รายงานการวิจัย

การวัดช่องสัญญาณแบบไร้สายขณะมียานพาหนะผ่าน โดยที่เครื่องส่งติดตั้งบนพื้นถนน

WIRELESS CHANNEL SOUNDER THAT VEHICLE RUN WHERE TRANSMITTERS ON THE ROAD SURFACE

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รายงานการวิจัย

การวัดช่องสัญญาณแบบไร้สายขณะมียานพาหนะผ่าน โดยที่เครื่องส่งติดตั้งบนพื้นถนน
WIRELESS CHANNEL SOUNDER WHERE TRANSMITTERS ON THE ROAD SURFACE

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และขอขอบคุณ ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษา ให้ข้อมูล และให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม MATLAB และคุณ ประพล จาระตะคุ วิศวกรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ รวมทั้งช่วยทำการทดสอบงานวิจัยครั้งนี้ด้วย

ชาญชัย ทองโสภา

มีนาคม 2553

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งและสามารถทำให้ได้รับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบปริมาณรถ อาทิเช่น การตรวจสอบปริมาณความหนาแน่นการจราจรบนท้องถนน สำหรับระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นมีส่วนประกอบหลักในการสื่อสารซึ่งประกอบด้วย ตัวตรวจจับ สถานีแม่ข่าย และสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น โดยงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการศึกษาจากสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นบนท้องถนน โดยตัวตรวจจับจะถูกติดตั้งและทำหน้าส่งสัญญาณข้อมูลไปยังสถานีแม่ข่าย ซึ่งสัญญาณข้อมูลที่ส่งออกมาผ่านสภาพแวดล้อมบนท้องถนนทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น ทำให้สัญญาณข้อมูลที่รับได้เกิดการลดทอนลงอย่างมาก ดังนั้น ข้อมูลทางสถิติของสัญญาณข้อมูลที่ได้มาจากองค์ประกอบของสัญญาณหลายทิศทางจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อนำไปใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องรับ ซึ่งสถิติของสัญญาณข้อมูลที่รับได้ จะขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของตัวกระจายคลื่นบนท้องถนน เนื่องจากเหตุนี้ การเข้าใจถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากการวัดในสภาพแวดล้อมแบบภายนอกนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางและสัญญาณที่รับได้ แต่งานวิจัยนี้ ระยะทางที่ใช้วัดช่องสัญญาณระหว่างชุดเครื่องรับและชุดเครื่องส่งมีระยะทางที่สั้น ดังนั้นจึงไม่ขึ้นกับระยะทาง แต่จะขึ้นกับขนาดของสัญญาณที่รับได้ โดยจะทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ในรูปแบบของความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณ และค่าที่ได้นี้จะนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบระบบการรับส่งสัญญาณให้ได้ข้อมูลข่าวสารที่ดีที่สุดในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน อย่างเช่น รูปแบบระบบการรับสัญญาณด้วยวิธีการไดเวอร์ซิตี้ (Diversity) หรือในรูปแบบของ Multiple Input Multiple output (MIMO) เป็นต้น เพื่อจะนำไปใช้สำหรับการพัฒนาชุดรับสัญญาณในระบบตรวจสอบปริมาณรถยนต์ รถจักรยานยนต์ในลานจอดหรือระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

Abstract

Current wireless sensor network has been widespread interest. With easy to install and can get information is changing. This can be applied for monitoring volume vehicles such as monitoring the amount of traffic congestion on the road. For wireless sensor network is a main component of communication. That including the detection station and server station. The research will study the environment that caused the propagation on the road. The sensor will be installed and transmitted data to the server station. The data signal output through the environment on the road causing the propagation. Signal data has been made to reduce the dramatically. So statistics of the signal data derived from components propagation of various signal direction is want. Used to improve the properties of the receiver. The statistics of the received data signal depends on component of the wave scattered on the road. As a result, To understand the properties of propagation is necessary. This research past, most measurements in the outdoor environment will depend on distance and signal received. But this research. Distance measure channel between receiver and transmitter set a short distance. Therefore not based on distance. But depends on the amplitude of the signal received. By analyzing the signal received in the form of the probability of signal strength. This values that will be analyzed to design a system for transmitting information to get the best environments on the road, such as Diversity or Multiple Input Multiple output (MIMO), etc. to be used for development set in the receiver volume vehicle monitoring systems or wireless sensor networks related to vehicles

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .... ก
บทคัดย่อภาษาไทย .... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ค
สารบัญ .... ง
สารบัญรูป .... ช
บทที่
1 บทนำ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.6 ปริทัศน์วรรณกรรม 3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุและสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันสำหรับใช้ในการทดลอง
2.1 กล่าวนำ 5
2.2 ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ 5
2.2.1 การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง 6
2.2.2 การแพร่กระจายคลื่นพื้นฐาน 7
2.2.3 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุ 8
2.2.4 ทฤษฎีสายอากาศ 17
2.3 ทฤษฎีของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน 25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ทฤษฎีของความน่าจะเป็น 30
2.4.1 ความหมายความของตัวแปรสุ่มและสัญญาณสุ่ม 30
2.4.2 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง 30
2.4.3 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็น 32
2.4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม 33
2.4.5 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานและแวเรียนซ์ 35
2.4.6 ฟังก์ชันการกระจายสะสมเติมเต็ม 36
2.5 สรุป 38
3 การออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันและเหตุการณ์ของการทดลองวัด
3.1 กล่าวนำ 39
3.2 ระบบการวัดและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด 39
3.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปย่าน 2.45 GHz 42
3.4 เหตุการณ์ของการวัด 47
3.4.1 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน 47
3.4.2 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่บนถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน 48
3.5 สรุป 51
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน
4.1 กล่าวนำ 52
4.2 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน 52
4.3 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่ที่พื้นถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน 56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 56
4.3.2 ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว วางห่างเท่ากับความยาวตัวรถ 5.30 เมตร 74
4.4 สรุป 92
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 93
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 95
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต 95
รายการอ้างอิง 97
ภาคผนวก 99
ประวัติผู้เขียน 104

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การสื่อสารไร้สาย 6
2.1 การสะท้อนจากพื้นดิน 7
2.3 ผลกระทบของสายอากาศที่เกิดขึ้นจากความสูงที่ต่างกัน 8
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับแบบจำลอง nth และตัวคูณ path loss ที่แตกต่างกัน 10
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน 12
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่มีผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน 13
2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางของสองความถี่ 14
2.8 ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม 19
2.9 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพตช์ 20
2.10 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก 22
2.11 ตัวอย่างของรูปแบบสัญญาณ AM, FM และ PM 26
2.12 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ PSK 28
2.13 Constellation Diagram ของการมอดูเลตแบบ PSK ชนิด Binary PSK 29
2.14 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ PSK สูง 29
2.15 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่อง 32
2.16 ตัวอย่างของ PDF 33
2.17 กราฟเส้นโค้ง CCDF 37
2.18 การคำนวณกราฟเส้นโค้ง CCDF 38
3.1 เครื่องส่ง Agilent signal generator model E4433B 40
3.2 เครื่องรับ Agilent N9020A MXA signal analyzer 40
3.3 IQ Modulation 41
3.4 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยม 44
3.5 รูปถ่ายสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยม 44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz 45
3.7 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz. 46
3.8 แบบจำลองการวัดที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน 47
3.9 การวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน 48
3.10 แบบจำลองการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่บนถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน 48
3.11 แบบจำลองการวัดบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะ $\lambda/2$ 49
3.12 การวัดจริงบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะ $\lambda/2$ 49
3.13 การวางสายอากาศสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะห่าง $\lambda/2$ 50
3.14 แบบจำลองการวัดบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะเท่าตัวรถ 50
3.15 การวัดจริงบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะเท่าตัวรถ 51
4.1 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถจักรยานยนต์ผ่าน 53
4.2 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถยนต์ผ่าน 53
4.3 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ 54
4.4 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถยนต์วิ่งสวนกับรถยนต์ 54
4.5 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของรถชนิดต่าง ๆ 55
4.6 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของรถชนิดต่าง ๆ 55
4.7 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 56
4.8 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 57
4.9 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.10 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 58
4.11 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 59
4.12 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 59
4.13 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 60
4.14 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 61
4.15 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 61
4.16 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 62
4.17 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDFของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 63
4.18 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 63
4.19 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 64
4.20 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 65
4.21 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 65
4.22 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.23 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 67

4.24 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 67

4.25 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 68

4.26 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 69

4.27 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 69

4.28 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 70

4.29 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 71

4.30 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 71

4.31 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 72

4.32 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 73

4.33 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน 73

4.34 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 74

4.35 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.36 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 75
4.37 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 76
4.38 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 77
4.39 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 77
4.40 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 78
4.41 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 79
4.42 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 79
4.43 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 80
4.44 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 81
4.45 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 81
4.46 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 82
4.47 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 83
4.48 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.49 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 84
4.50 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 85
4.51 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 85
4.52 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 86
4.53 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 87
4.54 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 87
4.55 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 88
4.56 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 89
4.57 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 89
4.58 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 90
4.59 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 91
4.60 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ 91

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวัดการแพร่กระจายของช่องสัญญาณไร้สายได้มีการวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการวิจัยเพื่อนำไปใช้ในระบบโทรศัพท์มือถือหรือระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) โดยงานวิจัยต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ใช้ อย่างเช่น คุณลักษณะของเครื่องส่ง คุณลักษณะของเครื่องรับ สภาพแวดล้อมของการวิจัย ซึ่งผลที่ได้ออกมาจะนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ หรือกำหนดรูปแบบการสื่อสารต่าง ๆ สภาพแวดล้อมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดช่องสัญญาณไร้สาย [1],[2] จะมีสภาพแวดล้อมหลายแบบด้วยกัน อย่างเช่น ภายในอาคาร สำนักงาน หรือโรงเรือน (Indoor) [3] ภายนอกอาคาร (Outdoor) [4] เป็นต้น แต่ในการวิจัยนี้เราสนใจสภาพแวดล้อมที่เป็นสภาพบนท้องถนนที่มีรถยนต์วิ่งผ่านไปมา โดยสภาพแวดล้อมบนท้องถนน จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากรถยนต์ที่วิ่งผ่านอีกทั้งปริมาณรถยนต์และความเร็วของรถยนต์ ทำให้ช่องสัญญาณที่ต้องวัดเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาด้วยเช่นกัน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากการวัดในสภาพแวดล้อมแบบภายนอกนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางและสัญญาณที่รับได้ แต่งานวิจัยนี้ ระยะทางที่ใช้วัดช่องสัญญาณระหว่างชุดเครื่องรับและชุดเครื่องส่งมีระยะทางที่สั้น ดังนั้นจึงไม่ขึ้นกับระยะทาง แต่จะขึ้นกับขนาดของสัญญาณที่รับได้ โดยจะทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ในรูปแบบของขนาดและเฟสที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และค่าที่ได้นี้จะนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบระบบการรับส่งสัญญาณให้ได้ข้อมูลข่าวสารที่ดีที่สุดในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน อย่างเช่น รูปแบบระบบการรับสัญญาณด้วยวิธีการไดเวอร์ซิตี้ (Diversity) [5] หรือในรูปแบบของ Multiple Input Multiple output (MIMO) [6] เป็นต้น เพื่อจะนำไปสู่การออกแบบระบบการควบคุมการจราจรแบบอัตโนมัติหรือระบบการควบคุมรถยนต์แบบอัจฉริยะในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษารูปการของแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการและคุณสมบัติของการมอดูเลตแบบดิจิตอล

1.2.3 เพื่อศึกษาระบบการรับส่งสัญญาณดิจิตอล

1.2.4 เพื่อศึกษาออกแบบวงจรรับส่งสัญญาณดิจิตอลและวิเคราะห์สัญญาณที่แพร่กระจายบนท้องถนน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK และวิเคราะห์ข้อมูลที่สำคัญทางสถิติการรับส่งสัญญาณของช่องสัญญาณไร้สายในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน

1.3.2 วัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 แนวทางการดำเนินงาน

1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
2) ศึกษาวิธีการมอดูเลตแบบดิจิตอล
3) ศึกษาวิธีการและคุณสมบติการรับส่งสัญญาณข้อมูล
4) ทดลองการรับส่งสัญญาณ โดยอุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งสัญญาณ
5) ทำการทดลองวัดค่าของช่องสัญญาณจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนน วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

1.4.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2) ศึกษาวิธีการและคุณสมบติการรับส่งสัญญาณข้อมูล
3) ติดตั้งเครื่องรับและเครื่องส่งทดลองการรับส่งสัญญาณ
4) ทำการวัดค่าของช่องสัญญาณจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนนและวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

1.4.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 (F4) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

1.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personnel Computer)
2) โปรแกรมเฉพาะทางวิศวกรรม MATLAB

3) อุปกรณ์รับสัญญาณและส่งสัญญาณไร้สาย
4) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer)
5) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม(Spectrum Analyzer)
6) เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่(Signal Generator)

1.4.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2) เก็บรวบรวมผลจากการทำการทดลองวัดค่าของช่องสัญญาณจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนนมา วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบต่าง ๆ และการรับส่งสัญญาณไร้สาย ที่ใช้การมอดูเลตแบบดิจิตอล จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีเฉพาะทางวิศวกรรม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ค่าการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณไร้สายจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนน

1.5.2 ได้ข้อมูลที่สำคัญทางสถิติการรับส่งสัญญาณของช่องสัญญาณไร้สายตามสภาพแวดล้อมการจราจรบนท้องถนนที่มีรถยนต์วิ่งผ่านไปมาตลอดเวลา

1.6 ปริทัศน์วรรณกรรม

ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและอาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเตอร์เน็ท จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นและการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่น

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับการการแพร่กระจายคลื่นงาน โดยงานวิจัยในส่วนของการแพร่กระจายคลื่นนี้ถือเป็นการวิจัยพื้นฐานที่สำคัญมากสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการการกระจายคลื่น ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญในการค้นหาช่องสัญญาณ

เนื่องจากเป็นการแพร่กระจายคลื่นของระบบสื่อสารไร้สาย และการรับส่งสัญญาณของระบบจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับการแพร่กระจายของคลื่นด้วยส่วนหนึ่ง โดยเฉพาะการแพร่กระจายคลื่นในสถานที่ต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร การแพร่กระจายคลื่นได้เป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยในช่วงที่ผ่านมา [7]-[10] โดยงานวิจัยของ Saleh and Valenzuela (1987) และ Seidel and Rappaport (1992) เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคาร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นในอาคารนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางและสภาพแวดล้อมของภายในอาคารรวมถึงพื้นของแต่ละชั้นของอาคารด้วย ซึ่งค่าของสัญญาณจะเปลี่ยนไปตามสิ่งกีดขวางต่าง ๆ และงานวิจัยของ Hata (1980) Ichitsubo, Furuno, Taga and Ryoji (2000) เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นภายนอกอาคาร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นนอกอาคารนั้นการแพร่กระจายคลื่นจะขึ้นอยู่กับระยะทาง ความสูงของสายอากาศรวมถึงสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาด้วย ส่วนงานวิจัยของ Phaiboon (2005) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับลานจอดรถภายในอาคาร โดยสัญญาณที่แพร่กระจายไปจะผ่านสภาพแวดล้อมที่มีรถยนต์จอดอยู่ ทำให้สัญญาณเกิดการลดทอนลง ดังนั้นการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นที่ผ่านมาจะเป็นการศึกษาเพื่อดูช่องสัญญาณ ที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาพแวดล้อม

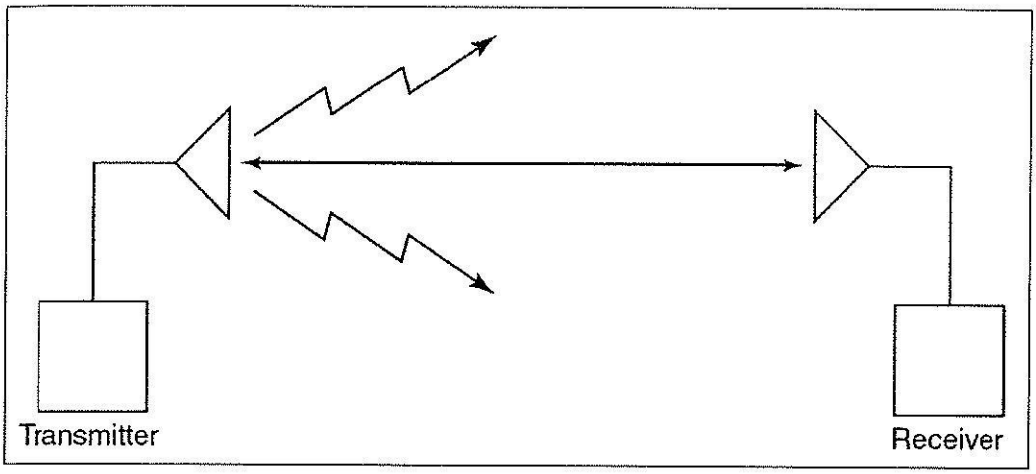
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุและสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันสำหรับใช้ในการทดลอง

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันมีระบบการสื่อสารอยู่หลายประเภท โดยมีการใช้สัญญาณในการส่งหลายแบบ และหนึ่งในนั้นก็คือสัญญาณวิทยุ ซึ่งมีการใช้อยู่อย่างมากมายในหลายงาน ซึ่งในระบบการสื่อสารสัญญาณวิทยุย่อมมีผลกระทบจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการของการแพร่กระจายคลื่น เพื่อให้สามารถวิจัยและประยุกต์พัฒนาประสิทธิภาพของระบบสื่อสารให้ดีขึ้นโดยในทฤษฎีของการแพร่กระจายคลื่นจะมีเรื่องของผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุซึ่งประกอบไปด้วยหลักการต่าง ๆ ตลอดจนผลกระทบหลักที่เกิดขึ้น และแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้มีการทำวิจัยกันมา ทฤษฎีของสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วยหลักการของโมโนโพลและไดโพล ซึ่งใช้ในการรับส่งสัญญาณ รวมถึงความเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่น ทฤษฎีของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลตชันแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณข้อมูล และทฤษฎีของความน่าจะเป็น ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณสัญญาณที่รับได้

2.2 ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ

ช่องทางการสื่อสารชนิดสัญญาณวิทยุประกอบด้วย ภาคส่งที่ทำการส่งสัญญาณผ่านสายอากาศภาคส่งและภาครับทำการรับสัญญาณผ่านสายอากาศภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นสัญญาณวิทยุแพร่ออกมาจากภาคส่งโดยสัญญาณจะแพร่กระจายผ่านตัวกลางมาถึงสายอากาศภาครับ คุณลักษณะของสายอากาศ ตัวกลางและปัจจัยอื่น ๆ โดยจะอธิบายในส่วนต่อมา ซึ่งมีผลกระทบส่วนใหญ่ต่อพลังงานที่แพร่ออกมาถึงภาครับ



รูปที่ 2.1 การสื่อสารไร้สาย

Path loss (หรือ Path attenuation) คือคำนิยามทั่วไปที่บอกถึงการลดลงของความหนาแน่นกำลังงาน (การลดทอน) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแพร่กระจายผ่านพื้นที่ว่าง และสิ่งที่สนใจก็คือความแรงสัญญาณที่รับ โดยจะเป็นประโยชน์เพื่อแสดงระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ

การเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสามารถสรุปได้ว่าเป็นการแทรกสอดของสัญญาณจากหลายทิศทางที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลของเฟดดิ้งทางเวลา ความถี่อิสระและการกระทบต่ออัตราขยายของช่องสัญญาณ โดยพื้นที่ของสัญญาณวิทยุเกิดการรบกวนเพราะปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่น

2.2.1 การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง

ในอากาศว่างนั้น คลื่นสัญญาณวิทยุจะแพร่กระจายเป็นวงกว้างจากจุดกำเนิด โดยอัตราส่วนของกำลังรับ $P_{r,fs}$ ต่อกำลังส่ง $P_{t,fs}$ แสดงในสมการที่ (2.1) คือฟังก์ชันลดลงซึ่งเป็นผลคูณกำลังของการผกผันของระยะทาง d ระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยความยาวคลื่นของความถี่การส่งสัญญาณแทนด้วย λ

$$\frac{P_{r,fs}}{P_{t,fs}}(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \tag{2.1}$$

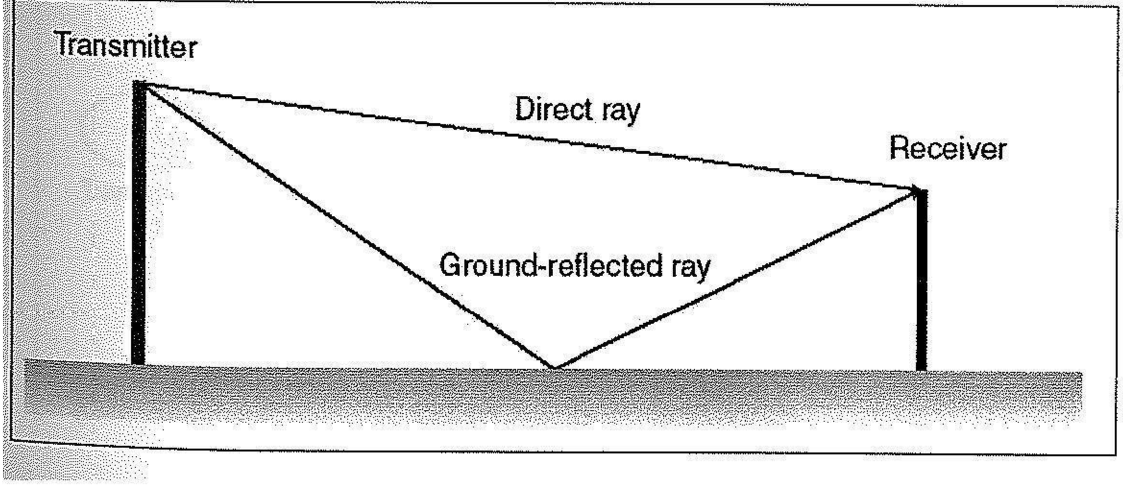
2.2.2 การแพร่กระจายคลื่นพื้นฐาน

การสะท้อน การเลี้ยวเบน และการกระเจิง คือการแพร่กระจายคลื่นพื้นฐานสามแบบ ซึ่งกระทบการแพร่กระจายคลื่นในระบบการสื่อสาร กำลังรับคือพารามิเตอร์สำคัญโดยทั่วไป ที่จะใช้ทำนายด้วยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบ Large – scale โดยบนพื้นฐานทางกายภาพของการสะท้อน การเลี้ยวและการกระเจิง ส่วนการเฟดดิ้งแบบ small-scale และการแพร่จายคลื่นใน multipath จะอธิบายโดยคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นฐานการแพร่กระจายคลื่นสามแบบ

การสะท้อน เกิดขึ้นเมื่อการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบบนวัตถุซึ่งมีขนาดที่ใหญ่มากเมื่อเปรียบกับความยาวคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น การสะท้อนเกิดขึ้นจากพื้นผิวของโลกและจากสิ่งก่อสร้างและกำแพง ดังรูปที่ 2.2

การเลี้ยวเบน เกิดขึ้นเมื่อเส้นทางสัญญาณวิทยุระหว่างภาคส่งและภาครับถูกกีดขวางโดยพื้นผิวที่เป็นขอบมุมที่หัก ผลจากคลื่นอันดับที่สองจากพื้นผิวสิ่งกีดขวางแสดงการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ หลังสิ่งก่อสร้างทำให้เกิดการเลี้ยวของคลื่นรอบสิ่งกีดขวาง เมื่อไม่ได้เกิดเส้นทาง Line-of-Sight (LOS) ระหว่างภาคส่งและภาครับ ที่ความถี่สูง การเลี้ยวเบนจะคล้ายการสะท้อนขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเลขาคณิต เช่นเดียวกับขนาด เฟส โพลาไลซ์ของคลื่นที่ตกกระทบที่จุดของการเลี้ยวเบน

การกระเจิง เกิดขึ้นเมื่อตัวกลางที่ผ่านซึ่งคลื่นที่เดินทางประกอบด้วยวัตถุที่มีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่น และที่จำนวนของสิ่งกีดขวางต่อค่าหนึ่งหน่วยมีค่ามาก การกระเจิงของคลื่นถูกสร้างจากพื้นผิวที่ขรุขระ วัตถุเล็ก ๆ หรือโดยความไม่สม่ำเสมออื่นในช่องสัญญาณ ตัวอย่างเช่น ใบไม้ ป้ายสัญญาณการจราจร และหลอดไฟ ก็สามารถทำให้เกิดการกระเจิงในระบบการสื่อสารได้

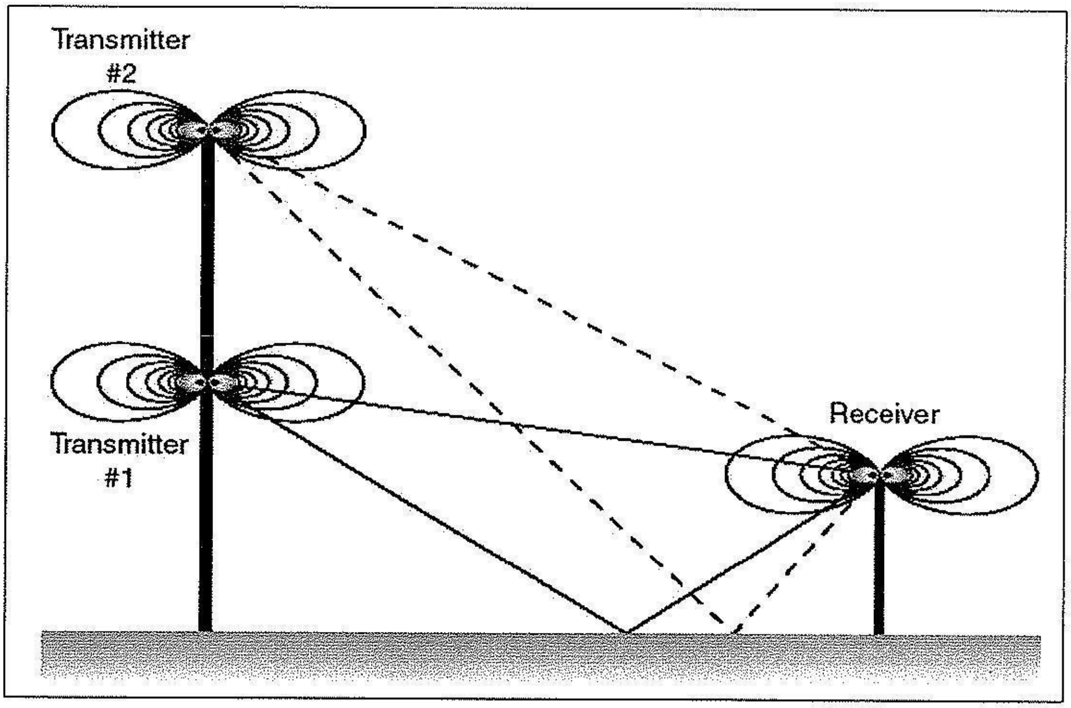


รูปที่ 2.2 การสะท้อนจากพื้นดิน

2.2.3 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุ

ผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุนั้นจะแสดงให้เห็นในสองแบบที่แตกต่างกัน โดยแบบแรกคือ Large Scale Fading ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับผลกระทบเมื่อระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับเปลี่ยนแปลงไปเป็นสิ่งสำคัญ เช่น มากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น และแบบที่สองคือ Small Scale Fading ซึ่งเกี่ยวกับผลกระทบเมื่อระยะทางเปลี่ยนแปลงภายในหนึ่งความยาวคลื่น ทั้งสายอากาศและการแพร่กระจายคลื่นรวมกันเป็นส่วนหนึ่งในการอธิบายผลกระทบของทั้งสองแบบ

นอกจากความแตกต่างแล้ว แบบจำลองสามารถอธิบายผลของการแพร่กระจายคลื่นโดยจะหาได้จากแบบจำลองของการสังเกตซึ่งเกี่ยวกับข้อมูลทางสถิติของลักษณะของสัญญาณที่รับ และแบบจำลองของสถานที่เฉพาะที่ทำการรวมการอธิบายทางสภาพทางกายภาพ เช่น รูปทรงเลขาคณิตของสถานที่ โดยความแตกต่างของทั้งสองแบบจำลองนั้นแบบจำลองของการสังเกตโดยปกติจะง่ายต่อการใช้ต่อสภาพแวดล้อม ส่วนแบบจำลองของสถานที่เฉพาะจะมีความถูกต้องแม่นยำและการคำนวณที่ถูกต้องกว่า โดยเมื่อใช้แบบจำลองของการสังเกต การขาดความรู้ของระบบไม่สามารถเพิ่มเติมด้วยการกระจายแบบ Stochastic ได้ ซึ่งความต้องการสำหรับแบบจำลองจะต้องเป็นปัจจุบันเสมอเมื่อใช้แบบจำลองทางสถิติ



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของสายอากาศที่เกิดขึ้นจากความสูงที่ต่างกัน

- Large Scale Fading

ข้อสมมุติหลักสำหรับเหตุการณ์ของ Large Scale Fading ซึ่งบ่อยครั้งจะใช้กับรูปแบบของ macrocell ซึ่งมีระยะทางหลายสิบกิโลระหว่างตัวส่งและตัวรับ ด้วยเหตุนี้บ่อยครั้งจะไม่มีผลของสภาพของ LOS โดยชนิดของเฟดดิ้งนี้จะกำหนดการเคลื่อนที่บนพื้นที่ขนาดใหญ่ซึ่งมีผลปรากฏกับการลดทอนสัญญาณต่อระยะทางที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น สถิติของชนิดของเฟดดิ้งแบบนี้จะถูกคำนวณด้วยการประมาณค่าของ path loss ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางและมักจะใช้อธิบายด้วย path loss เฉลี่ย (nth-power law) และการกระจายแบบ log-normal เกี่ยวกับความหมายของแบบจำลอง Large Scale Fading คือแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายนอกอาคารเป็นหลัก โดยในเหตุการณ์เหล่านี้จะใช้กำลังส่งหลายสิบวัตต์ ซึ่งสายอากาศจะสูงเพื่อกระจายสัญญาณและการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณหลักจะเกิดโดยเฉลี่ยระหว่างการเลี้ยวเบนและการสะท้อน สำหรับขนาดของพื้นที่นี้ องค์ประกอบของการหักเห จะมีความสำคัญเหมือนกัน

- Small Scale Fading

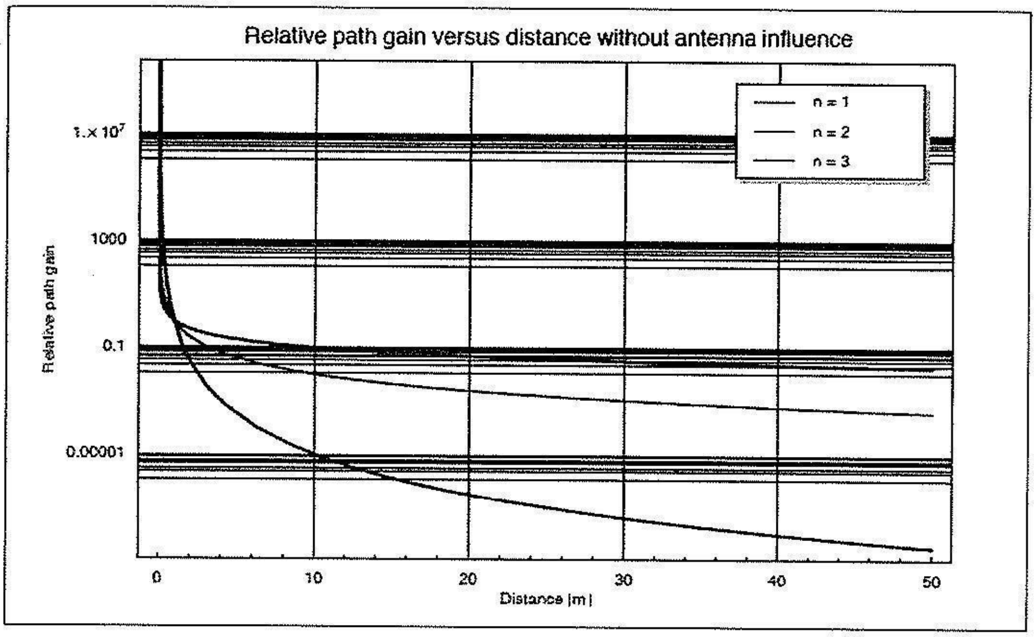
Small Scale Fading จะส่งผลปรากฏในการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของขนาดและเฟสของสัญญาณ โดยแบบจำลองของสถิติจะถูกใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงในการครอบคลุมของสัญญาณที่รับ แบบจำลองนี้แตกต่างในข้อสมมุติซึ่งใช้เกี่ยวกับเส้นทางของสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับ ตัวอย่างเช่น การกระจายแบบ Rician เกี่ยวกับสถานการณ์เมื่อมีองค์ประกอบของ LOS เป็นสำคัญ ส่วนการกระจายแบบ Rayleigh อธิบายสถานการณ์เกี่ยวกับสัญญาณที่ไม่ใช่ LOS มากกว่า ตัวอย่างอื่น เช่น แบบจำลองการกระจายแบบ Log-Normal Fading ซึ่งจำนวนการกระจายของสัญญาณได้รับการสะท้อนและการเลี้ยวเบนอย่างมาก โดยแบบจำลอง stochastic นี้ต้องการสัญญาณเฉลี่ยซึ่งสามารถหาได้จากตัวอย่างเช่น แบบจำลอง two ray แบบจำลอง three ray และแบบจำลอง multiple ray หรือเทคนิค ray-tracing

- แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง (n th-power law model)

แบบจำลองปกติ ใช้สำหรับการประยุกต์เฉพาะตำแหน่งคือ nth-power law model ซึ่งสมการของ n th-power law model ที่ใช้เพื่ออธิบายดังแสดงต่อไปนี้

$$PL(d) = \frac{1}{d^n} \tag{2.2}$$

ที่ path loss PL ลดลงซึ่งแปรผกผันของระยะทาง d ต่อกำลังของ n โดยเลขกำลัง n คือ ค่าเท่ากันต่อ path loss ค่าตัวคูณ γ ที่ใช้ในสมการ (2.6) โดยค่าตัวคูณ path loss สามารถหาด้วยค่าของข้อมูลหรือจากตาราง ซึ่งมีความสำคัญเพื่อเป็นข้อสังเกต โดยแบบจำลองนี้ใช้ในการอธิบายองค์ประกอบของ Large Scale Fading เท่านั้น



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับแบบจำลอง nth และตัวคูณ path loss ที่แตกต่างกัน

- แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบ Multiple – ray และ Two – ray

