



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัย

การสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก

โดย

จักรชัย ไวยาพัฒนกร

พฤษภาคม ๒๕๕๗

พ
วศ 15
012737



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก

โดย

นายฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร

สถาบันวิทยบริการ

พฤษภาคม ๒๕๔๖

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก
 ชื่อผู้วิจัย นายฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร
 เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ พฤษภาคม ๒๕๔๗

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่ารอยทางเดินของดาวตกสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ประเทศตะวันตกและประเทศที่มีความเจริญทางวิทยาการสูงได้ประยุกต์ใช้ความสามารถดังกล่าวในกิจการสื่อสารและการกู้ภัยมาเป็นเวลาพอสมควรแล้ว ประเทศไทยเองซึ่งก็มีทรัพยากรดาวตกกลับยังคงชื่นชมกับทรัพยากรนี้เพียงเชิงสุนทรีย์เท่านั้น โครงการนี้จึงดำเนินงานอย่างต่อเนื่องจากผลการวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัยเพื่อศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่น โดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกในบริเวณน่านฟ้าประเทศไทย เช่น แบบจำลองรอยทางเดินที่เหมาะสม สถิติการแพร่กระจายในรูปความยาวนานของการปรากฏรอยทางเดิน อัตราการเกิดรอยทางเดิน ขนาดกำลังเหนือกำลังสัญญาณรบกวนพื้นหลัง เป็นต้น

การศึกษานี้ทำโดยการจัดตั้งข่ายเชื่อมโยงและทดลองส่งคลื่นวิทยุสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก ข่ายเชื่อมโยงที่จัดตั้งขึ้นมีสถานีส่งอยู่ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถานีรับอยู่ ณ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา ใช้กำลังส่ง ๒๐๐ W และเครื่องรับที่มีความไวได้ถึง -๑๓๐ dBm การทดลองส่งคลื่นวิทยุกระทำ ณ ปลายสัปดาห์ที่สามของเดือนมีนาคม ๒๕๔๗ ถึง เดือนกันยายน ๒๕๔๗ ผลการวิเคราะห์สัญญาณรับที่ได้จากการทดลองส่งคลื่นแสดงให้เห็นความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองรอยทางเดินชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อน เนื่องจากผลการคำนวณรูปสัญญาณด้วยแบบจำลองนี้เทียบเคียงได้กับรูปสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดด้วยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณและผลการตรวจวัดที่สูงกว่า ๐.๘๐ ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติชี้ให้เห็นว่ามีรอยทางเดินประเภทความหนาแน่นต่ำปรากฏมากพอสมควร คิดเป็นสัดส่วนระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูงประมาณ ๒:๓ ขนาดกำลังเหนือกำลังสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่ตรวจวัดได้อยู่ในเกณฑ์ดีสามารถใช้ประโยชน์ในกิจการสื่อสารได้โดยอาศัยกรรมวิธีเข้ารหัสและกล้ำสัญญาณที่เหมาะสม

ผลจากการศึกษาตามโครงการนี้เมื่อรวมกับผลการศึกษาก่อนหน้าโดยผู้วิจัยทำให้สามารถสร้างแบบจำลองเพื่อประโยชน์ในการจัดตั้งข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกได้ แบบจำลองที่ได้ยังคงไม่สมบูรณ์เพียงพอเนื่องจากจำนวนข้อมูลที่เกี่ยวข้องยังมีน้อยเกินไป ผลการทดสอบแบบจำลองในเบื้องต้นแสดงให้เห็นศักยภาพของแบบจำลองในการออกแบบข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกได้อย่างน่าพอใจ

Project Title Study of Radiowave Propagation by Reflection from Meteor Trail

Name of the Investigator Dr.Chatchai Waiyapattanakorn

Date of Completion May 2004

Abstract

It is well known that a meteor trail is capable of reflecting radiowaves. Countries in the west and those with advanced technology have applied this capability in communication services and rescue missions for quite some time. However Thailand with meteor resources still appreciates its own resource in only the aesthetic aspect. This project, a resumption of the author's previous work, aims to study the nature of meteor scatter propagation within the airspace of Thailand. It is expected to obtain proper trail model, propagation statistics in terms of trail duration, rate of arrival, scattered signal peak amplitude and scattered signal power to background noise power ratio, etc.

This study is carried on by setting up a radio link and transmitting radiowave towards the meteor trail to observe radio reflection from the trail. The radio link has its transmitting station at Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Bangkok. The receiving station is located in the city district of Yala province. The transmitting power is 200 W, while the receiver's sensitivity is -130 dBm. The radio transmission was regularly performed at the weekend of the third week of each month from March 2003 to September 2003. Results from analysis of the received signal confirm the suitability of the multi-layered cylinder trail model. This is because the calculated signal waveform is in good agreement with the detected or measured signal waveform. The correlation coefficient of both waveforms is greater than 0.8. Results from statistical analysis show that there are a large number of low density meteor trails. The ratio of low density trail to high density rail is about 2:3. The signal power to background noise power ratio is of good quality. It is possible to serve communication purpose provided proper coding and modulation techniques are adopted. Results from this project together with previous work enable the author to construct a good model useful for setting up a meteor burst communication link. However the obtained model is still far from perfect. This is due to insufficient amount of data. The test of the model gives satisfactory result.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ต้องขอขอบคุณความสนับสนุนทางการเงินที่ได้รับจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยทั้งสามท่าน คือ นายผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ นางสาวอัชราภรณ์ เนตรนิล และนายคทา สุวรรณวัฒน์ ที่ปฏิบัติหน้าที่อย่างเข้มแข็งจนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี นอกเหนือจากนี้ต้องขอขอบคุณ ดร.ธีรศักดิ์ อนันตกุล ที่ได้กรุณาสละเวลาร่วมอภิปรายผลและให้คำปรึกษากับคณะผู้ช่วยวิจัย คุณพัฒนเกียรติ ฉ นคร ที่กรุณาช่วยเหลือเรื่องระบบรับส่งคลื่นวิทยุ นายรัชฎ ถาวรสิริ นายกุลธวัช ภูมิวงศ์พิทักษ์ และนายสุวิชาญ กาวาฮารา ที่สละเวลาช่วยปฏิบัติงานภาคสนามในหลายโอกาส



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ไทย).....	ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก.....	2
1.2.1 เรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยง.....	2
1.2.2 ลักษณะสมบัติทั่วไปของระบบสื่อสารผ่านดาวตก.....	4
1.2.3 การประยุกต์ใช้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก.....	6
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	7
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	7
1.5เค้าโครงของรายงานฉบับนี้.....	8
บทที่ 2 การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก.....	9
2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก.....	9
2.1.1 แหล่งเทหวัตถุดาวตก ปრაกฏการณ์ดาวตกและการก่อตัว เป็นรอยทางเดิน.....	10
2.1.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและ รอยทางเดินของดาวตก.....	12
2.2 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก...15	
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน.....	16
2.2.2 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล.....	17
2.2.3 ผลของพิกัดที่ตั้งและแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง ต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว.....	18
2.3 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก...18	
2.3.1 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตก.....	20
2.3.2 การแจกแจงความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตก.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง.....	21
2.4.1	แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ.....	22
2.4.2	แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง.....	25
2.4.3	ขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง.....	27
2.5	แบบจำลองรอยทางเดินแบบทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น.....	28
2.5.1	เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตก.....	30
2.5.2	เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพันธ์.....	33
2.5.3	เมทริกซ์การสะท้อนของทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น.....	37
2.5.4	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของรอยทางเดินของดาวตก.....	38
บทที่ 3	ปฏิบัติการทดลองส่งคลื่นวิทยุและผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตก.....	41
3.1	รายละเอียดของข่ายเชื่อมโยง.....	41
3.1.1	ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ - ยะลา.....	41
3.1.2	ข่ายเชื่อมโยงนครนายก-ปราจีนบุรี (อนาคติ).....	42
3.2	ระบบรับส่งคลื่นวิทยุ.....	42
3.2.1	อุปกรณ์ภาคส่ง.....	42
3.2.2	อุปกรณ์ภาครับ.....	43
3.2.3	การปรับเทียบอุปกรณ์ทั้งภาคส่งและภาครับ.....	44
3.2.4	การวิเคราะห์ห้บกำลังเบื้องต้น.....	45
3.3	ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ.....	46
3.3.1	กรรมวิธีเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดกับผลการคำนวณ.....	46
3.3.2	ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดกับผลการคำนวณ.....	48
3.4	สถิติการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก.....	54
3.4.1	อัตราการเกิดรอยทางเดินรายชั่วโมง.....	54
3.4.2	การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก.....	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3	การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตก.....	58
3.4.4	การเปลี่ยนแปลงอัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตกตามฤดูกาล.....	61
3.4.5	อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนพื้นหลัง.....	62
3.5	ปฏิบัติการนับอัตราการเกิดรอยทางเดินของดาวตกบริเวณท้องฟ้ารอบต่อ จังหวัดนครนายกและจังหวัดปราจีนบุรี.....	65
บทที่ 4	แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่การกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก.....	67
4.1	ขอบเขต และลักษณะของแบบจำลอง.....	67
4.1.1	ขอบเขตของแบบจำลอง.....	67
4.1.2	ลักษณะของแบบจำลอง.....	68
4.2	กรรมวิธีสร้างแบบจำลองและแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิง จากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ.....	69
4.2.1	แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตกเดี่ยว.....	70
4.2.2	แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ.....	71
4.3	การทดสอบแบบจำลอง.....	73
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1	สรุป.....	80
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....		82
ภาคผนวก ก.....		85
ภาคผนวก ข.....		86



บทที่ 1

บทนำ

ดาวตกเป็นทรัพยากรที่มีอยู่ตามธรรมชาติอย่างมากมาย หากแต่มนุษย์มักให้ความสนใจกับดาวตกในเชิงสุนทรียะมากกว่าในด้านอรรถประโยชน์ ความจริงแล้วปรากฏการณ์นี้สามารถใช้ประโยชน์เพื่อการสื่อสารได้และได้มีการจัดการสื่อสารผ่านดาวตกในระยะสองถึงสามทศวรรษที่ผ่านมาเองในประเทศทางตะวันตกและประเทศที่มีความเจริญทางวิทยาการสูงบางประเทศ การสื่อสารผ่านดาวตกกระทำโดยส่งคลื่นวิทยุไปสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก ดังนั้นก่อนที่จะสามารถจัดการสื่อสารลักษณะนี้ให้เกิดประสิทธิผลจำเป็นต้องศึกษาการแพร่กระจายคลื่นโดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก

ในแต่ละวันมีเทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกเป็นจำนวนมาก เทหวัตถุดาวตกเหล่านี้มีความเร็วสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างเทหวัตถุดาวตกกับโมเลกุลของอากาศทำให้เทหวัตถุดาวตกและโมเลกุลของอากาศแตกตัวเป็นอนุภาคมีประจุ กลุ่มประจุที่เกิดขึ้นนี้เรียงตัวเป็นแนวยาวตามเส้นทางที่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่ไปและเรียกว่า รอยทางเดินของดาวตก (meteor trails) รอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ดังนั้นจึงใช้ประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูลได้ การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะประจุที่เรียงตัวกันเป็นรอยทางเดินจะแพร่ออกทำให้ความหนาแน่นประจุลดลงจนกระทั่งไม่สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ช่องสัญญาณในการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจึงมีลักษณะสมบัติขาดตอนเป็นพักๆ โดยทั่วไปช่องสัญญาณนี้มีระยะเวลาปรากฏอยู่ในหลักร้อยมิลลิวินาที แต่เนื่องจากปริมาณรอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นมีเป็นจำนวนมาก การสื่อสารข้อมูลปริมาณมากๆ จึงสามารถทำได้ถ้าจัดระเบียบวิธีสื่อสารให้เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของช่องสัญญาณ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การใช้งานการสื่อสารผ่านดาวตกที่ผ่านมาจำกัดอยู่ในวงแคบ โดยเฉพาะการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ ส่วนใหญ่กระทำในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา กลุ่มประเทศในทวีปยุโรป และญี่ปุ่น [1-17, 20] ซึ่งล้วนแล้วแต่มีพิภคละติจูดสูงกว่าประเทศไทยทั้งสิ้น ทำให้ข้อมูลหรือสถิติเกี่ยวกับการรับสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำมีอยู่น้อย นอกจากนี้งานวิจัยจำนวนมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ใช้ประโยชน์จากแบบจำลองการแพร่กระจายแต่ไม่ได้ศึกษาลักษณะสมบัติการสะท้อนสัญญาณจากรอยทางเดินของดาวตกโดยตรง เช่น งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถนะของการสื่อสารผ่านดาวตก เป็นต้น อาศัยแบบจำลองที่ได้จากการประมาณว่าตำแหน่งสะท้อนสัญญาณอยู่ที่

กึ่งกลางตามแนววงกลมใหญ่ (great circle path) ระหว่างสถานีส่งและรับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดขึ้นน้อยครั้งมากในเหตุการณ์จริง และแบบจำลองที่ใช้โดยส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองรอยทางเดินของดาวตกในลักษณะเดียว คือเป็นแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ (underdense trails) [4-7] ขณะที่ในข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกจริง ลักษณะสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกจำนวนมากมีลักษณะที่ไม่ใกล้เคียงกับผลการคำนวณลักษณะสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินตามแบบจำลองทางทฤษฎี นอกจากนี้ผู้วิจัยพบว่ากรณีที่กำลังส่งของเครื่องส่งต่ำการสะท้อนของคลื่นวิทยุจะมาจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเป็นส่วนมาก [19]

โครงการนี้ศึกษาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก ซึ่งปรากฏบริเวณชั้นบรรยากาศเหนือ่านฟ้าประเทศไทย การศึกษากระทำได้ด้วยการตั้งข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกจริงขึ้น จุดสนใจของโครงการนี้อยู่ที่การศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายโดยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก หาค่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการจัดการสื่อสาร โดยวิธีการนี้ และรวบรวมข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการวางแผนและใช้ประโยชน์ระบบสื่อสารลักษณะนี้สำหรับกิจการต่างๆ

1.2 ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก

ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกคือข่ายเชื่อมโยงที่รับส่งสัญญาณระหว่างกัน โดยอาศัยการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก ช่องสัญญาณสื่อสารผ่านดาวตกจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นวิทยุจากสายอากาศส่งสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกที่มีขนาดและแนวการวางตัวที่เหมาะสมกลับมายังสายอากาศรับ ช่องสัญญาณจะสิ้นสุดลงเมื่อความหนาแน่นประจุของรอยทางเดินลดลงเนื่องจากการแพร่จันคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศรับมีระดับสัญญาณต่ำกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) เนื่องจากช่องสัญญาณของการสื่อสารผ่านดาวตกมีลักษณะสมบัติขาดตอนเป็นพักๆ (intermittent) โดยมีความยาวนาน (duration) ของช่องสัญญาณอยู่ในหลักร้อยมิลลิวินาที ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกจึงมีลักษณะเฉพาะตัว หัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะดังกล่าวโดยแบ่งเป็นลักษณะทางกายภาพซึ่งจะกล่าวถึงเรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยงและแนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตกที่เหมาะสมกับการสะท้อนสัญญาณ และลักษณะสมบัติของระบบสื่อสารผ่านดาวตกโดยจะเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบสื่อสารผ่านดาวตกกับระบบสื่อสารประเภทอื่นไว้ด้วย

1.2.1 เรขาคณิตของข่ายเชื่อมโยง

รอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นบนท้องฟ้าเหนือสถานีส่งและสถานีรับของระบบสื่อสารผ่านดาวตกมีเป็นจำนวนมาก รอยทางเดินของดาวตกที่จะสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุที่ส่งจากสายอากาศส่ง

1.2.2 ลักษณะสมบัติทั่วไปของระบบสื่อสารผ่านดาวตก

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกมีขอบเขตในการปฏิบัติงานและสมรรถนะที่จำกัดโดยธรรมชาติของตัวระบบเอง การใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวตกจึงจำเป็นที่จะต้องทราบขอบเขตการปฏิบัติงานและสมรรถนะของระบบเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวตกได้อย่างเหมาะสม หัวข้อนี้จะกล่าวถึงขอบเขตและสมรรถนะที่สำคัญของระบบสื่อสารผ่านดาวตกดังนี้

ก. ความถี่ปฏิบัติการ

รอยทางเดินของดาวตกมีความหนาแน่นประจุมากกว่าความหนาแน่นประจุของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ ทำให้ความถี่ปฏิบัติการของระบบสื่อสารผ่านดาวตกสูงกว่าความถี่ปฏิบัติการของระบบสื่อสารความถี่สูง (HF) ความถี่ปฏิบัติการปกติของระบบสื่อสารผ่านดาวตกอยู่ในช่วง 30 – 100 MHz แต่ระบบสื่อสารผ่านดาวตกโดยทั่วไปใช้ความถี่ไม่เกิน 60 MHz [2 ,10] คลื่นวิทยุอาจสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกที่ความถี่ปฏิบัติการสูงกว่านี้ได้ถ้าความหนาแน่นประจุสูงพอ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วคลื่นวิทยุที่ความถี่สูงกว่าระดับสัญญาณวิทยุเอฟเอ็มเป็นต้นไปจะทะลุชั้นบรรยากาศและไม่สะท้อนกลับมายังพื้นโลกอีก ส่วนที่ความถี่ต่ำกว่า 30 MHz การสะท้อนคลื่นวิทยุอาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศมากขึ้นรวมถึงอาจเกิดการรบกวนจากการสะท้อนคลื่นวิทยุจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วย ย่านความถี่ปฏิบัติการของระบบสื่อสารผ่านดาวตกเหมาะที่จะใช้สายอากาศชนิดเส้นลวด เช่น สายอากาศไดโพล และสายอากาศยาคิ-อูตะ เป็นต้น ในการรับส่งสัญญาณระหว่างการเลือกใช้สายอากาศประเภทใดจะขึ้นอยู่กับลักษณะการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารผ่านดาวตกเป็นสำคัญ

ข. กำลังส่ง

กำลังส่งที่เหมาะสมในการรับส่งสัญญาณ โดยการสะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความไวของเครื่องรับ ระดับสัญญาณรบกวนที่ภาครับ และความจำเป็นตามลักษณะการใช้งานหรือตามระเบียบวิธีสื่อสารที่ได้ออกแบบไว้ เป็นต้น โดยทั่วไปกำลังส่งไม่ควรน้อยกว่า 100 วัตต์ ถ้าเป็นข่ายเชื่อมโยงสำหรับการสื่อสาร โดยปกติจะใช้กำลังส่งตั้งแต่ 300 วัตต์ขึ้นไปจนถึงหลายกิโลวัตต์ แต่ถ้าเป็นเรดาร์ที่ใช้ศึกษาการสะท้อนสัญญาณจากรอยทางเดินของดาวตกก็มักใช้กำลังส่งสูงกว่านี้

ค. กำลังรับ

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกเป็นระบบสื่อสารที่จัดอยู่ในกลุ่มระบบสัญญาณอ่อน โดยทั่วไปกำลังรับสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกจะมีค่าต่ำกว่า -110 dBm ดังนั้นสถานที่ตั้งสถานีรับจึงควรเป็นสถานที่เงียบสงบทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ง. เขตคลุมสัญญาณ

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกมีเขตคลุมสัญญาณ (footprint) ประมาณ 5×25 ตารางกิโลเมตร [25] ซึ่งถือว่าพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณน้อยมาก ข้อดีของเขตคลุมสัญญาณที่มีขนาดเล็กนี้ทำให้สามารถใช้กรรมวิธีนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (frequency reuse) ในการประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่มีสถานีหลายสถานีในระบบ แต่ขณะเดียวกันเขตคลุมสัญญาณขนาดเล็กนี้จะทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลชุดเดียวกันไปถึงผู้รับในบริเวณกว้างได้พร้อมกัน

จ. เวลารอคอย

เวลารอคอย (waiting time) ในระบบสื่อสารผ่านดาวตกมี 2 ความหมายคือ เวลารอคอยรอยทางเดิน (trail waiting time) และเวลารอคอยข่าวสาร (message waiting time) เวลารอคอยรอยทางเดินหมายถึงระยะเวลาระหว่างการเกิดรอยทางเดินที่สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับหรือระยะเวลาระหว่างการรับสัญญาณ 2 ครั้งติดกันนั่นเอง โดยทั่วไปเวลารอคอยรอยทางเดินจะมีค่าในหลักสิบนาทีถึงนาทีขึ้นอยู่กับกำลังส่ง ความไวของเครื่องรับและระดับสัญญาณรบกวนที่ภาครับ ขณะที่เวลารอคอยข่าวสารเป็นเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการส่งข่าวสาร 1 กลุ่มข้อมูล (packet) เวลารอคอยข่าวสารนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การเลือกใช้ระเบียบวิธีสื่อสาร ความยาวของกลุ่มข้อมูล เป็นต้น

ฉ. วิสัยสามารถ

ระบบสื่อสารผ่านดาวตกโดยทั่วไป ซึ่งใช้สายอากาศตัวเดียวหรือสายอากาศแถวลำดับขนาดไม่ใหญ่มากนักและใช้ระเบียบวิธีสื่อสารที่มีอัตราข้อมูลคงที่ จะมีสมรรถนะในรูปของวิสัยสามารถ (throughput) ไม่เกิน 600 บิตต่อวินาที [22] แต่ในระบบสื่อสารผ่านดาวตกสมัยใหม่ที่ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบปรับค่าคลื่นได้ และใช้อัตราข้อมูลแบบปรับเปลี่ยนได้จะสามารถมีวิสัยสามารถเกินกว่า 1 กิโลบิตต่อวินาทีได้ [23]

ลักษณะของระบบสื่อสารผ่านดาวตกในด้านขอบเขตและสมรรถนะของระบบที่กล่าวถึงข้างต้นจะช่วยเลือกการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวตกได้อย่างเหมาะสม ข้อมูลในส่วนที่สามารถเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารอื่น และข้อมูลเพิ่มเติมในเรื่องค่าใช้จ่ายและความเชื่อถือได้ของระบบแสดงเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารอื่นๆ ในตาราง 1.1

ตาราง 1.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของระบบสื่อสารประเภทต่างๆ [22]

ระบบ	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ	ความถี่ปฏิบัติการ	ระยะสื่อสาร	วิสัยสามารถ	ความเชื่อถือได้
เครือข่ายสายส่งโทรศัพท์	สูงมาก สำหรับผู้ประกอบ การ	ขึ้นอยู่กับลักษณะการ ใช้งาน	300 – 3000 Hz	ขึ้นอยู่กับ การ วางเครือข่าย	9600 บิตต่อวินาที	สูงมาก
วิทยุความถี่สูง (HF Radio)	ปานกลาง	ต่ำถึงปาน กลาง	3 – 30 MHz	ปกติได้ไกล ถึง 6000 กิโลเมตร	300 บิตต่อวินาที	ต่ำถึงปาน กลาง
วิทยุความถี่สูง มาก (VHF Radio)	ต่ำถึงปาน กลาง	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	ขึ้นอยู่กับ การ วางเครือข่าย	สูง	ปานกลาง
ระบบสื่อสารผ่านดาวตก	ปานกลาง	ต่ำถึงปาน กลาง	30 – 60 MHz	2000 กิโลเมตร	50 - 600 บิตต่อวินาที	สูง

1.2.3 การประยุกต์ใช้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก

แนวทางในการประยุกต์ใช้ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกแบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ การใช้ประโยชน์ในเชิงการศึกษาสภาพบรรยากาศชั้นบนและการศึกษาเกี่ยวกับดาวตก และการใช้

ประโยชน์ในเชิงการสื่อสารข้อมูล การใช้ประโยชน์ในเชิงการศึกษาชั้นบรรยากาศนั้นอาศัยการแปลความหมายจากสัญญาณรับที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตก เช่น ความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ของบรรยากาศชั้นบน หรือความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของดาวตก เป็นต้น การใช้ประโยชน์ในเชิงการสื่อสารข้อมูลนั้น ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกไม่เหมาะกับการสื่อสารที่ต้องการความต่อเนื่องและความจุของช่องสัญญาณสูง เช่น การส่งสัญญาณเสียงโทรศัพท์หรือสัญญาณภาพวิดีโอ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะมีลักษณะสมบัติขาดตอนเป็นพักๆ ประกอบกับมีวิสัยสามารถไม่สูง แต่ข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกจะเหมาะกับการสื่อสารข้อมูลที่ไม่ต้องการลักษณะสมบัติแบบเวลาจริง (real time) เช่น ระบบสำรองข้อมูล หรือ ระบบเฝ้าตรวจระยะไกล (remote monitoring) ตัวอย่างของระบบเฝ้าตรวจระยะไกลอาจเป็นเครือข่ายระบบเฝ้าตรวจข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา [16] ระบบเฝ้าตรวจระดับน้ำตามลำน้ำต่างๆ [24] และระบบเฝ้าตรวจท่อส่งน้ำมันหรือท่อส่งก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งในกรณีหลายกรณีระบบเหล่านี้มีสถานีลูกข่ายอยู่ในแหล่งทุรกันดาร ไม่สะดวกต่อการไปเก็บข้อมูลถึงที่และไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนวางระบบสื่อสารด้วยสาย การใช้ระบบสื่อสารผ่านดาวตกจึงนับเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่งสำหรับปัญหาเรื่องแหล่งพลังงานในการดำเนินการระบบสื่อสารนั้นอาจแก้ไขได้ด้วยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกในบริเวณน่านฟ้าประเทศไทย เช่น แบบจำลองรอยทางเดินที่เหมาะสม สถิติการแพร่กระจายในรูปความยาวนานของการปรากฏของรอยทางเดิน อัตราการเกิดรอยทางเดิน ขนาดกำลังสัญญาณเหนือกำลังสัญญาณรบกวนพื้นหลัง เป็นต้น อันจะเป็นประโยชน์ต่อกิจการต่างๆ อาทิเช่น กิจการสื่อสารข้อมูลเพื่อการสำรองข้อมูล ระบบโทรมาตรสำหรับกิจการต่างๆ และการศึกษาชั้นบรรยากาศ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเชิงปฏิบัติการ โดยทดลองส่งคลื่นวิทยุสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกในเขตน่านฟ้าประเทศไทย
2. เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับผลการคำนวณด้วยแบบจำลองดั้งเดิมและแบบจำลองทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น
3. วิเคราะห์เชิงสถิติเกี่ยวกับความยาวนานของรอยทางเดิน อัตราการเกิดรอยทางเดิน ขนาดกำลังสัญญาณเหนือกำลังสัญญาณรบกวนพื้นหลัง
4. สรุปข้อเสนอแนะเบื้องต้นเกี่ยวกับการจัดตั้งข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตก

1.5 คำโครงของรายงานฉบับนี้

นอกเหนือจากเนื้อหาในบทนี้แล้วรายงานฉบับนี้ประกอบด้วยบทที่ 2 ซึ่งว่าด้วยการสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก บทที่ 3 ว่าด้วยปฏิบัติการทดลองส่งคลื่นวิทยุและผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตก บทที่ 4 ว่าด้วยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก และบทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ อนึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับระบบรับส่งคลื่นวิทยุจะนำเสนอประกอบไว้เพื่อความสมบูรณ์ในภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 2

การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก

คลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกกลับมายังสายอากาศรับ ไม่ได้เป็นผลมาจากการสะท้อนทั้งหมด กลไกการแผ่พลังงานกลับจากรอยทางเดินจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นประจุของรอยทางเดินซึ่งแสดงในรูปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในรอยทางเดินต่อหน่วยความยาว ความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่อหน่วยความยาวนี้เรียกว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของรอยทางเดินและมีหน่วยเป็นจำนวนอิเล็กตรอนต่อเมตร (e/m) แม้ว่าในธรรมชาติความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นจะเป็นค่าต่อเนื่องไม่สามารถแบ่งประเภทได้อย่างชัดเจน แต่โดยทั่วไปจะแบ่งรอยทางเดินของดาวตกตามความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นให้เป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

รอยทางเดินของดาวตกที่จัดว่าเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำคือรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นน้อยกว่า 10^{14} e/m รอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นสูงกว่านี้จะถือว่าเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นสูง กรณีที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าสูงมาก กลไกการแผ่พลังงานกลับจากรอยทางเดินจะเป็นการสะท้อนเช่นเดียวกับการสะท้อนคลื่นวิทยุของทรงกระบอกโลหะ ลักษณะการสะท้อนคลื่นเช่นนี้เหมือนกับการสะท้อนของคลื่นวิทยุย่านความถี่สูง (HF) ของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ [1] รอยทางเดินที่เกิดขึ้นจะขยายตัวเนื่องจากการแพร่ของอิเล็กตรอนในรอยทางเดินทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนน้อยลง เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนลดลงจนถึงระดับหนึ่ง กลไกการแผ่พลังงานกลับแบบการสะท้อนคลื่นของทรงกระบอกโลหะก็จะสิ้นสุดลง รอยทางเดินความหนาแน่นสูงก็จะกลายเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ และความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะลดลงเรื่อยๆ จนเท่ากับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของบรรยากาศแวดล้อมรอยทางเดิน ซึ่งถือว่ารอยทางเดินสิ้นสุดลง

บทนี้จะกล่าวถึงลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทวัตุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก ลักษณะสมบัติเชิงสถิติของรอยทางเดิน แบบจำลองรอยทางเดินดั้งเดิม และแบบจำลองทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทวัตุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก

สมบัติทางกายภาพของเทวัตุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก เช่น มวล และความเร็วในการพุ่งเข้าสู่โลก เป็นต้น มีผลต่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นและอัตราเร็วในการแพร่ของรอยทางเดิน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทวัตุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตกที่จะกล่าวในหัวข้อนี้ นอกจากมวลและ

ความเร็วในการพุ่งเข้าสู่โลกแล้ว ยังมีความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดิน ความยาว รัศมีเริ่มต้นและการแพร่ของรอยทางเดิน แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงสมบัติทางกายภาพเหล่านี้ จะกล่าวถึงแหล่งของเทหวัตถุ ดาวตกและการก่อตัวเป็นรอยทางเดินก่อน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 แหล่งเทหวัตถุ ดาวตก ปรากฏการณ์ดาวตกและการก่อตัวเป็นรอยทางเดิน

