งฉากกับแกนของรอยทางเดินเท่านั้น ซึ่งเรขาคณิตของการกระเจิงในลักษณะดังกล่าวคือเรขาคณิตแบบเรดาร์หรือแบบการกระเจิงไปข้างหน้าที่รอยทางเดินวางตัวในแนวตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย ( $\beta = 90^\circ$ ) ขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงไม่มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบแม้ว่าจะได้เพิ่มค่า ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นจนถึง  $10^{15}$  e/m แล้วก็ตาม

ผลของการแปรค่ามุมกระเจิงเมื่อวิเคราะห์ด้วยกรณวิวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบพบว่าเมื่อระยะสื่อสารหรือมุมกระเจิงมีค่ามากขึ้น ความยาวนานของคลื่นกระเจิงจะมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบประมาณ อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของความยาวนานไม่ได้เท่ากับ  $\sec^2 \phi'$  เหมือนกรณีที่ใช้แบบจำลองแบบประมาณในการวิเคราะห์ ในส่วนการวิเคราะห์ผลของการแปรค่าแนวการวางตัวของรอยทางเดินพบว่า แอมพลิจูด

ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อแนวการวางตัวของรอยทางเดินทำให้เกิด การไม่เข้าคู่ของโพลาร์เซชันมากที่สุด โดยแนวการวางตัวในลักษณะดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อระยะสี่อสารหรือมุมกระเจิงมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ผลที่ได้นี้ขัดแย้งกับผลที่วิเคราะห์ด้วยแบบ-จำลองแบบประมาณซึ่งแสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดของคลื่นกระเจิงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อรอยทาง-เดินขนานกับระนาบการแพร่กระจายและจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อรอยทางเดินตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจาย

ผลการเปรียบเทียบลักษณะคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตรอยเดี่ยวที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดโดยอาศัยข่ายเชื่อมโยงทดสอบที่จัดสร้างขึ้นแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบสามารถแสดงลักษณะของคลื่นกระเจิงได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด โดยผลการตรวจวัดที่จำแนกจากการสังเกตได้ว่าเป็นคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการแกว่งจะสามารถหาผล-การวิเคราะห์ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลทั้งสองส่วนมากกว่า 0.8 ได้ ขณะที่การ-วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบประมาณไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด แม้ว่าผลการเปรียบเทียบดังกล่าวจะไม่ได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ก็ตาม

สำหรับลักษณะสมบัติเชิงสถิติ ข้อมูลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพร ได้ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการแสดงลักษณะการແจกແจงแอมพลิจูดสูงสุดและการແจกແจงความยาวนานของคลื่นกระเจิง และลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน ขณะที่ลักษณะการ-เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงทุกข่าย โดยเปรียบเทียบค่าปัจจัยต่างๆ ของข่ายเชื่อมโยงให้เข้ากับค่าปัจจัยของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ชุมพร งานวิจัยนี้ได้เสนอแบบจำลองเชิงสถิติที่ทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลด้วยการเปรียบเทียบกับข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง โดยค่าปัจจัยเวลาและค่าปัจจัยเดือนที่ใช้เปรียบเทียบได้มาจากเส้นโค้งเข้าสู่รูปของลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่เป็นข้อมูลอ้างอิงดังกล่าวข้างต้น

การทดสอบแบบจำลองเชิงสถิติทำโดยเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองและจากการตรวจวัด โดยการตรวจวัดที่ใช้ทดสอบแบบจำลองมี 2 ครั้ง คือ การตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครศรีธรรมราช เดือนกันยายน พ.ศ. 2544 และการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - นครราชสีมา เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์

เฉพาะเวลาที่มีการตรวจวัด เท่ากับ 0.95 และ 0.85 ตามลำดับ แม้ว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทั้งสองครั้งจะมีค่าสูง แต่แบบจำลองเชิงสถิตินี้จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาต่อไป ทั้งนี้เพราะจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและจำนวนครั้งในการทดสอบแบบจำลองยังมีอยู่น้อยจนไม่เหมาะสมที่จะใช้ยืนยันในสมรรถนะของแบบจำลอง นอกจากนี้ข้อสมมติที่ใช้ในแบบจำลองอาจไม่สอดคล้องกับลักษณะการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจริงอีกด้วย ซึ่งรายละเอียดในเรื่องนี้จำเป็นต้องศึกษาต่อไปในอนาคต

### ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำที่ได้ควรจะได้รับ การปรับปรุงทั้งในส่วนการวิเคราะห์และส่วนการเปรียบเทียบกับ การตรวจวัดของทั้งแบบจำลองเชิงเดี่ยวและแบบจำลองเชิงสถิติดังนี้

1. การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยตรง
  - ก. แม้ว่ากรวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจะสามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด แต่การเปรียบเทียบเทียบดังกล่าวอาศัยข้อสมมติเกี่ยวกับตำแหน่งกระเจิง มุมกระเจิง และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่สามารถทราบค่าได้โดยอาศัยอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีอยู่ในปัจจุบัน แนวทางการตรวจวัดที่อาจทำให้การประมาณค่าปัจจัยดังกล่าวข้างต้นมีค่าใกล้เคียงจริงมากขึ้นที่เป็นไปได้มีดังนี้
    - ก. ดำเนินการตรวจวัดในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์ฝนดาวตกในกลุ่มที่ทราบ radiant และทิศทางที่ดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก
    - ข. ดำเนินการตรวจวัดโดยใช้ข่ายเชื่อมโยงที่มีเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ เพื่อให้มุมกระเจิงเท่ากับ  $0^\circ$  ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการลดค่าปัจจัยที่แปรเปลี่ยนได้
    - ค. ดำเนินการตรวจวัดโดยใช้ข่ายเชื่อมโยง 2 ข่ายพร้อมกัน โดยข่ายหนึ่งเป็นข่ายที่มีเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ ขณะที่อีกข่ายมีเรขาคณิตของการกระเจิงแบบการกระเจิงไปข้างหน้า และเลือกวิเคราะห์เฉพาะคลื่นวิทยุที่รับได้พร้อมกันทั้งสองข่ายเนื่องจากสามารถคำนวณตำแหน่งกระเจิงคลื่นวิทยุและมุมกระเจิงได้
2. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยตรง

การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบใช้เวลาคำนวณมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบประมาณ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้จึงควรทำฐานข้อมูลของผลคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามสมการ (3.43) ไว้ล่วงหน้า เนื่องจากสมการดังกล่าวนั้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเวลาในรูป  $(ka)^2$  ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คำนวณได้เป็นอิสระ ไม่ขึ้นกับความถี่ปฏิบัติการและค่าปัจจัยอื่นๆ ของระบบสื่อสาร

### 3. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

แบบจำลองเชิงสถิติที่ได้จากงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแบบจำลองเชิงสัดส่วน การทำนายลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกของชายเชื่อมโยงทำได้โดยอาศัยการปรับเทียบค่าปัจจัยต่างๆ กับข้อมูลอ้างอิง ซึ่งจำนวนข้อมูลที่นำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงควรมีมากกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ข้อมูลลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลควรได้มาจากการตรวจวัดโดยอาศัยชายเชื่อมโยงเดียวกันตลอดทั้งปีด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดำเนินการตรวจวัดเพิ่มเติม ในกรณีที่สามารถทราบตำแหน่งกระเจิง มุมกระเจิง และแนวการวางตัวของรอยทางเดินจากการตรวจวัด ข้อมูลดังกล่าวควรนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติด้วย

นอกจากการพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติโดยการเพิ่มจำนวนข้อมูลอ้างอิงแล้ว การพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติยังสามารถทำได้อีกหนึ่งแนวทางคือ การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเชิงสถิติโดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างแนวการวางตัวของชายเชื่อมโยงกับลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นของตำแหน่งปรากฏรอยทางเดินและทิศทางที่ดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก (Brown, 1985; Schilling, 1993) การวิเคราะห์ในแนวทางนี้ต้องอาศัยข้อมูลหรือแบบจำลองเกี่ยวกับการโคจรของเทหวัตถุดาวตกในอวกาศ และความสัมพันธ์กับการหมุนรอบตัวเองและการโคจรของโลก ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะทำให้สามารถทำนายลักษณะสมบัติเชิงสถิติโดยไม่จำกัดว่าชายเชื่อมโยงตั้งอยู่ ณ พิกัดใด การวิเคราะห์ในแนวทางนี้จึงนับเป็นเรื่องที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต



## รายการอ้างอิง

- Abou-Zeid, S.; El-Sherbini, A.; and El-Soudani, M. 1989. Meteor burst data communication for the Nile River irrigation system. Proc. Integrating Research, Industry and Education in Energy and Communication Engineering (MELECON '89): 644 –648.
- Balanis, C. A. 1989. Advanced engineering electromagnetics. New York: John Wiley & Sons
- Brown, D. W. 1985. A physical meteor-burst propagation model and some significant results for communication system design. IEEE J. Selected Area in Communications. 3: 745-755.
- Brysk, H., and Buchanan, M. L. 1965. Scattering by a cylindrical Gaussian potential: exact solution. Can. J. Phys. 43: 28-37.
- Chew, W. C. 1995. Waves and fields in inhomogeneous media. New York: IEEE Press.
- Dheerasak Anantakul, and Chatchai Waiyapattanakorn. 2000. The throughput performance of meteor burst link using the derived PDF of the decay constant. Proc. the 4th International Wireless and Telecommunications Symposium (IWTS2000): 147-150. Subang Jaya, Malaysia.
- Eshleman, V. R. 1955. Theory of radio reflections from electron-ion clouds. IRE Trans. AP. 3: 32-39.
- Glover, I. A. 1991. Meteor burst communications – I: Meteor burst propagation. Electronics & Communication Engineering Journal. 3: 185 –192.
- Hines, C. O., and Forsyth, P. A. 1957. The forward-scattering of radio waves from overdense meteor trails. Can. J. Phys. 35: 1033-1041.
- Hoff, J. A. 1988. The utility of meteor burst communications. Military Communications Conference (MILCOM '88): 565-570.
- Jones, J., and Collins, J. G. 1974. On the validity of certain approximations in radio meteor echo theory. Mon. Not. R. Astr. Soc. 168: 433-449.

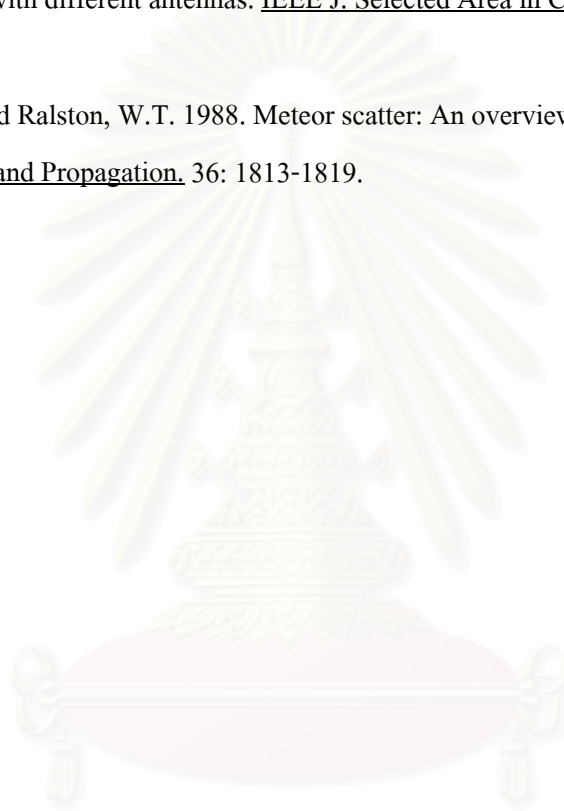
- Jones, W., and Jones, J. 1990. Oblique scattering of radio waves from meteor trains: Theory. Planet. Space. Sci. 38: 55-66.
- Kaiser T. R., and Closs, R. L. 1952. Theory of radio reflections from meteor trails: I. Phil. Mag. 43 : 1-32.
- Keitel, G. H. 1955. Certain mode solutions of forward scattering by meteor trails. Proc. IRE. 43: 1481-1488.
- Kong, J. A. 1975. Theory of electromagnetic waves. New York: John Wiley & Sons.
- Manning, L. A. 1953. The strength of meteoric echoes from dense columns. J. Atmos. Terr. Phys. 4: 219-225.
- Manning, L. A. 1959. Oblique echoes from over-dense meteor trails. J. Atmos. Terr. Phys. 14: 82-93.
- Manning, L. A., and Eshleman, V. R. 1958. Meteors in the ionosphere. Proc. IRE. 46: 186-199.
- Mawrey, R. S., and Weitzen, J. A. 1995. Measured performance of meteor burst systems using antenna beam steering. IEEE Trans. Communications. 43:1467-1476.
- McKinley, D. W. R. 1961. Meteor science and engineering. New York: McGraw-Hill.
- Poulter, E. M., and Baggaley, W. J. 1977. Radio wave scattering from meteoric ionization J. Atmos. Terr. Phys. 39: 757-768.
- Poulter, E. M., and Baggaley, W. J. 1978. The application of radio-wave scattering theory to radio-meteor observations. Planet Space Sci. 26: 969-977.
- Schaner, J. Z. 1990. Meteor burst communications. Norwood MA: Artech House.
- Schilling, D. L., ed. 1993. Meteor burst communications: Theory and practice. New York: John Wiley & Sons.
- Sugar, G. R. 1964. Radio propagation by reflection from meteor trails. Proc. IEEE. 52: 116-136.
- Wait, J. R. 1955. Scattering of a plane wave from a circular dielectric cylinder at oblique incidence. Can. J. Phys. 33: 189-195.
- Weitzen, J. A. 1986. Predicting the arrival of meteors useful for meteor burst communication. Radio Sci. 21: 1009-1020
- Weitzen, J. A. 1987. Communicating via meteor burst at short ranges. IEEE Trans.