แบบจำลองของ Two-ray ถูกใช้เพื่อพิสูจน์ข้อเท็จจริงของแบบจำลอง n th power โดยบ่อยครั้งมีความแน่นอนไม่เพียงพอหรือไม่ถูกต้อง ซึ่งสำหรับการประยุกต์เฉพาะตำแหน่งนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ในการอธิบายแบบจำลองของ two-ray นั้นอาจยังไม่เพียงพอและแบบจำลองที่มี ray มากกว่าอาจถูกใช้ในคำอธิบายแทน นี่คือข้อเท็จจริงเฉพาะสำหรับสภาพแวดล้อมในเมืองที่มีการสะท้อนจากกำแพงเป็นปกติ แต่มันไม่ใช่ข้อสำคัญสำหรับสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารแบบเปิด

- ความสัมพันธ์อัตราขยายในเส้นทางสำหรับแบบจำลองของ Two-ray

แบบจำลองของ Multiple – ray สามารถมองเป็นตัวอย่างที่ง่ายของเทคนิค ray-tracing แบบจำลองนี้คำนวณ path loss โดยเกิดขึ้นด้วยการเลื่อนเฟสเพราะความยาวของเส้นทางแต่ละเส้นจากภาคส่งถึงภาครับ ซึ่งจะใช้ในคำอธิบายของการสะท้อนเหมือนกันซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นผิวบนเส้นทางของสัญญาณ LOS ที่มีการสะท้อน โดยความสัมพันธ์ของอัตราขยายในเส้นทางเป็นฟังก์ชันของระยะทางสำหรับแบบจำลอง Multiple – ray ซึ่งสามารถอธิบายตามเหตุผลโดยใช้สมการที่ (2.3) โดยแบบจำลองนี้รวมการสูญเสียในอากาศว่างเป็นตัวคูณแรกและผลรวมขององค์ประกอบในตัวคูณที่สอง และในแบบจำลองของ two-ray นั้น สำหรับกรณีของลักษณะทั่วไป สำหรับ N = 2 ray คือหนึ่ง LOS ray และหนึ่ง ray จากการสะท้อนพื้นดิน

$$P_r(d) = P_t\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left|\sum_{i=1}^{N}\frac{\Gamma_i(\alpha_i)}{r_i(d)}\exp(-ikr_i(d))\right|^2 \tag{2.3}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \text{N... Number of rays}$$

ที่ P_t และ P_r ใช้แทนกำลังส่งและกำลังรับตามลำดับ ส่วน d ใช้แทนระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ ความยาวของ Ray แทนด้วย r_i คือฟังก์ชันของระยะทาง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ Γ สมการที่ (2.4) ขึ้นอยู่กับมุมของการตกกระทบ α ของ ray เช่นเดียวกับคุณสมบัติของวัตถุการสะท้อน ซึ่งอธิบายโดย ε_r ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์

$$\Gamma(\theta) = \frac{\cos\theta - a\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + a\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}} \quad \text{ที่ } \theta = 90 - \alpha \tag{2.4}$$

ค่าคงที่ a ขึ้นอยู่กับระนาบโพลาไลซ์และหาได้จาก

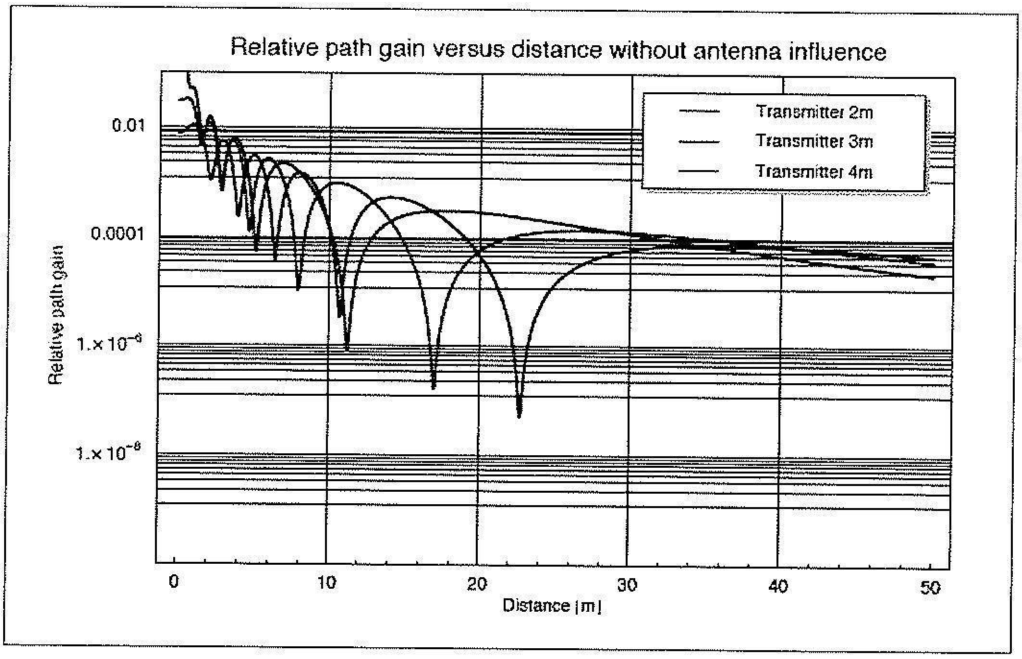
$a = 1$ Horizontal polarization

$a = \frac{1}{\varepsilon}$ Vertical polarization

สัญญาณที่แสดงในรูปที่ 2.5 คือความสัมพันธ์อัตราขยายในเส้นทางสำหรับสัญญาณรับของแบบจำลองของ two-ray ประกอบด้วยสององค์ประกอบที่แสดงในรูปที่ 2.2 สัญญาณนี้คือผลรวม

ของการสูญเสียในอากาศว่างและองค์ประกอบการสะท้อน แต่ไม่ได้รวมคำอธิบายที่มีผลกระทบจากแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศ

การพิจารณาของ ray ที่เพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับแบบจำลองของ n th power ที่แสดงให้ก่อนหน้านี้ นำไปสู่การเปลี่ยนที่สำคัญในกราฟเส้นโค้งของ path loss ด้วยเหตุที่ n th power แสดงการลด monotonically ลักษณะพิเศษที่ระยะทางเพิ่มขึ้น โดยในแบบจำลองของ two-ray และ Multiple – ray แสดงคุณสมบัติความแตกต่างที่สมบูรณ์ ซึ่งแบบจำลองอันหลังมี path loss ที่แกว่งซึ่งการลดช่วงความถี่และการเปลี่ยนแปลงในอัตราขยายในเส้นทางที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน

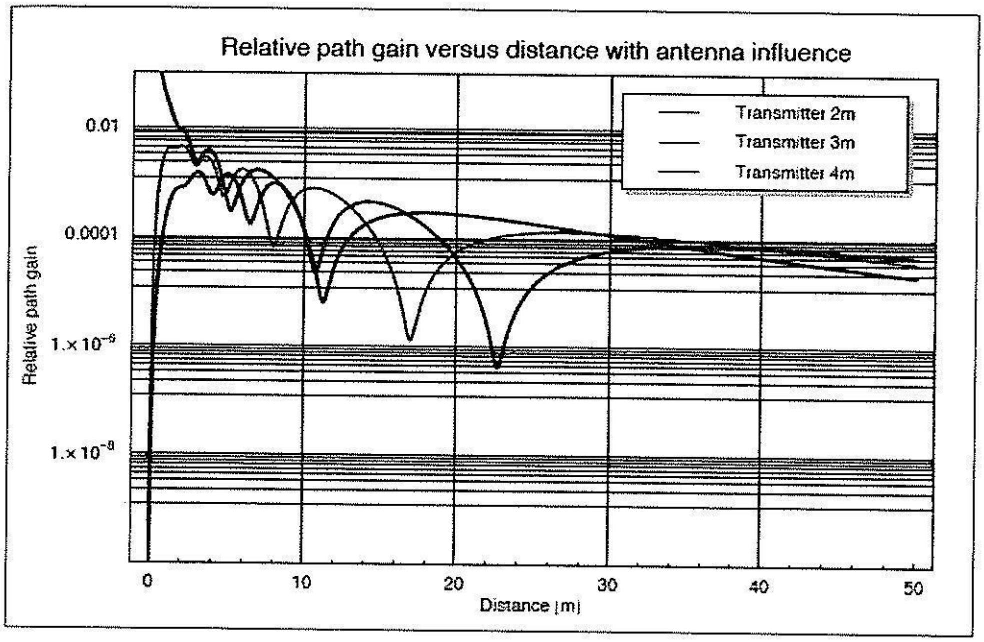
- ความสัมพันธ์อัตราขยายในเส้นทางสำหรับแบบจำลองของ Two-ray ที่มีผลกระทบของสายอากาศ

แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศจะรวมในแบบจำลองของ Multiple – ray ด้วยเหมือนกัน ภายใต้การสมมติที่ภาคส่งและภาครับใช้ชนิดของสายอากาศอันเดียวกัน แบบจำลองของ multiple – ray สามารถเขียนใหม่เพื่อรวมอัตราขยายของสายอากาศ

$$P_r(d) = P_t\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left|\sum_{i=1}^{N} G_{a,i}^2 \frac{\Gamma_i(\alpha_i)}{r_i(d)} \exp(-ikr_i(d))\right|^2 \tag{2.5}$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ N… Number of rays

ที่ตัวแปล $G_{a,i}$ แสดง Ray แต่ละอันภายใต้อัตราขยายเดียวกัน



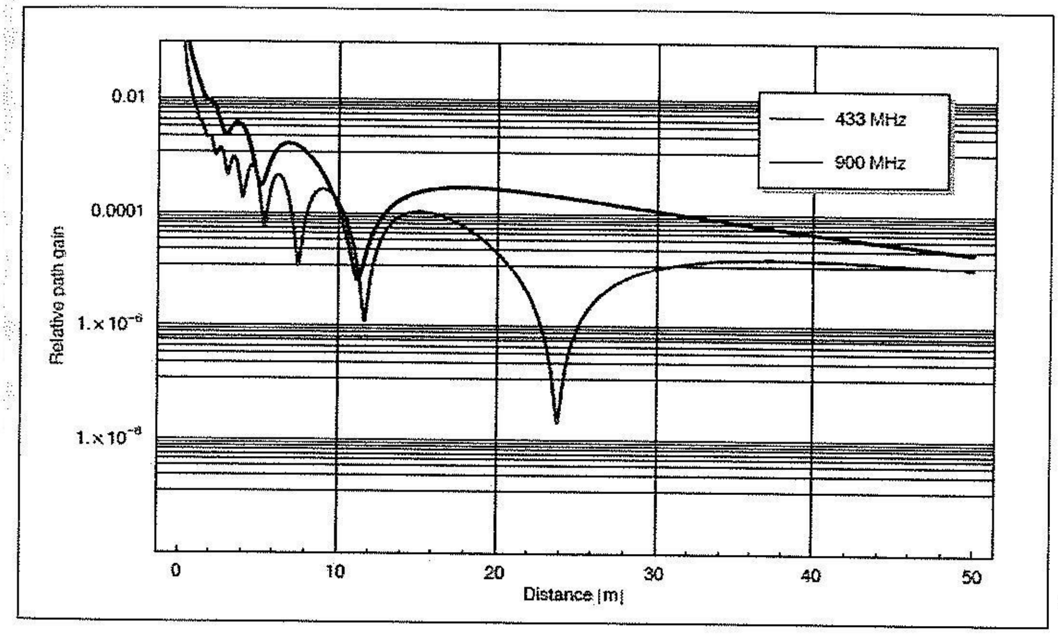
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่มีผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์อัตราขยายในเส้นทางสำหรับแบบจำลองของ two-ray แต่ในกรณีนี้รวมผลกระทบของแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศสำหรับสายอากาศไดโพลสั้น โดยจากรูป สำหรับการแยกระนาบตามขวางเล็ก ๆ ระหว่างภาคส่งและภาครับ ซึ่งผลกระทบของแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศคือสิ่งที่สำคัญ นี่คือข้อเท็จจริงสำหรับ ray ที่มีระยะทางที่แยกกันขนาดใหญ่ LOS และ ray ที่กระทบพื้นดินที่ปล่อยออกมาเหมือนกัน ซึ่งมุมเงยที่เล็กจะมีผลกระทบเหมือนกัน โดยอัตราขยายสูงสำหรับกรณีระยะทางที่สั้นมากเป็นสิ่งที่น่าสนใจ กรณีแรกเมื่อสายอากาศทั้งคู่ที่ความสูงเดียวกันและกรณีที่สองเมื่อทำการแยกมุมตั้งที่แตกต่างกัน เช่น ขึ้นสูงที่ความสูงต่างกัน ในกรณีแรก LOS จะมีอัตราขยายสูงสุดที่ปล่อยออกมาที่มุม 90 องศาโดยส่วนมาก ขณะที่ ray ที่สะท้อนจะมีอัตราขยายต่ำสุดที่ปล่อยมาที่มุมเงย 180 องศา ดังนั้น LOS จะกลายเป็น

ส่วนสำคัญขณะที่ ray ที่สะท้อนมีผลกระทบเล็กน้อย ในกรณีที่สอง ray ที่สะท้อนจะมีอัตราขยายต่ำสุดที่มุมของการสะท้อนอยู่ที่ 180 องศา แต่การเพิ่มความแตกต่างในความสูงนั้น ส่วน ของ LOS จะลดลงในอัตราขยายที่มุมเงยมีการเพิ่มขึ้น นำไปสู่สัญญาณขนาดเล็กมากที่ภาครับ

- ผลกระทบของความถี่สัญญาณวิทยุ

ความถี่ของสัญญาณวิทยุมีผลกระทบต่อลักษณะพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณที่ความถี่สูงแสดงคุณสมบัติที่ระยะทางสั้นกว่าสัญญาณที่ความถี่ต่ำ สามารถเห็นได้จากรูปที่ 2.7 สำหรับความถี่ที่ 434 MHz และ 900 MHz



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางของสองความถี่

- แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบต่าง ๆ ของการสื่อสาร

หัวข้อนี้จะแสดงแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่น่าสนใจ โดยแบบจำลองเหล่านี้จะพัฒนาครอบคลุมพื้นที่ให้แน่นอน ซึ่งการครอบคลุมพื้นที่จะเกี่ยวกับการรับประกันคุณภาพของสัญญาณ (การรองรับสัญญาณ) ภายในพื้นที่ที่สนใจ นี่คือความแรงสัญญาณในการสื่อสาร ซึ่งแบบจำลองสามารถใช้สร้างข้อมูลจากการสังเกตได้บ่อยครั้ง

- แบบจำลอง Path loss ทั่วไป

ลักษณะทั่วไปของ Path loss ในหน่วยของ dBm เป็นฟังก์ชันของระยะทาง d ดังนี้

$$PL(d) = PL(d_0) + \gamma \log(d / d_0) + x_\sigma \tag{2.6}$$

ในสมการข้างบน $PL(d_0)$ ใช้แทน path loss อ้างอิงที่ระยะทาง d_0 ค่าคงที่ γ เรียกว่าตัวคูณ path loss และสำหรับค่า $\gamma = 2$ จากสมการข้างบนจะเป็นการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง ตัวคูณ path loss ที่แตกต่างจะใช้ประยุกต์ได้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันและสามารถหาได้จากตารางหรือข้อมูลการทดลอง ส่วนการใช้ Gaussian random variable x_σ นั้น มันเป็นไปได้ในการจำลองที่ไม่แน่นอนของ path loss แบบจำลองนี้ถูกใช้สำหรับการประยุกต์เฉพาะที่และจะพิจารณาที่จุดแตกต่าง

- แบบจำลอง Okomura และ Hata

แบบจำลอง Okomura ใช้อย่างกว้างขวางในแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายนอกอาคารสำหรับพื้นที่ในเมือง ซึ่งอธิบายลักษณะค่าปานกลางของ path loss ในการแพร่กระจายคลื่นและสามารถเขียนได้ดังนี้

$$L_{50} = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{area} \tag{2.7}$$

ในสมการนี้ L_F ใช้แทน การสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง โดย A_{mu} คือค่าลดทอนปานกลางในตัวกลาง เกี่ยวข้องกับอากาศว่างที่ความถี่ f และระยะทาง d ยิ่งกว่านั้น สามอัตราขยายสำหรับภาคส่ง $G(h_{te})$ ภาครับ $G(h_{re})$ และอัตราขยายเฉพาะพื้นที่ G_{area} ถูกรวมไว้ในสูตร A_{mu} และ G_{area} สามารถหาจากการใช้กราฟเส้นโค้งที่มาจากการสังเกต

แบบจำลอง Hata คือการลดของกราฟเส้นโค้งจากหลายการสังเกตที่ได้จากแบบจำลอง Okomura ซึ่งแบบจำลองนี้อธิบายการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นปานกลางในสภาพแวดล้อมภายในเมืองโดย

$$L_{50}(urban)(dB) = 69.55 + 26.16\log f_c - 13.82\log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55\log h_{te})\log d \tag{2.8}$$

ที่ f_c คือความถี่การสื่อสารในหน่วยเมกกะเฮิรตซ์ (MHz) ในช่วงจาก 150 MHz ถึง 1500 MHz ตัวแปร h_{te} และ h_{re} คือผลของความสูงของสายอากาศภาคส่งและภาครับ ตามลำดับ และ d คือ ระยะทางระหว่างทั้งคู่เหมือนเดิม ส่วนตัวแปล $a(h_{re})$ คือ correction factor สำหรับผลของความสูงของสายอากาศของหน่วยเคลื่อนที่และเป็นฟังก์ชันของขนาดของพื้นที่ที่ครอบคลุม

- แบบจำลอง Breakpoint หรือแบบจำลอง Dual-slope

แบบจำลอง Breakpoint แบ่งขอบเขตระยะทางเป็นสองพื้นที่ที่แยกกัน ส่วนแบ่งที่เกิดขึ้นที่ Breakpoint d_{brk} และในแต่ละพื้นที่ ค่า path loss ถูกอธิบายลักษณะโดยสมการด้วยกราฟความเอียงที่ต่างกัน (n_1 และ n_2 ตามลำดับ) เนื่องจากเหตุนี้จึงกลายเป็นชื่อสำหรับแบบจำลองนี้

$$PL(d) = PL_b + \begin{cases} 10n_1 \log d + P_1 & 1 < d < d_{brk} \\ 10(n_1 - n_2)\log d_{brk} + 10n_2 \log d + P_1 & d \geq d_{brk} \end{cases} \qquad (2.9)$$

ค่าคงที่ P_1 แทน Path loss ที่ระยะทางอ้างอิง d_0 ตัวแปร PL_b คือตัวแปรการสูญเสียการสื่อสารขึ้นอยู่กับความถี่สื่อสารและความสูงสายอากาศ

- แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุภายในอาคาร

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารบ่อยครั้งสร้างจากแบบจำลอง Path loss ทั่วไป และรวมตัวคูณที่เพิ่มสำหรับการลดทอนที่เกิดขึ้นเพราะกำแพง (WAF) หรือชั้น (FAF) ของอาคาร

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\gamma \log(d/d_0) + \sum_{q=1}^{Q} FAF(q) + \sum_{p=1}^{P} WAF(p) \qquad (2.10)$$

q,p คือ จำนวนของชั้น/กำแพง

- เทคนิค Ray-tracing

ในจำนวนแบบจำลองเฉพาะของเทคนิค Ray-tracing ซึ่งส่วนประกอบที่แตกต่างกันและระดับของความยุ่งยากเป็นที่รู้จักดี ซึ่งมันมีความสำคัญในพื้นที่ของการดูกราฟ ที่การแทนกราฟจริงของธรรมชาติหรือวัตถุที่ถูกรับมา ภายใต้การสมมติที่พลังงานการแพร่กระจายสามารถเห็นการเดินทางของ ray เป็นเส้นตรง (ดัชนีค่าคงที่การเลี้ยวเบนน้อย) คล้ายกันสำหรับที่เกี่ยวกับสายตาหรือการประยุกต์สัญญาณวิทยุ โดยเทคนิค Ray-tracing จะดำเนินการสร้าง ray จากภาคส่งและ ray นี้มี

ผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมซึ่งกันและกันตามทฤษฎีของการเลี้ยวเบน การสะท้อน เป็นต้น หรือตามทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เทคนิคนี้เหมาะสมกับแบบจำลองภายในอาคารเช่นเดียวกับการแพร่กระจายคลื่นภายนอกอาคารและสามารถอธิบายผลกระทบ Small scale fading ได้

นอกจากแบบจำลองในปัจจุบัน มีแบบจำลองอื่นอีกที่ใช้ในการสื่อสาร เช่นแบบจำลอง ITU (CCIR), แบบจำลอง Clearance Angle, แบบจำลอง Ericsson 9999, แบบจำลอง Lee, แบบจำลอง Cost 231-Walfisch-Ikegami หรือแบบจำลอง ETF-Artificial Neural Networks Macrocell คือชื่อแบบจำลองที่มีความหลากหลายในการใช้งาน ดังนั้น ต้องอ้างอิงการวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารสำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองนี้และแบบจำลองอื่น

2.2.4 ทฤษฎีสายอากาศ

สายอากาศเป็นส่วนที่สำคัญของเครื่องส่งและเครื่องรับซึ่งทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นจากเครื่องส่งออกอากาศ และรับคลื่นวิทยุเข้าสู่เครื่องรับ สายอากาศประกอบไปด้วยลวดตัวนำเป็นท่อตันหรือกลวง ทำหน้าที่เสมือนวงจรไฟฟ้า ที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่ออยู่ ลวดตัวนำอาจเป็นเส้นตรงหรืองอโค้ง แล้วแต่ชนิดของสายอากาศโดยทั่วไปจะมีขนาดความยาวใกล้เคียงกับหนึ่งความยาวคลื่น (λ: Lamda) จึงสามารถใช้สายอากาศทำหน้าที่ได้ทั้งสายอากาศส่งหรือสายอากาศรับ

- การทำงานของสายอากาศ

การส่งและการรับสัญญาณ สายอากาศใช้ส่งและรับสัญญาณคลื่นวิทยุ หรือคลื่น(RF: Radio Frequency) เมื่อสายอากาศถูกใช้สำหรับส่งสัญญาณมันจะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้า ให้เป็น RF ซึ่งสัญญาณไฟฟ้านั้นถูกสร้างมาจาก อุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Transmitter) และสัญญาณไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปยังสายอากาศ และเมื่อพบกับความต้านทานของสายอากาศมันจะสร้างคลื่น RF ออกมาและถูกส่งออกไป

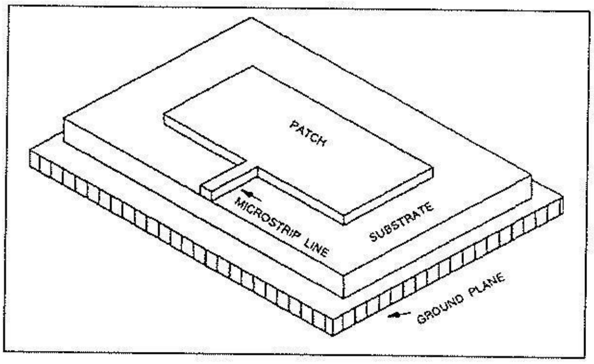
การรับสัญญาณ เมื่อสายอากาศถูกใช้ในการรับสัญญาณ การทำงานจะตรงข้ามกับการส่ง มันจะรับคลื่น RF และเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า เนื่องจากสัญญาณที่ส่งมาอาจจะไม่แรงเพียงพอ สายอากาศบางประเภทจะมีตัวขยายสัญญาณเบื้องต้น หรือ Preamplifier ที่ทำหน้าที่เพิ่มความแรงของสัญญาณก่อนที่จะส่งต่อไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณต่อไป

- สายอากาศไมโครสตริปแพตช์

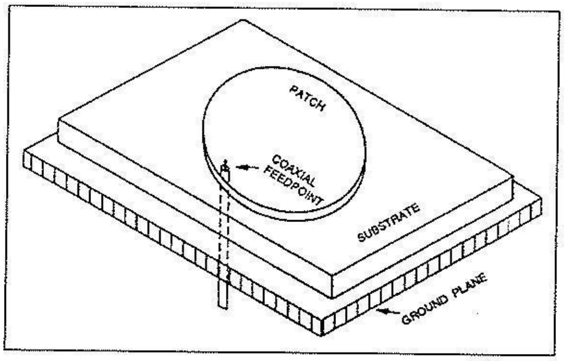
การพัฒนาการสื่อสารแบบไร้สายและโทรศัพท์เคลื่อนที่ สำหรับ แนวทางการออกแบบสายอากาศที่ใช้มีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบที่ต้องการใช้งานร่วมกับสายอากาศ ซึ่งยากที่จะกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ที่แน่นอนลงไป ในปัจจุบันสายอากาศที่ทำงานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดคือสายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) สายอากาศแบบปลอก (sleeve antenna) และสายอากาศแบบสัญฐานต่ำ (low-profile antenna) เช่นสายอากาศไมโครสตริป และสายอากาศระนาบอินเวอร์สเอฟ (Planar Inverted F Antenna : PIFA) ทั้งสามแบบนี้นิยมนำมาใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศแบบแรกคือสายอากาศโมโนโพลนิยมใช้มากที่สุดเพราะมีคุณลักษณะเป็นแถบกว้าง (broadband characteristics) และมีโครงสร้างไม่ยุ่งยากบางครั้งเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่าสายอากาศแบบแส้ (whip antenna) ส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ซึ่งสายอากาศนี้จะมีคุณลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ในทางปฏิบัติสายอากาศโมโนโพลมีความยาวไม่ใช่ครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ถ้ามีระนาบกราวด์ที่กว้างจะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะแตกต่างจากระนาบกราวด์แบบอนันต์สายอากาศแบบที่สองคือ สายอากาศแบบปลอกมีโครงสร้างของการแผ่กระจายคลื่นเป็นไดโพลแบบไม่สมมาตรของตัวนำ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดแตกต่างกันโดยที่ขนาดที่เล็กสุดของตัวนำจะเท่ากับตัวนำภายในสายโคแอคเชียลที่ป้อนให้กับสาย อากาศ และขนาดที่ใหญ่จะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำซึ่งจะถูกลัดวงจรกับลวดถักที่อยู่รอบ ๆ สายโคแอคเชียลสายอากาศนี้มีคุณลักษณะเหมือนกับสายอากาศโมโนโพล ที่ไม่ต้องมีระนาบกราวด์แต่การที่ไม่มีระนาบกราวด์นั้นมีข้อเสียเมื่อนำไปใช้งานโดยที่ต้องนำไปติดตั้งเข้ากับส่วนต่าง ๆ ที่เป็นโลหะทำให้อัตราการขยายจะลดลง ข้อเสียอีกอย่างของสายอากาศแบบแส้และสายอากาศแบบปลอกคือโครงสร้างไม่แข็งแรงหักง่าย และการนำไปสร้างเป็นสายอากาศแบบสองความถี่เป็นไปได้ยากแบบสุดท้ายคือสายอากาศแบบประหยัดบางครั้งเรียกสายอากาศไมโครสตริปว่าสายอากาศแพตซ์ มีโครงสร้างสามส่วนคือ ส่วนบนเป็นส่วนของการแผ่กระจายคลื่นโดยมีส่วนที่สองเป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่ขั้นกลางระหว่างกราวด์กับส่วนของการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นแผ่นตัวนำ ส่วนสายอากาศระนาบอินเวอร์สเอฟพัฒนามาจากสายอากาศอินเวอร์สแอล แต่สายอากาศทั้งแบบไมโครสตริปและสายอากาศแบบอินเวอร์สเอฟมีข้อเสียคือ มีความกว้างแถบที่แคบ

สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เรา เรียกว่าแพตซ์ ซึ่งเป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าเป็นซับสเตรท (substrate) ของสารไดอิเล็กตริก ไมโครสตริปได้รับความนิยมอย่าง

มากในการใช้งาน เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ต้านลม และสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ นอกจากนี้ยังมีข้อดีในแง่ที่ราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง แต่ขณะเดียวกันการออกแบบก็มีความยุ่งยากเช่นกัน



ก. แพตช์ของไมโครสตริปที่ป้อนผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป

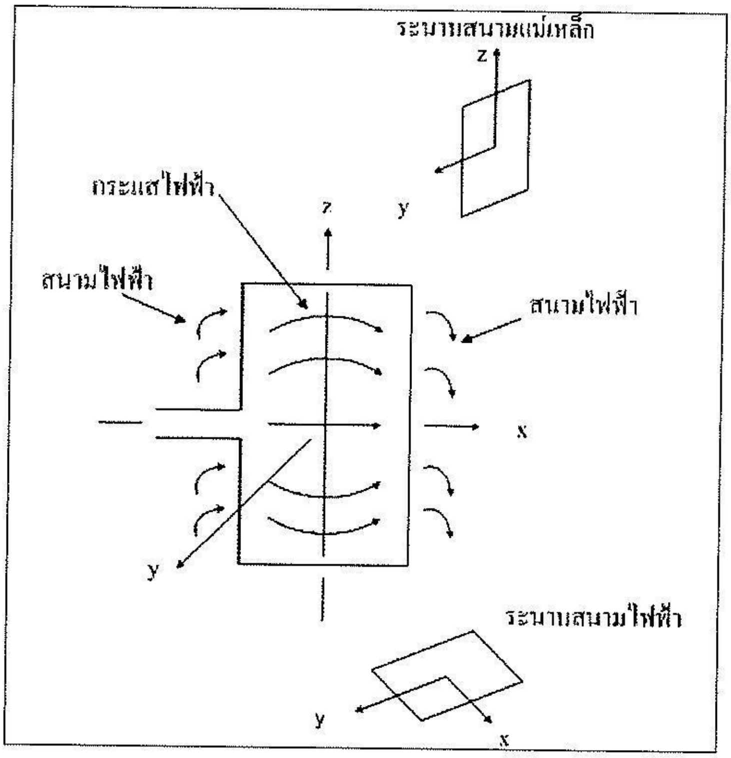


ข. แพตช์ของไมโครสตริปวงกลมที่มีการป้อนผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป

รูปที่ 2.8 ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม

จากรูปที่ 2.8 ก. และรูปที่ 2.8 ข. แสดงสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปวงกลม ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ โดยที่แพตช์จะถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ รูปที่ 2.8 ก. เป็นแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยสัญญาณความถี่วิทยุจะถูกป้อนเข้าที่สายป้อนสัญญาณที่เป็น

สตริปโลหะแคบ ๆ ในรูปที่ 2.8 ข. แสดงแพตช์รูปวงกลมที่ป้อนด้วยตัวนำผ่านช่องในระนาบกราวด์ ซึ่งการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้จะเรียกว่าการเชื่อมต่อแบบช่องเปิดผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ ในระนาบกราวด์



รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพตช์

โดยสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ ซับสเตรทถือว่ามีความสำคัญมากเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าคงที่ของการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งการแสดงคุณลักษณะของแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (characteristics of a rectangular patch) แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 เป็นการแสดงกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงของสนามไฟฟ้าภายในและบริเวณรอบ ๆ แพตช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพตช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 2.9 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้ง โดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพตช์รูป

สี่เหลี่ยมมุมฉากยาว $\lambda/2$ จะถูกแสดงในรูปของค่าความต้านทานที่มีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นที่ดี โดยค่าความต้านทานที่อินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์ [11] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1} \tag{2.11}$$

เมื่อ G_1 คือ ค่าความนำ (conductance) โดยมีเงื่อนไข

$$G_1 = \frac{1}{90}\left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2 \qquad W \ll \lambda_0 \tag{2.12}$$

$$G_1 = \frac{1}{120}\left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2 \qquad W \gg \lambda_0 \tag{2.13}$$

โดยที่ W เป็นความกว้างสายอากาศ

λ_0 เป็นความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ

การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแพตช์ ซึ่งตัวป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปหรือสายโคแอกเชียลที่นำมาต่อ ควรจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพตช์ด้วย อย่างไรก็ตามสายนำสัญญาณที่จะต่อเข้ากับเครื่องมือวัดและทดสอบสายอากาศมีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม จึงจำเป็นต้องทำการแมตช์อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพตช์ เพื่อให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม เสียก่อน

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์ พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ (f_c) หรือความถี่เรโซแนนซ (f_r) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซับสเตรท (dielectric constant : ε_r) ความสูงของไดอิเล็กตริกซับสเตรท (h) เป็นต้น การออกแบบได้แบ่งเป็นสองส่วนคือ การออกแบบสายอากาศแพตช์และการออกแบบการป้อนสัญญาณการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2548) สามารถหาความกว้าง (a) และความยาว (b) ได้ดังรูปที่ 2.10 แสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปซึ่งเป็นแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยค่าความนำของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง (a) ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว (b) ซึ่งจะกำหนดโดย

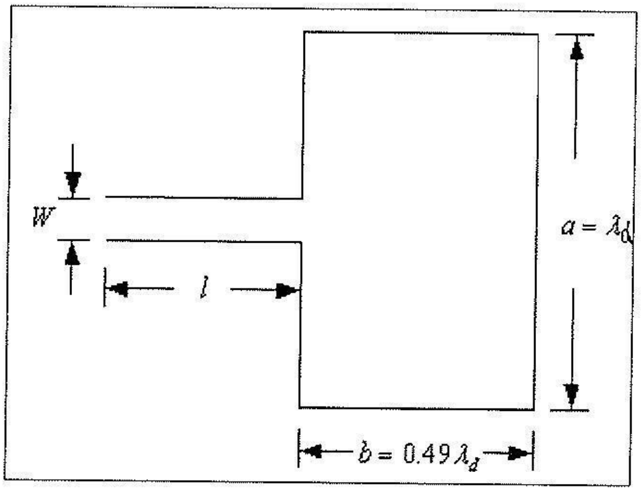
$$a = \lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.14}$$

$$b = 0.49\lambda_d = 0.49\frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.15}$$

โดยที่ λ_d คือความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก

λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศอิสระ

ε_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซับสเตรท



รูปที่ 2.10 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี คือ 1) สายนำสัญญาณไมโครสตริป (microstrip line) 2) สายนำสัญญาณ โคแอกเชียล (coaxial line) 3) โพรบโคแอกเชียล (coaxial probe) และ 4) การเหนี่ยวนำผ่านช่อง (aperture coupling) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การป้อนโดยใช้สายนำสัญญาณไมโครสตริป

การป้อนโดยใช้สายนำสัญญาณไมโครสตริป ซึ่งเทคนิคการป้อนแบบนี้แผ่นตัวนำ (conducting strip) จะถูกต่อเชื่อมโดยตรงเข้ากับขอบของไมโครสตริปแพตช์ แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแผ่นตัวนำจะมีขนาดเล็กกว่าความกว้างของแพตช์ สำหรับในการออกแบบแผ่นตัวนำสายป้อนสัญญาณไมโครสตริปนี้จะเป็นการหาความกว้าง (*W*) และความยาว (*l*) สามารถหาได้โดยพิจารณาเงื่อนไขของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะคือ

<u>กรณีที่ 1</u> $Z_0 \leq 44 - 2\varepsilon_r$ (หรือ $Z_0 \leq 23.6\ \Omega$)