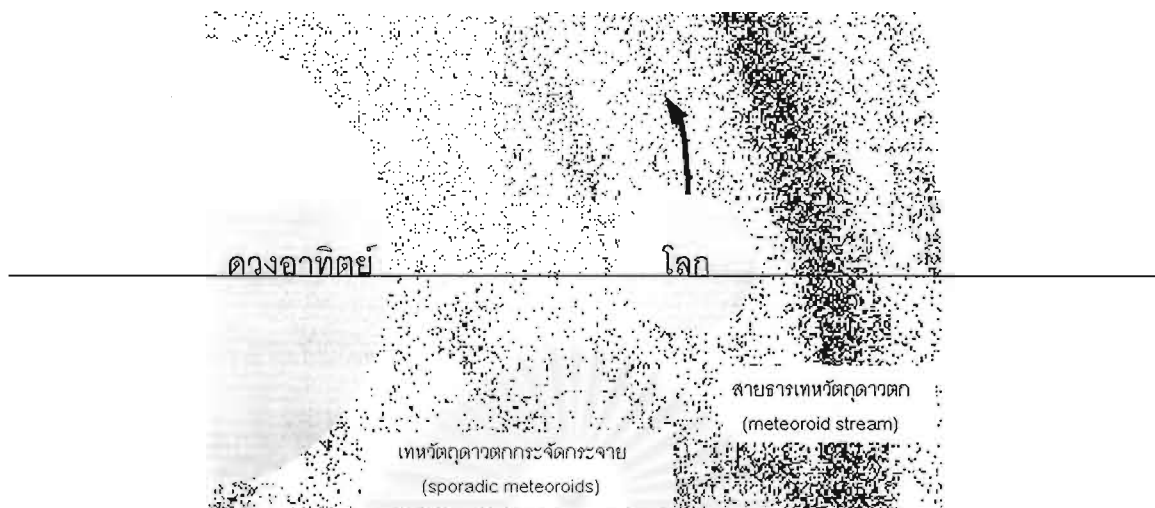
ก. แหล่งเทหวัตถุ ดาวตก

เทหวัตถุ ดาวตกเป็นส่วนหนึ่งของระบบสุริยะเช่นเดียวกับโลก ดาวเคราะห์อื่นๆ ดาวหาง และดาวเคราะห์น้อย เทหวัตถุ ดาวตกเหล่านี้โดยส่วนใหญ่จึงโคจรรอบดวงอาทิตย์ในทิศทางเดียวกับการโคจรของโลกและสมาชิกอื่นๆ ของระบบสุริยะ การกระจายความหนาแน่นของเทหวัตถุ ดาวตกตลอดแนวโคจรของโลกค่อนข้างสม่ำเสมอแม้ไม่อาจถือได้ว่าลักษณะการแจกแจงเป็นแบบเอกรูป (uniform distribution) เทหวัตถุ ดาวตกที่มีการกระจายความหนาแน่นในลักษณะนี้เรียกว่าเทหวัตถุ ดาวตกกระจัดกระจาย (sporadic meteoroids) ดาวตกที่เกิดจากเทหวัตถุ ดาวตกกระจัดกระจายนั้นเรียกว่าดาวตกกระจัดกระจาย (sporadic meteors) ดาวตกกระจัดกระจายจะปรากฏให้เห็นในท้องฟ้ายามค่ำคืนในลักษณะที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะปรากฏเมื่อใด ณ ตำแหน่งใด หากอาศัยแหล่งกำเนิดและการกระจายตำแหน่งปรากฏบนท้องฟ้าเป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทของดาวตก นอกจากดาวตกกระจัดกระจายที่กล่าวถึงแล้ว ยังมีดาวตกอีกประเภทหนึ่งคือ ฝนดาวตก (meteor showers) ฝนดาวตกนั้นเกิดจากสายธารของเทหวัตถุ ดาวตก (meteoroid streams) ซึ่งเป็นเศษซากที่เหลือจากการโคจรผ่านไปของดาวหาง โลกจะเคลื่อนที่ผ่านวงโคจรของดาวหางที่ตำแหน่งและเวลาเดิมทุกปี ดังนั้นจึงสามารถสังเกตพบฝนดาวตกได้ ณ ตำแหน่งปรากฏและเวลาเดิมทุกปีเช่นกัน การโคจรของโลกและเทหวัตถุ ดาวตกทั้ง 2 ประเภทแสดงดังรูป 2.1

ในบางครั้งที่ปริมาณดาวตกในช่วงที่เกิดฝนดาวตกมีมากก็จะเรียกว่าพายุฝนดาวตก (meteor storms) รายชื่อกลุ่มฝนดาวตกที่สำคัญในรอบ 1 ปีรวมถึงความยาวนานที่เกิดฝนดาวตกและอัตราการตกที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่ามีสรุปในตาราง 2.1

ข. ปรากฏการณ์ดาวตกและการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตก

เทหวัตถุ ดาวตกที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในสนามโน้มถ่วงของโลก จะถูกดึงดูดให้พุ่งเข้าสู่โลก กลายเป็นดาวตก กระบวนการเกิดดาวตกนับตั้งแต่เทหวัตถุ ดาวตกเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในสนามโน้มถ่วง



รูป 2.1 โลกและเทหวัตถุดาวตกในระบบสุริยะ

ของโลกนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ดาวตก เนื่องจากเทหวัตถุดาวตกกระจายอยู่ทั่วไปตลอดแนวโคจรของโลกและเทหวัตถุดาวตกเหล่านี้พุ่งเข้าสู่โลกตลอดเวลา ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ดาวตกตลอดเวลาเช่นกัน ขนาดของดาวตกนั้นขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตก ดาวตกที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าจะต้องมีมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตกมากพอที่จะทำให้การเผาไหม้เนื่องจากการเสียดสีกับบรรยากาศสามารถเห็นเป็นลำแสงวาบหรือที่เรียกว่าไฟพุ่งได้ (fireballs) ได้ กรณีที่ดาวตกมีขนาดใหญ่มากจนเผาไหม้ไม่หมดในชั้นบรรยากาศดาวตกก็จะตกลงถึงพื้นโลก ดาวตกที่ตกลงถึงพื้นโลกนี้เรียกว่า อุกกาบาต (meteorites) ดาวตกส่วนมากโดยเฉพาะดาวตกที่เป็นประโยชน์แก่การสะท้อนคลื่นวิทยุเป็นดาวตกขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาแม้จะใช้อุปกรณ์ช่วยในการสังเกตแล้วก็ตาม

กลไกในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตกนั้นเริ่มต้นจากการที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกด้วยความเร็วสูงมาก ความร้อนเนื่องจากการเสียดสีกับบรรยากาศจะระเหิดเทหวัตถุดาวตก หรือทำให้อะตอมที่ผิวเทหวัตถุดาวตกแตกตัวจากเทหวัตถุดาวตกนั่นเอง อะตอมที่หลุดออกจากผิวเทหวัตถุดาวตกซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของเทหวัตถุดาวตกจะชนกับ โมเลกุลของอากาศโดยรอบส่งผลให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคมีประจุขึ้น โมเลกุลจะแตกตัวเป็นทางยาวตามแนวการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตก กลุ่มประจุเหล่านี้ก็คือรอยทางเดินของดาวตก ประจุที่เกิดขึ้นจะแพร่ออกทำให้รูปทรงของรอยทางเดินของดาวตกไม่ได้เป็นทรงกระบอกตรง แต่จะเป็นพาราโบลาโดยมีหัวเทหวัตถุดาวตกอยู่ตรงจุดยอดของพาราโบลาโดยมีตัวเอง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดิน

ตาราง 2.1 ฝนดาวตกที่สำคัญในรอบ 1 ปี (อ้างจาก Sugar, 1964)

ชื่อของฝนดาวตก	ช่วงเวลาที่เกิดฝนดาวตกมากที่สุด	อัตราสูงสุดที่สามารถเห็นได้ (ดวง/ชั่วโมง)
ควอดแดรนต์คิดส์ (Quadrantids)	1 - 4 มกราคม (3 มกราคม)*	30
พิน (Lyrids)	20 - 23 เมษายน (21 เมษายน)	5
อีต้า คนแบกหม้อน้ำ (η Aquarids)	2 - 6 พฤษภาคม (4 พฤษภาคม)	5
เดลต้า คนแบกหม้อน้ำ (δ Aquarids)	15 กรกฎาคม - 15 สิงหาคม	10
เพอร์เซอิดส์ (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

ของดาวตกโดยทั่วไปจะพิจารณาให้รูปทรงของรอยทางเดินเป็นทรงกระบอกตรงทั้งนี้เพราะความเร็วในการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกสูงกว่าอัตราการแพร่ออกของประจุอยู่มาก

2.1.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตก

ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเทหวัตถุดาวตกและรอยทางเดินของดาวตกที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ได้แก่ แก่มวลและการแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตก ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก ความสูงของการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตก ความยาวของรอยทางเดินของดาวตก รัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินของดาวตก และการแพร่ของรอยทางเดินของดาวตก รายละเอียดในแต่ละเรื่องนั้นจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้

ก. มวลและการแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตก

มวลของเทหวัตถุดาวตกเป็นตัวกำหนดขนาดของดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลก ขนาดของดาวตกสามารถพิจารณาได้ทั้งในเชิงทัศนศาสตร์และเชิงกลันวิทย์ ขนาดในเชิงทัศนศาสตร์นั้นกำหนดในรูป

ของระดับความสว่างเชิงทัศน ส่วนขนาดในเชิงคลื่นวิทยุกำหนดในรูปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของเทหวัตถุดาวตกและขนาดทั้งในเชิงทัศนศาสตร์และเชิงคลื่นวิทยุแสดงในตาราง 2.2 การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ถ้าพิจารณาเฉพาะเทหวัตถุดาวตกกระจัดกระจาย จำนวนของเทหวัตถุดาวตกจะแปรผกผันกับมวลในลักษณะที่ประมาณได้ว่า ถ้ากำหนดมวลของเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 1 เป็น $1/10$ เท่าของมวลของเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 2 จำนวนเทหวัตถุดาวตกที่มีมวลมากกว่าเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 1 จะเป็น 10 เท่าของจำนวนเทหวัตถุดาวตกที่มีมวลมากกว่าเทหวัตถุดาวตกขนาดที่ 2 ตัวอย่างเช่น ดาวตกที่มีมวลมากกว่า 10^{-4} กรัมจะมีจำนวนเป็น 10 เท่าของดาวตกที่มีมวลมากกว่า 10^{-3} กรัม เป็นต้น [1] จำนวนดาวตกแต่ละขนาดแสดงในตาราง 2.2 ด้วยเช่นกัน

ข. ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก

ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่เข้าสู่โลกมีค่าอยู่ระหว่าง 11.3 - 72 กิโลเมตรต่อวินาที [1] โดยขอบเขตต่างเป็นความเร็วหลุดพ้นของวัตถุที่เคลื่อนที่ออกจากโลก ขณะที่ขอบเขตบนเป็นผลรวมระหว่างความเร็วในการโคจรของโลกกับความเร็วหลุดพ้นจากระบบสุริยะ การที่เทหวัตถุดาวตกจะพุ่งเข้าสู่โลกด้วยความเร็วเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกในอวกาศเอง ทิศทางและตำแหน่งที่พุ่งเข้าสู่โลก เป็นต้น เนื่องจากตำแหน่งที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกมีผลต่อความเร็วของดาวตก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเวลาที่ถ่วงถ่วงมีผลต่อการพุ่งเข้าสู่โลกของดาวตก

ค. ความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินของดาวตก

การก่อตัวเป็นรอยทางเดินเกิดขึ้นเมื่อพลังงานความร้อนจากการเสียดสีกับบรรยากาศมีค่ามากเพียงพอ ดังนั้นความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินจึงขึ้นอยู่กับทั้งความหนาแน่นของบรรยากาศและความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกเคลื่อนที่ บรรยากาศที่มีความหนาแน่นเพียงพอที่จะก่อให้เกิดรอยทางเดินจะอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 120 กิโลเมตร และโดยปกติเทหวัตถุดาวตกจะแตกตัวหมดที่ระดับสูงกว่า 80 กิโลเมตร [1]

ง. ความยาวของรอยทางเดินของดาวตก

ความยาวของรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตกเป็นหลัก อย่างไรก็ตามความเร็วและแนวการพุ่งเข้าสู่โลกจะมีผลต่อความยาวของรอยทางเดินด้วย ทั้งนี้เพราะความเร็วและแนวการพุ่งเข้าสู่โลกจะเป็นตัวกำหนดอัตราการแตกตัว โดยทั่วไปความยาวของรอยทางเดินของดาวตกกระจัดกระจายจะอยู่ที่ประมาณ 15 กิโลเมตร [1]

ตาราง 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมวล ปริมาณ รัศมี ระดับความสว่างเชิงทัศน
และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของดาวตก [1]

มวล (g)	จำนวนเทหวัตถุ ดาวตกที่มีมวล มากกว่าที่กำหนด ที่เข้าสู่โลก ในแต่ละวัน	รัศมี	ระดับ ความสว่าง เชิงทัศน	ความหนา แน่น อิเล็กตรอน เชิงเส้น (e^-/m)	หมายเหตุ
10^4	10	8 cm	-12.5	-	มวลของดาวตกมาก พอที่จะตกถึงพื้นโลก
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}	ขนาดเล็กที่สุดโดย ประมาณที่เรดาร์ ตรวจจับได้
10^{-8}	-	8 microns	17.5	-	

จ. รัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินของดาวตก

เมื่อรอยทางเดินของดาวตกก่อตัวประจุที่เกิดขึ้นจะแพร่ออกในทันทีทันใด จากนั้นอัตราการแพร่จะช้าลงเนื่องจากการชนกันระหว่างประจุ ระยะที่ประจุแพร่ออกอย่างรวดเร็วในช่วงแรกถือว่าเป็นรัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดิน ค่ารัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นประจุของบรรยากาศที่แวดล้อมรอยทางเดิน ดังนั้นรอยทางเดินที่ก่อตัวที่ความสูงมากจึงมีรัศมีเริ่มต้นมากกว่ารอยทางเดินที่ก่อตัวที่ความสูงต่ำกว่า ค่าเฉลี่ยของรัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดินจะอยู่ระหว่าง 0 – 4.35 เมตร [1] ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของรอยทางเดิน การวิเคราะห์การกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจึงมักจำลองให้รอยทางเดินเป็นทรงกระบอกตรงที่มีความยาวเป็นอนันต์

ฉ. การแพร่ของรอยทางเดินของดาวตก

รอยทางเดินของดาวตกจะขยายตัวออกเนื่องจากการแพร่ของประจุในรอยทางเดิน โดยอัตราการแพร่จะแสดงในรูปพื้นที่ที่รอยทางเดินขยายตัวออกในหนึ่งหน่วยเวลา อัตราการแพร่นี้เรียกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) มีหน่วยเป็น m^2/s ถ้าไม่รวมการแพร่อย่างทันทีทันใดในช่วงที่รอยทางเดินก่อตัว สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1 – 140 m^2/s [1] โดยรอยทางเดินที่อยู่สูงจากพื้นโลกมากจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่มาก ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นประจุในบรรยากาศแวดล้อมรอยทางเดินมีค่าน้อยนั่นเอง

2.2 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภทคือ ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวและลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้น ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวเป็นลักษณะสมบัติเชิงสถิติที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของสัญญาณรับในคาบเวลาที่นานพอที่จะเห็นจำนวนและลักษณะของสัญญาณรับมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นจะพิจารณาการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของสัญญาณในคาบสั้นๆ ที่สามารถประมาณได้ว่าจำนวนสัญญาณรับมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การพิจารณาลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นโดยทั่วไปจะพิจารณาการรับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดิน ในช่วงไม่เกิน 1 ชั่วโมง ถ้าระยะเวลาที่สังเกตสัญญาณเกินกว่านี้จะพบว่าอัตราการรับสัญญาณได้จะเริ่มเปลี่ยนไปซึ่งจะเป็นเรื่องของลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้

กลไกหลักที่ทำให้อัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเปลี่ยนแปลงไปก็คือการหมุนรอบตัวเองของโลก และการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ การหมุนรอบตัวเองของโลกทำให้อัตราการรับสัญญาณที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนโลก ณ เวลาต่างๆ ในรอบ 1 วันมีค่าไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน (diurnal variation) ขณะที่การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (seasonal variation) รายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลตลอดจนปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 แบบจะแยกกล่าวเป็นหัวข้อดังนี้

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน

การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันเป็นผลมาจากการหมุนรอบตัวเองของโลก สามารถอธิบายกลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้โดยอาศัยแผนภาพการหมุนรอบตัวเองของโลกและการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เมื่อมองจากอวกาศมายังขั้วโลกเหนือดังรูป 2.2



รูป 2.2 กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน

เนื่องจากเทหวัตถุดาวตกส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับโลก แต่มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ช้ากว่าโลก เมื่อพิจารณาจากรูป 2.2 จะเห็นได้ว่า ส่วนของโลกในด้านเดียวกันกับทิศการโคจรของโลกหรือที่เรียกว่าด้านหน้าของโลกจะกวาดเทหวัตถุดาวตกเข้ามายังโลก เทหวัตถุที่จะเข้ามายังส่วนของโลกในด้านตรงข้ามจะต้องเป็นเทหวัตถุที่มีอัตราเร็วสูงกว่าโลก ดังนั้นด้านหน้าของโลกจึงมีจำนวน

ดาวตกสูงกว่าด้านหลังของโลก เมื่อพิจารณาประกอบกับการหมุนรอบตัวเองของโลกจะเห็นได้ว่า ด้านหน้าของโลกก็คือเวลาที่ท้องถิ่นในช่วงเช้านั้นเอง ขณะที่ด้านหลังของโลกก็คือเวลาที่ท้องถิ่นในช่วงเย็น หากประมาณว่าการแจกแจงความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกมีลักษณะคงตัว จำนวนเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนโลกในรอบ 1 วันก็จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์ กล่าวคือจำนวนเทหวัตถุดาวตกจะเพิ่มจากระดับเฉลี่ยในเวลาเที่ยงคืนจนถึงระดับสูงสุดในเวลา 6 นาฬิกาและจะลดลงอย่างต่อเนื่องผ่านระดับเฉลี่ยในเวลาเที่ยงวันจนถึงระดับต่ำสุดในเวลา 18 นาฬิกาและจากนั้นจะเพิ่มอีกครั้งจนถึงระดับเฉลี่ยในเวลาเที่ยงคืน [9] ปรากฏการณ์นี้เป็นสาเหตุให้จำนวน ดาวตกที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาในช่วงรุ่งสางมากกว่าในช่วงหัวค่ำด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงจำนวน เทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้อัตราการรับสัญญาณได้ในรอบ 1 วันของข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้เช่นกัน นอกเหนือจากจำนวนดาวตกหรืออัตราการรับสัญญาณได้แล้ว ความเร็วของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์เช่นกัน ทั้งนี้เพราะในช่วงเช้าโลกจะกวาดเทหวัตถุดาวตกเข้ามาสู่โลกทำให้ความเร็วของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกในช่วงเช้ามากกว่าในช่วงหัวค่ำซึ่งโลกจะเคลื่อนที่หนี เทหวัตถุดาวตก ความเร็วของเทหวัตถุดาวตกที่ไม่เท่ากันนี้ส่งผลให้ความสูงในการก่อตัวเป็นรอยทางเดินและอัตราการแพร่ไม่เท่ากันและท้ายที่สุดความยาวนานของสัญญาณก็จะไม่เท่ากันด้วย

เมื่อพิจารณาเฉพาะอัตราการรับสัญญาณได้ อัตราส่วนระหว่างอัตราการรับสัญญาณได้มากที่สุดต่ออัตราการรับสัญญาณ ได้น้อยที่สุดในแต่ละวันจะอยู่ที่ประมาณ 4:1 โดยช่วงที่รับสัญญาณ ได้มากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวันอาจเลื่อนไปจากเวลา 6 นาฬิกาและ 18 นาฬิกา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อผลของภูมิประเทศและลักษณะการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

การแจกแจงความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกมีลักษณะ ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวการ โคจรของโลก กล่าวคือความหนาแน่นของเทหวัตถุดาวตกกระจุกกระจายมีค่ามากที่สุดในช่วงเดือน มิถุนายนจนถึงเดือนกันยายน และมีค่าน้อยที่สุดในระหว่างเดือนมกราคมจนถึงเดือนมีนาคม [9] ดังรูป 2.4 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลจึงมีลักษณะคล้ายรูปไซน์เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วัน นอกจากนี้โลกยังโคจรผ่านสายธารเทหวัตถุดาวตกที่สำคัญในช่วงครึ่งปีหลังมากกว่าในช่วงครึ่งปี

แรกซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนของอัตราการรับสัญญาณในช่วงครึ่งปีหลังต่ออัตราการรับสัญญาณในช่วงครึ่งปีแรกเพิ่มขึ้นด้วย

2.2.3 ผลของพิกัดที่ตั้งและแนวการวางตัวของข่ายเชื่อม โยงต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

ระยะยาว

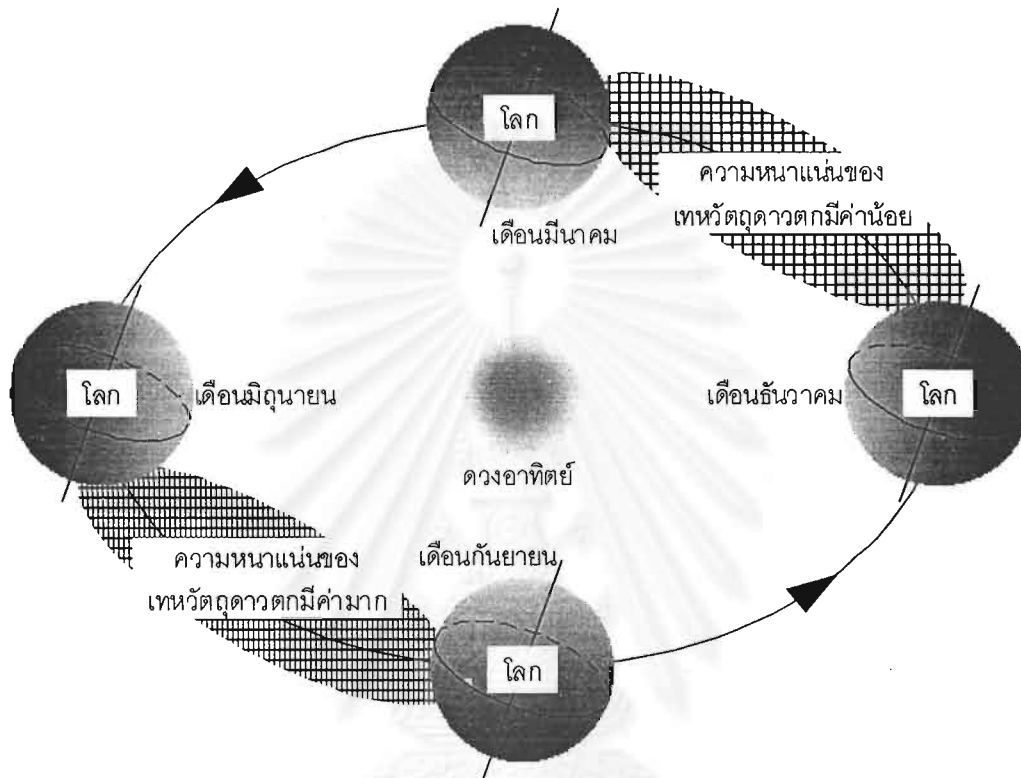
การเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่กล่าวถึงใน 2 หัวข้อที่ผ่านมา จะมีลักษณะที่เป็นแบบเฉพาะตัวของข่ายเชื่อม โยงแต่ละข่ายซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดละติจูดที่ตั้งสถานีส่งและสถานีรับ และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อม โยง พิกัดละติจูดของข่ายเชื่อม โยงจะมีผลสำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรกเป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่โลกหมุนรอบตัวเอง ความเร็วเชิงเส้นของตำแหน่งที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีค่ามากกว่าตำแหน่งที่ใกล้ขั้วโลก ดังนั้นความเร็วปรากฏของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกในละติจูดต่างกันจึงไม่เท่ากัน กลไกดังกล่าวทำให้อัตราสูงสุดต่ออัตราต่ำสุดของลักษณะสมบัติต่างๆ ในรอบ 1 วันที่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรมีค่ามากกว่าที่บริเวณใกล้ขั้วโลก ผลประการที่สอง เกี่ยวเนื่องกับการที่แกนโลกเอียงทำให้ด้านหน้าของโลกไม่ได้อยู่บนเส้นศูนย์สูตรตลอดเวลา ในช่วงครึ่งปีหลังซีกโลกเหนือจะเป็นด้านหน้าของโลก ขณะที่ในครึ่งปีแรกซีกโลกใต้จะเป็นด้านหน้าของโลก ดังรูป 2.3 ผลดังกล่าวประกอบกับลักษณะการแจกแจงเทหวัตถุดาวตกที่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวโคจรของโลกทำให้อัตราสูงสุดต่ออัตราต่ำสุดของลักษณะสมบัติต่างๆ ในรอบ 1 ปีที่ละติจูดต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน

นอกเหนือจากพิกัดละติจูดแล้ว แนวการวางตัวของข่ายเชื่อม โยงก็มีผลต่อลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว โดยเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับตำแหน่งปรากฏรอยทางเดินของดาวตกเมื่อเทียบกับแนวการวางตัวของข่ายเชื่อม โยง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยรูป 2.2 ประกอบ เมื่อพิจารณาจากรูป 2.2 จะเห็นได้ว่า ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนโลก ณ เวลาที่ยังคืน เทหวัตถุดาวตกจะพุ่งเข้าสู่โลกทางด้านทิศตะวันออกมากกว่าทิศตะวันตก ขณะที่เวลาเที่ยงวันเทหวัตถุดาวตกจะพุ่งเข้าสู่โลกทางด้านทิศตะวันตกมากกว่าทิศตะวันออก กลไกดังกล่าวทำให้บริเวณจุดร้อน (hot spot) หรือตำแหน่งปรากฏหลักของรอยทางเดินของดาวตกเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ในช่วงเวลาแต่ละช่วงของวัน ผลดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแนวการวางตัวของข่ายเชื่อม โยง

2.3 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

การแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญมาก โดยเฉพาะกับระบบสื่อสารผ่านดาวตกที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราข้อมูลได้แบบทันทีทันใด การทราบลักษณะการแจกแจงดังกล่าวจะมีส่วนช่วยในการออกแบบระเบียบวิธี

สื่อสารของชายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกเป็นอย่างมาก เนื่องจากแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งกระเจิงคลื่นวิทยุและขนาดของรอยทางเดิน



รูป 2.3 กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

ซึ่งขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตก ขณะที่ความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ ดังนั้นจึงสามารถหาลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกได้ถ้าทราบลักษณะการแจกแจงตำแหน่งกระเจิงคลื่นวิทยุ การแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตกและสัมประสิทธิ์การแพร่ อย่างไรก็ตามทั้งตำแหน่งกระเจิงและสัมประสิทธิ์การแพร่จะขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายปัจจัย เช่น ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก และความหนาแน่นประจุของบรรยากาศแวดล้อมรอยทางเดิน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวด้วย เพื่อที่จะตัดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาว การพิจารณาการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจึงต้องพิจารณาในคาบเวลาแคบๆ ที่ถือได้ว่ายังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติ

เชิงสถิติระยะยาว โดยทั่วไปถือว่าคาบเวลาดังกล่าวไม่เกิน 1 ชั่วโมง ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นทั้งในส่วนของแอมพลิจูดและความยาวนานที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะแนวทางในการวิเคราะห์เท่านั้น โดยจะไม่แสดงลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานไว้ เนื่องจากการวิเคราะห์ดังกล่าวเกี่ยวข้องกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินแต่ละรอย

2.3.1 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

แอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกขึ้นอยู่กับทั้งปัจจัยคงที่และปัจจัยที่แปรเปลี่ยนได้ โดยปัจจัยคงที่ได้แก่ลักษณะสมบัติต่างๆ ของระบบสื่อสาร เช่น กำลังส่ง เป็นต้น ขณะที่ปัจจัยที่แปรเปลี่ยนได้แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ด้วยกันคือ ตำแหน่งที่กระเจิงสัญญาณและแนวการวางตัวของรอยทางเดิน และขนาดของรอยทางเดิน โดยตำแหน่งที่กระเจิงสัญญาณและแนวการวางตัวของรอยทางเดินนั้นจะเป็นตัวกำหนดค่าให้กับค่าปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ มุมกระเจิง และโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง เป็นต้น ขณะที่ขนาดของรอยทางเดินจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการกระเจิงคลื่นวิทยุของรอยทางเดิน การวิเคราะห์การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดโดยละเอียดจำเป็นต้องรู้ลักษณะการแจกแจงทั้ง 2 ส่วน ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรสุ่มเป็นจำนวนมาก การวิเคราะห์การแจกแจงแอมพลิจูดโดยทั่วไปจึงกำหนดให้ปัจจัยที่เกี่ยวกับตำแหน่งที่กระเจิงสัญญาณทุกตัวเป็นค่าคงที่ โดยมักจะถือว่าการกระเจิงสัญญาณเกิดที่ตำแหน่งบนท้องฟ้าที่อยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ดังนั้นแอมพลิจูดของสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับขนาดของรอยทางเดินเพียงอย่างเดียว ลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดจึงหาได้จากลักษณะการแจกแจงมวลของเทวดูดาวตก อย่างไรก็ตามสมรรถนะของเครื่องคำนวณในปัจจุบันทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีตัวแปรสุ่มหลายตัวพร้อมกันได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์การแจกแจงแอมพลิจูดโดยการเปลี่ยนการพิจารณาปัจจัยบางปัจจัยจากค่าคงที่มาเป็นตัวแปรสุ่มมากขึ้น

2.3.2 การแจกแจงความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีนิยามที่แตกต่างกัน 2 นิยาม นิยามแรกเป็นนิยามที่ใช้ในระบบสื่อสาร ได้ให้ความหมายของความยาวนานว่า เป็นเวลาที่ระดับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีค่าสูงกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ขณะที่นิยามที่สองซึ่งใช้ในงานวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแบ่งย่อยเป็นนิยามสำหรับรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