Communications, 35: 1217-1221.

Weitzen, J. A. 1989. Effects of polarization coupling loss mechanism on design of meteor scatter antennas for short and long range communication. Military Communications Conference (MILCOM '89): 428-432.

Weitzen, J. A. 1992. Performance of short- and long-range meteor burst communication systems with different antennas. IEEE J. Selected Area in Communications, 10: 491-496.

Weitzen, J. A., and Ralston, W.T. 1988. Meteor scatter: An overview. IEEE Trans. Antenna and Propagation, 36: 1813-1819.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

### สำเนาหนังสืออนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุและเครื่องวิทยุคมนาคม

การตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกด้วยการทดลองส่งและรับคลื่นวิทยุโดยอาศัยชายเชื่อมโยงที่จัดสร้างขึ้นต้องขออนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ดูแลรับผิดชอบการใช้ทรัพยากรความถี่วิทยุในประเทศไทยในปัจจุบัน การขออนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุและเครื่องวิทยุคมนาคมจากกรมไปรษณีย์โทรเลขได้ดำเนินการเป็นรายปีนับตั้งแต่นั้นปี พ.ศ. 2542 จนถึงปี พ.ศ. 2545 ข้อมูลเกี่ยวกับการได้รับอนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุในการทดลองตรวจวัดสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแสดงในสำเนาหนังสืออนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุและเครื่องวิทยุคมนาคมดังรูป ก.1 - ก.3



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ที่ ศค 0704(ก.1) 16๕๕,

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
สำนักงานอธิการบดี กองกลาง  
แผนกสารบรรณ  
ว.ค.ป.๒๒.ก.๖.๒๒.๖๖๖ 4.00  
ที่ 1107.

กรมไปรษณีย์โทรเลข  
กรุงเทพมหานคร 10400

16 กุมภาพันธ์ 2542

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
แผนกสารบรรณ

เรื่อง อนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุเพื่อการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า 49 คน เวลา 10-11 น.  
วันที่ 203 วันที่ 676  
วันที่ 9/3/42

เรียน อธิการบดี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อ้างถึง หนังสือคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ มี.ป.308/๒๒๕-๒๖ วันที่ 27 ตุลาคม 2541

ตามหนังสือที่อ้างถึง แจ้งว่า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความประสงค์จะดำเนินการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาสายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกในประเทศไทย" ซึ่งมีความจำเป็นต่อองค์การส่งและรับคลื่นวิทยุในช่วง 50-54 MHz จึงมีความประสงค์ขอให้กรมไปรษณีย์โทรเลขพิจารณาอนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุในช่วงดังกล่าว เพื่อใช้ในการดำเนินการวิจัยข้างต้น ความละเอียดแจ้งแล้ว นั้น