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi}\left[B - 1 - \ln(2B-1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\left\{\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r}\right\}\right] \tag{2.16}$$

เมื่อ $B = \dfrac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}$

<u>กรณีที่ 2</u> $Z_0 \geq 44 - 2\varepsilon_r$ คือ $Z_0 \geq 23.6\ \Omega$

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^{A}}{e^{2A} - 2} \tag{2.17}$$

เมื่อ $A = \dfrac{Z_0}{60}\sqrt{\dfrac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \dfrac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\left(0.23 + \dfrac{0.11}{\varepsilon_r}\right)$

และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left[1 + \frac{12h}{W}\right]^{-1/2} \tag{2.18}$$

- สายอากาศกับการแพร่กระจายคลื่น

ในระบบสื่อสารใดๆ ต้องการให้สัญญาณที่รับได้ปลายทางมีความแรงมากๆ อย่างน้อยที่สุดแรงพอที่จะชนะสัญญาณรบกวนได้ และอยู่ในเกณฑ์ที่ความไวของเครื่องรับจะทำงานได้ ความแรงที่สถานีปลายทางจะมีค่าสูงหรือต่ำเพียงใดนั้นขึ้นกับองค์ประกอบที่สำคัญคือ ถ้าเป็นการส่งสัญญาณไปตามสายส่ง สัญญาณส่วนมากจะสูญเสียไปในรูปของความร้อนในสายส่งเนื่องจากความต้านทานของสายส่ง และเนื่องจากฉนวนที่นำมาทำสายส่งไม่เป็นฉนวนที่ดีจริง การสูญเสียของสัญญาณในแพร่กระจายคลื่นออกอากาศ คลื่นวิทยุบางส่วนถูกลดทอนกำลังลงในตัวกลางที่คลื่นเดินผ่านไป การสื่อสารในย่านความถี่สูง (HF หรือ High Frequency) นั้น ต้องอาศัยการสะท้อนคลื่นจากชั้นบรรยากาศ Ionosphere กลับมายัง โลกซึ่งมีลักษณะเป็นตัวกลางที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีอนุภาค ประจุไฟฟ้าบวกและอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อคลื่นวิทยุเดิน ทางไปสะท้อนชั้นบรรยากาศ คลื่นบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยชั้นบรรยากาศนั้น การสื่อสารที่ใช้ความถี่สูงมาก (VHF หรือ Very High Frequency) เช่นการติดต่อของหน่วยตำรวจตระเวนชายแดนในป่าการ

สื่อสารจะ ไปไม่ได้ไกล ทั้งนี้เพราะต้นไม้ใบไม้ในป่าจะดูดกลืนคลื่นวิทยุไว้เป็นส่วนมาก การสื่อสารที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เชื่อมโยงระหว่างสถานีถ่ายทอดทวนสัญญาณการสูญเสียของคลื่นวิทยุเนื่องจากบรรยากาศ เม็ดฝุ่นละอองหรืออณูของออกซิเจนดูดกลืนไว้ การสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นจะคลายกับการสูญเสียในสายส่ง และยังมีการสูญเสียกำลังส่งเนื่องจาก "การถ่างออก" ของรังสี คลื่นวิทยุ เนื่องจากโครงสร้างทางเรขาคณิตของคลื่นในการแพร่กระจายคลื่น "ทุกๆครั้งที่ระยะห่างเพิ่มเป็นสองเท่าความเข้ม ของคลื่นจะลดลง 4 เท่า

ความแรงของสัญญาณที่สายอากาศรับ เปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับแล้วป้อนเข้าเครื่องรับ อาจทำให้มีค่ามากขึ้นได้ 3 วิธี คือ

1. โดยการเพิ่มกำลังส่งของเครื่องส่ง
2. โดยการเพิ่ม Gain ของสายอากาศส่ง
3. โดยการเพิ่ม Gain ของสายอากาศรับ

ในทางทฤษฎีสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบต่าง ได้ดังนี้

$$P_r = P_t g_t g_r \left(\frac{v}{4\pi Rf} \right) \tag{2.19}$$

P_r คือ กำลังคลื่นวิทยุที่รับได้วัดที่ขั้วของสายอากาศรับ มีหน่วยเป็นวัตต์

P_t คือ กำลังของเครื่องส่งที่ส่งสัญญาณเข้าที่ขั้วของสายอากาศส่ง มีหน่วยเป็นวัตต์

g_t คือ ค่ากำลัง Gain ของสายอากาศส่ง เมื่อวัดเปรียบเทียบกับสายอากาศรอบตัว มี หน่วยวัดเป็นเลขลอยๆ

g_r คือ ค่ากำลัง Gain ของสายอากาศรับ เมื่อวัดเปรียบเทียบกับสายอากาศรอบตัว มีหน่วยวัดเป็น เลขลอยๆ

v คือ ความเร็วของคลื่นวิทยุ ซึ่งเท่ากับความเร็วแสง เท่ากับ 300 ล้านเมตรต่อวินาที

π คือ ค่าคงที่เท่ากับ 3.1416

R คือ ระยะห่างระหว่างสถานีส่งกับสถานีรับ มีหน่วยเป็นเมตร

f คือ ความถี่คลื่นวิทยุที่ใช้งานมีหน่วยเป็น Hz (เฮิรตซ์) หรือรอบต่อวินาที

ในทางปฏิบัติการวัดค่ากำลังสายอากาศนิยมเรียกเป็นหน่วยเดซิเบล (Decibel) หรือ dB หรือ dBi ตามมาตราฐานในประเทศญี่ปุ่น แต่โดยหลักของการจัดทำสายอากาศไม่สามารถที่จะวัด Gain ของสายอากาศให้ได้แน่นอนเพราะมีข้อจำกัดอีกมากมายที่ทำให้สายอากาศเมื่อจัดสร้างเสร็จแล้วได้ Gain ขยายไม่ตรงกับที่คำนวนไว้ ประการหนึ่งอยู่ที่สภาพแวดล้อมในช่วงของการแมตซ์สายอากาศ หรือสถานที่ติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น

2.3 ทฤษฎีของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน

การเข้าสู่ยุคของการสื่อสารในปัจจุบันหรือที่เรียกว่า 3G หรือระบบ CDMA, GSM ระบบเหล่านี้เกิดขึ้นมาจากแบบจำลองของการเข้ารหัสและการมอดูเลตสัญญาณที่ต่างกันออกไป ตามแต่ละเงื่อนไขและข้อกำหนดของแต่ละระบบนั้น ๆ ซึ่งพื้นฐานก่อนที่จะวิวัฒนาการเข้ามาสู่แบบจำลองของดิจิตอลมอดูเลชัน มาจากแบบจำลองของอะนาลอกมอดูเลชันแบบต่าง ๆ เช่น AM (Amplitude Modulation), FM (Frequency Modulation) และ PM (Phase Modulation) เป็นต้น โดยการใช้สัญญาณดิจิตอล 1 บิต “1” หรือ “0” ควบคุมจังหวะของการส่งสัญญาณมอดูเลตเหล่านั้นออกไป ก็จะทำให้เป็นการมอดูเลตแบบดิจิตอลแล้ว การควบคุม ON-OFF นั้น หรือที่เรียกว่า OOK (ON-OFF Keying) จะทำให้แบบจำลองของอะนาลอกมอดูเลชันเปลี่ยนแปลงไปสู่ดิจิตอลมอดูเลชันคือจาก AM เป็น ASK (Amplitude Shift Keying) FM เป็น FSK (Frequency Shift Keying) และ PM เป็น PSK (Phase Shift Keying)

แบบจำลองของการมอดูเลชันแบบ ASK, FSK และ PSK มีให้เห็นอยู่มากมายกับการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น อาร์เอฟไอดี (RFID) ใช้การมอดูเลตแบบ ASK (แต่ในปัจจุบัน RFID สามารถใช้การมอดูเลตแบบ FSK และ PSK ได้อีกด้วย) บลูทูธ (Bluetooth) นั้นโดยพื้นฐานใช้การมอดูเลตแบบ FSK แต่นำ Gaussian Filter (low pass) เข้าไปใส่ข้างหน้า ซึ่งจะทำให้การมอดูเลตแบบนี้ กลายเป็น GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) เป็นต้น ส่วน PSK ถ้าเติม B (Binary) เข้าไปข้างหน้าก็จะทำให้แบบจำลองของการมอดูเลตกลายเป็น BPSK (Binary Phase Shift Keying) หรือถ้าเติม Q (Quadrature) เข้าไปข้างหน้าก็จะทำให้แบบจำลองของการมอดูเลตชันกลายเป็น QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) หรือ Q เติมหน้า AM ก็จะกลายเป็น QAM (Quadrature Amplitude Modulation) เป็นต้น [12] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแบบจำลองการมอดูเลตชันนั้นมีมากมายเหลือเกิน ซึ่งพื้นฐานล้วนสร้างมาจากอะนาลอกแทบทั้งสิ้น

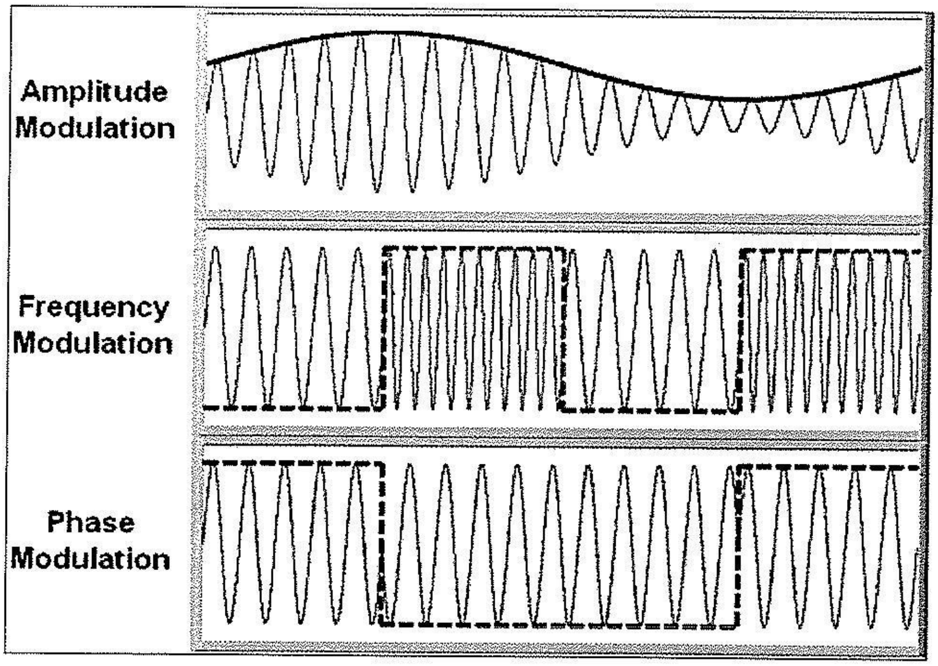
ในส่วนนี้จะนำเสนอการสร้างหรือการจำลองลักษณะของสัญญาณการมอดูเลตแบบ ASK, FSK และ PSK เพื่อให้เข้าใจและเป็นพื้นฐานที่ดี ในการสื่อสารด้วยระบบอะนาลอก หากชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูลแบบอะนาลอก (เช่นเสียง) อาจจะใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ AM, FM หรือ PM แต่ถ้าข้อมูลที่มีนั้นเป็นแบบดิจิตอล ก็ต้องใช้แบบจำลองการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK, FSK และ PSK แต่ถ้าข้อมูลเกิดมาในแบบจำลองของอะนาลอกและต้องการส่งเข้าไปในระบบดิจิตอลต้องแปลงสัญญาณอะนาลอกให้เป็นรหัสสัญญาณทางดิจิตอลก่อนด้วยวิธีการ PAM (Pulse Amplitude Modulation) หรือ PCM (Pulse Code Modulation) เป็นต้น

แต่ในที่นี้จะมาศึกษาเกี่ยวกับระบบการมอดูเลชันสัญญาณเท่านั้น การมอดูเลต คือการนำเอาสัญญาณข่าวสาร (modulating signal) ไปเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ (ขนาด, ความถี่ หรือเฟส)

อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างพร้อมกัน ของสัญญาณพาหะ (Carrier wave) โดยการมอดูเลต มีจุดประสงค์ดังนี้

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ
2. เพื่อให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณ (channel)
3. เพื่อลดสัญญาณรบกวน
4. เพื่อกำหนดความถี่ใช้งาน
5. เพื่อทำการมัลติเพลกซ์สัญญาณ

ซึ่งการมอดูเลตชันคือขั้นตอนการเปลี่ยนแบบจำลองของข้อมูลข่าวสารที่ อยู่ในรูปของสัญญาณ Baseband ให้เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมของการส่งผ่านข้อมูลเข้าไปยังช่องทางที่ต้องการ ส่วนการดีมอดูเลตชันคือ ขั้นตอนหรือขบวนการกู้คืนสัญญาณข้อมูลข่าวสารกลับมานั่นเอง



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของรูปแบบสัญญาณ AM, FM และ PM

ในพื้นฐานของการสื่อสารในย่าน RF (Radio Frequency) นั้น มักจะพิจารณาและเรียกสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วว่าเป็นสัญญาณมอดูเลตอย่างต่อเนื่องหรือ (continuous wave modulation : CW) ที่ซึ่งข้อมูลข่าวสารในสัญญาณ Baseband จะถูกส่งผ่าน (มอดูเลต) มากับสัญญาณพาห์ (sinusoidal carrier) ที่มีขนาดของแอมปลิจูดเป็น V_m และมุมความถี่ ω_m แสดงได้ดังสมการที่ (2.20) และ (2.21) ตามลำดับซึ่งถ้าสมมติว่าสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier)

$$v_m(t) = V_m \cos \omega_m t \tag{2.20}$$

และเมื่อนำการมอดูเลตกับอีกสัญญาณหนึ่งซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned} v_c(t) &= V_c(t)Cos[\omega(t) + \varphi(t)] \\ &= V_c(t)Cos[\theta(t)] \end{aligned} \tag{2.21}$$

1. การมอดูเลตทางขนาด (Amplitude Modulation: AM) ซึ่ง ω(t) จะคงที่ ณ ที่ ω_c และ φ(t) จะคงที่ ที่ 0 ส่วนขนาดของแอมปลิจูด V_c(t) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามลักษณะของสัญญาณเสียง V_m (t) ที่เข้ามา

2. การมอดูเลตทางมุมหรือองศา (Angle Modulation) ซึ่ง V_c (t) จะคงที่ ที่ V_c แต่ θ(t) จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณของเสียงที่เข้ามา ซึ่งการมอดูเลตทางมุมแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

2.1 การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation : FM) ซึ่ง $V_c(t)=V_c$ = ค่าคงที่ และภายในเทอมของ θ(t) , φ(t) จะคงที่ ที่ 0 แต่ ω(t) จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเสียง V_m (t) ที่เข้ามา

2.2 การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation : PM) ซึ่ง $V_c(t)=V_c$ = ค่าคงที่ และภายในเทอมของ θ(t) , ω(t) จะคงที่ ที่ ω_c แต่ φ(t) จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเสียง V_m (t) ที่เข้ามา

- Phase Shift Keying (PSK)

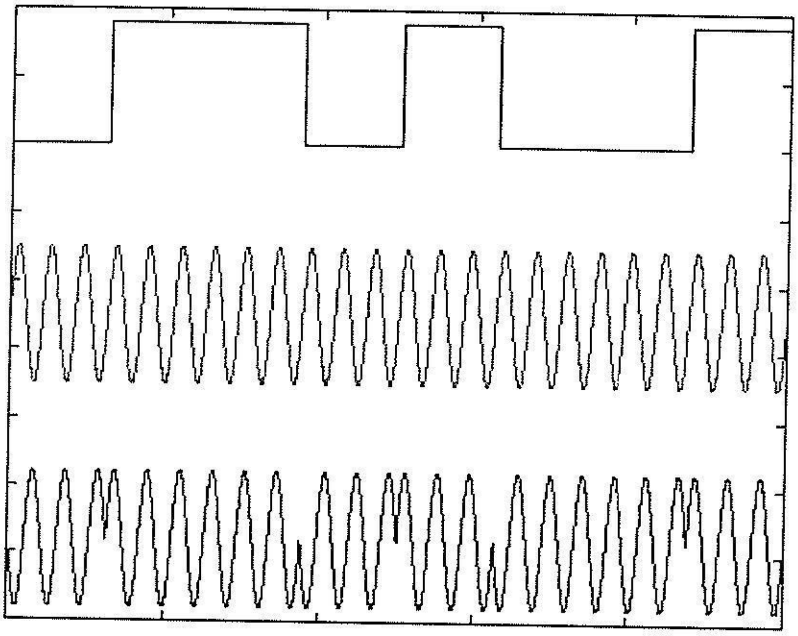
การมอดูเลตแบบ PSK ซึ่งการมอดูเลตชนิดนี้จะเป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การมอดูเลตที่มีความซับซ้อนขึ้นไปอีก เช่น QPSK, QAM เป็นต้น การมอดูเลตแบบ PSK คือการเปลี่ยน เฟส (ตำแหน่งเริ่มต้น) ของสัญญาณพาหะ ตามบิตข้อมูล เช่น เฟส ϕ_0 เมื่อข้อมูลเป็น 0 และเฟส ϕ_1 เมื่อข้อมูลเป็น 1 ดังสมการที่ (2.22

)

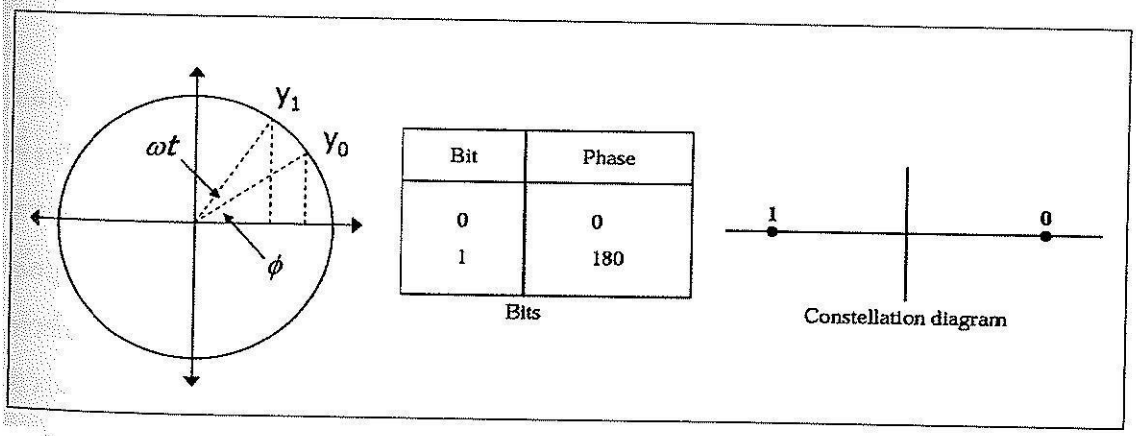
$$PSK(t) = \begin{cases} A\sin(2\pi f_c t + \phi_0), data(t) = 0 \\ A\sin(2\pi f_c t + \phi_1), data(t) = 1 \end{cases} \tag{2.22}$$

ข้อดีของสัญญาณ PSK คือจะทนต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า ASK ในขณะที่ใช้แถบความถี่แคบกว่า FSK และนอกจากนี้ยังสามารถแทนสัญญลักษณ์ได้มากกว่า 1 บิตต่อหน่วย

สัญญาณ แต่ข้อเสียคือ การออกแบบเครื่องรับ-ส่งสัญญาณนั้น รวมทั้งการวิเคราะห์ต่าง ๆ จะทำได้ยากกว่าสัญญาณแบบ ASK และ FSK ซึ่งคุณลักษณะของสัญญาณ PSK {PSK Characteristics (Constellation Diagram)} แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 กล่าวคือ การมอดูเลตแบบ PSK นั้นจะสังเกตได้ว่าในแบบจำลองต่าง ๆ สามารถแสดงโดยแผนผัง Constellation ซึ่งบอกตำแหน่ง Phase ของสัญญลักษณ์ จากตัวอย่าง 1 Symbol = 1 Bit เรียกว่า Binary PSK



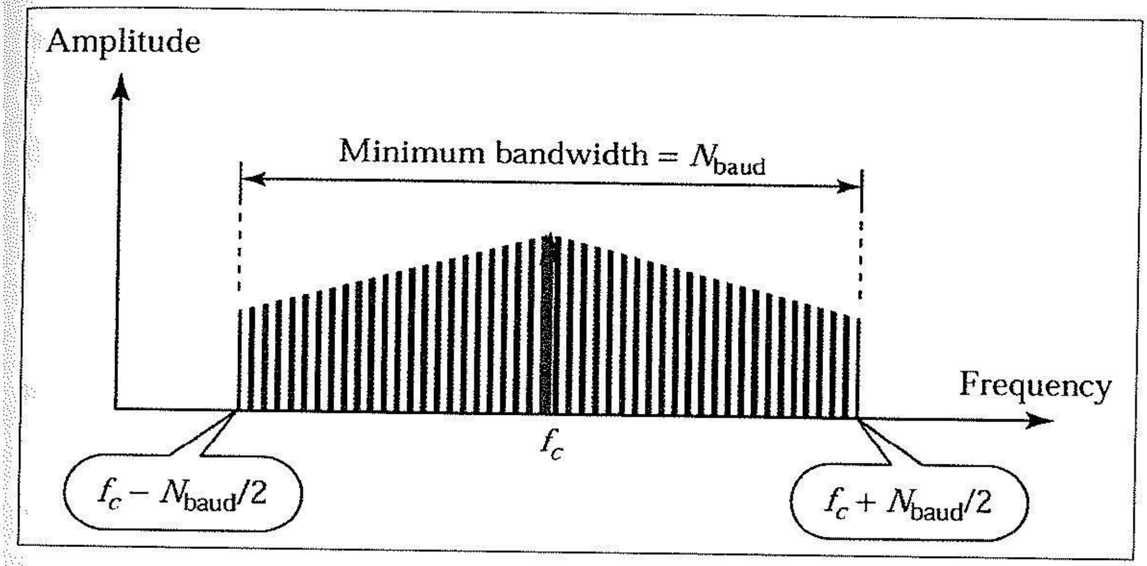
รูปที่ 2.12 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ PSK



รูปที่ 2.13 Constellation Diagram ของการมอดูเลตแบบ PSK ชนิด Binary PSK

สำหรับ Bandwidth ของ PSK มีค่าเท่ากับแถบความถี่ของ ASK เมื่อส่งด้วยอัตรา Baud เท่ากัน และค่าสัมประสิทธิ์ d = 0 นั่นคือ (แต่ Bit Rate ของ PSK จะมากกว่าหรือเท่ากับ ASK เสมอ) ดังสมการที่ (2.23)

$$BW_{PSK} = N_{baud} \tag{2.23}$$



รูปที่ 2.14 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ PSK

2.4 ทฤษฎีของความน่าจะเป็น

ทฤษฎีของความน่าจะเป็นและกระบวนการสุ่มคือเครื่องมือคณิตศาสตร์ที่สำคัญในการออกแบบของระบบสื่อสารดิจิตอล หัวข้อนี้มีความสำคัญในแบบจำลองทางสถิติของแหล่งกำเนิดซึ่งสร้างข้อมูลขึ้นมา ในการเก็บข้อมูลดิจิตอลของแหล่งที่ขาออก ในคุณลักษณะของช่องสัญญาณตลอดถึงข้อมูลดิจิตอลที่ส่ง ในการออกแบบเครื่องรับซึ่งกระบวนการของสัญญาณที่มีลักษณะข้อมูลจากช่องสัญญาณ และในการหาค่าของคุณสมบัติของระบบสื่อสาร ความครอบคลุมของหัวข้อที่น่าใจนี้จะทำการสรุป โดยแสดงจำนวนของคำนิยามและความคิดพื้นฐานในทฤษฎีของความน่าจะเป็นและกระบวนการสุ่ม [13],[14] ซึ่งได้มาจากผลจำนวนมากซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบที่มีประสิทธิภาพและหาค่าคุณสมบัติของระบบสื่อสารดิจิตอลต่อไป

2.4.1 ความหมายของตัวแปรสุ่มและสัญญาณสุ่ม

ตัวแปรสุ่มในเชิงสถิตินั้นไม่ได้หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นได้อย่างอิสระโดยไม่มีกฎเกณฑ์ แต่จะหมายถึงฟังก์ชันซึ่งสร้างค่าจริงออกจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในการทดลอง กล่าวคือ ถ้าให้ a เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในการทดลอง และ $X(a)$ เป็นฟังก์ชันที่จะกำหนดค่าจริงจาก a ค่า $X(a)$ นี้จะถูกเรียกว่าตัวแปรสุ่ม ตัวแปรสุ่มจะมี 2 แบบ คือแบบที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง และแบบที่มีค่าต่อเนื่อง แบบที่มีค่าไม่ต่อเนื่องจะเกิดจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในการทดลองมีจำนวนจำกัด สำหรับกรณีของตัวแปรสุ่มที่มีค่าต่อเนื่องนั้นจะเกิดจากจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในการทดลองมีไม่จำกัด ซึ่งจะส่งผลให้ $X(a)$ มีค่าต่อเนื่อง จากที่อธิบายมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าตัวแปรสุ่มมักจะมีค่าออกมาเป็นเลขจำนวนจริง และในกรณีของสัญญาณสุ่มแบบต่อเนื่องนั้นมักจะใช้ขนาดของสัญญาณเป็นตัวแปรสุ่มโดยตรง

2.4.2 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่อง (Probability function and cumulative distribution function)

ถ้าพิจารณาความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม คือ $P(X = x)$ และ $P(X \le x)$ คือฟังก์ชันความน่าจะเป็น โดยที่ $P(X = x)$ แสดงความน่าจะเป็นทีตัวแปรสุ่มมีค่าเท่ากับ x และ $P(X \le x)$ ซึ่งแสดงผลรวมของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ x จะถูกเรียกว่า ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่อง (Cumulative distribution function หรือ CDF) ซึ่งอาจจะนิยามฟังก์ชันดังกล่าวในรูปต่อไปนี้

$$F_x(x) \triangleq P(X \le x) \qquad -\infty < x < \infty \tag{2.24}$$

และเนื่องจากผลรวมของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มทั้งจะเท่ากับ 1 ดังนั้น $F_x(x)$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ดังนี้

$$0 \le F_x(x) \le 1 \tag{2.25}$$

$$\text{และ} \quad F_x(-\infty) = 0, \qquad F_x(\infty) = 1 \tag{2.26}$$

และเนื่องจาก

$$P(X \le x) + P(X > x) = 1$$

ดังนั้น $P(X > x) = 1 - P(X \le x)$

$$= 1 - F_x(x) \quad (2.27)$$

นอกจากนั้นถ้ารู้ $F_x(x)$ อาจจะหาความน่าจะเป็นที่ X อยู่ระหว่าง a และ b ได้ดังนี้

$$P(X \le a) + P(a < X \le b) + P(X > b) = 1$$

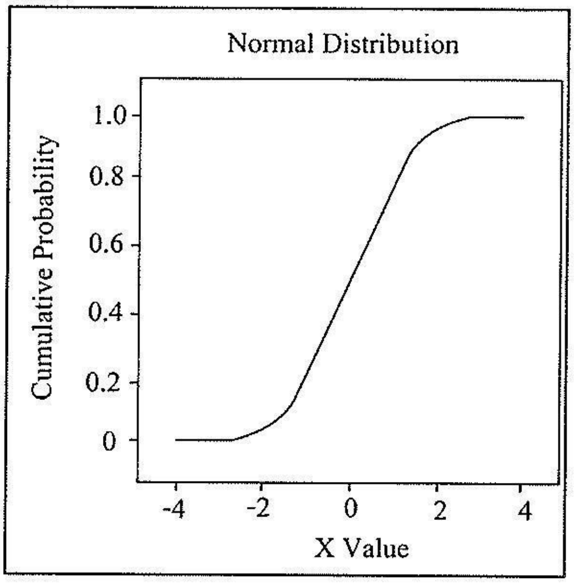
$$P(a < X \le b) = 1 - F_x(a) - [1 - F_x(b)]$$

$$= F_x(b) - F_x(a) \quad (2.28)$$

คุณสมบัติที่สำคัญอีกข้อหนึ่งของ $F_x(x)$ ก็คือฟังก์ชันนี้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพียงอย่างเดียว เมื่อ x มีค่ามากขึ้น

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่องในกรณีที่ X เป็นตัวแปรสุ่มที่มีค่าต่อเนื่อง ในกรณีที่ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากค่าไม่ต่อเนื่อง $x_1, x_2, ..., x_n$ โดยที่ $x_i > x_{i-1}$ ความน่าจะเป็นของ $X = x_i$ ก็คือ $P(X = x_i)$ ในกรณีเช่นนี้ ถ้าจะเชื่อมโยงกับฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่องตามที่ได้นิยามไว้ในสมการ (1) จะสามารถเขียน $F_x(x)$ ในกรณีนี้ได้ดังนี้

$$F_x(x)\begin{cases} 0 & x < x_1 \\ \sum_{i=1}^{k} P(X = x_i) & x_k < x < x_{k+1} \\ 1 & x < x_n \end{cases} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.15 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่อง

2.4.3 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function)

ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นแบบมีค่าต่อเนื่องนั้น ในหลาย ๆ โอกาสจะพบว่าการให้นิยามความหนาแน่นของความน่าจะเป็นนั้นมีประโยชน์มาก นิยามของความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function หรือ PDF) เป็นดังนี้

$$p_x(x) \triangleq \frac{dF_x(x)}{dx} \tag{2.30}$$

ตามนิยามในสมการ (2.30) $p_x(x)$ ก็จะเป็นความน่าจะเป็นที่ X อยู่ระหว่าง $x-dx$ ถึง x จากสมการ (2.30) ถ้าต้องการหาฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่องก็จะทำได้โดยการอินทิเกรตกลับมาเป็น

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^{x} p_x(\alpha)d\alpha \tag{2.31}$$

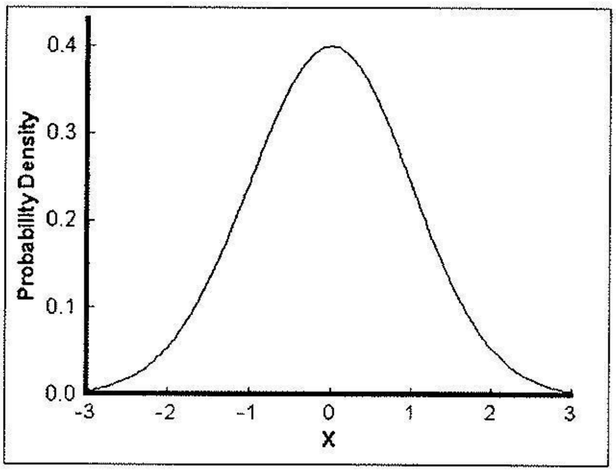
คุณสมบัติของ PDF ที่เห็นได้ชัดจะมีดังนี้ คือ

$$p_x(x) > 0 \tag{2.32}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_x(x)dx = 1 \tag{2.33}$$

$$P(a < X \le b) = F_x(b) - F_x(a) = \int_a^b p_x(x)dx \tag{2.34}$$

รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างของ PDF พื้นที่ใต้เส้นโค้งบริเวณ $a < x \le b$ ก็จะเป็นความน่าจะเป็นรวมในช่วงนั้นตามสมการ



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของ PDF

2.4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม

ในกรณีที่ตัวแปรสุ่ม X เป็นแบบมีค่าไม่ต่อเนื่อง เช่น มีค่าเป็น $x_1, x_2, x_3, \ldots$ และความน่าจะเป็นที่เกิดจากแต่ละค่าเป็น $P(x_1), P(x_2), P(x_3), \ldots$ ตามลำดับ ถ้าทำการทดลอง N ครั้ง โดยที่ N มีค่าใหญ่มาก จะพบว่าโอกาสที่ $X = x_i$ นั้นจะมี $NP(x_i)$ ดังนั้นเมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดนี้มารวมกันก็จะได้เป็น

$$x_1P(x_1)N + x_2P(x_2)N + \ldots = N\sum_i x_iP(x_i) \tag{2.35}$$

และเมื่อนำจำนวนครั้งของการทดลองคือ N มาหารสมการ (2.35) ก็จะได้ค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการทดลองออกมา ค่าเฉลี่ยที่ได้นี้บางครั้งเรียกว่า ค่าคาดคะเนของ X (exceptation of X) และมักจะใช้สัญญลักษณ์เป็น $\overline{X}$ หรือ $E[X]$ ดังนั้นถ้าให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ออกมาเป็น m ก็จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\overline{X} = E[X] = m = \sum_i x_i P(x_i) \tag{2.36}$$

ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นแบบที่มีค่าต่อเนื่องและมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นเป็น $p_x(x)$ จะสามารถหาค่าเฉลี่ยได้โดยคำนึงถึงว่า $P(x_i)$ ในสมการ (2.36) มีค่าเท่ากับ $p_x(x_i)\Delta x$ จากนั้นจึงเปลี่ยนรูปจากการหาผลบวกเป็นการอินทิเกรตดังนี้

$$\overline{X} = E[X] = m = \int_{-\infty}^{\infty} x_i P(x_i) \tag{2.37}$$

ในกรณีทั่วไปที่ $g(X)$ เป็นฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม X จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของ $g(X)$ ได้แบบเดียวกับสมการ (2.37) ดังนี้

$$\overline{g(X)} = E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)p(x)dx \tag{2.38}$$

ในกรณีพิเศษที่ $g(X) = X^n$ ผลที่ได้ในสมการ (2.38) จะถูกเรียกว่าโมเมนต์อันดับที่ n ของตัวแปรสุ่ม (nth moment of the random variable) กรณีที่ n = 1 หรือโมเมนต์อันดับที่ 1 ของตัวแปรสุ่มก็คือค่าเฉลี่ย กรณีที่ n = 2 หรือโมเมนต์อันดับที่ 2 ของตัวแปรสุ่มนี้คือค่ากำลังสองเฉลี่ย (mean square value) จัดว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญมากเพราะจะเชื่อมโยงกับกำลังงานของสัญญาณสุ่ม ซึ่งจะเห็นได้ชัดขึ้นและมีประโยชน์มากในกรณีที่สัญญาณสุ่มนั้นเป็นสัญญาณรบกวน

เนื่องจากตามนิยามของค่าเฉลี่ยตามสมการ (2.38) จะเห็นได้ว่าเป็นการจัดการกับตัวแปรสุ่มแบบเชิงเส้น ดังนั้น ถ้า $g(X) = aX + b$ โดยที่ a,b เป็นค่าคงที่ จากสมการ (2.38) จะได้

$$E[aX + b] = a\overline{X} + b \tag{2.39}$$

และถ้า $a = \overline{X},\ b = 0$ จะได้

$$E[\overline{X}X] = \overline{X}E[X] = \overline{X}^2 = E^2[X] \tag{2.40}$$

ค่าที่ได้ในสมการ (2.40) นี้ก็คือค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง ข้อสังเกตที่สำคัญประการหนึ่งก็คือ ค่าเฉลี่ยยกกำลังสองนี้จะแตกต่างจากค่ากำลังสองเฉลี่ยกล่าวคือ $E^2[X] \neq E[X^2]$ โดยที่ $E[X^2]$ จะมากกว่า $E^2[X]$ เสมอ