การวิเคราะห์ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยเฉพาะในงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะสมบัติของสัญญาณรับ โดยตรงมักจะพิจารณาให้สัญญาณรับทุก

สัญญาณมีลักษณะแบบสัญญาณที่กระเจิงมาจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ กล่าวคือ มีลักษณะแบบ เอ็กซ์โพเนนเชียลลบ การแจกแจงความยาวนานของสัญญาณตามนิยามที่ 1 จะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวการเสื่อมสลาย (decay constant) หรือเวลาที่สัญญาณรับมีแอมพลิจูดเหลือร้อยละ 37 ของแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งเป็นความยาวนานตามนิยามที่ 2 สำหรับรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ปกติแล้วการวิเคราะห์การแจกแจงของความยาวนานตามนิยามที่ 1 จะกำหนดให้ค่าคงตัวการเสื่อมสลายของรอยทางเดินมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากค่าคงตัวการเสื่อมสลายจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงในการก่อตัว เป็นรอยทางเดินอีกทีหนึ่ง การวิเคราะห์การแจกแจงความยาวนานโดยละเอียดจึงต้องทราบการแจกแจงลักษณะสมบัติอื่นๆ ย้อนกลับขึ้นไปด้วย

2.4 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดิน

ความหนาแน่นสูง

การสร้างแบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตกอาศัยข้อสมมติที่สำคัญ 4 ประการดังนี้ [1]

1. แนวการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่โลกเป็นเส้นตรง ดังนั้นรอยทางเดินของดาวตกที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีแนวการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุดาวตกเป็นแนวแกนของรอยทางเดิน
2. ความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกอยู่ระหว่าง 11.3 – 72 km/s ขณะที่สัมประสิทธิ์การแผ่มีค่าอยู่ระหว่าง 1 – 140 m²/s ดังนั้นความเร็วที่เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลกจึงมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอัตราการขยายตัวเนื่องจากการแผ่ ทำให้สามารถประมาณได้ว่ารอยทางเดินของดาวตกเมื่อเริ่มก่อตัวมีลักษณะเป็นกลุ่มประจุเรียงตัวตามแนวแกนของรอยทางเดิน โดยที่การแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวแกนของรอยทางเดินเป็นแบบคงตัว
3. ระยะทางที่เทหวัตถุดาวตกแตกตัวเป็นประจุอิสระมีค่ามาก กล่าวคือรอยทางเดินของดาวตกมีความยาวปกติอยู่ในหลักของสิบกิโลเมตร ซึ่งถือว่ามีความยาวมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นวิทยุในย่านปฏิบัติการสื่อสารผ่านดาวตก ดังนั้นจึงประมาณได้ว่ารอยทางเดินของดาวตกมีความยาวเป็นอนันต์
4. ประจุที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่อย่างอิสระ ดังนั้นผลลัพธ์ของการแผ่จึงเป็นการแผ่ในแนวรัศมี และการแจกแจงความหนาแน่นประจุตามแนวรัศมีนี้จะมีลักษณะเป็นแบบเกาส์

เมื่อพิจารณาหลักการก่อตัวของรอยทางเดินของดาวตกและข้อสมมติดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถกล่าวได้ว่า

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

แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตกนับตั้งแต่รอยทางเดินเริ่มก่อตัวขึ้นจนกระทั่งรอยทางเดินแพร่จางหายไป ในบรรยากาศสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูป 2.4

2.4.1 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

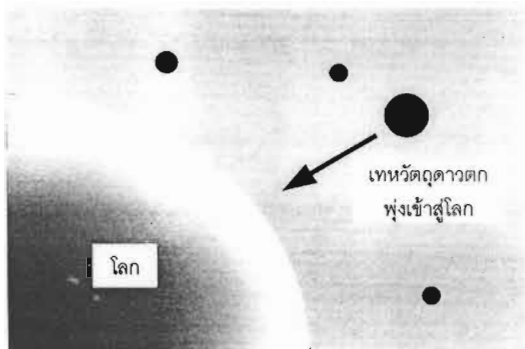
รอยทางเดินความหนาแน่นต่ำเป็นรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นประจุน้อยจนประมาณได้ว่าพลังงานคลื่นวิทยุเกือบทั้งหมดสามารถแพร่กระจายผ่านรอยทางเดิน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ขณะที่พลังงานคลื่นวิทยุในส่วนของกระเจิงกลับมายังสายอากาศรับจะเป็นผลรวมของการกระเจิงอย่างอิสระ (independent scattering) โดยอิเล็กตรอนแต่ละตัวในรอยทางเดิน อย่างไรก็ตามพลังงานคลื่นวิทยุเกือบทั้งหมดที่กระเจิงกลับมายังสายอากาศรับจะเป็นผลรวมของการกระเจิงกลับอย่างอิสระ โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในระยะครึ่งหนึ่งของบริเวณเฟสเนลแรกเท่านั้น ผลรวมของการกระเจิงจึงสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสนามกระเจิงจากอิเล็กตรอนแต่ละตัวในระยะดังกล่าวดังนี้

พิจารณากรณีการกระเจิงกลับหรือกรณีเรดาร์ กำหนดให้แกนของรอยทางเดินวางตัวอยู่บนแกน z ในระบบพิกัดทรงกระบอกดังรูป 2.5 อัตราส่วนระหว่างสนามกระเจิงจากอิเล็กตรอนหนึ่งตัวต่อสนามตกกระทบมีค่าดังสมการ (1) [25]

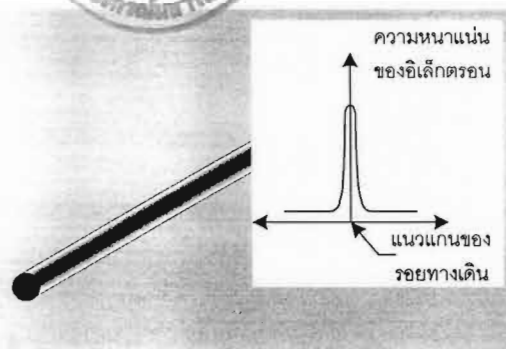
$$\frac{E^s}{E^i} = \frac{r_e}{R} \quad (1)$$

โดยที่ r_e คือรัศมีของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 2.82×10^{-15} m.

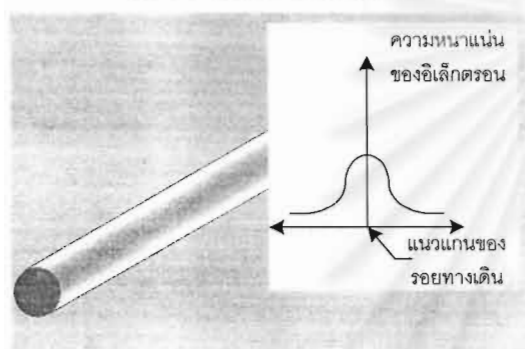
และ R คือระยะจากอิเล็กตรอนถึงจุดสังเกต



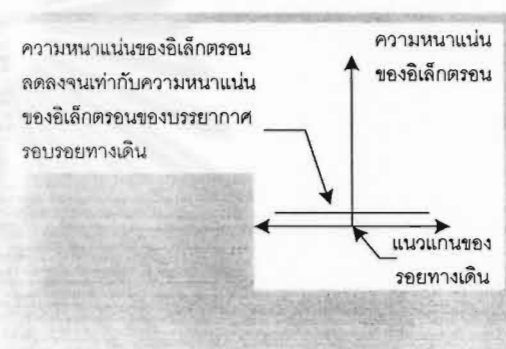
ก. เทหวัตถุดาวตกพุ่งเข้าสู่โลก (รอยทางเดินยังไม่ก่อตัว)



ข. รอยทางเดินเริ่มก่อตัว

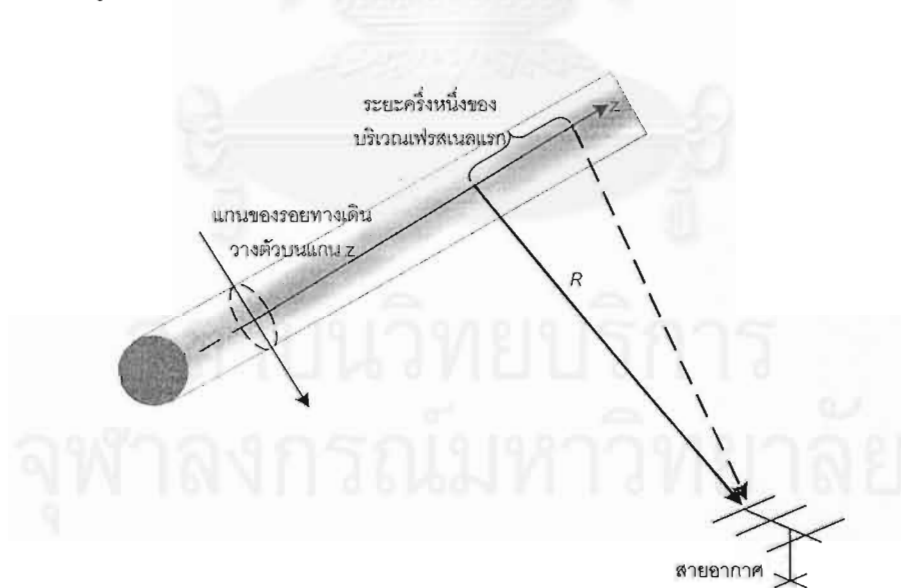


ค. รอยทางเดินแพร่ออก



ง. รอยทางเดินสิ้นสุดลง

รูป 2.4 แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินของดาวตก



รูป 2.5 เวกาคณิตของการกระเจิงกลับ

ดังนั้นผลรวมของสนามกระเจิงจึงมีสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{E^s}{E^i} &= \frac{r_e}{R} \int_V N \exp(j2kR') dV \\ &= \frac{r_e}{R} \int_0^{\sqrt{\frac{R\lambda}{2}}} \int_0^\pi \int_0^\pi 2N \exp(j2kR') d\phi r dr dz\end{aligned}\quad (2)$$

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

และ N คือความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิเล็กตรอน เป็นฟังก์ชันการแจกแจงแบบเกาส์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น q ในหน่วยจำนวนอิเล็กตรอนต่อเมตร (e/m) ดังสมการ (3) [26, 27]

$$N = \frac{q}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \quad (3)$$

โดยที่ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนในรอยทางเดิน

t คือเวลา

r คือระยะในแนวรัศมีจากแกนของรอยทางเดิน

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

แทนสมการ (3) ลงในสมการ (2) ผลรวมสนามกระเจิงต่อสนามตกกระทบตามสมการ (2) จึงเท่ากับ [28]

$$\frac{E^s}{E^i} = r_e q \sqrt{\frac{\lambda}{2R}} \exp\left(-\frac{16\pi^2 Dt}{\lambda^2}\right) \quad (4)$$

สมการ (4) เป็นรูปหนึ่งของแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่มีเรขาคณิตของการกระเจิงเป็นแบบเรดาร์ ถ้ากำหนดให้สายอากาศในรูป 2.5 มีอัตราขยายเท่ากับ G แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำในรูปอัตราส่วนระหว่างกำลังรับต่อกำลังส่งจะแสดงได้ดังนี้

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G^2 \lambda^3 r_e^2 q^2}{32\pi^2 R^3} \exp\left(-\frac{32\pi^2 Dt}{\lambda^2}\right) \quad (5)$$

ในกรณีที่การกระเจิงเป็นแบบการกระเจิงไปข้างหน้าดังรูป 2.6 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำในรูปอัตราส่วนระหว่างสนามกระเจิงต่อสนามตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างกำลังรับต่อกำลังส่งจะเปลี่ยนไปตามลำดับดังนี้

$$\frac{E^s}{E^i} = \frac{r_e q \sin \alpha}{R_R} \sqrt{\frac{\lambda R_T R_R}{(R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)}} \exp\left(-\frac{16\pi^2 Dt}{\lambda^2 \sec^2 \phi'}\right) \quad (6)$$

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^3 r_e^2 q^2 \sin^2 \alpha}{16\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)} \exp\left(-\frac{32\pi^2 Dt}{\lambda^2 \sec^2 \phi'}\right) \quad (7)$$

โดยที่ R_T และ R_R คือระยะจากสายอากาศส่งไปยังตำแหน่งกระเจิงและระยะจากตำแหน่งกระเจิงมายังสายอากาศรับตามลำดับ

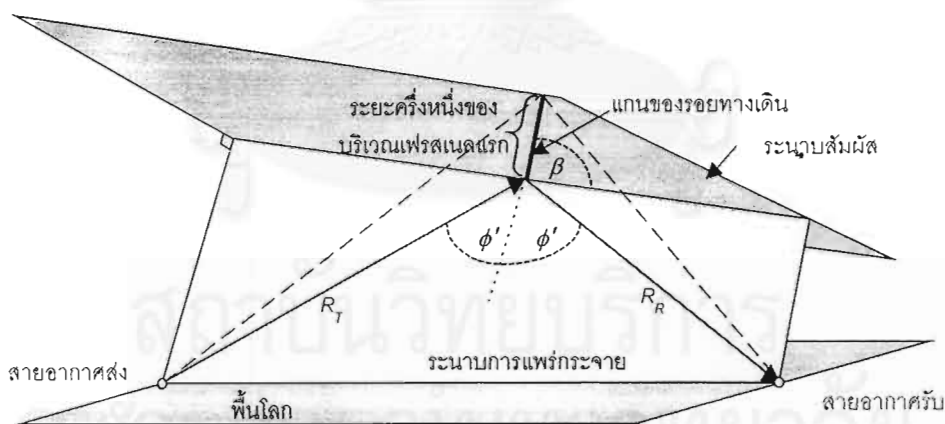
α คือมุมระหว่างเวกเตอร์สนามตกกระทบและแนว R_R ซึ่งมีค่าเป็น 90° ในกรณีเรดาร์

β คือแนวการวางตัวของรอยทางเดินซึ่งวัดเป็นมุมระหว่างแนวแกนของรอยทางเดินกับ

รอยตัดระหว่างระนาบสัมผัสและระนาบการแพร่กระจาย ดังรูป 2.6

ϕ' คือค่าครึ่งหนึ่งของมุมกระเจิงหรือมุมระหว่างแนว R_T และ R_R

และ G_T และ G_R คืออัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับตามลำดับ



รูป 2.6 เรขาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้า

2.4.2 แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

รอยทางเดินความหนาแน่นสูงเป็นรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากจนประมาณได้ว่า ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินภายในบริเวณรัศมีค่าหนึ่งมีค่ามากเพียงพอที่

จะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกในรัศมีดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าศูนย์ รัศมีดังกล่าวนี้เรียกว่ารัศมีวิกฤต (critical radius) คลื่นวิทยุที่ตกกระทบรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจะทะลุผ่านรอยทางเดินส่วนที่อยู่นอกรัศมีวิกฤต เมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายจนถึงรัศมีวิกฤตจะสะท้อนกลับในลักษณะเดียวกับการสะท้อนคลื่นของทรงกระบอกโลหะ แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจึงเป็น ทรงกระบอกโลหะหน้าตัดวงกลม มีความยาวเป็นอนันต์ และมีรัศมีเท่ากับค่ารัศมีวิกฤต รัศมีวิกฤตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการแพร่ของอิเล็กตรอนในรอยทางเดิน โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกซึ่งความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าสูง เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนตลอดแนวหน้าตัดลดลงมาถึงระดับหนึ่งค่ารัศมีวิกฤตจะลดตามมามีค่าเป็นศูนย์ รอยทางเดินความหนาแน่นสูงก็จะเปลี่ยนเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

ค่ารัศมีวิกฤตหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กทริกกับความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิเล็กตรอนของรอยทางเดิน (สมการ(3)) โดยกำหนดให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับศูนย์แล้วแก้สมการหาค่ารัศมีออกมา ซึ่งจะได้ค่ารัศมีวิกฤตดังนี้ [1]

$$r_c = \left[4Dt \ln \left(\frac{r_e q \lambda^2 \sec^2 \phi'}{4\pi^2 Dt} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงรังสีและเรขาคณิตของการกระเจิงไปข้างหน้าดังรูป 3.6 อัตราส่วนระหว่างสนามกระเจิงคือสนามตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างกำลังรับต่อกำลังส่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{E^s}{E^i} = \frac{\sin \alpha}{R_R \sqrt{2\lambda}} \sqrt{\frac{\lambda R_T R_R}{(R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)}} \left[\frac{4Dt}{\sec^2 \phi'} \ln \left(\frac{r_e q \lambda^2 \sec^2 \phi'}{4\pi^2 Dt} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^2 \sin^2 \alpha}{32\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R)(1 - \sin^2 \phi' \cos^2 \beta)} \left[\frac{4Dt}{\sec^2 \phi'} \ln \left(\frac{r_e q \lambda^2 \sec^2 \phi'}{4\pi^2 Dt} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

ในกรณีเรดาร์ สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศตัวเดียวกัน ดังนั้น $G_T = G_R$ นอกจากนี้ระยะ R_T จะมีค่าเท่ากับระยะ R_R มุม ϕ' และมุม α มีค่าเท่ากับ 90° และ 0° ตามลำดับ

2.4.3 ขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำจะพบว่า ระดับสัญญาณจะพุ่งขึ้นถึงจุดสูงสุดในทันทีที่รอยทางเดินก่อตัว จากนั้นระดับสัญญาณจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจนกระทั่งระดับสัญญาณเท่ากับระดับสัญญาณรบกวน ดังรูป 2.7 ก. ขณะที่ถ้าหากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจะพบว่าระดับสัญญาณจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดและจะลดระดับลงตามการขยายและหดตัวของทรงกระบอกโลหะ (ค่ารัศมีวิกฤตเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจากนั้นจะลดลงจนเป็นศูนย์) ตามลำดับ เมื่อรัศมีวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์รอยทางเดินของดาวตกจะกลายเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ระดับสัญญาณจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจนกระทั่งระดับสัญญาณเท่ากับระดับสัญญาณรบกวน ดังรูป 2.7 ข.

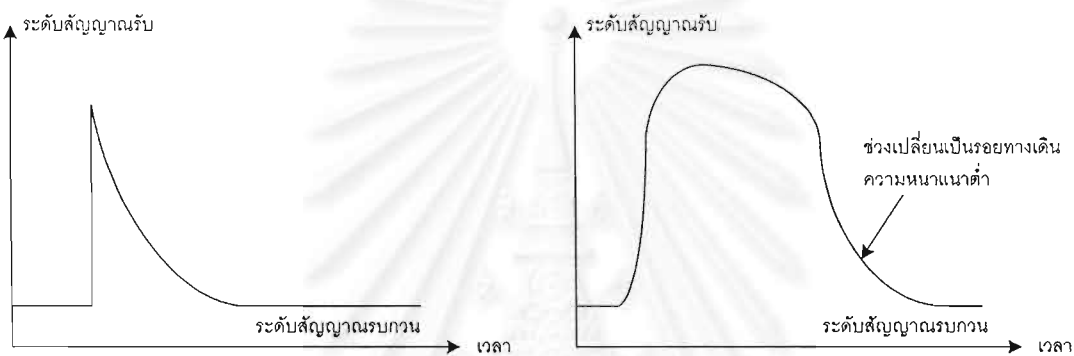
สัญญาณที่ได้รับได้จากการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจะมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าน้อยมาก ($q \leq 10^{13}$ e/m) และจะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่ามาก ($q \geq 10^{16}$ e/m) ขณะที่ถ้าหากความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าระหว่าง 2 ค่าดังกล่าวข้างต้น สัญญาณรับจะมีลักษณะผสมกันระหว่างสัญญาณรับจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสัญญาณและจำแนกประเภทของรอยทางเดินจึงได้มีการกำหนดความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่าง รอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ซึ่งค่าขอบเขตดังกล่าวกำหนดจากนิยาม 2 นิยามดังนี้

นิยามที่ 1 ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดิน ความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง คือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ทำให้แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณรับที่วิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทั้งสองมีค่าเท่ากัน ถ้าหากอาศัยนิยามนี้ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดินทั้งสองประเภทจะมีค่าเท่ากับ 0.75×10^{14} e/m [1]

นิยามที่ 2 ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นขอบเขตระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูง คือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ทำให้ความยาวนานของสัญญาณที่วิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทั้งสองมีค่าเท่ากัน โดยที่ความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำมีค่าเท่ากับเวลาที่สัญญาณลดระดับลงจนมีค่าเป็นร้อยละ 37 ($= \exp(-1)$) ของระดับสัญญาณสูงสุด ขณะที่ความยาวนานของสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดิน

ความหนาแน่นสูงมีค่าเท่ากับเวลาที่รัศมีวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์(เวลาที่รอยทางเดินไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นสูงไว้ได้) ถ้าหากอาศัยนิยามนี้ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นค่าขอบเขตระหว่างรอยทางเดินทั้งสองประเภทจะมีค่าเท่ากับ 0.885×10^{14} e/m [29]

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



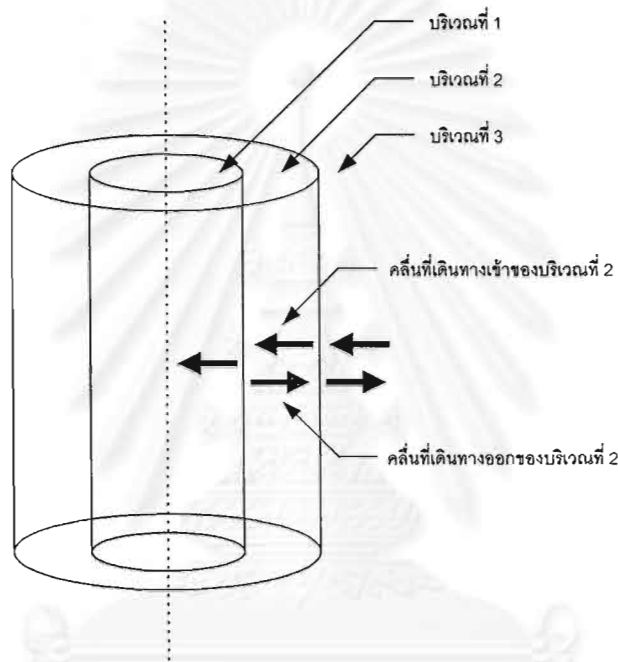
ก. ลักษณะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ
 ข. ลักษณะสัญญาณที่สะท้อนจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

รูป 2.7 ลักษณะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

2.5 แบบจำลองรอยทางเดินแบบทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น [21]

แบบจำลองนี้จำลองรอยทางเดินของดาวตกในลักษณะเดียวกับแบบจำลองทางกายภาพที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว ต่างกันตรงที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินในแนวรัศมีจะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นลักษณะทางกายภาพของรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จึงมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกหลายชั้นเรียงตัวบนแกนเดียวกัน โดยที่แต่ละชั้นมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนคงตัวแต่ต่างจากชั้นอื่นๆ รอยทางเดินแต่ละชั้นจึงมีสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน พลังงานคลื่นวิทยุที่ตกกระทบรอยทางเดินเป็นชั้นๆ จะทะลุผ่านเข้าไปในรอยทางเดินส่วนหนึ่ง ขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับออกมา คลื่นที่ทะลุผ่านก็จะตกกระทบกับรอยทางเดินในชั้นถัดไปซึ่งก็จะเกิดการทะลุผ่านและสะท้อนกลับอีกเช่นกัน กลไกเช่นนี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ จนถึงรอยทางเดินชั้นในสุด ดังแสดงตามแบบจำลองรูป 2.8 ซึ่งสมมติให้รอยทางเดินเป็นทรงกระบอก 2 ชั้น ดังนั้นบริเวณที่มีคลื่นวิทยุจึงแบ่งได้เป็น 3 บริเวณดังรูป บริเวณที่ 1 และบริเวณ 2 คือชั้นแต่ละชั้นของรอยทางเดิน และบริเวณสุดท้ายเป็นส่วนของบรรยากาศรอบรอยทางเดิน

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



รูป 2.8 คลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านรอยทางเดินทรงกระบอก-2 ชั้น

คลื่นวิทยุที่เดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์จะกล่าวถึงในหัวข้อย่อยที่ 2.5.2 เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพันธ์

นอกเหนือจากความแตกต่างในเรื่องความต่อเนื่องของการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแนวรัศมีแล้ว สิ่งที่แบบจำลองนี้ได้เพิ่มขึ้นมาอีกประการหนึ่งเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบก็คือ การยอมให้อิเล็กตรอนในรอยทางเดินมีการชนกันเล็กน้อยด้วยค่าความถี่การชน ν การชนนี้จะไม่ส่งผลให้ลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวรัศมีเปลี่ยนไป ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินตามแนวรัศมีมีลักษณะเป็นแบบเกาส์เนื่องจากข้อสมมติที่ว่า การแพร่ของรอยทางเดินเกิดจากการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอน ข้อสมมติดังกล่าวยังคงใช้อยู่ในแบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ดังนั้นแบบจำลอง

รอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น จึงยังคงลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวรัศมีเป็นแบบเกาส์อยู่ เพียงแต่การแจกแจงดังกล่าวไม่ต่อเนื่อง แต่จะมีค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเท่ากับค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่คำนวณได้จากรัศมีที่เป็นตัวแทนของชั้นนั้นๆ ซึ่งรัศมีที่เป็นตัวแทนของชั้นจะเท่ากับความยาวจากแกนของรอยทางเดินถึงกึ่งกลางของชั้น ดังนั้นความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินของดาวตกตามแนวรัศมีจึงมีค่าดังสมการ (11)

$$N_i(r_i, t) = \frac{q}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{a^2}\right) \quad (11)$$

โดยที่ ดัชนี “ i ” แสดงลำดับที่ของชั้นนับจากชั้นในที่สุด

อาศัยความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิเล็กตรอนตามสมการ (11) ประกอบกับค่าความถี่การชน ν จะสามารถแสดงค่าคงตัวไดอิเล็กทริกในแต่ละชั้น “ κ_i ” ของรอยทางเดินได้ดังสมการ (12)

$$\kappa_i = 1 - \frac{e^2 N_i(r_i, t)}{\omega^2 m_e \epsilon_0 (1 + j\nu/\omega)} \quad (12)$$

โดยที่ e และ m_e คือประจุและมวลของอิเล็กตรอนตามลำดับ

ω คือความถี่เชิงมุม

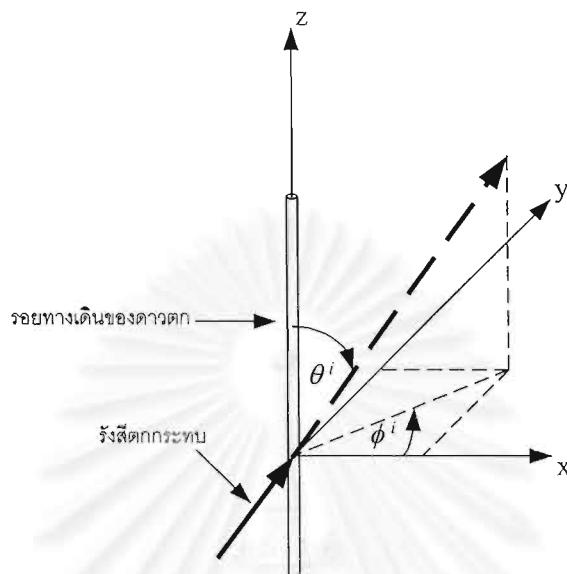
และ ϵ_0 คือค่าสภาพยอมของอากาศว่าง

เครื่องหมายของความถี่การชนจะขึ้นอยู่กับทางเลือกแสดงฟังก์ชันเวลาของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กว่าเป็น $\exp(j\omega t)$ หรือ $\exp(-j\omega t)$ ถ้าเป็น $\exp(j\omega t)$ เครื่องหมายของความถี่การชนจะเป็น “-” ทำให้พจน์ $(1 + j\nu/\omega)$ กลายเป็น $(1 - j\nu/\omega)$ แต่ถ้าใช้ฟังก์ชันเวลาเป็น $\exp(-j\omega t)$ อย่างที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เครื่องหมายของความถี่การชนจะเป็น “+” ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกก็จะแสดงได้ดังสมการ (12)

2.5.1 เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตก

เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตกเป็นเรขาคณิตที่ยี่ดรอยทางเดินเป็นหลัก กล่าวคือกำหนดให้แกนของรอยทางเดินวางตัวอยู่บนแกน z ของระบบพิกัดทรงกระบอก คลื่นที่ตกกระทบรอยทาง

เดินจะเดินทางมาจากทิศใดๆ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบแสดงได้ด้วยมุม θ^i และมุม ϕ^i ตามระบบพิกัดทรงกระบอกดังรูป 2.9



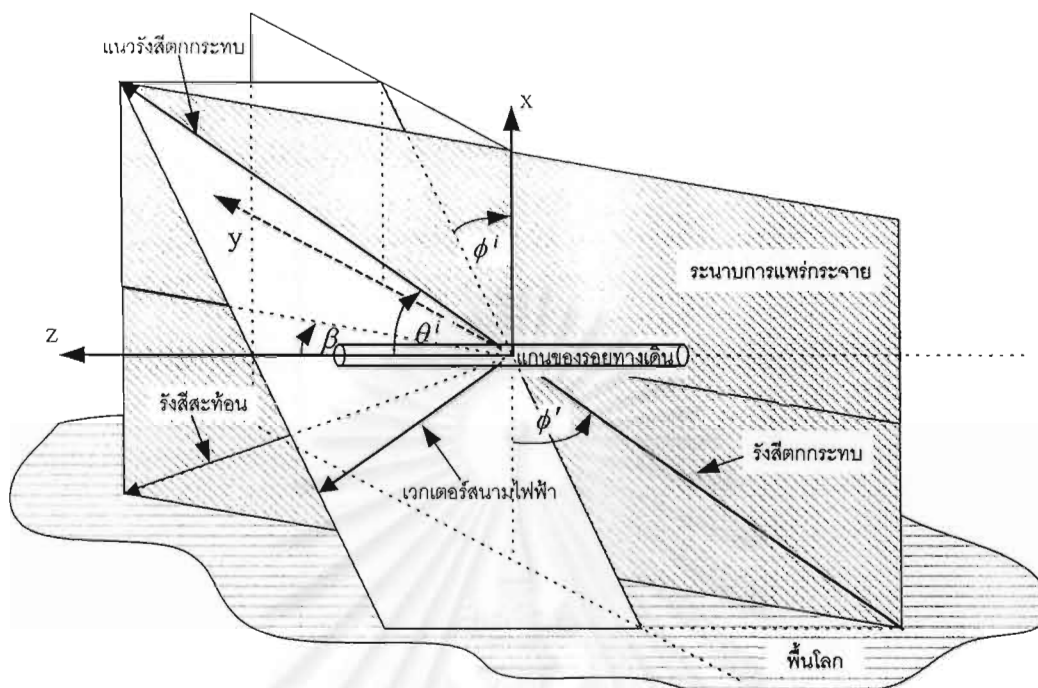
รูป 2.9 คลื่นตกกระทบทำมุมใดๆ กับแกนของรอยทางเดิน

การวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบนั้นต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแนวการวางตัวของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและแกนของรอยทางเดิน ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของมุม θ^i และมุม ϕ^i แต่เนื่องจากมุมกระเจิง ($2\phi'$) และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน (β) เป็นมุมที่สื่อลักษณะทางกายภาพของชายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกได้เข้าใจง่ายกว่ามุม θ^i และมุม ϕ^i ดังนั้นค่าของมุม θ^i และมุม ϕ^i ที่จะใช้ในการวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบจะแสดงในรูปของมุม ϕ' และมุม β นอกจากนี้การแสดงผลมุม θ^i และมุม ϕ^i ในรูปของมุม ϕ' และมุม β ก็จะทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยอาศัยกรรมวิธีวิเคราะห์เชิงคลื่นเต็มรูปแบบกับผลการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงได้โดยสะดวกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ^i และมุม ϕ^i กับมุม ϕ' และมุม β สามารถแสดงได้โดยอาศัยเรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตกดังรูป 2.10

ความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ^i และมุม ϕ^i กับมุม ϕ' และมุม β ดังรูป 2.10 สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\cos \theta^i = \cos \beta \sin \phi' \quad (13)$$

$$\tan \phi^i = \sin \beta \sin \phi' \quad (14)$$



รูป 2.10 เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตก

สำหรับคลื่นกระเจิงนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์สนามกระเจิงกับแกนของรอยทางเดินสามารถแสดงได้ด้วยมุม θ^s และมุม ϕ^s โดยที่มุม θ^s และมุม ϕ^s มีความสัมพันธ์กับมุม θ^i และมุม ϕ^i ดังนี้

$$\theta^s = \theta^i \quad (15)$$

$$\phi^s = \pi - \phi^i \quad (16)$$

เรขาคณิตของรอยทางเดินของดาวตกที่แสดงตามรูป 2.10 เป็นกรณีทั่วไปที่สุดของคลื่นในแบบแผน TM (transverse magnetic) กล่าวคือ ไม่จำกัดทิศทางที่คลื่นจะตกกระทบบรอยทางเดิน นอกจากจะกำหนดให้เวกเตอร์สนามแม่เหล็กวางตัวอยู่ในระนาบ xy ซึ่งตั้งฉากกับรอยทางเดินหรือแกน z (ในกรณีที่คลื่นตกกระทบบนคลื่นในแบบแผน TE (transverse electric) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะวางตัวอยู่ในระนาบ xy แทน) ถ้าหากแนวการวางตัวของรอยทางเดินตั้งฉากกับระนาบการแพร่กระจายหรือมุม β เท่ากับ 90° มุม θ^i จะมีค่าเท่ากับ 90° ด้วยซึ่งหมายความว่าคลื่นตกกระทบบและคลื่นกระเจิงจะตั้งฉาก

กับรอยทางเดิน และถ้าหากมุม ϕ^i เท่ากับ 0° ด้วย มุม ϕ^s ก็จะเท่ากับ 180° ซึ่งก็จะเป็นกรณีการกระเจิงกลับ โดยตกกระทบแบบตั้งฉากหรือกรณีเรดาร์นั่นเอง

2.5.2 เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพันธ์

เมื่อคลื่นวิทยุตกกระทบทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ทรงกระบอกแต่ละชั้นจะประกอบด้วยคลื่น 2 ประเภท คือ คลื่นที่เดินทางเข้า และคลื่นที่เดินทางออก ยกเว้นทรงกระบอกชั้นในสุดที่มีแต่คลื่นที่เดินทางเข้าเท่านั้น การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น จำเป็นต้องทราบลักษณะสมบัติการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นวิทยุทั้งในกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าและคลื่นเดินทางออก ลักษณะสมบัติสะท้อนและส่งผ่านของทั้งสองกรณีสามารถหาได้โดยอาศัยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาและเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์ดังรูป 2.11 ก. และ 2.11 ข. ตามลำดับ

พิจารณารณคลื่นวิทยุเดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์ คลื่นระนาบใดๆ ที่เดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์สามารถแสดงได้ในรูปคลื่นระนาบ 2 คลื่นที่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแกนของทรงกระบอก คลื่นระนาบดังกล่าวเรียกว่าคลื่น TM (transverse magnetic) และคลื่น TE (transverse electric) ตามลำดับ ถ้าหากคลื่นระนาบตก-กระทบทรงกระบอกในทิศทางใดๆ ซึ่งแสดงได้ด้วยมุม θ^i และมุม ϕ^i ดังรูป 2.10 เมื่อกำหนดให้พจน์การแปรผันตามเวลาของคลื่นเป็น $\exp(-j\omega t)$ องค์ประกอบในแนวแกน z ของคลื่นตกกระทบ คลื่นกระเจิง และคลื่นภายใน (คลื่นที่ทะลุผ่านไปทรงกระบอก) ของคลื่นในแบบแผน TM จะแสดงได้ด้วยสมการตามลำดับดังนี้

$$E_z^i = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_o \sin \theta^i e^{jk_z z} j^m J_m(k_{r_2} r) e^{jm(\phi-\phi^i)} \quad (17)$$

$$E_z^s = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m e^{jk_z z} j^m H_m^{(1)}(k_{r_2} r) e^{jm(\phi-\phi^i)} \quad (18)$$

$$E_z^c = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m e^{jk_z z} j^m J_m(k_{r_1} r) e^{jm(\phi-\phi^i)} \quad (19)$$

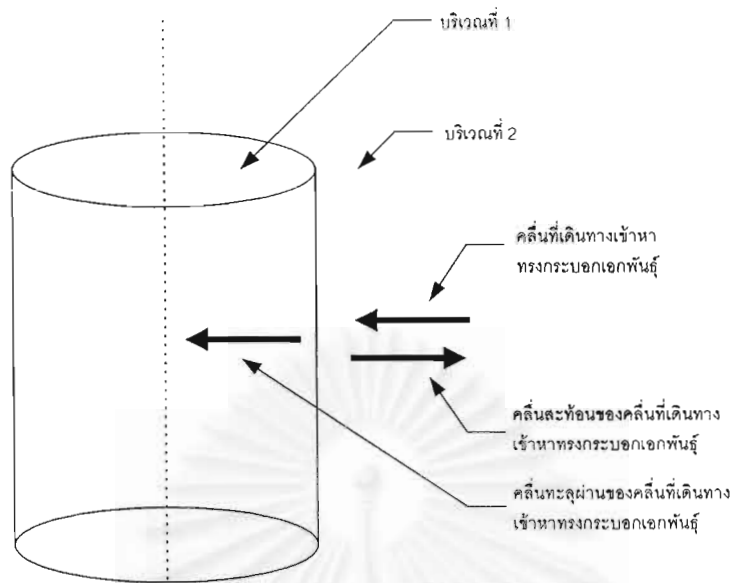
โดยที่ E_o คือแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ

k_z และ k_{r_i} คือองค์ประกอบในแนวแกน z และในแนวที่ตั้งฉากกับ z ของเวกเตอร์ค่าคงตัวการแพร่กระจาย \vec{k} โดยที่ดัชนี “ i ” ของ k_{r_i} แสดงลำดับที่ของบริเวณที่พิจารณาดังรูป 2.11

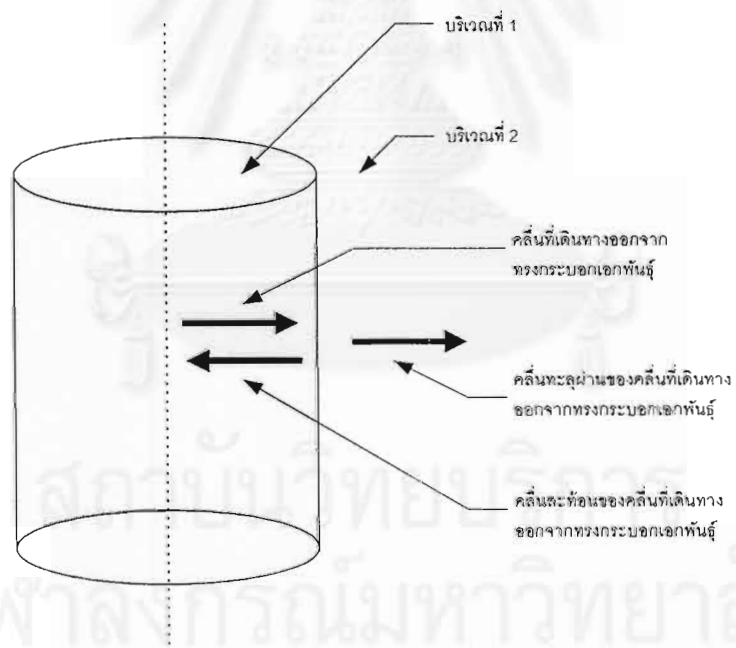
$J_m(k_{r_i} r)$ และ $H_m^{(1)}(k_{r_i} r)$ เป็นฟังก์ชันเบสเซลอันดับ m และฟังก์ชันเฮงเคลชนิดที่ 1

อันดับ m ตามลำดับ

และ R_m และ T_m คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแบบแผนที่ m ตามลำดับ



ก. กรณีคลื่นวิทยุเดินทางเข้าหาทรงกระบอกเอกพันธ์



ข. กรณีคลื่นวิทยุเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์

รูป 2.11 แบบจำลองคลื่นวิทยุที่เดินทางเข้าหาและออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์

กรณีคลื่นในแบบแผน TE องค์ประกอบในแนวแกน z มีแต่สนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการในลักษณะเดียวกับสมการ (17) – สมการ (19) เมื่อพิจารณาคลื่นทั้ง 2 แบบแผนพร้อมกัน องค์ประกอบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับแกน z จะหาได้จากสมการตามลำดับต่อไปนี้

$$H_t = \frac{1}{k^2 - k_z^2} [j\omega\epsilon(\hat{z} \times \nabla_t E_z) + jk_z \nabla_t H_z] \quad (20)$$

$$E_t = \frac{1}{k^2 - k_z^2} [jk_z \nabla_t E_z - j\omega\mu(\hat{z} \times \nabla_t H_z)] \quad (21)$$

โดยที่ ดัชนี "t" แทนความหมายว่าเป็นองค์ประกอบในแนวตามขวาง (transverse)

ω , ϵ และ μ คือ ความถี่เชิงมุม สภาพยอม และความซบซิมได้ตามลำดับ

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

เห็นได้จากสมการ (20) และ (21) ว่าเกิดการเชื่อมโยง (coupling) กันระหว่าง คลื่น TM และ คลื่น TE ยกเว้นในกรณีที่คลื่นตกกระทบในแนวตั้งฉากกับทรงกระบอก ($\theta^i = 90^\circ$) เนื่องจากความเป็นทวิภาวะ (duality) การแสดงสมการของทั้งคลื่น TM และคลื่น TE จึงสามารถทำได้พร้อมกันในรูปแบบสมการเมทริกซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นในแต่ละแบบแผนก็จะอยู่ในรูปเมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านตามลำดับ

เงื่อนไขขอบเขตของสนามในแนว z และในแนว ϕ ในรูปสมการเมทริกซ์ก็จะสามารถแสดงได้ดังสมการตามลำดับต่อไปนี้

$$\left[J_m(k_{r2}r_b) \mathbf{I} + H_m^{(1)}(k_{r2}r_b) \mathbf{R}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 = \left[J_m(k_{r1}r_b) \mathbf{T}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 \quad (22)$$

$$\left[\mathbf{J}'_m(k_{r2}r_b) + \mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r2}r_b) \mathbf{R}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 = \left[\mathbf{J}'_m(k_{r1}r_b) \mathbf{T}_{m21} \right] \mathbf{A}_2 \quad (23)$$

โดยที่ \mathbf{A}_2 คือแอมพลิจูดของคลื่นในบริเวณที่ 2

\mathbf{I} คือเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด 2×2

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

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

$$\mathbf{J}'_m(k_{ri}r) = \frac{1}{k_{ri}^2} \begin{bmatrix} j\omega\varepsilon_i k_{ri} J'_m(k_{ri}r) & -\frac{mk_z}{r} J_m(k_{ri}r) \\ -\frac{mk_z}{r} J_m(k_{ri}r) & -j\omega\mu_i k_{ri} J'_m(k_{ri}r) \end{bmatrix} \quad (24)$$

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

โดยการจัดรูปสมการ (22) และสมการ (23) เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพันธ์ในกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าทรงกระบอกจะแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_{m21} = \mathbf{D}^{-1} [J_m(k_{r1}r_b) \mathbf{J}'_m(k_{r2}r_b) - J_m(k_{r2}r_b) \mathbf{J}'_m(k_{r1}r_b)] \quad (25)$$

$$\mathbf{T}_{m21} = \mathbf{D}^{-1} \left[H_m^{(1)}(k_{r2}r_b) \mathbf{J}'_m(k_{r2}r_b) - J_m(k_{r2}r_b) \mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r2}r_b) \right] \quad (26)$$

โดยที่

$$\mathbf{D} = \left[H_m^{(1)}(k_{r2}r_b) \mathbf{J}'_m(k_{r1}r_b) - J_m(k_{r1}r_b) \mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r2}r_b) \right] \quad (27)$$

สำหรับกรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกเอกพันธ์ เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของกรณีดังกล่าวมีค่าดังสมการ

$$\mathbf{R}_{m12} = \mathbf{D}^{-1} \left[H_m^{(1)}(k_{r1}r_b) \mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r2}r_b) - H_m^{(1)}(k_{r2}r_b) \mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r1}r_b) \right] \quad (28)$$

$$\mathbf{T}_{m12} = \mathbf{D}^{-1} \left[H_m^{(1)}(k_{r1}r_b) \mathbf{J}'_m(k_{r1}r_b) - J_m(k_{r1}r_b) \mathbf{H}_m^{(1)'}(k_{r1}r_b) \right] \quad (29)$$

เมทริกซ์การสะท้อนและเมทริกซ์การส่งผ่านของทรงกระบอกเอกพันธ์ทั้งในกรณีที่คลื่นเดินทางเข้าทรงกระบอกและกรณีที่คลื่นเดินทางออกจากทรงกระบอกจะนำไปใช้ในกระบวนการวนซ้ำเพื่อหาเมทริกซ์การสะท้อนของทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นในหัวข้อย่อยถัดไป

2.5.3 เมทริกซ์การสะท้อนของทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

การวิเคราะห์หาผลเฉลยหรือลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายผ่านทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น จะกระทำในกรณีเดียวคือ การวิเคราะห์หามเมทริกซ์การสะท้อนในกรณีคลื่นเดินทางเข้าหาทรงกระบอก เนื่องจากเป็นกรณีเดียวกับการกระเจิงคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตก ชั้นตอนในการวิเคราะห์มีดังนี้

ในขั้นแรก พิจารณากรณีที่ทรงกระบอกแบ่งเป็น 2 ชั้น บริเวณที่มีคลื่นวิทยุจะมี 3 บริเวณ ดังรูป 2.8 แอมพลิจูดของคลื่นที่เดินทางเข้าของบริเวณที่ 2 (A_2) จะเท่ากับผลรวมของคลื่นที่ส่งผ่านมาจากคลื่นที่เดินทางเข้าของบริเวณที่ 3 ($T_{m32}A_3$) กับคลื่นสะท้อนของคลื่นที่เดินทางออกของบริเวณที่ 2 ($R_{m23}R_{m21}A_2$) ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$A_2 = T_{m32}A_3 + R_{m23}R_{m21}A_2 \quad (30)$$

หรือ

$$A_2 = [I - R_{m23}R_{m21}]^{-1}T_{m32}A_3 \quad (31)$$

พิจารณาบริเวณที่ 3 ซึ่งเป็นบริเวณภายนอกทรงกระบอก คลื่นสะท้อนทั้งหมดหรือคลื่นที่เดินทางออกจากทรงกระบอกจะมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างคลื่นส่งผ่านของคลื่นที่เดินทางออกของบริเวณที่ 2 และคลื่นสะท้อนของคลื่นตกกระทบหรือคลื่นสะท้อนของคลื่นที่เดินทางเข้าของบริเวณที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$R_{m32}^{i0}A_3 = R_{m32}A_3 + T_{m23}R_{m21}A_2 \quad (32)$$

โดยที่ คำนีบน i0 ของเมทริกซ์การสะท้อนเป็นตัวบ่งชี้ว่าเมทริกซ์การสะท้อนนั้นเป็นเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมด

เมื่อแทนค่า A_2 จากสมการ (31) ลงในสมการ (32) แล้วจัดรูปใหม่ เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดซึ่งแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากทรงกระบอก 2 ชั้นจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\mathbf{R}_{m32}^{l0} = \mathbf{R}_{m32} + \mathbf{T}_{m23} \mathbf{R}_{m21} [\mathbf{I} - \mathbf{R}_{m23} \mathbf{R}_{m21}]^{-1} \mathbf{T}_{m32} \quad (33)$$

ถ้าหากเพิ่มชั้นของทรงกระบอกอีก 1 ชั้นระหว่างบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 คลื่นที่เดินทางออกของบริเวณที่ 2 จะต้องเปลี่ยนเป็นคลื่นที่เดินทางออกทั้งหมดของบริเวณที่ 2 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า \mathbf{R}_{m21} จะต้องเปลี่ยนเป็น \mathbf{R}_{m21}^{l0} ในกรณีที่เพิ่มจำนวนชั้นของทรงกระบอกไปเป็น $n-1$ ชั้น หรือ n บริเวณ เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่ i ก็จะสามารถเขียนได้ในลักษณะเดียวกับสมการ (33) ดังนี้

$$\mathbf{R}_{m(i,i-1)}^{l0} = \mathbf{R}_{m(i,i-1)} + \mathbf{T}_{m(i-1,i)} \mathbf{R}_{m(i-1,i-2)}^{l0} [\mathbf{I} - \mathbf{R}_{m(i-1,i)} \mathbf{R}_{m(i-1,i-2)}^{l0}]^{-1} \mathbf{T}_{m(i,i-1)} \quad (34)$$

ลักษณะสมบัติของคลื่นวิฤทุที่กระเจิงจากทรงกระบอก $n-1$ ชั้นนั้นแสดงในรูปเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่ n ซึ่งเมทริกซ์ดังกล่าวสามารถหาได้โดยเริ่มจากทรงกระบอกชั้นในสุดหรือบริเวณที่ 1 เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณนี้มีค่าเป็น 0 ($\mathbf{R}_{m10}^{l0} = 0$) และใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (34) วนซ้ำหาเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่อยู่ถัดออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งได้เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณที่ n ตามต้องการ

2.5.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของรอยทางเดินของดาวตก

ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิฤทุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกโดยจำลองรอยทางเดินเป็นทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น เมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณนอกสุดเป็นเมทริกซ์เดียวที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการแสดงสมการต่อ ๆ ไปที่มีเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณนอกสุดเป็นส่วนประกอบ จะละเลขดัชนีที่บ่งบอกบริเวณไว้ เมทริกซ์การสะท้อนดังกล่าวจึงสามารถเขียนในรูปที่แสดงสมาชิกทั้ง 4 ตัวได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} R_m^{11} & R_m^{12} \\ R_m^{21} & R_m^{22} \end{bmatrix} \quad (35)$$

ดังนั้นองค์ประกอบในแนวแกน z ของสนามไฟฟ้ากระเจิงและสนามแม่เหล็กกระเจิงในแบบแผนที่ m จึงสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_{zm}^s = j^m e^{jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^i)} H_m^{(1)}(k_r r) R_m^E \quad (36)$$

$$H_{zm}^s = j^m e^{jk_z z} e^{jm(\phi-\phi^i)} H_m^{(1)}(k_r r) R_m^H \quad (37)$$

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

$$R_m^E = R_m^{11} E_o \sin \theta^i + R_m^{12} H_o \sin \theta^i \quad (38)$$

$$R_m^H = R_m^{21} E_o \sin \theta^i + R_m^{22} H_o \sin \theta^i \quad (39)$$

โดยที่ E_o และ H_o คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบและสนามแม่เหล็กตกกระทบตามลำดับ
และ θ^i คือมุมตกกระทบซึ่งนิยามตามรูป 2.9

สำหรับองค์ประกอบในแนว r และ ϕ ของทั้งสนามไฟฟ้ากระเจิงและสนามแม่เหล็กกระเจิงก็สามารถหาได้โดยอาศัยสมการ (20) และสมการ (21)

ในการหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นวิทยุของรอยทางเดินของดาวตกจะใช้เพียงองค์ประกอบทั้งสามองค์ประกอบ (E_r^s , E_ϕ^s และ E_z^s) ของสนามไฟฟ้ากระเจิงเท่านั้น เนื่องจากระยะทางจากรอยทางเดินของดาวตกกลับมายังสายอากาศรับหรือจุดสังเกตมีค่ามาก องค์ประกอบของสนามไฟฟ้ากระเจิงในแนว r และ ϕ ในพจน์ของสนามไฟฟ้ากระเจิงและสนามแม่เหล็กกระเจิงในแนว z จะประมาณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_r^s = -\frac{\cos \theta^i}{\sin \theta^i} E_z^s \quad (40)$$

$$E_\phi^s = \frac{1}{c\epsilon_o \sin \theta^i} H_z^s \quad (41)$$

โดยที่ c คือความเร็วของแสง

และ ϵ_o คือสภาพยอมของอวกาศว่าง

นิยามสัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสนามกระเจิงและสนามตกกระทบเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$g = \sqrt{\frac{\pi k_r r}{2}} \frac{E^s}{|E^i|} \quad (42)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นวิทยุจากรอยทางเดินของดาวตกจะแสดงได้ในรูปองค์ประกอบทั้ง 4 องค์ประกอบของเมทริกซ์การสะท้อนทั้งหมดของบริเวณภายนอกรอยทางเดิน โดยการจัดรูปสมการ (42) ใหม่โดยอาศัยสมการ (35) – สมการ (41) ดังนี้

$$g = \left\{ \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{jm(\phi-\phi^i)} \left(R_m^{11} \cos \chi + \frac{R_m^{12}}{\eta_0} \sin \chi \right) \right]^2 + \eta_0^2 \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{jm(\phi-\phi^i)} \left(R_m^{21} \cos \chi + \frac{R_m^{22}}{\eta_0} \sin \chi \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

โดยที่ η_0 คืออิมพีแดนซ์ของอวกาศว่าง

และ χ คือมุมระหว่างเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบและรอยตัดระหว่างระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ที่ชี้ทิศการแพร่กระจายกับแกนของรอยทางเดิน และระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบและสนามแม่เหล็กตกกระทบ

ในกรณีที่มีมุม χ เท่ากับ 0° คลื่นที่ตกกระทบก็จะเป็นคลื่นในแบบแผน TM เท่านั้น เราคาดคิดของการกระเจิงจะแสดงได้ดังรูป 2.10 ส่วนในกรณีที่มีมุม χ เท่ากับ 90° คลื่นที่ตกกระทบก็จะเป็นคลื่นในแบบแผน TE

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

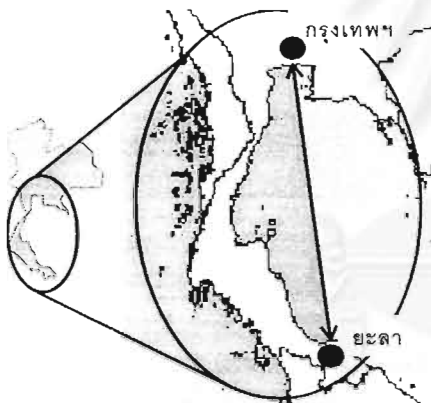
ปฏิบัติการทดลองส่งคลื่นวิทยุและผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตก

ปฏิบัติการทดลองส่งคลื่นวิทยุของโครงการนี้เลือกจัดตั้งข่ายเชื่อมโยงระหว่างกรุงเทพมหานครกับยะลา ด้วยเหตุผลเรื่องความสะดวกในการปฏิบัติงานและขนาดระยะทางของข่ายเชื่อมโยงที่จะทำให้โอกาสพบรอยทางเดินของดาวตกมีสูงพอสมควร นอกจากนี้ยังได้ปฏิบัติการนับอัตราการเกิดของรอยทางเดินดาวตก ณ บริเวณท้องฟ้าเขตรอยต่อระหว่างจังหวัดนครนายกและปราจีนบุรี การทดลองส่งคลื่นของข่ายเชื่อมโยง กรุงเทพฯ – ยะลา ทำในช่วงสุดสัปดาห์ที่สามของทุกเดือนตั้งแต่เดือนมีนาคม 2546 ถึงเดือนกันยายน 2546 ทั้งนี้เพื่อคงเงื่อนไขภาวะการทดลองส่งคลื่นภายในแต่ละเดือนที่ไม่เกี่ยวข้องกับความเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลให้มีความใกล้เคียงกัน

3.1 รายละเอียดของข่ายเชื่อมโยง

3.1.1 ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 3.1



ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา

1. พิกัดสถานี

กรุงเทพฯ : 13.7 °N, 100.5 °E

ยะลา : 6.5 °N, 101.3 °E

2. ระยะสื่อสาร : 800 กิโลเมตร

3. แนวการวางตัว : + 174°

รูป 3.1 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 45.55 MHz

ค. กำลังส่ง 200 วัตต์

ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาคี – อูคะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi

ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 13°

- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาคี – อูคะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi

ติดตั้งโดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 13°

3.1.2 ข่ายเชื่อมโยงนครนายก-ปราจีนบุรี (อ.นาดี)

ก. แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูป 3.2



รูป 3.2 แผนที่ พิกัด ระยะสื่อสาร และแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงนครนายก – ปราจีนบุรี(อ.นาดี)

ข. ความถี่ปฏิบัติการ 45.55 MHz

ค. กำลังส่ง 200 วัตต์

ง. สายอากาศและการติดตั้ง

- สายอากาศส่งเป็นสายอากาศยาคี – อูตะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi

ติดตั้ง โดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 80°

- สายอากาศรับเป็นสายอากาศยาคี – อูตะ 3 องค์ประกอบ มีอัตราขยาย 7.4 dBi

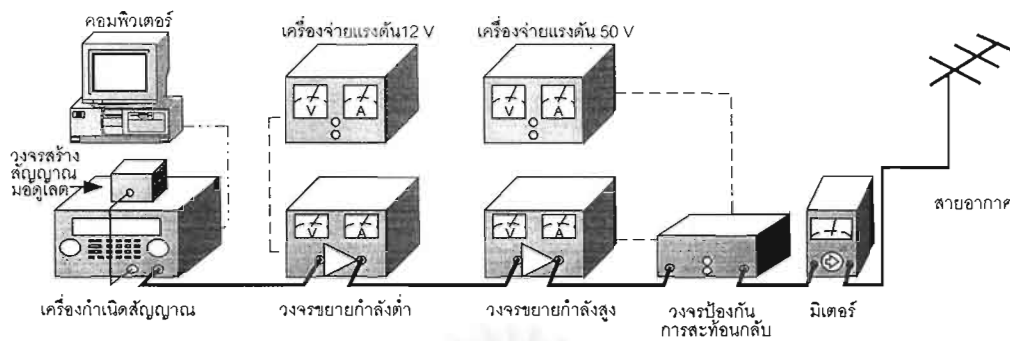
ติดตั้ง โดยให้โพลาริเซชันอยู่ในแนวระดับ และมีมุมเงย 80°

3.2 ระบบรับส่งคลื่นวิทยุ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแบ่งเป็น 2 ภาคคือ อุปกรณ์ภาคส่งและอุปกรณ์ภาครับ ฟังก์ชันและการทำงานของอุปกรณ์แต่ละภาคเป็นดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์ภาคส่ง

อุปกรณ์ภาคส่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ วงจรกล้ำสัญญาณ เครื่องขยายสัญญาณ สายอากาศ และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่นเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น การจัดวางชุดอุปกรณ์ภาคส่งมีลักษณะดังรูป 3.3



รูป 3.3 ฟังอุปกรณ์ภาคส่ง

เส้นทางเดินของสัญญาณตามฟังอุปกรณ์ภาคส่งเริ่มจากเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งจ่ายสัญญาณกำลัง 10 มิลลิวัตต์ (10 dBm) มาป้อนวงจรขยายกำลังต่ำ สัญญาณที่ออกจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นสัญญาณที่คล้ายกับสัญญาณเสียง 2 ความถี่แบบเอฟเอ็ม วงจรขยายกำลังต่ำจะขยายสัญญาณเป็น 2 วัตต์ เพื่อป้อนวงจรขยายกำลังสูงขนาด 200 วัตต์ต่อไป สัญญาณขาออกจากวงจรขยายกำลังสูงจะผ่านวงจรป้องกันการสะท้อนกลับซึ่งจะวัดแรงดันสะท้อนกลับจากสายอากาศ ถ้าแรงดันมีค่าเกินกว่าที่กำหนดจะตัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้วงจรขยายกำลังสูงหยุดทำงานอันเป็นการป้องกันไม่ให้วงจรขยายกำลังสูงเสียหาย สัญญาณที่ออกจากวงจรขยายกำลังสูงจะผ่านมิเตอร์วัดกำลังเพื่อวัดกำลังก่อนที่จะจ่ายให้กับสายอากาศ วัฏจักรทำงานของอุปกรณ์ภาคส่งกำหนดไว้ที่ร้อยละ 33 ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ความร้อนสะสมที่วงจรขยายกำลังสูงมีมากเกินไปซึ่งอาจทำให้วงจรเสียหายได้ จังหวะการทำงาน of อุปกรณ์ ภาคส่งจะเป็นจังหวะส่งสัญญาณ 1 นาทีสลับกับจังหวะพัก 2 นาที จังหวะการทำงานนี้ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณผ่านทางสายเชื่อมอุปกรณ์ต่อพ่วง (GPIB) ข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัวในภาคความถี่วิทยุของภาคส่งมีแสดงในภาคผนวก