กรมไปรษณีย์โทรเลขพิจารณาแล้ว อนุญาตให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งสถานีวิทยุคมนาคมทดลอง จำนวน 2 สถานี มีสัญญาณเรียกขาน (Call Sign) E22AZY และ E22AZZ ใช้ความถี่วิทยุจำนวน 5 ความถี่ คือ ความถี่วิทยุ 31,800 35,800 40,100 45,560 และ 49,100 MHz และใช้ความกว้างแถบคลื่นไม่เกิน 16 kHz เพื่อใช้งานส่วนรับการดำเนินงานโครงการวิจัยตามที่ได้ออกอนุญาตให้ข้างต้น ทั้งนี้ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1. อนุญาตให้ใช้ความถี่วิทยุดังกล่าวเป็นการชั่วคราวได้จนถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2543
2. อนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมชนิดติดตั้งประจำที่มีกำลังส่งไม่เกิน 200 วัตต์
3. หากต้องการใช้ความถี่วิทยุที่ได้รับอนุญาตดังกล่าวก่อให้เกิดการรบกวนกับการใช้ความถี่วิทยุของหน่วยงานอื่น จะต้องระงับการใช้ความถี่วิทยุดังกล่าวโดยทันที

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

เรียน หัวหน้าคณะ  
- กิจการไปรษณีย์  
- สหกรณ์วิทยุ โทร. กทพ  
วันที่ 25 ก.พ. 42  
น.พ. ๕๒  
๕๓๗๕๒

เลขาฯ อ.ค.พ.๒๒.๖๖๖.๒๒.๖๖๖

ขอแสดงความนับถือ

๒๒ ก.พ. ๕๒

กองบริหารความถี่วิทยุ

โทร. 2710151-60 ต่อ 309

โทรเลข 2782530

๒๒ ก.พ. ๒๕๔๒

(นายพรพจน์ สุวรรณรัตน์)

รองอธิบดี วิทยุราชการทหาร

อธิบดีกรมไปรษณีย์โทรเลข

เรียน นายพรพจน์ สุวรรณรัตน์

๒๒ ก.พ. ๕๒

รูป ก.1 สำเนาหนังสืออนุญาตฉบับที่ 1

ภาคีชีววิศวกรรมไฟฟ้า  
 วันที่ 1441  
 วันที่ 30.11.41  
 เวลา 11.00 น.

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 ถนนพระรามที่ 2 แขวงบางมด เขตบางมด กรุงเทพฯ 10820

ที่ ลค 0704 (ถว.1) / 13455  
 กรมไปรษณีย์โทรเลข  
 กรุงเทพมหานคร 10400

16 ธันวาคม 2542

เรื่อง: อนุญาตให้ขยายระยะเวลาการใช้ความถี่วิทยุ และเพิ่มกำลังส่งเครื่องวิทยุคมนาคม เพื่อการวิจัย  
 เรียน: อธิการบดี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อ้างถึง 1. หนังสือคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ ชม 0306/6949 ลงวันที่ 11 พฤศจิกายน 2542  
 2. หนังสือกรมไปรษณีย์โทรเลข ที่ ลค 0704(ถว.1)1672 ลงวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2542

ตามหนังสือที่อ้างถึง 1. แห่งขอทราบประสงค์ขออนุญาตขยายระยะเวลาการใช้ความถี่วิทยุที่ได้รับอนุญาตตามหนังสือที่อ้างถึง 2. เพื่อสนับสนุนการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกในประเทศไทย" เป็นการศึกษาคร่าวต่อไปอีกจนถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2544 และขออนุญาตเพิ่มกำลังส่งเครื่องวิทยุคมนาคมจากรที่ได้รับอนุญาตเดิมไม่เกิน 200 วัตต์ เป็นไม่เกิน 1000 วัตต์ ความละเอียดขอแจ้งแล้ว นั้น

กรมไปรษณีย์โทรเลขพิจารณาแล้ว ขอเรียนดังนี้

1. อนุญาตให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขยายระยะเวลาการใช้ความถี่วิทยุที่ได้รับอนุญาตตามหนังสือที่อ้างถึง 2. เป็นการศึกษาคร่าวต่อไปได้จนถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2544  
 2. อนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมชนิดติดตั้งประจำที่มีกำลังส่งไม่เกิน 1000 วัตต์

อนึ่ง สำหรับลักษณะทางวิชาการและเงื่อนไขอื่น ๆ ให้เป็นไปตามที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้รับอนุญาตตามหนังสือที่อ้างถึง 2. ทุกประการ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

13068 คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 27 ธ.ค. 42  
 2542  
 27 ธ.ค. 42