2.4.5 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานและแวเรียนซ์ (Standard deviation and Variance)

ความเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าที่ใช้แสดงการกระจายของตัวแปรสุ่มว่าจะมีการกระจายกว้างหรือเกาะกลุ่มแคบ ความเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งมักใช้สัญญลักษณ์ σ นั้นจะมีนิยามดังนี้

$$\sigma^2 \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 p(x)dx = E[(X-m)^2] \tag{2.41}$$

กำลังสองของ σ ที่นิยามตามสมการนี้ เรียกว่าแวเรียนซ์ (Variance) จากนิยามในสมการ (2.41) นี้ จะเห็นได้ชัดว่า ถ้า X กระจายห่างออกจากค่าเฉลี่ย m มากเท่าใด แวเรียนซ์หรือความเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะสูงตามไปด้วย ดังนั้นถ้ากล่าวว่า ตัวแปรสุ่มชุดหนึ่งมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือแวเรียนซ์ต่ำกว่าอีกชุดหนึ่ง ก็แสดงว่าตัวแปรสุ่มชุดแรกมีการกระจายออกจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่าชุดหลัง

เมื่อทำการพิจารณาแวเรียนซ์ในสมการ (2.41) โดยแตกเทอมทางขวามือของสมการจะได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E[X^2 - 2mX + m^2] \\ &= E[X^2] - m^2 = \overline{X^2} - m^2 \end{aligned} \tag{2.42}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแวเรียนซ์จะหาได้จากกำลังสองเฉลี่ยลบด้วยค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง และในกรณีที่ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ σ^2 จะเท่ากับ $E[X^2]$

ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ค่าแวเรียนซ์ที่นิยามไว้ในสมการ (2.41) ก็จะเปลี่ยนรูปเป็นผลบวกดังนี้คือ

$$\sigma_x^2 = \sum_i (x_i - m)^2 P(x_i) \tag{2.43}$$

2.4.6 ฟังก์ชันการกระจายสะสมเติมเต็ม (Complement Cumulative Distribution Function: CCDF)

ความต้องการสำหรับฟังก์ชันการกระจายสะสมเติมเต็ม เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อทำการจัดการสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันในระบบ Spread spectrum เช่น IS-95 cdma 2000 และ WCDMA เพราะชนิดของสัญญาณเหล่านี้คล้ายสัญญาณรบกวน (noiselike) กราฟเส้นโค้งของ CCDF [15] สามารถหาลักษณะพิเศษที่เป็นประโยชน์ของกำลังสัญญาณสูงสุด CCDF คือวิธีทางสถิติที่แสดงจำนวนของเวลาสัญญาณที่ใช้บนระดับกำลังอื่น ๆ ในทางคณิตศาสตร์เริ่มต้นของกราฟเส้นโค้ง CCDF คือฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็น (PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงความน่าเป็นแบบสะสม (CDF) โดยอธิบายในความรู้เบื้องต้นของความน่าจะเป็นและวิธีทางสถิติ

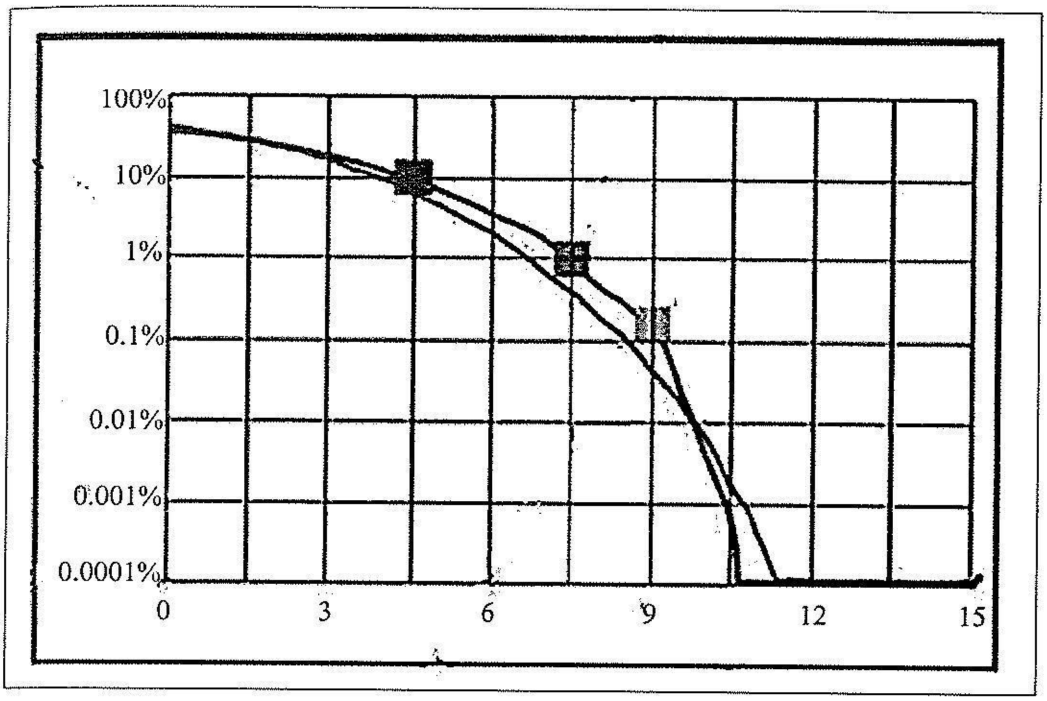
การวัดแบบ CCDF คือทางที่ดีที่จะหาสถิติกำลังของลักษณะพิเศษทั้งหมดของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน รูปแบบมอดูเลชันสามารถเปรียบเทียบผ่าน CCDF ในความหนาแน่นสัญญาณบนส่วนประกอบเช่น เครื่องขยายสัญญาณ กราฟเส้นโค้ง CCDF สามารถใช้หาผลกระทบของการกรองของสัญญาณจากกราฟเส้นโค้ง CCDF ของสัญญาณ multitone ซึ่งในการออกแบบเครื่องขยายสัญญาณจะรู้ค่าจริงที่มากเท่าไรที่สามารถใช้ได้สำหรับกำลังสูงสุดเพื่ออัด (compression) ได้ กราฟเส้นโค้ง CCDF คือวิธีของกำลังที่แสดงและลักษณะพิเศษที่ทำให้เกิดปัจจัยหลากหลายของผลกระทบขนาดสูงสุด ของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน

หมายเลขของรหัสที่ใช้งานในสัญญาณ CDMA สำคัญมีผลกระทบกับสถิติของกำลังสัญญาณ นอกจากนั้น การรวมความแตกต่างของรหัสที่ใช้งานให้ความแตกต่างกำลังของกราฟเส้นโค้ง CCDF เพราะผลของรหัส Orthogonal สัญญาณหลายพาหะด้วยเหมือนกันเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนที่สำคัญของกราฟเส้นโค้ง CCDF คล้ายกับผลกระทบของสัญญาณ multitone กราฟ CCDF มีความจำเป็นในการออกแบบและทดสอบเครื่องมือในระบบการสื่อสาร 3G

บางครั้ง การสนับสนุนที่สำคัญส่วนมากของกราฟเส้นโค้ง CCDF ในการติดตั้งกำลังสัญญาณสำหรับตัวผสมสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ เครื่องขยายสัญญาณ และส่วนประกอบอื่น ๆ การวัด CCDF สามารถช่วยหาจุดทำงานที่ดีที่สุดสำหรับองค์ประกอบ

- กราฟเส้นโค้ง CCDF

จากรูปที่ 2.20 แสดงการพล็อตค่ากำลังต่อเวลาของสัญญาณ Ninc-channel IS-95 ซึ่งยากที่กำหนดปริมาณจำนวนเพราะมันเป็นสัญญาณสุ่มโดยธรรมชาติ เพื่อตัดข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากสัญญาณรบกวน ดังนั้นต้องการลักษณะทางสถิติของระดับกำลังในสัญญาณนี้ และกราฟเส้นโค้ง CCDF จะให้สิ่งเหล่านั้น



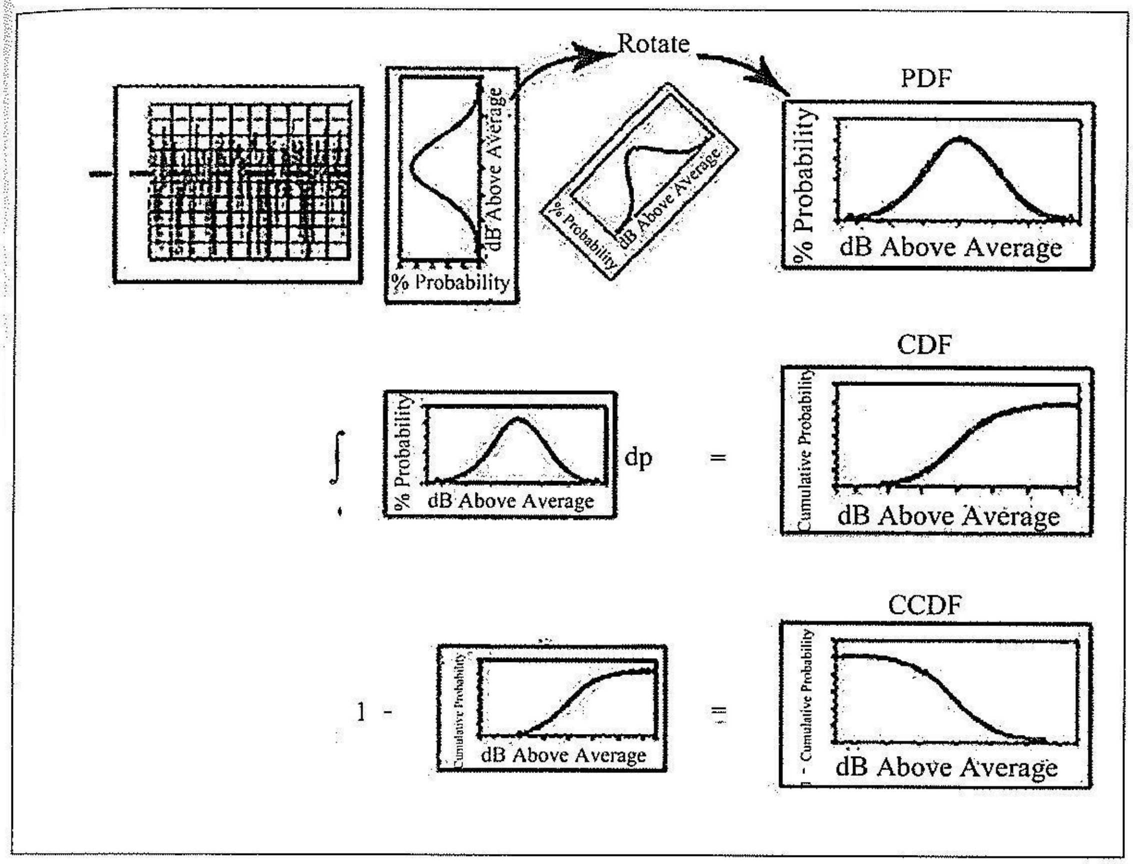
รูปที่ 2.17 กราฟเส้นโค้ง CCDF

กราฟเส้นโค้ง CCDF แสดงเวลามากเท่าไหร่ที่สัญญาณใช้หรือมากกว่าระดับกำลังที่ให้ระดับกำลังแสดงในรูปของ dB เกี่ยวกับกำลังเฉลี่ย สำหรับตัวอย่างแต่ละเส้นของรูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.17 แทนระดับกำลังกำลังเฉพาะมากกว่าสัญญาณเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นของเวลาสัญญาณที่ใช้หรือมากกว่าแต่ละเส้นกำหนดความน่าจะเป็นสำหรับระดับกำลังเฉพาะ กราฟเส้นโค้ง CCDF ดังแสดงในรูปที่ 2.17 คือการพล็อตของความสัมพันธ์ระดับกำลังต่อความน่าจะเป็น

- **การคำนวณของกราฟเส้นโค้ง CCDF**

การคำนวณของ CCDF แสดงในรูปที่ 2.18 โดย PDF ได้มาจากกราฟระดับสัญญาณต่อเวลาดังแสดงในกราฟสองรูปบน เพื่อให้ได้ CDF ทำได้โดยการคำนวณอินทิเกรต PDF ดังแสดงในกราฟสองรูปกลาง สุดท้ายทำการลบ CDF จาก 1 กลายเป็นผลของ CCDF ดังนั้น CCDF คือ ส่วนประกอบของ CDF (CCDF = CDF - 1)

ในการสร้างกราฟเส้นโค้ง CCDF ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แกน y คือการผกผันเป็นรูปแบบของลอการิทึม และแกน x เริ่มที่ 0 dB โดยที่ขนาดของ CCDF มีค่าสูงสุด ส่วนค่าของ CDF จะมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.18 การคำนวณกราฟเส้นโค้ง CCDF

2.5 สรุป

สำหรับการออกแบบระบบการสื่อสารสัญญาณวิทยุนั้น จำเป็นต้องศึกษาการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่สถานที่หรือสภาพแวดล้อม ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเรียนรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ ผลกระทบหลักของการแพร่กระจายคลื่น รวมทั้งแบบจำลองต่าง ๆ ที่มีการทำวิจัยกันมา และยังมีส่วนของสายอากาศอีกส่วนหนึ่งที่จำเป็นในการสื่อสารของสัญญาณวิทยุ ตลอดจนทั้งข้อมูลที่ใช้ในการส่งสัญญาณที่เป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งต้องทำการศึกษาส่วนของการมอดูเลตชันด้วยเพื่อให้เข้าใจลักษณะของสัญญาณข้อมูลดิจิตอล และทำการวิเคราะห์สัญญาณข้อมูลดิจิตอลออกมาในข้อมูลทางสถิติที่ใช้ความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์ ซึ่งหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในบทนี้จะใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณข้อมูลออกมาในรูปแบบของความน่าจะเป็น เพื่อจะได้นำไปประยุกต์และพัฒนาใช้กับระบบการสื่อสารสัญญาณวิทยุต่อไป

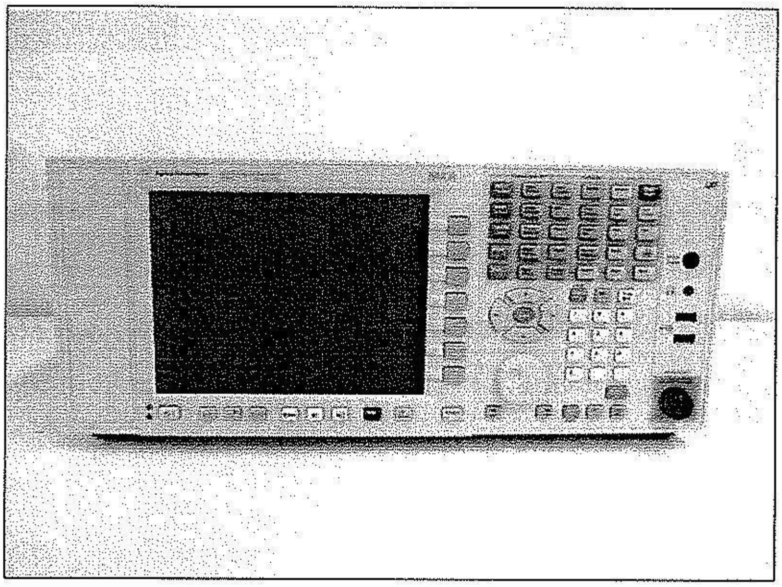
บทที่ 3
ระบบการวัดและเหตุการณ์ของการวัด

3.1 กล่าวนำ

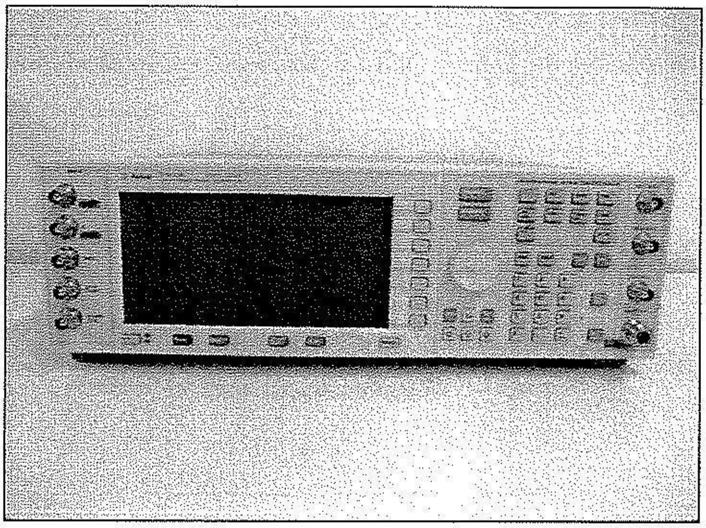
จากระบบการสื่อสารโดยทั่วไป จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก คือ เครื่องส่งและเครื่องรับที่ใช้ในการส่งสัญญาณ เมื่อทำการส่งสัญญาณออกมาผ่านสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ ทำให้สัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเกิดขึ้น โดยสัญญาณที่รับได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงระบบของการวัด และการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมสภาพแวดล้อมบนท้องถนน และในส่วนของสภาพแวดล้อมนั้นจะอธิบายทั้งเหตุการณ์ของการวัด รวมถึงสภาพแวดล้อมบนท้องถนนที่เลือกใช้ในการทดลองวัด

3.2 ระบบการวัดและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด

ระบบการทดลองประกอบด้วย เครื่องส่ง เครื่องรับ และกระบวนการของสัญญาณ โดยสัญญาณที่ใช้ทดลองคือ สัญญาณมอดูเลตแบบ BPSK โดยใช้เครื่องส่งของ Agilent signal generator model E4433B รูปที่ 3.1 โดยสัญญาณที่ใช้การส่งคือ สัญญาณมอดูเลตแบบ BPSK ซึ่งเป็นสัญญาณรูปแบบหนึ่งของ PSK ซึ่งทำการตั้งค่าของสัญญาณ ให้มีค่าอัตราเร็วของ symbol ที่ 50 ksps และทำการมอดูเลตที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้ แบนวิดท์ของสัญญาณสำหรับ BPSK ที่ $\alpha = 0.5$ raise cosine filter คือประมาณ 75 kHz สัญญาณถูกส่งโดยใช้สายอากาศแบบไดโพล ซึ่งมีอัตราขยาย 4 dB กำลังของสัญญาณส่งตั้งค่าที่ -10 dBm คงที่ ต่อเข้ากับ power amplifier ที่มีอัตราขยาย 23 dB และเครื่องรับประกอบด้วย Agilent N9020A MXA signal analyzer รูปที่ 3.2 ต่อกับสายอากาศภาครับผ่าน low noise amplifier ที่มีอัตราขยาย 28 dB สัญญาณเชิงซ้อนที่รับได้ถูกดีมอดูเลตโดยโปรแกรม Agilent 89600 vector signal analyzer ซึ่งติดตั้งใน Agilent N9020A ซึ่งมีค่าอัตราเร็วบิต 50 ksps และได้ทำการมอดูเลตที่ความถี่ 2.45 GHz และกำลังของสัญญาณส่งมีค่า -10 dBm



รูปที่ 3.1 เครื่องส่ง Agilent signal generator model E4433B



รูปที่ 3.2 เครื่องรับ Agilent N9020A MXA signal analyzer

เครื่องรับประกอบด้วย Agilent N9020A MXA signal analyzer ต่อกับสายอากาศภาครับ สัญญาณเชิงซ้อนที่รับได้ถูกดีมอดูเลตโดยโปรแกรม Agilent 89600 vector signal analyzer ซึ่งติดตั้งใน Agilent N9020A โดยโปรแกรมได้สัญญาณที่รับในรูปของ

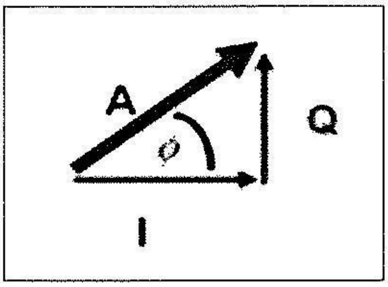
$$y(t) = i(t) + jq(t) \tag{3.1}$$

สัญญาณที่รับเป็นเวลา 2 วินาที และ แซมเปิลที่ 320 ksps เนื่องจากเหตุนี้ ทำให้จำนวนของแซมเปิล คือ 640000 แซมเปิลต่อการวัดหนึ่งครั้ง สำหรับสัญญาณ BPSK โดยสัญญาณแซมเปิลที่รับได้จะถูกเซฟลงในหน่วยความจำของ Agilent N9020A และสัญญาณจะถูกนำไปดำเนินการวิเคราะห์ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเครื่องส่งสัญญาณ ผ่านช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมบนท้องถนน จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการวัดนี้มาทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการแสดงค่าของการวัดออกเป็นกราฟฮิสโตแกรมและกราฟความน่าจะเป็น เพื่อให้แสดงข้อมูลที่เข้าใจง่ายของช่องสัญญาณที่แสดงขนาดของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$r(t) = \sqrt{i(t)^2 + q(t)^2} \tag{3.2}$$

$$\phi = tan^{-1} \frac{q(t)}{i(t)} \tag{3.3}$$

ซึ่ง I คือ Amplitude of the "In-Phase Carrier" และ Q คือ Amplitude of the "Quadrature Carrier" และ ค่า ϕ คือมุมของสัญญาณ I และ Q



รูปที่ 3.3 IQ Modulation

ซึ่งการวัดหาขนาดและเฟสของสัญญาณ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยที่ A แทนขนาด และ ϕ แทนมุมเฟสของสัญญาณ IQ Modulation

3.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปย่าน 2.45 GHz

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์เลือกใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยม ออกแบบสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 แบบสองหน้า ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบได้แก่ ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซับสเตรท (ε_r) ความสูงของไดอิเล็กตริกซับสเตรท (h) เป็นต้น การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ ได้แบ่งออกเป็นแบบการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและการโพลาไรซ์แบบวงกลม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยม ทำงานที่ย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz โดยใช้แผ่น FR-4 แบบสองหน้า ซึ่งมีค่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.5 และมีความหนาของไดอิเล็กตริก h เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ทำการป้อนโดยการใช้ไมโครสตริป สามารถหาความกว้าง (a) และความยาว (b) ของสายอากาศแพตช์สี่เหลี่ยมได้จากสมการ (2.46) และ สมการ (2.47)

หาความกว้าง (a) จาก $a = \lambda_d$

$$a = \lambda_d = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_r}}$$

$$a = \frac{3\times10^8}{2.45\times10^9\times\sqrt{4.5}}$$

$a =$ 64.28 มิลลิเมตร

หาความยาว (b) จาก $b = 0.49\lambda_d \approx \frac{\lambda_d}{2}$

$b =$ 32.14 มิลลิเมตร

จากนั้นคำนวณหาความกว้าง (W) และความยาว (l) ของไมโครสตริปที่จะป้อนจาก FR-4 แบบสองหน้าที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) เท่ากับ 50 โอห์ม ที่ความยาว $\lambda_d/4$ ความถี่

ที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 2.45 GHz (ε_r) เท่ากับ 4.5 และ (h) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร พิจารณาเงื่อนไขของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเนื่องจากค่า Z_0 เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่ง $Z_0 \geq 23.6$ โอห์ม สอดคล้องกับกรณีที่ 2 คำนวณหาค่าจากสมการ (2.49)

หาความกว้าง (W) จาก $\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$

เมื่อ $A = \frac{Z_0}{60}\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right)$

$W = 2.83$ มิลลิเมตร

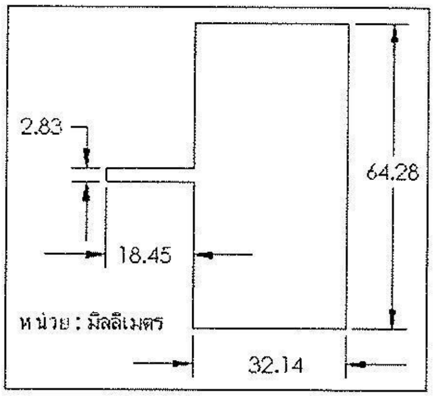
คำนวณหาความยาวของไมโครสตริปที่ความยาว $\lambda_d / 4$ จากสมการ (2.51)

หาความยาว (l) จาก $l = \frac{\lambda_d}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_{re}}}$

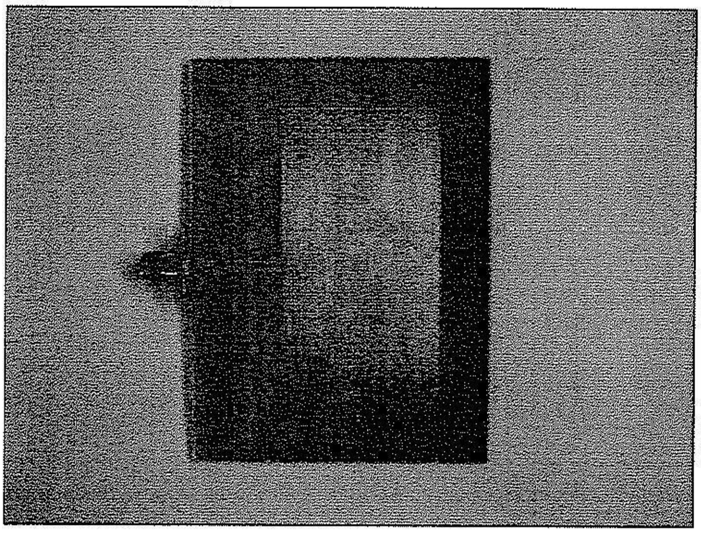
เมื่อ $\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left[1 + \frac{12h}{W}\right]^{-1/2}$

$l = 18.45$ มิลลิเมตร

ทำการป้อนด้วยไมโครสตริปขนาด 50 โอห์ม ตามที่คำนวณได้ให้กับสายอากาศแพตช์สี่เหลี่ยมจะได้ขนาดต่างๆ ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 แสดงรูปถ่ายของสายอากาศไมโคร-สตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยม



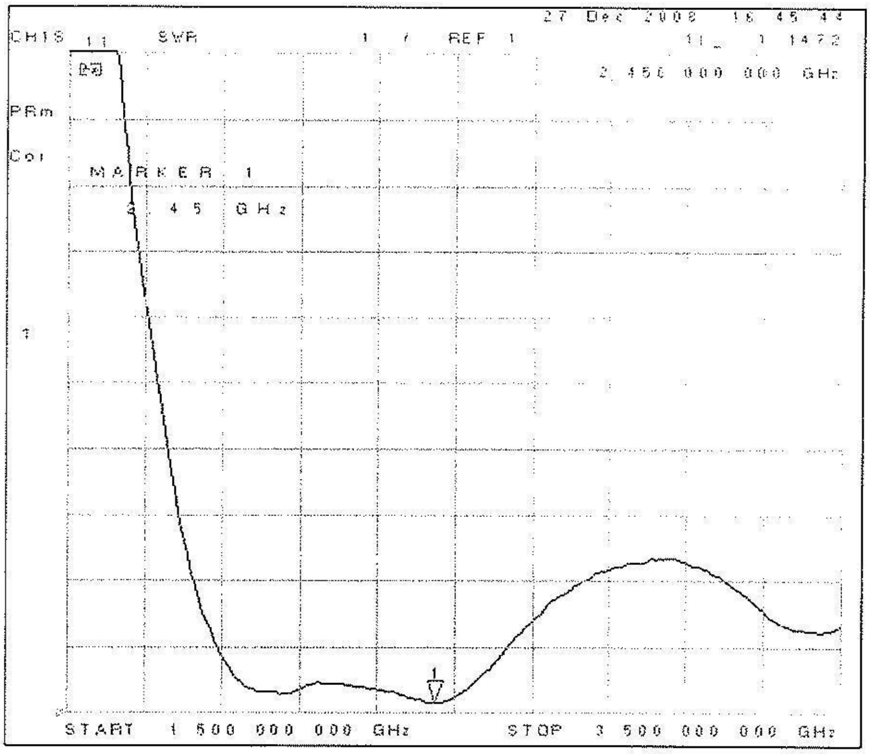
รูปที่ 3.4 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยม



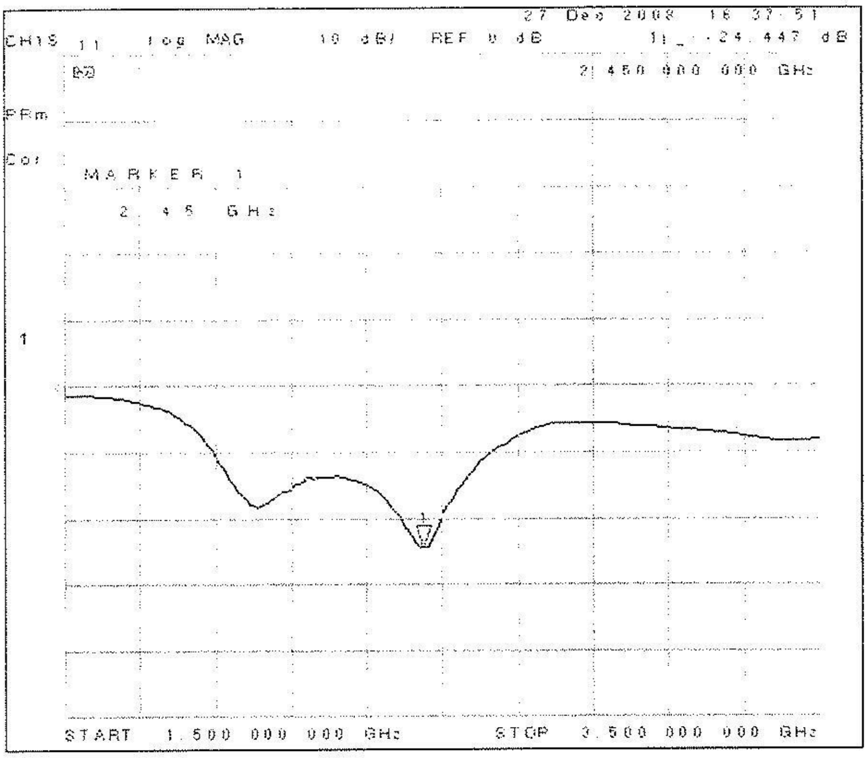
รูปที่ 3.5 รูปถ่ายสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยม

และทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคือ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงการแมตช์อินพุตอิมพีแดนซ์ โดยค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้นสามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ ถ้าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตช์ที่สมบูรณ์ นั่นคือ กำลังงานอินพุตที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา แต่ถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับอนันต์หมายความว่า สายอากาศนั้นเกิดการไม่แมตช์อย่างยิ่งทำให้กำลังงานที่ส่งออกไปจากสายอากาศเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ซึ่งอาจทำให้เครื่องส่งเสียหายได้ ดังนั้นในการวัดทดสอบสายอากาศจึงมีการกำหนดค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งให้มีค่าเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า ซึ่งจากรูป 3.6 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งในย่านความถี่ 2 GHz ถึง 3

GHz ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่า 2 หรือพิจารณาการแมตช์อินพุตอิมพีแดนซ์ จากค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ซึ่งสามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (Negative infinity : dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าสายอากาศไม่แมตช์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่าสายอากาศมีการแมตช์ที่สมบูรณ์ดีที่สุด (รังสรรค์ และ ชูวงค์, ม.ป.ป) ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ จะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ที่ดี รูปที่ 3.7 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าน้อยกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz



รูปที่ 3.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.7 ค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับจากการทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

โดยจากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์นี้สามารถหาความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\% \text{ ความกว้างแถบ} = \frac{f_{high} - f_{low}}{f_c} \times 100 \tag{3.4}$$

หรือ

$$\% \text{ ความกว้างแถบ} = \left(2\frac{f_{high} - f_{low}}{f_{high} + f_{low}} \right) \times 100 \tag{3.5}$$

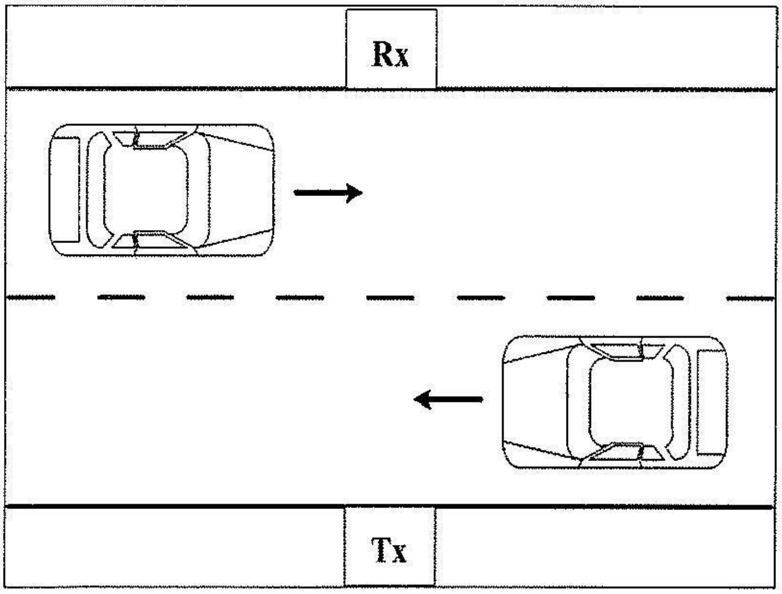
เมื่อ f_{high} คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้ f_{low} คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้ และ f_c คือค่าความถี่กึ่งกลางของความกว้างแถบนั้น ๆ ดังนั้น จากรูปที่ 3.7 สายอากาศจะมีความกว้างแถบประมาณ 15.56 % ที่ค่าความถี่กึ่งกลาง 2.45 GHz ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าสายอากาศต้นแบบมีแบนด์วิดธ์มากกว่าค่าแบนด์วิดธ์ที่ต้องการประมาณ 11.47 %

3.4 เหตุการณ์ของการวัด

เมื่อได้ทำการทดสอบสัญญาณ ผลการทดสอบเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด นั่นคือสามารถนำไปใช้งานได้แล้ว หลังจากนั้นจะเป็นการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด จึงได้มีการทดลองทั้งในสภาพแวดล้อมสภาพแวดล้อมบนถนน โดยการวัดสัญญาณกระทำการวัดในถนนที่มีสภาพการจราจรต่าง ๆ กัน โดยมีการศึกษาใน 2 รูปแบบ

3.4.1 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน

ซึ่งรูปแบบที่หนึ่งคือการตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับไว้ที่ข้างถนน โดยระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีระยะประมาณ 5 เมตร ความสูงของสายอากาศสูงประมาณ 0.5 เมตร ดังรูปที่ 3.8