3.2.2 อุปกรณ์ภาครับ

อุปกรณ์ภาครับประกอบด้วยสายอากาศ วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ เครื่องรับสัญญาณ วงจรถอดการกล้ำสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ กล้องวิดีโอ และเครื่องจ่ายแรงดัน 12 โวลต์ การจัดวางชุดอุปกรณ์ภาครับมีลักษณะดังรูป 3.4



รูป 3.4 ฟังอุปกรณ์ภาครับ

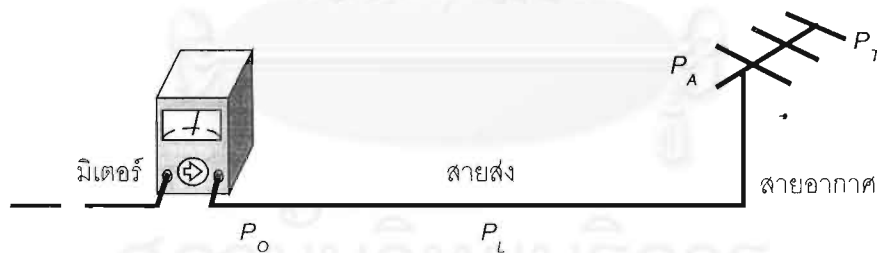
วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำจะขยายสัญญาณที่เข้ามายังสายอากาศรับ จากนั้นจะจ่ายสัญญาณส่วนหนึ่งให้กับเครื่องรับสัญญาณและวงจรถอดการกล้ำสัญญาณ ขณะที่จ่ายสัญญาณอีกส่วนหนึ่งให้กับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ เครื่องรับสัญญาณและวงจรถอดการกล้ำจะทำหน้าที่ตรวจสอบว่าสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณที่ส่งมาจากทางภาคส่งหรือไม่ การบันทึกลักษณะของสัญญาณรับใช้กล้องวิดีโอ จากนั้นจะแปลงภาพสัญญาณรับจากกล้องวิดีโอเป็นภาพนิ่งเพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสัญญาณรับต่อไป ข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัวในภาคความถี่วิทยุของภาครับมีแสดงในภาคผนวก

3.2.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ทั้งภาคส่งและภาครับ

ก. การเปรียบเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง

มิเตอร์วัดกำลังสัญญาณส่งอยู่ ณ ตำแหน่งขาออกของวงจรป้องกันการสะท้อนกลับดังแสดงในรูป 3.3 ดังนั้นการเปรียบเทียบอุปกรณ์ภาคส่งจึงมีเพียงการชดเชยการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของสายส่งและการสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสายอากาศดังแผนผังรูป 3.5

P_O, P_L, P_A และ P_T ในรูป 3.5 หมายถึงกำลังที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดกำลัง กำลังสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของสายส่ง กำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศ และกำลังสัญญาณที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งตามลำดับ สำหรับกำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศจะคำนวณมาจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนซึ่งแสดงในรูปร้อยละของกำลังสัญญาณที่จ่ายให้กับสายอากาศ โดยค่าการสูญเสียนี้คำนวณมาจากอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (voltage standing wave ratio : VSWR) อีกทอดหนึ่ง



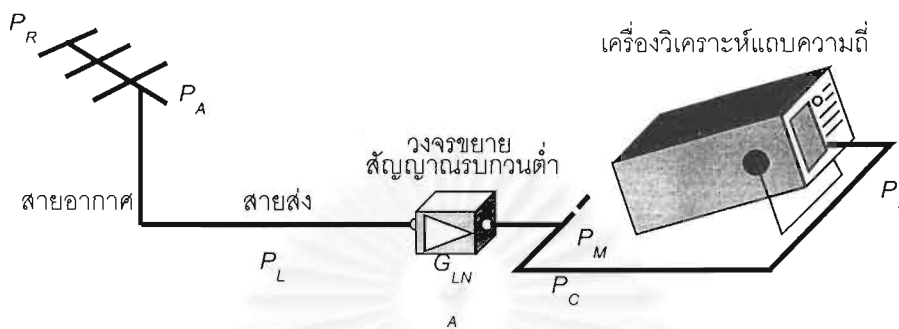
$$P_T = P_O - P_L - P_A \quad (dB)$$

รูป 3.5 ผังการเปรียบเทียบอุปกรณ์ภาคส่ง

ข. การเปรียบเทียบอุปกรณ์ภาครับ

กำลังรับที่อ่านได้เป็นกำลังรับสัญญาณที่เข้าของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ การหาค่ากำลังสัญญาณที่สายอากาศรับรับได้จึงต้องชดเชยการสูญเสียในสายส่งและตัวแบ่งกำลังสัญญาณ รวมถึงการ

สูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศและการไม่เข้าคู่จากการต่อขนาน ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับแสดงดังรูป 3.6



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

รูป 3.6 ผังการปรับเทียบอุปกรณ์ภาครับ

$P_S, P_L, P_A, P_M, P_C, G$ และ P_R ในรูป 3.6 หมายถึงกำลังที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ กำลังสูญเสียในสายส่ง กำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศ กำลังสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนจากการต่อขนาน กำลังสูญเสียของตัวแบ่งกำลังสัญญาณและหัวต่ออื่นๆ อัตราขยายของวงจรรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ และกำลังรับที่สายอากาศรับได้ ตามลำดับ

ประโยชน์อีกประการหนึ่งของการปรับเทียบอุปกรณ์นอกเหนือจากการหาค่ากำลังสัญญาณที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งและกำลังที่สายอากาศรับได้แล้วก็คือการประมาณกำลังรับที่ขาเข้าของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกสถานที่ตั้งสถานีรับสัญญาณ การประมาณกำลังรับสามารถทำได้โดยอาศัยวิเคราะห์หงบกำลังเบื้องต้นดังนี้

3.2.4 การวิเคราะห์หงบกำลังเบื้องต้น

ปัจจัยหลักในการเลือกสถานีรับสัญญาณอยู่ที่กำลังรับจะต้องมีค่ามากกว่ากำลังสัญญาณรบกวนไม่น้อยกว่าค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (SNR) ที่กำหนดไว้ โดยกำลังสัญญาณรบกวนจำเป็นที่จะต้องได้ข้อมูลจากสถานที่จริง ขณะที่กำลังรับสัญญาณประมาณจากการวิเคราะห์หงบกำลังเบื้องต้นดังนี้

พิจารณาข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกว่าเป็นระบบเรดาร์ทวิสถิต (bistatic radar) ที่มีรอยทางเดินของดาวตกเป็นตัวกระเจิง (scatterer) กำลังสัญญาณที่สายอากาศรับได้จึงสามารถหาได้โดยอาศัยสมการเรดาร์ดังนี้

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^3 R_T^2 R_R^2} \sigma \quad (1)$$

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

λ คือความยาวคลื่นปฏิบัติการ

และ σ คือภาคตัดขวางเรดาร์ทวิสถิติ (bistatic radar cross section) ของรอยทางเดินภาคตัดขวางเรดาร์ทวิสถิติของรอยทางเดินสำหรับความถี่ปฏิบัติการในย่านที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 31.4 – 57.0 dB โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 51.4 dB

กำลังสัญญาณรับที่คำนวณได้ตามสมการ (1) จะนำไปใช้หาลำดับที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ตามกรรมวิธีการปรับเทียบอุปกรณ์ในหัวข้อที่ผ่านมา ค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่วัดจากสถานที่จริงประกอบด้วยค่ากำลังที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่คำนวณได้ และความไวของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่จะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจว่าสถานที่นั้นสามารถใช้เป็นสถานีรับสัญญาณที่กระจังจากรอยทางเดินของดาวตกได้หรือไม่

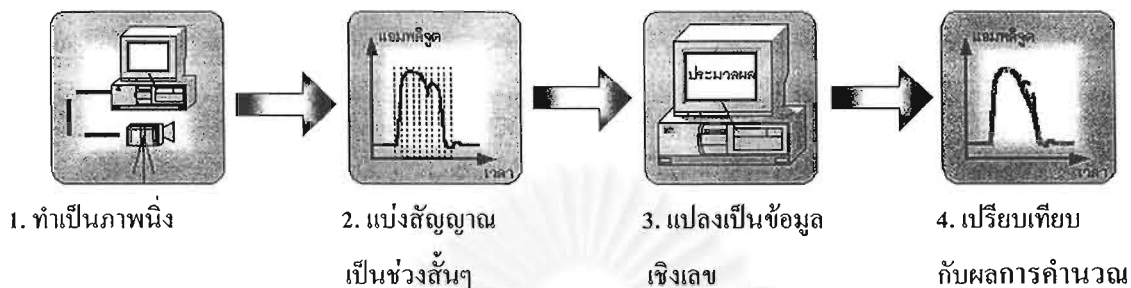
3.3 ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระจังจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระจังจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการคำนวณจะต้องแปลงภาพสัญญาณที่บันทึกด้วยกล้องวิดีโอเป็นข้อมูลเชิงเลขในรูปแบบที่สามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ กรรมวิธีการแปลงเพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.3.1 ขณะที่ผลเปรียบเทียบสัญญาณจะนำเสนอในหัวข้อ 3.3.2

3.3.1 กรรมวิธีเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดกับผลการคำนวณ

การเปรียบเทียบผลการคำนวณลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระจังจากรอยทางเดินของดาวตกกับสัญญาณรับเพื่อดูว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองรอยทางทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นมีความใกล้เคียงกับสัญญาณรับจริงเพียงใด ทำโดยการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทั้งสอง ในการ

เปรียบเทียบจะต้องแปลงภาพของสัญญาณรับที่บันทึกด้วยกล้องวิดีโอเป็นข้อมูลเชิงเลข กรรมวิธีการแปลงดังกล่าวแสดงเป็นขั้นตอนดังรูป 3.7



รูป 3.7 แผนผังการแปลงภาพสัญญาณวิดีโอเป็นข้อมูลเชิงเลข

การแปลงภาพที่บันทึกด้วยกล้องวิดีโอเป็นข้อมูลเชิงเลขทำโดยต่อสัญญาณจากกล้องวิดีโอเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วใช้โปรแกรมจับภาพวิดีโอแปลงให้เป็นภาพนิ่ง จากนั้นจะแบ่งรูปสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจากภาพนิ่งที่ได้เป็นช่วงเวลาสั้นๆ แล้วบันทึกเวลาและแอมพลิจูดของสัญญาณทุกช่วง ข้อมูลแอมพลิจูดที่บันทึกจะนำไปเปรียบเทียบตามกรรมวิธีเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งข้อมูลกำลังสัญญาณสูงสุดท้ายนี้จะเป็นข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณ โดยผลการคำนวณดังกล่าวจะต้องแปลงจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนให้อยู่ในรูปกำลังสัญญาณโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่างๆ ของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในการทดลองตรวจวัด เช่น กำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เป็นต้น ข้อมูลในรูปกำลังสัญญาณทั้งจากการตรวจวัดและการคำนวณจะนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังที่กล่าวข้างต้น ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดแต่ละรูปจะเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่แปรเปลี่ยนค่าปัจจัยต่างๆ หลายชุด เพื่อหาผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับลักษณะสัญญาณจริงมากที่สุด โดยค่าปัจจัยที่แปรเปลี่ยนได้แต่ละชุดประกอบด้วยมุมกระเจิง (ϕ') แนวการวางตัวของรอยทางเดิน (β) และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น (q) อย่างไรก็ตามมุมกระเจิงของข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายจะถูกกำหนดให้คงที่ โดยอาศัยข้อสมมติที่ว่าตำแหน่งกระเจิงเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับและอยู่สูงจากพื้นโลก 95 กิโลเมตร ข้อสมมติดังกล่าวเป็นข้อสมมติที่สอดคล้องกับการทดลอง เนื่องจากในการทดลองกำหนดให้แนวเส้นของสายอากาศส่งและสายอากาศรับชี้ไปยังบริเวณดังกล่าว ผลเปรียบเทียบระหว่างลักษณะคลื่นวิทยุที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากที่สุดแสดงในหัวข้อถัดไป

3.3.2 ผลการเปรียบเทียบลักษณะสัญญาณจากการตรวจวัดกับผลการคำนวณ

การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการคำนวณไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจากไม่ทราบค่าปัจจัยของการกระเจิงสัญญาณจริงหลายประการ เช่น มุมกระเจิงซึ่งเกี่ยวข้องกับระยะสื่อสารและตำแหน่งกระเจิง แนวการวางตัวของรอยทางเดิน และสัมประสิทธิ์การแพร่ของรอยทางเดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการแปรค่าปัจจัยโดยอาศัยข้อสมมติที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาประกอบกับกำหนดค่าปัจจัยบางค่าให้เป็นค่าคงตัวให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับลักษณะสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดจำนวนหนึ่ง (สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณและสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่า 0.8) ขณะที่สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดอีกจำนวนหนึ่งมีลักษณะไม่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ใดๆ ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณสามารถแบ่งได้เป็น 6 กลุ่ม โดยตัวอย่างทั้ง 6 กลุ่มที่ได้จากข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณมีดังนี้

ก. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำปกติ

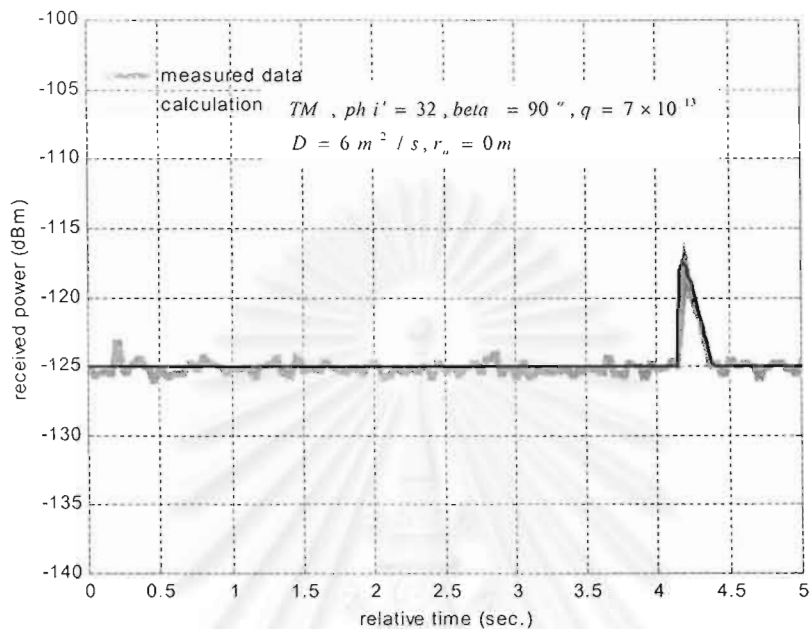
สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำแบบปกติจะมีลักษณะดังรูป 3.8 กล่าวคือสัญญาณจะมีแอมพลิจูดสูงสุดเกือบจะทันทีที่รอยทางเดินก่อตัวขึ้น หลังจากที่มีสัญญาณมีแอมพลิจูดสูงสุดแล้วสัญญาณจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งเห็นเป็นเส้นตรงบนแกนที่เป็นมาตราส่วนแบบลอการิทึม ค่าปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงประกอบไว้ในรูป โดยค่าปัจจัยในแถวบนอันได้แก่แบบแผนของคลื่น มุมกระเจิง (ϕ') แนวการวางตัวของรอยทางเดิน (β) และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น (q) เป็นค่าปัจจัยที่ถือเป็นตัวแปรในการคำนวณ ขณะที่ค่าปัจจัยในแถวล่างคือสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) และรัศมีเริ่มต้นของรอยทางเดิน (r_0) กำหนดเป็นค่าคงที่ ในการคำนวณกำหนดให้ $D = 6 \text{ m}^2/\text{s}$ และ $r_0 = 0 \text{ m}$

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการคำนวณเปรียบเทียบดังรูป 3.8 มีค่าเท่ากับ 0.93 โดยทั่วไปข้อแตกต่างระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการคำนวณจะอยู่ที่ช่วงเริ่มต้นของการกระเจิง โดยแอมพลิจูดของสัญญาณจริงจะเพิ่มถึงจุดสูงสุดช้ากว่าผลการคำนวณ ดังนั้นถ้าพิจารณาเฉพาะช่วงการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะพบว่าสามารถหาผลการคำนวณได้ใกล้เคียงกับสัญญาณจริงมาก ดังกรณีตัวอย่างรูป 3.8 ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉพาะช่วงที่สัญญาณลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเท่ากับ 0.995

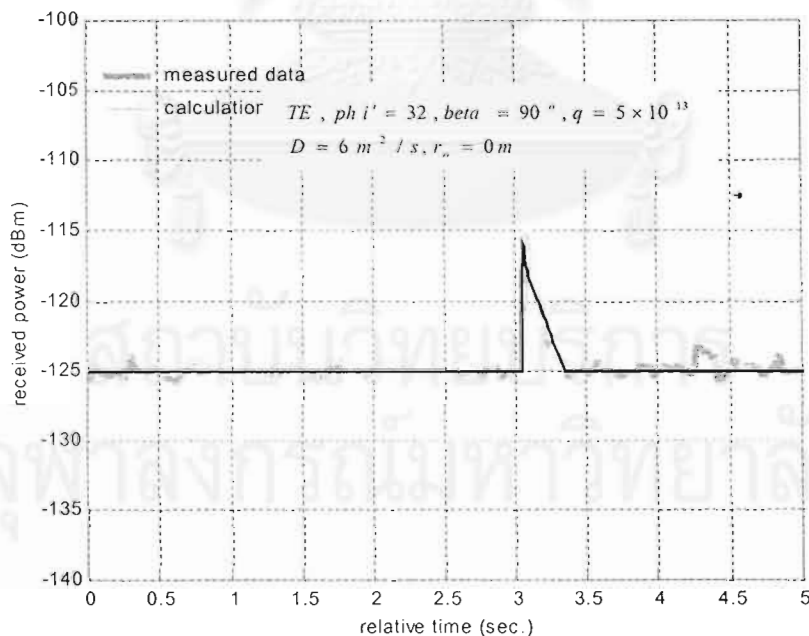
ข. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่มีแอมพลิจูดเริ่มต้นสูงเป็นพิเศษ

สัญญาณที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำบางสัญญาณมี

แอมพลิจูดในช่วงเริ่มต้นของการกระเจิงสูงเป็นพิเศษ จากนั้นสัญญาณจะลดระดับลงอย่างรวดเร็วก่อนที่จะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจนกระทั่งจางหายไปดังรูป 3.9



รูป 3.8 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำปกติ

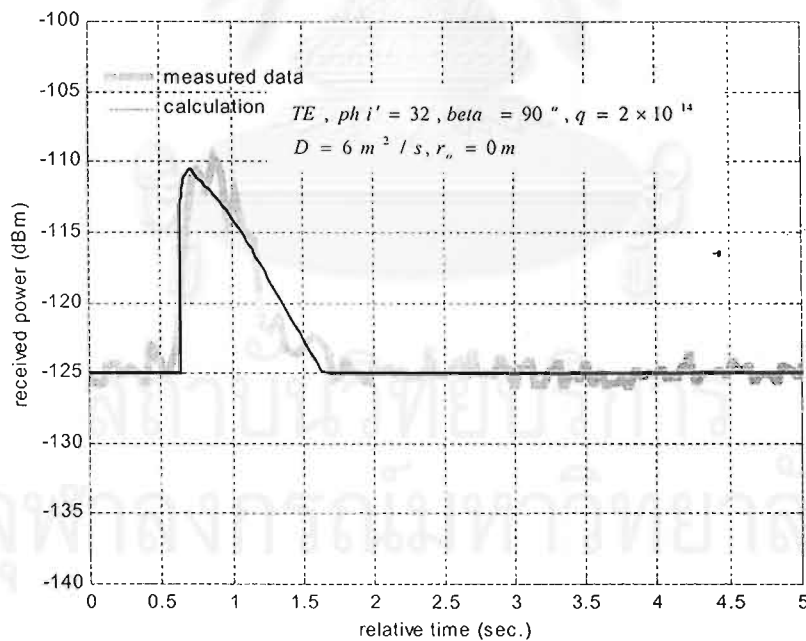


รูป 3.9 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่มีแอมพลิจูดเริ่มต้นสูงเป็นพิเศษ

แอมพลิจูดที่เพิ่มสูงขึ้นนี้เป็นผลจากเรโซแนนซ์ในช่วงเริ่มต้นของการกระเจิง สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำโดยทั่วไปมีผลของเรโซแนนซ์ปรากฏร่วมอยู่ด้วย แต่ลักษณะดังกล่าวไม่ชัดเจนเท่าตัวอย่างสัญญาณรูป 3.9 ซึ่งพบได้น้อยครั้งมาก ทั้งนี้เพราะผลของเรโซแนนซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติของสัญญาณรับจะเด่นชัดในกรณีคลื่นที่ตกกระทบรอยทางเดินของดาวตกไม่มีองค์ประกอบของคลื่น TM ที่ตกกระทบในลักษณะตั้งฉากกับรอยทางเดิน โดยที่รอยทางเดินต้องมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นน้อยมากๆ ด้วย แม้ว่าสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่เห็นปรากฏการณ์เรโซแนนซ์อย่างชัดเจนจะมีอยู่น้อย แต่สัญญาณที่มีลักษณะดังกล่าวจะสามารถหาผลการคำนวณที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้สูงมาก ดังกรณีตัวอย่างรูป 3.9 ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการคำนวณเท่ากับ 0.99

ค. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงปกติ

สัญญาณรับที่มีแอมพลิจูดสูงขึ้นจะมีแนวโน้มของลักษณะการเพิ่มระดับสัญญาณอย่างรวดเร็วในช่วงแรก สัญญาณจะไม่ลดระดับลงอย่างทันทีทันใดแต่จะเพิ่มในอัตราที่ช้าลงจนถึงระดับสูงสุด จากนั้นสัญญาณจึงจะลดระดับลงดังรูป 3.10 สัญญาณที่มีลักษณะดังกล่าวข้างต้นเป็นสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการคำนวณลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง



รูป 3.10 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงปกติ

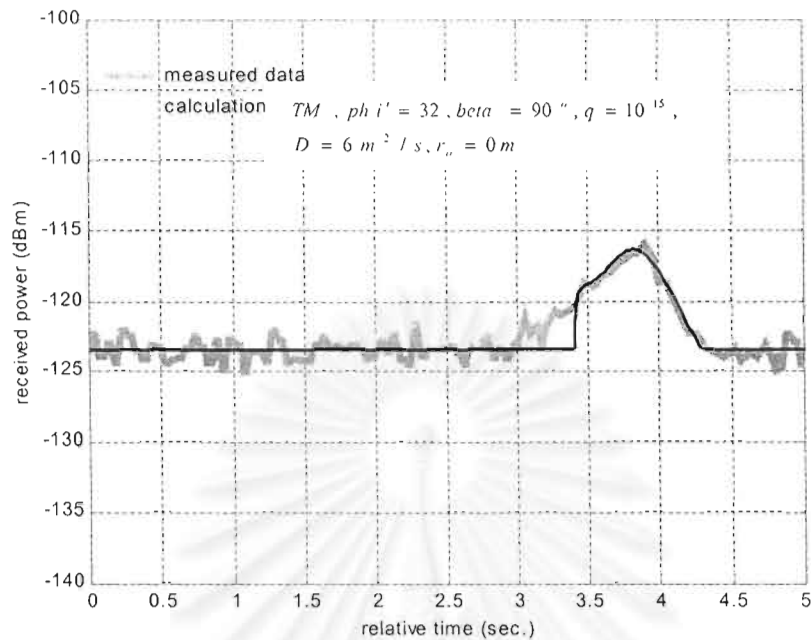
โดยทั่วไปสัญญาณขนาดใหญ่หรือสัญญาณที่มีแอมพลิจูดมากจะมีอัตราการลดระดับสัญญาณช้ากว่าสัญญาณขนาดเล็กหรือสัญญาณที่มีแอมพลิจูดน้อย (สำหรับข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ -- ยะลา ค่าเฉลี่ยของความชันเมื่อแสดงสัญญาณบนแกนที่ใช้มาตราส่วนลอการิทึมกรณีสัญญาณที่มีแอมพลิจูดน้อยกว่า -117 dBm เท่ากับ -23 dB/s ขณะที่สัญญาณที่มีแอมพลิจูดมากกว่า -117 dBm เท่ากับ -15 dB/s) ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นอยู่ในย่านการเปลี่ยนผ่านจะมีลักษณะการลดระดับสัญญาณแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวกับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำแต่มีอัตราการลดระดับสัญญาณช้ากว่า ลักษณะเช่นนี้จะไม่ปรากฏเมื่อคำนวณด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่อัตราการลดระดับสัญญาณขึ้นอยู่กับขนาดของมุมกระเจิง (θ') แต่เพียงอย่างเดียว

สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงโดยทั่วไปจะสามารถหาผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้ไม่สูงเท่ากับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ ทั้งนี้เพราะสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจะมีการแกว่งของสัญญาณมากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความยาวนานมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์สำหรับกรณีตัวอย่างรูป 3.10 เท่ากับ 0.89 และเมื่อพิจารณาที่แนวโน้มการเพิ่มและลดระดับสัญญาณจะพบว่าผลการคำนวณจะแตกต่างกับสัญญาณจริงมากที่สุดในช่วงเริ่มต้นการกระเจิงมากที่สุดเช่นเดียวกับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ

ง. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีช่วงการเพิ่มสัญญาณนาน

สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงจำนวนหนึ่งมีช่วงการเพิ่มระดับสัญญาณนานและมีอัตราการลดระดับสัญญาณที่ช้าทำให้สัญญาณมีลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูป 3.11

สัญญาณที่มีลักษณะดังกล่าวน่าจะเป็นสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมาก แต่ขณะเดียวกันการกระเจิงเกิดในลักษณะที่ต่างจากข้อสมมติมากเช่นกัน เช่น ตำแหน่งกระเจิงอยู่ห่างจากบริเวณกึ่งกลางระหว่างสถานีส่งและสถานีรับซึ่งเป็นบริเวณแนวโค้งของสายอากาศทำให้อัตราขยายน้อยกว่าที่ควรจะเป็นเป็นต้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและผลการคำนวณสำหรับกรณี ตัวอย่างรูป 3.11 นี้เท่ากับ 0.92



รูป 3.11 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง
ที่มีช่วงการเพิ่มสัญญาณนาน

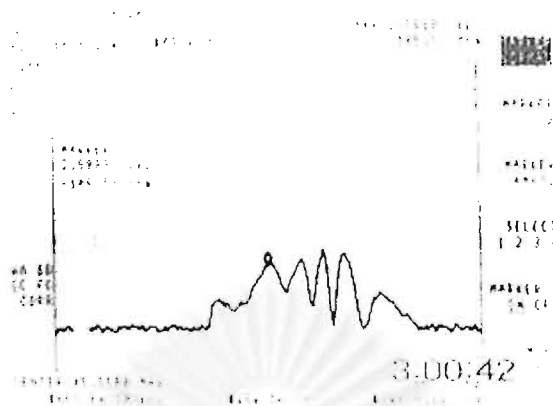
จ. สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่มีการแกว่งของสัญญาณ

สัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นสูงขึ้นจะมีความยาวนานมากขึ้นด้วย โดยสัญญาณที่มีความยาวนานมากๆ ทุกสัญญาณมีลักษณะไม่เรียบเหมือนกับลักษณะสัญญาณที่ได้จากการคำนวณซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความแปรปรวนของอิเล็กตรอนของบรรยากาศชั้นบน ทำให้การแพร่ของอิเล็กตรอนของรอยทางเดินมีลักษณะผิดปกติจนส่งผลให้รอยทางเดินของดาวตกโดยเฉพาะรอยทางเดินที่มีขนาดใหญ่หรือมีความยาวนานมากๆ มีรูปทรงไม่เป็นทรงกระบอกตรง สัญญาณที่กระเจิงมายังสายอากาศรับจะเกิดการแกว่งเนื่องจากคลื่นหลายวิถี ดังรูป 3.12 สำหรับข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ -ยะลา พบว่าสัญญาณที่มีความยาวนานมากกว่า 2.0 วินาทีที่มีลักษณะการแกว่งเนื่องจากคลื่นหลายวิถีทั้งสิ้น

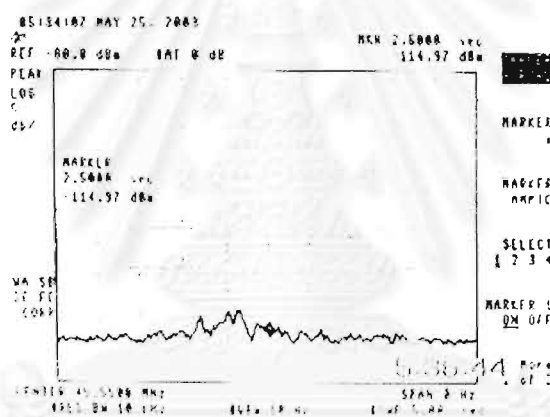
ฉ. สัญญาณที่มีลักษณะไม่เหมือนกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดิน

ความหนาแน่นต่ำหรือรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

สัญญาณรับอีกลักษณะหนึ่งมีรูปร่างไม่เหมือนกับลักษณะของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำหรือรอยทางเดินความหนาแน่นสูง ลักษณะของสัญญาณรับดังกล่าวมีหลากหลาย ตัวอย่างของสัญญาณรับที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้แสดงดังรูป 3.13



รูป 3.12 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง
ที่มีการแกว่งของสัญญาณ



รูป 3.13 ตัวอย่างสัญญาณที่มีลักษณะไม่เหมือนกับลักษณะของสัญญาณ
ที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำหรือรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