ขอแสดงความนับถือ  
 (นาย) เสรณัฐพร อุกวิพิทักษ์  
 อธิบดีกรมไปรษณีย์โทรเลข

78 ธ.ค. 2542

กองบริหารความถี่วิทยุ  
 โทร. 271-0151-60 ต่อ 306  
 โทรสาร 2782530

ศาสตราจารย์ ดร. ส. ส. ส. ส.  
 27 ธ.ค. 42

ศาสตราจารย์ ดร. ส. ส. ส. ส.  
 27 ธ.ค. 42

ศาสตราจารย์ ดร. ส. ส. ส. ส.  
 27 ธ.ค. 42

ศาสตราจารย์ ดร. ส. ส. ส. ส.  
 27 ธ.ค. 42

รูป ก.2 สำเนาหนังสืออนุญาตฉบับที่ 2



## ภาคผนวก ข.

### ข้อมูลอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุที่ใช้ในการทดลองตรวจวัด คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

รายการอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแสดงแยกเป็นรายการอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ ยกเว้นสายอากาศที่ใช้ในการทดลองจะแยกแสดงเป็นรายการสุดท้าย เนื่องจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีลักษณะสมบัติเหมือนกัน รายการอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุทั้งหมดมีดังนี้

#### 1. อุปกรณ์ภาคส่ง

##### 1.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.1



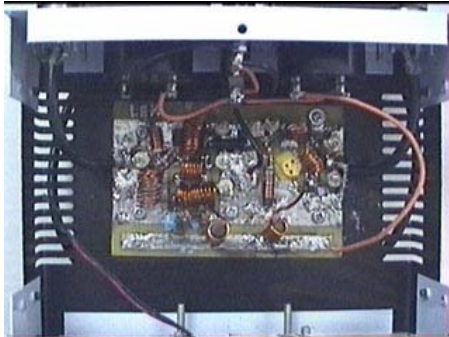
รูป ข.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

ข้อมูลเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ก. ตราอักษร	: Hewlett Packard
รุ่น	: 8648C
ข. ความถี่	: 100 kHz – 3200 MHz
ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง	: 45.55 MHz หรือ 49.1 MHz
ค. กำลังขาออกสูงสุด	: 20mW (13 dBm)
กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง	: 10mW (10 dBm)

## 1.2 วงจรขยายกำลังต่ำ

วงจรขยายกำลังต่ำที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.2



ก. ลักษณะของวงจร



ข. วงจรที่บรรจุลงในกล่อง

แล้ว

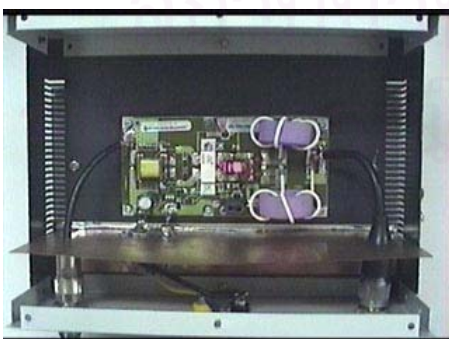
รูป ข.2 วงจรขยายกำลังต่ำ

ข้อมูลวงจขยายกำลังต่ำที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- |                             |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| ก. ทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์ | : Mitsubishi          |
| หมายเลข                     | : 2SC2053 และ 2SC1947 |
| ข. ความต้องการกำลังขาเข้า   | : 10 mW (10dBm)       |
| ค. กำลังขาออกสูงสุด         | : 2 W (33 dBm)        |
| กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง  | : 2 W (33 dBm)        |

## 1.3 วงจรขยายกำลังสูง

วงจรขยายกำลังสูงใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.3



ก. ลักษณะของวงจร



ข. วงจรที่บรรจุลงในกล่อง

แล้ว

รูป ข.3 วงจรขยายกำลังสูง



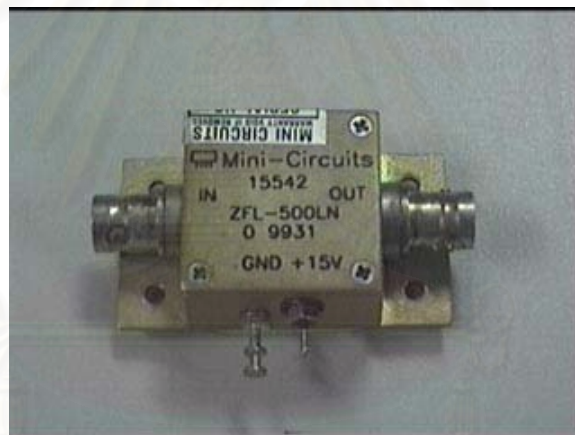
ข้อมูลวงจรรขยายกำลังสูงใช้ในการทดลองมีดังนี้