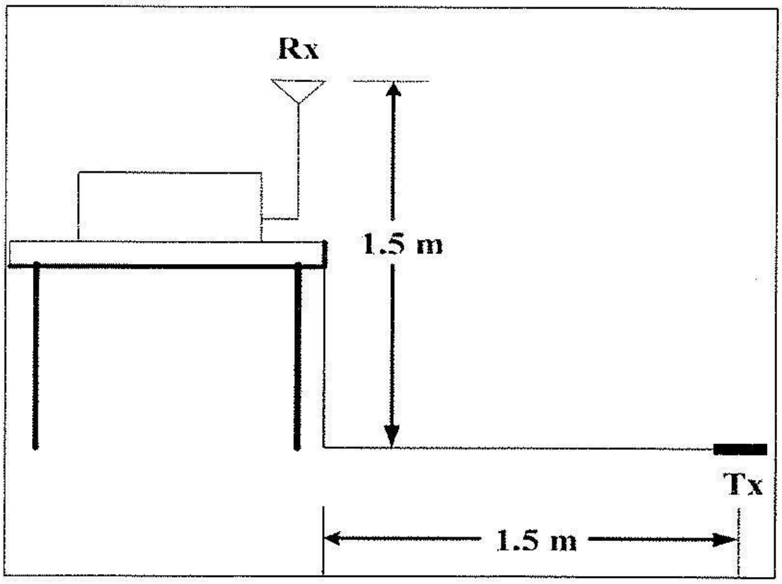


รูปที่ 3.8 แบบจำลองการวัดที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน

รูปที่ 3.9 การวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน

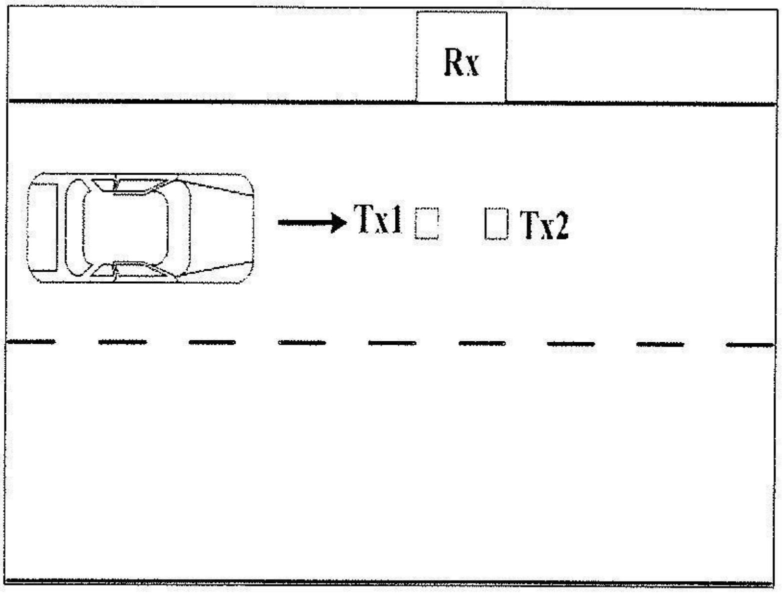
3.4.2 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่บนถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน

รูปแบบที่สองคือ การติดตั้งเครื่องส่งไว้ที่กลางถนน 2 เครื่อง โดยที่สายอากาศของภาคส่งของทั้ง 2 เครื่อง ส่วนเครื่องรับติดตั้งไว้ที่ข้างถนน โดยความสูงของสายอากาศภาครับสูงประมาณ 1.5 เมตร ดังรูปที่ 3.10 โดยทำการพิจารณาใน 2 กรณี

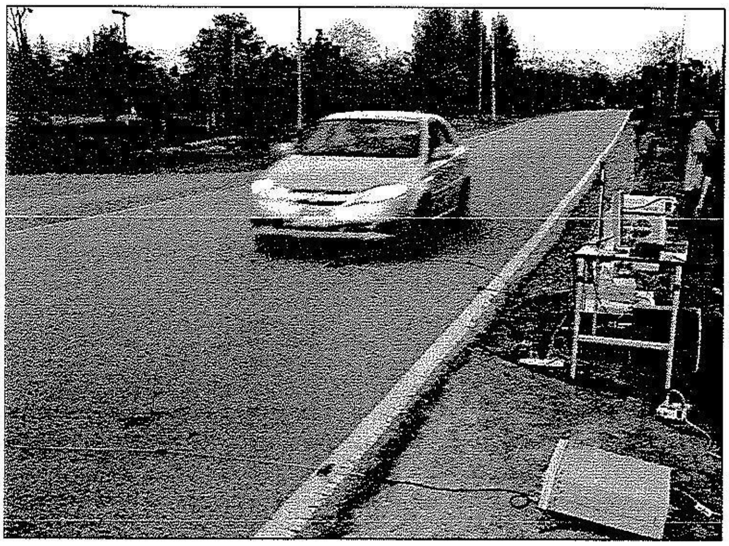


รูปที่ 3.10 แบบจำลองการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่บนถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน

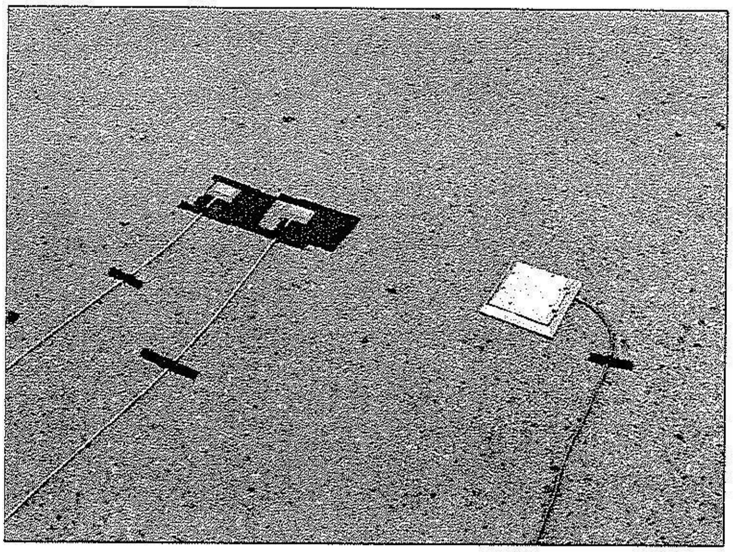
กรณีแรกจะเป็นการติดตั้งให้สายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องมีระยะห่างกัน โดยเริ่มจากระยะห่างที่ $\lambda/2$ และทำการเพิ่มระยะห่างขึ้นทีละ $\lambda/2$ ซึ่งจะมีการวัดที่ระยะห่างเท่ากับ $\lambda/2$, λ, $3\lambda/2$, 2λ, $5\lambda/2$, 3λ, $7\lambda/2$ และ 4λ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบจำลองการวัดบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่อง เริ่มที่ระยะ $\lambda/2$

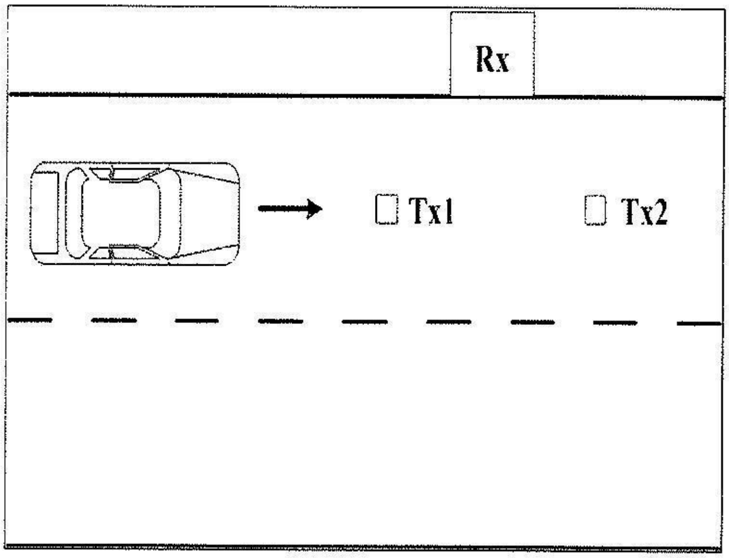


รูปที่ 3.12 การวัดจริงบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะ $\lambda/2$

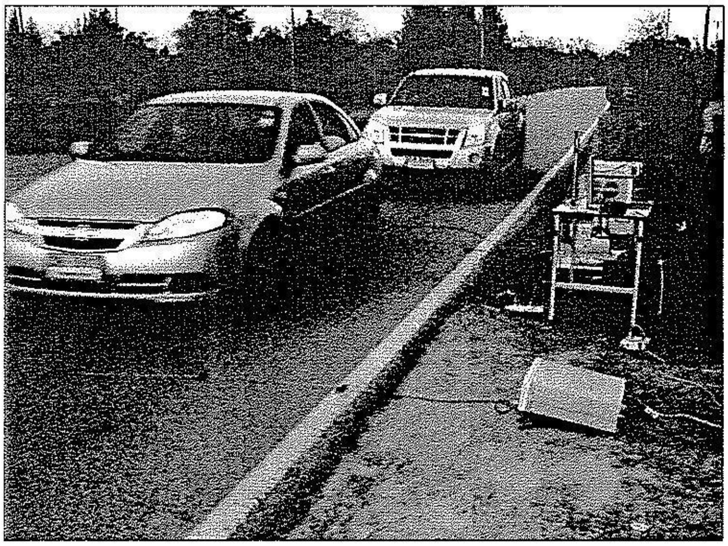


รูปที่ 3.13 การวางสายอากาศสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะห่าง $\lambda/2$

กรณีที่สองจะเป็นการติดตั้งให้สายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องมีระยะห่างกัน โดยเริ่มจากระยะห่างที่เท่ากับขนาดความยาวของรถยนต์และทำการเพิ่มระยะห่างขึ้นทีละ $\lambda/2$ ซึ่งจะมีการวัดที่ระยะห่างเท่ากับ $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$, 2λ , $5\lambda/2$, 3λ , $7\lambda/2$ และ 4λ เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แบบจำลองการวัดบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่อง เริ่มที่ระยะเท่าตัวรถ



รูปที่ 3.15 การวัดจริงบนถนนที่ระยะห่างของสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่งทั้ง 2 เครื่องเริ่มที่ระยะเท่าตัวรถ

โดยทั้งสองเหตุการณ์ได้จำลองการทดลองขึ้น โดยมีการแยกออกเป็น 3 กรณี โดยกรณีแรกเป็นกรณีของรถเก๋ง กรณีที่สองคือรถกระบะ และกรณีที่สามคือรถที่วิ่งตามกันมา ซึ่งทั้งสามกรณีจะวิ่งคร่อมสายอากาศภาคส่งของเครื่องส่ง โดยมีการกำหนดความเร็วที่ใช้ในทุกกรณีที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงระบบการวัดและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดและสภาพแวดล้อม รวมทั้งเหตุการณ์ของการทดลองวัด โดยได้กล่าวถึงในรายละเอียดของระบบการวัดและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด และได้กล่าวถึงสภาพแวดล้อมและเหตุการณ์ของการทดลองวัด โดยสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองวัดได้กล่าวถึง สภาพแวดล้อมของถนน รวมถึงเหตุการณ์ของแต่ละกรณี ที่แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองวัด

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน

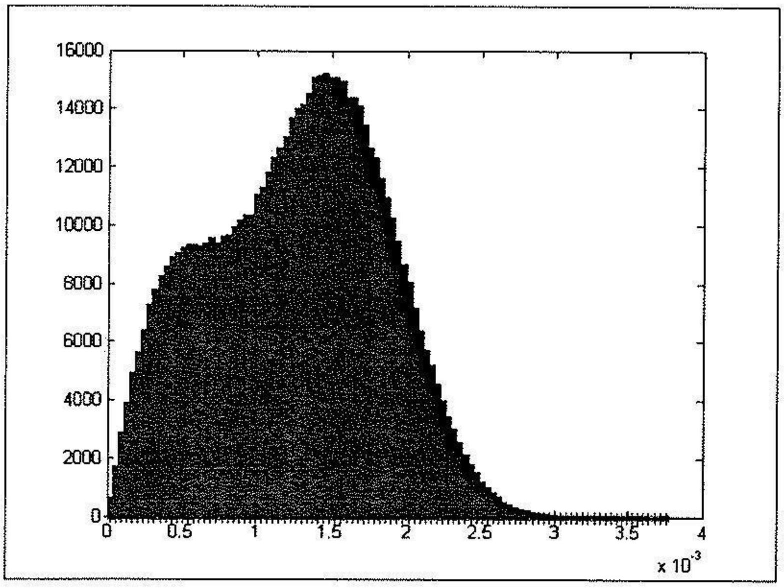
4.1 กล่าวนำ

จากการกล่าวถึงการทดลองวัดสัญญาณ ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงการนำทฤษฎีและเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมาเพื่อใช้ในการทดลองวัด โดยจะทำการกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ผลของสัญญาณออกมาในรูปแบบของความน่าจะเป็นตามเหตุการณ์ที่ได้กำหนดมา และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด

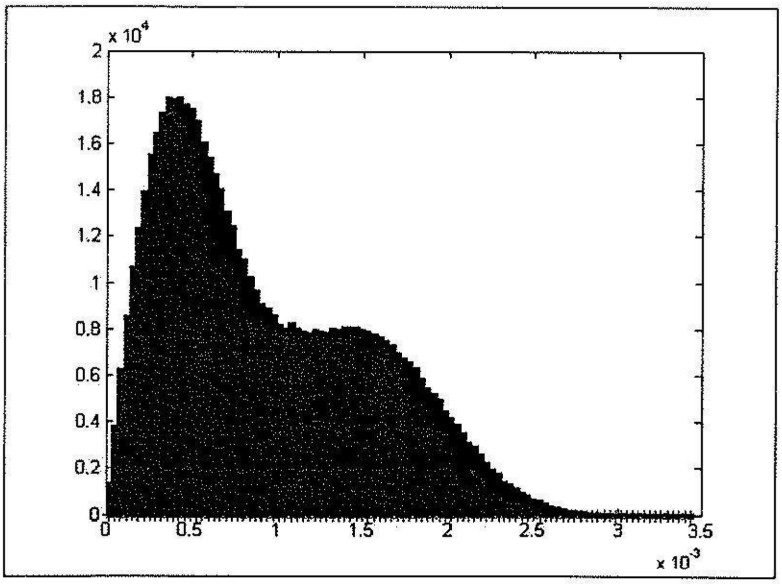
4.2 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน

ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.1 จะเป็นกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ในกรณีรถจักรยานยนต์ผ่าน ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.003754 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001472 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง รูปกราฟฮิสโตแกรม รูปที่ 4.2 จะเป็นกรณีของรถยนต์ผ่าน จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.003439 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0004506 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง กราฟฮิสโตแกรม รูปที่ 4.3 จะเป็นของกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.003362 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001352 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง และกราฟฮิสโตแกรม รูปที่ 4.4 จะเป็นของกรณีรถยนต์วิ่งสวนกับรถยนต์ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่

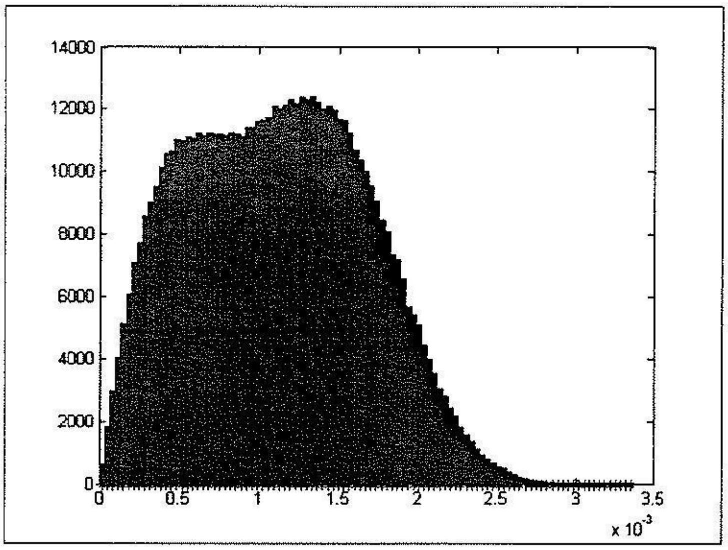
ในช่วง 0.000000 ถึง 0.003440 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0004151 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



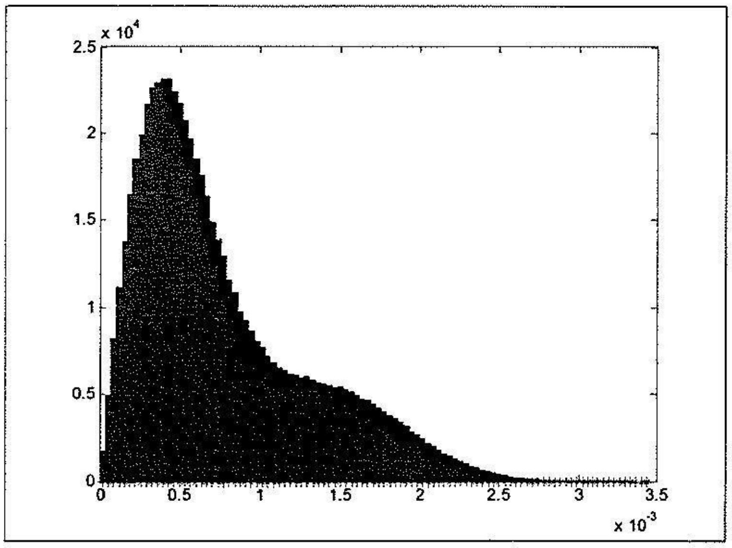
รูปที่ 4.1 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถจักรยานยนต์ผ่าน



รูปที่ 4.2 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถยนต์ผ่าน



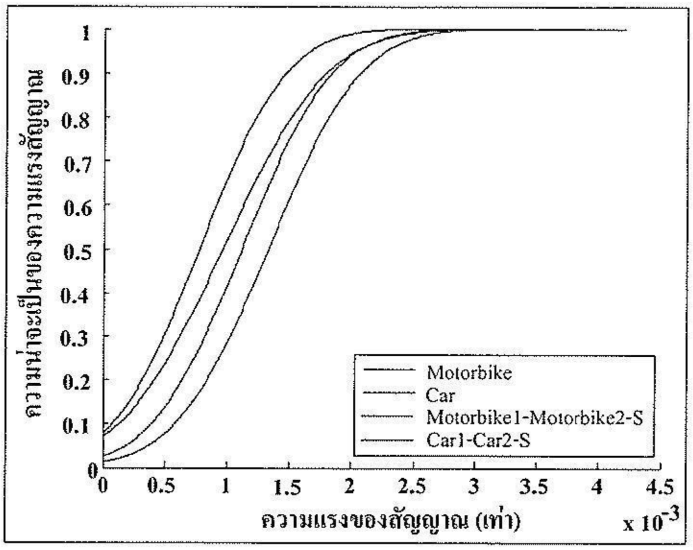
รูปที่ 4.3 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์



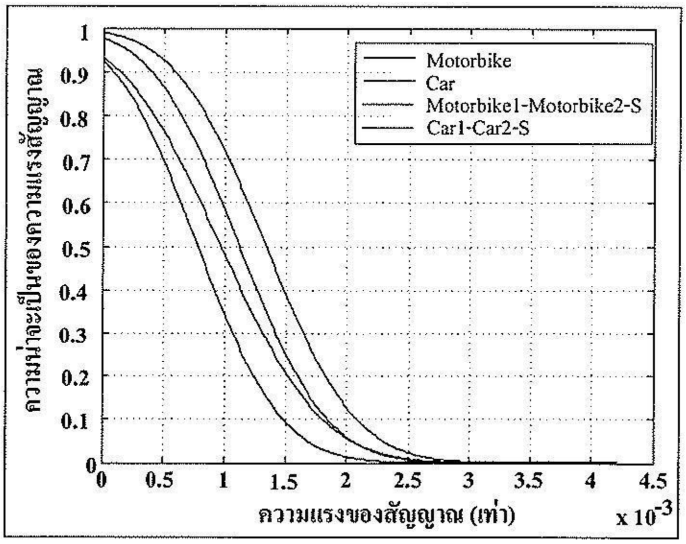
รูปที่ 4.4 กราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถยนต์วิ่งสวนกับรถยนต์

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.5 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรง

สัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณของกรณีรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 0.00059 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง กรณีต่อมา ค่าความแรงสัญญาณของกรณีรถยนต์ผ่าน มีค่าเท่ากับ 0.00013 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง กรณีที่สาม ค่าความแรงสัญญาณของกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 0.00036 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง และกรณีสุดท้ายคือกรณีรถยนต์วิ่งสวนกับรถยนต์ ค่าความแรงสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 0.00009 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



รูปที่ 4.5 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของรถชนิดต่าง ๆ



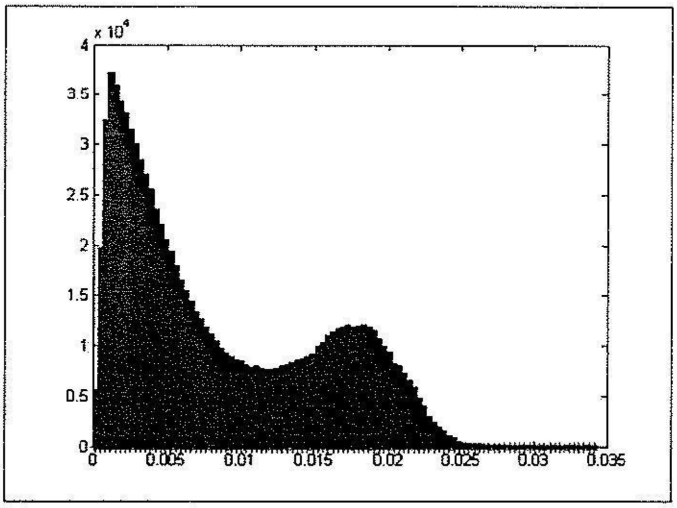
รูปที่ 4.6 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของรถชนิดต่าง ๆ

4.3 เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่ที่พื้นถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน

4.3.1 ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

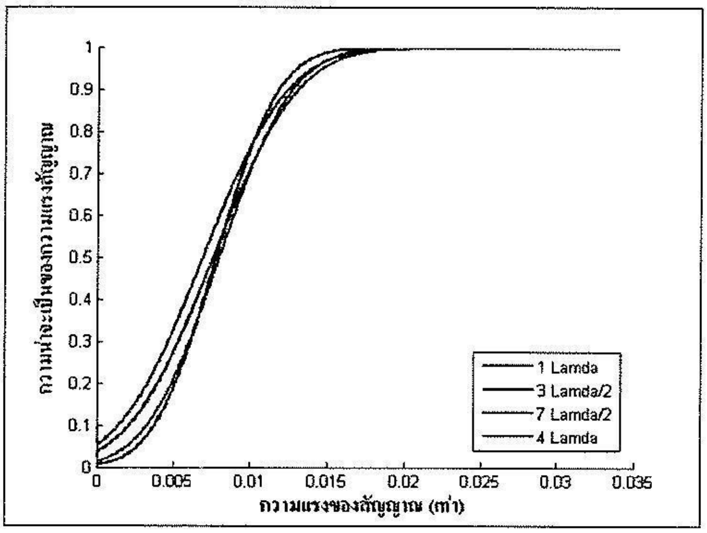
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.7 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.03414 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001376 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



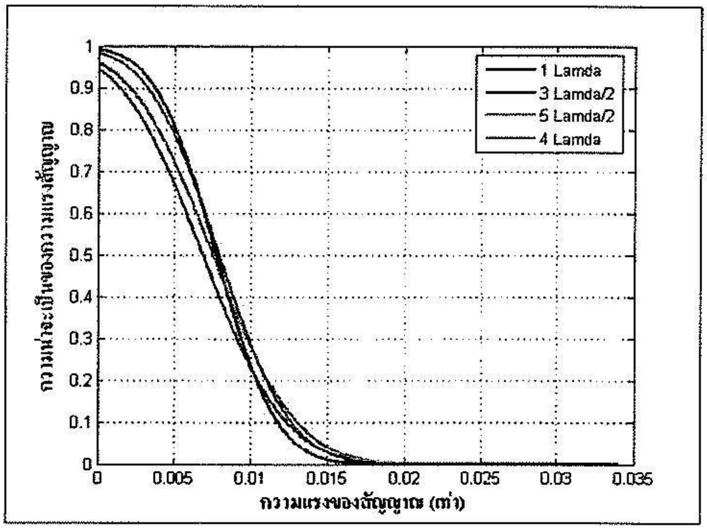
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.8 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรง

สัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0014 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0037 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.002 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0032 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



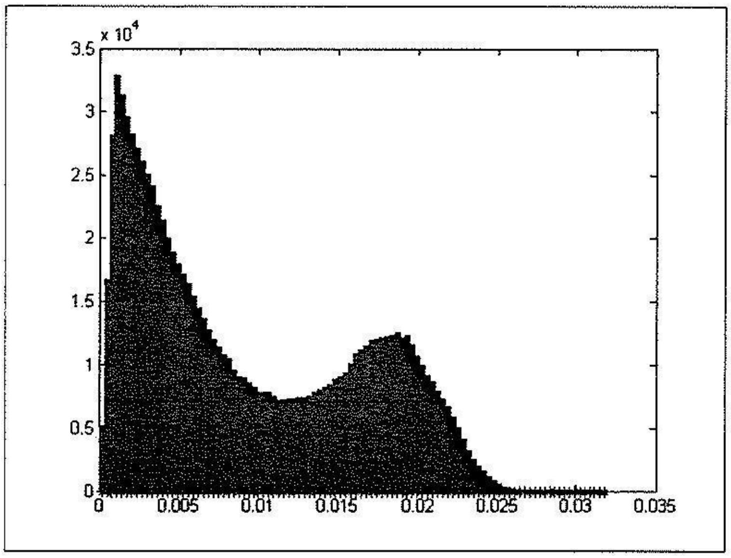
รูปที่ 4.8 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.9 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

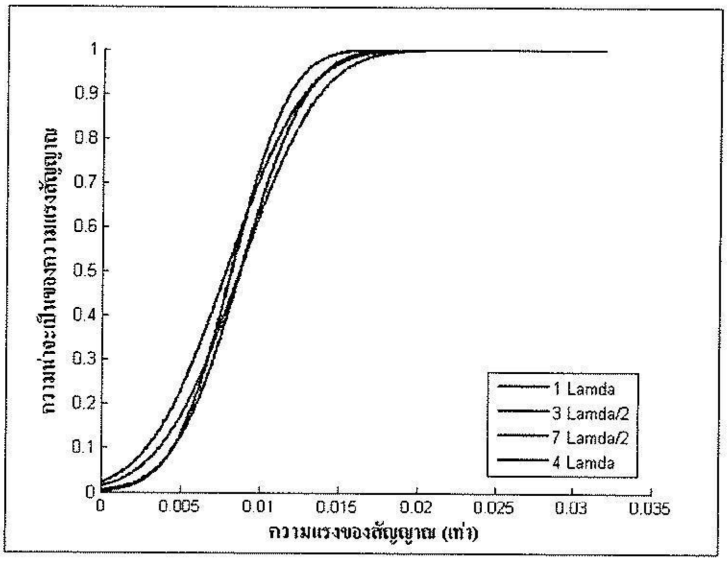
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.10 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.03183 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001285 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



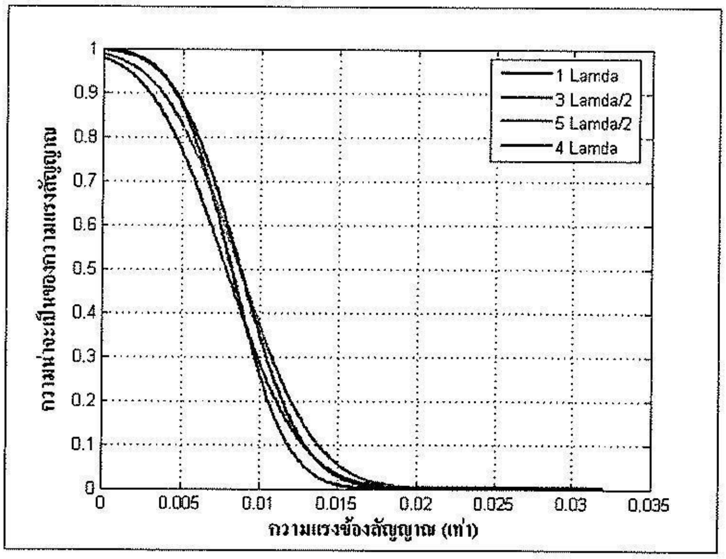
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.11 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟ

ความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0029 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0045 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0036 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0046 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



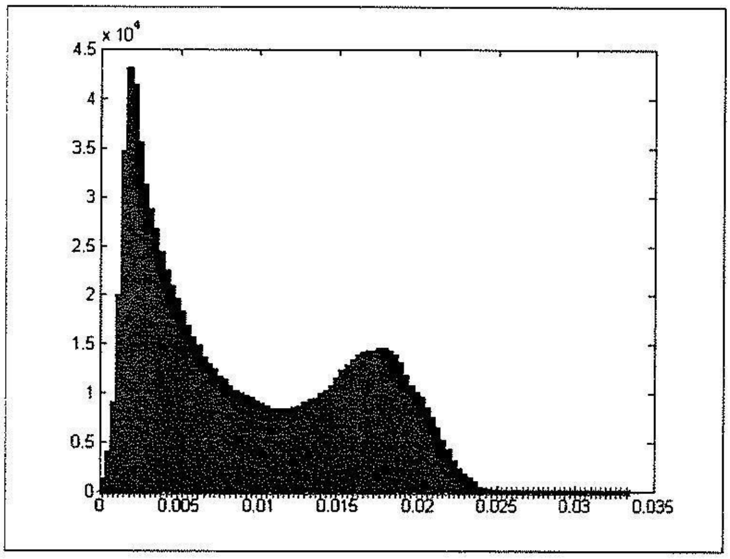
รูปที่ 4.11 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.12 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

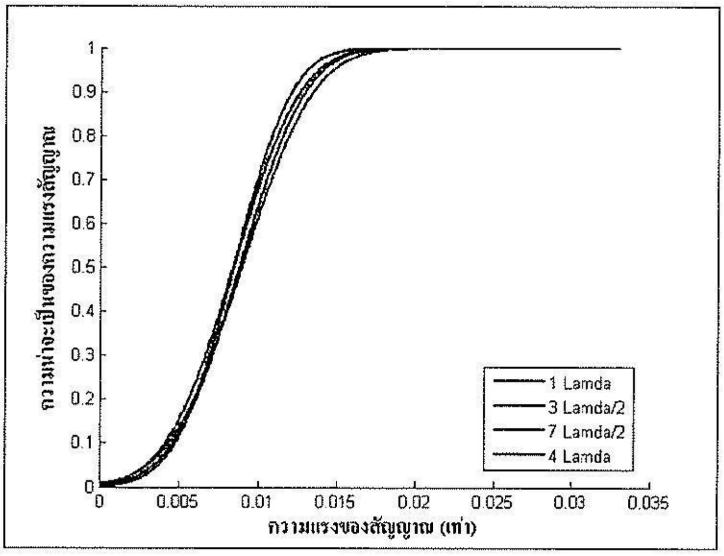
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.13 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.03331 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.002025 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



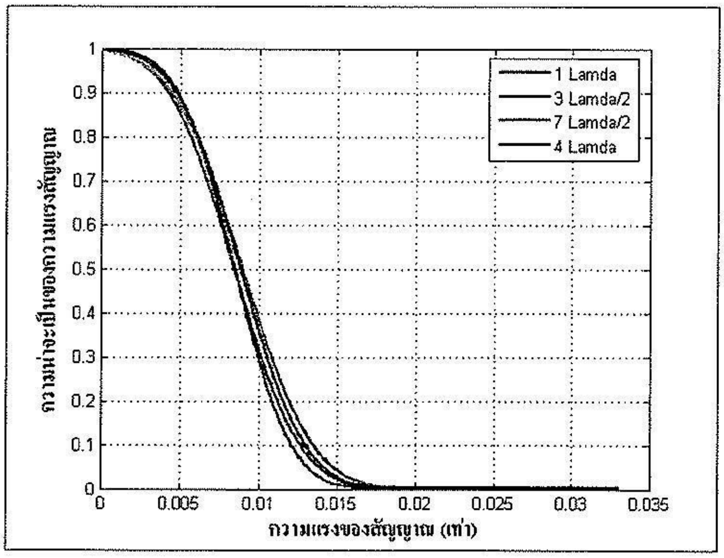
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.14 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ

0.0042 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0048 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0044 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0047 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



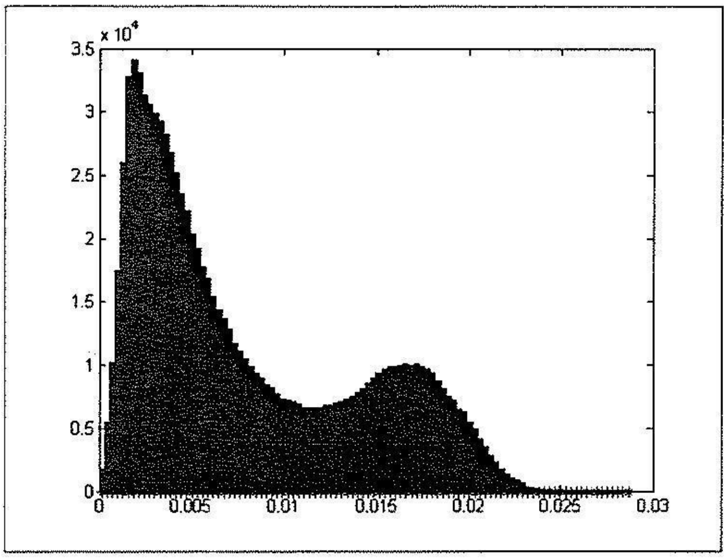
รูปที่ 4.14 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.15 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

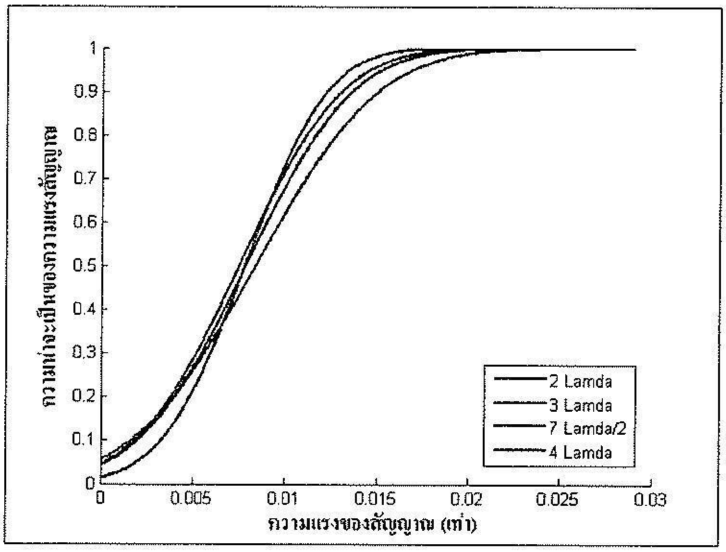
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.16 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.02869 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.002027 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



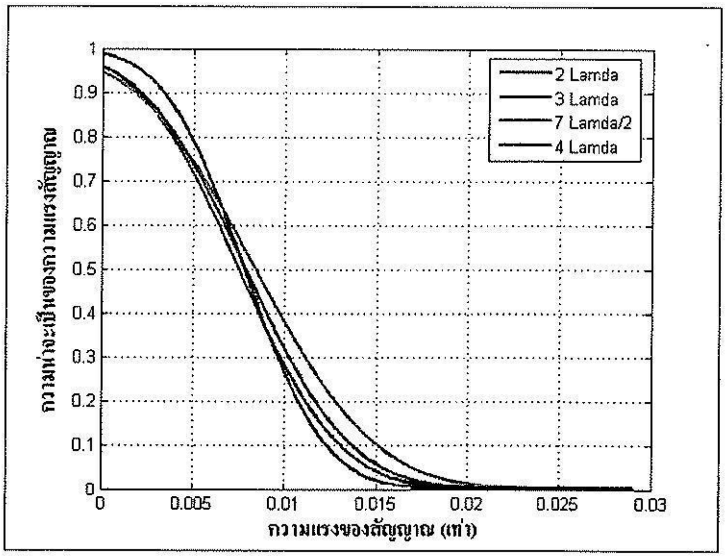
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.17 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ 2λ มีค่าเท่ากับ

0.0033 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 3λ มีค่าเท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.002 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



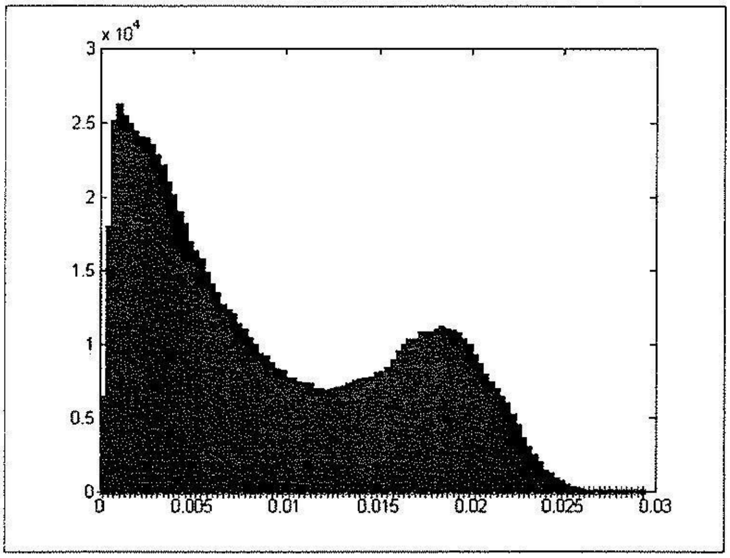
รูปที่ 4.17 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.18 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

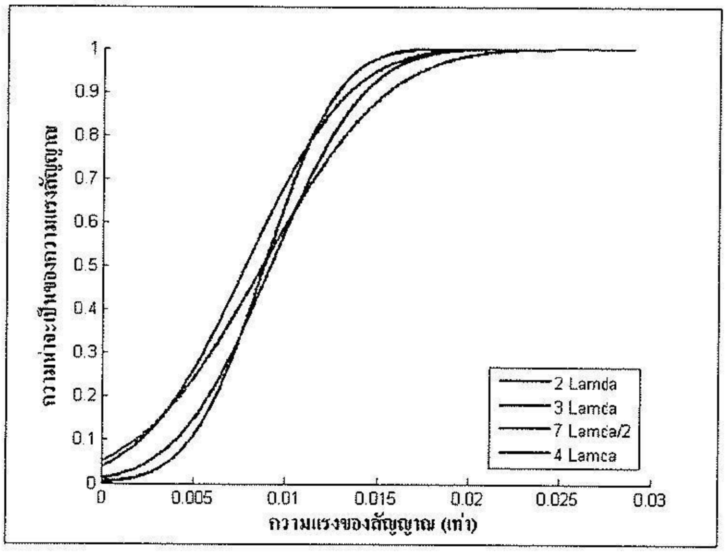
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.19 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.02933 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001185 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



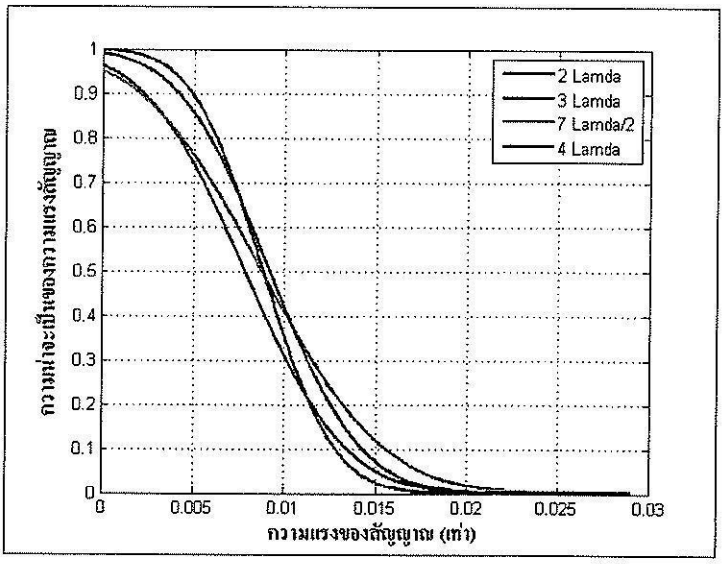
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.20 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ 2λ มีค่าเท่ากับ

0.0048 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 3λ มีค่าเท่ากับ 0.0022 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0041 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



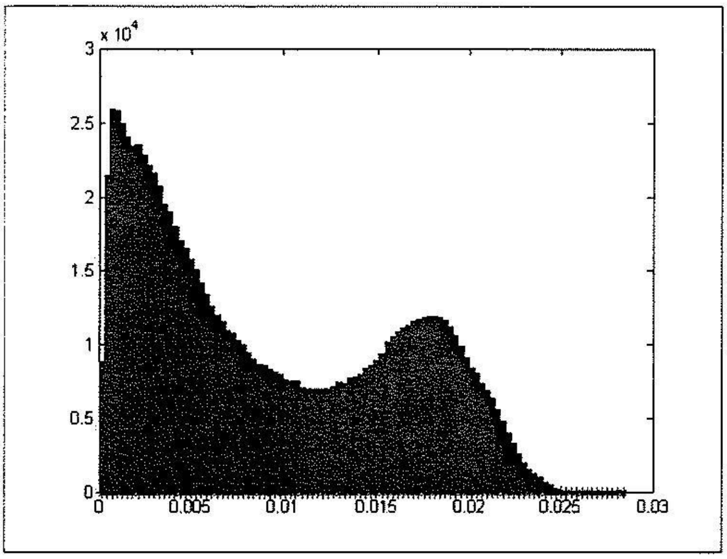
รูปที่ 4.20 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.21 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

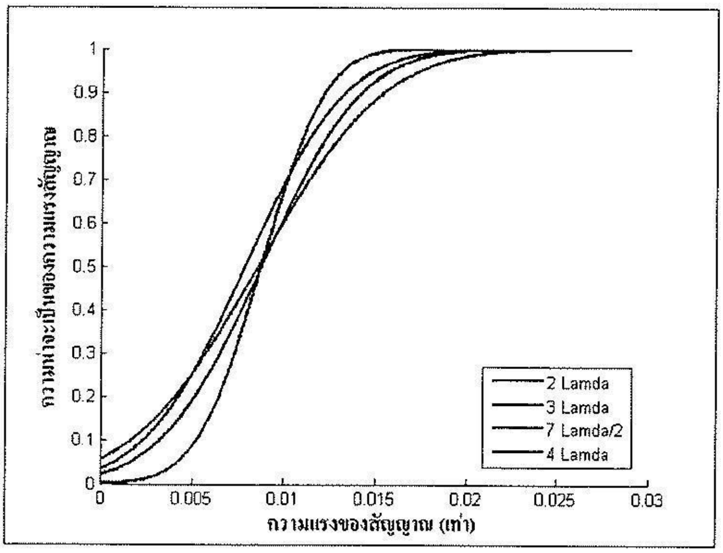
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.22 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.02841 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0008616เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



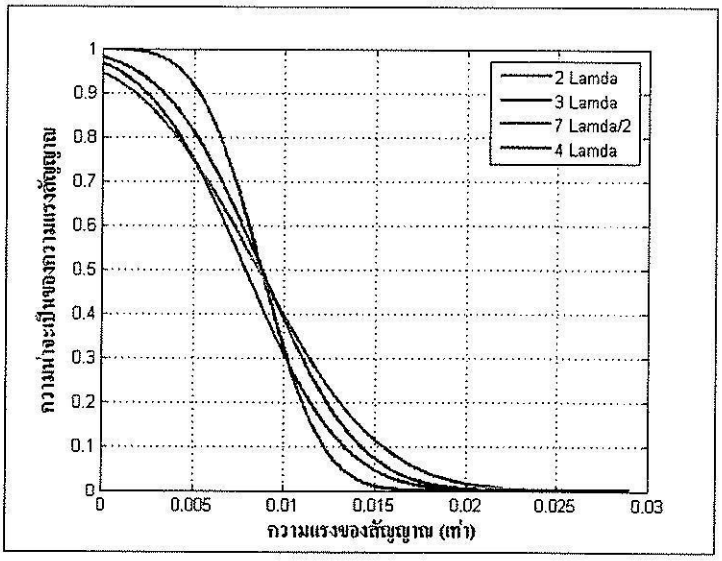
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.23 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ 2λ มีค่าเท่ากับ

0.0053 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 3λ มีค่าเท่ากับ 0.0023 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0033 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



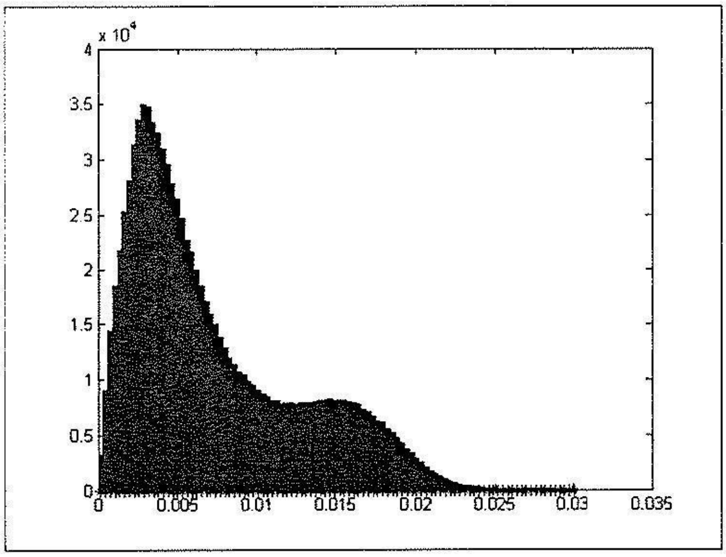
รูปที่ 4.23 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.24 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถสองคันวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

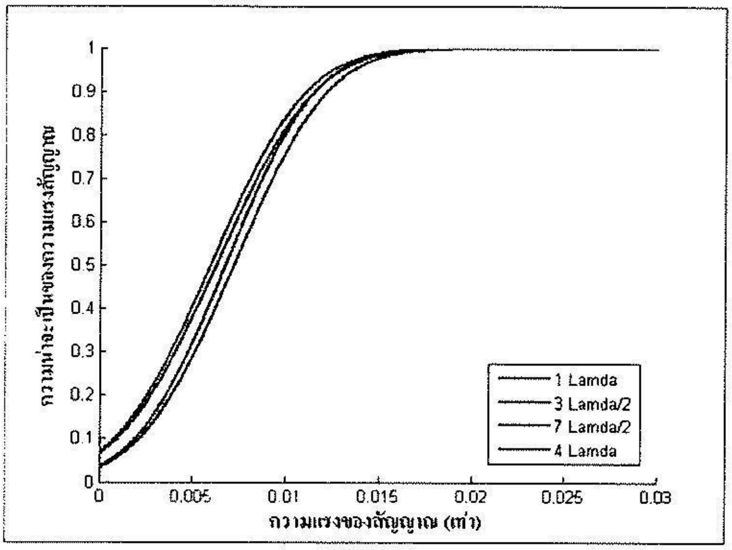
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.25 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.03003เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.003021เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



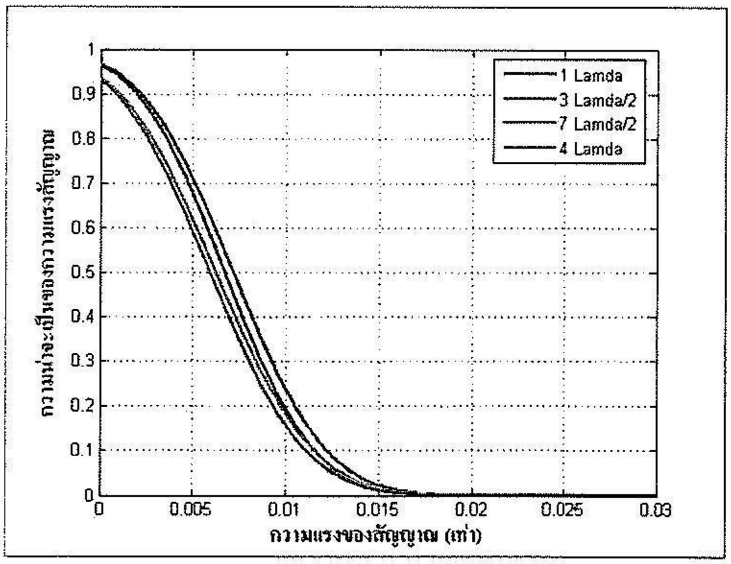
รูปที่ 4.25 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.26 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ

0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0022 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.001 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0008 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



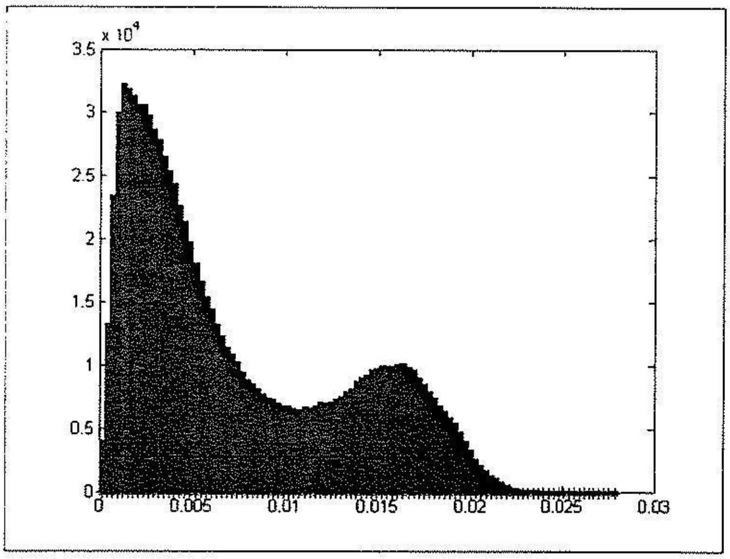
รูปที่ 4.26 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.27 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถสองคันวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

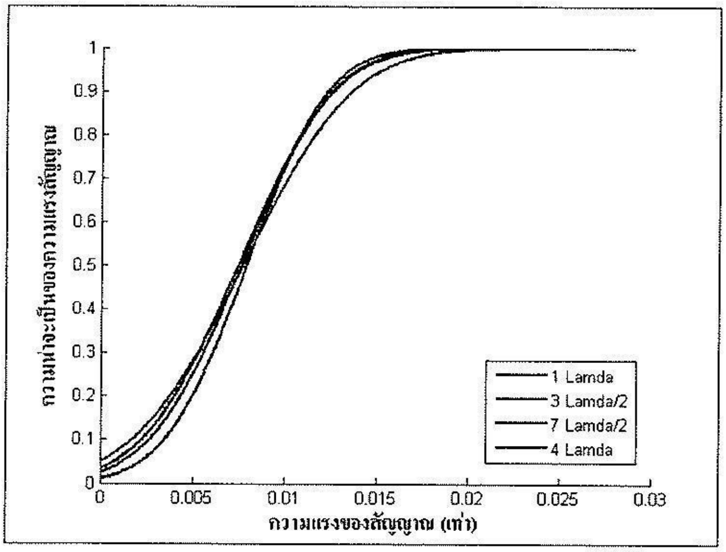
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.28 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.02786เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001405เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



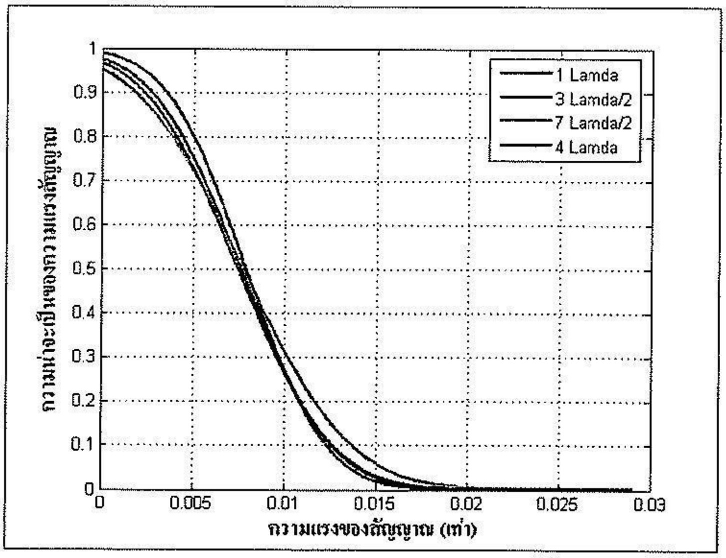
รูปที่ 4.28 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.29 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ

0.0035 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0026 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0022 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



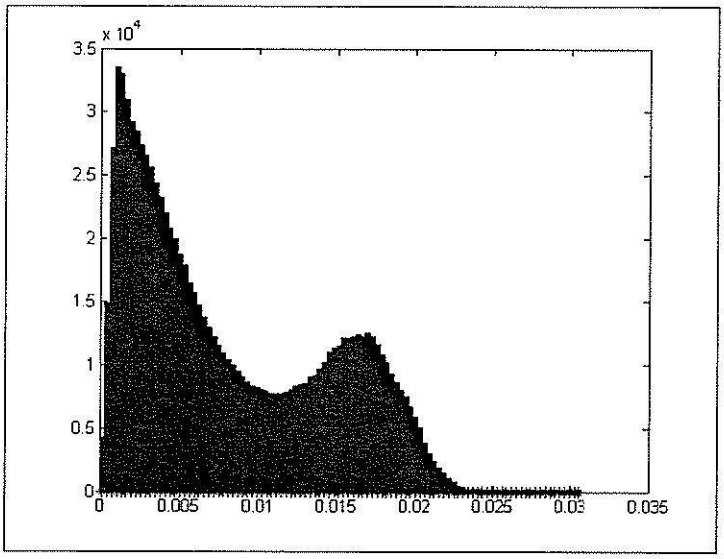
รูปที่ 4.29 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน



รูปที่ 4.30 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

- รถสองคันวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

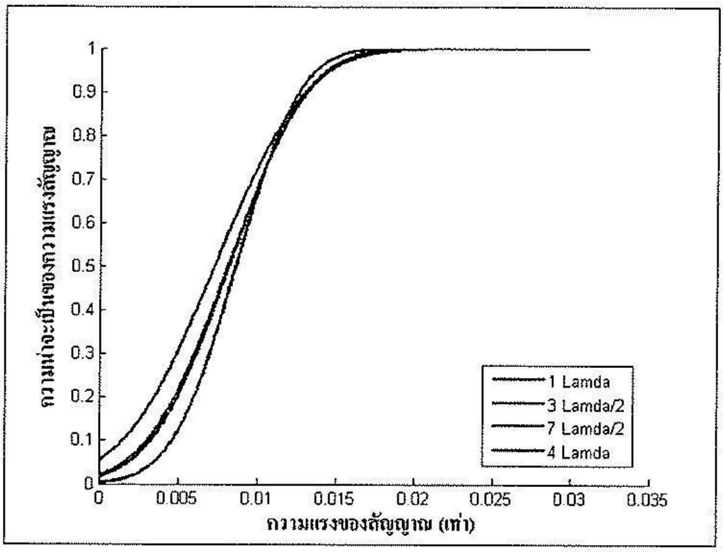
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.31 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.03047 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001226 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



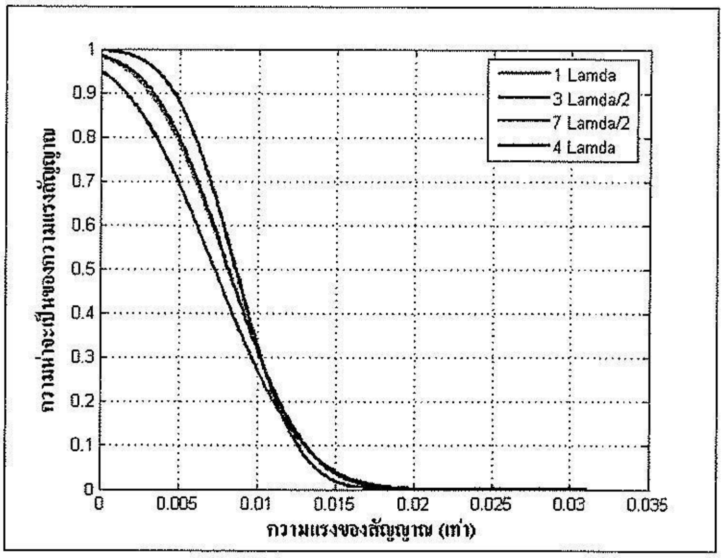
รูปที่ 4.31 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.32 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ

0.0046 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0031เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0033 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



รูปที่ 4.32 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

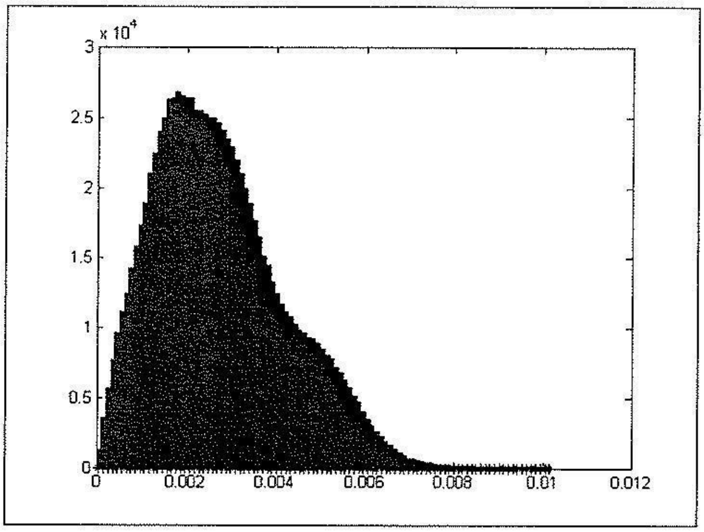


รูปที่ 4.33 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน

4.3.2 ความห่างของสายอากาศ 2 ตัว วางห่างเท่ากับความยาวตัวรถ 5.30 เมตร

- รถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

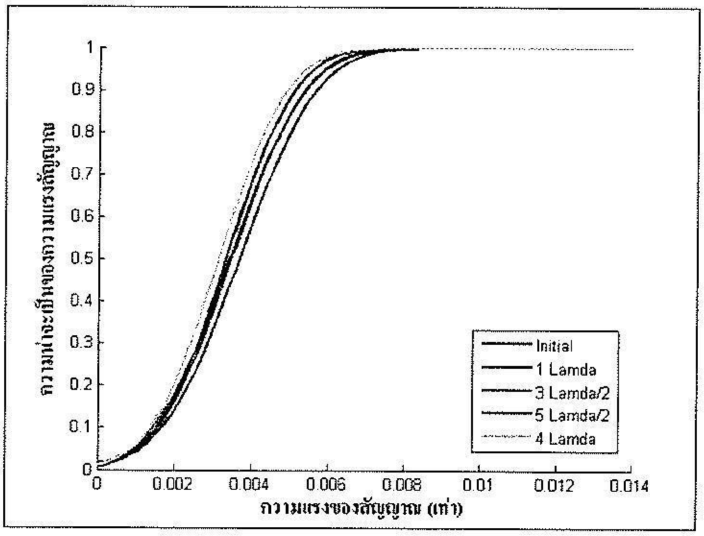
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.34 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.00000 ถึง 0.01014เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001837 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



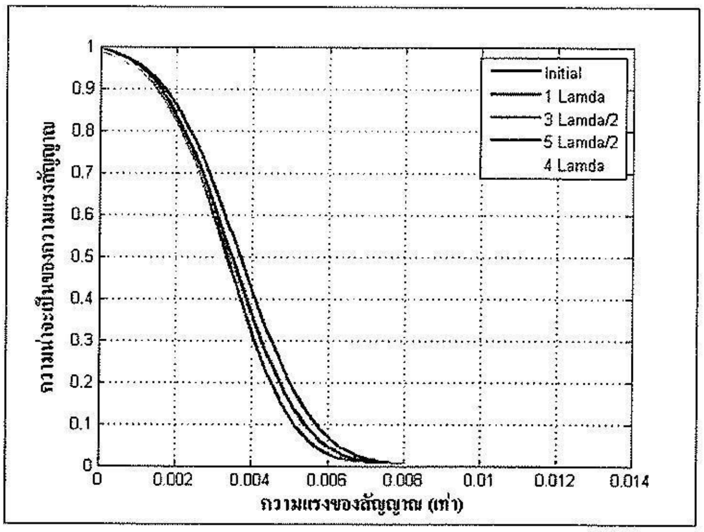
รูปที่ 4.34 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.35 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.36 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.0016 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0016 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0014 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



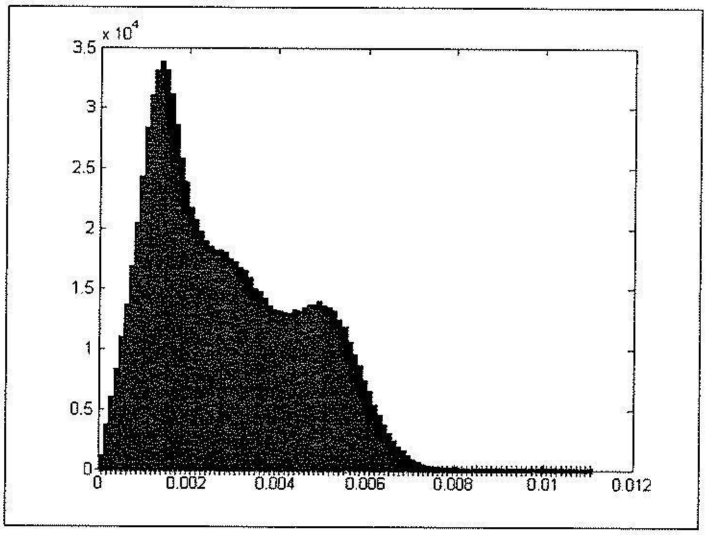
รูปที่ 4.35 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.36 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

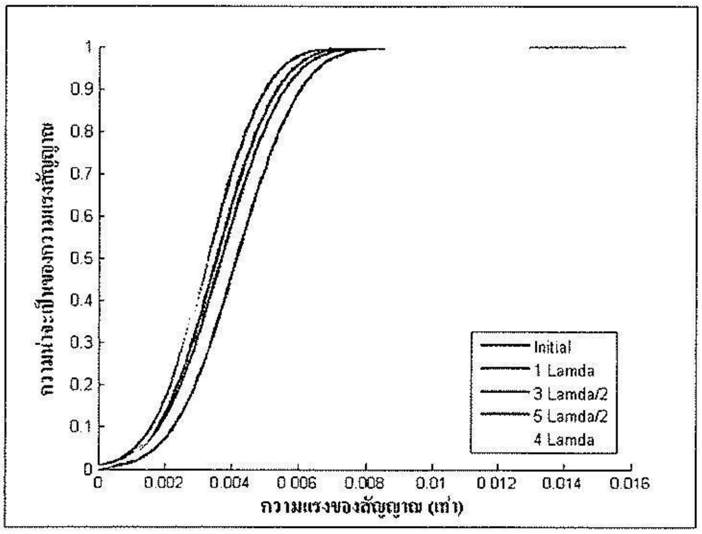
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.37 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.01106เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001446 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



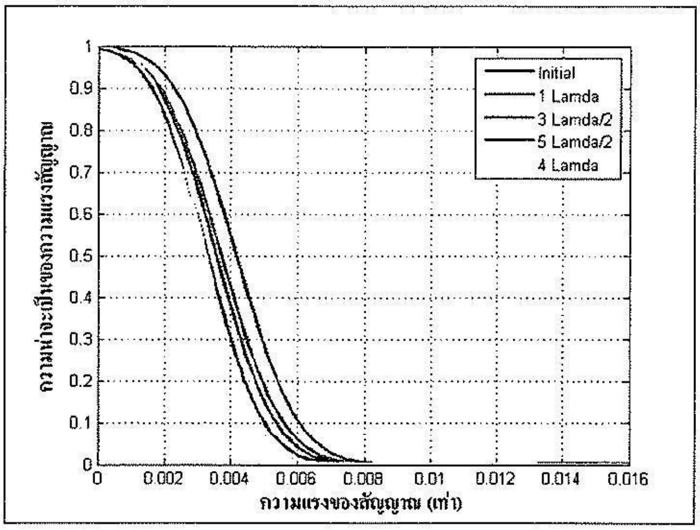
รูปที่ 4.37 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.38 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.39 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.0016 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0023 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0018 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



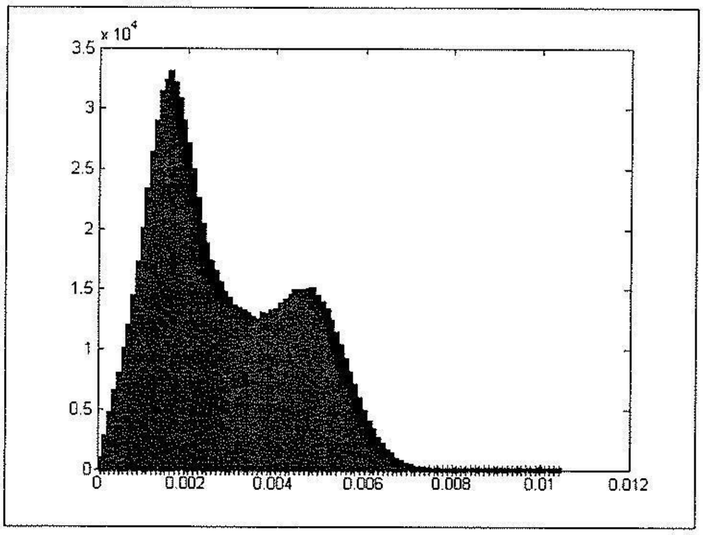
รูปที่ 4.38 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.39 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

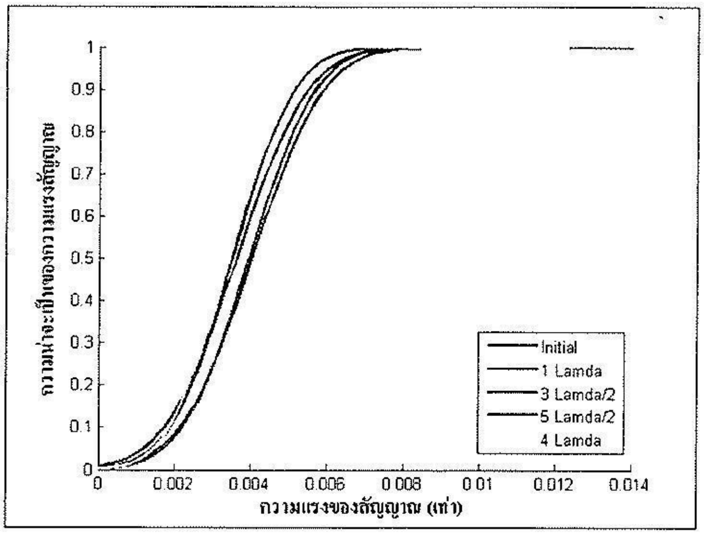
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.40 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.0104เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001675 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



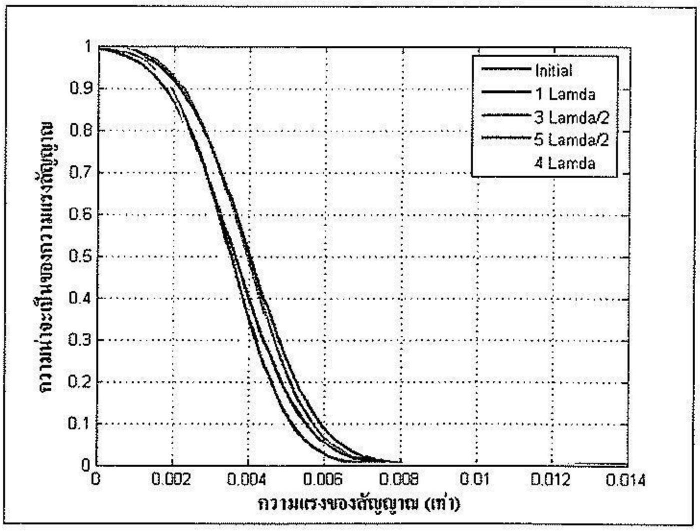
รูปที่ 4.40 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.41 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.42 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0021 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0022 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0018 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



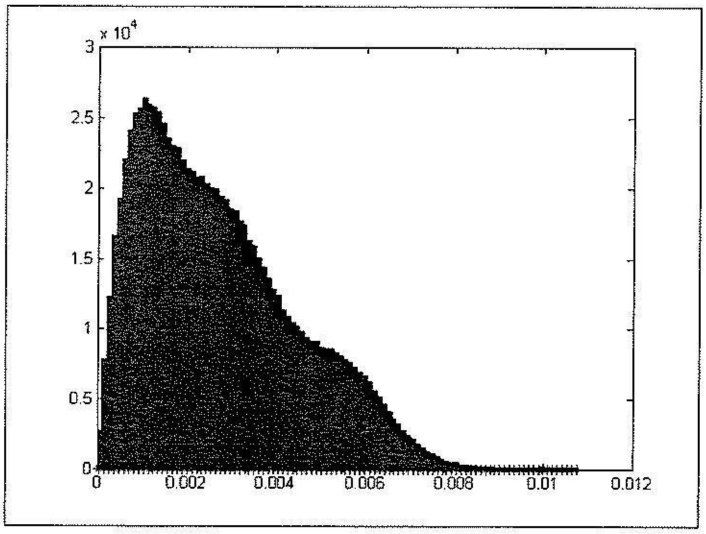
รูปที่ 4.41 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.42 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถเก๋งที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