สาเหตุที่ทำให้ลักษณะของสัญญาณที่ไม่เหมือนกับทั้งสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูงต่างจากผลการคำนวณมากไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่เชื่อว่าน่าจะเกิดจากรูปทรงของรอยทางเดินหรือการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนของรอยทางเดินมีลักษณะต่างจากแบบจำลองที่ใช้คำนวณมาก เมื่อพิจารณาเฉพาะความยาวนานของสัญญาณในกลุ่มนี้พบว่า สัญญาณดังกล่าวเกือบทั้งหมดมีความยาวนานมากกว่า 0.2 วินาทีซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความยาวนานของสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ (ข้อมูลเกี่ยวกับความยาวนานของสัญญาณแสดงในหัวข้อถัดไป) ดังนั้นจึงอาจประมาณได้ว่าสัญญาณในกลุ่มนี้เป็นสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงทั้งหมด

ผลการเปรียบเทียบทั้งหมดที่นำเสนอแสดงให้เห็นประสิทธิผลของแบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นที่อยู่ในระดับที่นำพองใจมาก ดังนั้นการออกแบบข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตจึงน่าจะพึงพิงผลการคำนวณด้วยแบบจำลองรอยทางเดินชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นได้

การพิจารณาลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดโดยการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณและแบ่งลักษณะสัญญาณเป็น 6 ประเภทดังที่กล่าวมานั้น เป็นการพิจารณาสัญญาณในเชิงคุณภาพเท่านั้น การพิจารณาในเชิงปริมาณหรือพิจารณาในรูปสถิติต่างๆ จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4 สถิติการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

สถิติการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้มีทั้งอัตราการเกิดรอยทางเดินดาวตกรายชั่วโมง สถิติระยะสั้นในรูปของการแจกแจงแอมพลิจูดและความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก และสถิติระยะยาวในรูปของการเปลี่ยนแปลงในรอบ 1 วันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ข้อมูลสถิติทุกรูปแบบที่นำเสนอออกเว้นการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเป็นข้อมูลที่ได้จากการข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา และสถิติที่คำนวณจากข้อมูลรวมทั้งหมดระหว่างข้อมูลของโครงการนี้กับผลการวิจัย [21] ซึ่งเป็นข้อมูลหลักที่ใช้ประกอบการสร้างแบบจำลองขณะที่สถิติการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากทุกข่ายเชื่อมโยง สถิติทั้ง 4 รูปแบบแยกแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

3.4.1 อัตราการเกิดรอยทางเดินรายชั่วโมง

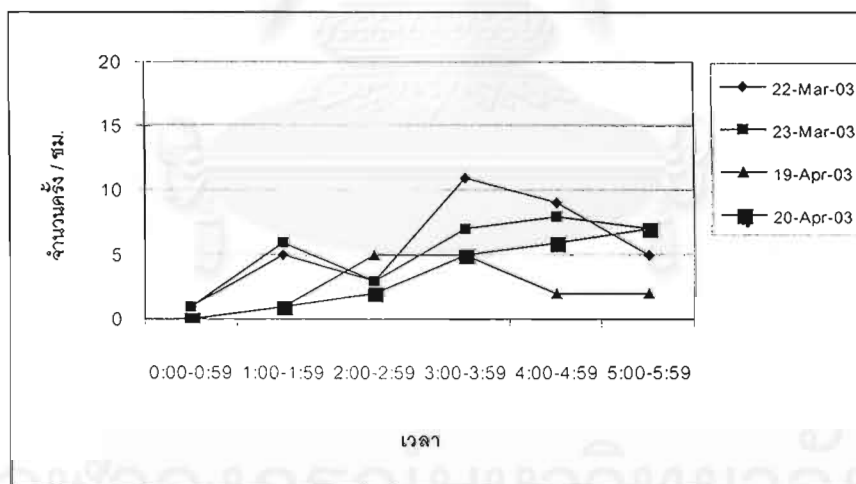
การนับอัตราการเกิดรอยทางเดินทำนับจำนวนครั้งการเกิดการสะท้อนต่อหน่วยเวลา ตาราง 3.1 สรุปจำนวนครั้งการเกิดการสะท้อนคลื่นวิทยุของรอยทางเดินของดาวตกระหว่างเวลา 00:00 – 06:00 น. ช่วงเวลานอกเหนือจากช่วงเวลาดังกล่าวนี้เป็นช่วงเวลาที่มีการออกอากาศทั้งของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีวิทยุโทรทัศน์ท้องถิ่นเป็นเหตุให้กำลังส่งคลื่นขนาด 200 W ของสถานีส่งต่ำเกินกว่าที่จะให้สัญญาณสะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกที่มีกำลังสูงกว่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่ปรากฏ ณ สถานีรับ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา

ผลที่ปรากฏในตาราง 3.1 เป็นไปตามคำอธิบายเกี่ยวกับปรากฏการณ์ดาวตก ในบทที่ 2 กล่าวคือจะสามารถพบรอยทางเดินได้มากในช่วงเวลาใกล้รุ่ง รูป 3.14 – รูป 3.16 แสดงผลในตาราง 3.1 ในลักษณะกราฟเส้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น รูปทั้งสามแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในระดับหนึ่ง ซึ่งสังเกตได้จากอัตราการเกิดรอยทางเดินช่วงเวลาใกล้รุ่งของเดือนพฤษภาคมและเดือนกรกฎาคมที่สูงกว่าเดือนอื่นๆ

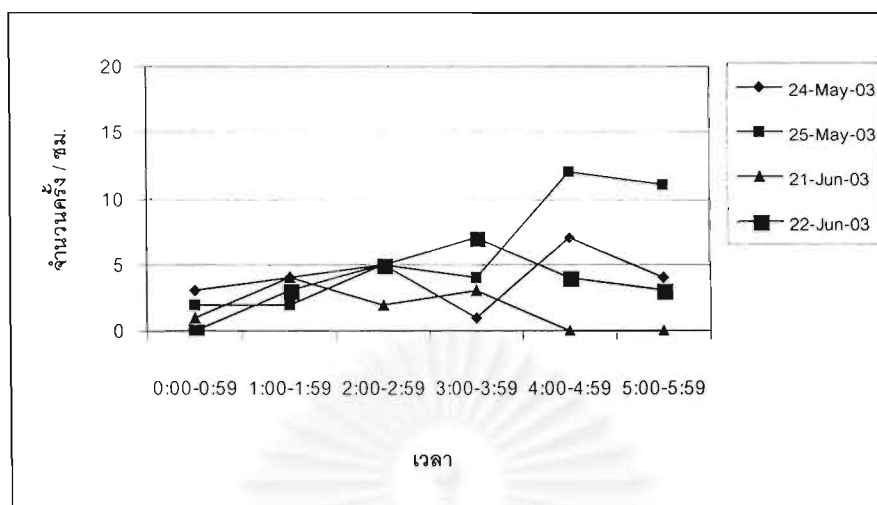
อัตราการเกิดรอยทางเดินของดาวตกตามที่ปรากฏในตาราง 3.1 เป็นอัตราการเกิดที่นับได้ด้วย กำลังส่งของเครื่องส่งขนาด 200 W ซึ่งยังเป็นกำลังส่งที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้สถานีรับยังมีความสามารถในการรับสัญญาณการสะท้อนเพียงโพลาริเซชันเดียวเท่านั้น กำลังส่งที่สูงขึ้นและความสามารถเชิงโพลาริเซชันที่เพิ่มขึ้นย่อมทำให้พบรอยทางเดินของดาวตกมากขึ้นเช่นกัน

ตาราง 3.1 สรุปจำนวนครั้งการเกิดการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกระหว่างเวลา 00:00-06:00 น. ในวันที่ 22-23 มี.ค., 19-20 เม.ย., 24-25 พ.ค., 21-22 มิ.ย., 26-27 ก.ค., 23-24 ส.ค. และ 21-22 ก.ย. 2546

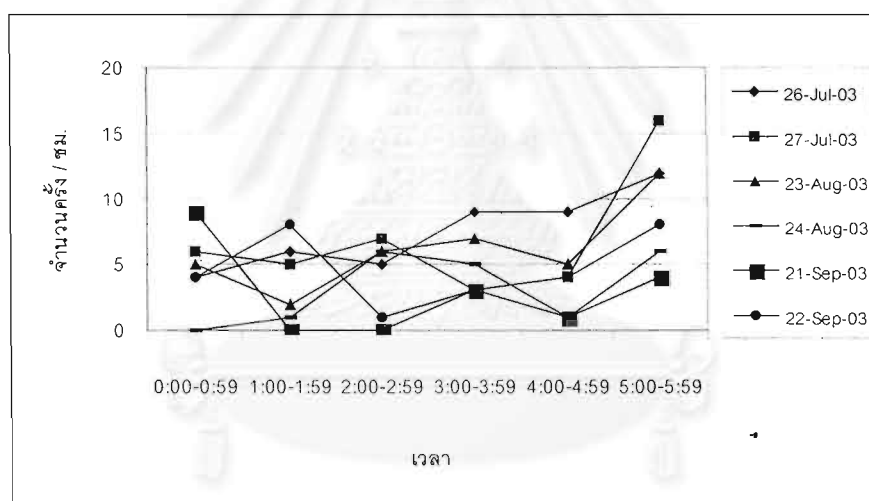
เดือน	มี.ค.		เม.ย.		พ.ค.		มิ.ย.		ก.ค.		ส.ค.		ก.ย.	
วันที่ เวลา	22	23	19	20	24	25	21	22	26	27	23	24	21	22
0:00-0:59	1	1	0	0	3	2	1	0	4	6	5	0	9	4
1:00-1:59	5	6	1	1	4	2	4	3	6	5	2	1	0	8
2:00-2:59	3	3	5	2	5	5	2	5	5	7	6	6	0	1
3:00-3:59	11	7	5	5	1	4	3	7	9	3	7	5	3	3
4:00-4:59	9	8	2	6	7	12	0	4	9	4	5	1	1	4
5:00-5:59	5	7	2	7	4	11	0	3	12	16	12	6	4	8



รูป 3.14 จำนวนครั้งต่อชั่วโมงของการเกิดการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกระหว่างเวลา 00:00-06:00 น. ในวันที่ 22-23 มี.ค. และ 19-20 เม.ย. 2546



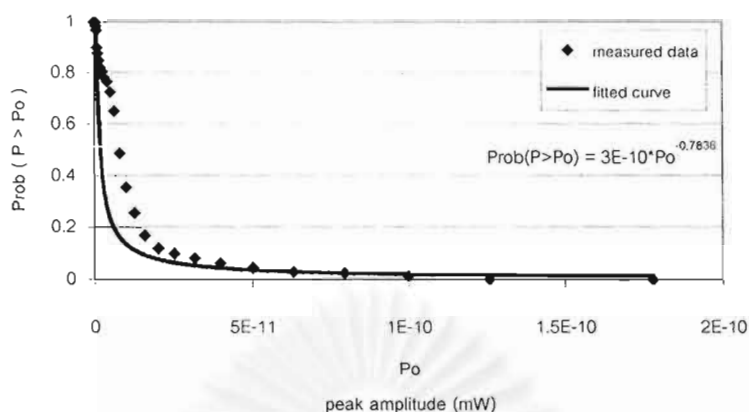
รูป 3.15 จำนวนครั้งต่อชั่วโมงของการเกิดการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกระหว่างเวลา 00:00-06:00 น. ในวันที่ 24-25 พ.ค. และ 21-22 มิ.ย. 2546



รูป 3.16 จำนวนครั้งต่อชั่วโมงของการเกิดการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกระหว่างเวลา 00:00-06:00 น. ในวันที่ 26-27 ก.ค., 23-24 ส.ค. และ 21-22 ก.ย. 2546

3.4.2 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแสดงในรูปความน่าจะเป็นที่จะพบคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าที่กำหนดดังรูป 3.17 โดยข้อมูลดังรูป 3.17 นี้เป็นข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองตรวจวัด โดยอาศัยข่ายเชื่อมโยง กรุงเทพฯ - ยะลา



รูป 3.17 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ระหว่างเวลา 00:00-06:00 น. ในวันที่ 22-23 มี.ค., 19-20 เม.ย., 24-25 พ.ค., 21-22 มิ.ย., 26-27 ก.ค., 23-24 ส.ค. และ 21-22 ก.ย. 2546

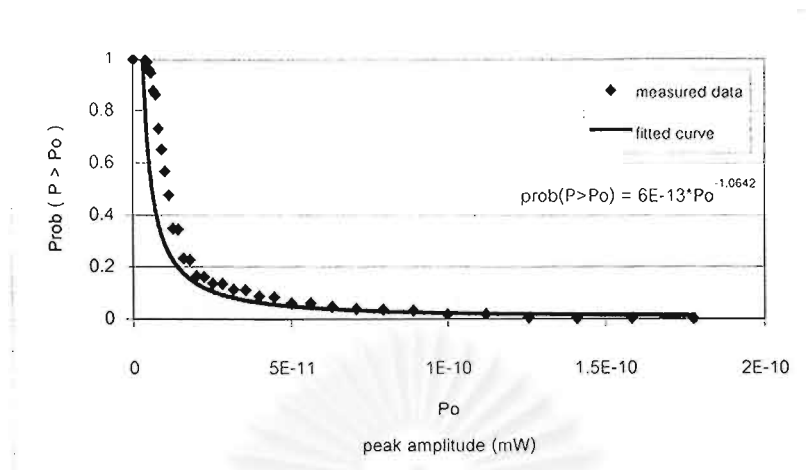
อาศัยข้อสมมติที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกประกอบการกำหนดให้ค่าปัจจัยบางประการที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าคงที่ ทำให้แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นกระเจิงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ซึ่งความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นนี้ขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของเทหวัตถุดาวตก ดังนั้นลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจึงสามารถหาได้จากลักษณะการแจกแจงมวลของเทหวัตถุดาวตก การแจกแจงแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Prob}(P > P_0) = cP_0^{-a} \quad (2)$$

โดยที่ $\text{Prob}(P > P_0)$ หมายถึงความน่าจะเป็นที่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก มีแอมพลิจูดสูงสุดมากกว่า P_0

c และ a เป็นค่าคงที่ใดๆ

เนื่องจากผลการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกและผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น แสดงให้เห็นว่าคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการคำนวณที่ใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ และแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมีค่าต่ำมากและสูงมากตามลำดับดังนั้นเมื่ออาศัยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงมาช่วยวิเคราะห์จะได้ว่า ค่าคงที่ a จะมีค่าระหว่าง 0.5 - 2 โดย a มีค่าเท่ากับ 0.5 เมื่อมีแต่



รูป 3.18 การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก (ข้อมูลของข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ-ชุมพร [21] และกรุงเทพฯ-ยะลา)

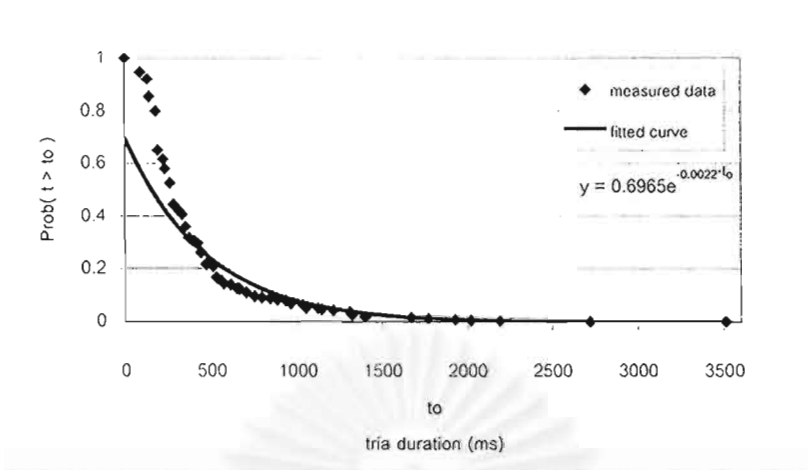
คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำแต่เพียงอย่างเดียวและ α จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นมากขึ้นจน α มีค่าเป็น 2 เมื่อมีแต่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

เส้นประในรูป 3.17 เป็นเส้นโค้งเข้ารูป (fitted curve) ของกลุ่มจุดข้อมูลจากการตรวจวัดที่สอดคล้องกับสมการ (2) โดยค่า α ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.7836 แสดงให้เห็นว่ามีจำนวนคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงอยู่มากพอสมควรซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณอัตราส่วนจำนวนรอยทางเดินความหนาแน่นสูงต่อจำนวนรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำที่ใกล้เคียงกับ 3 : 2 เมื่อนำมารวมกับข้อมูลข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ชุมพร [21] ซึ่งรอยทางเดินจำนวนมากเป็นรอยทางเดินความหนาแน่นสูงพบว่าผลที่ได้เป็นดังรูป 3.18 ซึ่งค่า $\alpha = 1.0642$

3.4.3 การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแสดงในลักษณะเดียวกับการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุด กล่าวคือ แสดงในรูปของความน่าจะเป็นที่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีความยาวนานมากกว่าค่าที่กำหนด ลักษณะการแจกแจงดังกล่าวแสดงดังรูป 3.19

นิยามความยาวนานที่ใช้ในการหาลักษณะการแจกแจงความยาวนานที่ได้จากการตรวจวัดนี้เป็นนิยามที่ใช้ในระบบสื่อสารซึ่งให้ความหมายของความยาวนานว่าเป็นเวลาที่ระดับสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกมีค่าสูงกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนซึ่งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่ใช้ในข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ยะลา กำหนดไว้ที่ -112 dBm (สูงกว่าระดับสัญญาณรบกวนปกติ 2 dB) เมื่อวิเคราะห์



รูป 3.19 การแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก ระหว่างเวลา 00:00-06:00 น. ในวันที่ 22-23 มี.ค., 19-20 เม.ย., 24-25 พ.ค., 21-22 มิ.ย., 26-27 ก.ค., 23-24 ส.ค. และ 21-22 ก.ย. 2546

การแจกแจงความยาวนานในลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์การแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุด พบว่าการแจกแจงความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\text{Prob}(t > t_0) = \exp\left(-\frac{at_0}{\tau}\right) \tag{3}$$

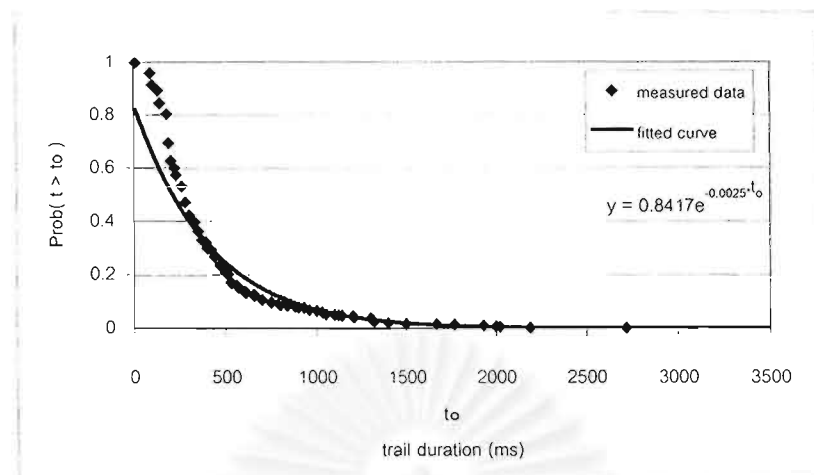
โดยที่ $\text{Prob}(t > t_0)$ หมายถึงความน่าจะเป็นที่คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก มีความยาวนานมากกว่า t_0

τ เป็นเวลาที่รอยทางเดินมีแอมพลิจูดเป็นร้อยละ 37 ของแอมพลิจูดสูง

a เป็นค่าคงที่ใดๆ

เส้นประในรูป 3.19 เป็นเส้นโค้งเข้ารูปของกลุ่มข้อมูลจากการตรวจวัดที่สอดคล้องกับสมการ (3) โดยค่า a ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.8412 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า a ที่ได้จากเส้นโค้งเข้ารูปการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อนำข้อมูลของชายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ชุมพร [21] มาคำนวณร่วมพบว่าค่า a เปลี่ยนไปเป็น 0.9559 ดังในรูป 3.20

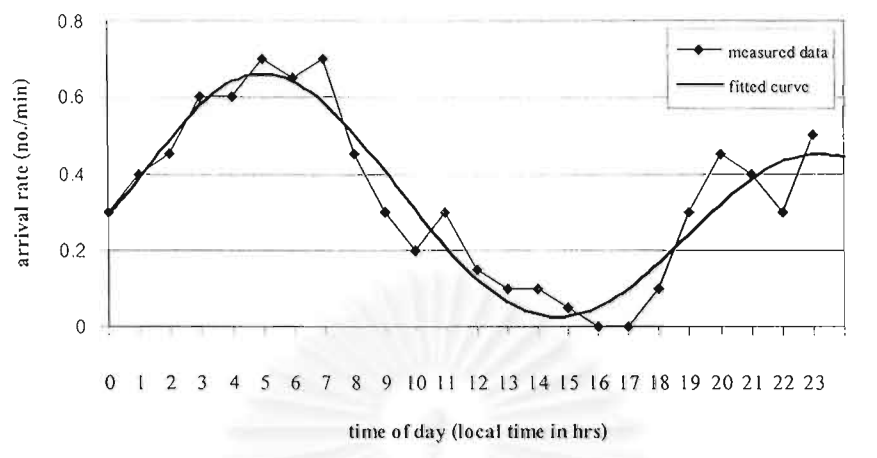
บริเวณละติจูดแคบๆ สำหรับประเทศไทยอาจถือได้ว่าการแจกแจงความหนาแน่นของเทวดูดาวตกทั่วทุกภูมิภาคของประเทศมีลักษณะคงตัวสำหรับบริเวณละติจูดต่ำ ทั้งนี้เพราะภูมิภาคทุกภูมิภาคของประเทศไทยอยู่ในซีกโลกเหนือระหว่างเส้นศูนย์สูตรและเส้น Tropic of Cancer ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณละติจูดต่ำและมีระยะสื่อสารไกลที่สุดในแนวเหนือ - ใต้น้อยกว่า 2,000 กิโลเมตร



รูป 3.20 การแจกความยาวนานของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก (ข้อมูลของ
ข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ-ชุมพร และกรุงเทพฯ-ยะลา)

อัตราการมาถึงของรอยทางเดินของดาวตกที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุในรอบ 1 วัน โดยอาศัยข้อมูลทั้งของข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ชุมพรและข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ยะลา แสดงดังรูป 3.21

ข่ายเชื่อม โยงทั้งสองข่ายเป็นข่ายเชื่อม โยงที่ใช้กำลังส่งต่ำเป็นเหตุให้อัตราการมาถึงของรอยทางเดินมีค่าน้อย โดยค่าที่คำนวณได้น้อยกว่า 1 รอยทางเดินต่อนาที นอกจากนี้ผลการตรวจวัดยังแสดงให้เห็นว่าในช่วง 15 - 17 นาฬิกาเป็นช่วงที่อัตราการมาถึงมีค่าต่ำมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่ระดับสัญญาณรบกวนที่ภาครับมีค่าสูงใกล้เคียงกับระดับจุดเริ่มเปลี่ยน ทำให้ไม่สามารถแยกสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกออกจากสัญญาณรบกวนได้ อย่างไรก็ตามการนำค่าอัตราการมาถึงของรอยทางเดินไปใช้งานจะใช้ค่าที่ได้จากเส้นโค้งเข้ารูปร่างของข้อมูลซึ่งแสดงเป็นเส้นประในรูป 3.21 เมื่อพิจารณาจากเส้นโค้งเข้ารูปร่างนี้จะเห็นได้ว่าอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุในรอบ 1 วันมีลักษณะคล้ายรูปสัญญาณไซน์โดยมีค่าสูงที่สุดที่เวลาประมาณ 6 นาฬิกา และมีค่าต่ำที่สุดที่เวลาประมาณ 16 นาฬิกาซึ่งเลื่อนขึ้นจากค่าที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.1 เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเช่นกัน สาเหตุอาจเนื่องมาจากแนวลักษณะการกระจายเชิงทิศทางของเทหวัตถุดาวตกที่พุ่งเข้าสู่บรรยากาศโลกสัมพันธ์กับแนวการวางตัวของข่ายเชื่อม โยงทำให้พบเหตุการณ์ดังกล่าวก่อนเวลาที่น่าจะเป็นไปได้ตามคำอธิบายปรากฏการณ์

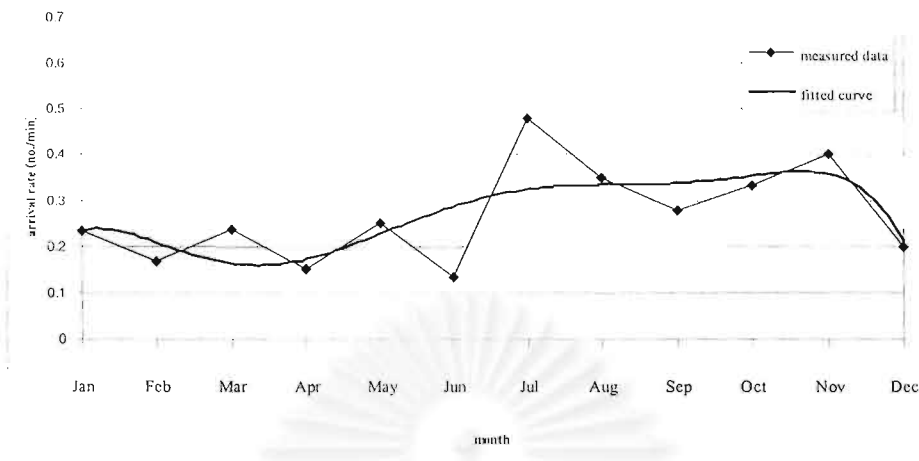


รูป 3.21 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วัน (ข้อมูลข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ชุมพร และกรุงเทพฯ-ยะลา)

3.4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ตามฤดูกาล

การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อการกระเจิงคลื่นวิทยุตามฤดูกาลแสดงดังรูป 3.22 โดยข้อมูลที่ใช้ในรูปเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงหลายข่ายในงานวิจัยก่อนหน้า ร่วมกับของข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ยะลา ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะสื่อสารและกำลังส่ง ต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับเทียบข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่ภายใต้ค่าปัจจัยฐานเดียวกันก่อน ค่าปัจจัยฐานที่ใช้ปรับเทียบข้อมูลคือค่าปัจจัยต่างๆ ของข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ชุมพร ในเดือนพฤศจิกายน การใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงหลายข่ายในการแสดงการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลทำให้ได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลครบรอบ 1 ปีที่ปรากฏค่อนข้างกว้างตัวพอสมควรจึงประมาณโดยอาศัยเส้นโค้งเข้ารูปของกลุ่มจุดข้อมูลที่มีอยู่ อัตราการมาถึงที่ได้จากการตรวจวัดและเส้นโค้งเข้ารูปจึงมีลักษณะดังรูป 3.22 ข้อมูลเชิงสถิติทั้ง 4 รูปแบบที่แสดงในหัวข้อนี้จะใช้เป็นข้อมูลฐานในการทำนายลักษณะสมบัติเชิงสถิติของการตรวจวัดคลื่นกระเจิงจากข่ายเชื่อม โยงที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง ขณะที่ลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวนั้นจะอาศัยผลการคำนวณตามแบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น รายละเอียดในเรื่องนี้จะกล่าวในบทถัดไป



รูป 3.22 การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินมีระดับมากกว่า -112 dBm ณ เวลา 0 นาฬิกา ในรอบ 1 ปี (ข้อมูลข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ในงานก่อนหน้า [31] และกรุงเทพฯ-ยะลา)

3.4.5 อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Signal power to Background Noise power Ratio : SBNR) เป็นอัตราส่วนที่สามารถบ่งชี้คุณภาพสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงได้ลักษณะหนึ่ง ค่า SBNR ของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ-ยะลาในรูปแบบของค่าเฉลี่ยรายวันและค่าเฉลี่ยตลอดทั้ง 14 วันของการทดลองส่งคลื่นพร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรายวันและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตลอดทั้ง 14 วันมีสรุปในตาราง 3.2

ค่าเฉลี่ยรายวันของ SBNR ที่ต่ำที่สุดมีค่า 4.32 dB ค่า SBNR เฉลี่ยดังกล่าวนี้อยู่ในระดับที่สามารถใช้ประโยชน์ในการสื่อสารโดยต้องพึ่งพากรรมวิธีเข้ารหัสและกรรมวิธีกีดสัญญาณที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SBNR ตลอดทั้ง 14 วัน พบว่ามีค่า 5.53 dB ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ SBNR ตลอดทั้ง 14 วัน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ SBNR ที่สูงที่สุดมีค่า 2.53 dB และ 3.55 dB ตามลำดับ ตัวเลขทั้งสองแสดงให้เห็นข้อจำกัดของการใช้งานที่ไม่สามารถทำได้ตลอดเวลาเมื่อมีกำลังส่งจำกัดเพียง 200 W ความแปรปรวนของค่า SBNR และจำนวนครั้งการสะท้อนรบกวนของดาวตกบ่งบอกความไม่แน่นอน และความไม่สม่ำเสมอที่ทำให้ต้องมีการศึกษาเชิงสถิติอย่างจริงจังเพื่อประโยชน์สูงสุดในการประยุกต์ใช้ด้านการสื่อสาร

ตาราง 3.2 สรุปค่าเฉลี่ยรายวัน,ค่าเฉลี่ยตลอดทั้ง 14 วัน, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรายวัน,ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตลอดทั้ง 14 วันของ SBNR และจำนวนครั้งการเกิดการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก

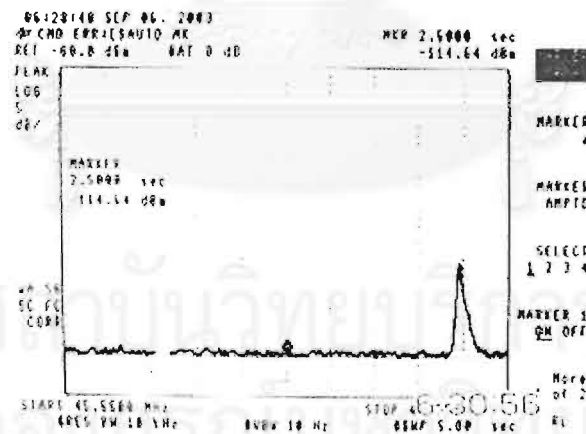
วัน เดือน ปี	ค่าเฉลี่ย SBNR (dB)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SBNR (dB)	จำนวนครั้งการเกิดการ สะท้อนรอยทางเดินของ ดาวตก
22 มีนาคม 2546	4.70	2.19	34
23 มีนาคม 2546	5.43	2.63	32
19 เมษายน 2546	4.91	1.28	15
20 เมษายน 2546	6.17	3.55	21
24 พฤษภาคม 2546	4.32	1.59	24
25 พฤษภาคม 2546	4.55	1.9	36
21 มิถุนายน 2546	6.64	3.22	10
22 มิถุนายน 2546	4.73	2.1	22
26 กรกฎาคม 2546	6.03	2.92	45
27 กรกฎาคม 2546	6.08	2.61	41
23 สิงหาคม 2546	5.10	2.41	37
24 สิงหาคม 2546	6.24	2.62	19
21 กันยายน 2546	6.10	2.64	17
22 กันยายน 2546	5.57	2.71	28
ค่าเฉลี่ยตลอดทั้ง 14 วัน = 5.53 dB			
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตลอดทั้ง 14 วัน = 2.53 dB			
จำนวนครั้งการเกิดการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกตลอดทั้ง 14 วัน = 381 ครั้ง			

3.5 ปฏิบัติการนับอัตราการเกิดรอยทางเดินดาวตกบริเวณท้องฟ้ารอยต่อ จังหวัดนครนายกและ จังหวัดปราจีนบุรี

ขีดความสามารถด้านกำลังส่งของเครื่องส่งในโครงการวิจัยนี้จำกัดอยู่ที่ 200 W เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณ ขนาดกำลังส่งที่จำกัดนี้ทำให้จำนวนรอยทางเดินที่พบของข่ายเชื่อมโยง กรุงเทพฯ-ยะลา มีค่อนข้างน้อยและสถานีรับ ณ อำเภอเมืองจังหวัดยะลาจะประสบปัญหาการรับสัญญาณในช่วงเวลา 6:00 - 24:00 น. อันเป็นผลจากการออกอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีวิทยุโทรทัศน์ในจังหวัดยะลาและพื้นที่ใกล้เคียง

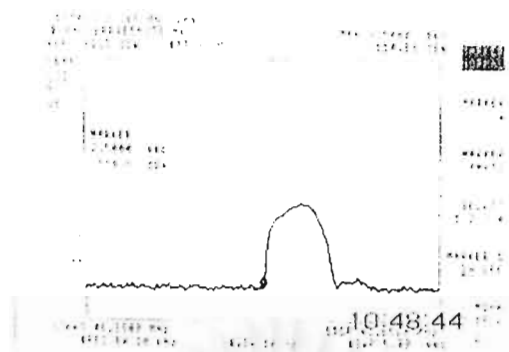
ด้วยเหตุดังกล่าวโครงการวิจัยนี้จึงปฏิบัติการนับอัตราการเกิดรอยทางเดินดาวตกบริเวณท้องฟ้า รอยต่อจังหวัดนครนายกและปราจีนบุรี ปฏิบัติการดังกล่าวดำเนินตั้งแต่เวลา 19:45 น. วันที่ 5 กันยายน 2546 ถึง 18:59 น. วันที่ 6 กันยายน 2546 ผลที่ได้จากปฏิบัติการนี้แสดงในตาราง 3.3 จะเห็นได้จากตารางดังกล่าวว่าช่วงเวลา 20:00 – 21:59 น. มีจำนวนรอยทางเดินที่ได้นับได้อยู่ในเกณฑ์สูง ช่วงเวลาที่มีจำนวนรอยทางเดินสูงมากคือช่วง 4:00 – 6:59 น. ช่วงเวลา 3:00 – 3:59 น. มีปัญหาไฟฟ้าดับเกิดขึ้น ณ สถานที่รับทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณได้ ช่วงเวลา 11:00 – 16:59 น. เป็นช่วงเวลาที่มิจำนวนรอยทางเดินน้อยมาก ความเปลี่ยนแปลงรายวันดังกล่าวมีความสอดคล้องกับคำอธิบายปรากฏการณ์ในบทที่ 2 นอกจากนี้ผลที่ปรากฏชี้ให้เห็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการสื่อสารโดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกที่อยู่ในบริเวณท้องฟ้ารอยต่อจังหวัดนครนายกและจังหวัดปราจีนบุรี อย่างไรก็ตามผลที่ได้ยังไม่สามารถถือเป็นข้อสรุปที่ยอมรับได้เนื่องจากเป็นผลของการปฏิบัติการเพียง 23 ชั่วโมงเท่านั้น

รูป 3.23 และรูป 3.24 เป็นตัวอย่างรูปสัญญาณที่ตรวจวัดได้ รอยทางเดินส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 70 เป็นรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังตรวจพบสัญญาณจากปรากฏการณ์ถ่ายทอดประจุบนท้องฟ้า(ฟ้าผ่า)อีกด้วย รูป 3.25 แสดงตัวอย่างสัญญาณดังกล่าว เหตุที่พบสัญญาณดังกล่าว รูป 3.25 เพราะในช่วงวันแรกของการปฏิบัติการมีพายุฝนฟ้าคะนองเกิดขึ้นเป็นเวลายาวนานกว่า 4-5 ชั่วโมง จะสังเกตพบว่าขนาดสัญญาณจะใหญ่ซึ่งอาจกลายเป็นการรบกวนหรือการแทรกสอดต่อระบบสื่อสารผ่านดาวตกได้ เนื่องจากปรากฏอยู่ในย่านความถี่ใกล้เคียงมาก

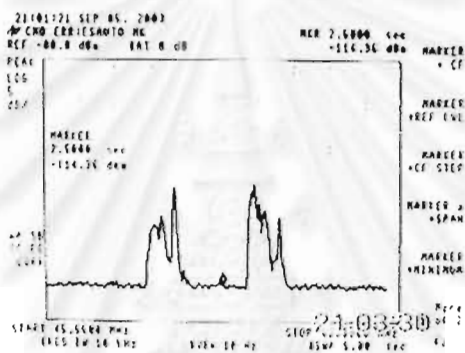


รูปที่ 3.23 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำปกติ

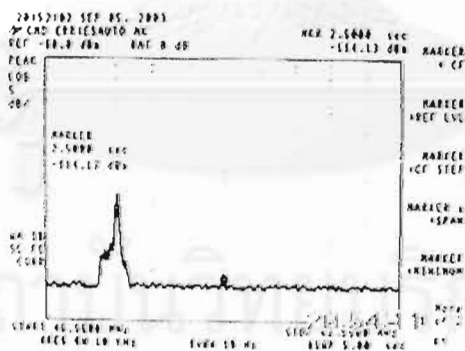
ณ ชายเชื่อมโยง นครนายก-ปราจีนบุรี



รูปที่ 3.24 ตัวอย่างสัญญาณที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นสูงปกติ
ณ ข่ายเชื่อม โยง นครนายก-ปราจีนบุรี



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.25 ตัวอย่างสัญญาณที่ผ่าน ณ ข่ายเชื่อม โยง นครนายก-ปราจีนบุรี

ตารางที่ 3.3 สรุปจำนวนครั้งการเกิดการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก ณ ชายเชื่อม โยง
นครนายก-ปราจีนบุรี ระหว่างเวลา 19:45-18:59 ในวันที่ 5-6 ก.ย. 2546

เวลา	จำนวน
19:45-19:59	2
20:00-20:59	11
21:00-21:59	9
22:00-22:59	5
23:00-23:59	9
00:00-00:59	3
01:00-01:59	7
02:00-02:59	1
03:00-03:59	ไฟฟ้าดับ
04:00-04:59	13
05:00-05:59	11
06:00-06:59	12
07:00-07:59	6
08:00-08:59	5
09:00-09:59	3
10:00-10:59	5
11:00-11:59	3
12:00-12:59	1
13:00-13:59	2
14:00-14:59	3
15:00-15:59	2
16:00-16:59	1
17:00-17:59	5
18:00-18:59	-
รวม	119

บทที่ 4

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

ผลการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการการคำนวณแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น และข้อมูลเชิงสถิติเหมาะที่จะประกอบกันเป็นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่สามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านพิกัดละติจูดที่เป็นแหล่งข้อมูลเชิงสถิตินั้นได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงขอบเขตและลักษณะของแบบจำลอง กรรมวิธีพัฒนาแบบจำลองและตัวแบบจำลอง การทดสอบแบบจำลองและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

4.1 ขอบเขต และลักษณะของแบบจำลอง

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกที่ประกอบขึ้นจากการคำนวณลักษณะสมบัติของการกระเจิงและข้อมูลการตรวจวัดมีพื้นฐานมาจากข้อสมมติที่ใช้ในการศึกษา กล่าวคือสมมติให้ค่าปัจจัยบางประการเป็นค่าคงตัว ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงจึงมีเพียงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น แบบแผนของคลื่น และแนวการวางตัวของรอยทางเดิน การสมมติในลักษณะดังกล่าวอาจทำให้การแปลความหมายจากลักษณะของคลื่นกระเจิงในงานประยุกต์ที่ต้องทราบลักษณะสมบัติที่แท้จริง เช่น การศึกษาทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าสู่โลกของดาวตก หรือการศึกษาอื่นๆ ในเชิงดาราศาสตร์เกี่ยวกับดาวตก เกิดความผิดพลาดได้ อย่างไรก็ตามข้อสมมตินี้ไม่น่าจะมีผลต่อลักษณะสมบัติที่จำเป็นในการวิเคราะห์สมรรถนะของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ประโยชน์ในเชิงการสื่อสารข้อมูล ข้อสมมติที่ทำให้ต้องจำกัดขอบเขตและลักษณะของแบบจำลองที่ประกอบขึ้นจากการการคำนวณลักษณะสมบัติคลื่นกระเจิงและข้อมูลการตรวจวัดไว้ดังนี้

4.1.1 ขอบเขตของแบบจำลอง

ขอบเขตของแบบจำลองจำกัดไว้ดังนี้

1. ข้อมูลการตรวจวัดที่ใช้ในแบบจำลองเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงหลายข่ายในเวลาที่แตกต่างกัน โดยข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายมีลักษณะสมบัติพื้นฐาน เช่น ระยะสื่อสารและแนวการวางตัวของข่ายเชื่อมโยงต่างกันด้วย ลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะยาวที่ใช้ในแบบจำลองจึงได้มาจากการปรับเทียบข้อมูลเหล่านี้ โดยอาศัยแนวคิด

จากแบบจำลองเชิงสัดส่วน [30] ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงผลของแนวการวางตัวของขั้วเชื่อมโยงต่อตำแหน่งปรากฏและแนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตก ดังนั้นแบบจำลองที่ได้นี้จึงเป็นแบบจำลองสำหรับขั้วเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวตกที่อยู่ในซีกโลกเหนือ บริเวณละติจูดต่ำ โดยไม่ได้คำนึงถึงแนวการวางตัวของขั้วเชื่อมโยง แม้ว่าแนวการวางตัวนี้จะมีผลต่อตำแหน่งปรากฏและแนวการวางตัวของรอยทางเดินของดาวตกดังที่กล่าวข้างต้นแล้วก็ตาม

2. ค่าปัจจัยบางประการเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่และพิกัดของตำแหน่งกระเจิงซึ่งจะเป็นตัวที่กำหนดค่ามุมกระเจิง เป็นต้น เป็นปริมาณที่ไม่ทราบค่าที่แน่นอน การคำนวณลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกจึงอาศัยข้อสมมติในการกำหนดค่าปัจจัยดังกล่าว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้นี้จึงไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้ความสามารถในการกระเจิงคลื่นวิทยุของรอยทางเดินของดาวตกบางประการที่ต้องอาศัยการแปลความหมายจากลักษณะของคลื่นกระเจิง เช่น การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับใช้วิเคราะห์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของบรรยากาศชั้นบน เป็นต้น เพราะอาจเกิดความผิดพลาดในการแปลความหมายได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้ทำนายลักษณะสมบัติบางประการในเชิงการสื่อสารข้อมูลได้ เช่น ลักษณะการแจกแจงความยาวนานของคลื่นกระเจิง เป็นต้น

4.1.2 ลักษณะของแบบจำลอง

แบบจำลองที่ได้นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแบบจำลองที่สามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำตลอดช่วงเวลาในรอบ 1 ปี ดังนั้นแบบจำลองจึงประกอบด้วย 2 ส่วนดังนี้

ก. แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกรวยเดียว

แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกกรวยเดียวนี้เป็นแบบจำลองที่แสดงกำลังรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก แบบจำลองนี้ขยายมาจากการคำนวณลักษณะสมบัติของคลื่นกระเจิงด้วยแบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ เกี่ยวกับระบบสื่อสาร เช่น อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ กำลังส่ง เป็นต้น ร่วมด้วย

จุดเด่นของแบบจำลองนี้อยู่ที่ความต่อเนื่องในการคำนวณลักษณะสมบัติคลื่นกระเจิงที่ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น ทำให้สามารถแสดงลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิง

จากรอยทางเดินของดาวตกที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นอยู่ในย่านการเปลี่ยนผ่านได้ศึกษาการใช้แบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูงซึ่งไม่มีความต่อเนื่องไม่ว่าจะใช้เกณฑ์ใดในการกำหนดขอบเขตระหว่างแบบจำลองทั้งสอง ผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบสื่อสารผ่านดาวตก [19] แสดงให้เห็นว่าลักษณะของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินและประโยชน์ต่อช่องสัญญาณ ไม่ได้มาจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำตามที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ เป็นเหตุผลที่ช่วยเสริมให้แบบจำลองทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นมีบทบาทและความเหมาะสม

ข. แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิตินี้เป็นแบบจำลองที่แสดงลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกของข่ายเชื่อมโยงใดๆ ที่อยู่ในซีกโลกเหนือ บริเวณละติจูดต่ำ แบบจำลองนี้อาศัยข้อมูลลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร ณ เดือนพฤศจิกายน เวลา 0.00 – 1.00 น. [21] เป็นข้อมูลอ้างอิง การหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติของข่ายเชื่อมโยงใดๆ ที่เดือนและเวลาต่างๆ ทำโดยการปรับเทียบค่าปัจจัยของระบบสื่อสารประกอบกับการปรับเทียบอัตราการมาถึงไปยังเดือนและเวลาที่ต้องการ ดังนั้นแบบจำลองเชิงสถิตินี้จึงอาศัยแนวคิดในลักษณะเดียวกับแบบจำลองเชิงสัดส่วน แต่การหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติอื่นๆอาศัยลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นแทนที่จะเป็นลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดเหมือนดังแบบจำลองอื่นที่สมมติให้ลักษณะสมบัติเชิงเดี่ยวเป็นแบบผลการคำนวณด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำทั้งหมด โดยไม่คำนึงถึงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้น

กรรมวิธีสร้างแบบจำลองและตัวแบบทั้ง 2 ส่วนตามลักษณะที่กล่าวมานั้น มีรายละเอียดดังนี้

4.2 กรรมวิธีสร้างแบบจำลองและแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ

แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในเชิงเดี่ยวอาศัยพื้นฐานจากแบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ส่วนแบบจำลองในเชิงสถิติอาศัยพื้นฐานจากการปรับเทียบค่าปัจจัยต่างๆ กับข้อมูลอ้างอิง รายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองทั้งสองส่วนแยกแสดงตามหัวข้อดังนี้

4.2.1 แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

รอยเดี่ยว

แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวเป็นแบบจำลองที่แสดงกำลังรับคลื่นกระเจิงโดยพิจารณาค่าปัจจัยต่าง ๆ ของระบบสื่อสารไว้ด้วย แบบจำลองนี้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับและสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่วิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น ซึ่งแสดงได้ด้วยชุดสมการต่อไปนี้

กำลังรับคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^3 R_T^2 R_R^2} \sigma \quad (1)$$

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

λ คือความยาวคลื่นปฏิบัติการ

σ คือภาคตัดขวางเรดาร์ทวิสถิติ (bistatic radar cross section) ของรอยทางเดินซึ่งมีความสัมพันธ์กับสนามกระเจิงและสนามตกกระทบดังนี้

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

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

$$\frac{|E^s|}{|E^i|} = \sqrt{\frac{2}{\pi k R_R}} g \quad (3)$$

โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อน g เป็นผลที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้น

แม้ว่าแบบจำลองนี้จะมีจุดเด่นในเรื่องความต่อเนื่องในการคำนวณและให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับลักษณะของคลื่นกระเจิงที่รับได้มากกว่าการคำนวณด้วยแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองรอยทางเดินความหนาแน่นสูง แต่แบบจำลองนี้ใช้เวลาคำนวณยาวนานกว่ามาก อย่างไรก็ตามจุดด้อยนี้สามารถชดเชยได้ด้วยการคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนไว้ล่วงหน้าและเก็บเป็นฐานข้อมูลไว้ เนื่องจากสมการดังกล่าวนั้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนและเวลาในรูป $(ka)^2$ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คำนวณได้เป็นอิสระไม่ขึ้นกับความถี่ปฏิบัติการและค่าปัจจัยอื่นๆ ของระบบสื่อสาร

4.2.2 แบบจำลองลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของควาคในย่านละติจูดต่ำ

แบบจำลองเชิงสถิตินี้เป็นแบบจำลองที่แสดงลักษณะสมบัติเชิงสถิติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของควาคในบริเวณละติจูดต่ำโดยอาศัยข้อสมมติว่าลักษณะสมบัติเชิงสถิติระยะสั้นในการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะพิจารณาในเวลาและเดือนใด โดยลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงนี้ได้มาจากข้อมูลชุดเดียวกับที่ใช้วิเคราะห์หาลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดและลักษณะการแจกแจงความยาวนานที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.2 และ 3.4.3 ตามลำดับ ขณะที่อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงคำนวณโดยเปรียบเทียบกับอัตราการมาถึงอ้างอิง (reference arrival rate) ซึ่งเป็นอัตราการมาถึงในช่วงเวลา 0.00 – 1.00 น. เดือนพฤศจิกายนของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร ค่าปัจจัยที่ใช้เปรียบเทียบมี 3 ประการคือ ค่าปัจจัยข่ายเชื่อมโยง (link factor) ค่าปัจจัยเวลา (time factor) และค่าปัจจัยเดือน (month factor) อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาในเดือนและเวลาที่สนใจแสดงด้วยสมการดังนี้

$$AR = AR_R \times L \times T \times M \quad (4)$$

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

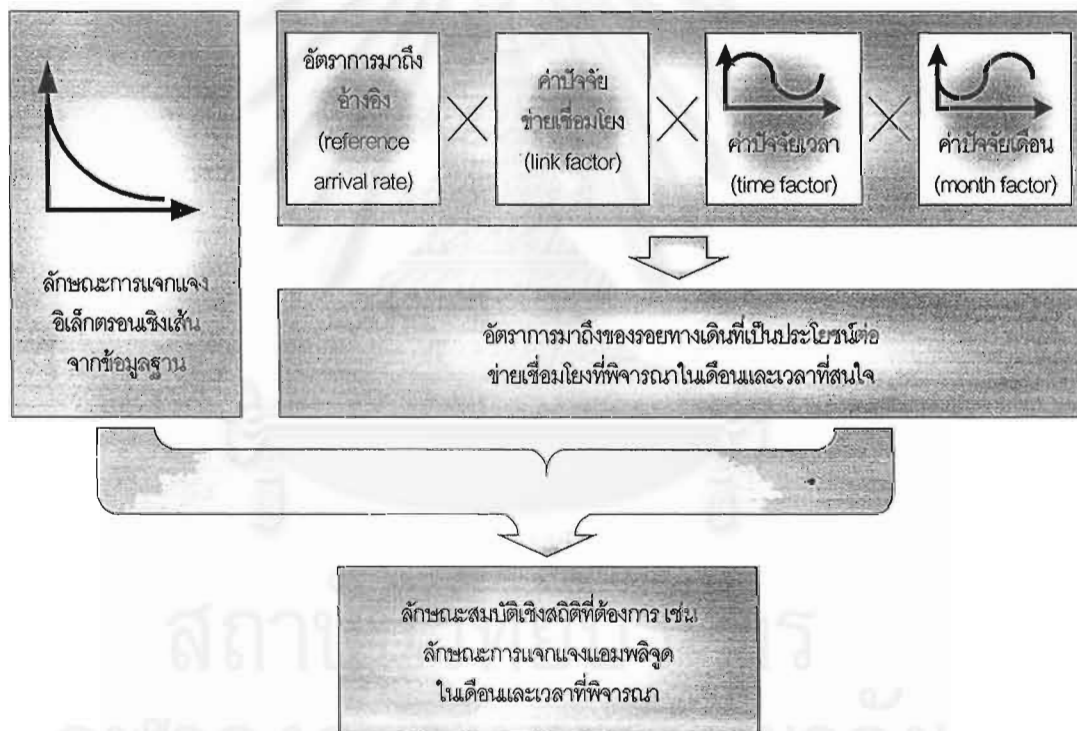
อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาในเดือนและเวลาที่สนใจ และลักษณะการแจกแจงความหนาแน่นอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ได้ สามารถนำไปใช้หาลักษณะสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการเช่น ลักษณะการแจกแจงแอมพลิจูดสูงสุดได้ ตามแผนภาพกรรมวิธีสร้างแบบจำลองเชิงสถิติดังรูป 4.1

รายละเอียดเกี่ยวกับค่าปัจจัยทั้ง 3 ประการที่แสดงในแบบจำลองมีดังนี้

ค่าปัจจัยข่ายเชื่อมโยงเป็นค่าที่ปรับเทียบค่าปัจจัยต่างๆ ของระบบสื่อสาร เช่น กำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จากข่ายเชื่อมโยงอ้างอิงมาสู่ข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณา โดยค่าปัจจัยข่ายเชื่อมโยงมีค่าดังนี้

$$L = \frac{P_T G_T G_R T_R f'^3 R'^3}{P_T' G_T' G_R' T_R' f^3 R^3} \quad (5)$$

โดยที่ P_T , G_T , G_R , T_R , f และ R หมายถึง กำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศส่ง อัตราขยายของสายอากาศรับ ระดับกำลังต่ำสุดที่ภาครับสามารถรับได้ ความถี่ปฏิบัติการ และระยะจากสายอากาศถึงตำแหน่งกระเจิง (จุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและ



รูป 4.1 กรรมวิธีสร้างแบบจำลองเชิงสถิติ

สายอากาศรับที่ระดับความสูงเหนือพื้นโลก 95 กิโลเมตร) ตามลำดับ เครื่องหมาย “ ’ ” บนค่าปัจจัยแต่ละตัวแสดงว่าค่าปัจจัยนั้นเป็นค่าปัจจัยของข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง

ค่าปัจจัยเวลาและค่าปัจจัยเดือนตามตาราง 4.1 และ 4.2 เป็นค่าที่คำนวณจากข้อมูลในงานวิจัยก่อนหน้า [21,31] (สดมภ์ที่สอง) และค่าที่รวมข้อมูลจากการตรวจวัดในงานวิจัยนี้ด้วย (สดมภ์

ที่สาม) ค่าดังกล่าวจึงอาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการตรวจวัดเพิ่มขึ้น แบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกทั้งในส่วนแบบจำลองเชิงเดี่ยวและแบบจำลองเชิงสถิติที่ได้ สามารถใช้เป็นแบบจำลองสำหรับย่านละติจูดต่ำ (ซีกโลกเหนือ) ได้ เนื่องจากลักษณะของคลื่นกระเจิงที่คำนวณ โดยอาศัยแบบจำลองรอยทางเดินทรงกระบอกเรียงซ้อนหลายชั้นมีความใกล้เคียงกับลักษณะคลื่นกระเจิงที่รับได้จากการตรวจวัด และลักษณะสมบัติเชิงสถิติที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงก็เป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในประเทศไทยซึ่งมีพื้นที่ทั้งประเทศอยู่ในซีกโลกเหนือ ย่านละติจูดต่ำ เพื่อที่จะทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองทั้งสองส่วนจำเป็นต้องมีการทดสอบการใช้งานแบบจำลอง รายละเอียดของการทดสอบแบบจำลองมีอยู่ในหัวข้อถัดไป

4.3 การทดสอบแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลองในส่วนแบบจำลองเชิงเดี่ยวหรือแบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวกระทำโดยเปรียบเทียบลักษณะของคลื่นกระเจิงที่ได้จากการคำนวณกับคลื่นกระเจิงที่ได้จากการตรวจวัด เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลจากการตรวจวัดที่แสดงในหัวข้อ 3.3 ส่วนการทดสอบแบบจำลองเชิงสถิติจะทำโดยเปรียบเทียบอัตราความมาถึงของรอยทางเดินที่เป็นประโยชน์ต่อข่ายเชื่อมโยงในรอบ 1 วันที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยสมการ (4) และ (5) ประกอบกับค่าปัจจัยเวลาและค่าปัจจัยเดือนที่แสดงในตาราง 4.1 และ 4.2 กับสถิติที่ได้จากการตรวจวัด ผลการตรวจวัดของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ-ยะลา คือ ผลที่นำมาทดสอบแบบจำลอง

การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองและผลการตรวจวัดในส่วนแบบจำลองลักษณะสมบัติของคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกรอยเดี่ยวได้ผลในลักษณะเดียวกันกับการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการตรวจวัดที่แสดงในหัวข้อ 3.3 กล่าวคือสามารถหาผลการคำนวณที่ให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณและผลการตรวจวัดที่จำแนกโดยการสังเกตได้ว่าเป็นคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการแกว่ง ได้มากกว่า 0.8 จึงไม่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในที่นี้ ขณะที่ผลการทดสอบแบบจำลองเชิงสถิติของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

ตาราง 4.1 ค่าปัจจัยเวลา

เวลา	ค่าปัจจัยเวลา (T) [31]	ค่าปัจจัยเวลา (T)*
00:00-01:00	1.00	1.00
01:00-02:00	1.50	1.04
02:00-03:00	1.77	1.48
03:00-04:00	1.90	1.88
04:00-05:00	1.87	2.09
05:00-06:00	1.77	2.09
06:00-07:00	1.60	1.95
07:00-08:00	1.33	1.73
08:00-09:00	1.10	1.47
09:00-10:00	0.87	1.21
10:00-11:00	0.63	0.95
11:00-12:00	0.43	0.70
12:00-13:00	0.30	0.46
13:00-14:00	0.17	0.26
14:00-15:00	0.13	0.11
15:00-16:00	0.13	0.04
16:00-17:00	0.17	0.09
17:00-18:00	0.27	0.25
18:00-19:00	0.37	0.50
19:00-20:00	0.5	0.80
20:00-21:00	0.67	1.06
21:00-22:00	0.83	1.22
22:00-23:00	0.97	1.27
23:00-00:00	1.00	1.00

* การคำนวณค่าปัจจัยเวลาใช้ข้อมูลของข่ายเชื่อมโยง กรุงเทพฯ-ชุมพร กับ
กรุงเทพฯ-ยะลา (00:00-06:00 น.)