ก. ตราอักษร	: RF Gain
รุ่น	: IS300 - 1050
ข. ความต้องการกำลังขาเข้า	: 2 W
ค. กำลังขาออกสูงสุด	: 300 W
กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง	: 200 W

## 2. อุปกรณ์ภาครับ

### 2.1 วงจรรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ

วงจรรขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.4



รูป ข.4 วงจรรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ

ข้อมูลวงจรรขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

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

## 2.2 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.5



รูป ข.5 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

ข้อมูลวงจรถวายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- |             |                      |
|-------------|----------------------|
| ก. ตราอักษร | : Hewlett Packard    |
| รุ่น        | : 8590L              |
| ข. ความถี่  | : 100 kHz – 1800 MHz |

## 3. สายอากาศ

สายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.6



ก. สายอากาศส่ง

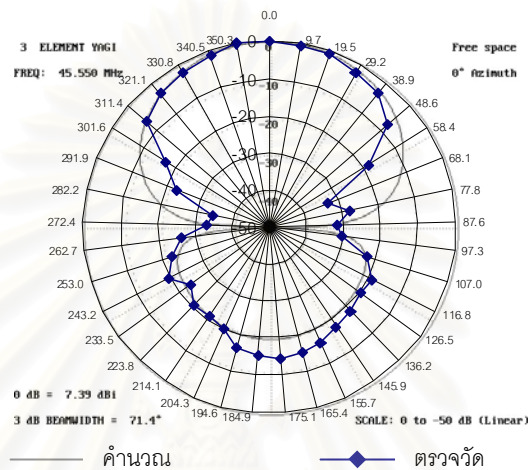


ข. สายอากาศรับที่ จ. นครราชสีมา

รูป ข.6 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง

สายอากาศส่งและสายอากาศรับทุกตัวที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเป็นสายอากาศยาก็ - คู่ละ 3 องค์ประกอบ ลักษณะสมบัติของสายอากาศมีดังนี้

ก. แบบรูปการแผ่พลังงาน : แสดงดังรูป ข.7



รูป ข.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

ข. ความกว้างลำ :  $71.4^{\circ}$

ค. อัตราขยาย : 7.39 dBi

ง. อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) : 1.5

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรศักดิ์ อนันตกุล เกิดวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ.2516 ที่เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2535 และ 2539 ตามลำดับ ในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ได้เขียนวิทยานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นแม่-เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากฝน และได้เผยแพร่ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยา-นิพนธ์นี้ที่ประชุมระดับชาติดังนี้

- [1] ผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ, ธีรศักดิ์ อนันตกุล, ฉัตรชัย ไวยภาพฒนกร, “การศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่านระยะใกล้มาก” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 (EECON-20), กรุงเทพฯ. 665-669, 13-14 พฤศจิกายน 2540

ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2540 ได้เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในระดับปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิตเขียนวิทยานิพนธ์เรื่อง แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ และได้เผยแพร่ผลงานวิจัยที่เกิดขึ้นจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ประชุมระดับนานาชาติดังนี้

- [1] Dheerasak Anantakul and Chatchai Waiyapattanakorn. 2000. The throughput performance of meteor burst link using the derived PDF of the decay constant. Proc. the 4th International Wireless and Telecommunications Symposium (IWTS2000): 147-150. Subang Jaya, Malaysia.

- [2] Dheerasak Anantakul, and Chatchai Waiyapattanakorn. 2000. On meteor scatter experiment using low transmitting power. Proc. 2000 International Symposium on Antennas and Propagation vol. 3, pp. 1031-1034. Fukuoka, Japan.

และได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์บทความในวารสาร IEICE Transaction on Communications เมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2545 ดังนี้

- [1] Dheerasak Anantakul, and Chatchai Waiyapattanakorn. 2002. Investigation of oblique scattering of radio wave from a meteor trail. IEICE Trans. Communications. Accepted to be published in March, 2002.