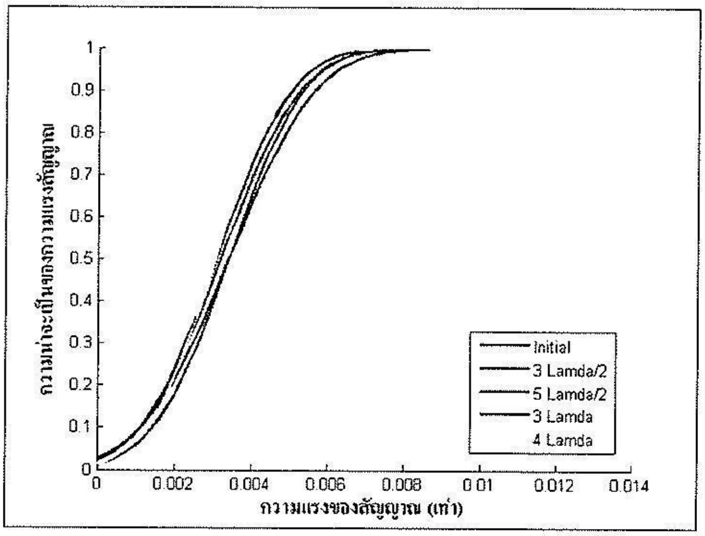
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.43 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.01074เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.00108 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



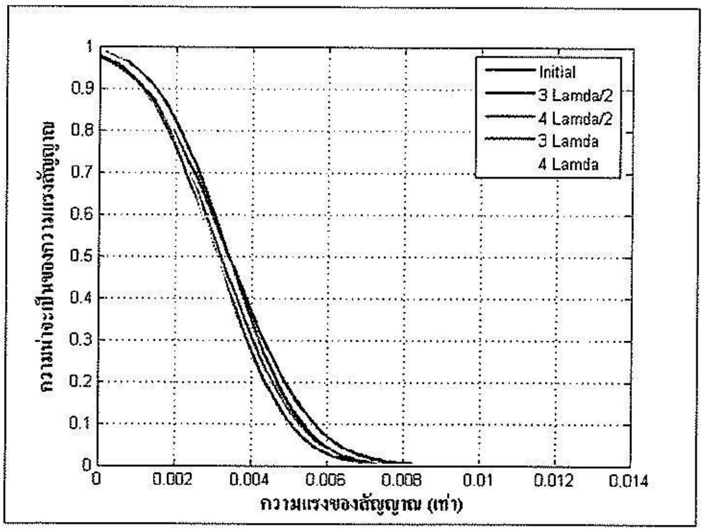
รูปที่ 4.43 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.44 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.45 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.0011 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0011 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 3λ มีค่าเท่ากับ 0.0011 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0013 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



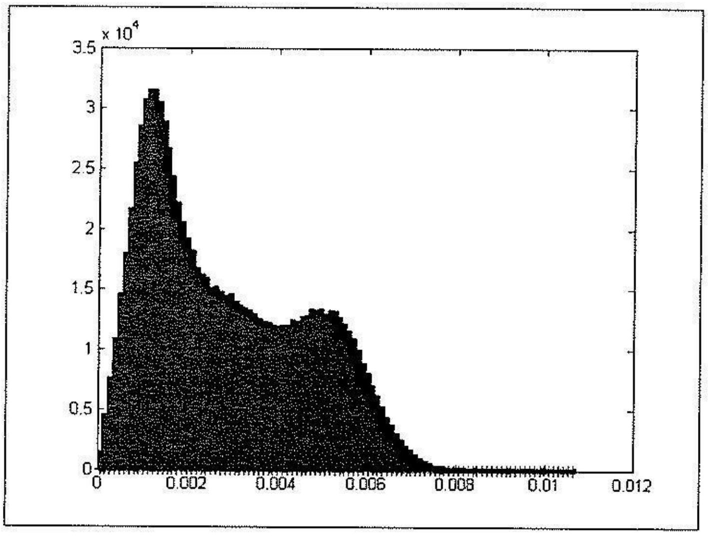
รูปที่ 4.44 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.45 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

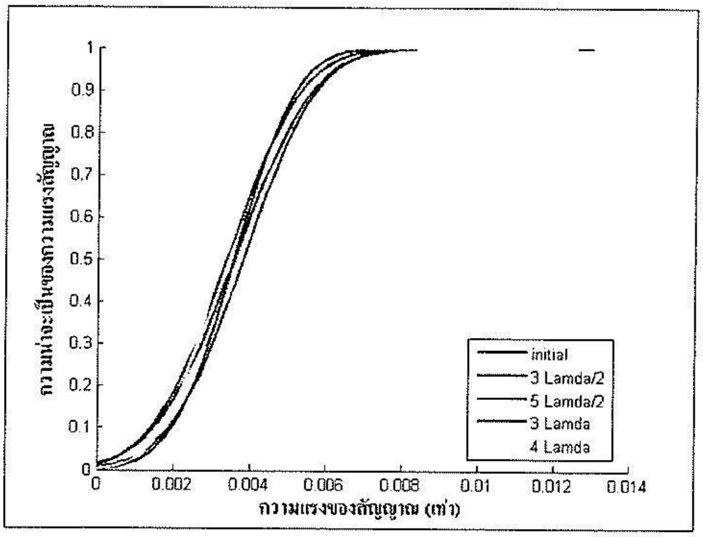
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.46 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.01062เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001176 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



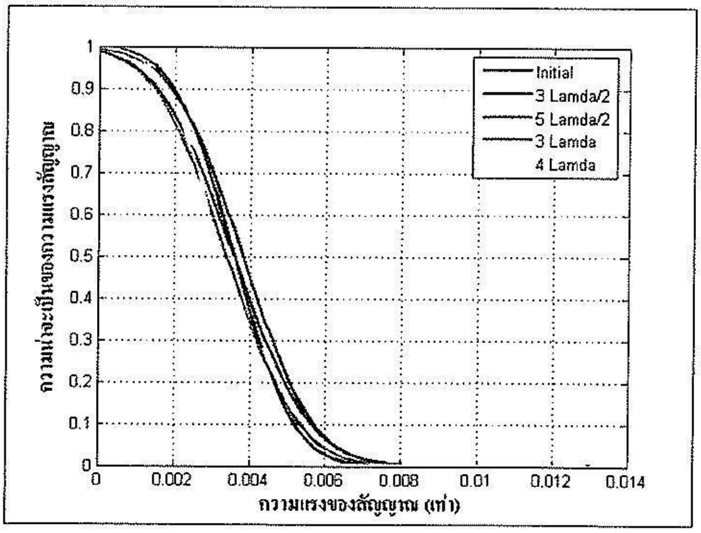
รูปที่ 4.46 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.47จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.48 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.002 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0014 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 3λ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



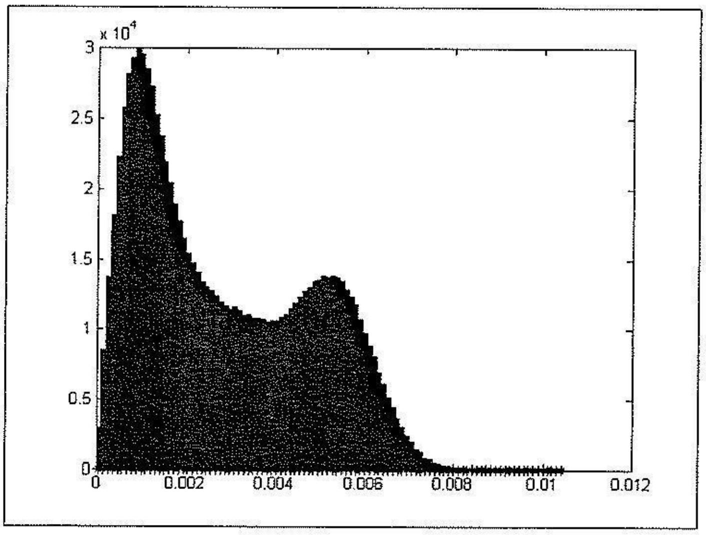
รูปที่ 4.47 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.48 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

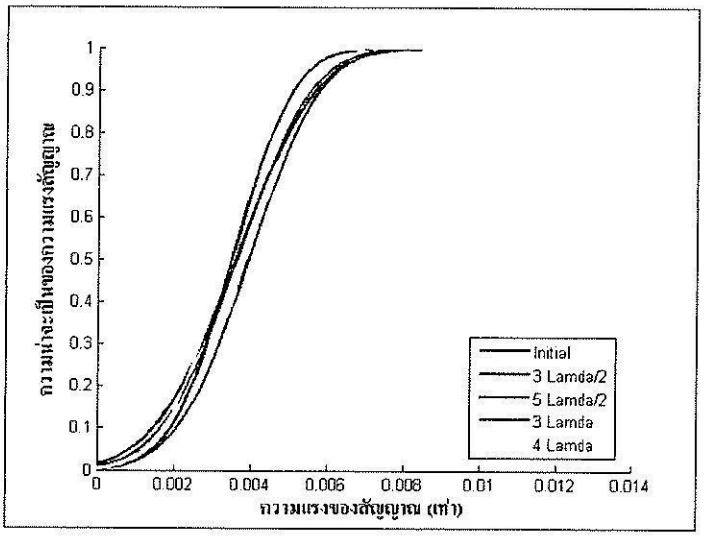
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.49 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.01041 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0009438เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



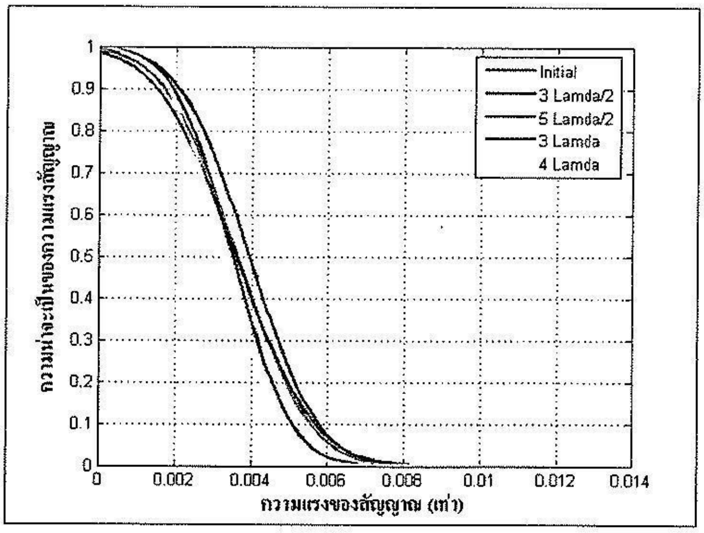
รูปที่ 4.49 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.50 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.51 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0021 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 3λ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0018เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



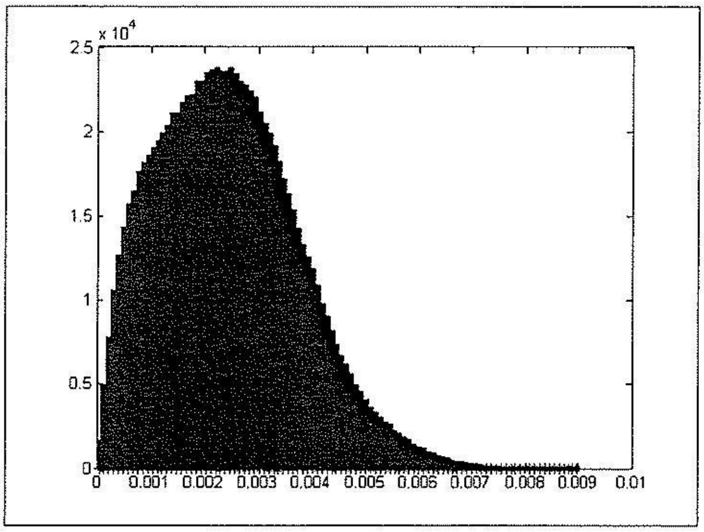
รูปที่ 4.50 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.51 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถกระบะที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถสองคันวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

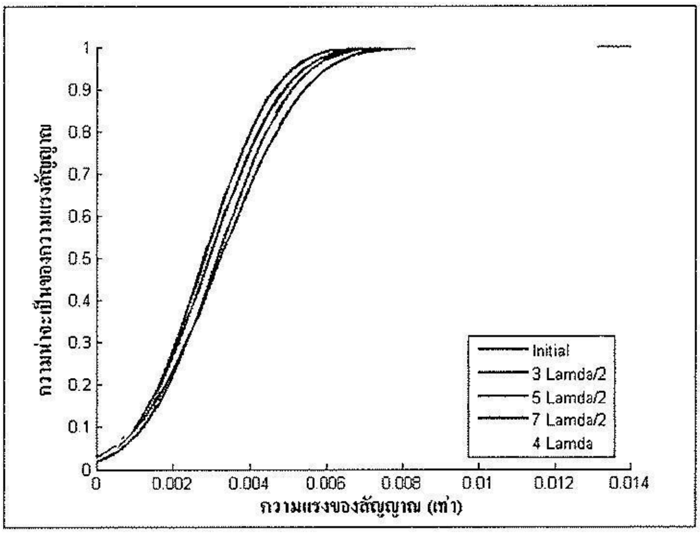
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.52 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.008984เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.002258 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



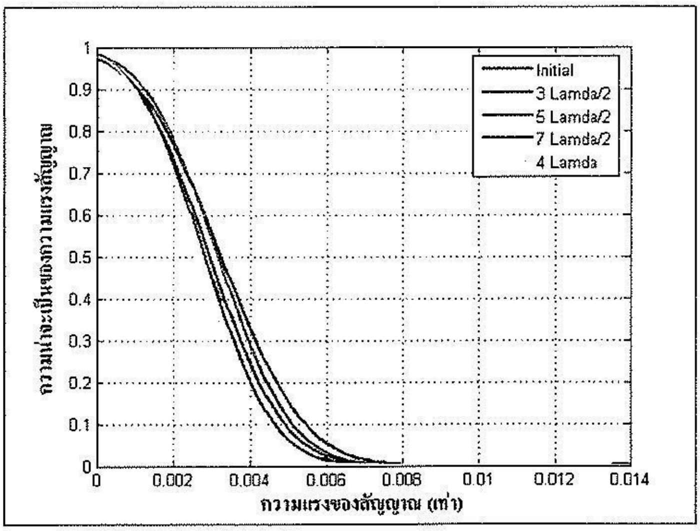
รูปที่ 4.52 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.53 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.54 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.001 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0011 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0012 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.001 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0009 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



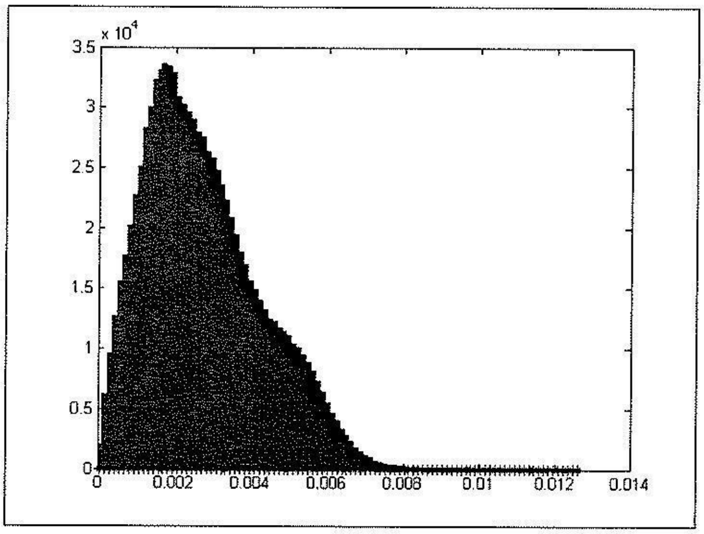
รูปที่ 4.53 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.54 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถสองคันวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

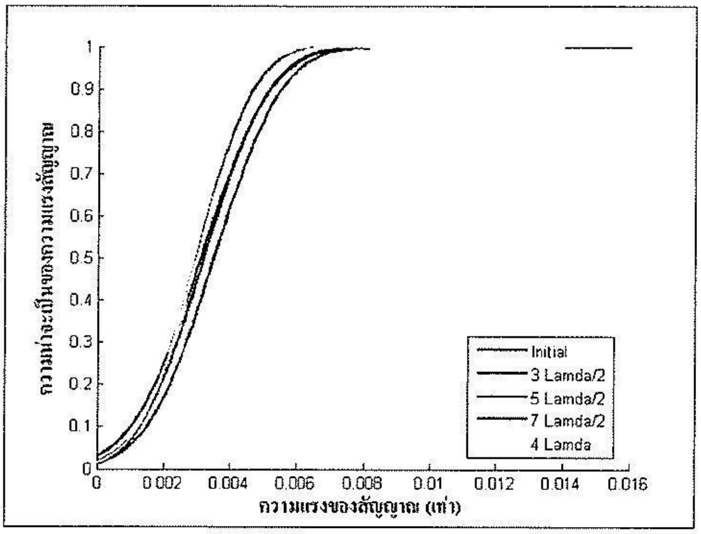
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.55 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.01259เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.001772 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



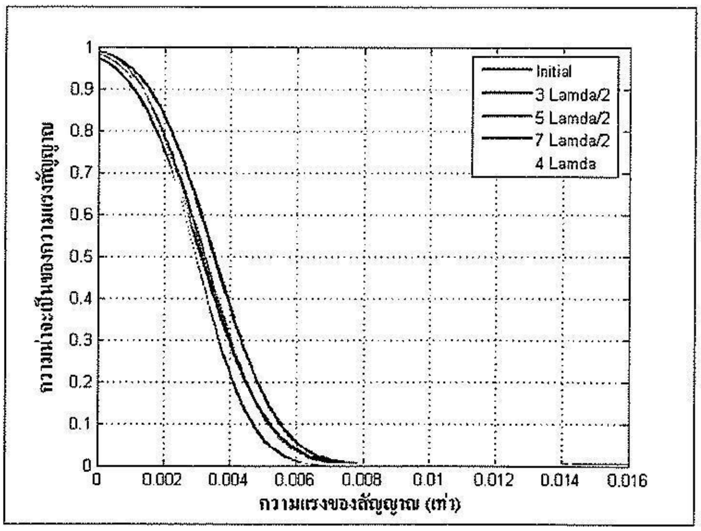
รูปที่ 4.55 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.56 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.57 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.0013 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0012 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.001 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0012 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



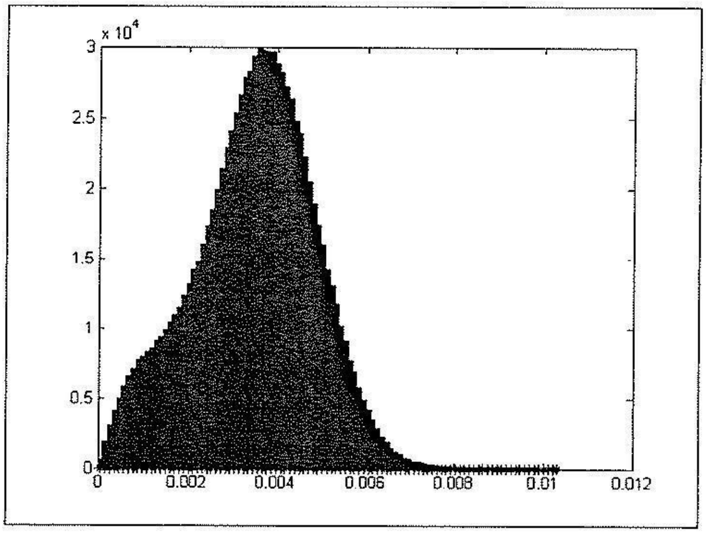
รูปที่ 4.56 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.57 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

- รถสองคันวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

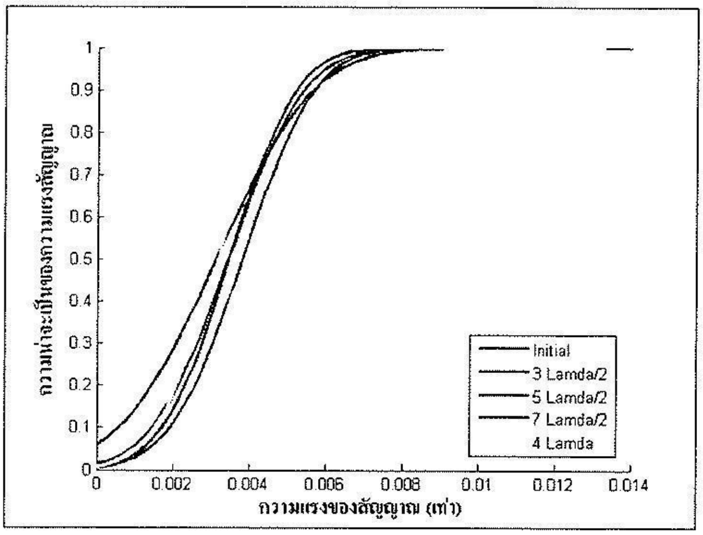
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.58 จะเป็นตัวอย่างของกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK ที่ความห่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.01031เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.003627 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง



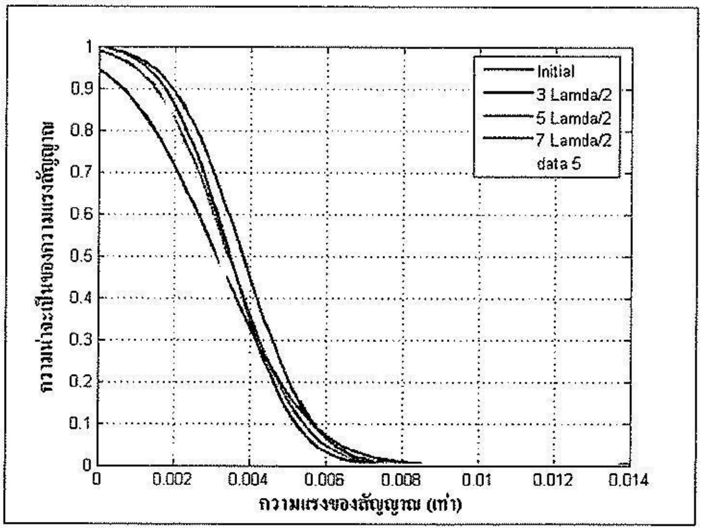
รูปที่ 4.58 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมของสายอากาศห่างกัน $\lambda/2$ ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

จากนั้น นำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.59 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.60 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณ ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่า

เท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ $7\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0006 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ตามลำดับ



รูปที่ 4.59 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ



รูปที่ 4.60 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ของกรณีรถวิ่งตามกันที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ความห่างของสายอากาศ 2 ตัวเท่าความยาวตัวรถ

4.5 สรุป

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการทดลองวัดสัญญาณดิจิตอลบนท้องถนน ซึ่งได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา และทำการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้การ วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม แล้วนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน โดยจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % ซึ่งในการทดลองวัดได้มีการทดลองใน 2 เหตุการณ์ คือ เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนและเหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่ที่พื้นถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน ซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการทดลองวัดไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบระบบสื่อสารที่มีรถเป็นส่วนประกอบ รวมถึงการประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวัดการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมที่เป็นสภาพบนท้องถนนที่มีรถยนต์วิ่งผ่านไปมา โดยสภาพแวดล้อมบนท้องถนน จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากรถยนต์ที่วิ่งผ่านอีกทั้งปริมาณรถยนต์และความเร็วของรถยนต์ ทำให้ช่องสัญญาณที่ต้องวัดเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาด้วยเช่นกัน ทำการวัดการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้ชุดเครื่องส่งและชุดเครื่องรับ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการออกแบบชุดเครื่องส่งและชุดเครื่องรับเพื่อใช้ในการทดลองวัดสัญญาณ พร้อมทำการวัดและทดสอบการทำงานจริง โดยการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มจากการศึกษาเนื้อหาและความสำคัญของปัญหา ตั้งวัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

จากนั้นได้ทำการศึกษาหลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ สัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน และทฤษฎีของความน่าจะเป็น โดยเลือกใช้สัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK นั้นออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อใช้ในการทดลองวัดการแพร่กระจายในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการทดลองวัดหาความน่าจะเป็นของระดับสัญญาณที่รับได้เพื่อดูความเหมาะสมของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน สำหรับประยุกต์ใช้เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันในสภาพแวดล้อมที่มีรถเป็นส่วนประกอบ รวมทั้งการประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

การติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันนั้นได้ใช้สัญญาณดิจิตอลมอดูเลตแบบ BPSK ได้ใช้เครื่องส่งของ Agilent signal generator model E4433B แทนโมดูล ซึ่งทำการตั้งค่าของสัญญาณ ให้มีค่าอัตราเร็วของ symbol ที่ 50 ksps และทำการมอดูเลตที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้ แบนวิดท์ของสัญญาณสำหรับ BPSK ที่ $\alpha = 0.5$ raise cosine filter คือประมาณ 75 kHz สัญญาณถูกส่งโดยใช้สายอากาศแบบไดโพล ซึ่งมีอัตราขยาย 4 dB กำลังของสัญญาณส่งตั้งค่าที่ -10

dBm คงที่และเครื่องรับประกอบด้วย Agilent N9020A MXA signal analyzer ต่อกับสายอากาศภาครับผ่าน low noise amplifier ที่มีอัตราขยาย 28 dB สัญญาณเชิงซ้อนที่รับได้ถูกดีมอดูเลตโดยโปรแกรม Agilent 89600 vector signal analyzer ซึ่งติดตั้งใน Agilent N9020A โดยรายละเอียดในการออกแบบและวิเคราะห์ทั้งหมดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

ในส่วนของการทดลองวัดผล โดยจากผลการทดลองในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน จะพบว่ากราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดย จะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% ซึ่งในการวัดได้มีการทดลองใน 2 เหตุการณ์ คือ เหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนและเหตุการณ์ของการวัดบนถนนที่มีเครื่องส่งติดอยู่ที่พื้นถนนและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนน โดยจากการผลการทดลองในเหตุการณ์แรก พบว่า จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ค่าความแรงสัญญาณของกรณีรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 0.00059 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง กรณีต่อมา ค่าความแรงสัญญาณของกรณีรถยนต์ผ่าน มีค่าเท่ากับ 0.00013 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง กรณีที่สาม ค่าความแรงสัญญาณของกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 0.00036 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง และกรณีสุดท้ายคือกรณีรถยนต์วิ่งสวนกับรถยนต์ ค่าระดับสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 0.00009 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง และเหตุการณ์ที่สอง ในกรณีความห่างของสายอากาศ 2 ตัว ใกล้กัน พบว่าชนิดรถเก๋ง ความเร็ว 20 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0037 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 40 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ 4λ มีค่าเท่ากับ 0.0046 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 60 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0048 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ชนิดรถกระบะ ความเร็ว 20 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ 2λ มีค่าเท่ากับ 0.0033 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 40 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ 2λ มีค่าเท่ากับ 0.0048 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 60 กิโลเมตร ระยะห่างสายอากาศ 2λ มีค่าเท่ากับ 0.0053 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ชนิดรถตามกันความเร็ว 20 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0022 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 40 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0035 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 60 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0046 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ต่อมาเป็นกรณีความห่างของสายอากาศ 2 ตัว วางห่างเท่ากับความยาวตัวรถ 5.30 เมตร พบว่า ชนิดรถเก๋ง ความเร็ว 20 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0017 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 40 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ λ มีค่าเท่ากับ 0.0023 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 60 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0022 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ชนิดรถกระบะ ความเร็ว 20 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 40 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศเท่าตัวรถ มีค่าเท่ากับ 0.002 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 60

กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0021 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ชนิดรถตามกัน ความเร็ว 20 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $5\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0012 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 40 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ความเร็ว 60 กิโลเมตร ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 0.0019 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง

เมื่อทำการวิเคราะห์จากค่าของกราฟสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเราทำการวัดที่ค่าระยะห่างระหว่างเครื่องส่ง 2 เครื่อง ที่เท่ากัน เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่า ความแรงของสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และทำการวัดที่ความเร็วที่เท่ากัน ที่ระยะห่างสายอากาศ $3\lambda/2$ ให้ค่าความแรงของสัญญาณที่ดีที่สุด ซึ่งรถเก๋งและรถกระบะให้ความแรงของสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน เพราะความเร็วที่เท่ากันทำให้ได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกันโดยจากผลการทดลองวัดเป็นค่าระยะห่างที่เหมาะสมในการติดตั้งสายอากาศของเครื่องส่ง ซึ่งแบบตำแหน่งของเครื่องส่งที่วางวางบนพื้นถนนแบบใกล้กันนั้น สามารถให้ค่าความแรงของสัญญาณได้ดีที่สุด เหมาะกับการนำไปใช้งานจริง ซึ่งสามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบระบบสื่อสารที่มีรถเป็นส่วนประกอบรวมถึงการประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

สรุปผลที่ได้จากการทดลองวัดมีความสอดคล้องกับทฤษฎี แต่ผลที่ได้จากการทดลองวัดจะให้ค่าที่แตกต่างจากผลการทดลองไปบ้างตามแต่ละสภาพแวดล้อม อาจจะเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ จากการสร้างมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ เช่น ตัวอุปกรณ์ที่ใช้ ซึ่งอาจจะมีค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่กำหนดไปบ้าง รวมถึงสภาพแวดล้อมที่สามารถเปลี่ยนได้ตลอดเวลาและอื่น ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งผลการทดลองวัดนี้สามารถนำไปพัฒนาออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบชุดเครื่องส่งและชุดเครื่องรับ ส่วนที่สำคัญคือวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้าง ได้แก่ แผ่นวงจรพิมพ์ และตัวอุปกรณ์ ซึ่งต้องเลือกใช้ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเหมือนกัน เพราะถ้าหากเลือกใช้ค่าที่ไม่มีความเหมาะสมแล้วอาจจะทำให้เป็นปัญหาในการสร้าง รวมถึงเครื่องมือในการช่วยสร้างและวัดผลมีข้อจำกัด เช่นการวัดสัญญาณกลางแจ้งโดยใช้เครื่องรับสัญญาณสเปคตรัม จะเกิดปัญหาเนื่องจากสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวยในการวัด และการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์การทดลองนั้นมีความยุ่งยากเนื่องจากมีเครื่องรับมีขนาดที่ใหญ่และมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งเยอะ ซึ่งผู้วิจัยคิดว่าควรเตรียมอุปกรณ์การทดลองเอาไว้ให้เรียบร้อยทุกอย่างรวมทั้งสถานที่การทดลอง เพื่อจะได้ใช้วัดในได้ทันทีที่สภาพอากาศเอื้ออำนวย และอีกปัญหาหนึ่งโดยในการวัด

แต่ละครั้งต้องต่อสายอากาศเข้ากับตัวโมดูลของชุดเครื่องส่งก่อนแล้วค่อยจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ด มิฉะนั้นจะทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวสายอากาศได้ซึ่งผู้ใช้งานส่วนมากที่ทำการ ส่วนใหญ่เกิดจากปัญหาในเรื่องนี้

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

แนวทางการพัฒนาต่อไปของการวัดการแพร่กระจายคลื่น อาจจะมีการทดสอบวัดในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ของรถ เพื่อเป็นการศึกษาคุณลักษณะสภาพแวดล้อมแต่ละแบบ และนอกจากนี้จะเห็นว่าระดับสัญญาณที่รับมีค่าที่ต่ำ แตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมของรถ ซึ่งเราสามารถที่จะทำใช้สายอากาศหรือเครื่องขยายสัญญาณมีอัตราการขยายที่สูงขึ้นเพื่อสามารถนำไปใช้ร่วมกับการสื่อสารไร้สายต่าง ๆ เพื่อประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมที่มีรถเป็นส่วนประกอบ เช่น การจราจร เป็นต้น

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์ออกแบบ ผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ และเป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าในเรื่องของการวัดการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมที่มีรถเป็นส่วนประกอบ ทั้งในโครงสร้างที่นำเสนอในงานวิจัยนี้หรือโครงสร้างแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

รายการอ้างอิง

[1] S. V. HUM and R. J. Davies, "A Measurement System for Predicting the Performance of 64 QAM in Non-equalized Radio Channels," *TRLabs Calgacy Internal Report* ,1998.

[2] R. Behin, "Multi-Antenna Indoor Radio Channel Measurement and Analysis," *TRLabs Calgacy Internal Report* , 1998.

[3] A. A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, "Statistical Model for Indoor Multipath Propagation," *IEEE Journal on selected Areas in Communication*, vol. SAC-5, pp. 128-137, 1987.

[4] T. S. Rappaport , *Wireless Communication: Principles & Practice*, New Jersey, Prentice Hall PTR, 2000.

[5] A. Khaleghi, A. Azoulay, and J.C. Bolomey, "Diversity Techniques with Dipole Antennas in Indoor Multipath Propagation," *PIMRC 2005 IEEE 16th International Symposium*, vol. 1, pp. 669 – 673, 2005.

[6] L. P. Kafle, A. Intarapanich, B. A. Sesay, J. R. Davies, J. McRory, and G. McGibney, "A Wideband MIMO Channel Measurement System for Indoor Office Environment," *Proc of World Wireless Congress*, pp. 95-100, 2004.

[7] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *Vehicular Technology, IEEE Transactions.*, vol. 29, pp 317-325, 1980

[8] S.Y. Seidel and T.S. Rappaport, "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions.*, vol. 40, pp 207-217, 1992

[9] S. Ichitsubo, T. Furuno, T. Taga and R. Kawasaki, "Multipath propagation model for line-of-sight street microcells in urban area," *Vehicular Technology, IEEE Transactions.*, vol. 49, pp 422-427, 2000

[10] S. Phaiboon, "Propagation Path Loss Models for Parking Buildings," *Information, Communications and Signal Processing, 2005 Fifth International Conference*, pp 1348 – 1351, 2005

[11] C. A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc, 1997.

[12] J. G. Proakis, *Digital communication 3rd Ed*, New Yoke: McGraw-Hill, 1995.

[13] ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ. (2540). **หลักการระบบสื่อสาร.** บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

[14] ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ. (2546). **หลักการไฟฟ้าสื่อสาร.** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[15] A. W. Scott and R. Frobenius, *RF measurements for cellular phones and wireless data systems*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2008

ภาคผนวก

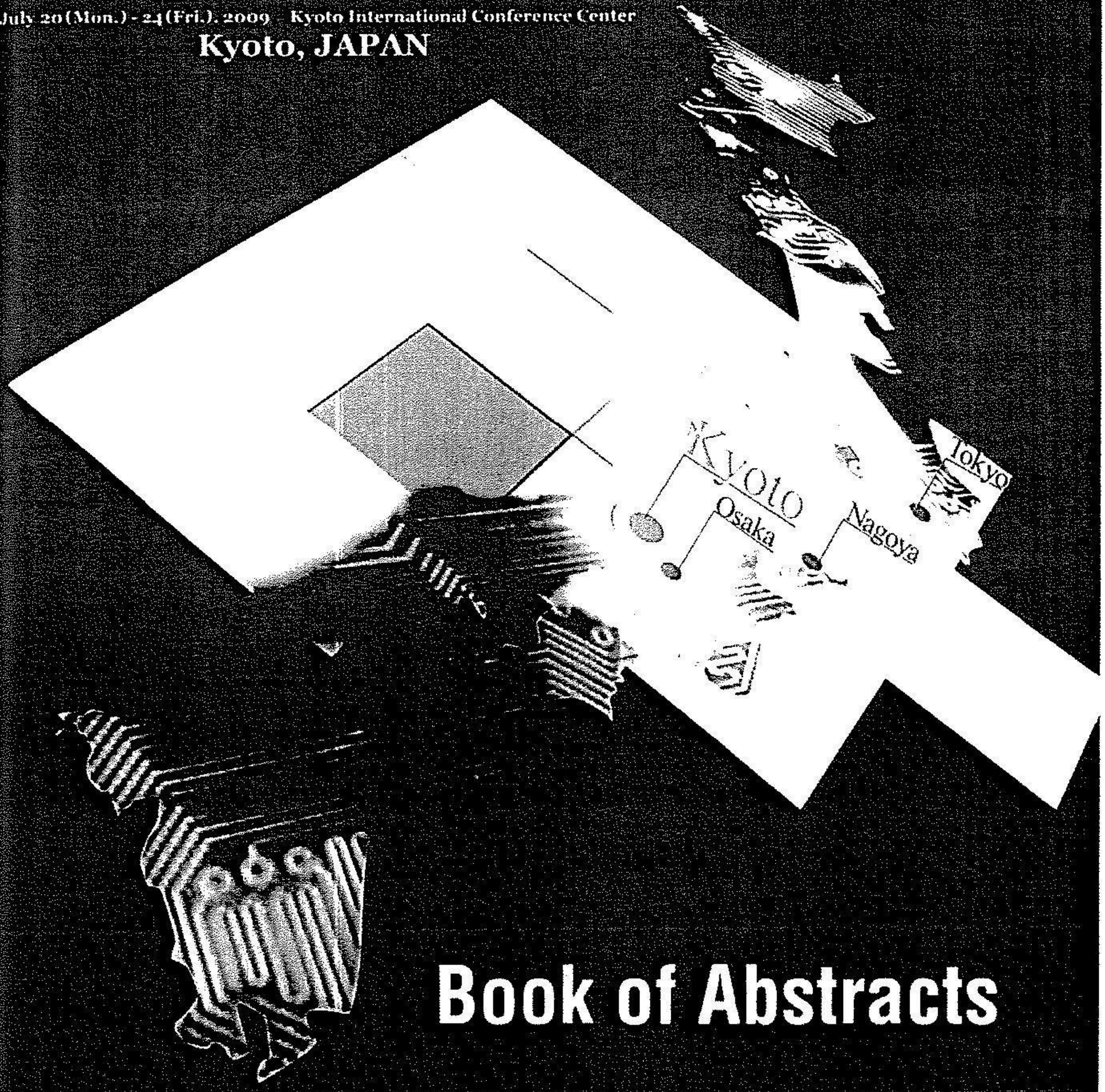
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto

EMC'09 Kyoto

July 20 (Mon.) - 24 (Fri.), 2009 Kyoto International Conference Center

Kyoto, JAPAN



Book of Abstracts

IEEE

2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility

July 20-24, 2009
Kyoto International Conference Center
Kyoto, Japan

Sponsored by

The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers,
Communications Society

Technically Co-Sponsored by

The Institute of Electrical Engineers of Japan, Technical Committee on EMC

In Cooperation with

IEEE EMC Society
IEEE EMC Society Japan and Sendai Chapters
IEEE Kansai Section
CISPR, IEC/TC77, URSI, IEJ, JIEP, JSAP, JSMBE, SICE

Supported by

Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan
Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan

Page

2. Calculation and Measurement of Induced Current Density Inside Human Body Under 60 Hz ELF Magnetic Fields 14
S. W. Min*, E. S. Kim** and S. H. Myung***
*Soonchunhyang University, **Hoseo University, *** Korea Electrotechnology Research Institute, Korea

3. Computational Analysis on Induced Current Density and Electric Field in a Pregnant Woman Model Due to Intermediate Frequency Magnetic Fields 14
Y. Suzuki*, K. Maruyama**, K. Wake***, S. Watanabe***, M. Taki* and O. Hashimoto**
*Tokyo Metropolitan University, ** Aoyama Gakuin University, ***National Institute of Information and Communications Technology, Japan

Open discussion, 30 minutes

Organized Session 21T3: Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)

1. Application of IEC SC 77C Standards for Protecting Commercial Buildings from the Effects of Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) 15
W. A. Radasky* and R. Hoad**
*Metatech Corporation, USA, **QinetiQ, UK

2. Protecting Telecommunication Devices against High Power Electromagnetic Effects: The Work of ITU-T SG5 Q15 15
T. Tominaga*, D. J Carpenter**, H. Sekiguchi***, S. Seto***, Y. Suzuki* and M. Hattori****
*NTT Corporation, Japan **BT Design, UK ***National Institute of Information and Communications Technology, **** NTT Advanced Technology Corporation, Japan

3. IEMI Classification of Facilities 15
D. Månsson*, R. Thottappillil** and M. Bäckström***
*High Voltage Valley, **Royal Institute of Technology, ***Saab Systems, Sweden

4. Methods and Results of Calculating Voltage Characteristics at Equipment Inputs for Non-Contact Injection of Pulse Interference into a Power Cable 15
Y. V. Parfenov*, W. A. Radasky**, O. A. Tarasov*, B. A. Titov* and L. N. Zdoukhov*
*Associated Institute for High Temperatures, Russia, **Metatech Corp, USA

5. Equipment Test Normative Base for IEMI 16
L. Siniy*, N. Safronov***, V. Bogdanov***, Y. Parfenov** and M. Zhukovskiy***
*JSC Research Institute of Pulse Teqnique, **Associated Institute for High Temperatures, ***Scientific and Technological Centre, Russia

Open discussion, 20 minutes

Page

Session 21P4: EM Wave Propagation and Scattering II

1. Temporal Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicles 17
C. Thongsopa*, A. Intarapanich** and M. Maungrat*
*Suranaree University of Technology, **National Electronics and Computer Technology Center, Thailand

2. Analysis of Resonant Characteristics of Conducting Polygons 17
S. Ohnuki and R. Ohsawa
Nihon University, Japan

3. Statistical Scattering and Attenuation Characteristics of Microwaves by Randomly Distributed Rainfalls 17
K. Takahashi*, Y. Miyazaki* and N. Goto**
*Aichi University of Technology, **The University of Tokushima, Japan

4. Attenuation and Scattering Characteristics of Microwaves Over Forests for WiMAX Wireless Communications 17
Y. Miyazaki, T. Takada and K. Takahashi
Aichi University of Technology, Japan

Session 21R4: Power System EMC

1. Studying the Design and Performance of Conducted-Noise Spectrum Spreading in DC-DC Converters with an FPGA-Based Controller 18
G. M. Dousoky*, M. Shoyama* and T. Ninomiya**
*Kyushu University, **Nagasaki University, Japan

2. Conducted Electromagnetic Emissions Analysis in Grid-tied PV System 18
D. Hamza and P. Jain
Queens University, Canada

3. Radiated Electric Field from a Solar Cell Module Set on the Ground Plane 18
R. Hasegawa, M. Tomisawa and M. Tokuda
Musashi Institute of Technology, Japan

4. Voltage Quality in the Context of EMC 19
M. Olofsson* and U. Grape**
*Swedish National Electrical Safety Board, **Vattenfall Research and Development, Sweden

Temporal Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicles

Chanchai Thongsopa[1], Apichart Intarapanich[2], Mungkala Maungrat[1]

[1]*Suranaree University of Technology, Nakon Ratsrima, Thailand*
[2]*National Electronics and Computer Technology Center, Pathumtani, Thailand*
E-mail: chan@sut.ac.th

Abstract— **Use of wireless sensor network for traffic and parking lot monitoring is very attractive. However, the network performance is difficult to predict due to complex radio wave propagation characteristic. In this paper, receiving signal level is measured for UHF radio wave in presence of vehicles. We perform measurement in two scenarios: 1) a parking lot and 2) a small street. We have found that the probability density function (pdf) of receiving signal level in small street scenario exhibits two peaks while only one peak is observed in the parking lot environment. The complement cumulative distribution functions (CCDF) of receiving signal in both full and empty parking lots are similar. However, the average signals level in the full parking lot of lower than the empty parking lot. Level crossing rate (LCR) is also calculated for each scenario.**

Key words: wave propagation, wireless sensor networks, diversity.

I. Introduction

There are many attempts, which require real-time traffic information, to solve traffic problem. A wireless sensor network is an attractive choice to gather traffic information since it is convenient to install and maintain. One major problem in large city is traffic jam due to inappropriate traffic signal control. The wireless sensor network can provide real-time traffic information so that traffic lights in the area can be properly controlled according to traffic condition. Another major problem in urban area is available spaces in a parking lot. The wireless sensor network can provide some crucial information how many and where spaces in the parking lot are available before the vehicles enter the parking lot. .

The wireless sensor network consists of server nodes and sensor nodes. Typically, sensor nodes are installed on the road surface and they transmit data to the server nodes via wireless channel. Communication between the sensor nodes and server nodes utilizes radio wave propagated through moving vehicles. The moving vehicles reflect and obstruct the radio wave and, hence, such environment creates a number of multipath components. Moreover, mutipath components are time varying due to moving vehicles. This severe multipath environment strongly degrades receiver performance. In order to improve receiver performance, statistical information of mutipath components is required.

Statistical properties of multipath components heavily depend on scatterers characteristic. Due to small scale of the propagation and moving scatterers, the propagation characteristic is difficult to model. Hence, to understand the propagation behavior, the channel measurement is required. In this study, we perform amplitude characteristic of propagation channel using a channel sounder. The channel sounder consists of standard RF measurement equipments. The channel sounder is used to measure receiving signal level in two different scenarios. The first scenario is a parking lot environment which consists mostly of non-moving vehicles and, hence, the multipath components do not vary much with time. The second scenario arises in traffic monitoring application in which the wireless sensors are installed in heavy traffic scenario. Moving vehicles in this scenario create time varying multipath components.

The paper is organized as follow. In the first section, the measurement system is discussed. Section II-B shows measurement results on the parking lot. The measurement results on the small street are in section II-C. Section III concludes the paper and discusses possible future works.

II. Measurement Campaigns and Results

A. Measurement scenarios and channel sounder system

The channel sounder consists of a transmitter, receiver and signal processing unit. The probing signal is BPSK modulation with bit rate of 50 kbps which is modulated to 2.45 GHz by Agilent signal generator model E4433B. The signal bandwidth for BPSK with $\alpha = 0.5$ raise cosine filter is about 75 KHz. The signal is transmitted using a dipole antenna with 4 dB gain. The signal power is set to be constant at 10 dBm.

The receiver consists of Agilent N9020A MXA signal analyzer connected to the receiving antenna via a low noise amplifier with 28 dB gain. The receiving complex signal is demodulated by Agilent 89600 vector signal analyzer software installed in the Agilent N9020A. The software acquired the receiving signal in the form of

$$y(t) = i(t) + q(t)j \qquad (1)$$

The receiving signal is acquired for two seconds and sampled at 320 ksps. Hence, the number of sample is 640,000 samples

er measurement. The sampled receiving signal is stored to he hard disk of the Agilent N9020A. The signal is then rocessed off-line using MATLAB software. The signal mplitude and phase are simply calculated by

$$r(t) = \sqrt{i(t)^2 + q(t)^2} \tag{2}$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{q(t)}{i(t)} \tag{3}$$

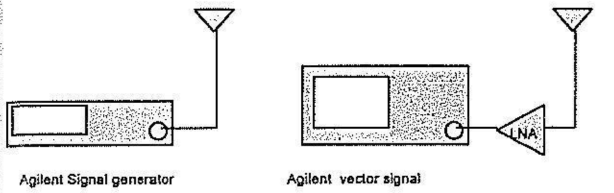


Fig. 1 The transmitter and receiver for the measurement

B. *Parking lot*

To investigate receiving signal power in the parking lot, the measurements are performed in two extreme cases. The first scenario is an empty parking lot representing radio propagation without any random obstacle. Another extreme is a full parking lot where all vehicles act as scatterers. By performing measurement of signal level on these two scenarios, the total signal fluctuation should be captured.

The parking lot is outdoor type with metal roof. The height of roof is about three meters as shown in Fig 2. The measurements are performed on two different conditions on the parking lot. The transmitter and receiver are 6 meters apart. Both transmitting and receiving antenna height from the ground is 2 meters.

Fig. 2 Parking lot scenario

We first study statistical behavior of the receiving signal amplitude in both scenarios. In order to understand this statistical behavior, we examine the signal amplitude pdf. The pdf represents the "density" of probability at the receiving signal amplitude. Hence, it can be utilized to determine the receiving signal fluctuation. The receiving amplitude distribution of the empty and full parking lot is shown in fig. 3. The measurements show that the amplitude distributions in the empty and full parking lots are similar. The only difference is the average receiving signal amplitude. The vehicles in the parking lot influence only on the average signal attenuation. Variation of the signal level depends on the structure of the parking lot because the pdf of both cases are similar.

We further investigate probability of the receiving signal level. In order to illustrate the receiving signal probability, the empirical complement cumulative distribution (CCDF) [1, 3] is calculated for both cases. CCDF associates the receiving signal level being greater than a particular value with a probability. Fig. 4 shows the CCDF of signal level in both empty and full parking lot. Let us consider the CCDF of full parking lot signal level of -60 dBm. It will be 6.51% of the receiving signal being less than -60dBm. There is another benefit of using CCDF to indicate the channel characteristic. Different channels can be compared by the signal level different at the same probability. For example, let us consider the probability at 90%. The signal levels in full and empty parking lots are -58.45 dBm and -50.26 dBm respectively. The signal difference is 8.19 dBm. This signal level difference can be use in performance evaluation of various propagation scenarios.

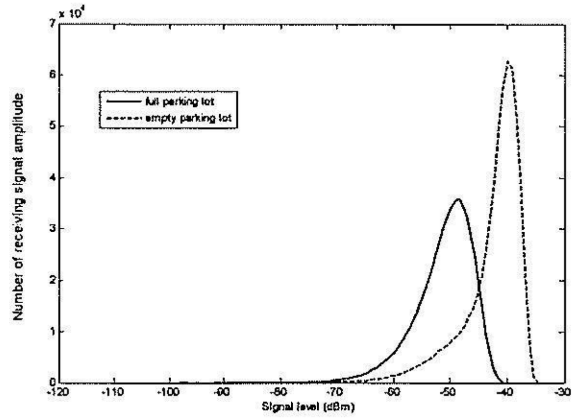


Fig. 3 Pdf of the receiving signal level in the empty parking and the full parking

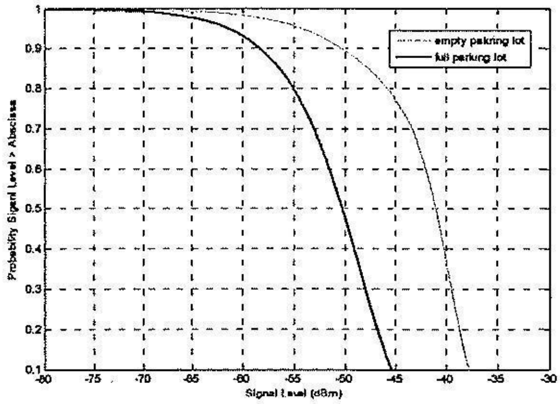


Fig. 4 CCDF of receiving signal level in the parking lots

Dynamic of receiving signal level can be visualized by ding envelop. The fading envelop plot is normalized to root ean square (rms) power. The fading envelop of full parking t case is shown in Fig 5. It can be observed that there is only nall fluctuation in the fading envelop since most of scatters e stationary. Next, we calculate the level crossing rate CR) [1] of the receiving signal. Fig 6 shows the LCR for oth full and empty parking lot. It can be seen that the highest CR is about the rms signal level in both cases. However, in ll park lot, the LCR are spread into the lower threshold area ue to higher signal loss.

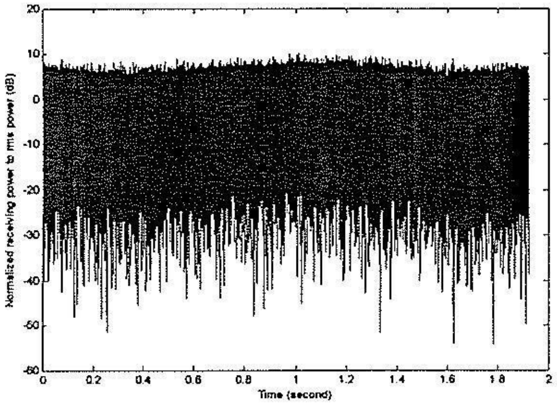


Fig. 5 Fading envelop of the full parking lot

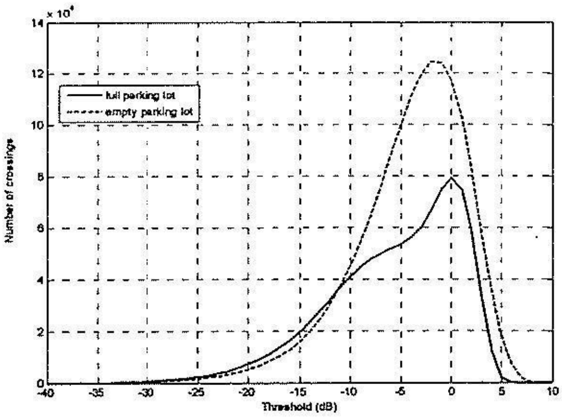


Fig. 6 Level crossing rate (LCR) for full and empty parking lots.

C. *Small Road with traffic*

The measurements are performed on a road side with various traffic conditions. The distance between the transmitter and receiver is five meters. The corresponding minimum propagation delay is 16.7 ns. We approximate the exceed delay is ten times of the minimum delay and, hence, coherence bandwidth is 6 MHz. The probing signal is 75 kHz which is much smaller then the coherence bandwidth. Thus, the channel is flat fading. The antenna position is 0.5 meters above the ground as shown in Fig 7. The average vehicle velocity is about 40-60 km/hr.

Sedan cars and motorcycles are observed in the experiment. The first traffic condition is a sedan car and two motorcycles are moving in opposite direction. It can be seen from the pdf shown in fig 8 that there are two signal concentrations at low and high power region. The signal in low power region corresponds to the signal blocking due to the moving car. The peak in high power region represents the signal propagation without any obstacle.

When a motorcycle and a motorcycle are in the opposite direction, the amplitude fluctuates in high power region as shown in fig. 8. The receiving signal in motorcycle case is higher than the signal in previous case because the motorcycle is smaller than car. Thus, the duration of signal blocking is shorter and the signal attenuation is lower.

Fig. 7 Road with traffic scenario

Similar to parking lot case, we calculate the CCDF of receiving signal level in both cases as shown in Fig. 9. The receiving signal is greater than -54.57 dBm and -42.72 dBm with probability of 0.9 in car-motorcycle and motorcycle-motorcycle respectively. With the probability of 0.9, the signal level difference is 11.85 dBm. The signal level difference is 3.66 dBm greater than the parking lot case. This difference indicates that this scenario is more dynamic than the parking lot. The dynamic of the signal level is higher than the parking lot case due to moving scatterers. However, the receiving signal level in this case is higher than the parking lot case since the road is in open space area.

Measuring fading envelop of car-motorcycle case, normalized to the receiving signal root mean square (rms) ,is show in fig 10. It can be clearly seen that there is a duration that the signal level is below the rms signal level due to the car blocking the signal. All signals in lower peak in the pdf are in this signal blocking period. LCR is calculated for each scenario for the threshold levels ranging from -50 dB to +10 dB. The results are shown in fig 11. It can be observed that the LCR of car-motorcycle case is highest at the signal level -15 dB below the rms signal level. In the motorcycle-motorcycle case, the peak LCR is about the rms signal level.

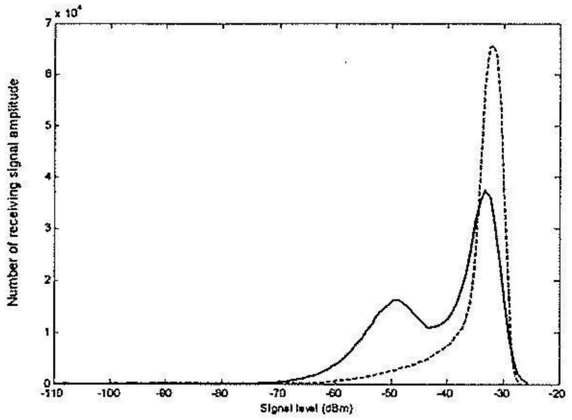


Fig. 8 Pdf of the receiving signal level in a car and two motorcycles and a motorcycle and a motorcycle are moving in opposite direction

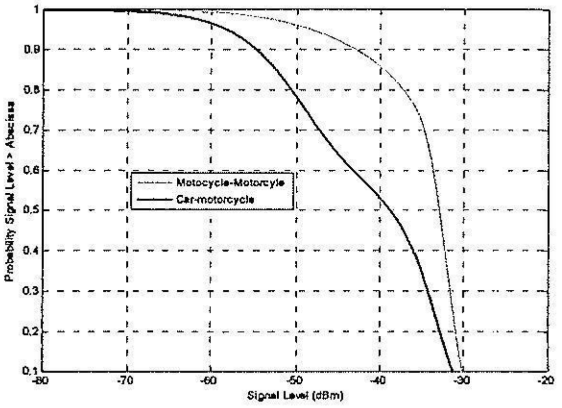


Fig. 9 CCDF of receiving signal level in the road

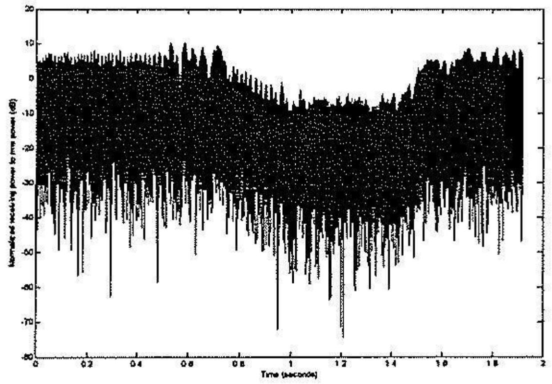


Fig. 10 Fading envelop when a car and two motorcycles are moving in opposite direction

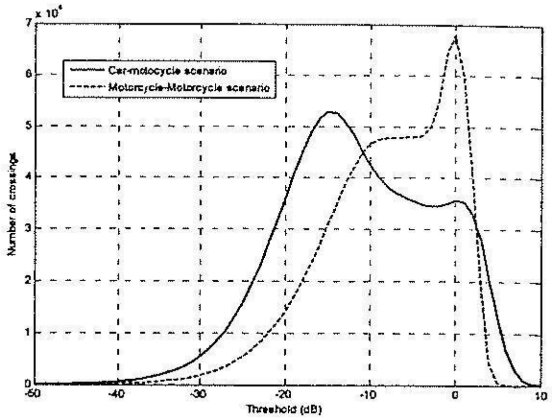


Fig. 11 Level crossing rate (LCR) for car-motorcycle and motorcycle-motorcycle scenarios.

III. Conclusion and Future Works

In this paper, dynamic of signal level in radio propagation channel in presence of vehicles is studied. We perform receiving signal level measurements in two difference scenarios. The results in the street scenario show that the signal level is more fluctuated than the parking lot case. There is evidence that the moving sedan car significantly reduce the receiving signal level. In the parking lot scenario, signal level variation is small.

The measurement results can be utilized to design diversity system for the wireless sensor network. With temporal channel information, time diversity techniques can be employed. For example, diversity system for small road scenario has to be capable to receive signal with a curtain period of outage.

To fully utilize diversity scheme, spatial channel information is required. We plan to study spatial channel characteristic in the future with our existing channel sounder.

Acknowledgments

This work was supported by the Research Department Institute of Engineering University of Technology Thailand.

References

[1] W. C. Lee, "Mobile Communication Engineering", New York, McGraw-Hill, 1982..

[2] T. S. Rappaport, "Wireless Communications : Principle and Practice", New Jersey , Prentice Hall PTR, 1996.

[3] H. Hashemi, M. McGuire, T. Vlasschaert and D. Tholl, , "Measurement and Modeling of Temporal Variations of the Indoor Radio Propagation\ Channel," IEEE Trans. Veh. Technol.., vol. 43, no. 3, pp.733-737, August 1994.

ประวัติภาพรวมโดยย่อ

ชื่อ - นามสกุล : ผศ.ดร. ชาญชัย ทองโสภา

ที่อยู่ : 454/168 ม.ชนชอบ-ธันธวัช ถ.รามอินทรา-วัชรพล
แขวงคลองถนน เขตสายไหม กทม. 10220
โทร. (081-8378185), (02) 994-2095

ประวัติการศึกษา :

2545 –วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2539 –วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า-สื่อสาร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2535 –วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์
(เกียรตินิยม อันดับ 1)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- ใบประกอบวิชาชีพสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้าสื่อสาร, ภฟส.5514

ความชำนาญเฉพาะด้าน :

1) การออกแบบวงจรความถี่สูง
2) ระบบสายอากาศ และสายอากาศแบบแอคทีฟ (Active Antenna)
3) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง (Microwave Hyperthermia)

ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย :

พ.ศ. 2535 – 2540 ตำแหน่งนักวิจัย บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด
- ผลงานการออกแบบระบบสื่อสาร หอบังคับการบินกับนักบิน
- ผลงานการออกแบบวิทยุรับ-ส่งความถี่ย่าน VHF, UHF (AM) 25W (ระบบเปิดตลอด 24 ชั่วโมง)
- ผลงานการออกแบบระบบวิทยุคลื่นสั้น HF (AM) 1 kW (ระบบเปิดตลอด 24 ชั่วโมง)

พ.ศ. 2540 – 2543 ตำแหน่งนักวิจัย สังกัดหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโทรคมนาคม ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
- เป็นที่ปรึกษาองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ในโครงการ SDH

- ผลงานการออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง

ปัจจุบัน อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

- สาขา วิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
- ผู้อำนวยการศูนย์คอมพิวเตอร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รางวัลเกียรติคุณ :

2533: โล่ห์เกียรติคุณ จากกรมสื่อสารทหารอากาศ **ในฐานะบุคคลดีเด่น**

2534: โล่ห์เกียรติคุณ จากกองทัพอากาศ **ในฐานะบุคคลดีเด่น**

2540: รางวัลวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2546: รางวัลศิษย์เก่าดีเด่น โรงเรียนช่างฝีมือทหาร

2551: โล่ห์เกียรติคุณ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**ในฐานะบุคคลดีเด่น**

สิทธิบัตร:

ประเภท การประดิษฐ์

1. การหลอมขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้วัตถุดิบรีไซเคิ้ลจากขยะชุมชนโดยขบวนการคลื่นแม่เหล็กและการบีบอัด เลขที่คำขอ 0501000290
2. สายอากาศแพตซ์แนวตั้งคู่ที่มีสตริปเชื่อมอยู่ตรงกลาง เลขที่คำขอ 0701001929
3. เครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือน เลขที่คำขอ 0901003816
4. เครื่องไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง เลขที่คำขอ 0901003815
5. เครื่องกำจัดลูกน้ำยุงโดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เลขที่คำขอ 1001000444

ผลงานวิจัยทางวิชาการ

1 M.Krairiksh, **C.Thongsopa** and A.Mearnchu, "A Steerable Active Applicator," *Proceedings of the 1998 Asia-Pacific Microwave Conference,* Yokohama, vol. 2, pp.861-864, Dec. 1998.

2 M.Krairiksh, **C.Thongsopa** and C.Phongcharoenpanich, "A Steerable Active Spherical Slot Array Antenna," *Proceedings of the 1999 Progress in Electromagnetics Research Symposium,* Taipei, vol. 1, p.483, Mar. 1999.

3 M.Krairiksh, **C.Thongsopa**, D.Srimoon and A.Mearnchu, "Analysis of Steerable Active Slot Array Applicator," *Proceedings of the 1999 Asia-Pacific Microwave Conference,* Singapore, vol. 2, pp.489-492, Dec. 1999.

4 M.Krairiksh, **C.Thongsopa**, C.Phongcharoenpanich, E.Khoomwong andC.Leekpai,"A Steerable Spherical Slot Array Antenna," *Journal Science Asia,* vol. 25, no.4, pp.231-236, 1999.

5 **C.Thongsopa,** M.Krairiksh, N.Srirattana and A.Intarapanich, "A Single Patch Beam Steering Antenna," *Proceedings of the 2000 Asia-Pacific Microwave Conference,* Sydney, pp. 1510-1513, Dec. 2000.

6 **C.Thongsopa**, M.Krairiksh and A.Mearnchu, " Analysis and Design of a Steerable Active Array Applicator," *The First National Meeting on Biomedical Engineering,* Bangkok Thailand, Sep. 2001

7 **C.Thongsopa**, M.Krairiksh, A.Mearnchu and D.Srimoon, "Analysis and Design of Injection Locking Steerable Active Array Applicator," *IEICE Trans. Communications,* vol.E 85-B, no 10, pp. 2327-2337, Oct. 2002.

8 **C.Thongsopa**, C. Jumniensri, and J.Wongmethanukro, "Beam Steering Using Single Patch Active Antenna," *Proceedings of the* 26^{th} *Electrical Engineering Conference*, Thailand, pp.1796-1800, Nov. 2003.

9 **C. Thongsopa**, P. Jarataku, and P. Sukpong, "Wide Band U-Shaped cross section Antenna with a strip on a U-Shaped ground plane," *IEEE Transactions on Magnetics,*Beijing,China, pp.458-461, Apr. 2005.

10 Sukpong, **C. Thongsopa**, and P. Jarataku, "Injection-Locked Active Antenna Using a Dual Gate MESFET," *The 4th PSU-Engineering Conference (PEC4)*, Songkhla,Thailand, pp. 50-54, December 8-9, 2005.

11 **C. Thongsopa**, A. Intarapanich, and C. Saetiaw," Amplitude Modulation Using Injection Locking Oscillator Under Strong Envelop Variation Injection," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications,* Tokyo, Japan, August 2006.

12 **C. Thongsopa**, "Array of A U-Shaped Element on A U-Shaped Ground Plane Wideband Antenna", *2006 Asia-Pacific Conference on Communication,* Bussan, Republic of Korea, 31 August-1 September 2006, 5D-145.

13 P. Jarataku, and **C. Thongsopa**, "2.45 GHz Bi- Directional Amplifier for Wireless LAN," *The 5th PSU-Engineering Conference (PEC5)*, Thailand, pp.197-201,May 10-11. 2007.

14 **C. Thongsopa**, D.Srimoon,and P. Jarataku, "A U-Shaped Cross Sectional Antenna on a U-Shaped Ground Plane with an offset Parabolic Reflector for WLAN," IEEE AP-S International Symposium 2007, Honolulu, Hawaii. USA, pp 5159-5162, Jun 10-15, 2007.

15 C. Saetiaw, A. Intarapanich, and **C.Thongsopa**, "Effect of Spatial Correlation with Directional Antenna on MIMO capacity," 2007 International Symposium on Antenna and Propagation, Niigata, Japan, pp 1334-1337, August 20-24, 2007.

16 A. Intarapanich, **C.Thongsopa,** and C. Saetiaw, "Effect of Antenna Patterns on Narrowband MIMO capacity," IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications, Hangzhou, China, pp 160-163, August 14-16, 2007.

17 **C. Thongsopa**, and A. Intarapanich, " Double injection Locking Active Antenna," European Conference on Antennas and Propagation, (Eucap 2007) Edinburgh, UK, pp aa-bb, November 11-16, 2007.

18 P. Thosdee, and **C. Thongsopa**, "Quasi-Rhomboid Antenna for Ultra Wideband Wireless Communication System," *Proceedings of the 30th Electrical Engineering Conference,* Kanchanaburi, Thailand, pp. aa-bb, October 25-26. 2007.

19 C. Saetiaw, A. Intarapanich, and **C.Thongsopa**, "Relations between 3-Dimensions Antenna Pattern and Narrowband MIMO Capacity," *Proceedings of the 2007 Asia-Pacific Microwave Conference,* Bangkok, Thailand, pp. aa-bb, December 11-14, 2007.

20 Maungrat, M., **Thongsopa**,C., and Jarataku, P.,"Measurement of UHF Radio Wave Propagation in Parking," *The 7th PSU-Engineering Conference (PEC7)*, Songkhla,Thailand, pp. 97-100, May. 21-22, 2009.

21 Tangwachirapan, S., **Thongsopa**,C., "Numerical Simulation of Magnetic Fields Shield for Breast Cancer Hyperthermia," *The 7th PSU-Engineering Conference (PEC7)*, Songkhla,Thailand, pp. 102-105, May. 21-22, 2009.

22 Patummakasorn, C., and **Thongsopa, C.,** "Analysis and Design of Applicator System for Regional Induction Heating 2.45 GHz," WSEAS Transactions on Communications, Issue 9, Volume 8, September 2009.

23 **Thongsopa, C.**, and Thosdee, P., "Array of Quasi Rhomboid Shaped Element Bowtie Antenna with Reflector for Ultra Wideband Applications," *in proc.* The 2009 International Symposium on Antennes and Propagation (ISAP 2009), Bangkok, Thailand, October 20-23, 2009.

24 **Thongsopa, C.**, and Saetiaw, C., "The Effect of 3D Antenna Radiation Pattern on Narrowband MIMO Capacity: Simulation and Measurement," *in proc.* The 2009 International Symposium on Antennes and Propagation (ISAP 2009), Bangkok, Thailand, October 20-23, 2009.

25 Patummakasorn, C., and **Thongsopa, C.,** "Simulations and Experiment of Applicator System for Regional Induction Heating 2.45 GHz," WSEAS Conferences AIC '09, ISCGAV '09, ISTASC '09, HTE '09, FMA '09, BEBI'09 Moscow, Russia, August 20-22, 2009.

26 **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A.and Maungrat, M., "Temporal Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicles" *in proc.* 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC'09) Kyoto, Japan, July 20-24,2009.

27 **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A.and Tangwachirapan, S.,"Shielding system for breast hyperthermia inductive heating"*in proc.* The XIVth International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics Electrical and Electronic Engineering, (ISEF'09) Arras, France, Sep 10-12, 2009.

28 **Thongsopa, C.**, and Thosdee, P., *"Development of Monocycle pulse* Generator Circuit for Ultra Wideband Applications," *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.

29 Maungrat, M., and **Thongsopa, C.**, "Measurement of ASK and FSK Wave Propagation in Parking," *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.

30 Tangwachirapan, S., **Thongsopa, C.**, "Study Magnetic Fields Shield for Lossy Mediums Inductive Hyperthermia Heating," *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009. ***(The Best Paper Award in Biomedical Engineering).***

31 Santalunai, S., and **Thongsopa, C.**, "High Power Amplifier Design for RF Induction Heating" *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.

32 Yaemsuan, P., and **Thongsopa, C.**, "Design and Construction of Induction Heating Boiler Machine with Full-Bridge Inverter"*in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.