ตาราง 4.2 ค่าปัจจัยเดือน

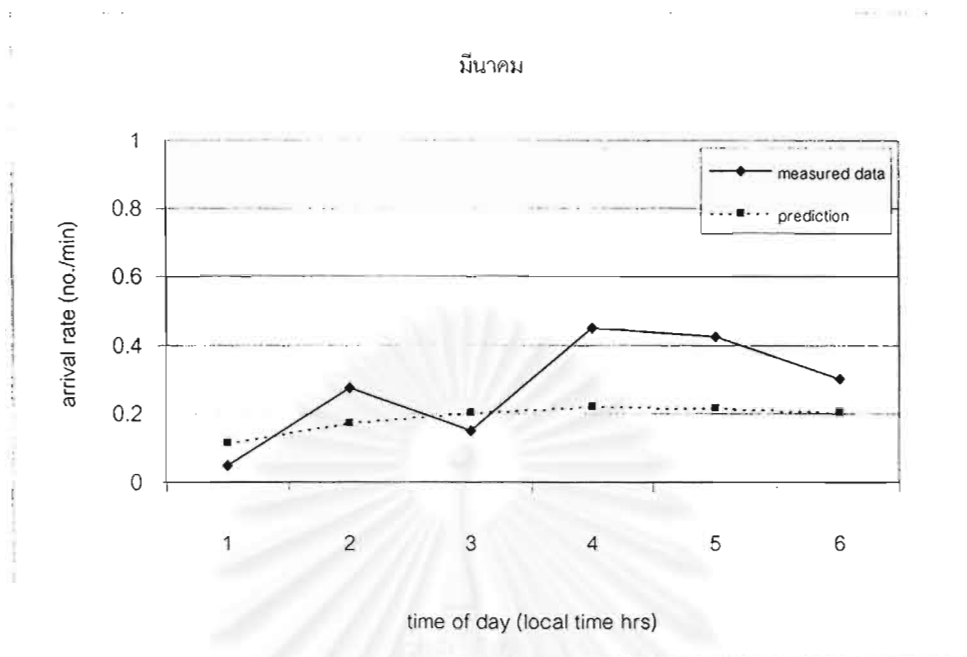
เดือน	ค่าปัจจัยเดือน (M) [31]	ค่าปัจจัยเดือน (M)*
มกราคม	0.82	0.60
กุมภาพันธ์	0.61	0.62
มีนาคม	0.71	0.45
เมษายน	1.07	0.45
พฤษภาคม	1.43	0.61
มิถุนายน	1.71	0.80
กรกฎาคม	1.86	0.91
สิงหาคม	1.79	0.92
กันยายน	1.61	0.91
ตุลาคม	1.29	0.96
พฤศจิกายน	1.00	1.00
ธันวาคม	0.89	0.58

* การคำนวณค่าปัจจัยเดือนใช้ข้อมูลของข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ-ชุมพร กับ กรุงเทพฯ-ยะลา (มี.ค.- ก.ย. 46)

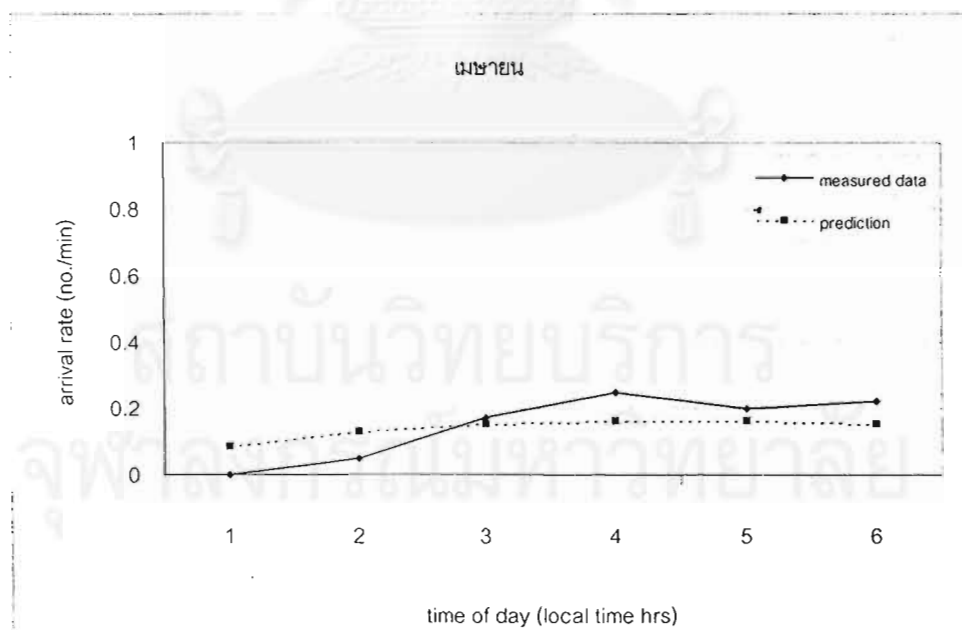
ผลการทดสอบข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ-ยะลา

การทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากรอยทางเดินของดาวตกโดยอาศัยข่ายเชื่อม โยง กรุงเทพฯ-ยะลา ณ สูดสัปดาห์ที่สามของเดือนมีนาคม 2546 ถึงเดือนกันยายน 2546 ดำเนินการใน เฉพาะช่วงเวลา 0:00-6:00 น. เมื่อใช้แบบจำลองเชิงสถิติดังสมการ (4) และสมการ (5) ทำนายค่าเฉลี่ยอัตราการมาถึงของรอยทางเดินปรากฏผลดังรูป 4.2 ถึงรูป 4.8

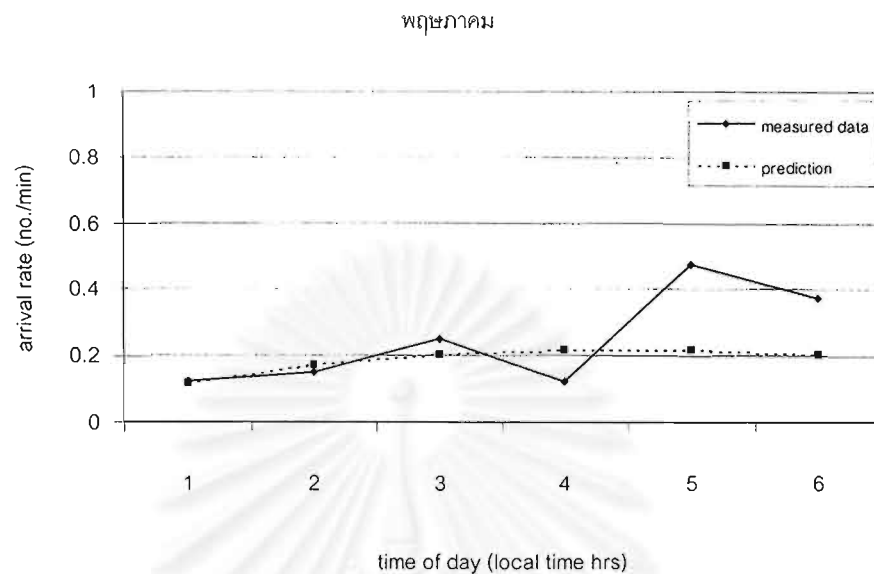
จะเห็นได้ว่ามีเฉพาะผลของเดือนมีนาคมที่มีความแตกต่างพอสมควรแต่ก็ไม่มากจนเกินไปนัก ผลของเดือนอื่นๆ แสดงให้เห็นความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองเชิงสถิติได้ดีทีเดียว ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายและผลการตรวจวัดมีสรุปในตาราง 4.3 เมื่อพิจารณาด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าผลของเดือนมีนาคม น่าพอใจมาก ขณะที่ผลของเดือนกรกฎาคมซึ่งมีผลการวัดที่สูงเวลา 6:00 น. มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำที่สุด ผลของเดือนกันยายนได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีเครื่องหมายเป็นลบ เพราะลักษณะเส้นโค้งผลการทำนายเป็นโค้งว่า ขณะที่ผลการวัดเป็นโค้งนูน การใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีนี้อาจสื่อความหมายที่ไม่ค่อยดีนักเนื่องจากจำนวนข้อมูลที่มีค่อนข้างน้อย ดังนั้นอาจกล่าวโดยรวมได้ว่าผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ดีสำหรับปริมาณข้อมูลที่มีอยู่



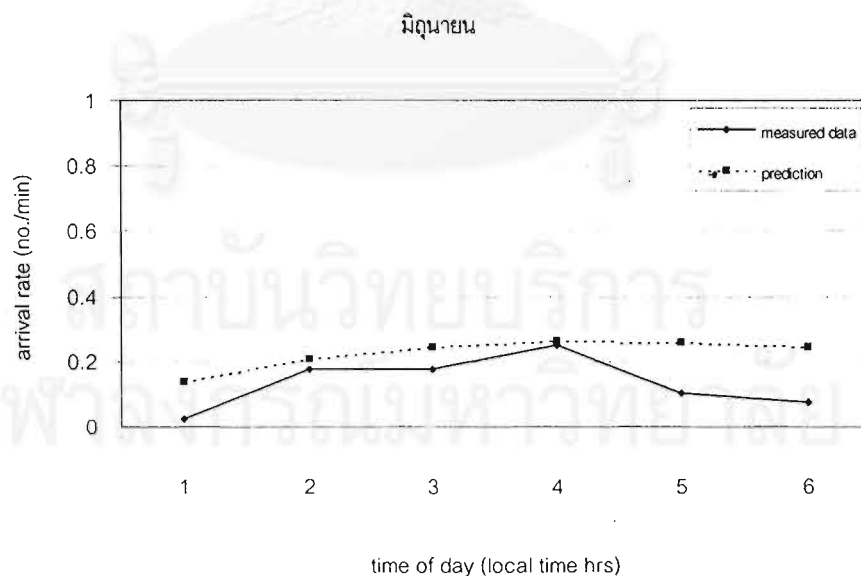
รูป 4.2 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วันของเดือนมีนาคม ของข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ยะลา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง (ข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ชุมพร [31])



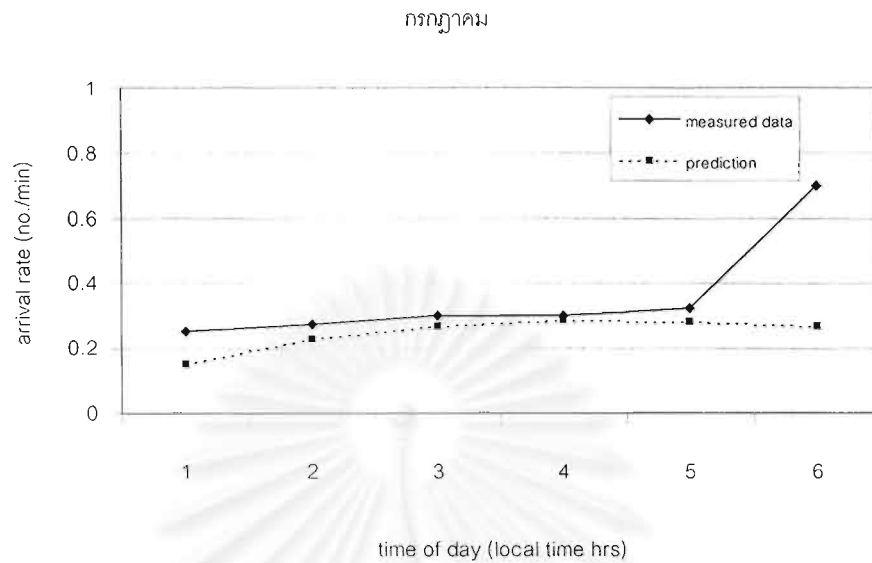
รูป 4.3 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วันของเดือนเมษายน ของข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ยะลา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง (ข่ายเชื่อม โยงกรุงเทพฯ - ชุมพร [31])



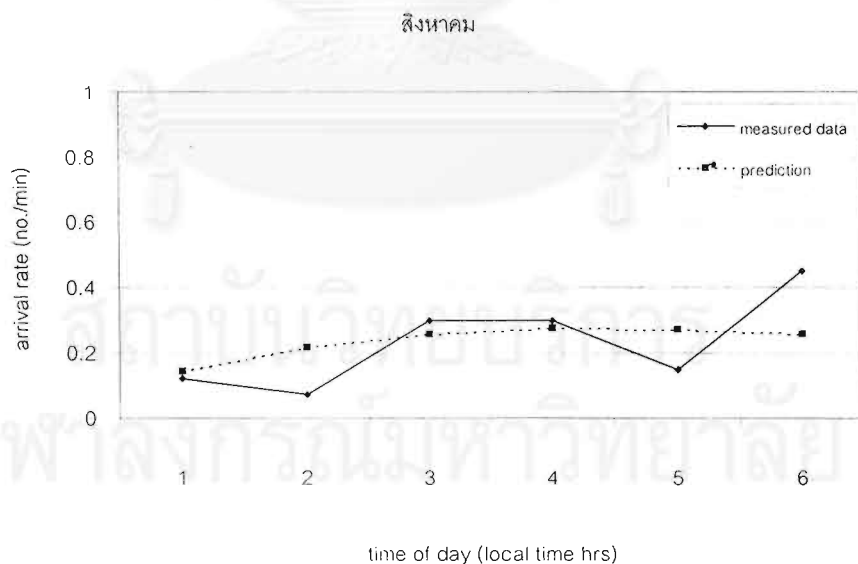
รูป 4.4 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วันของเดือนพฤษภาคม ของข่ายเชื่อมต่อโยงกรุงเทพฯ - ยะลา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมต่อโยงอ้างอิง (ข่ายเชื่อมต่อโยงกรุงเทพฯ - ชุมพร [31])



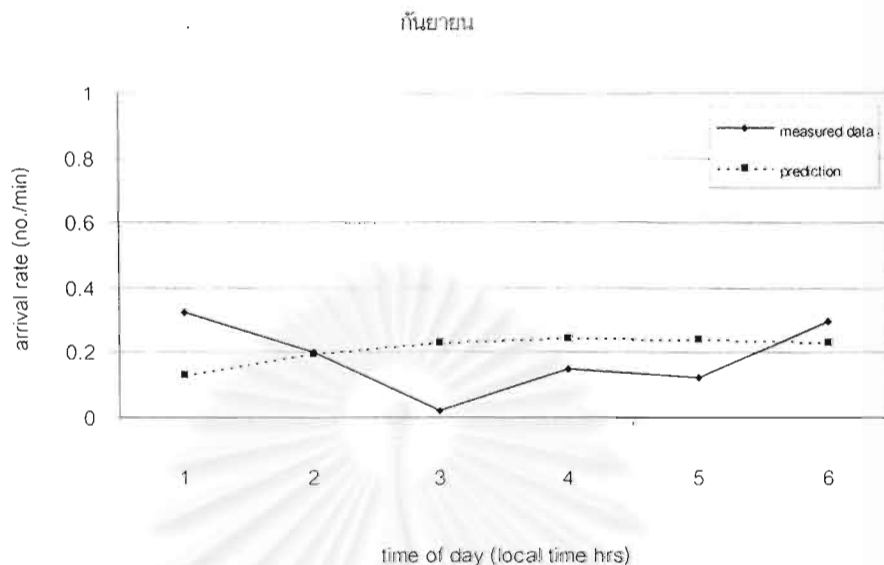
รูป 4.5 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วันของเดือนมิถุนายน ของข่ายเชื่อมต่อโยงกรุงเทพฯ - ยะลา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมต่อโยงอ้างอิง (ข่ายเชื่อมต่อโยงกรุงเทพฯ - ชุมพร [31])



รูป 4.6 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วันของเดือนกรกฎาคม ของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง (ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร [31])



รูป 4.7 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วันของเดือนสิงหาคม ของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง (ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร [31])



รูป 4.8 อัตราการมาถึงของรอยทางเดินที่ทำให้คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดิน มีระดับมากกว่า -112 dBm ในรอบ 1 วันของเดือนกันยายน ของข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ยะลา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากข่ายเชื่อมโยงอ้างอิง (ข่ายเชื่อมโยงกรุงเทพฯ – ชุมพร [31])

ตาราง 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายและผลการตรวจวัด ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2546 ถึงเดือนกันยายน 2546

เดือน	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
มีนาคม	0.80
เมษายน	0.93
พฤษภาคม	0.51
มิถุนายน	0.61
กรกฎาคม	0.33
สิงหาคม	0.52
กันยายน	-0.63



ต้นฉบับไม่มีหน้านี้

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการแพร่กระจายคลื่น โดยการศึกษาคลื่นวิทยุไปสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่น โดยอาศัยการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่ในธรรมชาติ การศึกษานี้หวังว่าจะได้แบบจำลองรอยทางเดินที่เหมาะสมเพื่อใช้ประโยชน์ในกิจการต่าง ๆ ได้ข้อสังเกตเชิงสถิติที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและจัดสร้างข่ายเชื่อมต่อโยงการสื่อสารผ่านดาวตกในบริเวณประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้านที่อยู่บริเวณละติจูดเดียวกันหรือใกล้เคียง ผลการศึกษาได้บทสรุปและข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุป

การศึกษานี้ทำโดยการจัดตั้งข่ายเชื่อมต่อโยงและทดลองส่งคลื่นวิทยุสะท้อนรอยทางเดินของดาวตก ข่ายเชื่อมต่อโยงที่จัดตั้งขึ้นมีสถานีส่งอยู่ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถานีรับอยู่ ณ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา ใช้กำลังส่ง 200 W และเครื่องรับที่มีความไวได้ถึง -130 dBm การทดลองส่งคลื่นวิทยุกระทำ ณ ปลายสัปดาห์ที่สามของเดือนมีนาคม 2547 ถึง เดือนกันยายน 2547 ผลการวิเคราะห์สัญญาณรับที่ได้จากการทดลองส่งคลื่นแสดงให้เห็นความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองรอยทางเดินชนิดทรงกระบอกเรียงซ้อน เนื่องจากผลการคำนวณรูปสัญญาณด้วยแบบจำลองนี้เทียบเคียงได้กับรูปสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดด้วยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณและผลการตรวจวัดที่สูงกว่า 0.80 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติชี้ให้เห็นว่ามีรอยทางเดินประเภทความหนาแน่นต่ำปรากฏมากพอสมควร คิดเป็นสัดส่วนระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำและรอยทางเดินความหนาแน่นสูงประมาณ 2:3

ผลจากการศึกษาตาม โครงการนี้เมื่อรวมกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ โดยผู้วิจัยทำให้สามารถสร้างแบบจำลองเพื่อประโยชน์ในการจัดตั้งข่ายเชื่อมต่อโยงการสื่อสารผ่านดาวตกได้ แบบจำลองที่ได้ยังคงไม่สมบูรณ์เพียงพอเนื่องจากจำนวนข้อมูลที่เกี่ยวข้องยังมีน้อยเกินไป ผลการทดสอบแบบจำลองในเบื้องต้นแสดงให้เห็นศักยภาพของแบบจำลองในการออกแบบข่ายเชื่อมต่อโยงการสื่อสารผ่านดาวตกได้อย่างน่าพอใจ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะทั้งในเชิงวิชาการและในแง่การให้ทุนอุดหนุนการวิจัยดังนี้

1. กำลังส่งที่ใช้ในการศึกษาเรื่องนี้ที่ผ่านมาค่อนข้างต่ำ จำเป็นต้องเพิ่มให้สูงขึ้นถึงระดับ 1 kW เป็นอย่างน้อยเพื่อให้สามารถติดตามการสะท้อนรอยทางเดินของดาวตกได้อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง
2. ควรพัฒนาระบบรับส่งคลื่นให้เป็นแบบอัตโนมัติเพื่อให้ดำเนินการทดลองได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนาน ซึ่งจะทำได้ข้อมูลเชิงสถิติที่มีความน่าเชื่อถือได้มากกว่า
3. การศึกษาในระยะต่อไปน่าจะมีการทดลองส่งข่าวสารด้วยกรรมวิธีกล้ำสัญญาณและกรรมวิธีเข้ารหัสลักษณะต่าง ๆ เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีไปสู่การพัฒนาระบบจริงสำหรับประเทศไทย
4. การให้ทุนอุดหนุนการวิจัยไม่ควรทำแบบกระเหม็ดกระแหม่งจนสร้างปัญหากับการทำงานของโครงการวิจัย โครงการวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสำหรับผู้ช่วยวิจัยเพียงหกเดือนทั้งที่ต้องการถึงสิบสองเดือน เพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของปรากฏการณ์ได้อย่างครบถ้วน งบประมาณที่จำกัดยังทำให้โครงการวิจัยนี้ต้องหาทางออกในการสร้างเครื่องส่งกำลังปานกลางเอง เป็นเหตุให้ต้องใช้เวลาปฏิบัติงานรองมากพอสมควร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยน่าจะแต่งตั้งคณะกรรมการพิจารณาให้ทุนอุดหนุนการวิจัยที่มีประสบการณ์ปฏิบัติงานวิจัยภาคสนามและมีความเข้าใจธรรมชาติการทำงานที่ต้องติดตามความเปลี่ยนแปลงของปรากฏการณ์เป็นระยะเวลายาวนานด้วย
5. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยคงต้องปรับปรุงการประเมินและติดตามความก้าวหน้าของโครงการวิจัย เนื่องจากผู้วิจัยไม่ทราบผลการประเมินรายงานความก้าวหน้า ทำให้ไม่มั่นใจเกี่ยวกับจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์และต้องเร่งทำให้เป็นรูปเล่มเมื่อใกล้ครบกำหนดส่ง จวบจนปัจจุบันผู้วิจัยได้ส่งร่างรายงานฉบับสมบูรณ์แล้วก็ยังมีได้รับผลการประเมินรายงานความก้าวหน้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] G. R. Sugar, "Radio Propagation by Reflection from Meteor Trails," *Proc. IEEE*, vol.52, no.2, pp. 116-136, Feb. 1964
- [2] I. A. Glover, "Meteor Burst Communications – I* Meteor Burst Propagation," *Electronics & Commun. Engineering Journal*, vol.34, pp. 185-192, Aug. 1991
- [3] R. S. Mawrey, "A Comparison between Predicted and Measured Annual Cycles of Meteors," *COMSIG 90 proc.*, pp. 32-37, 1990
- [4] M. W. Abel, "Meteor Burst Communications: Bits per Burst Performance Bounds," *IEEE Trans. Commun.*, vol.34, no.9, pp. 927-936, Sep. 1986
- [5] S. Davidovici, and E. G. Kanterakis, "Performance of a Meteor-Burst Communication System Using Packet Messages with Variable Data Rates," *IEEE Trans. Commun.*, vol.37, No.1, pp. 6-17, Jan. 1989
- [6] S. L. Miller, and L. B. Milstein, "A Comparison of Protocols for a Meteor-Burst Channel Based on a Time-Varying Channel Model," *IEEE Trans. Commun.*, vol.37, No.1, pp. 18-30, Jan. 1989
- [7] J. M. Jacobsmeyer, "Message Waiting Time Performance for Meteor-Burst Communication Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.37, No.7, pp. 677-684, Jul. 1989
- [8] C. W. Baum, and C. S. Wilkins, "Meteor Burst Communication," to appear in the *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, J. C. Webster, Ed.
- [9] D. L. Schilling, Ed., *Meteor Burst Communications: Theory and Practice*, John Wiley and Sons, NY, 1993
- [10] J. A. Weitzen, and W. T. Ralston, "Meteor Scatter: An Overview," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.36, no.12, pp. 1813-1818, Dec. 1988
- [11] S. Melville, "Observations on the Relative Importance of Different Trail Families in Meteor Burst Communication," *COMSIG90 Proc.*, pp. 26-31, 1990
- [12] J. A. Weitzen, E. Hibshoosh, and D. L. Schilling, "Some Observations on the Distributions of Amplitude and Duration of Underdense Meteor Trails and Its Application to Design of Meteor Scatter Protocols," *Military Communications Conference*, 1988, pp. 571-576

- [13] J. A. Weitzen, *et al.* "Distributions of Underdense Meteor Trail Amplitudes and Application to Meteor Scatter Communication System Design," *Computers and Communications, Conference Proceedings, Ninth Annual International Phoenix Conference*, pp. 237-240, 21-23 March 1990
- [14] J. A. Weitzen, "Communicating via Meteor Burst at Short Ranges," *IEEE Trans. Commun.*, vol.35, No.11, pp. 1217-1221, Nov. 1987
- [15] C. Marriott, V. Oduoi, A. Ghosh, and B. Taylor, "Meteor Burst in The Post 2000 Era," *Military Communications Conference*, 1990, pp. 359-363
- [16] J. A. Hoff, "The utility of meteor burst communications," *Military Communications Conference*, 1988, pp. 565 -570
- [17] S. W. Melville, and D. D. Fraser, "Meteor-burst communications: the state of the science," *Proceedings of the 1992 South African Symposium on Communications and Signal Processing*, 1992, pp. 227 -232
- [18] D. Anantakul and C. Waiyapattanakorn, "The Throughput Performance of Meteor Burst Link using the Derived PDF of the Decay Constant," 4th INTERNATIONAL WIRELESS AND TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM/EXHIBITION, 15-19 May 2000, Sheraton Subang Hotel, Subang Jaya, Malaysia, pp. 147-150.
- [19] Dheerasak Anantakul and Chatchai Waiyapattanakorn, "On Meteor Scatter Experiment using Low Transmitting Power," 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, 21-25 August, 2000, Fukuoka, Japan, pp. 1031 – 1034.
- [20] M. Nagasawa, K. Mukumoto, and A. Fukuda, "Analysis of data collection system via meteor burst channel," *IEICE Trans.*, vol.J79-B-I, no. 6, pp. 424-435, June 1996.
- [21] Dheerasak Anantakul and Chatchai Waiyapattanakorn, "Investigation of oblique scattering of radio wave from a meteor trail," *IEICE Trans. Communications.*, vol. EB 85-B, no. 9, pp. 1774-1786, SEPTEMBER 2002.
- [22] Schanker, J. Z., *Meteor burst communications*, Artech House, Norwood MA, 1990.
- [23] Mawrey, R. S., and Weitzen, J. A., "Measured performance of meteor burst systems using antenna beam steering," *IEEE Trans. Communications*, vol.43, pp.1467-1476, 1995.

- [24] Abou-Zeid S., El-Sherbini A, and El-Soudani M. "Meteor burst data communication for the Nile River irrigation system," Proc. Integrating Research, Industry and Education in Energy and Communication Engineering (MELECON '89), pp. 644 –648, 1989.
- [25] Manning, L. A., and Eshleman, V. R., "Meteors in the ionosphere," Proc. IRE., vol. 46, pp. 186-199, 1958.
- [26] McKinley, D. W. R., "Meteor science and engineering," McGraw-Hill, New York, 1961.
- [27] Poulter, E. M., and Baggaley, W. J., "The application of radio-wave scattering theory to radio-meteor observations," Planet Space Sci., vol. 26, pp. 969-977, 1978.
- [28] Eshleman, V. R., "Theory of radio reflections from electron-ion clouds," IRE Trans, AP. 3, pp. 32-39, 1955
- [29] Manning, L. A., "Oblique echoes from over-dense meteor trails," J. Atmos. Terr. Phys., vol. 14, pp. 82-93, 1959.
- [30] Weitzen, J. A., "Predicting the arrival of meteors useful for meteor burst communication," Radio Sci., vol. 21, pp. 1009-1020, 1986
- [31] ชีรศักดิ์ อนันตกุล. แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยการกระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกในย่านละติจูดต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2544.

ภาคผนวก ก
 สัดส่วนระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำกับรอยทางเดินความหนาแน่นสูง
 ในช่วงเดือน มีนาคม ถึง กันยายน

ตาราง ก 1. สัดส่วนระหว่างรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำกับรอยทางเดินความหนาแน่นสูง

เดือน	UD	OD	UD : OD
มี.ค.	30	36	0.83 : 1
เม.ย.	13	23	0.57 : 1
พ.ค.	22	38	0.58 : 1
มิ.ย.	10	22	0.45 : 1
ก.ค.	35	51	0.69 : 1
ส.ค.	27	29	0.93 : 1
ก.ย.	19	26	0.73 : 1
รวม	156	225	0.69 : 1

ความน่าจะเป็นในการเกิดรอยทางเดินความหนาแน่นต่ำเท่ากับ

$$P(UD) = \frac{156}{381} = 0.41$$

ความน่าจะเป็นในการเกิดรอยทางเดินความหนาแน่นสูงเท่ากับ

$$P(OD) = \frac{225}{381} = 0.59$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุที่ใช้ในการทดลองตรวจวัด คลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตก

รายการอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กระเจิงจากรอยทางเดินของดาวตกแสดงแยกเป็นรายการอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ ยกเว้นสายอากาศที่ใช้ในการทดลองจะแยกแสดงเป็นรายการสุดท้ายเนื่องจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีลักษณะสมบัติเหมือนกัน รายการอุปกรณ์ภาคความถี่วิทยุทั้งหมดมีดังนี้

1. อุปกรณ์ภาคส่ง

1.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.1



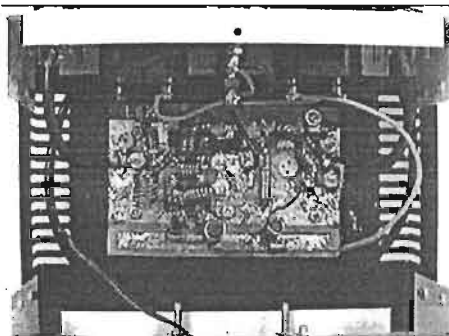
รูป ข.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

ข้อมูลเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

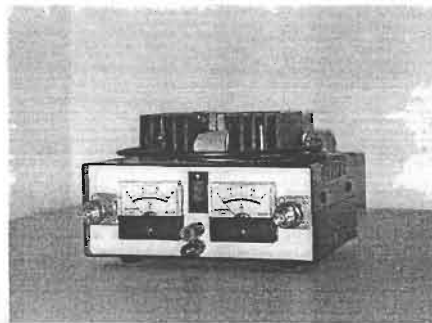
- | | |
|----------------------------|----------------------|
| ก. ตราอักษร | : Hewlett Packard |
| รุ่น | : 8648C |
| ข. ความถี่ | : 100 kHz – 3200 MHz |
| ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง | : 45.55 MHz |
| ค. กำลังขาออกสูงสุด | : 20 mW (13 dBm) |
| กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง | : 10 mW (10 dBm) |

1.2 วงจรขยายกำลังต่ำ

วงจรขยายกำลังต่ำที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.2



ก. ลักษณะของวงจร



ข. วงจรที่บรรจุลงในกล่องแล้ว

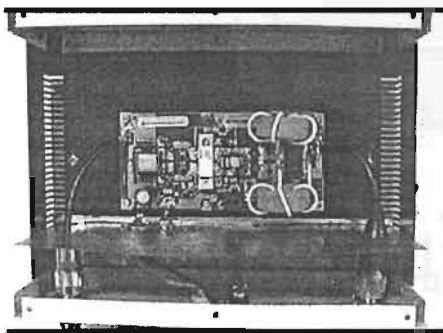
รูป ข.2 วงจรขยายกำลังต่ำ

ข้อมูลวงจรขยายกำลังต่ำที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

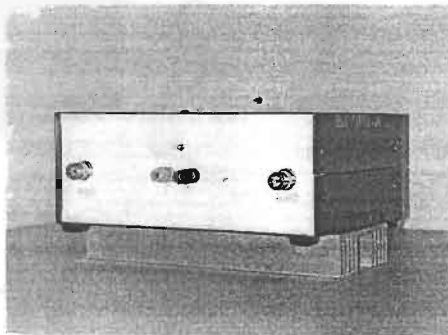
- | | |
|----------------------------|-----------------------|
| ก. ทรานซิสเตอร์ตราอักษร | : Mitsubishi |
| หมายเลข | : 2SC2053 และ 2SC1947 |
| ข. ความต้องการกำลังขาเข้า | : 10 mW (10 dBm) |
| ค. กำลังขาออกสูงสุด | : 2 W (33 dBm) |
| กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง | : 2 W (33 dBm) |

1.3 วงจรขยายกำลังสูง

วงจรขยายกำลังสูงใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.3



ก. ลักษณะของวงจร



ข. วงจรที่บรรจุลงในกล่องแล้ว

รูป ข.3 วงจรขยายกำลังสูง

ข้อมูลวงจรขยายกำลังสูงใช้ในการทดลองมีดังนี้

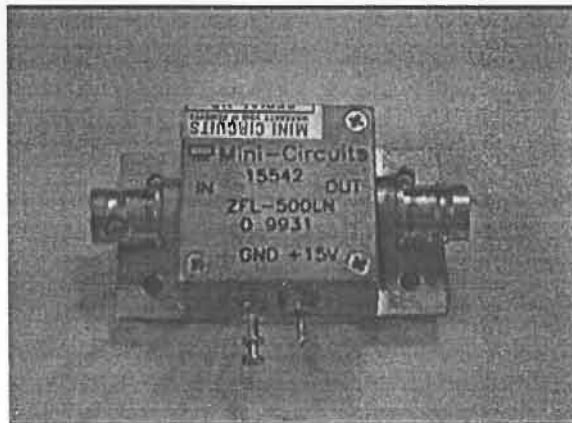
- | | |
|---------------------------|----------------|
| ก. ทรานซิสเตอร์ | : RF Gain |
| รุ่น | : IS300 - 1050 |
| ข. ความต้องการกำลังขาเข้า | : 2 W |

- ค. กำลังขาออกสูงสุด : 300 W
กำลังขาออกที่ใช้ในการทดลอง : 200 W

2. อุปกรณ์ภาครับ

2.1 วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ

วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป ข.4



รูป ข.4 วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ

ข้อมูลวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- 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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย