การวัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุบนท้องถนน

นายมังคลา ม่วงรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF RADIO WAVE PROPAGATION ON THE ROAD

Mungkala Maungrat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

การวัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุบนท้องถนน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
ประธานกรรมการ

____

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)
กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มังคลา ม่วงรัตน์ : การวัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุบนท้องถนน (MEASUREMENT AND ANALYSIS OF RADIO WAVE PROPAGATION ON THE ROAD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา, 120 หน้า.

การวัดการการแพร่กระจายของช่องสัญญาณไร้สาย ได้มีการวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการวิจัยเพื่อนำไปใช้ในระบบโทรศัพท์มือถือหรือระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) โดยงานวิจัยต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ใช้ อย่างเช่น คุณลักษณะของเครื่องส่ง คุณลักษณะของเครื่องรับ สภาพแวดล้อมของการวิจัย ซึ่งผลที่ได้ออกมาจะนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ หรือกำหนดรูปแบบการสื่อสารต่าง ๆ สภาพแวดล้อมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดช่องสัญญาณไร้สาย จะมีสภาพแวดล้อมหลายแบบด้วยกัน อย่างเช่น ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงเรือน (Indoor) ภายนอกอาคาร (Outdoor) เป็นต้น แต่ในการวิจัยนี้เราสนใจสภาพแวดล้อมที่เป็นสภาพบนท้องถนนที่มีรถยนต์วิ่งผ่านไปมา โดยสภาพแวดล้อมบนท้องถนนจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากรถยนต์ที่วิ่งผ่านอีกทั้งปริมาณรถยนต์และความเร็วของรถยนต์ ทำให้ช่องสัญญาณที่ต้องวัดเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาด้วยเช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากการวัดในสภาพแวดล้อมแบบภายนอกนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางและสัญญาณที่รับได้ แต่งานวิจัยนี้ระยะทางที่ใช้วัดช่องสัญญาณระหว่างชุดเครื่องรับและชุดเครื่องส่งมีระยะทางที่สั้น ดังนั้นจึงไม่ขึ้นกับระยะทาง แต่จะขึ้นกับขนาดของสัญญาณที่รับได้ โดยจะทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ในรูปแบบของขนาดและเฟสที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และค่าที่ได้นี้จะนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบระบบการรับส่งสัญญาณให้ได้ข้อมูลข่าวสารที่ดีที่สุดในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน อย่างเช่น รูปแบบระบบการรับสัญญาณด้วยวิธีการไดเวอร์ซิตี้ (Diversity) หรือในรูปแบบของ Multiple Input Multiple output (MIMO) เป็นต้น เพื่อจะนำไปสู่การออกแบบระบบการควบคุมการจราจรแบบอัตโนมัติหรือระบบการควบคุมรถยนต์แบบอัจฉริยะในอนาคตต่อไป

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม	ลายมือชื่อนักศึกษา________________
ปีการศึกษา 2552	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา____________

MUNGKALA MAUNGRAT : MEASUREMENT AND ANALYSIS OF RADIO WAVE PROPAGATION ON THE ROAD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D., 120 PP.

DIGITAL MODULATION/RADIO WAVE PROPAGATION

Propagation measurement of wireless channels researching has been ongoing. Most researching is research to be used in mobile or wireless local area network (WLAN) The researching will depend on various factors such as characteristics of the transmitter, Features of the receiver, Environment research. That have various environments such as Indoor, Outdoor, etc., However, we are interested in this research environment is road that runs through to the car. The environment on the road is changing due to cars running through the car as well as volume and speed of the car. That channel to measure change over time too. This research past, most measurements in the outdoor environment will depend on distance and signal received. But this research, distance measure between the set of receiver and transmitter is a short distance. Therefore, it not based on distance but depends on the amplitude of the signal received. By analyzing the signal received in the form of amplitude and phase change. That values 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., it used to design traffic control systems, or automatic vehicle control system

School of Telecommunication Engineering	Student's Signature _______________
Academic Year 2009	Advisor's Signature_______________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณประพล จาระตะคุ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์ คุณมณีรัตน์ ทุมพงษ์ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

มังคลา ม่วงรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ข

กิตติกรรมประกาศ .... ค

สารบัญ .... ง

สารบัญรูป .... ช

สารบัญตาราง .... ฏ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 2

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย 2

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.7 ปริทัศน์วรรณกรรม 3

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์ 4

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุและสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันสำหรับใช้ในการทดลอง 6

2.1 กล่าวนำ 6

2.2 ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ 6

2.2.1 การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง 7

2.2.2 การแพร่กระจายคลื่นพื้นฐาน 7

2.2.3 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุ 8

2.2.4 ทฤษฎีสายอากาศ 17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 ทฤษฎีของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน 21
2.3.1 Amplitude Shift Keying 26
2.3.2 Frequency Shift Keying 28
2.3.3 Phase Shift Keying 30
2.4 ทฤษฎีของความน่าจะเป็น 32
2.4.1 ความหมายความของตัวแปรสุ่มและสัญญาณสุ่ม 32
2.4.2 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น
สะสม
ของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง 33
2.4.3 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็น 34
2.4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม 36
2.4.5 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานและแวเรียนซ์ 37
2.4.6 ฟังก์ชันการกระจายสะสมเติมเต็ม 38
2.5 สรุป 40
3 การออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันและเหตุการณ์
ของการทดลองวัด 42
3.1 กล่าวนำ 42
3.2 การออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน 42
3.3.1 การออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบ
Amplitude Shift Keying 42
3.3.2 การออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบ
Frequency Shift Keying 46
3.3.2 การออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบ
Phase Shift Keying 55
3.3 เหตุการณ์ของการวัด 56
3.3.1 เหตุการณ์ของสภาพแวดล้อมห้องปิดภายในอาคาร 57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 เหตุการณ์ของสภาพแวดล้อมลานจอดรถยนต์ 58
3.3.3 เหตุการณ์ของสภาพแวดล้อมลานจอดรถจักรยานยนต์ 59
3.3.4 เหตุการณ์ของสภาพแวดล้อมบนท้องถนน 61
3.4 สรุป 62
4 การวัดและผลการทดลอง 98
4.1 กล่าวนำ 63
4.2 ระบบการวัดและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด 63
4.3 การวิเคราะห์ผลแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมทั่วไป 64
4.3.1 สภาพแวดล้อมของห้องปิดภายในอาคาร 64
4.3.2 สภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ 68
4.3.3 สภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ 77
4.4 การวิเคราะห์ผลแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน 86
4.5 สรุป 97
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 98
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 98
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 100
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต 100
รายการอ้างอิง 101
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 103
ภาคผนวก ข. รายละเอียดทางเทคนิคของวงจรดิจิตอลมอดูเลชัน 118
ประวัติผู้เขียน 120

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การสื่อสารไร้สาย 7

2.2 การสะท้อนจากพื้นดิน 8

2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับแบบจำลอง nth และตัวคูณ path loss ที่แตกต่างกัน 10

2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน 12

2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่มีผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน 13

2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางของสองความถี่ 14

2.7 สายอากาศโมโนโพลที่ป้อน ด้วยสายโคแอกเชียลและระนาบกราวด์ 18

2.8 ตัวอย่างของรูปแบบสัญญาณ AM FM และ PM 22

2.9 สเปกตรัมของสัญญาณ AM 24

2.10 สเปกตรัมของสัญญาณ FM 25

2.11 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK 27

2.12 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK 28

2.13 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK 29

2.14 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ FSK 30

2.15 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ PSK 31

2.16 Constellation Diagram ของการมอดูเลตแบบ PSK ชนิด Binary PSK 31

2.17 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ PSK 32

2.18 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่อง 34

2.19 ตัวอย่างของ PDF 35

2.20 กราฟเส้นโค้ง CCDF 39

2.21 การคำนวณกราฟเส้นโค้ง CCDF 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.1 ASK Transmitter Module 43
3.2 วงจรสร้างสัญญาณจากไอซีเบอร์ 555 43
3.3 สายอากาศย่านความถี่ 433 MHz 44
3.4 ภาพการต่อวงจรภาคส่งของมอดูเลตแบบ ASK 44
3.5 ASK Receiver Module 45
3.6 ภาพการต่อวงจรภาครับของมอดูเลตแบบ ASK 45
3.7 สัญญาณ ASK ที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป 46
3.8 FSK Transmitter Module 47
3.9 ส่วนประกอบต่างๆของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 48
3.10 Serial Port 49
3.11 การจัดเรียงสัญญาณของพอร์ต I/O ต่างๆของบอร์ด ET-BASE51 V2.0 50
3.12 ชุดเชื่อมต่อแรงดันลอจิกระหว่าง 3.3Vกับ 5V 53
3.13 ภาพการต่อวงจรภาคส่งของมอดูเลตแบบ FSK 53
3.14 FSK Receiver Module 54
3.15 ภาพการต่อวงจรภาครับของมอดูเลตแบบ FSK 54
3.16 สัญญาณ FSK ที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป 55
3.17 เครื่องส่ง Agilent signal generator model E4433B 56
3.18 เครื่องรับ Agilent N9020A MXA signal analyzer 56
3.19 แบบจำลองสถานที่การทดลองจริง ห้องปิด (Top view) 57
3.20 ห้องปิดภายในอาคาร (Indoor) ที่ใช้ในการทดลอง 57
3.21 แบบจำลองสถานที่การทดลองจริง ลานจอดรถยนต์ 58
3.22 ลานจอดรถยนต์ว่าง 59
3.23 ลานจอดรถยนต์เต็ม 59
3.24 แบบจำลองสถานที่การทดลองจริง ลานจอดรถจักยานยนต์ 60
3.25 ลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง 60
3.26 ลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม 61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.27 แบบจำลองการทดลองวัดบนท้องถนน 61
3.28 การทดลองวัดบนท้องถนน 62
4.1 IQ Modulation 64
4.2 กราฟฮิสโตแกรมในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 65
4.3 กราฟฮิสโตแกรมในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 66
4.4 กราฟฮิสโตแกรมในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 66
4.5 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอล ASK FSK และ BPSK 67
4.6 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอล ASK FSK และ BPSK 68
4.7 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 69
4.8 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 69
4.9 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK 70
4.10 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK 71
4.11 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 72
4.12 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 72
4.13 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK 73
4.14 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK 74
4.15 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.16 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 75
4.17 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK 76
4.18 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK 77
4.19 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 78
4.20 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 78
4.21 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK 79
4.22 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK 80
4.23 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 81
4.24 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 81
4.25 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK 82
4.26 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK 83
4.27 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 84
4.28 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 84
4.29 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK 85
4.30 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK 86
4.31 กราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 87
4.32 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่านของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.33 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK 88
4.34 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล ASK 89
4.35 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล ASK 89
4.36 กราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 90
4.37 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่านของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 91
4.38 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK 91
4.39 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล FSK 92
4.40 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล FSK 93
4.41 กราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 94
4.42 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่านของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 94
4.43 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK 95
4.44 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล BPSK 96
4.45 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล BPSK 96

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 องค์ประกอบของโดเมนความถี่ของ $V_{am}(t)$ 24

ข.1 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรดิจิตอลมอดูเลชันแบบ ASK และ FSK 119

ข.2 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรดิจิตอลมอดูเลชันแบบ BPSK 119

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

P_t	=	transmit power
P_r	=	receive power
d	=	distance
λ	=	wave lenght
PL	=	path loss
α	=	angle of reflection
N	=	number of ray
G	=	gain
LOS	=	line of sight
d_0	=	reference distance
$G(h_{te})$	=	transmiter gain
$G(h_{re})$	=	recievergain
G_{area}	=	area gain
f_c	=	carier frequency
Γ	=	reflection coefficient
$a(h_{re})$	=	correction factor
Z	=	impedance
D	=	directivity
HF	=	high frequency
VHF	=	very high frequency
σ	=	standard deviation
f	=	frequency
g_t	=	transmiter antenna gain
g_r	=	reciever antenna gain
AM	=	amplitude modulation
FM	=	frequency modulation
PM	=	phase modulation

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ASK	=	amplitude shift keying
FSK	=	frequency shift keying
PSK	=	phase shift keying
V_m	=	amplitude
ω_m	=	frequency angle
BW	=	bandwidth
d	=	modulating factor
CDF	=	cumulative distribution function
PDF	=	probability density function
CCDF	=	complement cumulative distribution function
E	=	Variance
DC	=	direct current
IEEE	=	the Institute of Electrical and Electronics Engineers
LNA	=	low noise amplifier

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวัดการแพร่กระจายของช่องสัญญาณไร้สายได้มีการวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการวิจัยเพื่อนำไปใช้ในระบบโทรศัพท์มือถือหรือระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) โดยงานวิจัยต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ใช้ อย่างเช่น คุณลักษณะของเครื่องส่ง คุณลักษณะของเครื่องรับ สภาพแวดล้อมของการวิจัย ซึ่งผลที่ได้ออกมาจะนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ หรือกำหนดรูปแบบการสื่อสารต่าง ๆ สภาพแวดล้อมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดช่องสัญญาณไร้สาย จะมีสภาพแวดล้อมหลายแบบด้วยกัน อย่างเช่น ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงเรือน (Indoor) ภายนอกอาคาร (Outdoor) เป็นต้น แต่ในการวิจัยนี้เราสนใจสภาพแวดล้อมที่เป็นสภาพบนท้องถนนที่มีรถยนต์วิ่งผ่านไปมา โดยสภาพแวดล้อมบนท้องถนน จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากรถยนต์ที่วิ่งผ่านอีกทั้งปริมาณรถยนต์และความเร็วของรถยนต์ทำให้ช่องสัญญาณที่ต้องวัดเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาด้วยเช่นกัน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากการวัดในสภาพแวดล้อมแบบภายนอกนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางและสัญญาณที่รับได้ แต่งานวิจัยนี้ระยะทางที่ใช้วัดช่องสัญญาณระหว่างชุดเครื่องรับและชุดเครื่องส่งมีระยะทางที่สั้น ดังนั้นจึงไม่ขึ้นกับระยะทาง แต่จะขึ้นกับขนาดของสัญญาณที่รับได้ โดยจะทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ในรูปแบบของขนาดและเฟสที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และค่าที่ได้นี้จะนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบระบบการรับส่งสัญญาณให้ได้ข้อมูลข่าวสารที่ดีที่สุดในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน อย่างเช่น รูปแบบระบบการรับสัญญาณด้วยวิธีการไดเวอร์ซิตี้ (Diversity) หรือในรูปแบบของ Multiple Input Multiple output (MIMO) เป็นต้น เพื่อจะนำไปสู่การออกแบบระบบการควบคุมการจราจรแบบอัตโนมัติหรือระบบการควบคุมรถยนต์แบบอัจฉริยะในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษารูปการของแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการและคุณสมบัติของการมอดูเลตแบบดิจิตอล

1.2.3 เพื่อศึกษาระบบการรับส่งสัญญาณดิจิตอล

1.2.4 เพื่อศึกษาออกแบบวงจรรับส่งสัญญาณดิจิตอลและวิเคราะห์สัญญาณที่แพร่กระจายบนท้องถนน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ออกแบบวงจรรับส่งสัญญาณดิจิตอล

1.3.2 วัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมแบบภายในอาคารและแบบภายนอกอาคาร

1.3.3 วัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบสร้างวงจรรับส่งสัญญาณดิจิตอลในแบบ ASK, FSK และ PSK

1.4.2 วัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK, FSK และ PSK ในสภาพแวดล้อมทั่ว ๆ ไป

1.4.3 วัดและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK, FSK และ PSK ในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
2) ศึกษาวิธีการมอดูเลตแบบดิจิตอล
3) ศึกษาวิธีการและคุณสมบติการรับส่งสัญญาณข้อมูล
4) ทดลองการรับส่งสัญญาณ โดยอุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งสัญญาณ
5) ทำการทดลองวัดค่าของช่องสัญญาณจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนนและทั่ว ๆ ไป
6) วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2) ศึกษาวิธีการและคุณสมบติการรับส่งสัญญาณข้อมูล
3) ติดตั้งเครื่องรับและเครื่องส่งทดลองการรับส่งสัญญาณ
4) ทำการวัดค่าของช่องสัญญาณจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนนและทั่ว ๆ ไป วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

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

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personnel Computer)

2) โปรแกรมเฉพาะทางวิศวกรรม MATLAB

3) อุปกรณ์รับสัญญาณและส่งสัญญาณไร้สาย

4) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer)

5) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม(Spectrum Analyzer)

6) เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่(Signal Generator)

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2) เก็บรวบรวมผลจากการทำการทดลองวัดค่าของช่องสัญญาณจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนนและทั่ว ๆ ไป วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบต่าง ๆ และการรับส่งสัญญาณไร้สาย ที่ใช้การมอดูเลตแบบดิจิตอล จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีเฉพาะทางวิศวกรรม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ค่าการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณไร้สายจากสภาพแวดล้อมบนท้องถนนและทั่ว ๆ ไป

1.6.2 ได้ข้อมูลที่สำคัญทางสถิติการรับส่งสัญญาณของช่องสัญญาณไร้สายตามสภาพแวดล้อมการจราจรบนท้องถนนที่มีรถยนต์วิ่งผ่านไปมาตลอดเวลา

1.7 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 การแพร่กระจายคลื่น ได้เป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยในช่วงที่ผ่านมา (Hata, 1980; Saleh and Valenzuela, 1987; Seidel and Rappaport, 1992; Ichitsubo, Furuno, Taga, and Ryoji, 2000; Phaiboon, S., 2005) โดยงานวิจัยของ Saleh and Valenzuela (1987); Seidel and Rappaport (1992) เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคาร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นในอาคารนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางและสภาพแวดล้อมของภายในอาคารรวมถึงพื้นของแต่ละชั้นของอาคารด้วย ซึ่งค่าของสัญญาณจะเปลี่ยนไปตามสิ่งกีดขวางต่าง ๆ และงานวิจัยของ Hata (1980); Ichitsubo, Furuno, Taga, and Ryoji (2000) เป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นภายนอกอาคาร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายคลื่นนอกอาคารนั้นการแพร่กระจายคลื่นจะขึ้นอยู่กับระยะทาง ความสูงของสายอากาศรวมถึงสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาด้วย ส่วนงานวิจัยของ Phaiboon, S. (2005) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับลานจอดรถภายในอาคาร โดยสัญญาณที่แพร่กระจายไปจะผ่านสภาพแวดล้อมที่มีรถยนต์จอดอยู่ ทำให้สัญญาณเกิดการลดทอนลง ดังนั้นการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นที่ผ่านมา จะเป็นการศึกษาเพื่อดูช่องสัญญาณ ที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาพแวดล้อม

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับบนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ โดยจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ได้แก่ ทฤษฎีของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุ ทฤษฎีของดิจิตอลมอดูเลชันและทฤษฎีของความน่าจะเป็น เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองวัด

บทที่ 3 กล่าวถึง การออกแบบและสร้างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันรวมถึงเหตุการณ์ของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการจำลองแบบวัด

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดลองวัด โดยจะอธิบายถึงระบบการวัด และการวิเคราะห์ผลจากความน่าจะเป็นในแบบต่าง ๆ เพื่อดูระดับสัญญาณในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

บทที่ 5 กล่าวถึง การสรุปผลจากการจำลองแบบที่ได้ทำการพัฒนาของวิทยานิพนธ์นี้ ปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา และแนวทางการพัฒนาในอนาคตในการทำศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวัดการแพร่กระจายคลื่นในโอกาสต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุและสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันสำหรับใช้ในการทดลอง

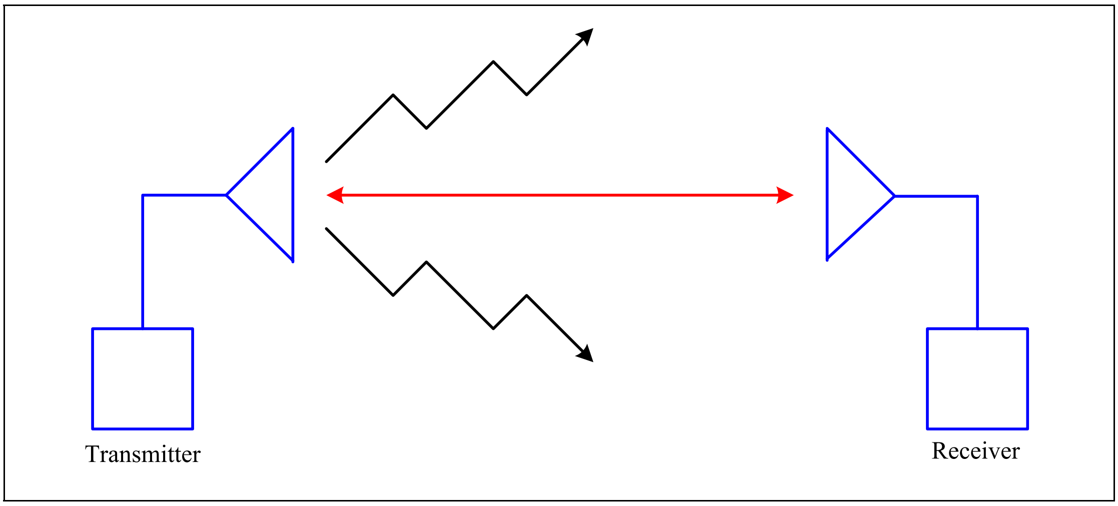
2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันมีระบบการสื่อสารอยู่หลายประเภท โดยมีการใช้สัญญาณในการส่งหลายแบบและหนึ่งในนั้นก็คือสัญญาณวิทยุ ซึ่งมีการใช้อยู่อย่างมากมายในหลายงาน ซึ่งในการระบบการสื่อสารสัญญาณวิทยุย่อมมีผลกระทบจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการของการแพร่กระจายคลื่น เพื่อให้สามารถวิจัยและประยุกต์พัฒนาประสิทธิภาพของระบบสื่อสารให้ดีขึ้นโดยในทฤษฎีของการแพร่กระจายคลื่นจะมีเรื่องของผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุซึ่งประกอบไปด้วยหลักการต่าง ๆ ตลอดจนผลกระทบหลักที่เกิดขึ้น และแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้มีการทำศึกษาวิจัยกันมา ทฤษฎีของสายอากาศ ซึ่งจะประกอบด้วยหลักการของโมโนโพลและไดโพล ซึ่งใช้ในการรับส่งสัญญาณ รวมถึงความเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นทฤษฎีของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณข้อมูล และทฤษฎีของความน่าจะเป็น ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณสัญญาณที่รับได้

2.2 ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ

ช่องทางการสื่อสารชนิดสัญญาณวิทยุประกอบด้วย ภาคส่งที่ทำการส่งสัญญาณผ่านสายอากาศภาคส่งและภาครับที่ทำการรับสัญญาณผ่านสายอากาศภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นสัญญาณวิทยุแพร่ออกมาจากภาคส่งโดยสัญญาณจะแพร่กระจายผ่านตัวกลางมาถึงสายอากาศภาครับ คุณลักษณะของสายอากาศ ตัวกลางและปัจจัยอื่น ๆ โดยจะอธิบายในส่วนต่อมา ซึ่งมีผลกระทบส่วนใหญ่ต่อพลังงานที่แพร่ออกมาถึงภาครับ

Path lose (หรือ Path attenuation) คือคำนิยามทั่วไปที่บอกถึงการลดลงของความหนาแน่นกำลังงาน (การลดทอน) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแพร่กระจายผ่านพื้นที่ว่าง และสิ่งที่สนใจก็คือความแรงของสัญญาณที่รับ โดยจะเป็นประโยชน์เพื่อแสดงระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ



รูปที่ 2.1 การสื่อสารไร้สาย

การเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสามารถสรุปได้ว่าเป็นการแทรกสอดของสัญญาณจากหลายทิศทางที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลของเฟดดิ้งทางเวลา ความถี่อิสระและการกระทบต่ออัตราขยายของช่องสัญญาณ โดยพื้นที่ของสัญญาณวิทยุเกิดการรบกวนเพราะปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่น

2.2.1 การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง

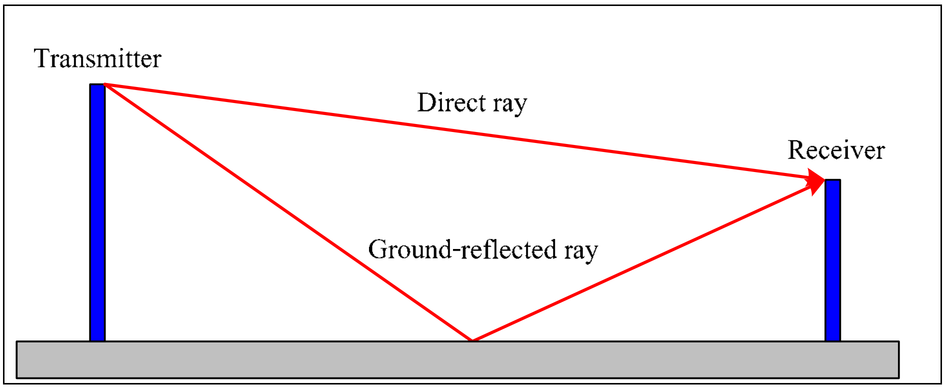
ในอากาศว่างนั้น คลื่นสัญญาณวิทยุจะแพร่กระจายเป็นวงกว้างจากจุดกำเนิด โดยอัตราส่วนของกำลังรับ $P_{r,fs}$ ต่อกำลังส่ง $P_{t,fs}$ แสดงในสมการที่ (2.1) คือฟังก์ชันลดลงซึ่งเป็นผลคูณกำลังของการผกผันของระยะทาง d ระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยความยาวคลื่นของความถี่การส่งสัญญาณแทนด้วย λ

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

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



รูปที่ 2.2 การสะท้อนจากพื้นดิน

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

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

- **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 สำหรับขนาดของพื้นที่นี้องค์ประกอบของการหักเห จะมีความสำคัญเหมือนกัน

- **Small Scale Fading**

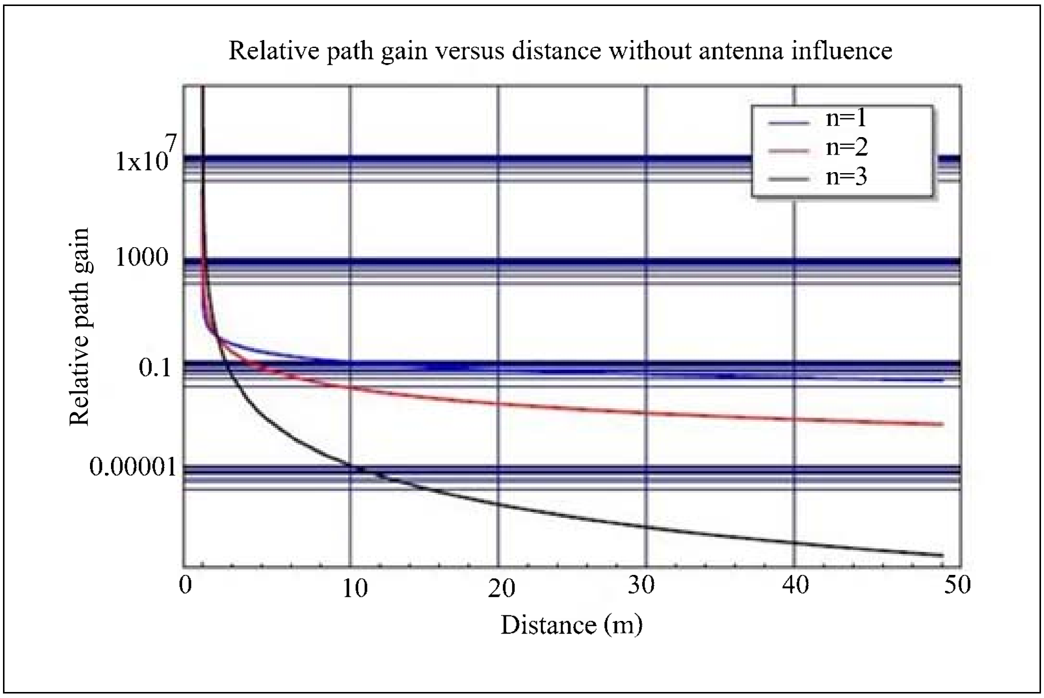
Small Scale Fading จะส่งผลปรากฏในการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของขนาดและเฟสของสัญญาณ โดยแบบจำลองของสถิติจะถูกใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงในการครอบคลุมของสัญญาณที่รับ แบบจำลองนี้แตกต่างในข้อสมมุติซึ่งใช้เกี่ยวกับเส้นทางของสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับ ตัวอย่างเช่น การกระจายแบบ Rician เกี่ยวกับสถานการณ์เมื่อมีองค์ประกอบของ 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 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับแบบจำลอง nth และตัวคูณ path loss ที่แตกต่างกัน

- แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบ Multiple – ray และ Two – ray

แบบจำลองของ Two-ray ถูกใช้เพื่อพิสูจน์ข้อเท็จจริงของแบบจำลอง n th power โดยบ่อยครั้งมีความแน่นอนไม่เพียงพอหรือไม่ถูกต้อง ซึ่งสำหรับการประยุกต์เฉพาะตำแหน่งนั้นจะขึ้นอยู่

กับสภาพแวดล้อม 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

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

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 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 เช่นเดียวกับคุณสมบัติของวัตถุการสะท้อนซึ่งอธิบายโดย ε_r ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์ที่ $\theta = 90 - \alpha$

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

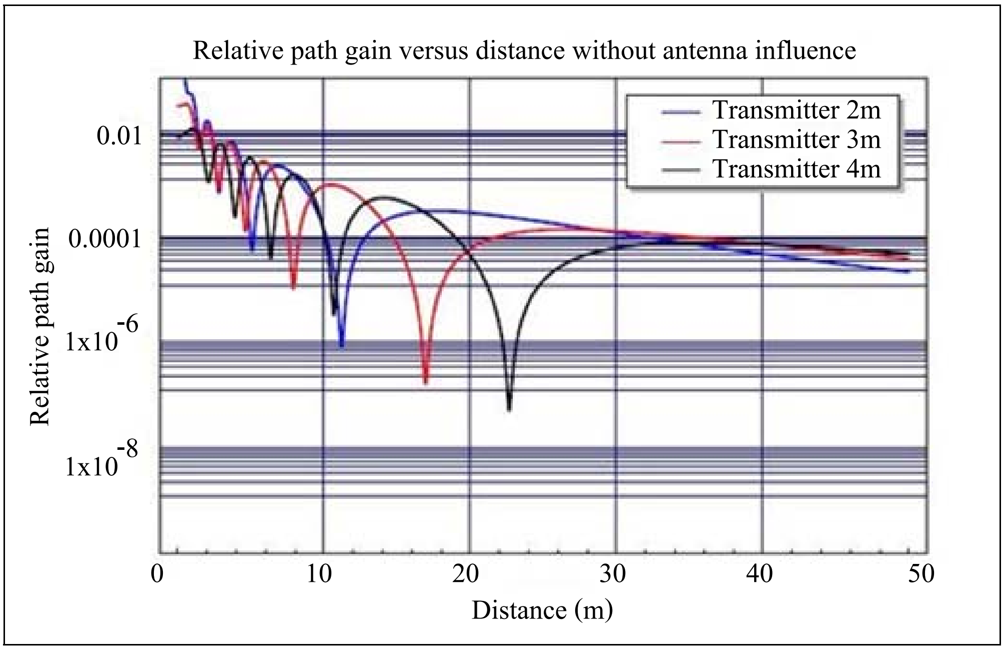
ค่าคงที่ a ขึ้นอยู่กับระนาบโพลาไลซ์และหาได้จาก

$a = 1$ Horizontal polarization

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

สัญญาณที่แสดงในรูปที่ 2.4 คือความสัมพันธ์อัตราขยายในเส้นทางสำหรับสัญญาณรับของแบบจำลองของ Two-ray ประกอบด้วยสององค์ประกอบที่แสดงในรูปที่ 2.2 สัญญาณนี้คือผลรวมของการสูญเสียในอากาศว่างและองค์ประกอบการสะท้อน 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 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่ปราศจากผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน

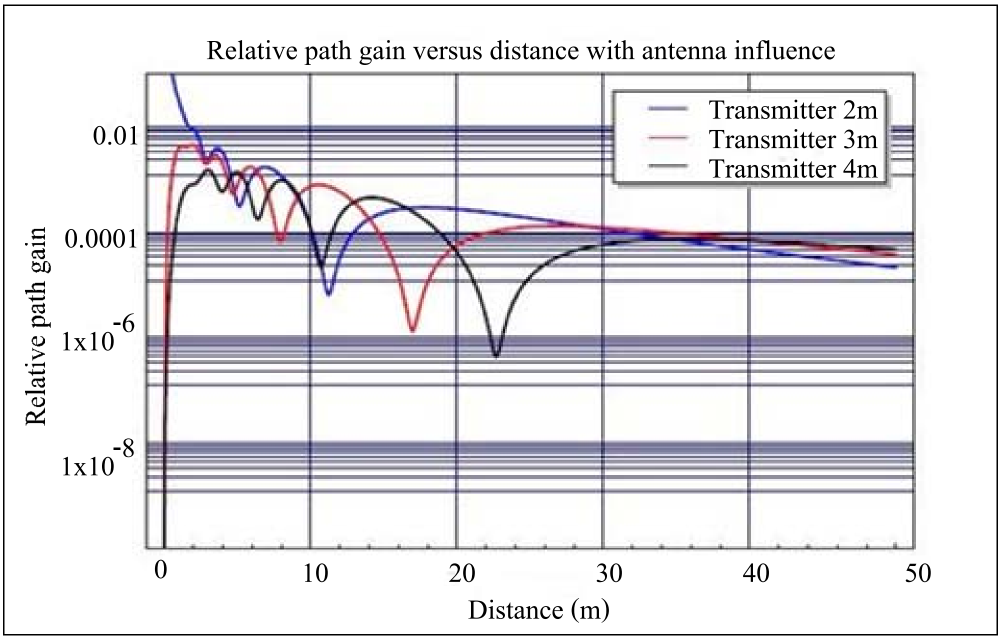
- **ความสัมพันธ์อัตราขยายในเส้นทางสำหรับแบบจำลองของ Two-ray ที่มีผลกระทบของสายอากาศ**

แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศจะรวมในแบบจำลองของ Multiple–ray ด้วยเหมือนกัน ภายใต้การสมมติที่ภาคส่งและภาครับใช้ชนิดของสายอากาศอันเดียวกัน แบบจำลองของ Multiple–ray สามารถเขียนใหม่เพื่อรวมอัตราขยายของสายอากาศ

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

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

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



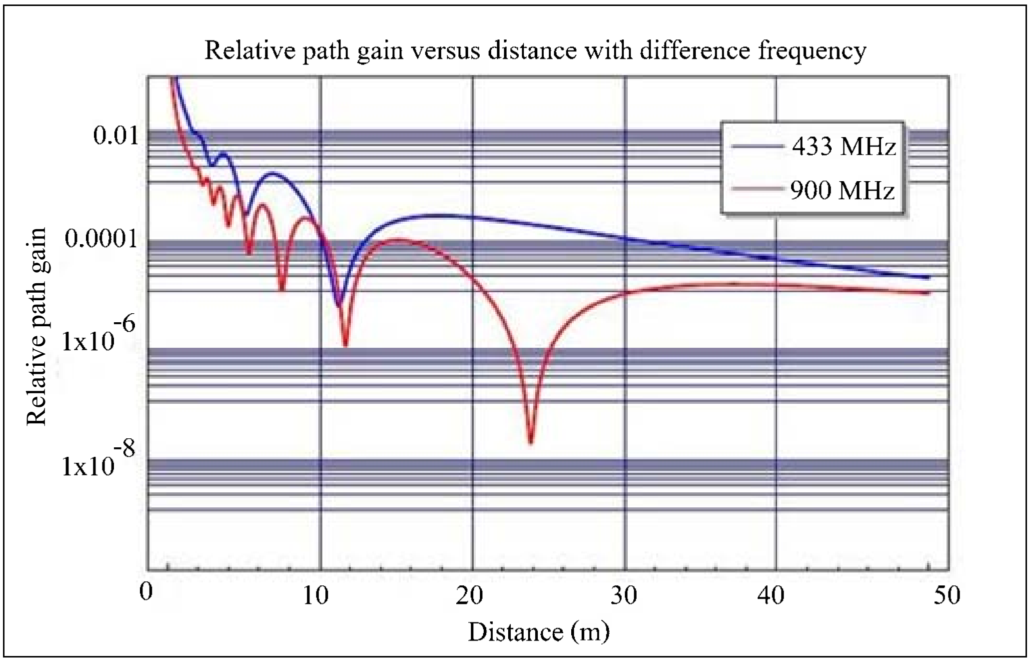
รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในเส้นทางต่อระยะทางที่มีผลกระทบของสายอากาศสำหรับที่ความสูงของสายอากาศภาคส่งต่างกัน

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์อัตราขยายในเส้นทางสำหรับแบบจำลองของ two-ray แต่ในกรณีนี้รวมผลกระทบของแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศสำหรับสายอากาศไดโพล โดยจากรูปเป็นการแยกระนาบตามขวางระหว่างภาคส่งและภาครับ ซึ่งผลกระทบของแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศคือสิ่งที่สำคัญ นี่คือข้อเท็จจริงสำหรับ ray ที่มีระยะทางที่แยกกันขนาดใหญ่ โดย LOS และ ray ที่กระทบพื้นดินที่ปล่อยออกมาจะเหมือนกัน ซึ่งมุมเงยที่เล็กจะมีผลกระทบเหมือนกัน โดยอัตราขยายสูงสำหรับกรณีระยะทางที่สั้นมากเป็นสิ่งที่น่าสนใจ กรณีแรกเมื่อสายอากาศทั้งคู่ที่ความสูงเดียวกันและกรณีที่สองเมื่อทำการแยกมุมตั้งที่แตกต่างกัน เช่น ขึ้นสูงที่ความสูงต่างกัน ในกรณีแรก LOS จะมีอัตราขยายสูงสุดที่ปล่อยออกมาที่มุม 90 องศาโดยส่วนมาก ขณะที่ ray ที่สะท้อนจะมีอัตราขยายต่ำสุดที่ปล่อยมาที่มุมเงย 180 องศา ดังนั้น LOS จะกลายเป็นส่วนสำคัญ ขณะที่

ray ที่สะท้อนมีผลกระทบเล็กน้อย ในกรณีที่สอง ray ที่สะท้อนจะมีอัตราขยายต่ำสุดที่มุมของการสะท้อนอยู่ที่ 180 องศา แต่การเพิ่มความแตกต่างในความสูงนั้น ส่วนของ LOS จะลดลงในอัตราขยายที่มุมเงยมีการเพิ่มขึ้น นำไปสู่สัญญาณขนาดเล็กมากที่ภาครับ

- **ผลกระทบของความถี่สัญญาณวิทยุ**

ความถี่ของสัญญาณวิทยุมีผลกระทบต่อลักษณะพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สัญญาณที่ความถี่สูงแสดงคุณสมบัติที่ระยะทางสั้นกว่าสัญญาณที่ความถี่ต่ำ สามารถเห็นได้จากรูปที่ 2.6 สำหรับความถี่ที่ 434 MHz และ 900 MHz



รูปที่ 2.6 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 เรียกว่า ตัวคูณ path loss และสำหรับค่า $\gamma = 2$ จากสมการข้างบนจะเป็นการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง ตัวคูณ path loss ที่แตกต่างจะใช้ประยุกต์ได้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันและสามารถหาได้จากตารางหรือข้อมูลการทดลอง ส่วนการใช้ Gaussian random variable x_σ นั้นคือความเป็นไปได้ในการจำลองที่ไม่แน่นอนของ 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

$$\begin{aligned} L_{50}(urban)(dB) = 69.55 + 26.16logf_c - 13.82logh_{te} - a(r_{re})... \\ + (44.9 - 6.55logh_{te})logd \end{aligned} \tag{2.8}$$

ที่ f_c คือความถี่การสื่อสารในหน่วยเมกกะเฮริตซ์ (MHz) ในช่วงจาก 150 MHz ถึง 1500 MHz ตัวแปร h_{te} และ h_{re} คือผลของความสูงของสายอากาศภาคส่งและภาครับ ตามลำดับ และ d คือระยะทางระหว่างทั้งคู่เหมือนเดิม 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

$$PL(d) = PL_b + \begin{cases} 10n_1 logd + P_1 & 1 < d < d_{brk} \\ 10(n_1 - n_2)logd_{brk} + 10n_2 logd + P_1 & d^3 d_{brk} \end{cases} \quad (2.9)$$

ค่าคงที่ P_1 แทน Path loss ที่ระยะทางอ้างอิง d_0 ตัวแปร PL_b คือตัวแปรการสูญเสียการสื่อสารขึ้นอยู่กับความถี่สื่อสารและความสูงสายอากาศ

- แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุภายในอาคาร

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

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

Q,P…Number of floors/walls

- เทคนิค Ray-tracing

ในจำนวนแบบจำลองเฉพาะของเทคนิค Ray-tracing ซึ่งส่วนประกอบที่แตกต่างกันและระดับของความยุ่งยากเป็นที่รู้จักดี ซึ่งมันมีความสำคัญในพื้นที่ของการดูจากกราฟ ที่การแทนกราฟจริงของธรรมชาติหรือวัตถุที่ถูกรับมา ภายใต้การสมมติที่พลังงานการแพร่กระจายสามารถเห็นการเดินทางของ ray เป็นเส้นตรง (ดัชนีค่าคงที่การเลี้ยวเบนน้อย) คล้ายกันสำหรับที่เกี่ยวกับสายตาหรือการประยุกต์สัญญาณวิทยุ โดยเทคนิค Ray-tracing จะดำเนินการสร้าง ray จากภาคส่งและ ray นี้มีผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมซึ่งกันและกันตามทฤษฎีของการเลี้ยวเบน การสะท้อน เป็นต้น หรือตามทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เทคนิคนี้เหมาะสมกับแบบจำลองภายในอาคารเช่นเดียวกับการแพร่กระจายคลื่นภายนอกอาคารและสามารถอธิบายผลกระทบ Small scale fading ได้

นอกจากแบบจำลองในปัจจุบัน มีแบบจำลองอื่นอีกที่ใช้ในการสื่อสาร เช่น แบบจำลอง ITU (CCIR), แบบจำลอง Lee หรือแบบจำลอง Cost 231-Walfisch-Ikegami คือชื่อแบบจำลองที่มีความหลากหลายในการใช้งาน ดังนั้น ต้องอ้างอิงการวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารสำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองนี้และแบบจำลองอื่น

2.2.4 ทฤษฎีสายอากาศ

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

- การทำงานของสายอากาศ

การส่งและการรับสัญญาณ สายอากาศใช้ส่งและรับสัญญาณคลื่นวิทยุ หรือคลื่น RF เมื่อสายอากาศถูกใช้สำหรับส่งสัญญาณมันจะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นคลื่น RF ซึ่งสัญญาณไฟฟ้านั้นถูกสร้างมาจาก อุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Transmitter) และสัญญาณไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปยังสายอากาศและเมื่อพบกับความต้านทานของสายอากาศมันจะสร้างคลื่น RF ออกมา และถูกส่งออกไป

การรับสัญญาณ เมื่อสายอากาศถูกใช้ในการรับสัญญาณ การทำงานจะตรงข้ามกับสายอากาศที่ใช้ในการส่ง มันจะรับคลื่น RF และเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า เนื่องจากสัญญาณที่ส่งมาอาจจะไม่แรงเพียงพอ สายอากาศบางประเภทจะมีตัวขยายสัญญาณเบื้องต้น หรือ Preamplifier ที่ทำหน้าที่เพิ่มความแรงของสัญญาณก่อนที่จะส่งต่อไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณต่อไป

- ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna)

โมโนโพล (Monopole) เป็นสายอากาศเส้นลวดที่มีต้นแบบมาจากสายอากาศไดโพล เพียงแต่นำมาใช้เพียงครึ่งหนึ่งของความยาวไดโพล และมีการป้อนสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของไดโพลโดยเทียบกับระนาบกราวด์ ดังนั้นความยาวของโมโนโพลจึงเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นที่ใช้งาน ($\lambda/4$) การแจงรูปของกระแสที่เกิดขึ้นบนสายอากาศโมโนโพลนี้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นโดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดป้อนสัญญาณและค่าจะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ที่ปลายของโมโนโพล

แรงดันที่เกิดขึ้นที่ขั้วของสายอากาศโมโนโพลนั้นจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลเท่านั้น ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของสายอากาศชนิดนี้จึงมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพลที่ใช้เปรียบเทียบนั่นคือ

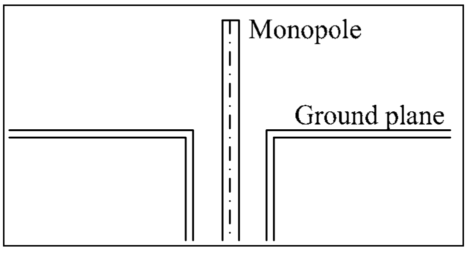
$$Z_{in}^{monopole} = 0.5Z_{in}^{dipole} \tag{2.11}$$

ค่ากำลังงานรวมที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศโมโนโพล จะมีขนาดเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากมีการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะบริเวณอากาศอิสระครึ่งบน ทำให้มุมตันลำคลื่น (beam solid angle) ของสายอากาศโมโนโพลนี้มีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของไดโพลที่ใช้ในการเปรียบเทียบด้วยกัน ส่งผลให้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงกว่าของไดโพลถึงสองเท่า นั่นคือ

$$D_0^{monopole} = \frac{4\pi}{\Omega_A^{monopole}} = \frac{4\pi}{0.5\Omega_A^{monopole}} = 2D_0^{dipole} \tag{2.12}$$

- **สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน**

สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน ที่ใช้ในการปฏิบัติการได้แสดงไว้ใน ซึ่งจะมีการป้อนสัญญาณโดยผ่านสายโคแอกเชียล 50 Ω ผ่านช่องของแผ่นระนาบกราวด์ขนาดใหญ่เข้าไปที่ขั้วอินพุตของสายอากาศโมโนโพล ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงการป้อนสัญญาณแก่สายอากาศโมโนโพล



รูปที่ 2.7 สายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยสายโคแอกเชียลและระนาบกราวด์

แผ่นระนาบกราวด์ คือ ส่วนที่จำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศโมโนโพล ในทางอุดมคตินั้นจะต้องมีขนาดเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติจะกำหนดให้มีรัศมีเท่ากับ 0.5λ ก็ทำให้เพียงพอที่จะให้เกิดเงื่อนไขใกล้เคียงกับขนาดในอุดมคติได้ หรือจะใช้ขนาดที่ต่ำที่สุดซึ่งจะให้เงื่อนไขใกล้เคียงอุดมคติได้เช่นกัน ก็คือที่ 0.5λ

ในทางปฏิบัตินั้นสายอากาศโมโนโพลที่สร้างได้ง่ายและเป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย ก็คือ สายอากาศโมโนโพลที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (quarter-wavelength monopole) โดยทำจากเส้นลวดตรงที่มีความยาว $l = \lambda/4$ ติดตั้งบนระนาบกราวด์ ดังนั้นลักษณะของการแจงรูปของสนามก็จะคล้ายกับของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (half-wavelength dipole) ที่ถูกพิจารณาเฉพาะแขนส่วนบนที่อยู่ในอากาศเหนือแผ่นกราวด์ โดยสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

(ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเหมือนกับของสายอากาศไดโพล ความยาวครึ่งคลื่นที่วางอยู่ในอากาศอิสระ แต่ค่าของสนามจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เฉพาะมุมที่อยู่เหนือแผ่นกราวด์ ($0 < \theta \leq 90^o$) เท่านั้น

(ข) สมการที่ใช้แสดงสนามที่เกิดขึ้นจากสายอากาศโมโนโพล $(\lambda/4)$ จะเหมือนกับของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น

(ค) กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศโมโนโพล $(\lambda/4)$ จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น

(ง) ความต้านทานการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศโมโนโพล $(\lambda/4)$ จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น นั่นคือ

$$Z_{in}^{monopole} = 0.5 Z_{in}^{dipole} \tag{2.13}$$

(จ) ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศโมโนโพล $(\lambda/4)$ จะมีค่าเท่ากับ

$$D_0^{monopole} = 2 D_0^{dipole} \tag{2.14}$$

- สายอากาศกับการแพร่กระจายคลื่น

ในระบบสื่อสารใด ๆ ต้องการให้สัญญาณที่รับได้ปลายทางมีความแรงมาก ๆ อย่างน้อยที่สุดแรงพอที่จะชนะสัญญาณรบกวนได้ และอยู่ในเกณฑ์ที่ความไวของเครื่องรับจะทำงานได้ ความแรงที่สถานีปลายทางจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญคือ ถ้าเป็นการส่งสัญญาณไปตามสายส่ง สัญญาณส่วนมากจะสูญเสียไปในรูปของความร้อนในสายส่งเนื่องจากความต้านทานของสายส่ง และเนื่องจากฉนวนที่นำมาทำสายส่งไม่เป็นฉนวนที่ดีจริง การสูญเสียของสัญญาณในแพร่กระจายคลื่นออกอากาศ คลื่นวิทยุบางส่วนถูกลดทอนกำลังลงในตัวกลางที่คลื่นเดินผ่านไป การสื่อสารในย่านความถี่สูง (HF หรือ High Frequency) นั้นต้องอาศัยการสะท้อนคลื่นจากชั้นบรรยากาศ Ionosphere กลับมายังโลก เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางไปสะท้อนชั้นบรรยากาศ คลื่นบางส่วนจะถูกดูดกลืน

โดยในชั้นบรรยากาศ ส่วนการสื่อสารที่ใช้ความถี่สูงมาก (VHF หรือ Very High Frequency) เช่น การติดต่อของหน่วยตำรวจตระเวนชายแดนในป่าการสื่อสารจะไปไม่ได้ไกล ทั้งนี้เพราะต้นไม้ใบไม้ในป่าจะดูดกลืนคลื่นวิทยุไว้เป็นส่วนมาก การสื่อสารที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เชื่อมโยงระหว่างสถานีถ่ายถอดทวนสัญญาณ จะเกิดการสูญเสียของคลื่นวิทยุเนื่องจากบรรยากาศ เม็ดฝุ่นละอองหรืออณูของออกซิเจนดูดกลืนไว้ การสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นจะคลายกับการสูญเสียในสายส่ง และยังมีการสูญเสียกำลังส่งเนื่องจากการถ่างออกของคลื่นวิทยุ เนื่องจากโครงสร้างทางเรขาคณิตของคลื่นในการแพร่กระจายคลื่น ทุก ๆ ครั้งที่ระยะห่างเพิ่มเป็น สองเท่า ความเข้มของคลื่นจะลดลง 4 เท่า

ความแรงของสัญญาณที่สายอากาศรับ เปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับแล้วป้อนเข้าเครื่องรับ อาจทำให้มีค่ามากขึ้นได้ 3 วิธี คือ

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

ในทางทฤษฎีสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบต่าง ได้ดังนี้

$$P_r = P_t g_t g_r \left(\frac{v}{4\pi Rf} \right) \tag{2.15}$$

P_r คือ กำลังคลื่นวิทยุที่รับได้วัดที่ขั้วของสายอากาศรับ มีหน่วยเป็นวัตต์

P_t คือ กำลังของเครื่องส่งที่ส่งสัญญาณเข้าที่ขั้วของสายอากาศส่ง มีหน่วยเป็นวัตต์

g_t คือ ค่ากำลัง Gain ของสายอากาศส่ง เมื่อวัดเปรียบเทียบกับสายอากาศรอบตัว

g_r คือ ค่ากำลัง Gain ของสายอากาศรับ เมื่อวัดเปรียบเทียบกับสายอากาศรอบตัว

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 ตามมาตรฐานในประเทศญี่ปุ่น แต่โดยหลักของการจัดทำสายอากาศไม่สามารถที่จะวัด Gain ของสายอากาศให้ได้แน่นอนเพราะมีข้อจำกัดอีกมากมายที่ทำให้สายอากาศเมื่อจัดสร้างเสร็จแล้วได้ Gain ขยายไม่ตรงกับที่คำนวนไว้ ประการหนึ่งอยู่ที่สภาพแวดล้อมในช่วงของการแมตช์สายอากาศหรือสถานที่ติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น

2.3 ทฤษฎีของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน

การเข้าสู่ยุคของการสื่อสารในปัจจุบัน ระบบเหล่านี้เกิดขึ้นมากจากแบบจำลองของการเข้ารหัสและการมอดูเลตสัญญาณที่ต่างกันออกไป ตามแต่ละเงื่อนไขและข้อกำหนดของแต่ละระบบนั้น ๆ ซึ่งพื้นฐานก่อนที่จะวิวัฒนาการเข้ามาสู่แบบจำลองของดิจิตอลมอดูเลชัน ล้วนมาจากแบบจำลองของอะนาลอกมอดูเลชันแบบต่าง ๆ เช่น AM (Amplitude Modulation), FM (Frequency Modulation) และ PM (Phase Modulation) เป็นต้น โดยการใช้สัญญาณดิจิตอล 1 บิต “1” หรือ “0” ควบคุมจังหวะของการส่งสัญญาณมอดูเลตเหล่านั้นออกไป ก็จะทำให้เป็นการมอดูเลตแบบดิจิตอลแล้วการควบคุม ON-OFF นั้น หรือที่เรียกว่า OOK (ON-OFF Keying) จะทำให้แบบจำลองของระบบอะนาลอกมอดูเลชันเปลี่ยนแปลงไปสู่ระบบดิจิตอลมอดูเลชันคือจาก AM เป็น ASK (Amplitude Shift Keying) FM เป็น FSK (Frequency Shift Keying) และ PM เป็น PSK (Phase Shift Keying)

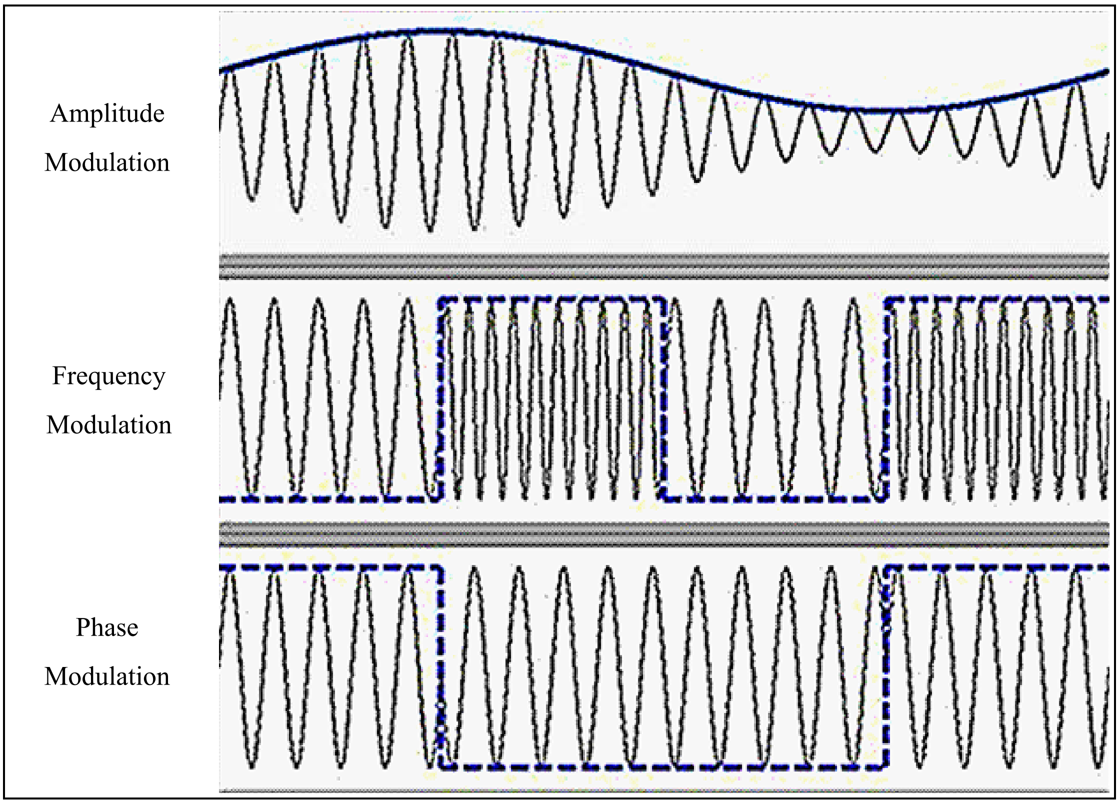
แบบจำลองของการมอดูเลชันแบบ ASK, FSK และ PSK มีให้เห็นอยู่มากมายกับการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น อาร์เอฟไอดี (RFID) ใช้การมอดูเลตแบบ ASK (แต่ในปัจจุบัน RFID สามารถใช้การมอดูเลตแบบ FSK และ PSK ได้อีกด้วย) บลูทูธ (Bluetooth) นั้นโดยพื้นฐานใช้การมอดูเลตแบบ FSK แต่นำ Gaussian Filter (low pass)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

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

แต่ในที่นี้จะมาศึกษาเกี่ยวกับระบบการมอดูเลชันสัญญาณเท่านั้น การมอดูเลตคือการนำเอาสัญญาณข่าวสาร (Modulating signal) ไปเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ (ขนาด ความถี่ หรือเฟส) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างพร้อมกันของสัญญาณพาหะ (Carrier wave) โดยการมอดูเลต มีจุดประสงค์ดังนี้

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

ซึ่งการมอดูเลชัน คือขั้นตอนของการเปลี่ยนแบบจำลองของข้อมูลข่าวสารที่อยู่ในรูปของสัญญาณ Baseband ให้เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมของการส่งผ่านข้อมูลเข้าไปยังช่องทางที่ต้องการ ส่วนการดีมอดูเลชันคือ ขั้นตอนหรือขบวนการกู้คืนสัญญาณข้อมูลข่าวสารกลับมานั่นเอง



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของรูปแบบสัญญาณ AM FM และ PM

ในพื้นฐานของการสื่อสารในย่านคลื่น RF (Radio Frequency) นั้น มักจะพิจารณาและเรียกสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วว่าเป็นสัญญาณมอดูเลตอย่างต่อเนื่องหรือ (continuous wave modulation: CW) ที่ซึ่งข้อมูลข่าวสารในสัญญาณ Baseband จะถูกส่งผ่าน (มอดูเลต) มากับสัญญาณพาห์ (sinusoidal carrier) ที่มีขนาดของแอมปลิจูดเป็น V_m และมุมความถี่ ω_m แสดงได้ดังสมการที่ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ ซึ่งถ้าสมมติว่าสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier)

$$v_m(t) = V_m cos\omega_m t \tag{2.16}$$

และเมื่อนำการมอดูเลตกับอีกสัญญาณหนึ่งซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า ซึ่งจะได้ว่า

$$v_c(t) = V_c(t)Cos[\omega(t) + \varphi(t)]$$
$$v_c(t) = V_c(t)Cos[\theta(t)] \tag{2.17}$$

1. การมอดูเลตทางขนาด (Amplitude Modulation: AM) ซึ่ง $\omega(t)$ จะคงที่ ณ ที่ ω_c และ $\varphi(t)$ 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 $\theta(t)$ จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณของเสียงที่เข้ามา ซึ่งการมอดูเลตทางมุมแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

- การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation: FM) ซึ่ง $V_c(t) = V_c$ = ค่าคงที่ และภายในเทอมของ $\theta(t), \varphi(t)$ จะคงที่ ที่ 0 แต่ $\omega(t)$ จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเสียง $V_m(t)$ ที่เข้ามา
- การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation: PM) ซึ่ง $V_c(t) = V_c$ = ค่าคงที่ และภายในเทอมของ $\theta(t), \omega(t)$ จะคงที่ ที่ ω_c แต่ $\varphi(t)$ จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเสียง $V_m(t)$ ที่เข้ามา

สัญญาณ AM หรือ Amplitude Modulation คือ การมอดูเลตแบบ AM นั้น แอมปลิจูดของสัญญาณคลื่นพาหะ (carrier signal) จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณของสัญญาณเสียงที่เข้ามา แต่ความถี่และเฟสนั้นจะคงที่ และเมื่อนำสมการมาคูณกันจะได้ว่า

$$V_c(t) = V_c + V_m cos\omega_m t = V_c(1 + m_a cos\omega_m t) \tag{2.18}$$

ที่ซึ่ง $m_a = V_m/V_c$ เรียกว่าเป็นดัชนีการมอดูเลต (Amplitude modulation index) และโดยทั่วไปค่าดัชนีการมอดูเลตนี้ จะอยู่ระหว่าง 0 - 1 (0 - 100%) ซึ่งจะได้สมการของสัญญาณ AM คือ

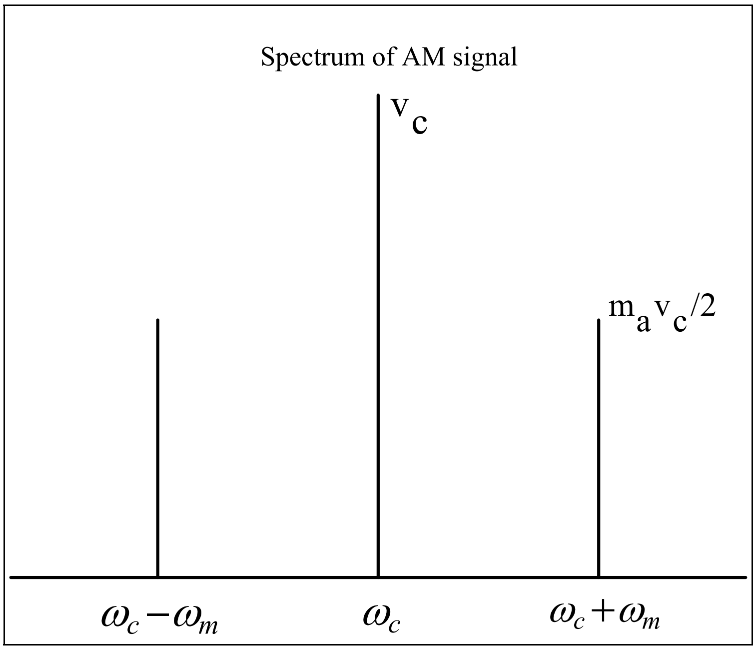
$$V_{am}(t) = V_c(1 + m_a \omega_m t)cos\omega_c t \tag{2.19}$$

เมื่อกระจายเทอมในสมการที่ (2.19) จะได้ว่า

$$V_{am}(t) = V_c cos\omega_c t + m_a cos\omega_m t \times cos\omega_c t$$
$$V_{am}(t) = V_c cos\omega_c t + (m_a V_c/2)[cos(\omega_c + \omega_m)t + cos(\omega_c - \omega_m)t] \tag{2.20}$$

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของโดเมนความถี่ของ $V_{am}(t)$

	คลื่นพาหะ (Carrier)	ความถี่ด้านสูง (upper)	ความถี่ด้านต่ำ (lower)
ความถี่	ω_c	$\omega_c + \omega_m$	$\omega_c - \omega_m$
ขนาด	v_c	$m_a v_c/2$	$m_a v_c/2$



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของสัญญาณ AM

บางครั้งสัญญาณอินพุตที่เข้ามา อาจไม่ใช่เป็นสัญญาณอินพุตที่มีความถี่เดียว แต่อาจจะเป็นสัญญาณที่มอดูเลตมาแล้วก็ได้ เช่น เป็นสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK FSK และ PSK เป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะใช้การจำลองการทำงานของวงจรมีความถูกต้องมากที่สุด ควรจะกำหนดสัญญาณอินพุตให้ตรงกับความต้องการของระบบที่กำลังพิจารณาอยู่ ต่อมาดูการมอดูเลชันแบบ FM สมมติว่าสัญญาณข่าวสารคือสัญญาณเสียง ซึ่งคือ $v_m(t) = V_m cos\omega_m t$ (เหมือนสมการที่ 2.16) และการมอดูเลตเกิดขึ้นจากความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดขึ้นจากสมการในเทอมของ

$$\omega(t) = \omega_c + Kv_m = \omega_c + KV_m cos\omega_m t \tag{2.21}$$

ที่ซึ่ง K คือ Frequency deviation constant, (rad/s) /V สัญญาณ FM คือ

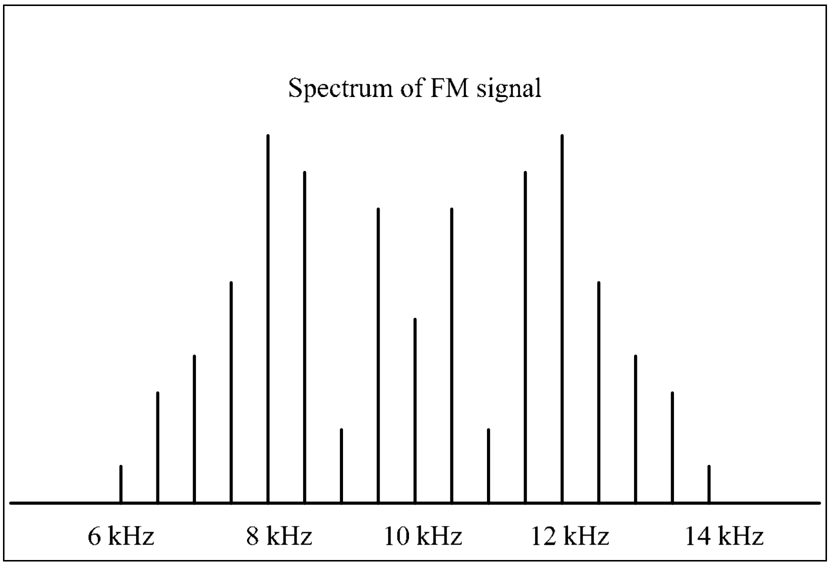
$$V_{fm} = V_c cos(\int \omega(t) + \varphi) \tag{2.22}$$

แทนค่าของ $\omega(t)$ จากสมการที่ (2.21) ลงในสมการที่ (2.22) ที่ซึ่งกำหนดให้ ϕ=0 และจะได้ว่า

$$V_{fm} = V_c cos\left(\omega_c t + \frac{KV_m}{\omega_m} sin\omega_m t\right)$$

$$V_{fm} = V_c cos(\omega_c t + m_f sin\omega_m t) \tag{2.23}$$

ที่ซึ่ง $m_f = KV_m/w_m$ คือ ดัชนีการมอดูเลชันทางความถี่ (frequency modulation index)



รูปที่ 2.10 สเปกตรัมของสัญญาณ FM

ส่วนสัญญาณการมอดูเลตแบบ PM นั้น ก็จัดว่าอยู่ในกลุ่มเดียวกับการมอดูเลตแบบ FM เพราะทั้งคู่ ถูกเรียกว่า Angle Modulation เฟสมอดูเลชัน คือการเปลี่ยนแปลงเฟสในเทอมของ $\varphi(t)$ นั่นคือ

$$\varphi(t) = \varphi_0 + KV_m sin\omega_m t = KV_m sin\omega_m t \tag{2.24}$$

โดยสมมติให้ $\varphi_0 = 0$ ซึ่งจะได้ว่าสมการของเฟสมอดูเลชัน คือ

$$v_{pm} = V_c cos(\omega_c t + K_p V_m sin\omega_m t) = V_c cos(\omega_c t + m_p sin\omega_m t) \tag{2.25}$$

ที่ซึ่ง $m_p = K_p V_m$ คือ ดัชนีการมอดูเลชันทางเฟส (the phase modulation index)

จากสมการของการมอดูเลตแบบ FM ดังสมการที่ (2.23) และสมการของการมอดูเลตแบบ PM ดังสมการที่ (2.25) ซึ่งถ้าเขียนใหม่ให้อยู่ในแบบจำลองของสัญญาณที่เหมือนกันจะได้ว่า

$$v_{fm} = v_{pm} = V_c cos(\omega_c t + \beta sin\omega_m t) \tag{2.26}$$

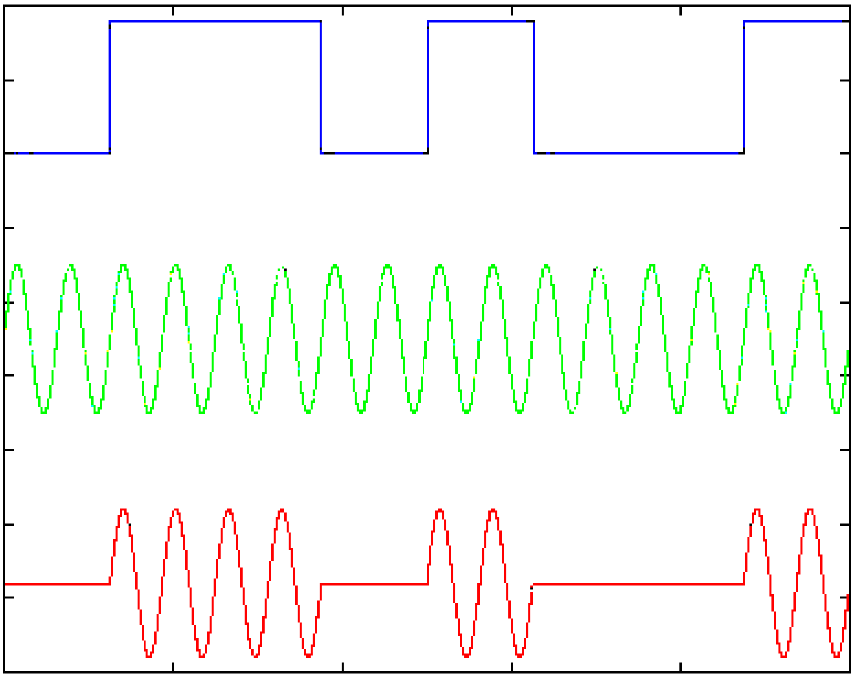
ที่ซึ่ง FM/PM = ดัชนีการมอดูเลต และคือ β , ถ้าเป็น FM, $\beta = KV_m/\omega_m = K'V_m/f_m$ (K' มีหน่วยเป็น Hz/V)

2.3.1 Amplitude Shift Keying (ASK)

การมอดูเลตมีแบบ ASK นั้นมีพื้นฐานมาจากการมอดูเลตแบบ AM แต่อาศัยสัญญาณดิจิตอล (0, 1) เข้ามาควบคุมจังหวะในการมอดูเลต หรือในจังหวะของการส่งเสียงการมอดูเลตออกไปนั่นเอง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าสัญญาณมี 2 ระดับ คือ A_i (HigH) และ A_o (Low) ซึ่งถ้ากำหนดให้ A_0 = 0 และ A_1 = 1 จะเรียกว่า ON/OFF Keying ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$ASK(t) = \begin{cases} A_0 sin(2\pi ft + \varphi), data(t) = 0 \\ A_1 sin(2\pi ft + \varphi), data(t) = 1 \end{cases} \tag{2.27}$$

$$OOK(t) = \begin{cases} 0, data(t) = 0 \\ A_1 sin(2\pi ft + \varphi), data(t) = 1 \end{cases} \tag{2.28}$$

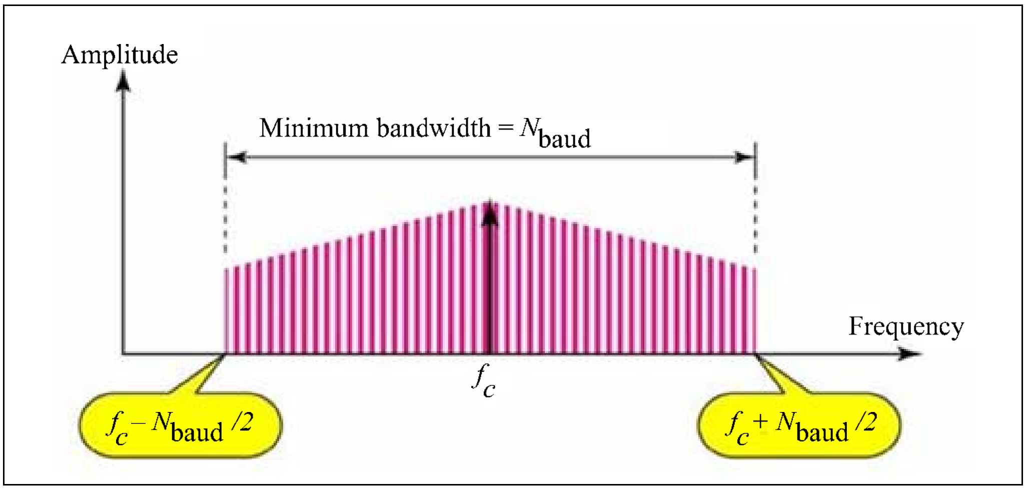


รูปที่ 2.11 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK

สัญญาณ ASK นั้นสร้างมาจากการคูณกันของสัญญาณที่มีแอมปลิจูดต่างกัน ข้อดีของการใช้ ASK คือง่ายไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน แต่ข้อเสียคือข้อมูลอาจจะเกิดการผิดพลาดจากการส่งได้ง่าย รวมทั้งมีสัญญาณรบกวนที่สูง (High noise) สำหรับ Bandwidth ของ ASK คือ

$$BW_{ASK} = \left(1 + \frac{A_1 - A_0}{A_1 + A_0}\right) \times N_{baud}$$

$$BW_{ASK} = (1 + d) \times N_{baud} \tag{2.29}$$



รูปที่ 2.12 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK

ที่ซึ่ง d คือ modulating Factor ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. ถ้าค่า d น้อย (A_1 ต่างจาก A_0 น้อย) แล้ว Bandwidth จะแคบ และสัญญาณมีโอกาสเสียหายไปจาก Noise สูง

2. ถ้าค่า d มาก (A_1 ต่างจาก A_0 มาก) แล้ว Bandwidth จะกว้าง และสัญญาณมีโอกาสเสียหายไปจาก Noise ต่ำ

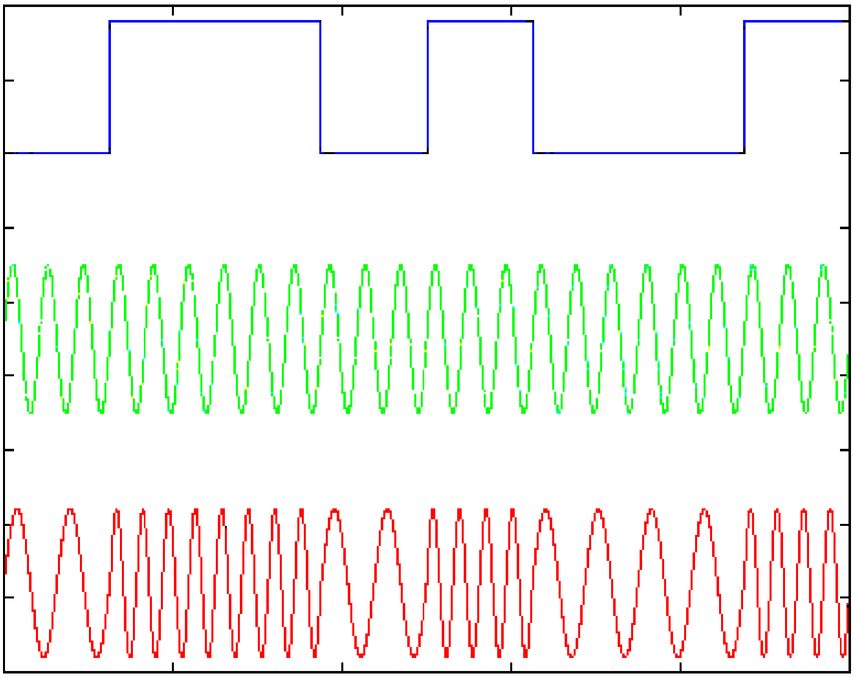
Bandwidth ของการผสมสัญญาณแบบ ASK ด้วยความถี่ของสัญญาณพาหะ f_c และอัตราBaud N_{baud} มีความถี่อยู่ในช่วง

$$f_c \pm N_{baud}/2 \tag{2.30}$$

2.3.2 Frequency Shift Keying (FSK)

สัญญาณการมอดูเลตแบบ FSK (Frequency Shift Keying) ซึ่งพื้นฐานนั้นได้มาจากการมอดูเลตแบบ FM นั่นเอง ในการมอดูเลตแบบ FSK นั้น จะเปลี่ยนเฉพาะความถี่ ของสัญญาณพาหะตามบิตข้อมูล เช่น ความถี่ เมื่อข้อมูลเป็น 0 และความถี่ เมื่อข้อมูลเป็น 1 และสมการของสัญญาณ FSK คือ

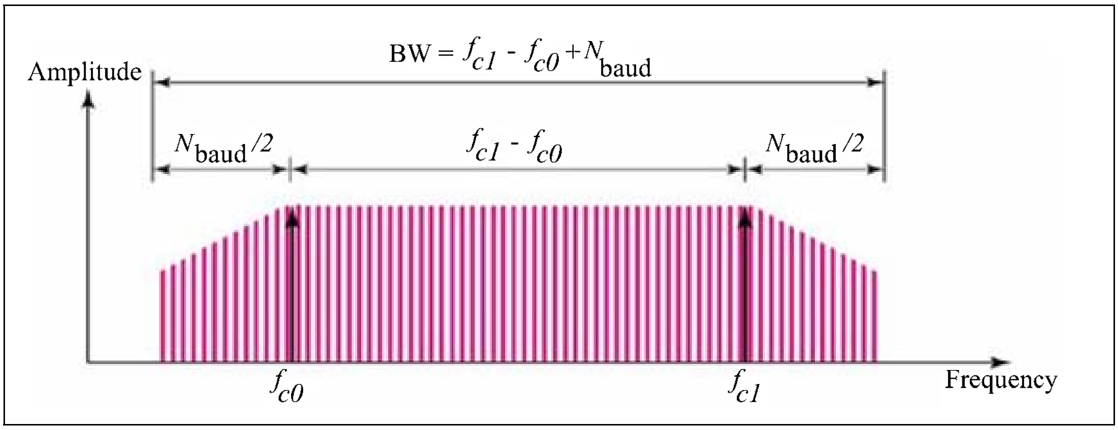
$$FSK(t) = \begin{cases} A\sin(2\pi f_{c0}t + \varphi), data(t) = 0 \\ A\sin(2\pi f_{c1}t + \varphi), data(t) = 1 \end{cases} \tag{2.31}$$



รูปที่ 2.13 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK

ข้อดีสำหรับสัญญาณแบบ FSK จะทนต่อสัญญาณรบกวน (Noise) ได้มากกว่าแบบ ASK เนื่องจากอุปกรณ์ทางด้านภาครับจะมองหาความถี่เฉพาะที่อยู่ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ โดยไม่สนใจสัญญาณรบกวนกระชากระยะสั้น (Transient Noise) แต่ข้อเสียคือต้องการ Bandwidth กว้างกว่าวิธีการมอดูเลชันแบบ ASK เมื่อส่งข้อมูลที่มี Baud Rate เท่ากัน ซึ่ง Bandwidth ของ FSK สามารถพิจารณาได้จากผลรวมระหว่างความแตกต่างของความถี่พาห์และอัตราเร็วของข้อมูล แสดงดังสมการที่ (2.32)

$$BW_{FSK} = (f_{c1} - f_{c0}) + N_{baud} \tag{2.32}$$



รูปที่ 2.14 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ FSK

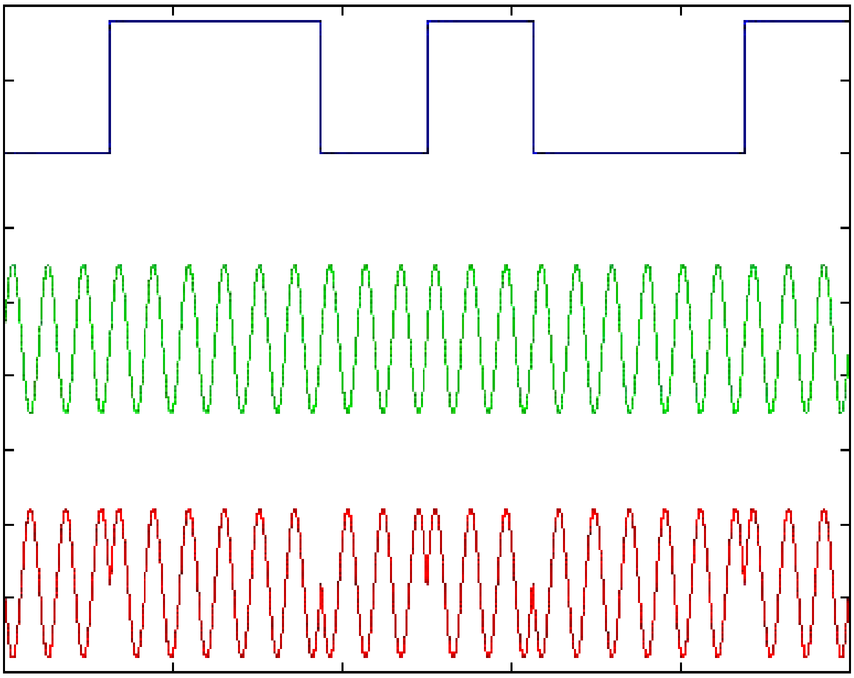
ในการจำลองสัญญาณการมอดูเลตแบบ FSK ขึ้นมา โดยการสมมติให้ความถี่ของ Carrier และสัญญาณที่ถูกนำมามอดูเลตมีการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น ขณะที่แอมปลิจูดและเฟสมีค่าคงที่

2.3.3. Phase Shift Keying (PSK)

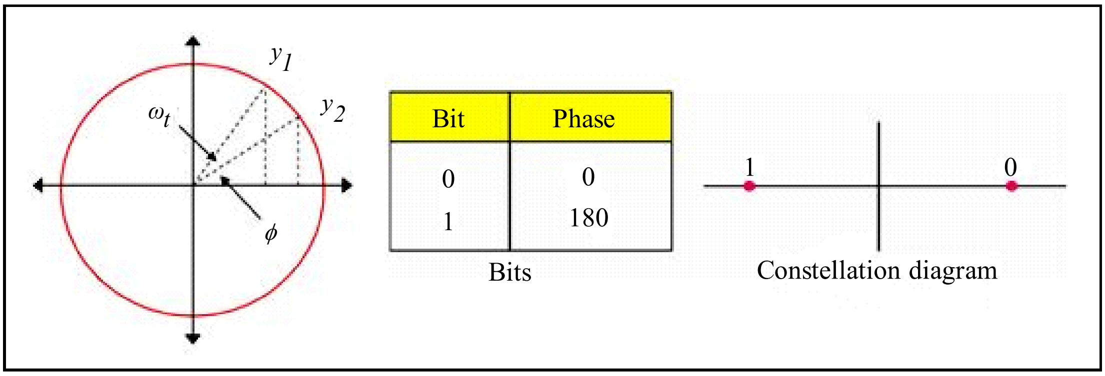
การมอดูเลตแบบ PSK ซึ่งการมอดูเลตชนิดนี้จะเป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การมอดูเลตที่มีความซับซ้อนขึ้นไปอีก เช่น QPSK, QAM เป็นต้น การมอดูเลตแบบ PSK คือการเปลี่ยนเฟส (ตำแหน่งเริ่มต้น) ของสัญญาณพาหะตามบิตข้อมูล เช่น เฟส ϕ_0 เมื่อข้อมูลเป็น 0 และเฟส ϕ_1 เมื่อข้อมูลเป็น 1 ดังสมการที่ (2.33)

$$PSK(t) = \begin{cases} Asin(2\pi f_c t + \varphi_0), data(t) = 0 \\ Asin(2\pi f_c t + \varphi_1), data(t) = 1 \end{cases} \tag{2.33}$$

ข้อดีของสัญญาณ PSK คือจะทนต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า ASK ในขณะที่ใช้แถบความถี่แคบกว่า FSK และนอกจากนี้ยังสามารถแทนสัญญลักษณ์ได้มากกว่า 1 บิตต่อหน่วยสัญญาณ แต่ข้อเสียคือ การออกแบบเครื่องรับ-ส่งสัญญาณนั้นรวมทั้งการวิเคราะห์ต่าง ๆ จะทำได้ยากกว่าสัญญาณแบบ ASK และ FSK ซึ่งคุณลักษณะของสัญญาณ PSK {PSK Characteristics (Constellation Diagram)} แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 กล่าวคือ การมอดูเลตแบบ PSK นั้นจะสังเกตได้ว่าในแบบจำลองต่าง ๆ สามารถแสดงโดยแผนผัง Constellation ซึ่งบอกตำแหน่งของเฟสแต่ละสัญลักษณ์จากตัวอย่าง 1 Symbol = 1 Bit เรียกว่า Binary PSK



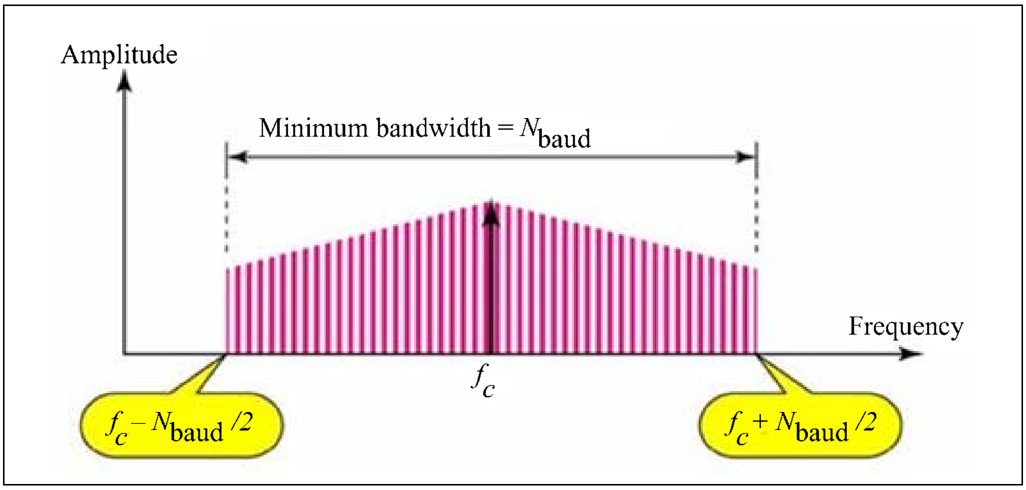
รูปที่ 2.15 ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตแบบ PSK



รูปที่ 2.16 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 (2.34) (ส่วนรูปของ BW เหมือนกับรูปที่ 2.15)

$$BW_{PSK} = N_{baud} \tag{2.34}$$



รูปที่ 2.17 ช่วง bandwidth ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ PSK

2.4 ทฤษฎีของความน่าจะเป็น

ทฤษฎีของความน่าจะเป็นและกระบวนการสุ่มคือเครื่องมือคณิตศาสตร์ที่สำคัญในการออกแบบของระบบสื่อสารดิจิตอล หัวข้อนี้มีความสำคัญในแบบจำลองทางสถิติของแหล่งกำเนิดซึ่งสร้างข้อมูลขึ้นมา ในการเก็บข้อมูลดิจิตอลของแหล่งที่ขาออก ในคุณลักษณะของช่องสัญญาณตลอดถึงข้อมูลดิจิตอลที่ส่ง ในการออกแบบเครื่องรับซึ่งกระบวนการของสัญญาณที่มีลักษณะข้อมูลจากช่องสัญญาณ และในการหาค่าของคุณสมบัติของระบบสื่อสาร ความครอบคลุมของหัวข้อที่น่าสนใจนี้จะทำการสรุปโดยแสดงจำนวนของคำนิยามและความคิดพื้นฐานในทฤษฎีของความน่าจะเป็นและกระบวนการสุ่ม ซึ่งได้มาจากผลจำนวนมากซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบที่มีประสิทธิภาพและหาค่าคุณสมบัติของระบบสื่อสารดิจิตอลต่อไป

2.4.1 ความหมายของตัวแปรสุ่มและสัญญาณสุ่ม

ตัวแปรสุ่มในเชิงสถิตินั้นไม่ได้หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นได้อย่างอิสระโดยไม่มีกฎเกณฑ์ แต่จะหมายถึงฟังก์ชันซึ่งสร้างค่าจริงออกจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในการทดลอง กล่าวคือถ้าให้ a เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในการทดลองและ $X(a)$ 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

$$F_X(x) \triangleq P(X \le x) \qquad -\infty < x < \infty \tag{2.35}$$

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

$$0 \le F_X(x) \le 1 \tag{2.36}$$

$$F_x(-\infty) = 0, \qquad F_x(\infty) = 1 \tag{2.37}$$

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

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

$$P(X > x) = 1 - F_X(x) \tag{2.38}$$

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

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

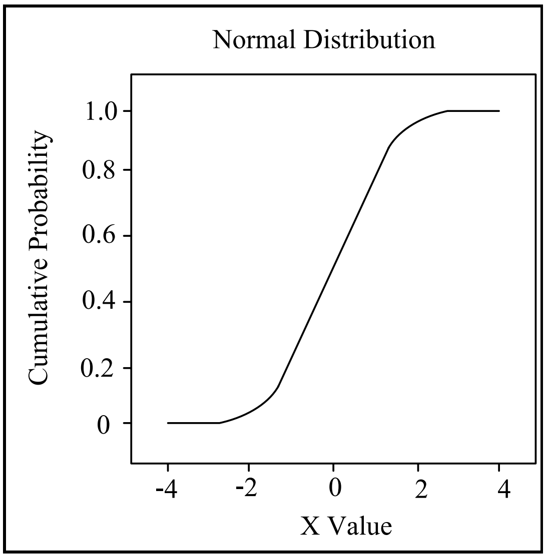
$$P(a < X \le b) = 1 - F_X(a) - [1 - F_X(b)]$$

$$P(a < X \le b) = F_X(b) - F_X(a) \tag{2.39}$$

คุณสมบัติที่สำคัญอีกข้อหนึ่งของ $F_X(x)$ ก็คือฟังก์ชันนี้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพียงอย่างเดียวเมื่อ x มีค่ามากขึ้น

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

$$F_X(x)\begin{cases} 0 & x < x_1 \\ \sum_{i=1}^{k} P(X = x_i) & x_k < x < x_{k+1} \\ 1 & x < x_n \end{cases} \tag{2.40}$$



รูปที่ 2.18 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่อง

2.4.3 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function)

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

$$p_X(x) \triangleq \frac{dF_X(x)}{dx} \tag{2.41}$$

ตามนิยามในสมการ (2.41) $p_x(x)$ ก็จะเป็นความน่าจะเป็นที่ X อยู่ระหว่าง $x - dx$ ถึง x จากสมการ (2.41) ถ้าต้องการหาฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรเชิงสุ่มแบบต่อเนื่อง ก็จะทำได้โดยการอินทิเกรตกลับมาเป็น

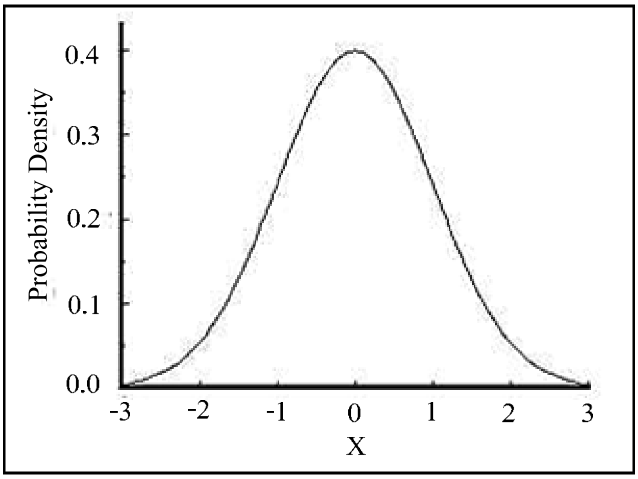
$$F_X(x) = \int_{-\infty}^{x} p_X(\alpha)d\alpha \tag{2.42}$$

คุณสมบัติของ PDF ที่เห็นได้ชัดจะมีดังนี้ คือ

$$p_X(x) > 0 \tag{2.43}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_X(x)dx = 1 \tag{2.44}$$

$$P(a < X \leq b) = F_X(b) - F_X(a) = \int_a^b p_X(x)dx \tag{2.45}$$



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างของ PDF

รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างของ PDF พื้นที่ใต้เส้นโค้งบริเวณ $a < x \leq b$ ก็จะเป็นความน่าจะเป็นรวมในช่วงนั้นตามสมการ (2.45)

2.4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม

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

$$x_1 P(x_1) N + x_2 P(x_2) N + ... = N \sum_i x_i P(x_i) \tag{2.46}$$

และเมื่อนำจำนวนครั้งของการทดลองคือ N มาหารสมการ (2.46) ก็จะได้ค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการทดลองออกมา ค่าเฉลี่ยที่ได้นี้บางครั้งเรียกว่า ค่าคาดคะเนของ X (exceptation of X) และมักจะใช้สัญลักษณ์เป็น $\overline{X}$ หรือ $E[X]$ ดังนั้นถ้าให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ออกมาเป็น m ก็จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\overline{X} = E[X] = m = \sum_i x_i P(x_i) \tag{2.47}$$

ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นแบบที่มีค่าความต่อเนื่องและมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นคือ $p_X(x)$ จะสามารถหาค่าเฉลี่ยได้โดยคำนึงถึงว่า $P(x_i)$ ในสมการ (2.47) มีค่าเท่ากับ $p_X(x_i)\Delta x$ จากนั้นจึงเปลี่ยนรูปจากการหาผลบวกเป็นการอินทิเกรตดังนี้

$$\overline{X} = E[X] = m = \int_{-\infty}^{\infty} x_i P(x_i) \tag{2.48}$$

ในกรณีทั่วไปที่ $g(X)$ เป็นฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม X จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของ $g(X)$ ได้แบบเดียวกับสมการ (2.48) ดังนี้

$$\overline{g(X)} = E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) p(x) dx \tag{2.49}$$

ในกรณีพิเศษที่ $g(X) = X^n$ ผลที่ได้ในสมการ (2.49) 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 (2.49) จะเห็นได้ว่าเป็นการจัดการกับตัวแปรสุ่มแบบเชิงเส้น ดังนั้น ถ้า $g(X) = aX + b$ โดยที่ a, b เป็นค่าคงที่ จากสมการ (2.49) จะได้

$$E[aX + b] = a\overline{X} + b \tag{2.50}$$

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

$$E[\overline{X}X] = \overline{X}E[X] = \overline{X}^2 = E^2[X] \tag{2.51}$$

ค่าที่ได้ในสมการ (2.51) นี้ก็คือค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง โดยข้อสังเกตที่สำคัญประการหนึ่งก็คือ 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 รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างการกระจายของฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม 2 ชุด ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าชุดแรกที่การเกาะกลุ่มมากเมื่อเทียบกับชุดหลังความเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งมักใช้สัญญลักษณ์ σ นั้นจะมีนิยามดังนี้

$$\sigma^2 \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} (x - m)^2 p(x)dx = E[(X - m)^2] \tag{2.52}$$

กำลังสองของ σ ที่นิยามตามสมการ (2.52) นี้ เรียกว่าแวเรียนซ์ (Variance) จากนิยามในสมการ (2.52) จะเห็นได้ชัดว่า ถ้า X กระจายห่างออกจากค่าเฉลี่ย m มากเท่าใด แวเรียนซ์หรือความเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะสูงตามไปด้วย ดังนั้น ถ้ากล่าวว่าตัวแปรสุ่มชุดหนึ่งมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าอีกชุดหนึ่ง ก็แสดงว่าตัวแปรสุ่มชุดแรกมีการกระจายออกจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่าชุดหลัง

เมื่อทำการพิจารณาแวเรียนซ์ในสมการ (2.52) โดยแตกเทอมทางขวามือของสมการจะได้ผลดังนี้

$$\sigma^2 = E[X^2 - 2mX + m^2]$$

$$\sigma^2 = E[X^2] - m^2 = \overline{X^2} - m^2 \tag{2.53}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าแวเรียนซ์จะหาได้จากกำลังสองเฉลี่ยลบด้วยค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง และในกรณีที่ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ σ^2 จะเท่ากับ $E[X^2]$

ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ค่าแวเรียนซ์ที่นิยามไว้ในสมการ (2.52) ก็จะเปลี่ยนรูปเป็นผลบวกดังนี้คือ

$$\sigma_x^2 = \sum_i (x_i - m)^2 P(x_i) \tag{2.54}$$

2.4.6 ฟังก์ชันการกระจายสะสมเติมเต็ม (Complement Cumulative Distribution Function: CCDF)

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

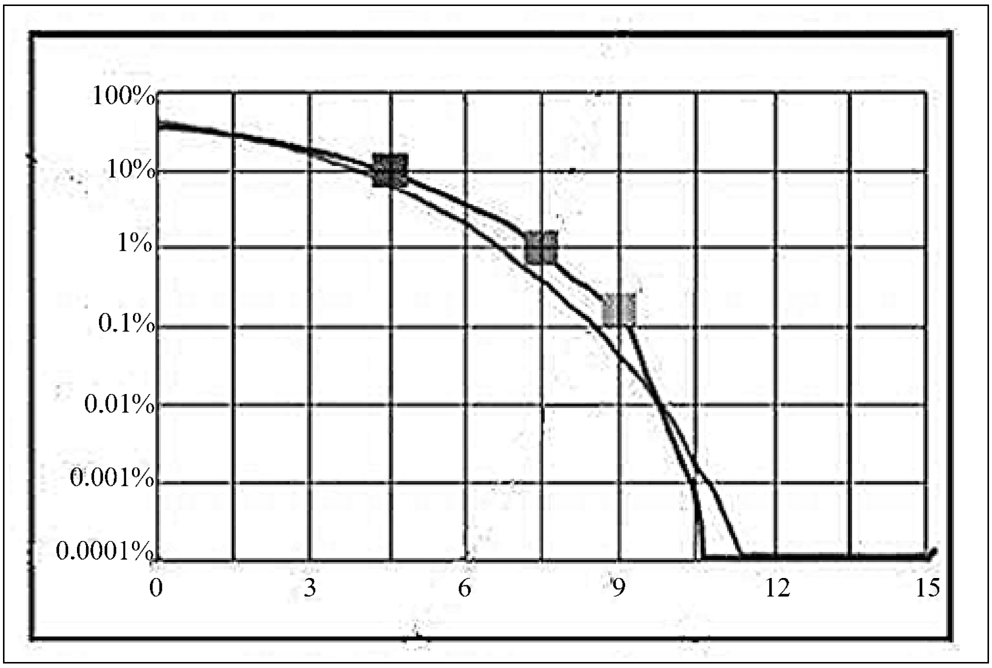
การวัดแบบ CCDF คือทางที่ดีที่จะหาสถิติกำลังของลักษณะพิเศษทั้งหมดของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน รูปแบบมอดูเลชันสามารถเปรียบเทียบผ่าน CCDF ในความหนาแน่นสัญญาณบนส่วนประกอบเช่น เครื่องขยายสัญญาณ กราฟเส้นโค้ง CCDF สามารถใช้หาผลกระทบของการกรองของสัญญาณจากกราฟเส้นโค้ง CCDF ของสัญญาณ multitone ซึ่งในการออกแบบเครื่องขยายสัญญาณจะรู้ค่าจริงที่มากเท่าไรที่สามารถใช้ได้สำหรับกำลังสูงสุดเพื่ออัด (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 Nine-channel IS-95 ซึ่งยากที่กำหนดปริมาณจำนวนเพราะมันเป็นสัญญาณสุ่มโดยธรรมชาติ เพื่อตัดข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากสัญญาณรบกวน ดังนั้นต้องการลักษณะทางสถิติของระดับกำลังในสัญญาณนี้ และกราฟเส้นโค้ง CCDF จะให้สิ่งเหล่านั้น



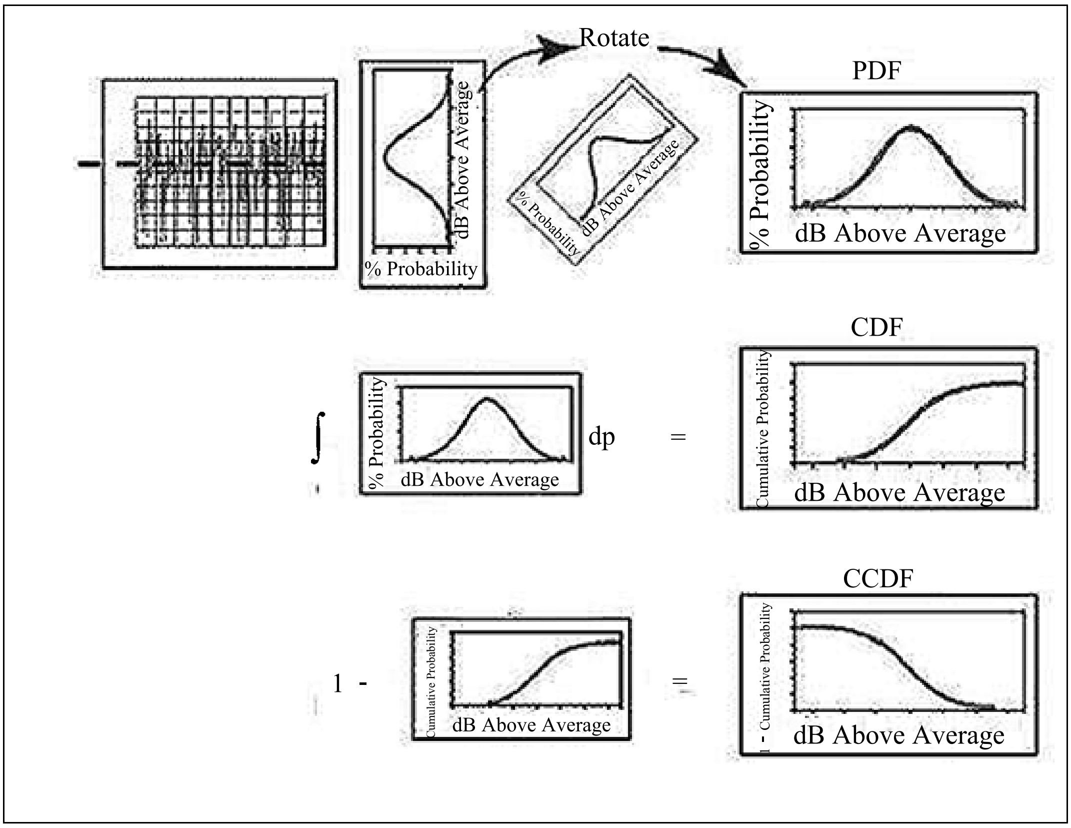
รูปที่ 2.20 กราฟเส้นโค้ง CCDF

กราฟเส้นโค้ง CCDF แสดงเวลามากเท่าไหร่ที่สัญญาณใช้หรือมากกว่าระดับกำลังที่ให้ระดับกำลังแสดงในรูปของ dB เกี่ยวกับกำลังเฉลี่ย สำหรับตัวอย่างแต่ละเส้นของรูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.20 แทนระดับกำลังกำลังเฉพาะมากกว่าสัญญาณเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นของเวลาสัญญาณที่ใช้หรือมากกว่าแต่ละเส้นกำหนดความน่าจะเป็นสำหรับระดับกำลังเฉพาะ กราฟเส้นโค้ง CCDF ดังแสดงในรูปที่ 2.20 คือการพล็อตของความสัมพันธ์ระดับกำลังต่อความน่าจะเป็น

- การคำนวณของกราฟเส้นโค้ง CCDF

การคำนวณของ CCDF แสดงในรูปที่ 2.21 โดย PDF ได้มาจากกราฟระดับสัญญาณต่อเวลาดังแสดงในกราฟสองรูปบน เพื่อให้ได้ CDF ทำได้โดยการคำนวณอินทิเกรต PDF ดังแสดงในกราฟสองรูปกลาง สุดท้ายทำการลบ CDF จาก 1 กลายเป็นผลของ CCDF ดังนั้น CCDF คือส่วนประกอบของ CDF (CCDF = CDF - 1)

ในการสร้างกราฟเส้นโค้ง CCDF ดังแสดงในรูปที่ 2.21 แกน y คือการผกผันเป็นรูปแบบของลอการิทึม และแกน x เริ่มที่ 0 dB โดยที่ขนาดของ CCDF มีค่าสูงสุด ส่วนค่าของ CDF จะมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.21 การคำนวณกราฟเส้นโค้ง CCDF

2.5 สรุป

สำหรับการออกแบบระบบการสื่อสารสัญญาณวิทยุนั้น จำเป็นต้องศึกษาการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่สถานที่หรือสภาพแวดล้อม ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเรียนรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ ผลกระทบหลักของการแพร่กระจายคลื่น รวมทั้งแบบจำลองต่าง ๆ ที่มีการทำวิจัยกันมา และยังมีส่วนของสายอากาศอีกส่วนหนึ่งที่จำเป็นในการสื่อสารของสัญญาณวิทยุ ตลอดจนทั้งข้อมูลที่ใช้ในการส่งสัญญาณที่เป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งต้องทำการศึกษาส่วนของการมอดูเลชันด้วยเพื่อให้เข้าใจลักษณะของสัญญาณข้อมูลดิจิตอล และทำการวิเคราะห์สัญญาณข้อมูลดิจิตอลออกมาในข้อมูลทางสถิติที่ใช้ความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์ ซึ่งหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในบทนี้จะใช้

สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณข้อมูลออกมาในรูปแบบของความน่าจะเป็น เพื่อจะได้นำไปประยุกต์และพัฒนาใช้กับระบบการสื่อสารสัญญาณวิทยุต่อไป

บทที่ 3
การออกแบบเครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลและระบบการทดลองรวมทั้งเหตุการณ์ของการทดลอง

3.1 กล่าวนำ

จากระบบการสื่อสารโดยทั่วไป จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก คือ เครื่องส่งและเครื่องรับที่ใช้ในการส่งสัญญาณ เมื่อทำการส่งสัญญาณออกมาผ่านสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ ทำให้สัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเกิดขึ้น โดยสัญญาณที่รับได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับที่ใช้สัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันแบบ ASK FSK และ PSK และการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมแบบทั่วไปและสภาพแวดล้อมบนท้องท้องถนน โดยในส่วนของการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า Transmitter module ใช้สำหรับส่งสัญญาณที่มีการมอดูเลต (Modulate) แบบต่างๆ และ Receiver module ใช้รับสัญญาณและดีมอดูเลต (Demodulate) สัญญาณออกมาตามชนิดของการมอดูเลต (Modulate) สัญญาณ และในส่วนของข้อมูล (Data) ที่ใช้สำหรับทดสอบในการรับ-ส่งสัญญาณนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 หรือไอซี 555 ในการสร้างสัญญาณ และในส่วนของสภาพแวดล้อมนั้นจะอธิบายทั้งสภาพแวดล้อมแบบทั่วไปและสภาพแวดล้อมบนท้องถนนที่เลือกใช้ในการทดลองวัด รวมถึงเหตุการณ์ของการวัด

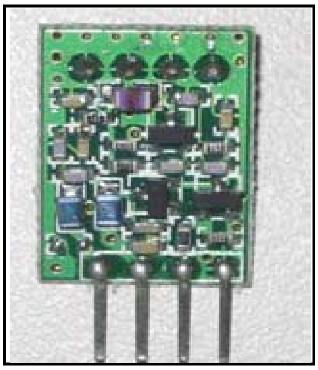
3.2 การออกแบบเครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอล

3.2.1 การออกแบบการรับส่งของสัญญาณดิจิตอลแบบ Amplitude Shift Keying (ASK)

- ภาคส่ง

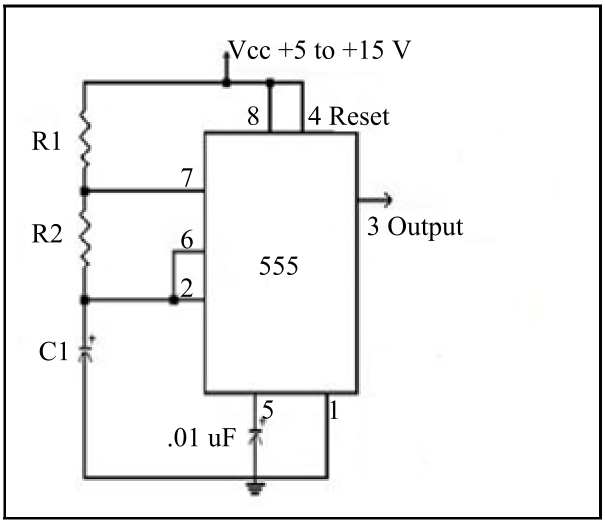
ในส่วนของภาคส่ง จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบคือ ASK Transmitter Module ไมโครคอนโทรลเลอร์ สายอากาศ (Antenna) และไอซีเบอร์ 555

ASK Transmitter Module เป็น Transmitter Module แบบ ASK ซึ่งมีขนาดเล็ก ออกแบบได้ง่าย ทำงานที่ความถี่ 315/433.92 MHz ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 3-12V ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ASK Transmitter Module

ไอซีเบอร์ 555 สำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK นั้นได้ใช้ไอซีเบอร์ 555 ในการสร้างสัญญาณเป็นข้อมูล (Data) ในการทดสอบวงจร ดังวงจรในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสร้างสัญญาณจากไอซีเบอร์ 555

- **การสร้างสัญญาณ**

สัญญาณที่สร้างขึ้นมีการปรับความถี่ได้ ตั้งแต่ 300 Hz ถึง 3 kHz ซึ่งวงจรสร้างสัญญาณจากไอซีเบอร์ 555 มีพารามิเตอร์ ดังนี้ R_1=1.1 kΩ, R_2=20 kΩ, C_1=0.1 μF

- **สายอากาศ (Antenna)**

โดยทั้งภาคส่งและภาครับของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK และ FSK ใช้สายอากาศที่ความถี่ 433 MHz Portable Duck Antenna ดังรูปที่ 3.3 และมีคุณสมบัติดังนี้

Frequency range : 433MHz(center)

Polarization : Linear, vertical

Impedance : 50 Ohms

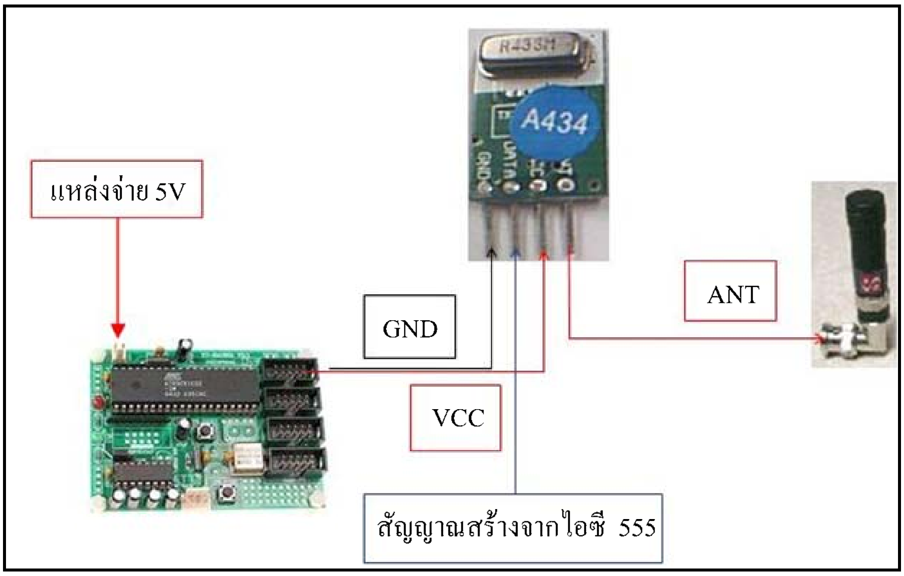
Gain : Unity

VSWR : < 1.1:1

Connector : BNC (male)

รูปที่ 3.3 สายอากาศย่านความถี่ 433 MHz

จากนั้น ทำการต่อวงจรภาคส่ง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพการต่อวงจรภาคส่งของมอดูเลตแบบ ASK

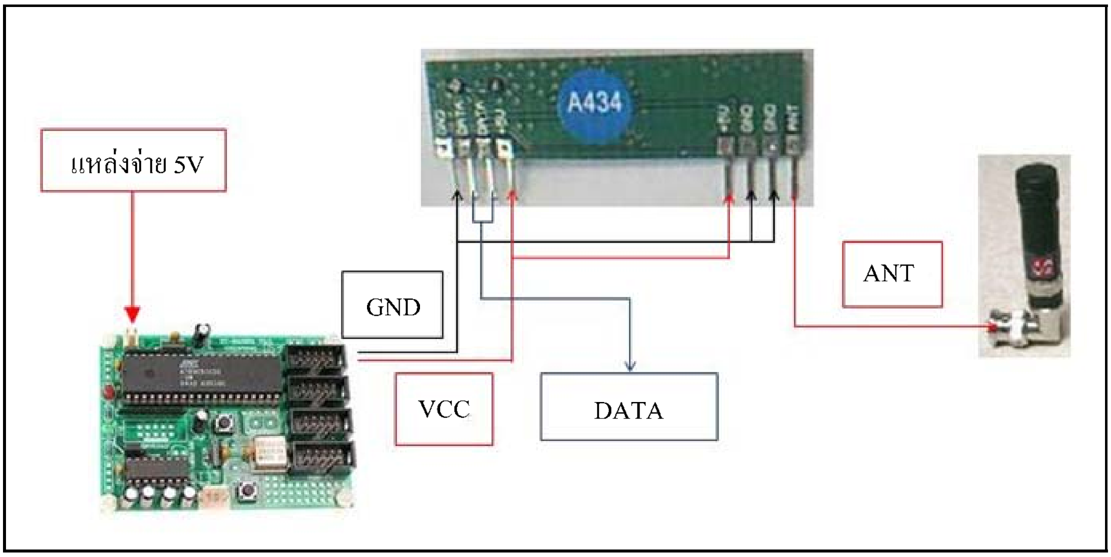
- ภาครับ

ในส่วนของภาครับ จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบคือ ASK Receiver Module ไมโครคอนโทรลเลอร์ และสายอากาศ (Antenna)

ASK Receiver Module เป็นวงจร Receiver Module แบบ ASK ทำงานที่ความถี่ 315/433.92 MHz ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 5V และกระแสไฟฟ้า 2.3mA ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ASK Receiver Module

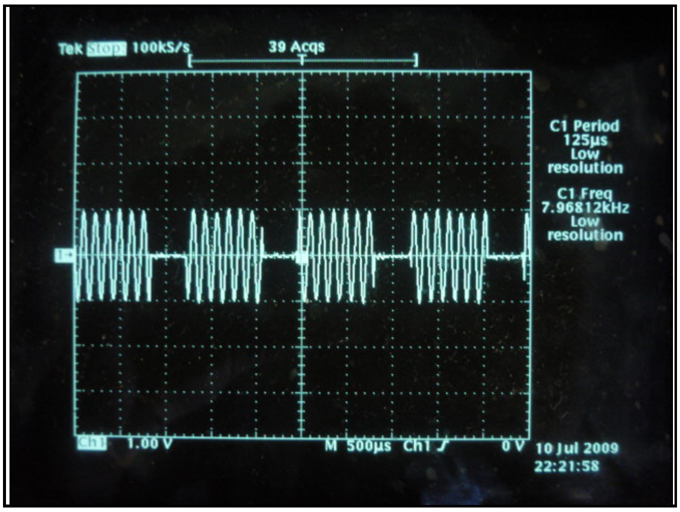
จากนั้น ทำการต่อวงจรภาครับ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาพการต่อวงจรภาครับของมอดูเลตแบบ ASK

- การทดสอบวงจร

เมื่อได้ประกอบวงจรตามรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.6 เรียบร้อยแล้ว ก็จะนำวงจรไปทำการทดสอบก่อนที่จะนำไปวัดจริงที่สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบวงจรนี้จะใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดสัญญาณข้อมูลที่ได้มีการส่งออกมา



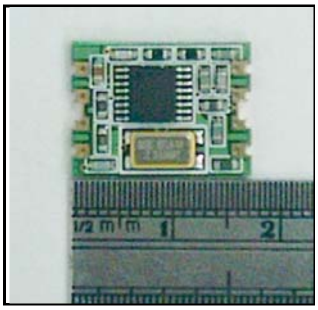
รูปที่ 3.7 สัญญาณ ASK ที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

3.2.2 การออกแบบการรับส่งของสัญญาณดิจิตอลแบบ Frequency Shift Keying (FSK)

- ภาคส่ง

ในส่วนของภาคส่ง จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบคือ FSK Transmitter Module ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 สายอากาศ (Antenna) และ ชุดเชื่อมต่อแรงดันลอจิกระหว่าง 3.3V กับ 5V (ET-MINILOGICLEVELSHIFTER)

FSK Transmitter Module เป็น Transmitter Module แบบ FSK ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ทำงานที่ความถี่ 434/868 MHz ใช้ไฟเลี้ยง 2.2-3.5V มีประสิทธิภาพในการขยายกำลังสูง 10dBm ที่ 3V ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ 15mA ที่ 3V และสามารถส่งได้ไกลประมาณ 150-200 เมตร ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 FSK Transmitter Module

- **ไมโครคอนโทรลเลอร์**

การส่งสัญญาณแบบ FSK นี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการสร้างสัญญาณ (Data) ขึ้นมา เพื่อใช้ในการทดสอบวงจร ในการเขียนโปรแกรมนั้นใช้บอร์ดไมโครคอลโทรลเลอร์รุ่น ET-BASE51 V2.0 (AT89C51ED2) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ET-BASE51 V2.0 เป็นบอร์ดไมโครคอลโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 ขนาด 40 Pin ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอลโทรลเลอร์ เบอร์ AT89C51ED2 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดย MCU รุ่นนี้จะบรรจุอยู่ภายในตัวถังแบบ DIP40 โดย MCU ตัวนี้จะมีจุดเด่น คือ เรื่องในการประมวลผลซึ่งสามารถทำงานได้ด้วยความถี่สูงสุด 60 MHz ที่ 12 Clock/1 Machine Cycle นอกจากนี้ยังมีความเพียบพร้อมด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 2 Kbyte หรือหน่วยความจำใช้งานแบบ RAM ซึ่งมีมากถึง 1792 Byte เป็นต้น

- **คุณสมบัติของบอร์ด**

1. เลือกใช้ MCU ตระกูล MCS-51 เบอร์ AT89C51ED2 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยเลือกใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบ Oscillator Module ค่า 29.4912 MHz ซึ่งสามารถกำหนดการทำงานของ MCU ให้ทำงานในโหมดความเร็ว 2 เท่า (X2 Mode) ได้ ทำให้ MCU สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 58.9824 MHz โดยคุณสมบัติเด่น ๆ ได้แก่

- มีหน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรมขนาด 64 Kbyte
- มี EEPROM ขนาด 2 Kbyte สำหรับเก็บข้อมูล และสามารถเขียนข้อมูลซ้ำได้กว่า 1 ล้านครั้ง
- มีพอร์ตขนาน I/O ขนาด 8 บิต จำนวน 4 พอร์ต (P0 P1 P2 P3)
- มี RAM ใช้งาน 1792 Byte เพียงพอต่อการใช้งาน
- มีวงจรสื่อสารอนุกรม UART จำนวน 1 พอร์ต และวงจร SPI จำนวน 1 พอร์ต

- มีวงจร Timer/Counter ขนาด 16 บิต จำนวน 3 ชุด
- มีวงจร Watchdog Power - ON Reset Capture/Compare PWM

2. มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมแบบ RS 232 จำนวน 1 ช่อง สำหรับใช้ในการ Download โปรแกรมให้กับบอร์ด และประยุกต์ใช้งานทั่วไป

3. มีขั้วต่อสัญญาณ I/O แบบ TTL แบบ Header ขนาด 2×5 จำนวน 4 ชุด (P0 P1 P2 P3)

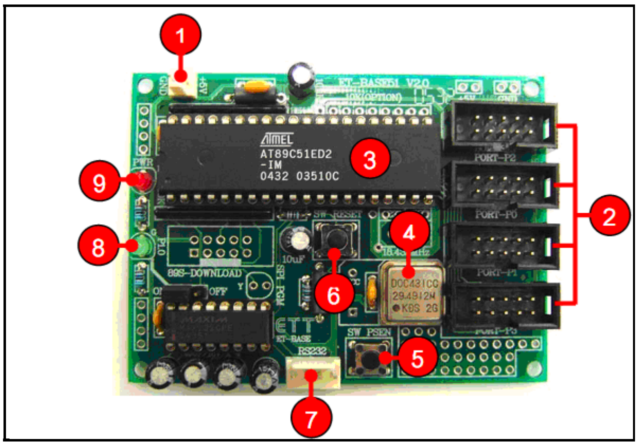
4. มี LED แสดงสถานะแหล่งจ่าย Power และ Self-Test สำหรับใช้ทดสอบการทำงานของบอร์ด

5. ใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด +5VDC

6. ขนาด PCB Size เล็กเพียง 8 x 6 cm.

- โครงสร้างบอร์ด ET-BASE51 V2.0 (AT89C51ED2)

ในรูปที่ 3.9 แสดงถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ รวมทั้งพอร์ตเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถใช้งานร่วมกับบอร์ด ET-BASE51 V2.0 (AT89C51ED2) ได้



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบต่างๆของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

หมายเลข 1 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร ใช้กับแหล่งจ่ายไฟตรง +5 VDC

หมายเลข 2 คือ PORT-P2 PORT-P0 PORT-P1 และ PORT-P3 ตามลำดับ

หมายเลข 3 คือ MCU เบอร์ AT89C51ED2 ซึ่งเป็น MCU ตระกูล MCS51

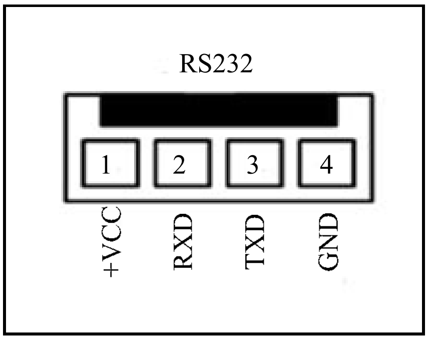
หมายเลข 4 คือ Oscillator Module ค่า 29.4912 MHz

หมายเลข 5 คือ SW PSEN ใช้สำหรับกำหนดสถานะลอจิก “0” ให้ขา PSEN ใช้สำหรับในขั้นตอนของการ Download HEX File ให้กับหน่วยความจำ Flash ของ MCU ในบอร์ด

หมายเลข 6 คือ SW RESET ใช้สำหรับรีเซ็ตการทำงานของ MCU ภายในบอร์ด

หมายเลข 7 คือ พอร์ต RS232 หรือ Serial Port ดังรูปที่ 3.10 Serial Port สำหรับติดต่อกับอุปกรณ์

มาตรฐาน RS232 และใช้เป็น ISP Download Connector สำหรับ Download HEX File ให้กับ MCU ของบอร์ด



รูปที่ 3.10 Serial Port

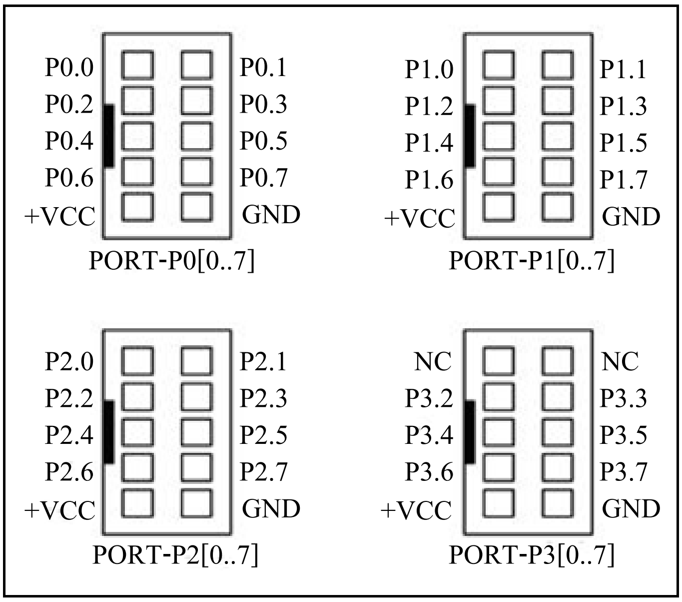
หมายเลข 8 คือ LED แสดงสถานะของ P1.0 ในกรณีที่เลือก Jumper ไว้ทางด้าน ON เพื่อ Test

หมายเลข 9 คือ LED Power สีแดง ใช้แสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรของบอร์ด

- **ขั้วต่อสัญญาณต่าง ๆ**

สำหรับขั้วต่อของ I/O จาก MCU นั้น จะถูกออกแบบและจัดเตรียมไว้ผ่านทางขั้วต่อแบบ IDE Header ขนาด 2×5 จำนวน 4 ชุด คือ PORT-P0 PORT-P1 PORT-P2 และ PORT-P3 ตามลำดับ โดยที่ขั้วต่อของสัญญาณแต่ละชุด จะประกอบไปด้วยสัญญาณของ I/O ที่เชื่อมต่อมาจากขาสัญญาณของ MCU โดยตรงทั้งหมด โดยแต่ละพอร์ตจะมีสัญญาณพอร์ตละ 8 บิต ยกเว้น PORT-P3 ซึ่งจะมีเพียง 6 บิต คือ P3.2-P3.7 เท่านั้น ส่วน P3.0 และ P3.1 จะถูกสงวนไว้ใช้งานเป็นขาของสัญญาณ RXD และ TXD สำหรับรับส่งข้อมูลของ RS232 ซึ่งสัญญาณทั้ง 2 เส้น (P3.0 P3.1) จะถูกเชื่อมต่อผ่านวงจร Line Driver (MAX232) สำหรับแปลงระดับสัญญาณจากระดับโลจิก TTL ของMCU ให้เป็นสัญญาณแรงดันตามมาตรฐานของ RS 232 โดยสัญญาณที่ได้รับการแปลงเป็นแบบ RS232 จะถูกเชื่อม

ต่อไปรอไว้ที่ขั้วต่อแบบ CPA ขนาด 4 PIN (RS232) โดยการจัดเรียงสัญญาณของแต่ละชุดจะเป็นดัง รูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงการจัดเรียงสัญญาณของพอร์ตต่างๆ ที่สามารถอ้างอิงในระดับบิตได้



รูปที่ 3.11 การจัดเรียงสัญญาณของพอร์ต I/O ต่างๆของบอร์ด ET-BASE51 V2.0

- **การสร้างสัญญาณ**

การสร้างสัญญาณข้อมูล (Data) จากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นการเขียนโปรแกรม สร้างสัญญาณขึ้นมาเป็นสัญญาณพัลล์ ที่มีความถี่ 5.3 kHz และความถี่ 10.2 kHz แต่ที่ใช้ในการทดลองจริงที่ความถี่ 5.3 kHz ดังโปรแกรมข้างล่างนี้

```
                ORG     0000H
                CLR     P1.3
LOOP:           SETB    P1.3
                CALL    DELAY_1MS
DATA:           SETB    P3.1
                CALL    DELAY
                CLR     P3.1
                CALL    DELAY
                JMP     DATA
DELAY_1MS:      MOV     R2,#184
HERE:           NOP
```

```
                        NOP
                        NOP
                        DJNZ    R2,HERE
                        RET
DELAY:                  MOV     R3,#113
AGAIN:                  DJNZ    R3,AGAIN
                        RET
```

- **การ Download Hex file ให้กับ MCU ของบอร์ด**

การ Download Hex File ให้กับหน่วยความจำ Flash ของ MCU ในบอร์ดนั้น จะใช้โปรแกรมชื่อ “FLIP” ของ ATMEL ซึ่งจะติดต่อกับ MCU ผ่าน Serial Port ของคอมพิวเตอร์ PC โดยโปรแกรมดังกล่าว สามารถดาวน์โหลดได้จาก WWW.ATMEL.COM โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายใด ๆ แต่สำหรับในกรณีที่ซื้อบอร์ดจากอีทีทีนั้น โปรแกรมดังกล่าวจะจัดเตรียมไว้ให้ในแผ่น CD ROM อยู่แล้ว โปรแกรม FLIP (Flexible In-system Programmer) เป็นโปรแกรมสำหรับพัฒนาระบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ของ ATMEL โดยสามารถใช้สนับสนุนการพัฒนาโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS51 ในกลุ่มที่ใช้การพัฒนาแบบ ISP ซึ่งรวมถึงเบอร์ AT89C51ED2 ด้วย โดยโปรแกรมจะทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการของ Windows9X/Me/NT/2000 และ Windows XP โดยสนับสนุนการเชื่อมต่อกับระบบฮาร์ดแวร์ที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ RS232 หรือ CAN หรือ USB ซึ่งวิธีการเชื่อมต่อของโปรแกรม FLIP กับระบบฮาร์ดแวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จะขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะนำมาทำการพัฒนาว่าสามารถใช้การติดต่อสื่อสารด้วยวิธีใดบ้าง แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2 นั้นจะสามารถใช้การเชื่อมต่อผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232 เท่านั้น ไม่สามารถเชื่อมต่อผ่านระบบการสื่อสารของ CAN หรือ USB ได้ โดยโปรแกรม FLIP จะใช้สำหรับ Download ข้อมูลให้กับหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำงานใน Monitor Mode เพื่อให้ผู้ใช้สั่งจัดการกับหน่วยความจำภายในตัว CPU ไม่ว่าจะเป็นการสั่งลบข้อมูล (Erase) สั่งตรวจสอบข้อมูลในหน่วยความจำ (Blank Check) สั่งโปรแกรมข้อมูลให้กับหน่วยความจำโปรแกรมของ CPU (Program) สั่งเปรียบเทียบข้อมูลจาก Buffer กับหน่วยความจำในตัว CPU (Verify) หรือสั่งอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำของ CPU (Read) เป็นต้น โดยในการ Download HEX File จาก PC ให้กับบอร์ดจะใช้กับสาย RS232 แบบ 4 Pin ในการสั่ง Download โปรแกรม ซึ่งสามารถใช้งานได้กับโปรแกรม FLIP ทุกรุ่น แต่ในปัจจุบัน (ตุลาคม2548) โปรแกรม FLIP ได้รับการปรับปรุงเป็น “FLIP V2.4.4” แล้ว ซึ่งเมื่อต้องการให้โปรแกรม FLIP ติดต่อกับ CPU ใน Monitor Mode ด้วยวิธีการ Download แบบ Manual นั้น จะต้องสั่ง Reset ให้ CPU เข้าทำงานใน Monitor Mode ก่อน จึงจะสามารถสั่งงาน CPU ผ่านทางโปรแกรม FLIP ได้ ซึ่งหลักการสำหรับ Reset ให้ CPU เข้า

ทำงานใน Monitor Mode จะต้องกำหนดให้ขาสัญญาณ PSEN มีสภาวะเป็น "0" ในขณะที่ CPU หลุดพ้นจากสภาวะของการ Reset ซึ่งตามปรกติแล้วหลังการ Reset ทุกครั้ง CPU จะตรวจสอบสภาวะของขาสัญญาณ PSEN ว่าเป็น "0" หรือไม่ ถ้าไม่ใช่ก็จะทำงานในโหมดการทำงานปกติ แต่ถ้าใช่ก็จะตรวจสอบสถานะของสัญญาณอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานใน Monitor Mode ถ้าเงื่อนไขอื่น ๆ ถูกต้องก็จะเข้าทำงานใน Monitor Mode สำหรับบอร์ดรุ่น ET-BASE51 V2.0 (AT89C51ED2) นั้นการที่จะสั่ง Reset ให้ CPU ของ ATMEL เข้าทำงานใน Monitor Mode ด้วยวิธีการแบบ Manual นั้นจะต้องทำตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้ (อ้างอิงการใช้งานกับโปรแกรม FLIP Version 2.4.4 เป็นหลัก ถ้าใช้รุ่นที่แตกต่างไปจากนี้ลักษณะโปรแกรมอาจแตกต่างไปจากนี้ได้)

- ลำดับขั้นตอนการ Download HEX File ด้วยโปรแกรม FLIP 2.4.4

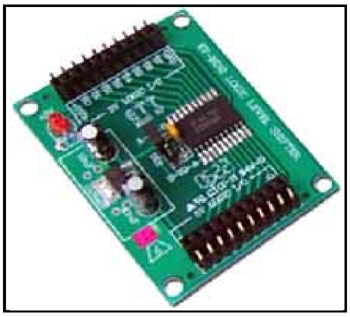
1. ต่อสายสัญญาณ RS232 จาก Com Port ของเครื่องคอมพิวเตอร์ PC เข้ากับขั้ว RS232 แบบ 4 Pin ของบอร์ด
2. จ่ายไฟเลี้ยงวงจรให้บอร์ด ซึ่งจะสังเกตุเห็น LED แสดงสถานะของ PWR สีแดงติดสว่างอยู่
3. สั่ง Run โปรแกรม FLIP V2.4.4
4. สั่งเลือกกำหนดเบอร์ของ MCU ที่ติดตั้งไว้ในบอร์ด โดยเลือก Device ⟶ Select ซึ่งต้องเลือก กำหนดให้ตรงกับที่ทำการติดตั้งไว้จริงๆในบอร์ดด้วย
5. คลิกเมาส์ที่คำสั่ง Setting ⟶ Communication ⟶ RS232 จากนั้นเลือกกำหนด Comport ให้ตรงกับที่ต่อสายไว้จริง
6. ทำการรีเซ็ต MCU ให้เข้าทำงานใน Monitor โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้
   a) กดสวิตช์ PSEN ค้างไว้เพื่อกำหนดสถานะขาสัญญาณ PSEN ให้เป็น "0"
   b) กดสวิตช์ RESET เพื่อส่งสัญญาณ RESET ให้กับ CPU โดยสวิตช์ PSEN ต้องกดค้างอยู่เช่นเดิม
   c) ปล่อยสวิตช์ RESET เพื่อปล่อยให้ CPU พ้นจากสภาวะการ Reset (สวิตช์ PSEN ยังกดค้างอยู่)
   d) ปล่อยสวิตช์ PSEN เป็นลำดับสุดท้าย
7. คลิกเมาส์ที่ปุ่ม Connect เพื่อทำการติดต่อสื่อสารกับ MCU ใน Monitor Mode
8. สั่งเปิด Hex File ที่ต้องการจะ Download ให้กับ MCU มารอไว้ใน Buffer ของโปรแกรม FLIP โดยใช้คำสั่ง "File ⟶ Load Hex File…"
9. คลิกเมาส์ที่หน้าตัวเลือกคำสั่งใน Tab ของ Operation Flow ให้ครบทุกคำสั่ง ซึ่งได้แก่ Erase Bank Check Program และ Verify จากนั้นคลิกเมาส์ที่ปุ่มคำสั่ง Run และรอจนการทำงานของโปรแกรมเสร็จเรียบร้อย

10. ตรวจสอบค่า Device BSB และ SBV ว่ามีค่าเป็น 00 ทั้งหมดแล้ว ซึ่งถ้ายังไม่เป็น 00 ให้ทำการแก้ไขค่าให้เป็น 00 โดยคลิกเมาส์ในช่องตัวเลขแล้วพิมพ์ค่า 00 แทนที่ลงไปทั้ง 2 ช่อง

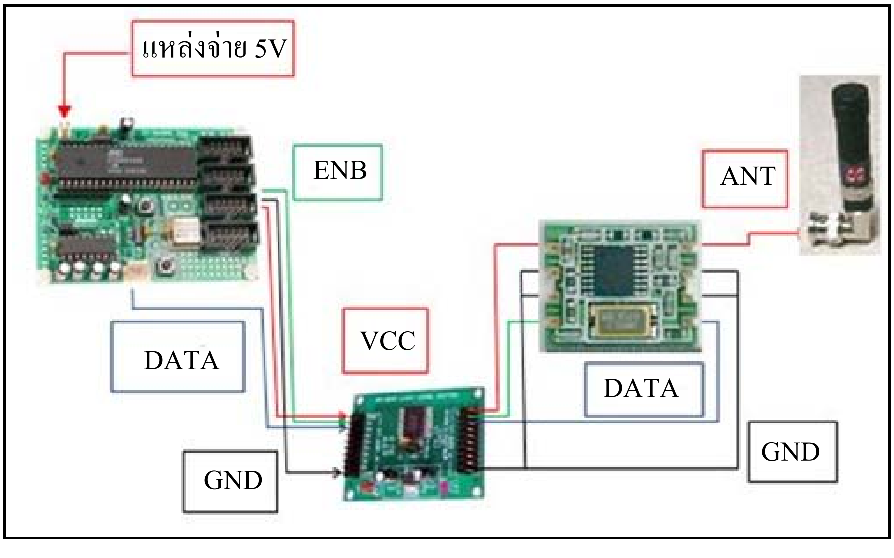
11. ทำการกดสวิตช์ Reset ให้กับบอร์ดเพื่อให้บอร์ดเริ่มต้นทำงานตามโปรแกรมที่ได้ทำการ Download ไปให้ ซึ่งถ้าไม่เกิดความผิดพลาดใดๆจะเห็น MCU เริ่มต้นทำงานทันที

- ชุดเชื่อมต่อแรงดันลอจิกระหว่าง 3.3V กับ 5V (ET – MINI LOGIC LEVELSHIFTER)

เป็นบอร์ดวงจรที่ใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณลอจิกระหว่างอุปกรณ์ 5V กับอุปกรณ์สัญญาณประเภท 3.3V (หรือ 3V) เพราะ FSK Transmitter Module ต้องใช้แรงดันแค่ 3V ดังรูปที่ 3.12 จากนั้น ทำการต่อวงจรภาคส่ง ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 ชุดเชื่อมต่อแรงดันลอจิกระหว่าง 3.3Vกับ 5V

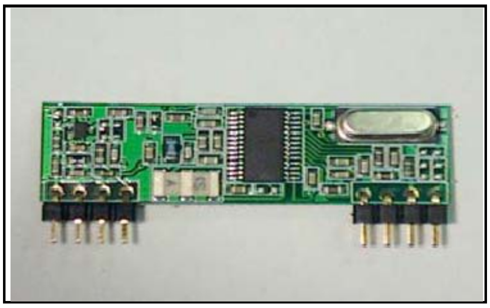


รูปที่ 3.13 ภาพการต่อวงจรภาคส่งของมอดูเลตแบบ FSK

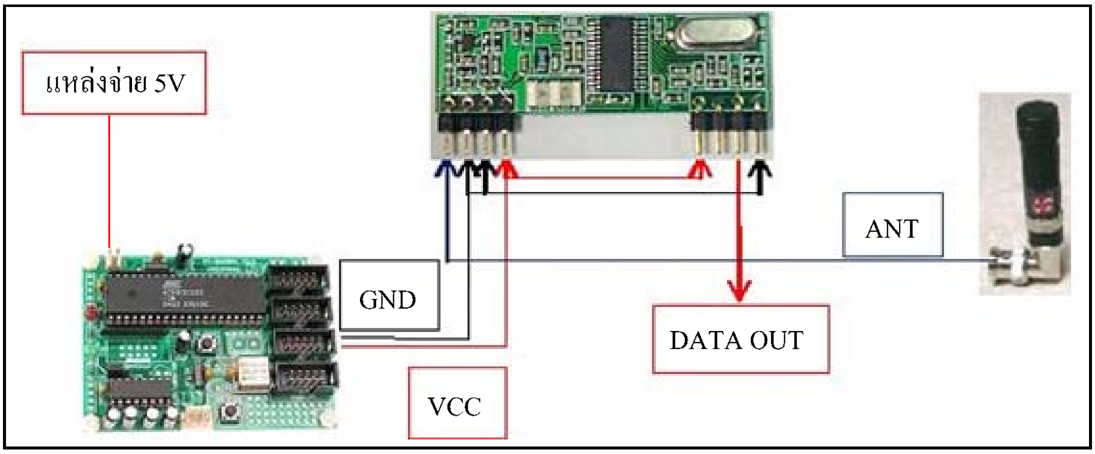
- **ภาครับ**

ในส่วนของภาครับ จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบคือ FSK Receiver Module ไมโครคอนโทรลเลอร์ และสายอากาศ (Antenna)

FSK Receiver Module เป็น Receiver Module แบบ FSK ทำงานที่ความถี่ 434/868 MHz ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 10mA ที่ความถี่ 434 MHz และ 13mA ที่ความถี่ 868 MHz และใช้แรงดันที่ 5V ดังรูปที่ 3.14 จากนั้น ทำการต่อวงจรภาครับ ดังรูปที่ 3.16



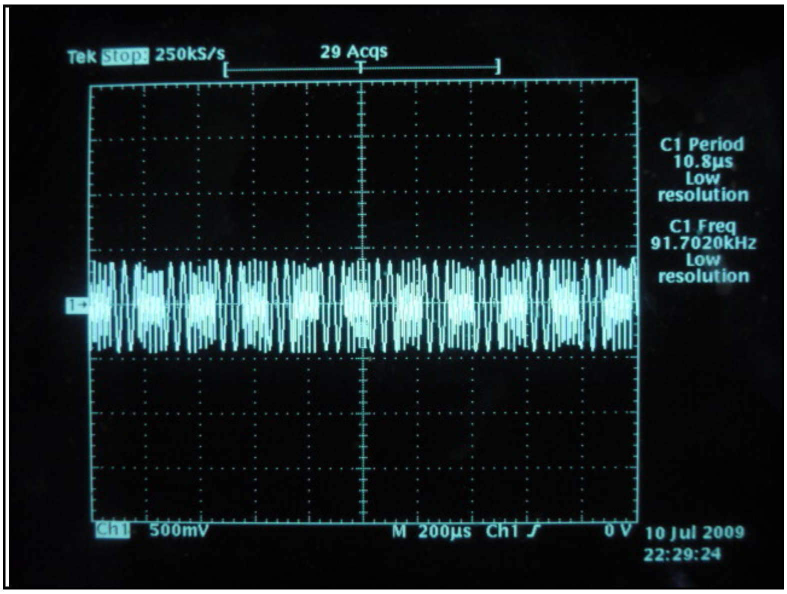
รูปที่ 3.14 FSK Receiver Module



รูปที่ 3.15 ภาพการต่อวงจรภาครับของมอดูเลตแบบ FSK

- **การทดสอบวงจร**

เมื่อได้ประกอบวงจรตามรูปที่ 3.13 และ รูปที่ 3.15 เรียบร้อยแล้ว ก็จะนำวงจรไปทำการทดสอบก่อนที่จะนำไปวัดจริงที่สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบวงจรนี้จะใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดสัญญาณข้อมูลที่ได้มีการส่งออกมา



รูปที่ 3.16 สัญญาณ FSK ที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

3.2.1 การออกแบบการรับส่งของสัญญาณดิจิตอลแบบ Phase Shift Keying (PSK)

ในการออกแบบสัญญาณดิจิตอลแบบ PSK ได้ใช้เครื่องส่งของ Agilent signal generator model E4433B รูปที่ 3.17 แทนโมดูล โดยสัญญาณที่ใช้การส่งคือ สัญญาณมอดูเลตแบบ BPSK ซึ่งเป็นสัญญาณรูปแบบหนึ่งของ PSK ซึ่งทำการตั้งค่าของสัญญาณ ให้มีค่าอัตราเร็วของ symbol ที่ 50 ksps และทำการมอดูเลตที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้แบนวิดท์ของสัญญาณสำหรับ 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 3.18 ต่อกับสายอากาศภาครับผ่าน low noise amplifier ที่มีอัตราขยาย 28 dB สัญญาณเชิงซ้อนที่รับได้ถูกดีมอดูเลตโดยโปรแกรม Agilent 89600 vector signal analyzer ซึ่งติดตั้งใน Agilent N9020A

รูปที่ 3.17 เครื่องส่ง Agilent signal generator model E4433B

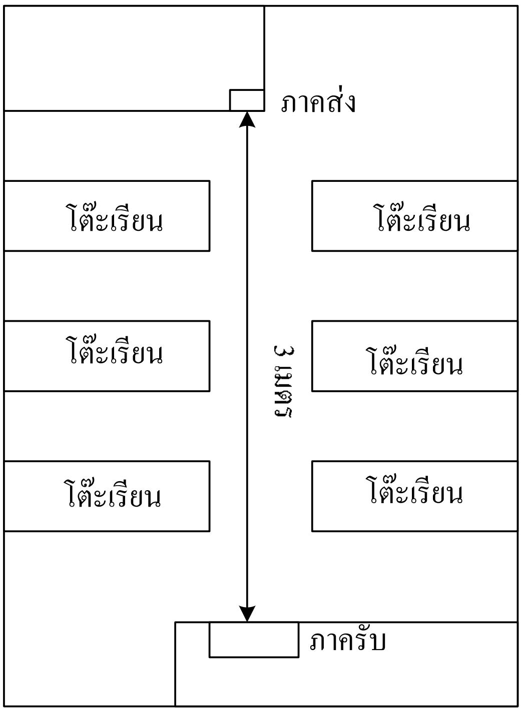
รูปที่ 3.18 เครื่องรับ Agilent N9020A MXA signal analyzer

3.3 เหตุการณ์ของการวัด

เมื่อได้ทำการทดสอบวงจรที่ได้ออกแบบ ผลการทดสอบเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด นั่นคือ สามารถนำไปใช้งานได้แล้ว หลังจากนั้นจะเป็นการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองเป็นไปตามเป้าหมาย ที่กำหนด จึงได้มีการทดลองทั้งในสภาพแวดล้อมของภายในอาคาร (Indoor) และภายนอกอาคาร (Outdoor) ซึ่งสภาพแวดล้อมของภายนอกอาคารจะทำการทดลองวัดที่ลานจอดรถ ในขณะที่ลานจอดรถว่างและลานจอดรถเต็ม และทำการทดลองวัดในสภาพแวดล้อมบนถนน

3.3.1 เหตุการณ์ของห้องปิดภายในอาคาร

การวัดหากำลังสัญญาณที่รับได้ในห้องปิดภายในอาคาร จากภาพจำลองการทดลองดัง รูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับเท่ากับ 3 เมตรและมีสิ่งกีดขวางเป็น โต๊ะเรียนและอุปกรณ์ภายในห้อง ดังรูปที่ 3.20 โดยผลรวมสัญญาณจะถูกบันทึกไว้

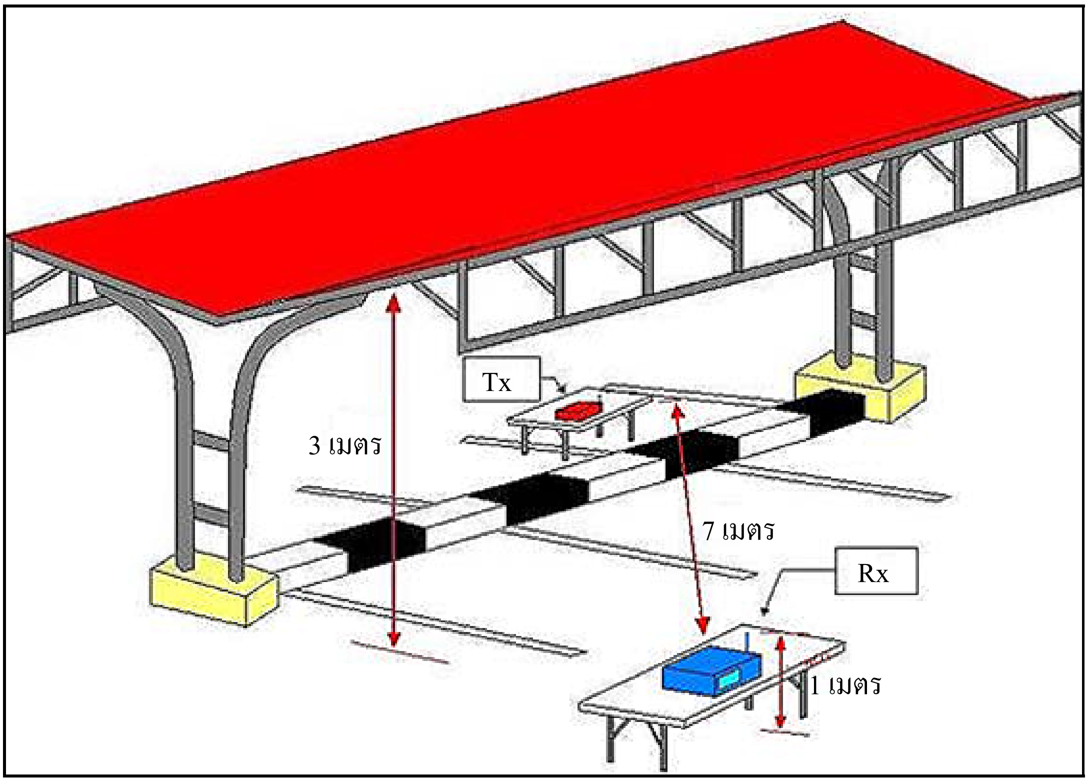


รูปที่ 3.19 ภาพวาดจำลองสถานที่การทดลองจริง ห้องปิด (Top view)

รูปที่ 3.20 ห้องปิดภายในอาคาร (Indoor) ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.2 เหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์

การหากำลังสัญญาณที่รับในลานจอดรถยนต์ ตามภาพจำลองการทดลองดังรูปที่ 3.21 โดยการวัดสัญญาณถูกกระทำใน 2 กรณี คือลานจอดรถยนต์ว่างดังรูปที่ 3.22 แทนการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุที่ปราศจากสิ่งกีดขวางและอีกกรณีคือลานจอดรถยนต์เต็มดังรูปที่ 3.23 และสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์เป็นชนิดแบบภายนอกอาคาร ซึ่งมีหลังคาเป็นโลหะ ความสูงของหลังคาประมาณ 3 เมตร เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ห่างกันประมาณ 7 เมตร ทั้งสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับสูงจากพื้น 1 เมตร โดยการวัดระดับสัญญาณใน 2 กรณี ผลรวมสัญญาณที่แกว่งไปแกว่งมา จะถูกบันทึกไว้



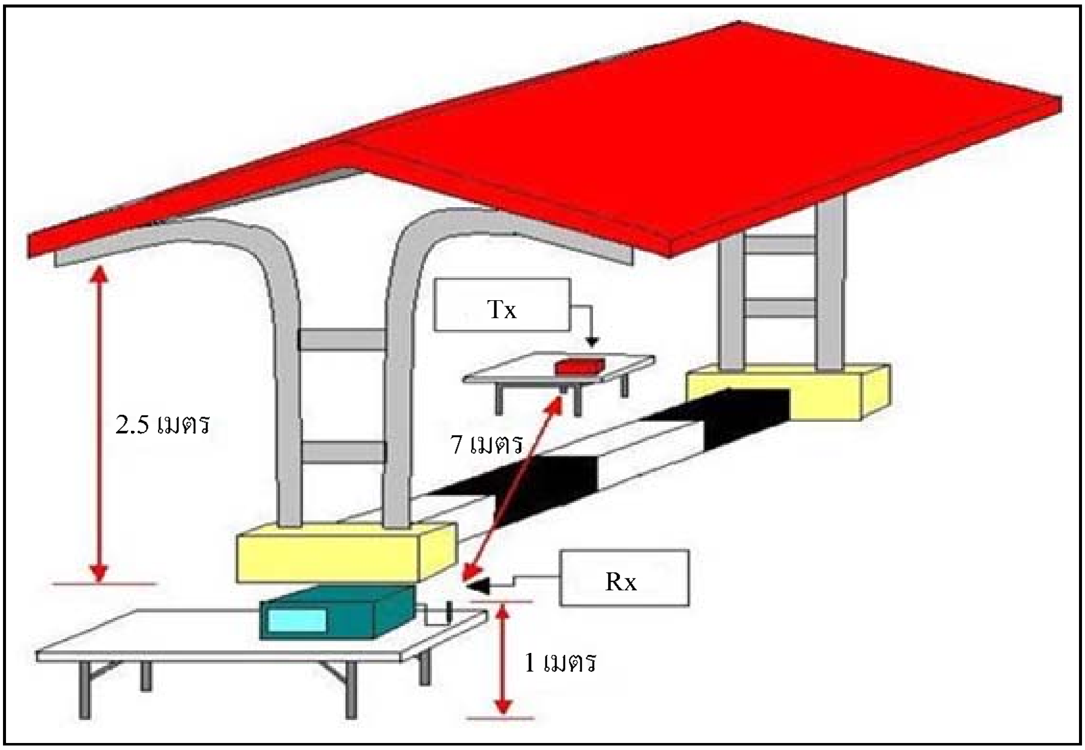
รูปที่ 3.21 ภาพวาดจำลองสถานที่การทดลองจริง ลานจอดรถยนต์

รูปที่ 3.22 ลานจอดรถยนต์ว่าง

รูปที่ 3.23 ลานจอดรถยนต์เต็ม

3.3.3 เหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์

ทำการวัดสัญญาณในลานจอดรถจักรยานยนต์ ตามภาพจำลองการทดลองรูปที่ 3.24 โดยจะทำการวัดคล้ายกับกรณีของลานจอดรถยนต์ คือทำการวัดใน 2 กรณีเช่นกัน กรณีแรกคือลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง ดังรูปที่ 3.25 และกรณีที่ 2 คือลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม ดังรูปที่ 3.26 โดยมีรถจักรยานยนต์เป็นตัวกระจายคลื่น ซึ่งลานจอดรถจักรยานยนต์มีหลังคาเป็นโลหะ ความสูงของหลังคาประมาณ 2.5 เมตร เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ห่างกันประมาณ 7 เมตร ทั้งสายอากาศส่งแล ะสายอากาศรับสูงจากพื้น 1 เมตร



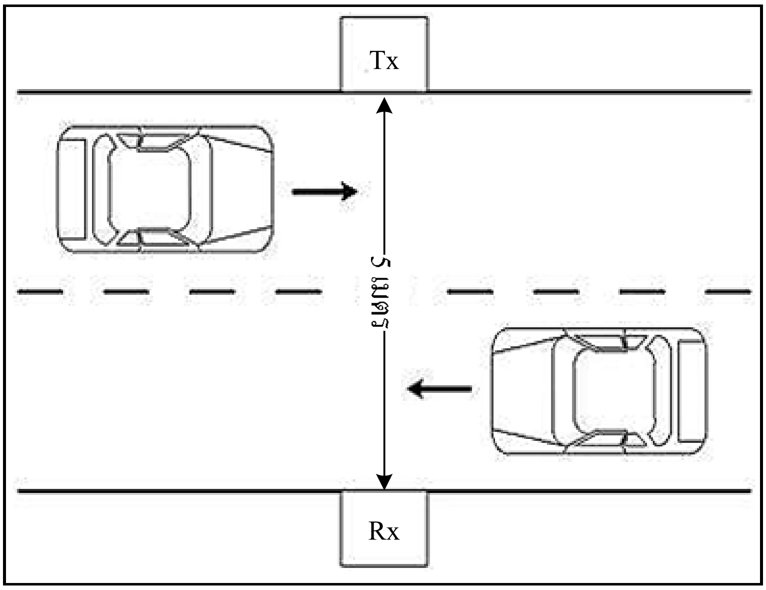
รูปที่ 3.24 ภาพวาดจำลองสถานที่การทดลองจริง ลานจอดรถจักยานยนต์

รูปที่ 3.25 ภาพแสดงลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง

รูปที่ 3.26 ภาพแสดงลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม

3.3.4 เหตุการณ์บนท้องถนน

การวัดสัญญาณกระทำการวัดในถนนที่มีสภาพการจราจรต่าง ๆ กัน โดยมีการศึกษาในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน โดยทำการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับไว้ที่ข้างถนน โดยระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีระยะประมาณ 5 เมตร ความสูงของสายอากาศสูงประมาณ 0.5 เมตร ดังรูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 แบบจำลองการทดลองวัดบนท้องถนน

รูปที่ 3.28 การทดลองวัดบนท้องถนน

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงการออกแบบเครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลและสภาพแวดล้อมรวมทั้งเหตุการณ์ของการทดลองวัดโดยได้กล่าวถึงในรายละเอียดของการออกแบบเครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบต่าง ๆ ได้แก่ Amplitude Shift Keying (ASK) Frequency Shift Keying (FSK) และ Binary Phase Shift Keying (BPSK) โดยใช้โมดูลในการสร้างวงจร และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในสร้างข้อมูลเพื่อส่งสัญญาณออกไป และได้กล่าวถึงสภาพแวดล้อมและเหตุการณ์ของการทดลองวัด โดยสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองวัดได้กล่าวถึง สภาพแวดล้อมของห้องปิดภายในอาคาร สภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ สภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ และสภาพแวดล้อมของถนน รวมถึงเหตุการณ์ของแต่ละสภาพแวดล้อม ที่แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองวัด

บทที่ 4
การวัดและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

จากการกล่าวถึงการทดลองวัดสัญญาณ ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงการนำทฤษฎีและเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมาเพื่อใช้ในการทดลองวัด โดยจะทำการกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ผลของสัญญาณออกมาในรูปแบบของความน่าจะเป็นตามเหตุการณ์ที่ได้กำหนดมา และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด

4.2 ระบบการวัดและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด

ระบบการทดลองประกอบด้วย เครื่องส่ง เครื่องรับ และกระบวนการของสัญญาณ โดยสัญญาณที่ใช้ในการทดลองคือ สัญญาณมอดูเลตแบบ ASK FSK และ BPSK ซึ่งมีค่าอัตราเร็วบิต 700 bps 2 kbps และ 50 ksps ตามลำดับ และได้ทำการมอดูเลตที่ความถี่ 433.92 MHz สำหรับ ASK และ FSK กำลังของสัญญาณส่งมีค่า -16 dBm ของ ASK และ -15 dBm ของ FSK ส่วน BPSK ทำการมอดูเลตที่ความถี่ 2.45 GHz และกำลังของสัญญาณส่งมีค่า -10 dBm

เครื่องรับประกอบด้วย Agilent N9020A MXA signal analyzer ต่อกับสายอากาศภาครับสัญญาณเชิงซ้อนที่รับได้ถูกดีมอดูเลตโดยโปรแกรม Agilent 9600 vector signal analyzer ซึ่งติดตั้งใน Agilent N9020A โดยโปรแกรมได้สัญญาณที่รับในรูปของ

$$y(t) = i(t) + jq(t) \tag{4.1}$$

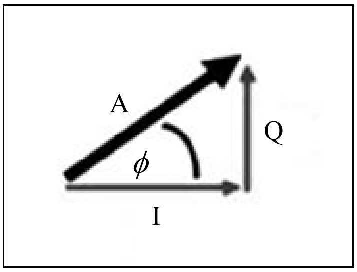
สัญญาณที่รับได้เป็นเวลา 2 วินาที และแซมเปิลที่ 600 ksps สำหรับสัญญาณ ASK และ FSK และที่ 320 ksps สำหรับสัญญาณ BPSK เนื่องจากเหตุนี้ ทำให้จำนวนของแซมเปิล คือ 1200000 แซมเปิลต่อการวัดหนึ่งครั้ง สำหรับสัญญาณ ASK และ FSK และ 640000 แซมเปิลต่อการวัดหนึ่งครั้ง สำหรับสัญญาณ BPSK โดยสัญญาณแซมเปิลที่รับได้จะถูกเซฟลงในหน่วยความจำของ Agilent N9020A และสัญญาณจะถูกนำไปดำเนินการวิเคราะห์ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเครื่องส่งสัญญาณ ผ่านช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ทั้งห้องปิดภายในอาคาร (Indoor) และกลางแจ้ง (Outdoor) เช่น ของลานจอดรถยนต์และลานจอดจักรยานยนต์มายังเครื่องรับสัญญาณ และ

สภาพแวดล้อมบนท้องถนน จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการวัดนี้มาทำการวิเคราะห์ผล ด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการแสดงค่าของการวัดออกเป็นกราฟฮิสโตแกรมและกราฟความน่าจะเป็น เพื่อให้แสดงข้อมูลที่เข้าใจง่ายของช่องสัญญาณที่แสดงขนาดของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$A(t) = \sqrt{i(t)^2 + q(t)^2} \qquad (4.2)$$

$$\phi = tan^{-1} \frac{q(t)}{i(t)} \qquad (4.3)$$

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 4.1 IQ Modulation

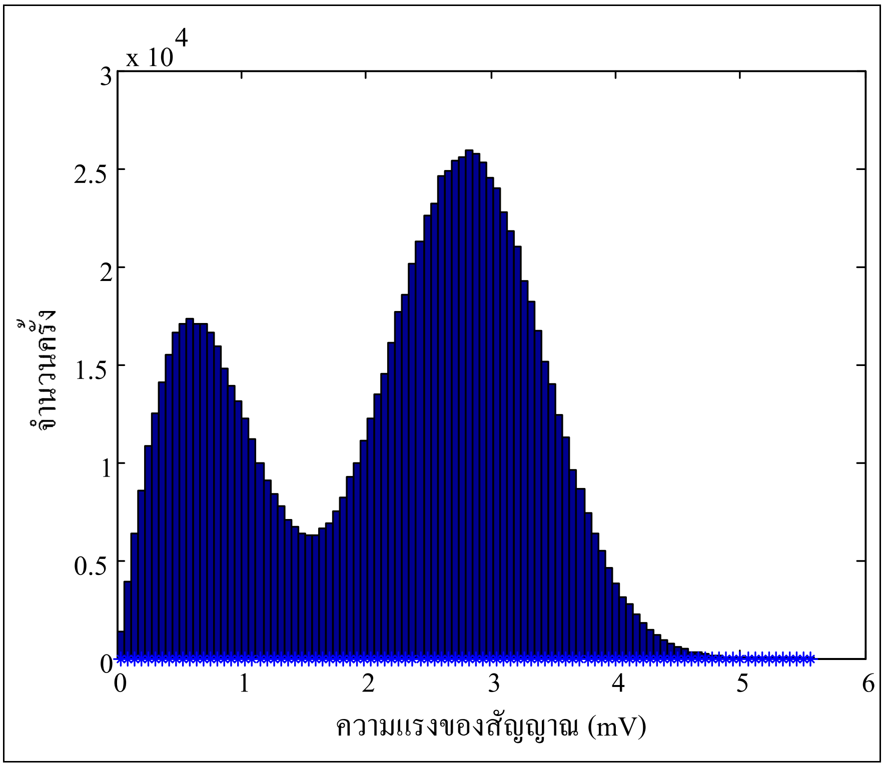
ซึ่งการวัดหาขนาดและเฟสของสัญญาณ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยที่ A แทนขนาด และ ϕ แทนมุมเฟสของสัญญาณ IQ Modulation

4.3 การวิเคราะห์ผลแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมทั่วไป

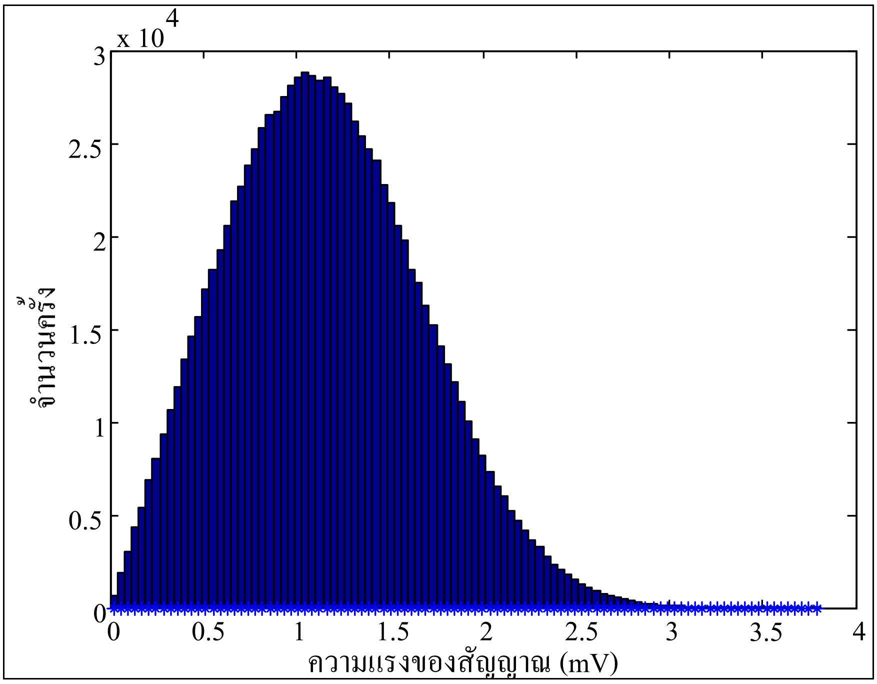
4.3.1 สภาพแวดล้อมของห้องปิดภายในอาคาร

ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมของห้องปิดภายในอาคารดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยมีการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.2 จะเป็นกราฟฮิสโตแกรมของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK ซึ่ง

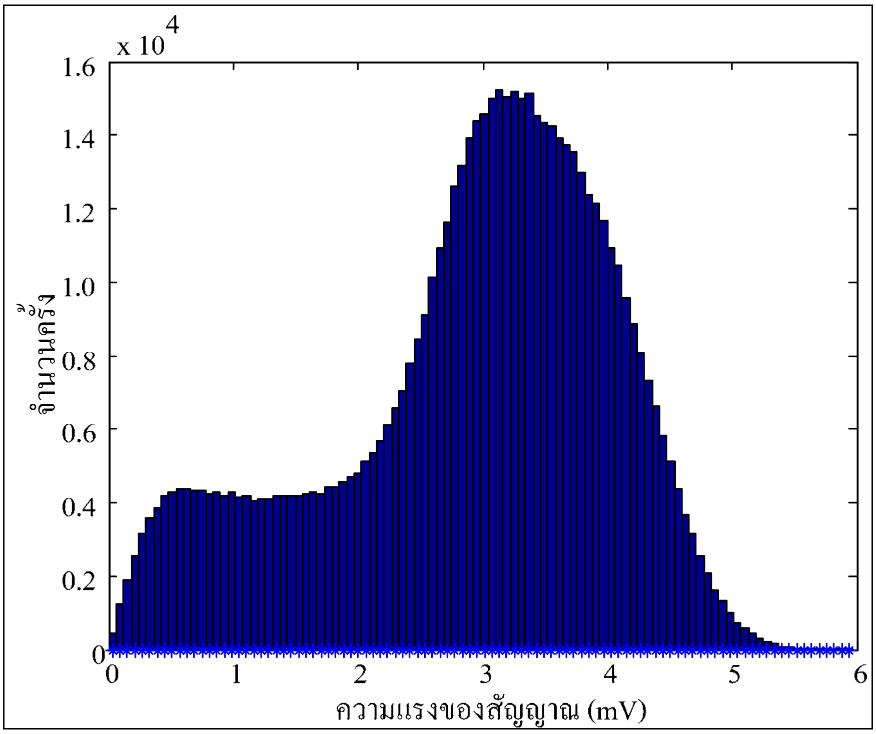
จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 5.563 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 2.852 mV ต่อมาก็เปลี่ยนสัญญาณที่ส่งเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK โดยจากกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.788 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 1.067 mV และสัญญาณดิจิตอลแบบสุดท้ายที่ใช้ในการส่งคือ สัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK โดยจากกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 5.937 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 3.164 mV



รูปที่ 4.2 กราฟฮิสโตแกรมในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

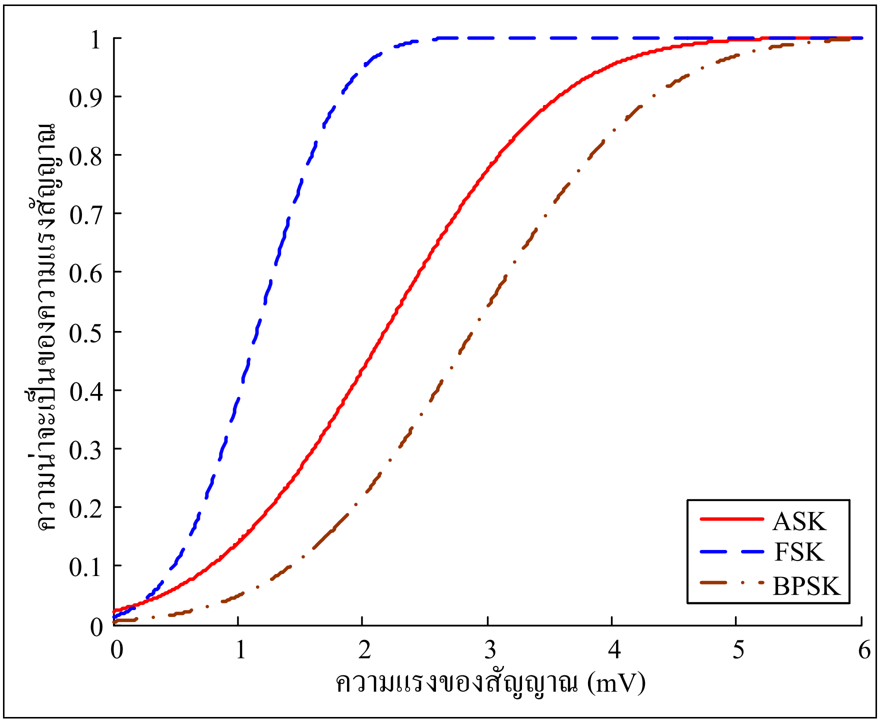


รูปที่ 4.3 กราฟฮิสโตแกรมในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK

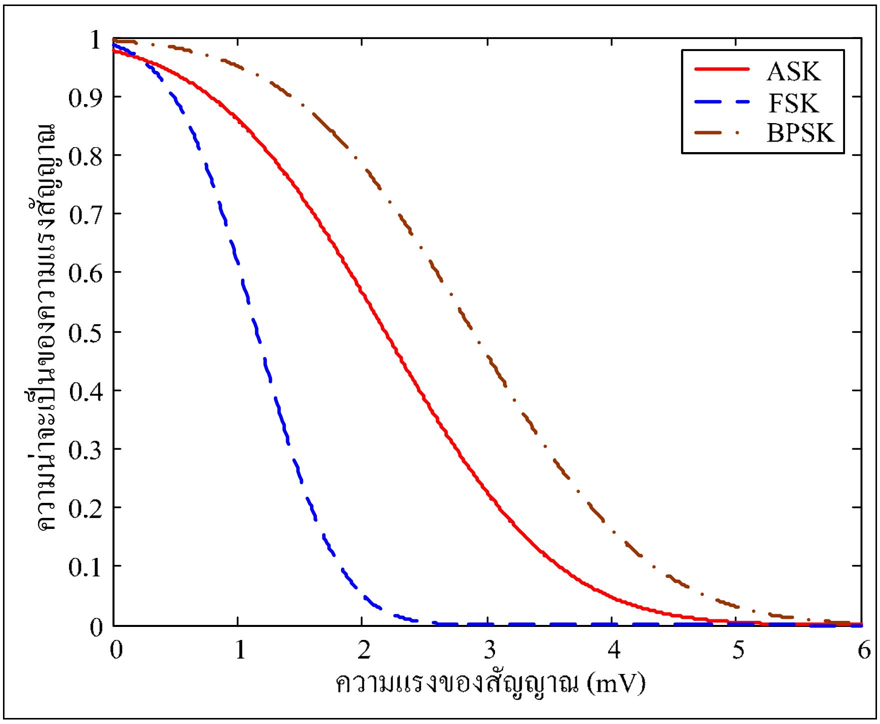


รูปที่ 4.4 กราฟฮิสโตแกรมในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK

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 โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK FSK และ BPSK มีค่าเท่ากับ 0.8 mV 0.5 mV และ 1.4 mV ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอล ASK FSK และ BPSK

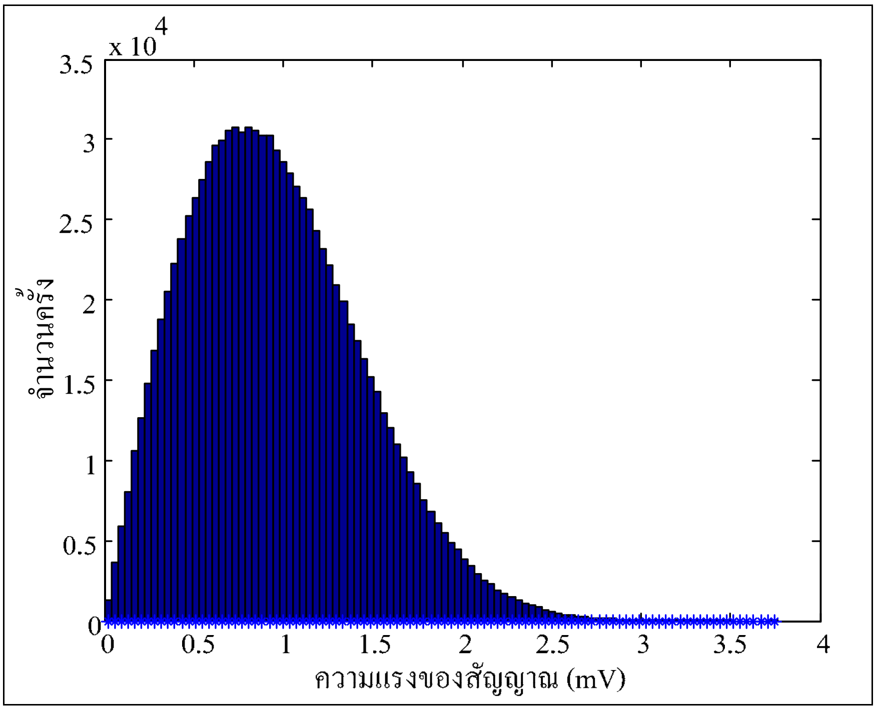


รูปที่ 4.6 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ห้องปิดภายในอาคารของสัญญาณดิจิตอล ASK FSK และ BPSK

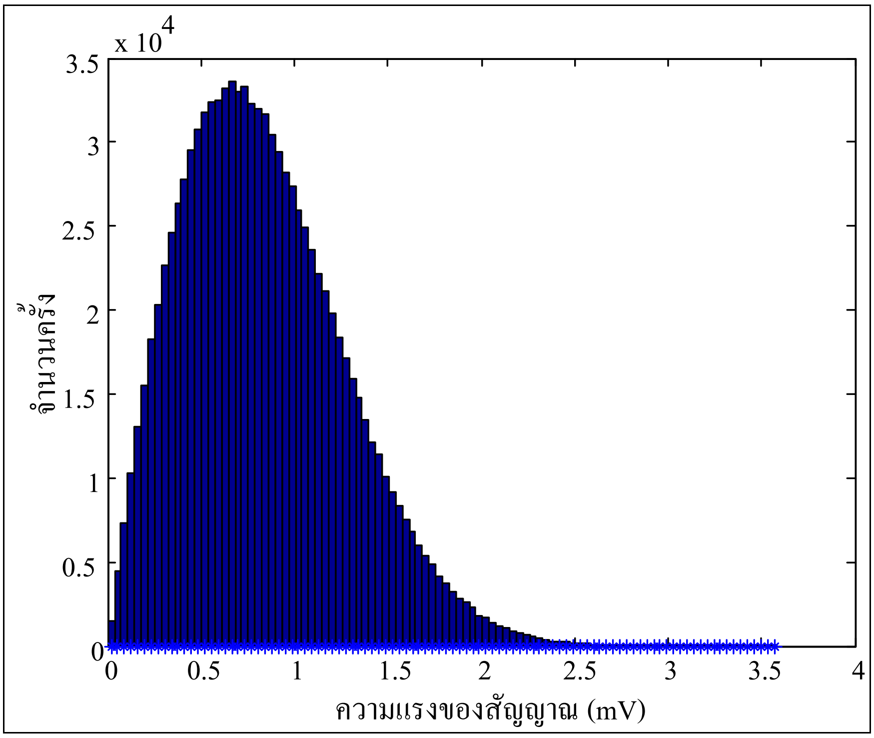
4.3.2 สภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์

- สัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา แต่ได้มีการแยกการทดลองวัดออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีของลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีของลานจอดรถยนต์เต็ม ซึ่งจะทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้เปรียบเทียบกันของทั้ง 2 กรณี และทำการทดลองวัดแยกออกแต่ละสัญญาณดิจิตอล โดยสัญญาณดิจิตอลแบบแรกคือ สัญญาณดิจิตอลแบบ ASK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถยนต์ว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.744 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.828 mV และรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถยนต์เต็ม ซึ่งเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.567 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0. 682 mV

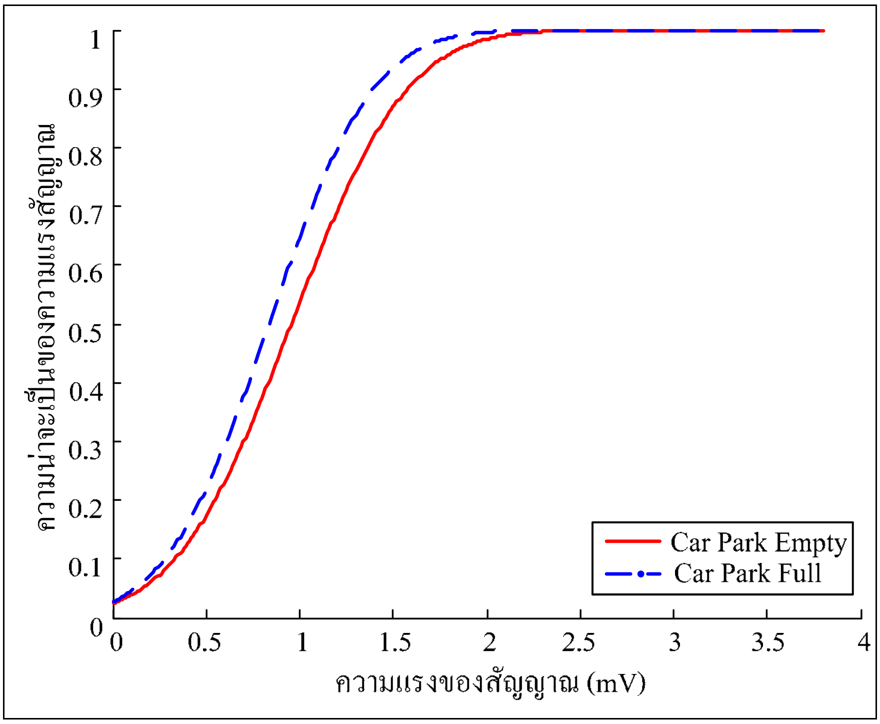


รูปที่ 4.7 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

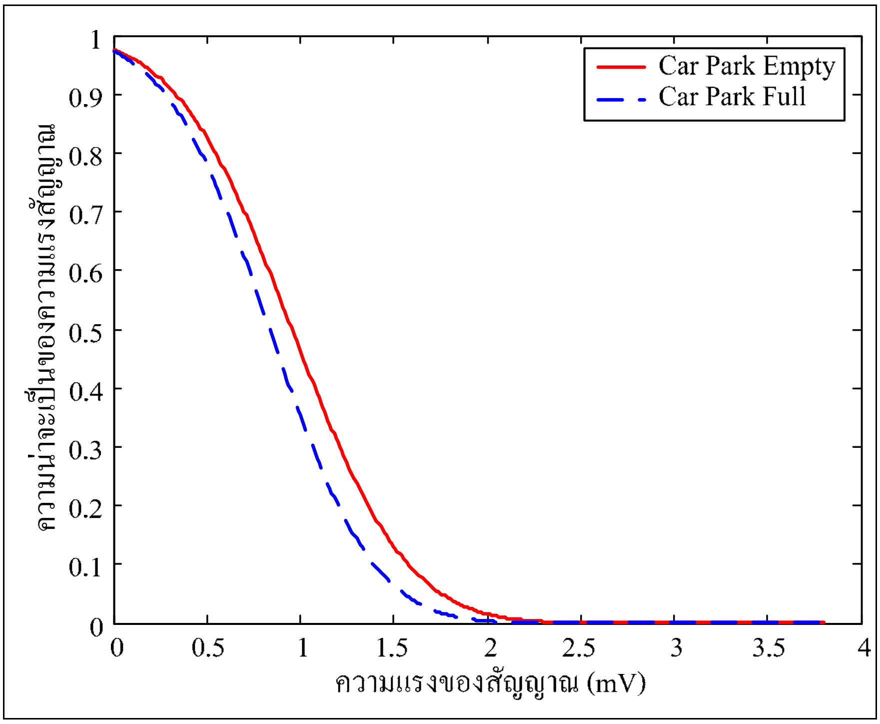


รูปที่ 4.8 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.9 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK มีค่าเท่ากับ 0.4 mV และ 0.3 mV ตามลำดับ



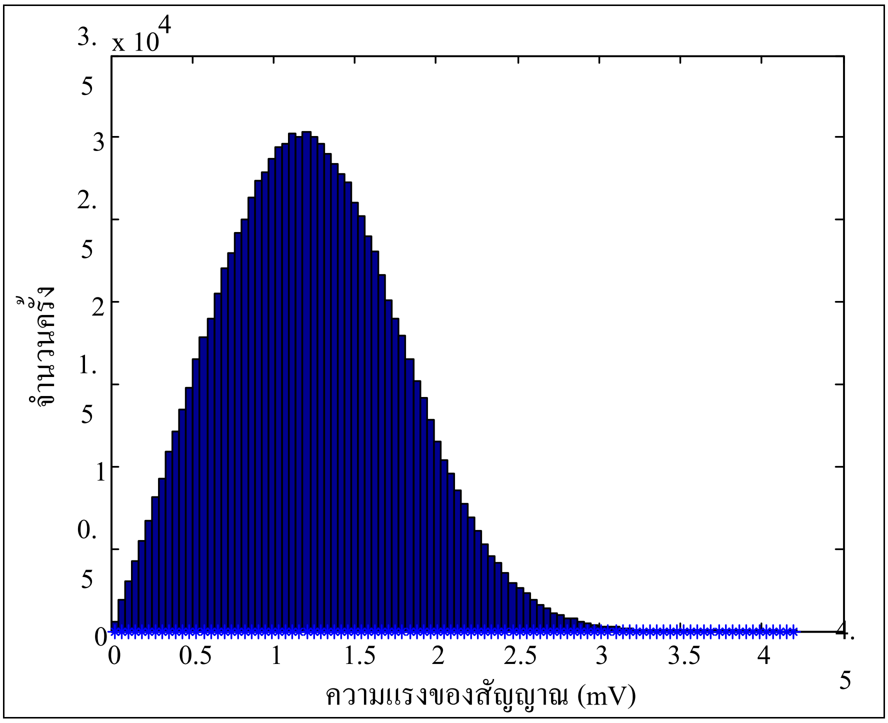
รูปที่ 4.9 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK



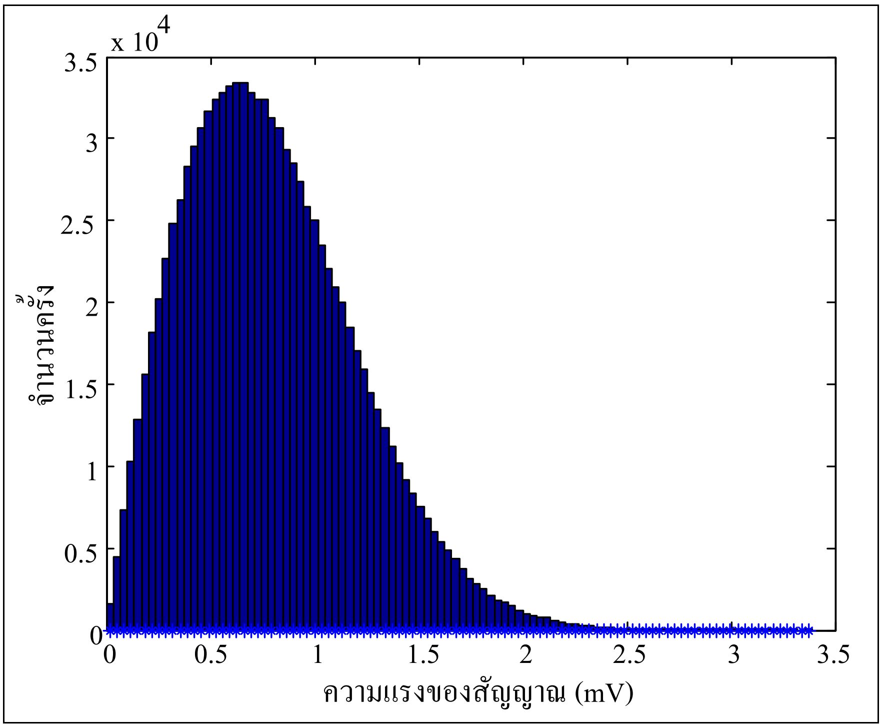
รูปที่ 4.10 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK

- **สัญญาณดิจิตอลแบบ FSK**

ต่อมาก็เปลี่ยนสัญญาณที่ส่งเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK และทำการแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถยนต์ว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 4.197 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 1.224 mV และรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถยนต์เต็ม ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.373 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.664 mV

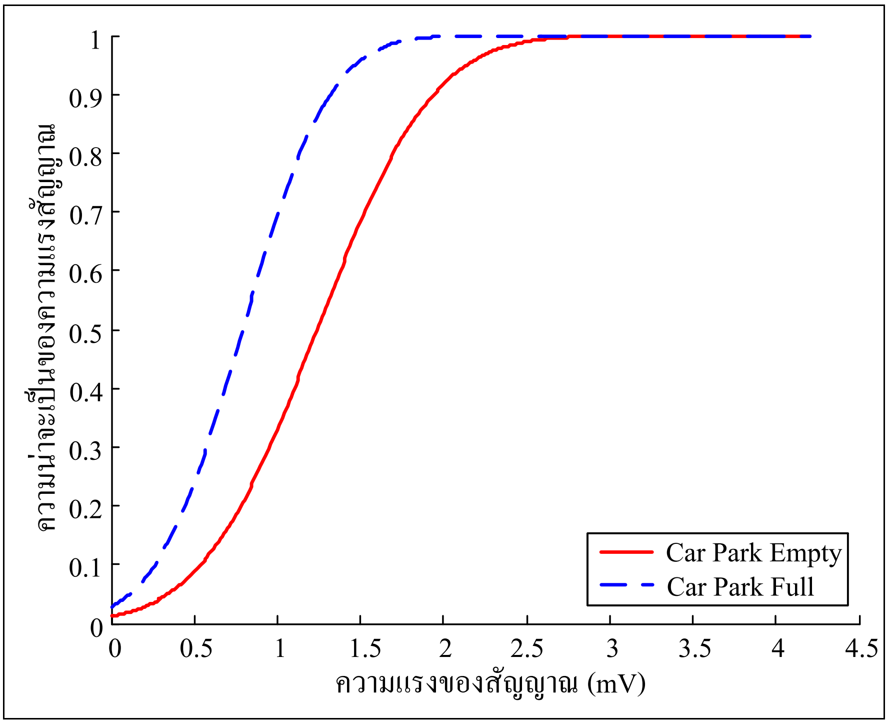


รูปที่ 4.11 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK

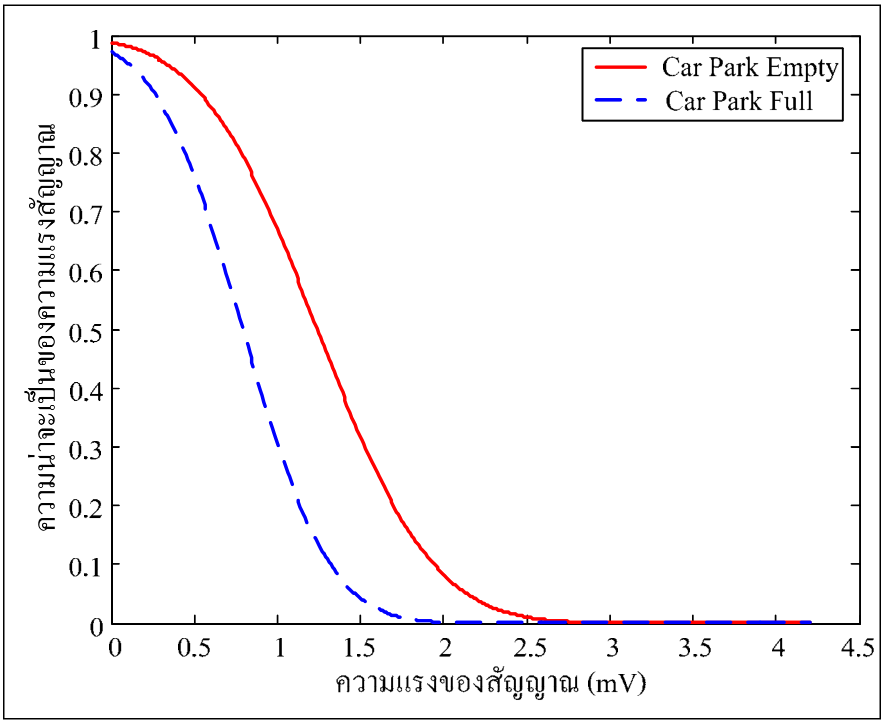


รูปที่ 4.12 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.13 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK มีค่าเท่ากับ 0.5 mV และ 0.3 mV ตามลำดับ



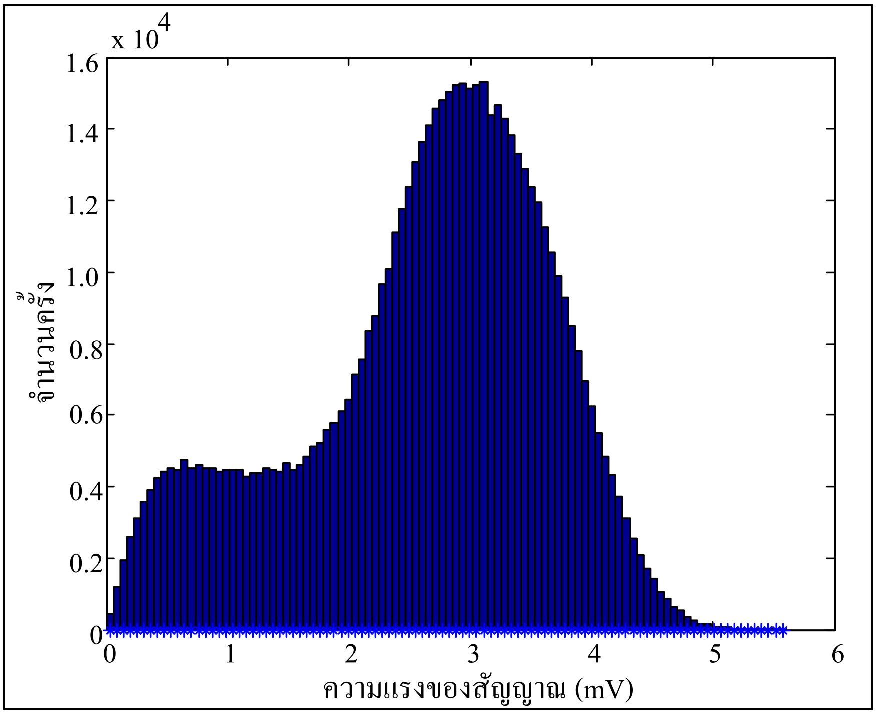
รูปที่ 4.13 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK



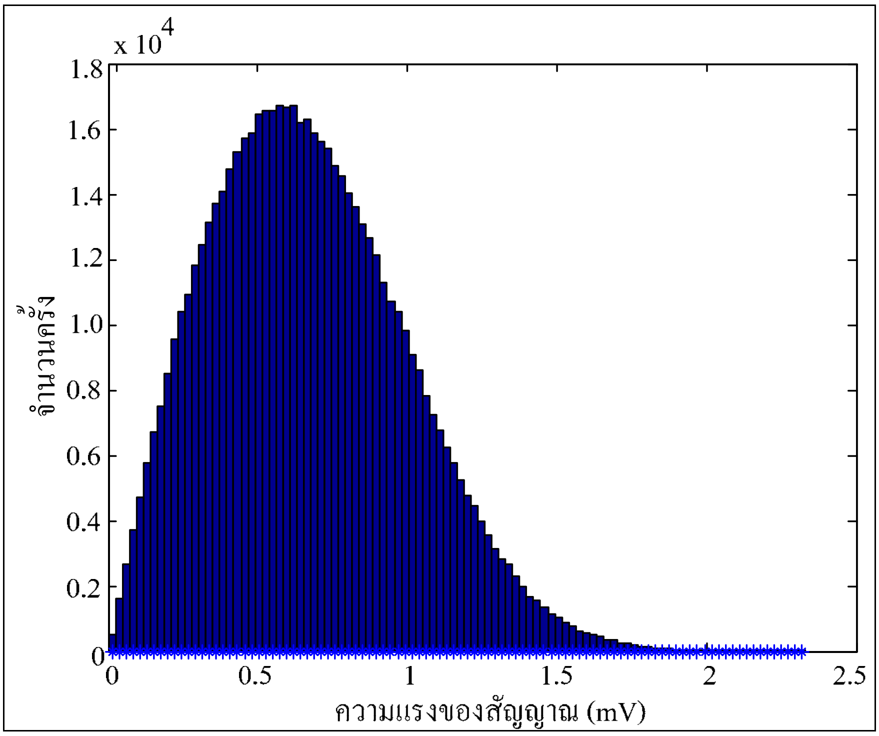
รูปที่ 4.14 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK

- สัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK

สัญญาณดิจิตอลแบบสุดท้ายที่ใช้ในการส่งคือ สัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถยนต์ว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 5.572 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 3.139 mV และรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถยนต์เต็ม ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 2.319 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.607 mV

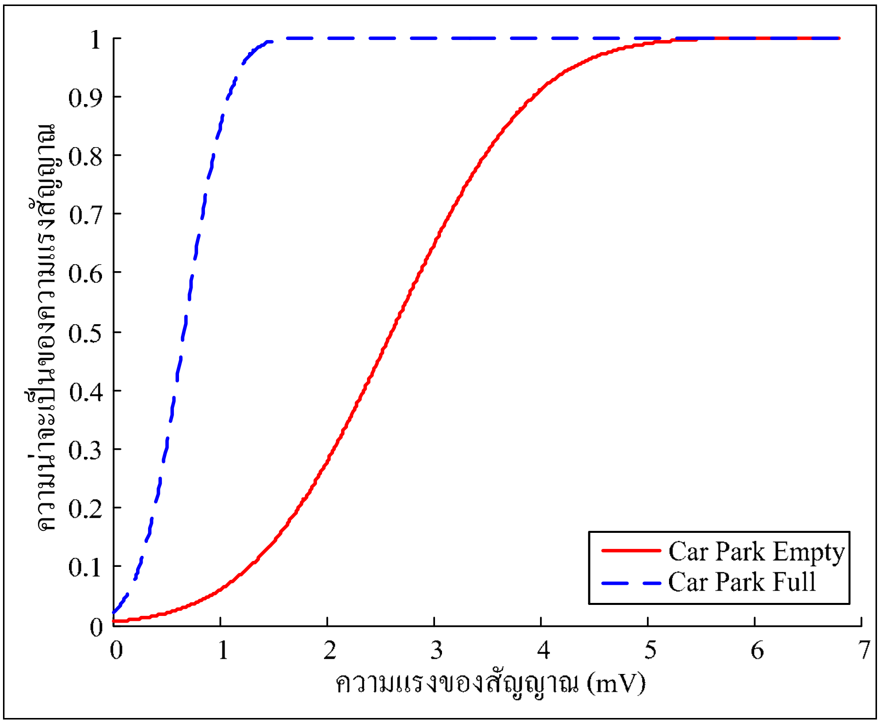


รูปที่ 4.15 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK

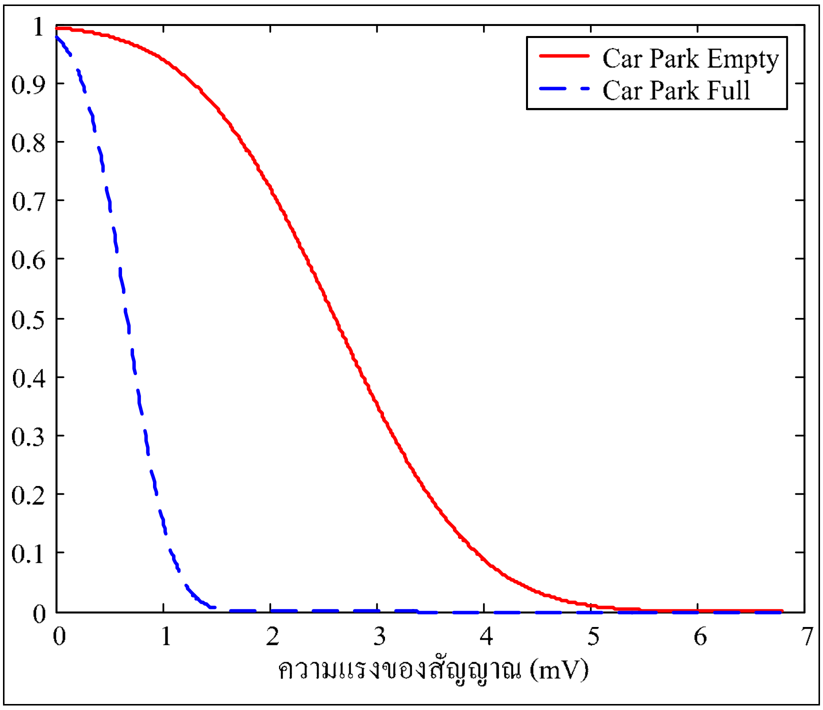


รูปที่ 4.16 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.17 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งทำการพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK มีค่าเท่ากับ 1.3 mV และ 0.2 mV ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK

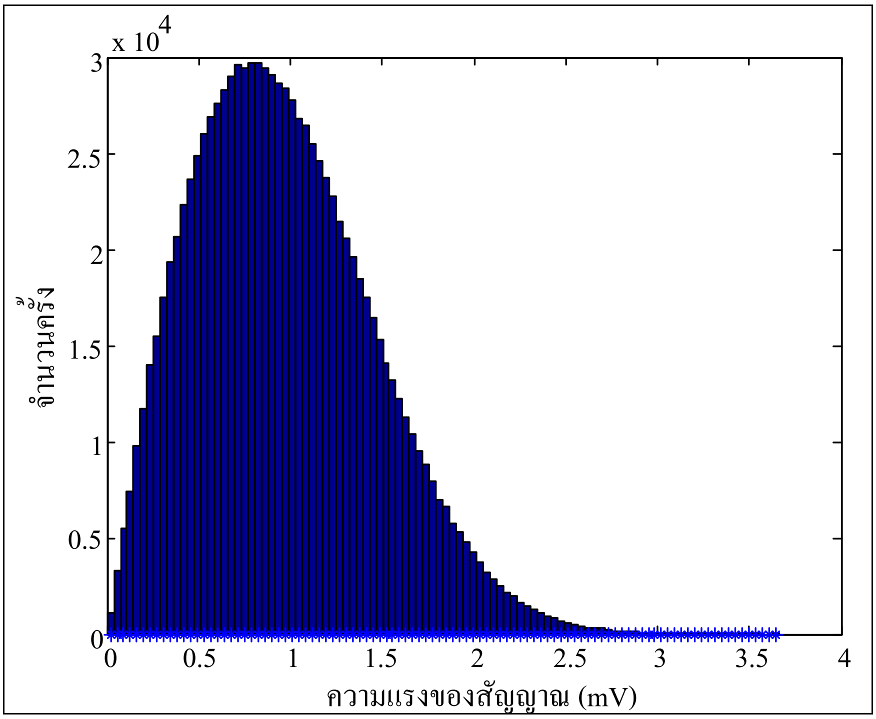


รูปที่ 4.18 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK

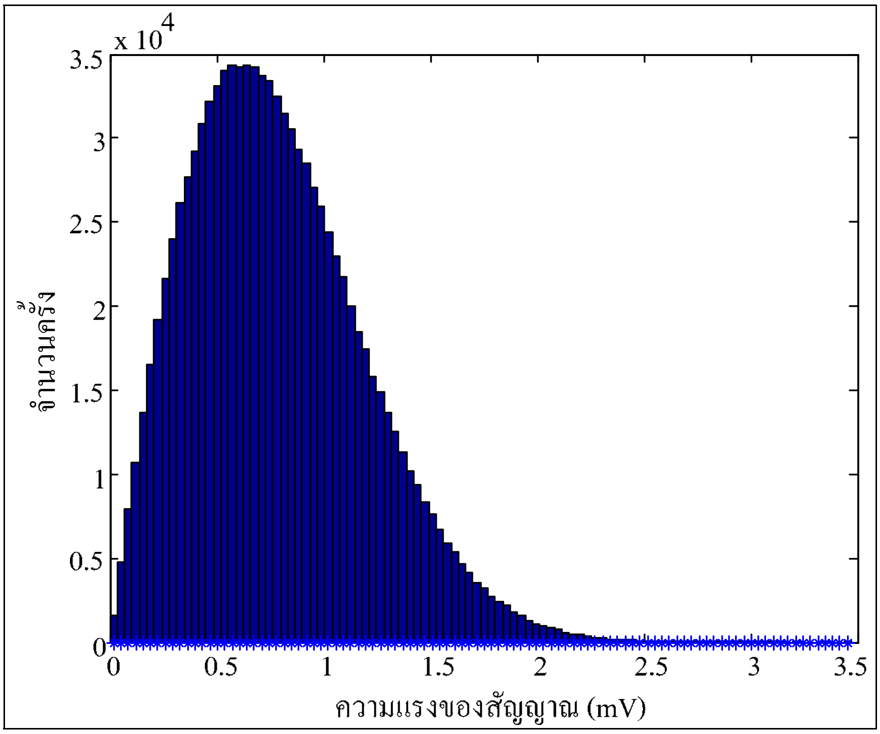
4.3.3 สภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์

- สัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา โดยจะทำการวิเคราะห์แบบเดียวกับสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้เปรียบเทียบกันของทั้ง 2 กรณีเหมือนกัน และทำการทดลองวัดแยกออกแต่ละสัญญาณดิจิตอล โดยสัญญาณดิจิตอลแบบแรกคือ สัญญาณดิจิตอลแบบ ASK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.646 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.806 mV และรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม ซึ่งเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.371 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.645 mV

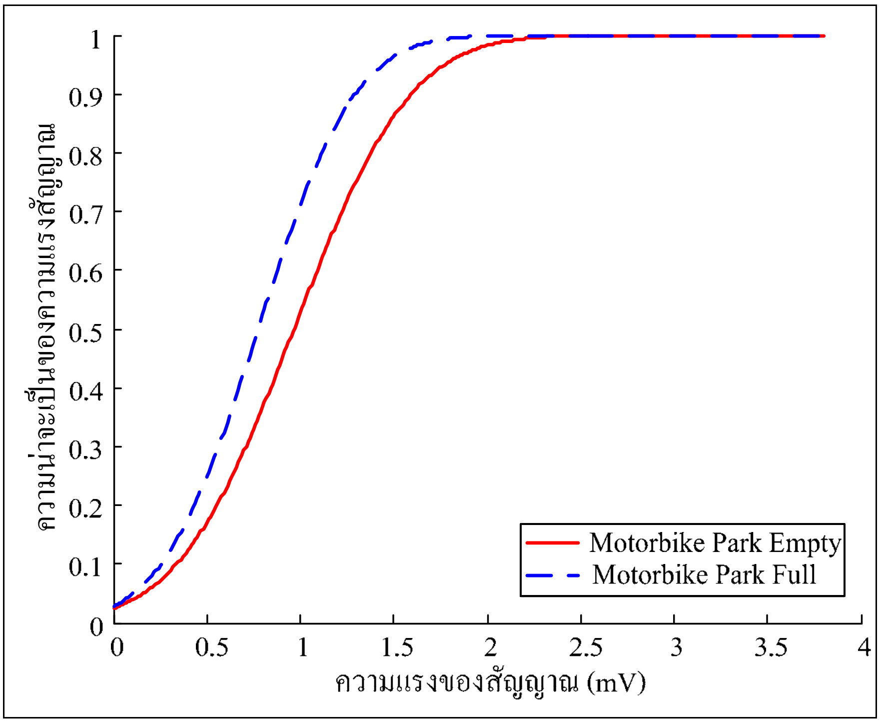


รูปที่ 4.19 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

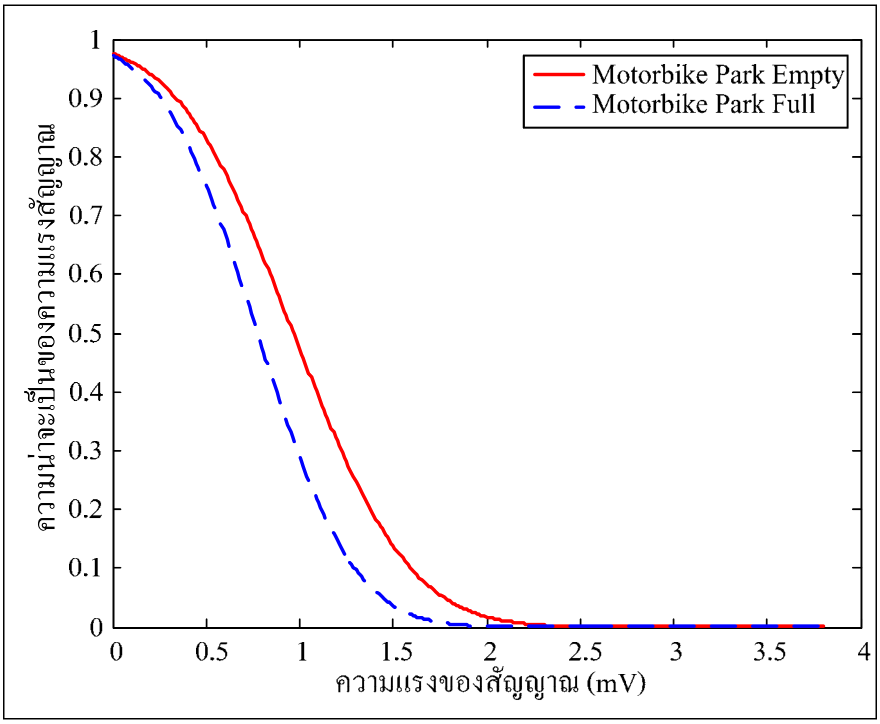


รูปที่ 4.20 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.21 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK มีค่าเท่ากับ 0.4 mV และ 0.2 mV ตามลำดับ



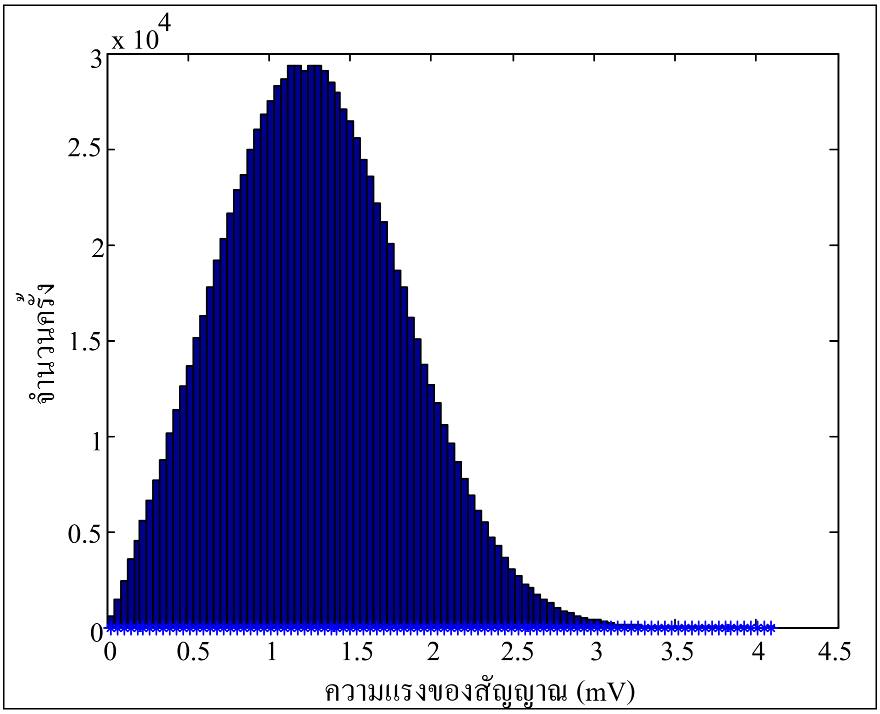
รูปที่ 4.21 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK



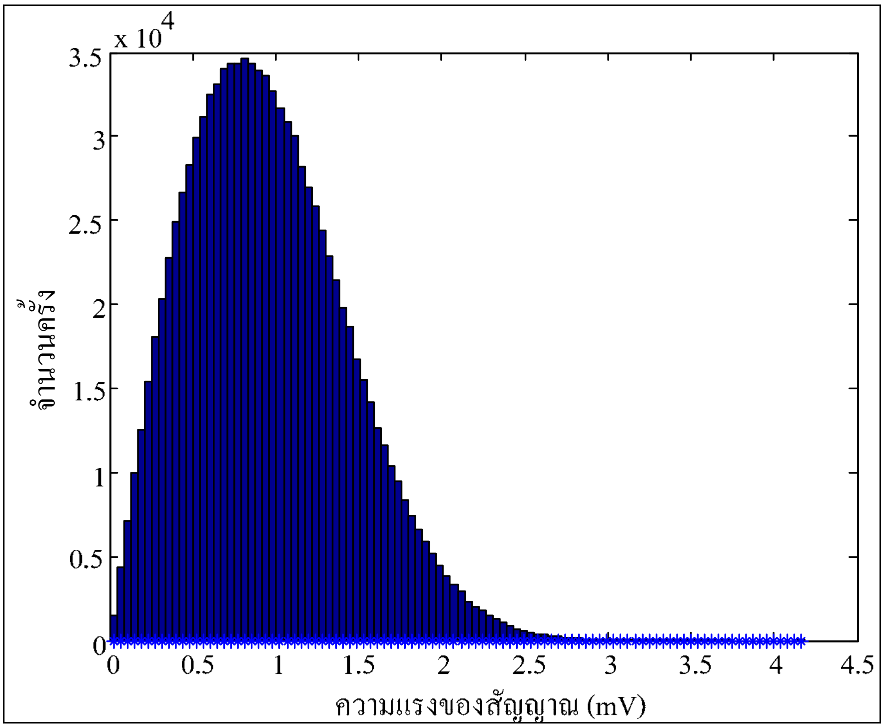
รูปที่ 4.22 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK

- **สัญญาณดิจิตอลแบบ FSK**

ต่อมาก็เปลี่ยนสัญญาณที่ส่งเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 4.093 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 1.194 mV และรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 4.168 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.838 mV

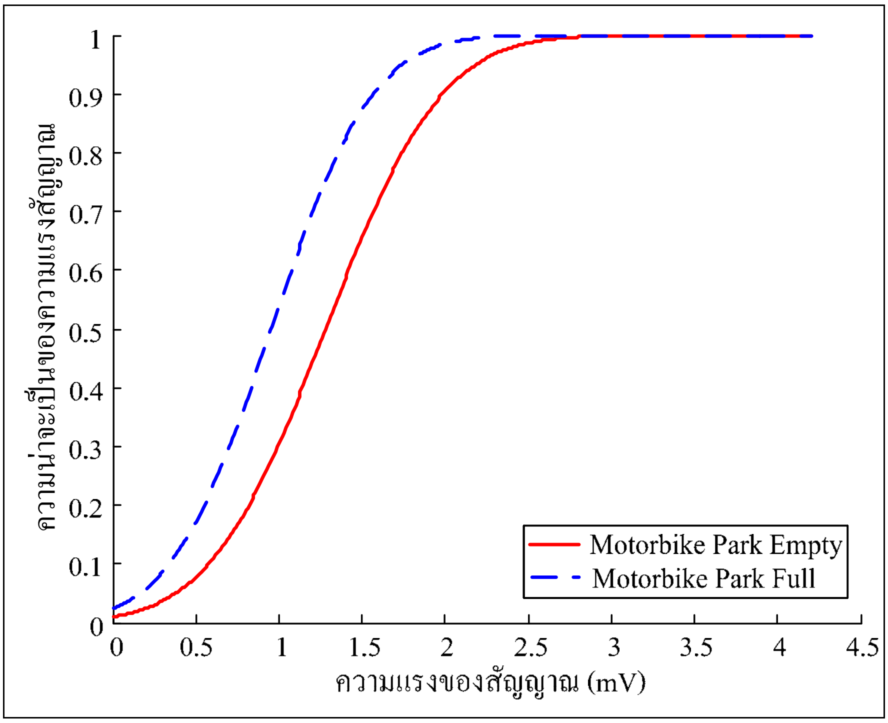


รูปที่ 4.23 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK

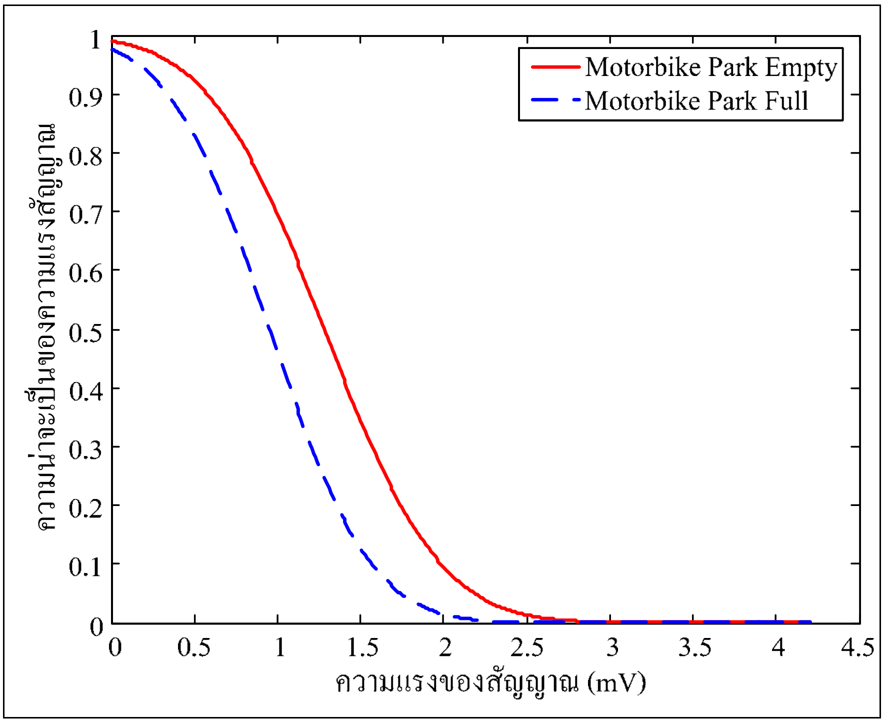


รูปที่ 4.24 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.25 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK มีค่าเท่ากับ 0.6 mV และ 0.3 mV ตามลำดับ



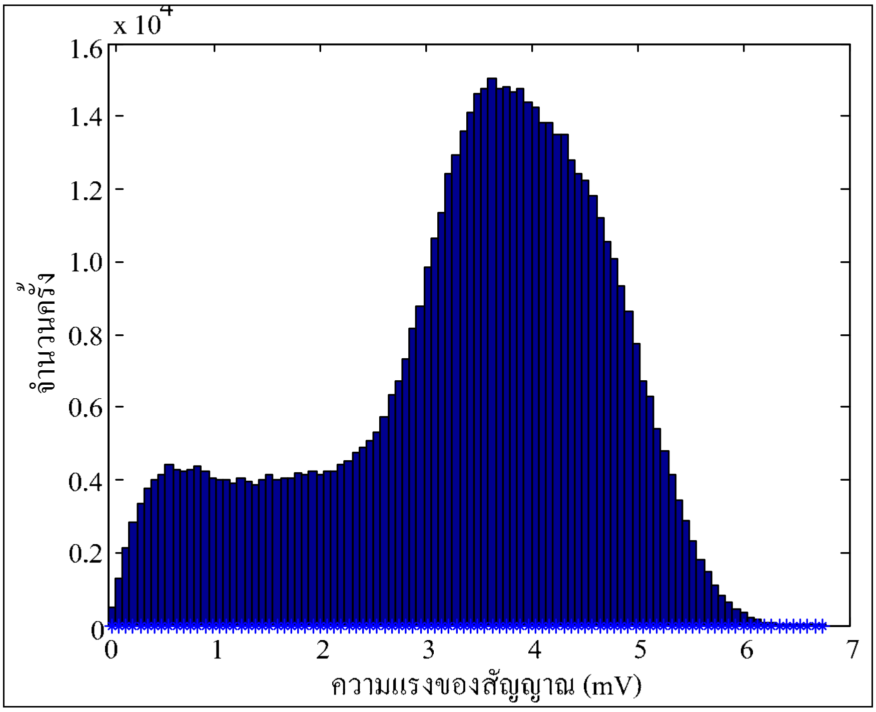
รูปที่ 4.25 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK



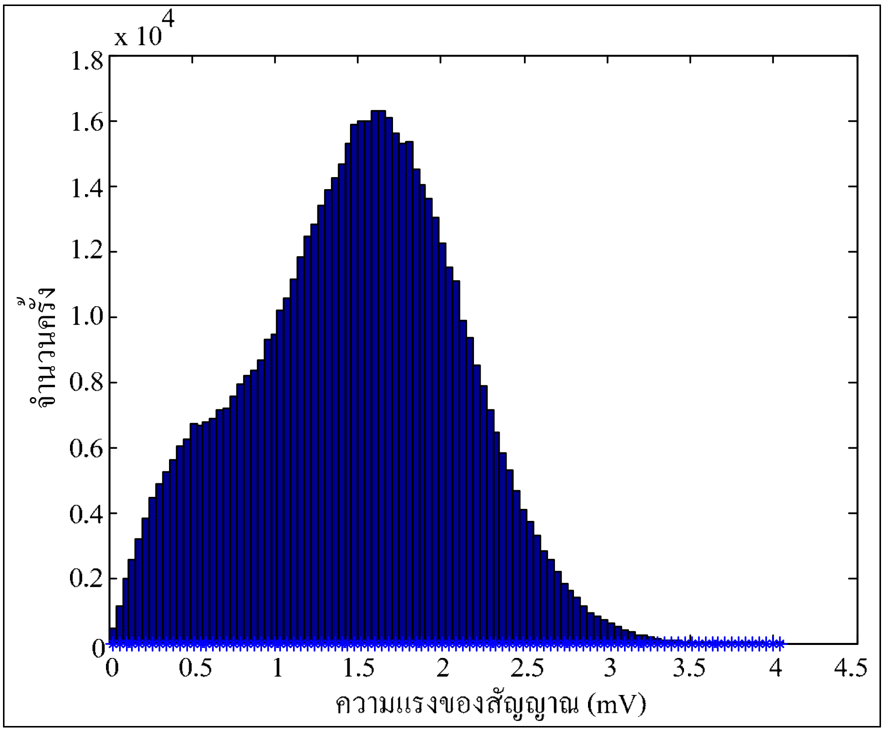
รูปที่ 4.26 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK

- สัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK

สัญญาณดิจิตอลแบบสุดท้ายที่ใช้ในการส่งคือ สัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 6.748 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 3.664 mV และรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม ซึ่งเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 4.035 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 1.624 mV

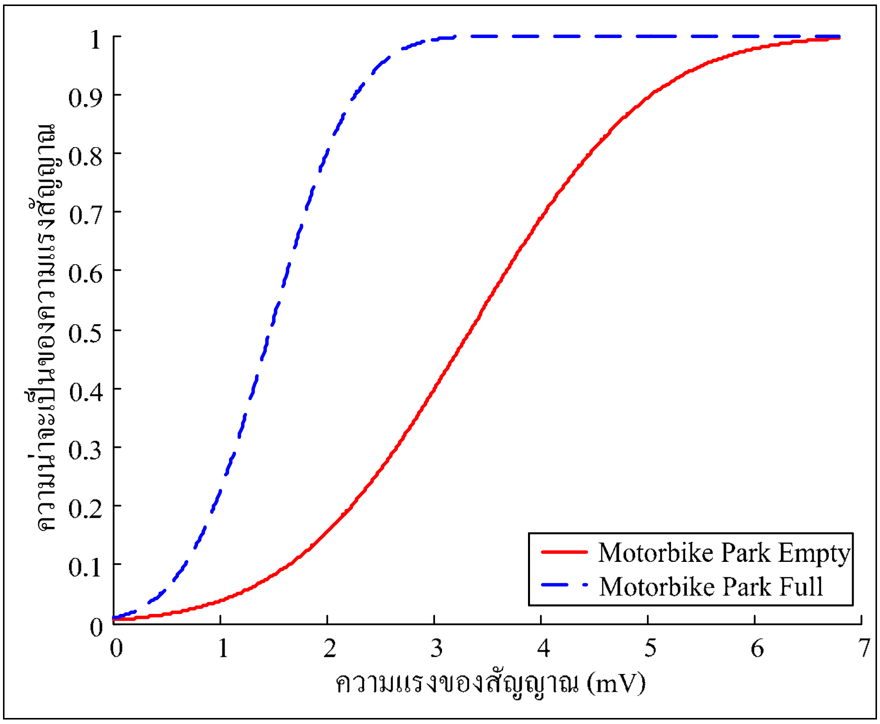


รูปที่ 4.27 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK

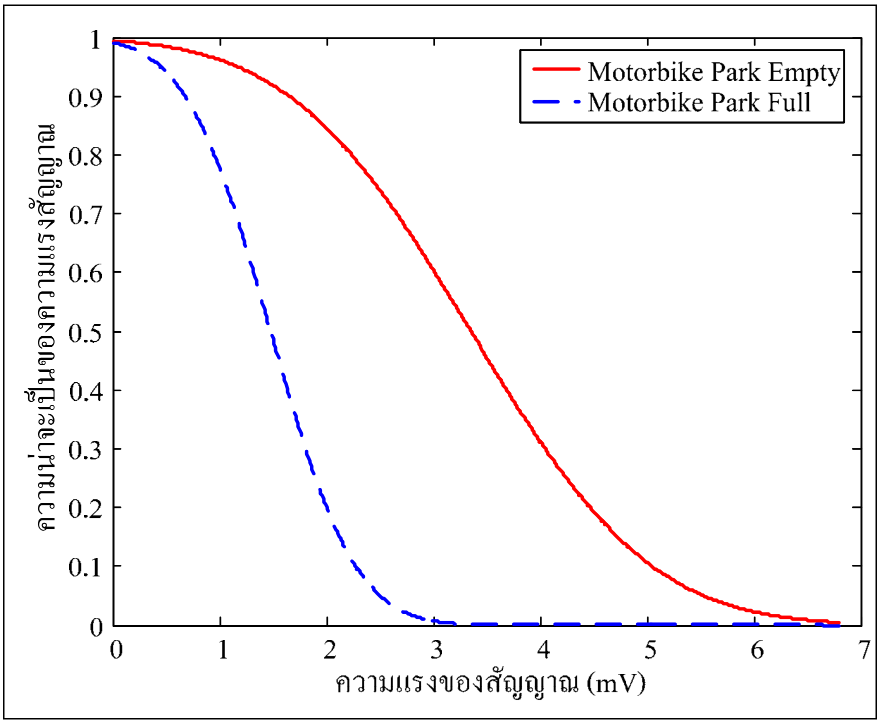


รูปที่ 4.28 กราฟฮิสโตแกรมกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.29 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง และกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มของสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK มีค่าเท่ากับ 1.6 mV และ 0.7 mV ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK

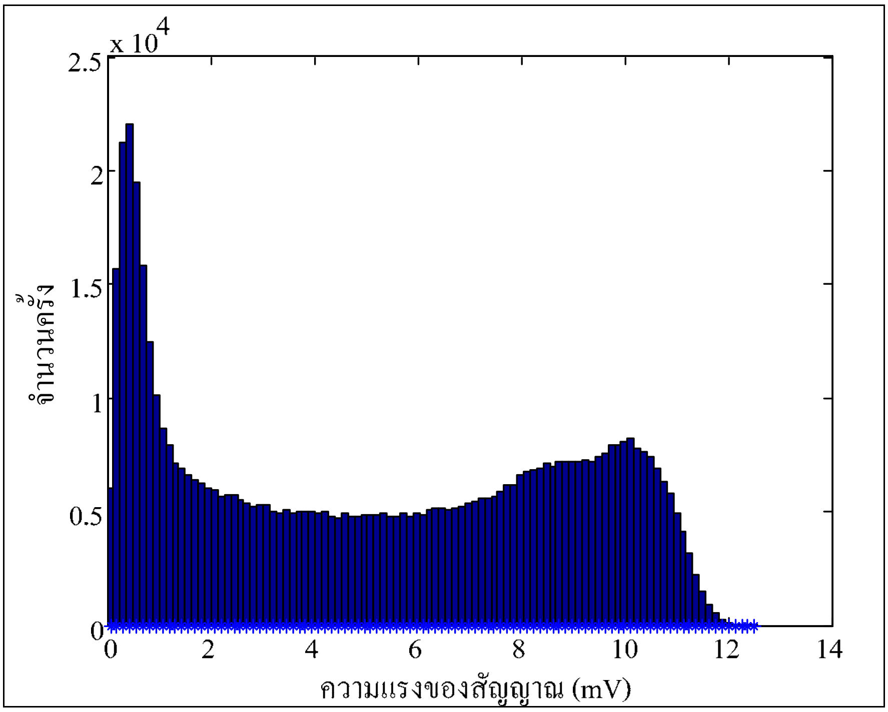


รูปที่ 4.30 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK

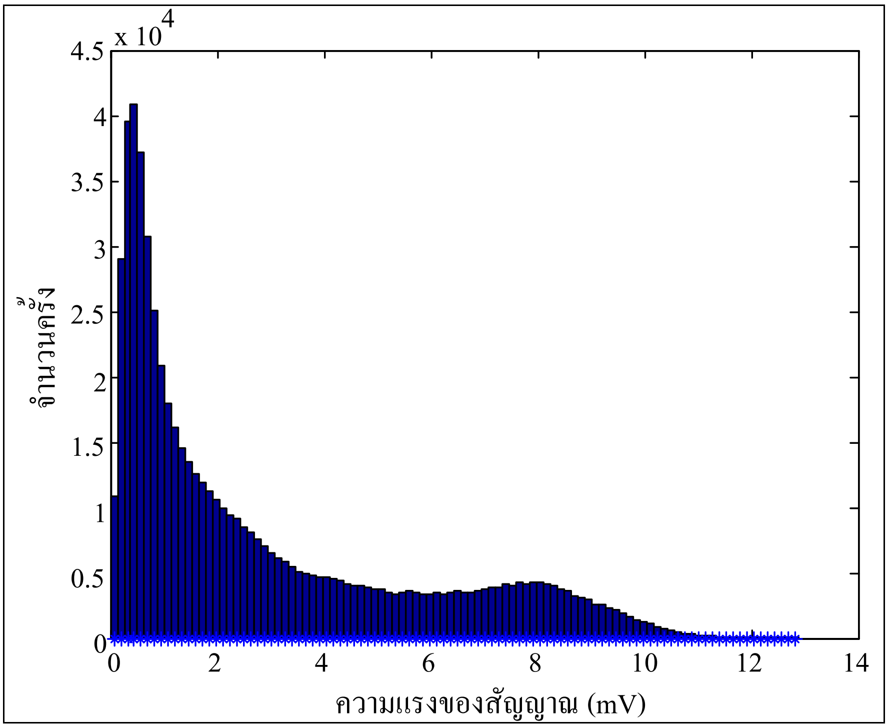
4.4 การวิเคราะห์ผลแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน

- สัญญาณดิจิตอลแบบ ASK

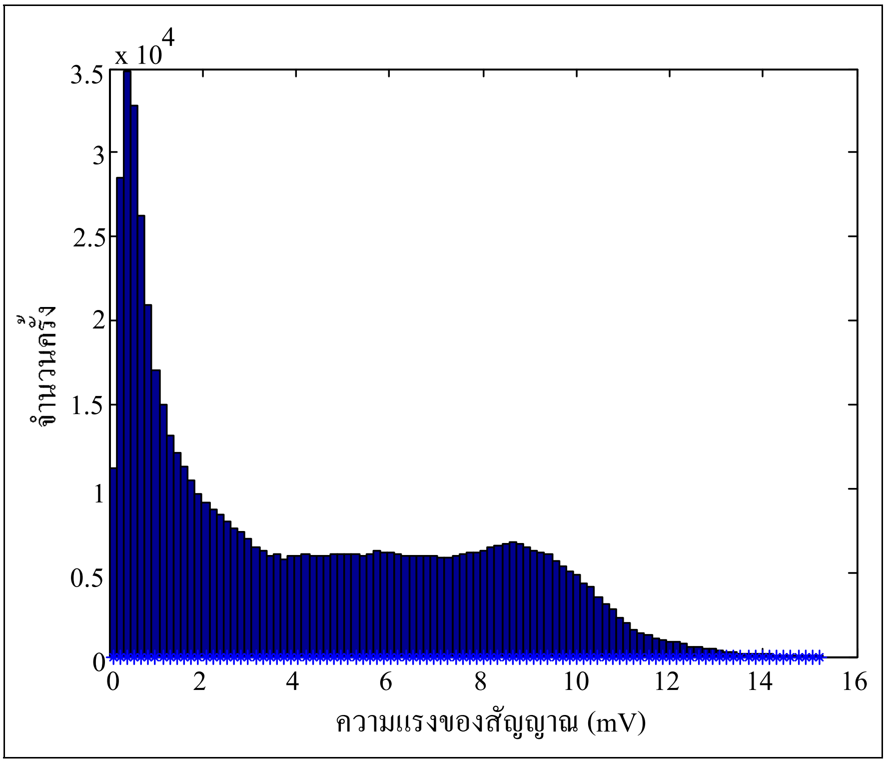
ได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ที่ข้างถนนดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมา แต่ได้มีการแยกการทดลองวัดออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีถนนว่าง กรณีรถวิ่งผ่าน และกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้เปรียบเทียบกัน และทำการทดลองวัดแยกออกแต่ละสัญญาณดิจิตอล โดยสัญญาณดิจิตอลแบบแรกคือ สัญญาณดิจิตอลแบบ ASK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.31 จะเป็นกราฟฮิสโตแกรมของกรณีถนนว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 12.51 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.505 mV รูปที่ 4.32 ซึ่งเป็นกรณีกราฟฮิสโตแกรมของกรณีรถวิ่งผ่าน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 8.435 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.516 mV และรูปที่ 4.33 ซึ่งเป็นกรณีกราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 15.21 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.460 mV



รูปที่ 4.31 กราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่างของสัญญาณดิจิตอล ASK

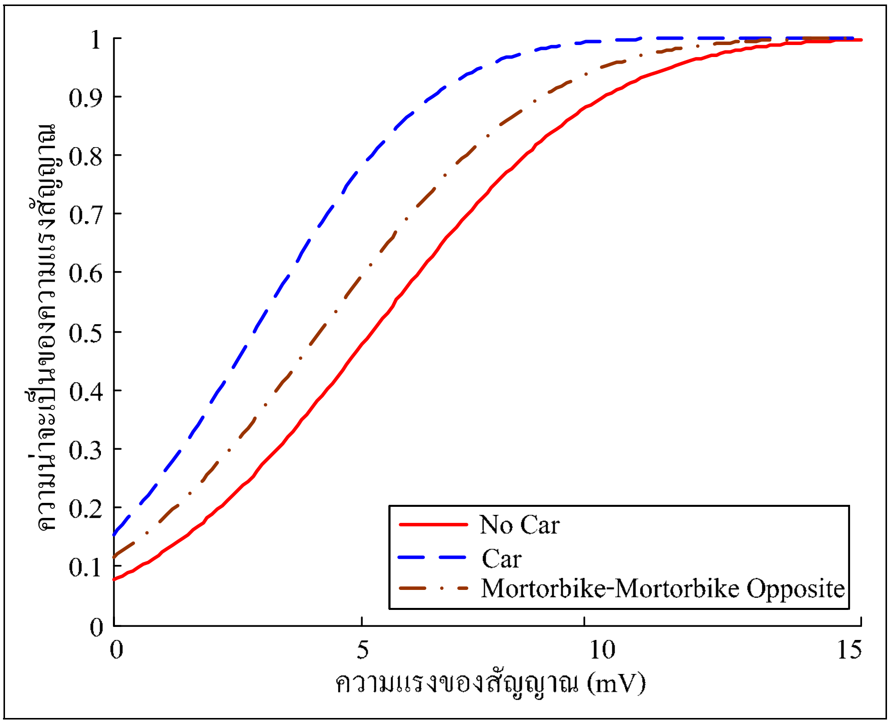


รูปที่ 4.32 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่านของสัญญาณดิจิตอล ASK

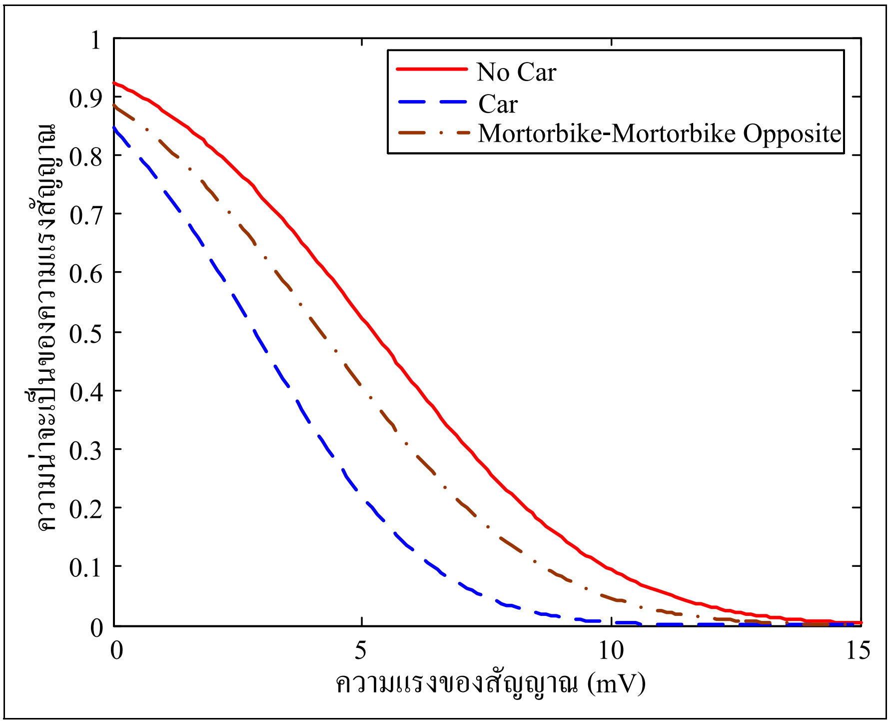


รูปที่ 4.33 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล ASK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.34 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งจากความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 80% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงของสัญญาณของกรณีถนนว่าง กรณีรถวิ่งผ่าน และกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 2.2 mV 0.5 mV 1.3 mV ของตามลำดับ



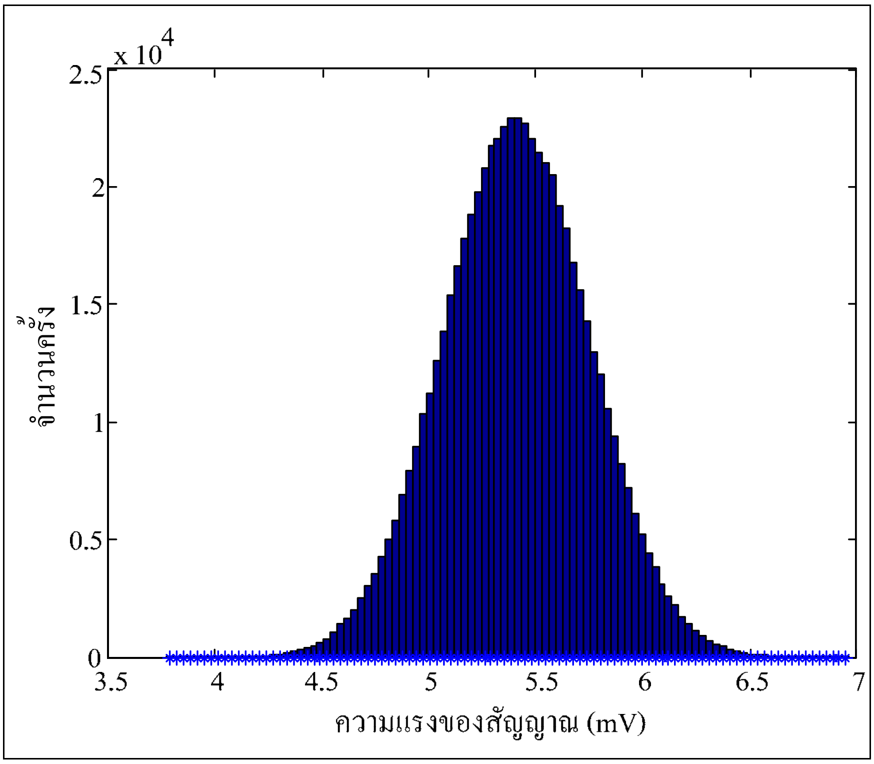
รูปที่ 4.34 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล ASK



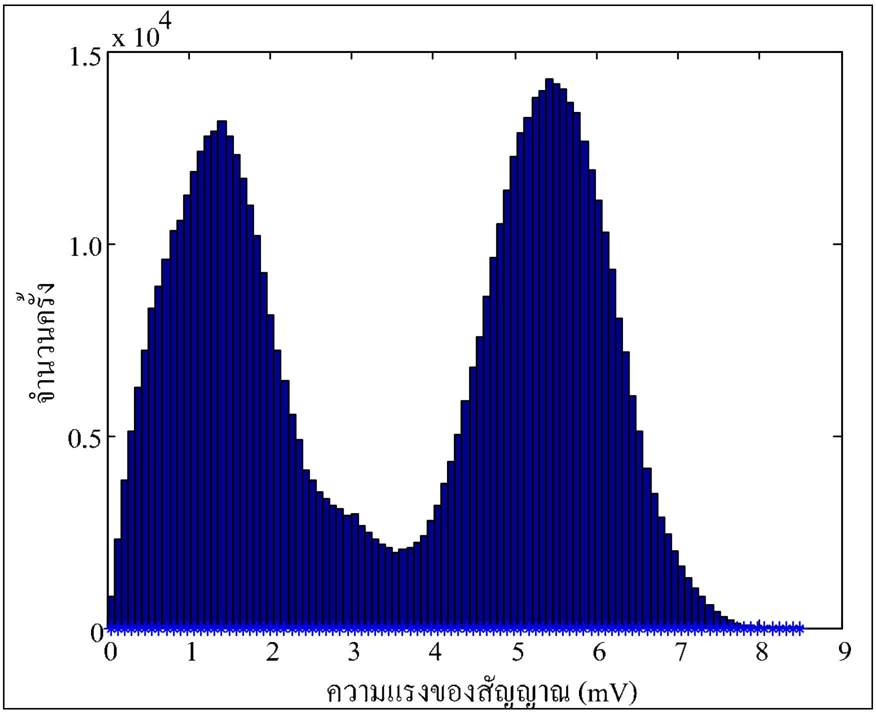
รูปที่ 4.35 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล ASK

- สัญญาณดิจิตอลแบบ FSK

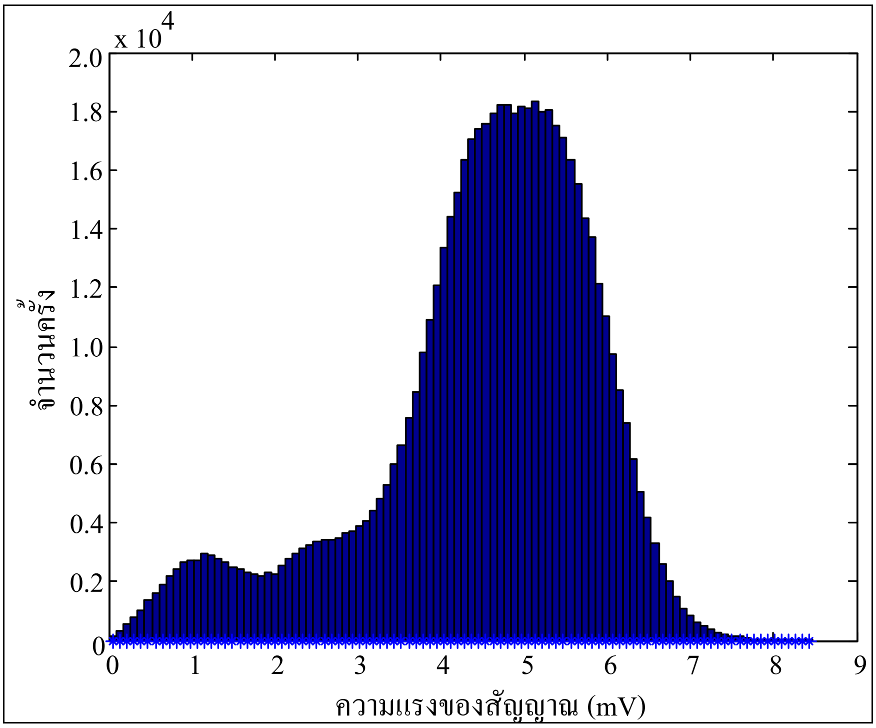
ต่อมาก็เปลี่ยนสัญญาณที่ส่งเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.36 จะเป็นกราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 3.789 ถึง 6.951 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 5.434 mV รูปที่ 4.37 ซึ่งเป็นกรณีกราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่าน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 8.493 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 5.463 mV และรูปที่ 4.38 ซึ่งเป็นกรณีกราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 8.437 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 5.177 mV



รูปที่ 4.36 กราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่างของสัญญาณดิจิตอล FSK

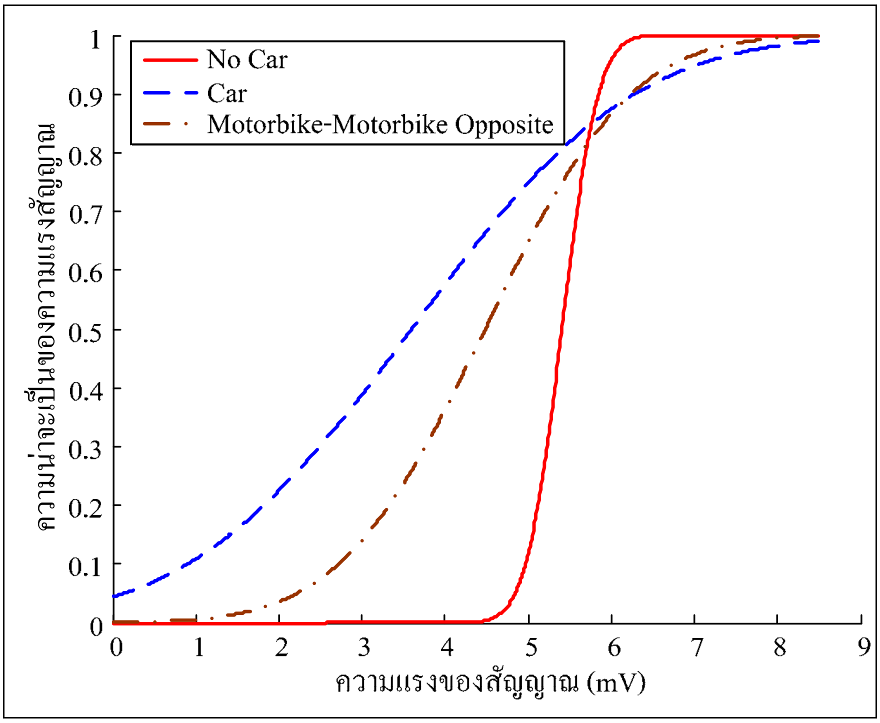


รูปที่ 4.37 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่านของสัญญาณดิจิตอล FSK

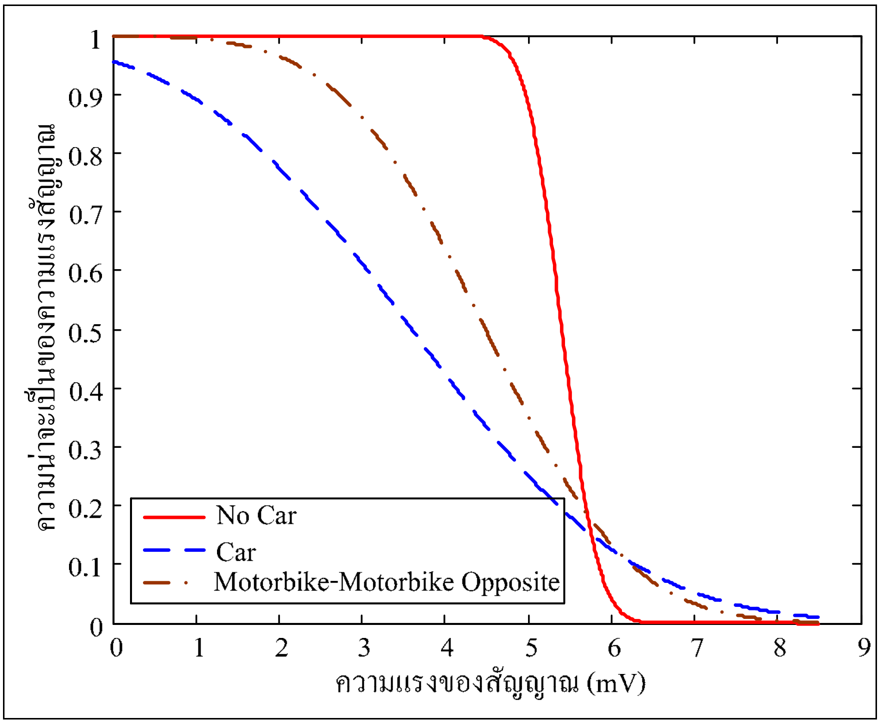


รูปที่ 4.38 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล FSK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.39 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.40 ซึ่งจากความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงของสัญญาณของกรณีถนนว่าง กรณีรถวิ่งผ่าน และกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 4.97 mV 0.90 mV 2.72 mV ตามลำดับ



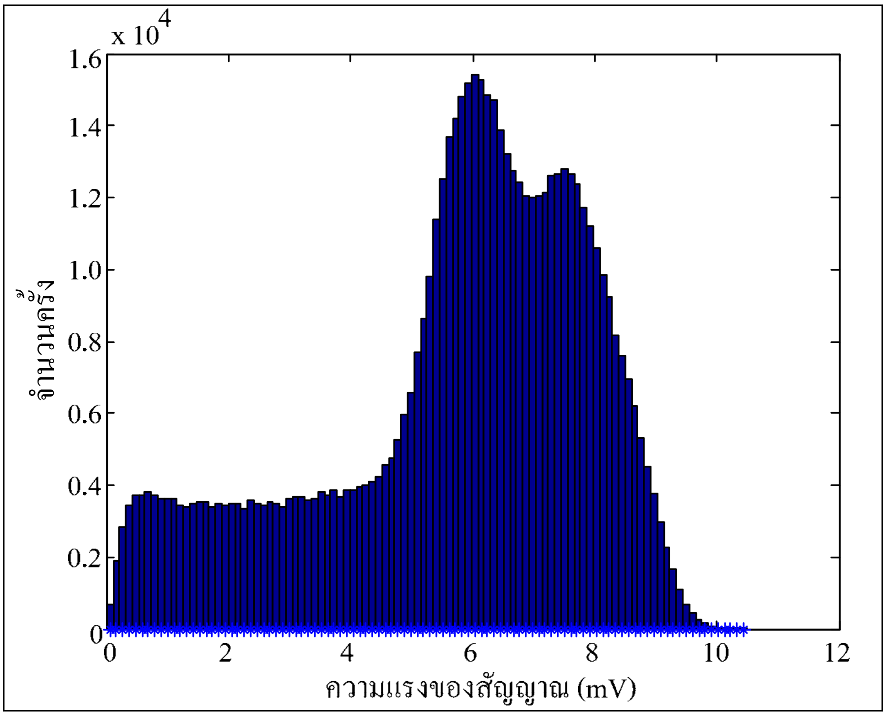
รูปที่ 4.39 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล FSK



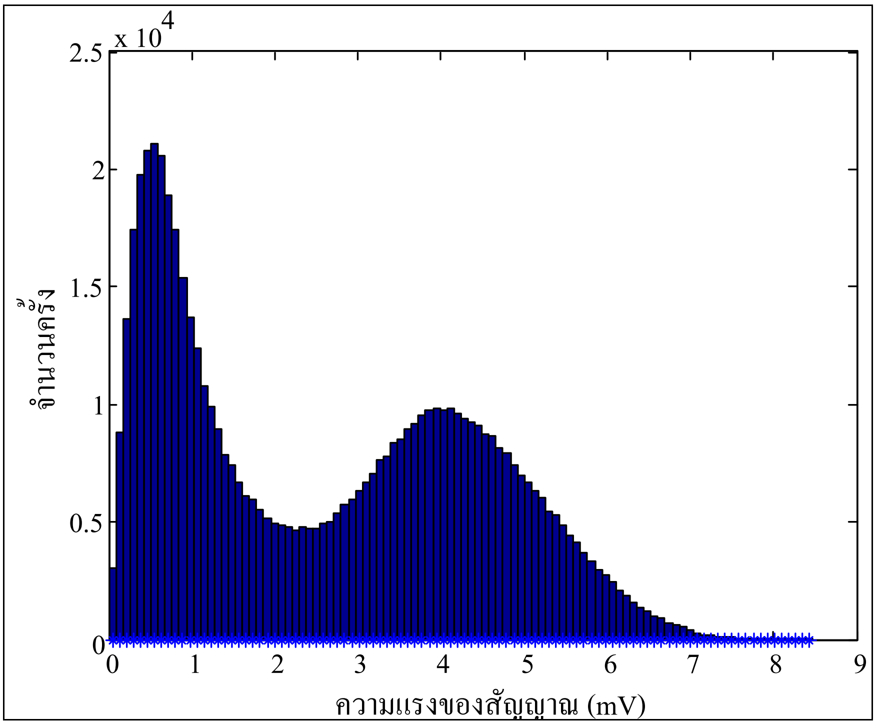
รูปที่ 4.40 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล FSK

- **สัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK**

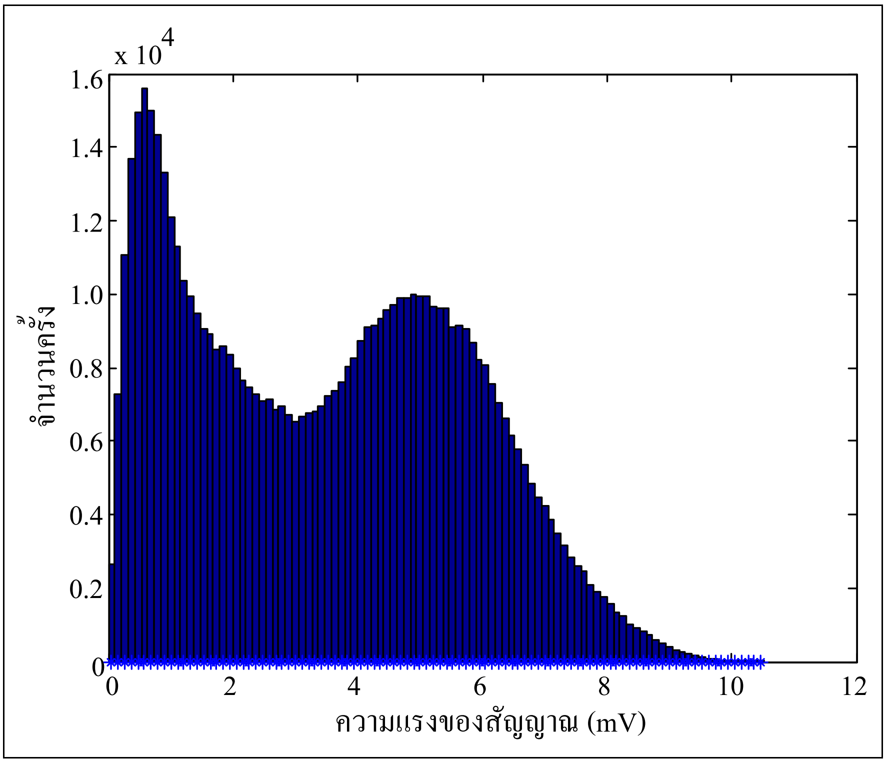
ต่อมาก็เปลี่ยนสัญญาณที่ส่งเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 4.41 จะเป็นกราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง0 ถึง 10.44 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 6.088 mV รูปที่ 4.42 ซึ่งเป็นกรณีกราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่าน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 8.435 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.595 mV และรูปที่ 4.43 ซึ่งเป็นกรณีกราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 10.47 mV โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.633 mV



รูปที่ 4.41 กราฟฮิสโตแกรมกรณีถนนว่างของสัญญาณดิจิตอล BPSK

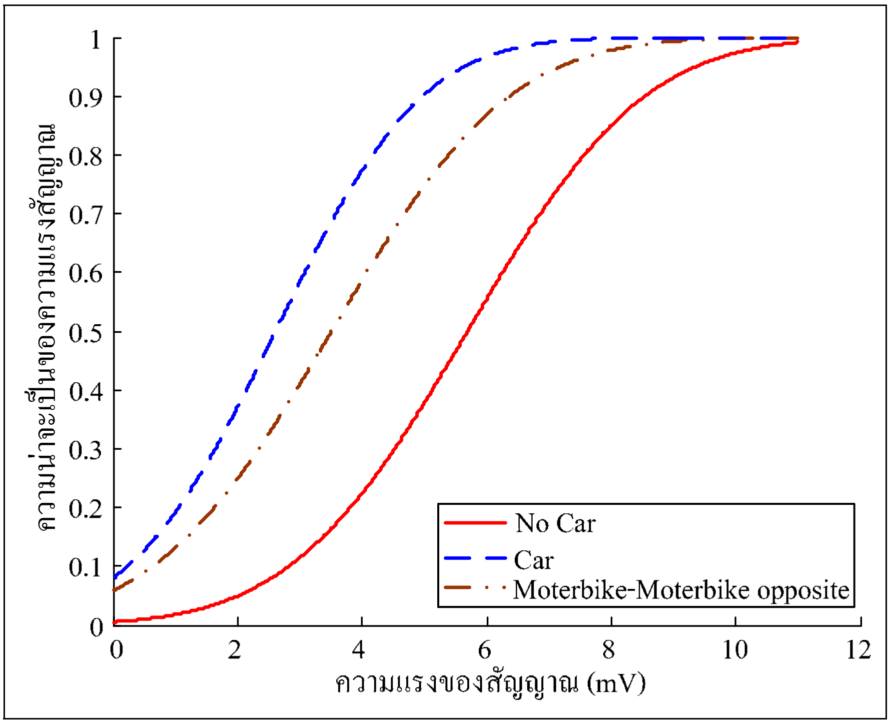


รูปที่ 4.42 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถวิ่งผ่านของสัญญาณดิจิตอล BPSK

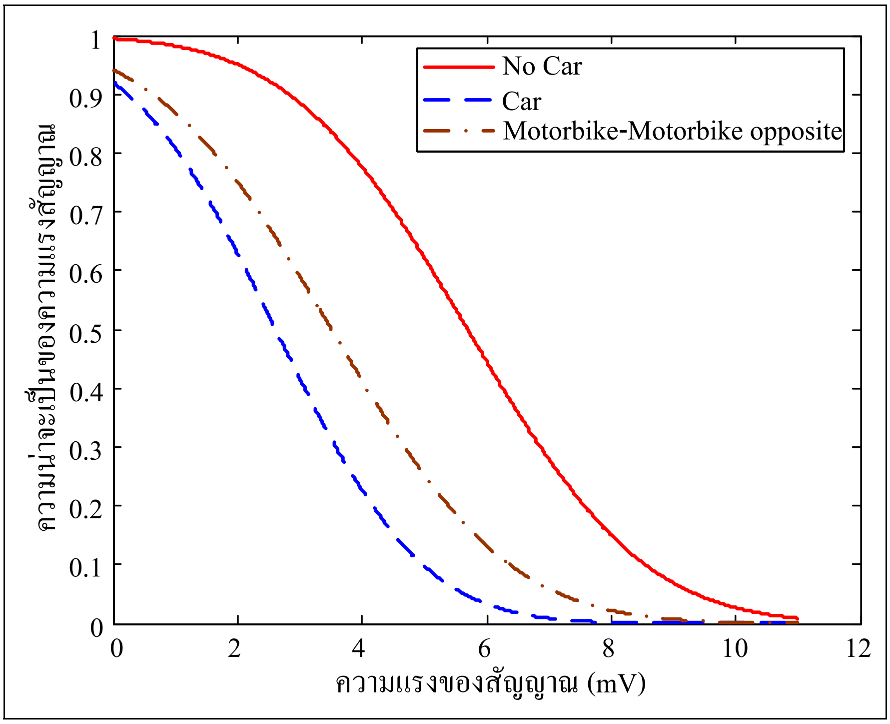


รูปที่ 4.43 กราฟฮิสโตแกรมกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ของสัญญาณดิจิตอล BPSK

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาเข้าโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ดังรูปที่ 4.44 จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ดังรูปที่ 4.45 ซึ่งจากความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับ และใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงของสัญญาณของกรณีถนนว่าง กรณีรถวิ่งผ่าน และกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 2.83 mV 0.24 mV 0.64 mV ตามลำดับ



รูปที่ 4.44 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล BPSK



รูปที่ 4.45 กราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ในเหตุการณ์บนท้องถนนของสัญญาณดิจิตอล BPSK

4.5 สรุป

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการทดลองวัดสัญญาณดิจิตอลบนท้องถนน ซึ่งได้มีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับในสภาพแวดล้อมบนถนนที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับดังที่กล่าวในบทที่ผ่านมาและทำการทดลองวัดซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง โดยผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของ IQ Modulation โดยใช้การ วิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ออกมา ในรูปแบบของกราฟฮิสโตแกรม แล้วนำค่าที่ได้จากกราฟฮิสโตแกรมมาทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF จากนั้นจะนำค่าจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CDF ที่ได้ มาทำการลบด้วย 1 เพื่อพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF ซึ่งความน่าจะเป็นแบบ CCDF โดยความน่าจะเป็นแบบ CCDF มีความสัมพันธ์กับความแรงสัญญาณที่รับและใช้ความน่าเป็นแบบ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยความแรงสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน โดยจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90% ซึ่งในการทดลองวัดสามารถนำผลที่ได้จากการทดลองวัดไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบระบบสื่อสารที่มีรถเป็นส่วนประกอบ รวมถึงการประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

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

จากนั้นได้ทำการศึกษาหลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ สัญญาณดิจิตอลมอดูเลชัน และทฤษฎีของความน่าจะเป็น เพื่อใช้ในการทดลองวัดการแพร่กระจายในสภาพแวดล้อมภายของห้องปิดภายในอาคาร สภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ สภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ และสภาพแวดล้อมบนท้องถนน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการทดลองวัดในสภาพแวดล้อม เพื่อหาความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่รับได้เพื่อดูความเหมาะสมของสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันแบบต่าง ๆ สำหรับประยุกต์ใช้เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลชันในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน รวมทั้งการประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

โดยได้มีการสร้างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลมอดูเลตแบบ ASK, FSK และ BPSK ซึ่งมีค่าอัตราเร็วบิต 700 bps 2 kbps และ 50 ksps ตามลำดับ และได้ทำการมอดูเลตที่ความถี่ 433.92 MHz สำหรับ ASK และ FSK กำลังของสัญญาณส่งมีค่า -16 dBm ของ ASK และ -15 dBm ของ FSK ส่วน BPSK ทำการมอดูเลตที่ความถี่ 2.45 GHz และกำลังของสัญญาณส่งมีค่า -10 dBm และเครื่องรับประกอบด้วย Agilent N9020A MXA signal analyzer ต่อกับสายอากาศภาครับ สัญญาณเชิงซ้อนที่รับได้ถูกดีมอดูเลตโดยโปรแกรม Agilen 89600 vector signal analyzer และได้กล่าวถึงเหตุการณ์ของการวัดที่ใช้ในการทดลอง โดยรายละเอียดในการออกแบบและสภาพแวดล้อมทั้งหมดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

ในส่วนของการทดลองวัดผล โดยจากผลการทดลองวัดในสภาพแวดล้อมของห้องปิดภายในอาคาร จะพบว่าจากกราฟของความน่าจะเป็นแบบ CCDF ที่ความน่าจะเป็น 90% ของสัญญาณที่รับได้จะเห็นได้ ค่าความแรงสัญญาณของสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK FSK และ BPSK มีค่าเท่ากับ 0.8 mV 0.5 mV และ 1.4 mV ตามลำดับ ต่อมาเป็นผลการทดลองวัดในสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ โดยมีการแยกการทดลองวัดออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีของลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีของลานจอดรถยนต์เต็ม ซึ่งมีการแยกตามชนิดของสัญญาณดิจิตอล โดยสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม มีค่าเท่ากับ 0.4 mV และ 0.3 mV ตามลำดับ สัญญาณดิจิตอลแบบ FSK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม มีค่าเท่ากับ 0.5 mV และ 0.3 mV ตามลำดับ และสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์ มีค่าเท่ากับ 1.3 mV และ 0.2 mV ตามลำดับ และต่อมาเป็นผลการทดลองวัดในสภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ ซึ่งแยกออกเป็น 2 กรณีเหมือนกับสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ โดยสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม มีค่าเท่ากับ 0.4 mV และ 0.2 mV ตามลำดับ สัญญาณดิจิตอลแบบ FSK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม มีค่าเท่ากับ 0.6mV และ 0.3 mV ตามลำดับ และสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงสัญญาณของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม มีค่าเท่ากับ 1.6 mV และ 0.7 mV ตามลำดับ และสุดท้ายจะเป็นผลการทดลองวัดในสภาพแวดล้อมบนท้องถนน โดยมีได้มีการแยกการทดลองวัดออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีถนนว่าง กรณีรถวิ่งผ่าน และกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ ซึ่งสัญญาณดิจิตอลแบบ ASK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสัญญาณของกรณีของถนนว่าง กรณีรถวิ่งผ่าน และกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ จะมีค่าเท่ากับ 2.2 mV 0.5 mV 1.3 mV ตามลำดับ สัญญาณดิจิตอลแบบ FSK จาใกกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ค่าความแรงของสัญญาณของกรณีถนนว่าง กรณีรถวิ่งผ่าน และกรณีรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ มีค่าเท่ากับ 4.97 mV 0.90 mV 2.72 mV ตามลำดับ และสัญญาณดิจิตอลแบบ BPSK จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ CCDF จะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสัญญาณของกรณีของถนนว่าง กรณีของรถวิ่งผ่าน และกรณีของรถจักรยานยนต์วิ่งสวนกับรถจักรยานยนต์ จะมีค่าเท่ากับ 2.83 mV 0.24 mV 0.64 mV ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบระบบสื่อสารที่มีรถเป็นส่วนประกอบ รวมถึงการประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

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

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

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

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์ออกแบบ ผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ และเป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าในเรื่องของการวัดการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมที่มีรถเป็นส่วนประกอบ ทั้งในโครงสร้างที่นำเสนอในงานวิจัยนี้หรือโครงสร้างแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

รายการอ้างอิง

ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ. (2540). **หลักการระบบสื่อสาร.** บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน).

ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ. (2546). **หลักการไฟฟ้าสื่อสาร.** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

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

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

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

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

Balanis, C. A. (1997). **Antenna Theory : Analysis and Design**. John Wiley & Sons, Inc

Rappaport , T. S. (2000). **Wireless Communication: Principles & Practice**. New Jersey, Prentice Hall PTR

Proakis, J. G. (1995). **Digital communication 3rd Ed,** New Yoke: McGraw-Hill

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

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

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

Behin, R. (1998). **Multi-Antenna Indoor Radio Channel Measurement and Analysis.** *TRLabs Calgacy Internal Report*.

Ertel, R. B., Cardieri, P., Sowerby, K. W., Rappaport, T. S. and Reed, J. H. (1998). **Overview of spatial channel models for antenna array communication Systems.** *IEEE Personal Communication*, vol. 5, pp. 10-22.

Bruen, A. A. and Forcinito, M. A. (2004). **Cryptography, Information Theory and Error Correction : A Handbook for the 21st Century,** New York: John Wiley & Sons, Inc.

Iwakiri, N. and Kobayashi, T. (2007). **Ultra-Wideband Indoor Channel Estimation Using a Signal Model Based on Measurements**. *Proceedings of the Second European Conference, EuCAP 2007*, pp 1-6, Nov. 11-16.

Hadzialic, M., Lipovac, V. and Behlilovic, N. (2005). **Fading and Propagation Attenuation Based Explicit Analytical Model for the PDF of Mobile Channel Composite Envelope**. *Proceedings of the 18th International Conference, ICECom 2005*., pp 1-4, Oct. 12-14.

Motamedi, Z. and Soleymani, M.R. (2008). **On the achievable throughput of ad-hoc networks with MIMO Rician channels**. *Proceedings of Canadian Conference, CCECE 2008*, pp 000115-000118, May 4-7.

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

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

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Maungrat, M. Jarataku, P. and Thongsopa, C. (2008). **Measurement of UHF Radio Wave Propagation in Parking**. *Proceedings of PEC Conference*, Songkha, Thailand.

Thongsopa C. Intarapanich, A. and Maungrat, M. (2009). **Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicle**. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility,* Kyoto, Japan.

Maungrat, M. Jarataku, P. and Thongsopa, C. (2009). **Measurement of ASK and FSK Wave Propagation in Parking**. *Proceedings of the Electrical Engineering Conference*, Prajeenburi, Thailand.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7
21-22 พฤษภาคม 2552

การวัดแพร่กระจายสัญญาณวิทยุย่านคลื่นความถี่สูงยิ่งในลานจอดรถ

Measurement of UHF Radio Wave Propagation in Parking

มังคลา ม่วงรัตน์[1*] ชาญชัย ทองโสภา[2] ประพล จาระตะคุ[3]
[1, 2] สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[3] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
E-mail: mungkala_maungrat@hotmail.com*

Mungkala Maungrat[1*] Chanchai Thongsopa[2] Prapol Jarataku[3]
[1,2] School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000
[3] The Center for Scientific and Technological Equipment, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000
E-mail: mungkala_maungrat@hotmail.com*

บทคัดย่อ

การใช้ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับเฝ้าสังเกตลานจอดรถเป็นที่สนใจอย่างมาก เนื่องจากระบบเครือข่ายสามารถติดตั้งได้ง่าย โดยดูจากคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่น ในบทความนี้เป็นการวัดการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุในย่านคลื่นความถี่สูงยิ่ง ซึ่งทำการวัดในสองเหตุการณ์ คือเหตุการณ์ในลานจอดรถยนต์และเหตุการณ์ในลานจอดรถจักรยานยนต์ โดยทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ แสดงในรูปแบบของขนาดและเฟส โดยใช้กราฟฮิสโตแกรม ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการกระจายสะสมเติมเต็ม (Complement Cumulative Distribution Function: CCDF) ในการเปรียบเทียบ ซึ่งผลการวัดของทั้งสองเหตุการณ์นี้จะเห็นได้ว่าความแรงของระดับสัญญาณของกรณีลานจอดรถเต็มจะมีค่าน้อยกว่ากรณีของลานจอดรถว่าง ส่วนค่าของเฟสสัญญาณของทั้งสอง เหตุการณ์ จะมีเฟสต่างกันประมาณ 180 องศา ตามรูปแบบของสัญญาณ BPSK ซึ่งผลการทดลองนี้นำไปใช้ในการพัฒนาระบบตรวจสอบปริมาณรถยนต์ รถจักรยานยนต์ในลานจอด หรือระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับรถยนต์และรถจักรยานยนต์ต่อไป

คำหลัก การแพร่กระจายคลื่น, ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย, ไดเวอร์ซิตี้

Abstract

Use of wireless sensor network for traffic and parking lot monitoring is very attractive because the networks can be installed easily. To accurately estimate the network performance, the radio wave propagation characteristic is required. In this paper, propagation is measured for UHF radio wave. We performed measurement in two scenarios. 1) in a car parking lot and 2) in a motorcycle parking lot. We have analyzed receiving signal that shown in amplitude and phase. We have used histogram, probability density function (PDF) and complement cumulative distribution function (CCDF) for comparing receiving signal level between different scenarios. This result of two scenarios, signal level of full parking lot has less than empty parking lot. Phase of signal in two scenarios difference is 180 degree. Because it is phase of BPSK signal. That result of measurement can be use to develop vehicle quantity measurement systems or wireless sensor network with respect to cars and motorcycles.

Keywords: wave propagation, Wireless sensor network, diversity.

1. บทนำ

การจราจร เป็นปัญหาใหญ่ในหลายเมือง มีความพยายามหลายอย่างที่ต้องการข้อมูลการจราจรแบบตลอดเวลา เพื่อแก้ปัญหาการจราจร ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจเพื่อเก็บข้อมูลการจราจร โดยเหตุที่สะดวกต่อการติดตั้ง การควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมด้วยระบบ

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ทำให้ได้ข้อมูลการจราจรแบบตลอดเวลา ดังนั้น ไฟจราจรในพื้นที่สามารถควบคุมได้อย่างถูกต้อง และยังมีปัญหาใหญ่อื่น ๆ อีกในเขตเมือง คือพื้นที่ในลานจอดรถยนต์ โดยระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จะสามารถให้ข้อมูลปริมาณพื้นที่ว่างในแต่ละลานจอดรถยนต์ได้อีกด้วย

ในการติดตั้ง ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย มีความยุ่งยากบางอย่างสำหรับประเภทของการประยุกต์เหล่านี้ เพราะสภาพแวดล้อมการแพร่กระจายคลื่น [1] ประกอบด้วยตัวกระจายคลื่นอย่างดี นั้นคือ รถยนต์ ดังนั้น จากสภาพแวดล้อมเป็นเหตุให้เกิดองค์ประกอบของสัญญาณแบบหลายทิศทางจำนวนมาก โดยสภาพแวดล้อมแบบสัญญาณหลายทิศทางที่มีความหลากหลาย จะลดคุณสมบัติของเครื่องรับลงอย่างมาก เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องรับ ดังนั้น ข้อมูลทางสถิติขององค์ประกอบช่องสัญญาณหลายทิศทาง จึงเป็นที่ต้องการ

คุณสมบัติเกี่ยวกับสถิติขององค์ประกอบช่องสัญญาณหลายทิศทาง ขึ้นอยู่กับ คุณลักษณะการกระจาย ตำแหน่งของตัวกระจายทำให้คุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นนั้นยากต่อการกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง เนื่องจากเหตุนี้ การเข้าใจถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น การวัดช่องสัญญาณจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ ในการศึกษาเป็นการแสดงคุณลักษณะขนาดของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้ระบบการวัด ซึ่งระบบการวัด ประกอบด้วยเครื่องมือการวัดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุมาตรฐาน โดยใช้เพื่อวัดระดับสัญญาณที่รับได้ในสองเหตุการณ์ที่แตกต่างกัน เหตุการณ์แรกคือสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ และเหตุการณ์ที่สองคือสภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ ซึ่งประกอบด้วยรถยนต์และรถจักรยานยนต์ที่จอดจำนวนมากและ เพราะจากเหตุนี้องค์ประกอบสัญญาณหลายทิศทาง จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยจะติดตั้งเซ็นเซอร์ไร้สายในทั้งสองเหตุการณ์

บทความนี้รวบรวมสิ่งต่อไปนี้ ในส่วนที่หนึ่งอธิบายระบบการวัดสัญญาณ ส่วนที่สองแสดงผลการวัดที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบลานจอดรถยนต์ ส่วนผลการวัดในสภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ จะแสดงในส่วนที่สาม และส่วนสุดท้ายจะเป็นสรุปบทความและพิจารณางานวิจัยที่เป็นไปได้ต่อไปในอนาคต

2. ระบบการวัด และผลการวัด

2.1 เหตุการณ์ของการวัดและระบบการวัด

ระบบการวัดประกอบด้วย เครื่องส่ง เครื่องรับ และกระบวนการของสัญญาณ โดยสัญญาณที่ใช้ทดลองคือ สัญญาณมอดดูเลตแบบ BPSK [2] ซึ่งมีค่าอัตราเร็วบิต 50 kbps และ ทำการมอดูเลตที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้ Agilent signal generator model E4433B แบนวิดท์ของสัญญาณสำหรับ BPSK ที่ $\alpha = 0.5$ raise cosine filter คือประมาณ 75 kHz สัญญาณถูกส่งโดยใช้สายอากาศแบบไดโพล ซึ่งมีอัตราขยาย 4 dB กำลังของสัญญาณส่งตั้งค่าที่ -10 dBm คงที่

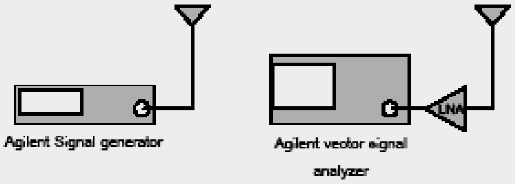
เครื่องรับประกอบด้วย Agilent N9020A MXA signal analyzer ต่อกับสายอากาศภาครับผ่าน low noise amplifier ที่มีอัตราขยาย 28 dB สัญญาณเชิงซ้อนที่รับได้ถูกดีมอดดูเลตโดยโปรแกรม Agilent 89600 vector signal analyzer ซึ่งติดตั้งใน Agilent N9020A โดยโปรแกรมได้สัญญาณที่รับในรูปของ

$$y(t) = i(t) + q(t)j \tag{1}$$

สัญญาณที่รับเป็นเวลา 2 วินาที และ แซมเปิลที่ 320 ksps เนื่องจากเหตุนี้ จำนวนของแซมเปิล คือ 640000 แซมเปิลต่อการวัดหนึ่งครั้ง สัญญาณแซมเปิลที่รับได้จะถูกเซฟลงในหน่วยความจำของ Agilent N9020A และสัญญาณจะถูกนำไปดำเนินการวิเคราะห์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของขนาดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปจากเครื่องส่งสัญญาณ ผ่านช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์และลานจอดจักรยานยนต์มายังเครื่องรับสัญญาณ และนำผลที่ได้จากการวัดนี้มาทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการแสดงค่าของการวัดออกเป็นกราฟอิสโตแกรม [3] และกราฟของความน่าจะเป็น เพื่อให้แสดงข้อมูลที่เข้าใจง่ายของช่องสัญญาณที่แสดงขนาดและเฟสของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งคำนวณได้โดย

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

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



รูปที่ 1 เครื่องส่งและเครื่องรับที่ใช้ในกาวัด

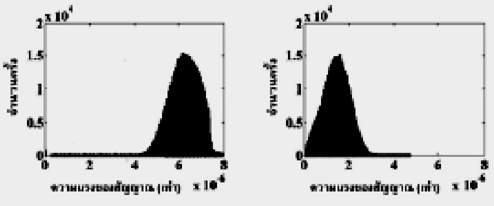
2.2 ลานจอดรถยนต์

การหากำลังสัญญาณที่รับในลานจอดรถยนต์ การวัดถูกกระทำในสองกรณี คือลานจอดรถยนต์ว่างแทนการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุที่ปราศจากสิ่งกีดขวางและอีกกรณีคือลานจอดรถยนต์เต็ม โดยการวัดระดับสัญญาณในสองกรณี ผลรวมสัญญาณที่แกว่งไปแกว่งมา จะถูกบันทึกไว้

รูปที่ 2 ลานจอดรถยนต์ที่ใช้ในการวัด

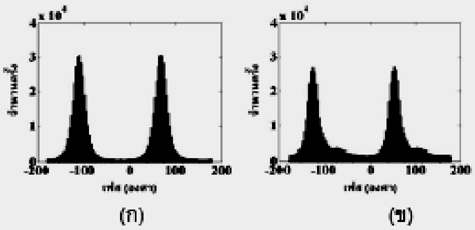
สภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์เป็นชนิดแบบภายนอกอาคาร ซึ่งมีหลังคาเป็นโลหะ ความสูงของหลังคาประมาณ 3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ห่างกันประมาณ 10 เมตร ทั้งสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับสูงจากพื้น 2 เมตร กรณีแรกทำการวัดสัญญาณที่รับได้ในลานจอดรถยนต์ว่าง

ทำการวิเคราะห์สัญญาณที่รับได้ เพื่อแสดงขนาดและเฟสของสัญญาณ จากสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์แสดงในรูปแบบกราฟฮิสโตแกรม รูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าของขนาดสัญญาณในกรณีของลานจอดรถยนต์ว่าง (ก) ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.000008 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0000063 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง และในกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม (ข) ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.000000 ถึง 0.0000047 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0000015 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยจากค่าของขนาด ซึ่งค่าของขนาดสัญญาณทั้งสองกรณีจะต่างกัน 0.0000048 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง จะเห็นได้ว่าขนาดของกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม มีค่าน้อยกว่า ต่อมาทำการวิเคราะห์เฟสของสัญญาณที่รับได้ รูปที่ 4 แสดงค่าของเฟสของสัญญาณที่ได้จากการวัด จากกราฟฮิสโตแกรมจะเห็นได้ว่าค่าของเฟสของในกรณีของลานจอดรถยนต์ว่าง (ก) ค่าของเฟสจะอยู่ที่ประมาณ -109.8 องศา และ 66.59 องศา และในกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม (ข) ค่าของเฟสจะอยู่ที่ประมาณ -127.8 องศาและ 52.2 องศา เป็นค่าเฟสของบิต 0 และบิต 1 ซึ่งเฟสของสัญญาณจะต่างกันประมาณ 180 องศา ตามรูปแบบของสัญญาณ BPSK



(ก) (ข)

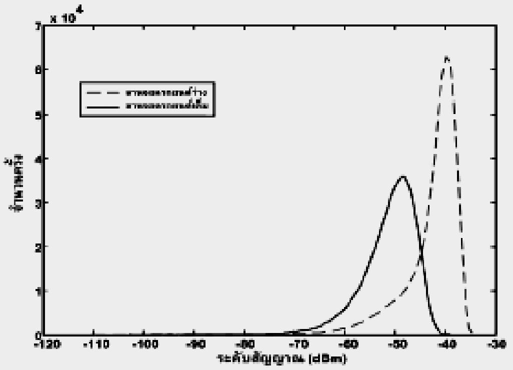
รูปที่ 3 ขนาดของสัญญาณที่รับได้ของลานจอดรถยนต์
(ก) ลานจอดรถยนต์ว่าง (ข) ลานจอดรถยนต์เต็ม



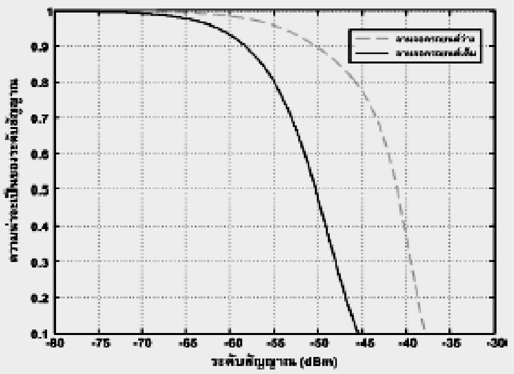
(ก) (ข)

รูปที่ 4 เฟสของสัญญาณที่รับได้ของลานจอดรถยนต์
(ก) ลานจอดรถยนต์ว่าง (ข) ลานจอดรถยนต์เต็ม

จากนั้น ทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของสัญญาณที่รับได้ เพื่อแสดงให้เห็นความน่าจะเป็นของสัญญาณที่รับ จากกราฟความน่าจะเป็นแบบ PDF [4] รูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ค่าของระดับสัญญาณของกรณีลานจอดรถยนต์ว่าง จะมีค่าประมาณ -40 dBm และค่าของระดับสัญญาณกรณีของลานจอดรถยนต์เต็มจะมีค่าประมาณ -48 dBm และนำค่าของกราฟความน่าจะเป็นแบบ PDF มาทำความน่าจะเป็นแบบ CCDF [5] ซึ่งเป็นการคำนวณแสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นสำหรับสองกรณี โดย CCDF มีความสัมพันธ์กับระดับสัญญาณที่รับ ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดง CCDF ของระดับสัญญาณของทั้งกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม ให้พิจารณา CCDF ของกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม ที่ระดับความแรงสัญญาณที่รับได้ -60 dBm จะมีค่าประมาณ 6.51% และใช้ CCDF แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบด้วยระดับสัญญาณที่แตกต่างกันที่ความน่าจะเป็นเดียวกัน ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่ 90 % ระดับสัญญาณในกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็มคือ -50.26 dBm และ -58.45 dBm ตามลำดับ ระดับสัญญาณต่างกัน 8.19 dBm ระดับสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถใช้ในหาค่าคุณสมบัติของเหตุการณ์การแพร่กระจายคลื่นต่อไป



รูปที่ 5 PDF ของระดับสัญญาณที่รับได้ของลานจอดรถยนต์



รูปที่ 6 CCDF ของระดับสัญญาณที่รับได้ของลานจอดรถยนต์

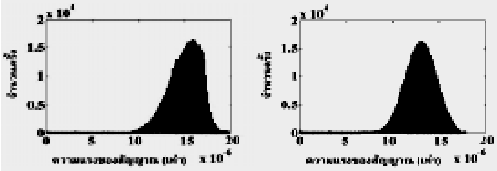
2.3 ลานจอดรถจักรยานยนต์

ทำการวัดสัญญาณในลานจอดรถจักรยานยนต์ โดยจะทำการวัดคล้ายกับกรณีของลานจอดรถยนต์ คือทำการวัดในสองกรณี

เช่นกัน กรณีแรกคือลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง และกรณีที่สองคือลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม โดยมีรถจักรยานยนต์เป็นตัวกระจายคลื่น ซึ่งลานจอดรถจักรยานยนต์มีหลังคาเป็นโลหะ ความสูงของหลังคาประมาณ 2.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ห่างกันประมาณ 10 เมตร ทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับสูงจากพื้น 1.5 เมตร กรณีแรกทำการวัดสัญญาณที่รับได้ในลานจอดรถจักรยานยนต์ที่ว่าง

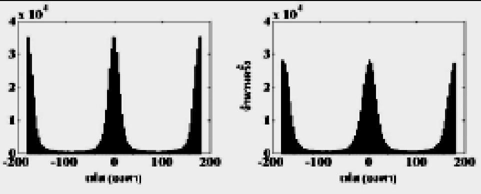
รูปที่ 7 ลานจอดรถจักรยานยนต์ที่ใช้ในการวัด

และทำการวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบเดียวกันกับเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ โดยจากสภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์ จะเห็นได้ว่ากราฟฮิสโตแกรม รูปที่ 8 ของขนาดสัญญาณในกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง(ก) ขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.0000000 ถึง 0.0000200 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0000165 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง และในกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม (ข) ค่าของขนาดสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0.0000000 ถึง 0.0000194 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยขนาดของสัญญาณที่รับได้บ่อยครั้งที่สุด คือประมาณ 0.0000138 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง ซึ่งค่าของขนาดสัญญาณทั้ง 2 กรณีจะต่างกัน 0.0000027 เท่าของขนาดสัญญาณที่ส่ง โดยจะเห็นได้ว่าขนาดของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม มีค่าน้อยกว่าและทำการวิเคราะห์เฟสของสัญญาณที่รับได้ รูปที่ 9 แสดงค่าของเฟสของสัญญาณที่ได้จากการวัด กราฟฮิสโตแกรมจะเห็นได้ว่าค่าของเฟสในกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง (ก) ค่าของเฟสจะอยู่ที่ประมาณ 1.8 องศา และ -178.2 องศา และในกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม (ข) ค่าของเฟสจะอยู่ที่ประมาณ 1.8 องศา และ -178.2 องศา จะเห็นว่าค่าเฟสของสัญญาณทั้ง 2 กรณี เฟสของสัญญาณจะต่างกันประมาณ 180 องศา เหมือนเช่นเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์



(ก) (ข)

รูปที่ 8 ขนาดของสัญญาณที่รับได้ของลานจอดรถจักรยานยนต์
(ก) ลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง (ข) ลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม



(ก) (ข)

รูปที่ 9 เฟสของสัญญาณที่รับได้ของลานจอดรถจักรยานยนต์
(ก) ลานจอดรถจักรยานยนต์ว่าง (ข) ลานจอดรถจักรยานยนต์เต็ม

3. สรุป

ในบทความนี้ ศึกษาการวัดของระดับสัญญาณในช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุ และทำการแสดงการวัดในสองเหตุการณ์ที่แตกต่างกัน ผลการวัดจะแสดงโดยใช้กราฟฮิสโตแกรมและกราฟของความน่าจะเป็น ซึ่งผลการวัดในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์นั้น ขนาดของสัญญาณที่รับได้ของกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม มีค่าน้อยกว่ากรณีของลานจอดรถยนต์ว่าง เนื่องจากรถยนต์จะเป็นตัวกระจายสัญญาณหลายทิศทางและทำให้สัญญาณเกิดการลดทอนขึ้นได้ โดยขนาดของสัญญาณทั้งสองกรณีจะต่างกัน 0.000048 เท่าของสัญญาณที่ส่ง และความน่าจะเป็นแบบ CCDF แสดงให้เห็นว่าค่าระดับสัญญาณของทั้งสองกรณี ต่างกัน 8.19 dBm และเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ ค่าของขนาดสัญญาณของกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มนั้น มีค่าน้อยกว่ากรณีของลานจอดรถยนต์ว่างเช่นกัน โดยขนาดของสัญญาณทั้งสองกรณีจะต่างกัน 0.0000027 เท่าของสัญญาณที่ส่ง โดยจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากขนาดของรถจักรยานยนต์ที่เล็กกว่า ทำให้มีส่วนที่กระจายคลื่นได้น้อย รวมถึงโครงสร้างของลานจอดรถด้วย จากขนาดของสัญญาณและความน่าจะเป็นที่แตกต่างกันจากทั้งสองเหตุการณ์ สามารถใช้ในหาค่าคุณสมบัติของเหตุการณ์การแพร่กระจายคลื่นต่าง ๆ ได้ ส่วนค่าเฟสของสัญญาณนั้น จะต่างกันประมาณ 180 องศา ตามรูปแบบสัญญาณ BPSK โดยในกรณีของลานจอดรถยนต์นั้นจะเกิดการแกว่งของสัญญาณเล็กน้อย แต่กรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์นั้น ค่าของเฟสสัญญาณจะมีค่าเท่าเดิมไม่มีการแกว่งของสัญญาณ โดยจากผลการวัดนี้อาจจะนำไปใช้ในการพัฒนาระบบสื่อสารหรือระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับรถยนต์และรถจักรยานยนต์รวมทั้งระบบตรวจสอบปริมาณรถในลานจอดรถแบบอัตโนมัติต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

[1] Rappaport, T.S. 2000. Wireless Communication: Principles & Practice, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ

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

[3] Iwakiri, N., Kobayashi, T. 2007. Ultra-Wideband Indoor Channel Estimation Using a Signal Model Based on Measurements. Proceedings of the Second European Conference, EuCAP 2007, Nov. 11-16, 2007: 1-6

[4] Hadzialic, M., Lipovac, V., Behlilovic, N. 2005. Fading and Propagation Attenuation Based Explicit Analytical Model for the PDF of Mobile Channel Composite Envelope. Proceedings of the 18th International Conference, ICECom 2005, Oct. 12-14, 2005: 1-4

[5] Motamedi, Z., Soleymani, M.R. 2008. On the achievable throughput of ad-hoc networks with MIMO Rician channels. Proceedings of Canadian Conference, CCECE 2008, May 4-7, 2008: 000115-000118

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

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

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

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

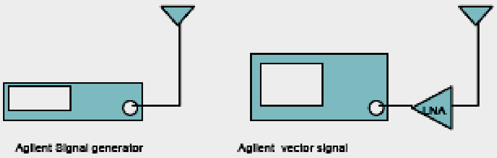


Fig. 1 The transmitter and receiver for the measurement

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 the average receiving signal amplitude. The vehicles in th parking lot influence only on the average signal attenuatio Variation of the signal level depends on the structure of th parking lot because the pdf of both cases are similar.

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

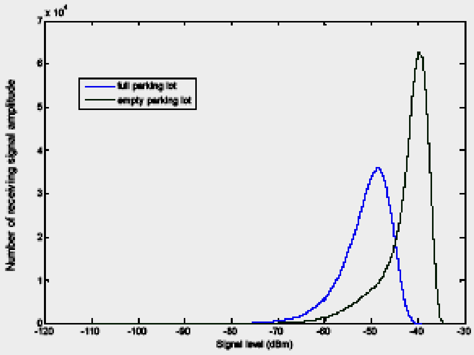


Fig. 3 Pdf of the receiving signal level in the empty parking and the fu parking

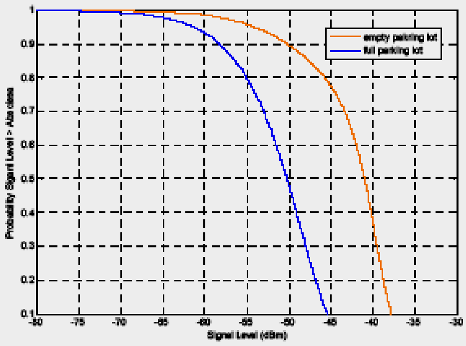


Fig. 4 CCDF of receiving signal level in the parking lots

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

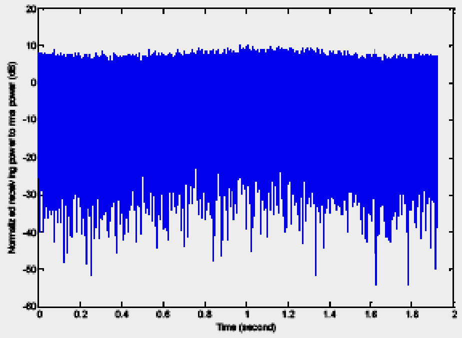


Fig. 5 Fading envelop of the full parking lot

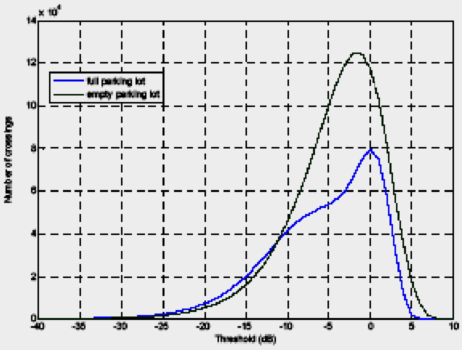


Fig. 6 Level crossing rate (LCR) for full and empty parking lots.

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.

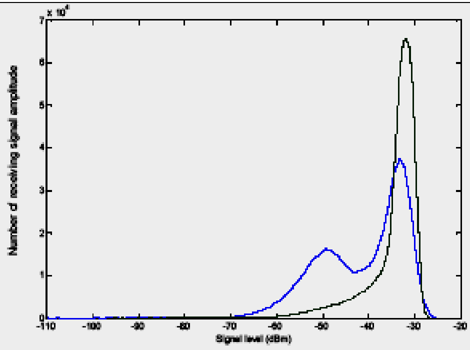


Fig. 8 Pdf of the receiving signal level in a car and two motorcycles and a motorcycle and a motorcycle are moving in opposite direction

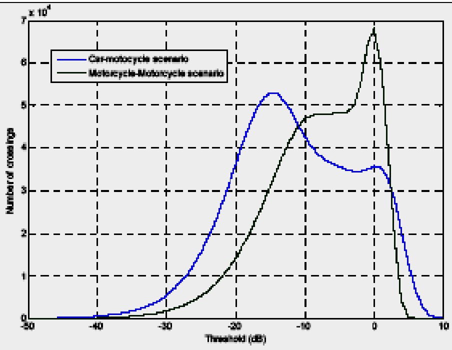


Fig. 11 Level crossing rate (LCR) for car-motorcycle and motorcycle-motorcycle scenarios.

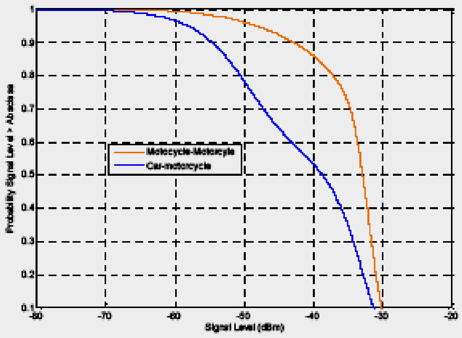


Fig. 9 CCDF of receiving signal level in the road

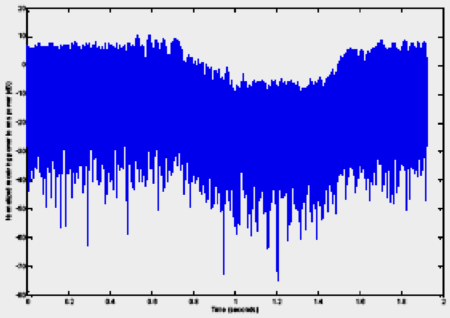


Fig. 10 Fading envelop when a car and two motorcycles are moving in opposite direction

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.

การวัดสัญญาณในการแพร่กระจายคลื่นของลานจอดรถที่มีการมอดูเลตชันแบบ ASK และ FSK

Measurement of ASK and FSK Wave Propagation in Parking

มังคลา ม่วงรัตน์[1], ประพล จาระตะคุ[2] และ ชาญชัย ทองโสภา[1]

[1,2]สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 086-7268744 E-mail: mungkala_muangrat@hotmail.com

[2]ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ : 089-4281804 E-mail: prapol@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวัดสัญญาณข้อมูลที่รับได้จากการแพร่กระจายคลื่นในลานจอดรถ โดยทำการศึกษาจากสภาพแวดล้อมของลานจอดรถในสองเหตุการณ์ คือ ลานจอดรถยนต์ และลานจอดรถจักรยานยนต์ ด้วยการใช้โมดูลสัญญาณดิจิตอลที่ทำการสร้างขึ้นมาที่ความถี่ 434 MHz มีการมอดูเลตชันแบบ ASK (Amplitude Shift Keying) และ FSK (Frequency Shift Keying) เพื่อเปรียบเทียบระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ระหว่างสภาพแวดล้อมของลานจอดรถว่างและสภาพแวดล้อมของลานจอดรถเต็ม โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) ในการวิเคราะห์ผลจากการดีมอดูเลตชันของสัญญาณข้อมูลทั้งสองแบบ เพราะถ้าสัญญาณที่รับได้อยู่ในช่วงของความแตกต่าง แสดงว่าลานจอดรถยังคงมีที่ว่างสำหรับจอดรถได้อีก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการมอดูเลตแบบ ASK มีความแตกต่างความแรงของสัญญาณที่รับได้มากกว่าการมอดูเลตแบบ FSK ซึ่งคือให้การเปรียบเทียบได้ง่ายกว่า และสามารถนำผลที่ได้ไปใช้สำหรับการพัฒนาชุดรับสัญญาณในระบบตรวจสอบปริมาณรถยนต์ รถจักรยานยนต์ในลานจอดหรือระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เกี่ยวกับยานยนต์ต่อไป

คำสำคัญ : การแพร่กระจายคลื่น, ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

Abstract

This paper presents signal measurement from propagation in parking lot. We performed measurement in two scenarios. 1) in a car parking lot and 2) in a motorcycle parking lot. We have used module of ASK (Amplitude Shift Keying) and FSK (Frequency Shift Keying) at 434 MHz to transmit. We compared receiving signal level between empty parking lot and full parking lot. We used probability density function (PDF) to analyze result of two demodulation signal. Because if receive signal has signal level in range of difference that parking lot is not full. From result, ASK modulation has more difference signal level than FSK modulation. That difference result has compared is easily and can be use to develop vehicle quantity measurement systems or wireless sensor network with respect to vehicle.

Keywords: wave propagation, wireless sensor network

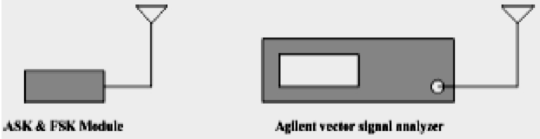
1. คำนำ

ปัจจุบันระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งและสามารถทำให้ได้รับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบปริมาณรถ อาทิเช่น การตรวจสอบปริมาณความหนาแน่นการจราจรบนท้องถนน รวมทั้งสามารถใช้วัดปริมาณความหนาแน่นของรถในลานจอดรถได้ สำหรับระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นมีส่วนประกอบหลักในการสื่อสารซึ่งประกอบด้วย ตัวตรวจจับ สถานีแม่ข่าย และสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น โดยการศึกษาในครั้งนี้จะทำการศึกษาจากสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นของลานจอดรถ โดยตัวตรวจจับจะถูกติดตั้งในลานจอดรถ และทำหน้าส่งสัญญาณข้อมูลไปยังสถานีแม่ข่าย ซึ่งสัญญาณข้อมูลที่ส่งออกมาผ่านสภาพแวดล้อมของลานจอดรถทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น ทำให้สัญญาณข้อมูลที่รับได้เกิดการลดทอนลงอย่างมาก ดังนั้นข้อมูลทางสถิติของสัญญาณข้อมูลที่ได้มาจากองค์ประกอบของสัญญาณหลายทิศทางจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อนำไปใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องรับ ซึ่งสถิติของสัญญาณข้อมูลที่รับได้ จะขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของตัวกระจายคลื่นในลานจอดรถ เนื่องจากเหตุนี้ การเข้าใจถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

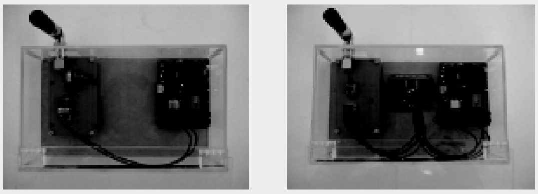
จากรูปแบบเดิมการรับส่งสัญญาณที่ผ่านมา ใช้การส่งที่มีแต่สัญญาณพาหะเท่านั้น จึงทำให้สัญญาณที่รับได้มีความไม่ถูกต้องหรือรับสัญญาณไม่ได้ เนื่องจากสัญญาณเกิดการสะท้อนหรือเกิดการกระจายคลื่น ดังนั้น จึงเลือกใช้ให้มีการมอดูเลตชันเข้าไปกับคลื่นพาหะด้วยเพราะเมื่อสัญญาณที่รับได้ถูกดีมอดูเลตสัญญาณได้ถูกต้องแสดงว่าได้รับสัญญาณนั้นจริง จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2] เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองวัดสัญญาณข้อมูลที่รับได้ด้วยเครื่องส่งและเครื่องรับจากเครื่องมือวัดของ Agilent โดยใช้สัญญาณดิจิตอลมอดูเลตชันแบบ BPSK ทำการทดลองในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์และเหตุการณ์ของถนนขนาดเล็ก จากการทดลองนี้ได้เป็นแนวทางในการวิจัยศึกษาต่อมา จึงมีการสร้างเครื่องส่งสัญญาณดิจิตอลมอดูเลตชัน ขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลองวัดเปรียบเทียบสองแบบคือ ASK และ FSK โดยทำการวัดสัญญาณข้อมูลที่รับได้ในสองเหตุการณ์ที่แตกต่างกัน เหตุการณ์แรกคือสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์ และเหตุการณ์ที่สองคือสภาพแวดล้อมของลานจอดรถจักรยานยนต์เป็นต้น

2. ระบบการวัดและเหตุการณ์ของการวัด

ระบบการวัดประกอบด้วย เครื่องส่ง เครื่องรับ และกระบวนการของสัญญาณ โดยสัญญาณที่ใช้ทดลองคือ สัญญาณมอดูเลตแบบ ASK และสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK [3] ทำการมอดูเลตที่ความถี่ 434 MHz ทำการสร้างโดยใช้โมดูลสัญญาณของ ASK และ FSK และในส่วนของข้อมูลที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณนั้นได้ใช้ไอซีเบอร์ 555 และใช้บอร์ดไมโครคอลโทรลเลอร์ MCS-51 ในการเขียนโปรแกรมสำหรับสร้างสัญญาณข้อมูลของสัญญาณมอดูเลตแบบASK และ FSK ที่อัตราเร็วบิต 512 ksps และใช้สายอากาศแบบไดโพล ซึ่งมีอัตราขยาย 1.2 dB ในการส่งสัญญาณ โดยกำลังของสัญญาณส่งมีค่า -15 dBm



รูปที่ 1 บล็อคไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับที่ใช้ในกาวัด



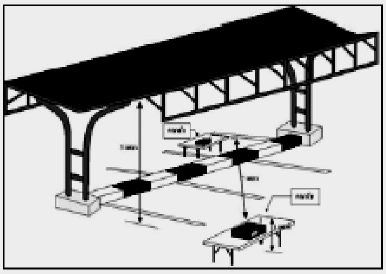
(ก) (ข)

รูปที่ 2 อุปกรณ์ส่งสัญญาณดิจิตอลมอดูเลตชัน
(ก) อุปกรณ์ส่งสัญญาณ ASK (ข) อุปกรณ์ส่งสัญญาณ FSK

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

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

ซึ่ง i คือขนาดของสัญญาณที่ให้ค่าเอาท์พุตเฟสเดียวกันกับอินพุตและ q คือ ขนาดของสัญญาณเอาท์พุตต่างเฟสกับอินพุต 90 องศา โดยรับสัญญาณได้เป็นเวลา 2 วินาที จำนวนของข้อมูล คือ 1024000 ข้อมูลต่อการวัดหนึ่งครั้ง สัญญาณข้อมูลที่รับได้จะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำของ Agilent N9020A และสัญญาณจะถูกนำไปดำเนินการวิเคราะห์ เพื่อหาจำนวนของสัญญาณข้อมูลที่รับได้ต่อขนาดความแรงของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากเครื่องส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมในลานจอดรถยนต์และลานจอดจักรยานยนต์



รูปที่ 4 รูปจำลองของลานจอดรถที่ใช้ในการวัด

โดยทำการวัดในสองเหตุการณ์คือ เหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์และลานจอดรถจักรยานยนต์ ซึ่งทั้งสองเหตุการณ์ของการวัดจะถูกกระทำในสองกรณี คือลานจอดรถว่างแทนการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุที่ปราศจากสิ่งกีดขวางและอีกกรณีคือลานจอดรถเต็มที่มีรถยนต์และรถจักรยานยนต์เป็นตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์และลานจอดรถจักรยานยนต์เป็นชนิดแบบภายนอกอาคาร ซึ่งมีหลังคาเป็นโลหะ โดยหลังคาของลานจอดรถยนต์และลานจอดรถจักรยานยนต์มีความสูงประมาณ 3 เมตร และ 2.5 เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปจำลองที่ 4 เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ห่างกันประมาณ 7 เมตร ทั้งสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับสูงจากพื้นประมาณ 1 เมตร ส่วนรูปที่ 5 (ก) และ (ข) แสดงสภาพแวดล้อมจริงของการวัด

(ก) (ข)

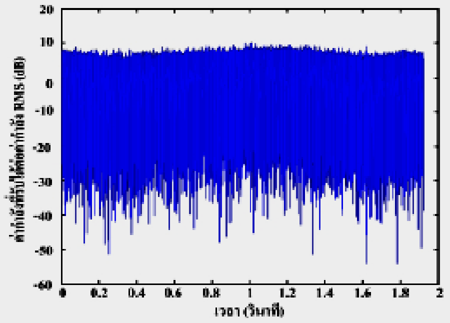
รูปที่ 5 สภาพแวดล้อมจริงของลานจอดรถที่ใช้ในการวัด
(ก) ลานจอดรถยนต์ (ข) ลานจอดรถจักรยานยนต์

และนำผลที่ได้จากการวัดในสองเหตุการณ์นี้มาทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม MATLAB เพื่อทำการแสดงค่าของการวัดออกเป็นกราฟของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือ PDF [4] เพื่อให้แสดงข้อมูลที่เข้าใจง่ายของช่องสัญญาณที่แสดงจำนวนสัญญาณข้อมูลที่รับต่อระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ

3. ผลการทดลอง

จากการวัดสัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ ระดับสัญญาณที่รับได้ แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นตัวอย่างของสัญญาณที่รับได้จากการรวมกันในหลายทิศทาง (Fading) สัญญาณที่รับได้นี้คือการนอร์มอล

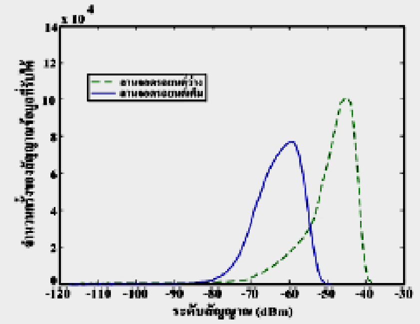
ไลซ์กำลังที่รับต่อค่าเฉลี่ย (rms) โดยค่าสัญญาณที่รับได้เป็นของกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่ามีการแกว่งของสัญญาณที่รับได้เล็กน้อย ส่วนในกรณีอื่น ๆ ที่ทำการวัดจะมีลักษณะสัญญาณคล้ายกันกับรูปนี้



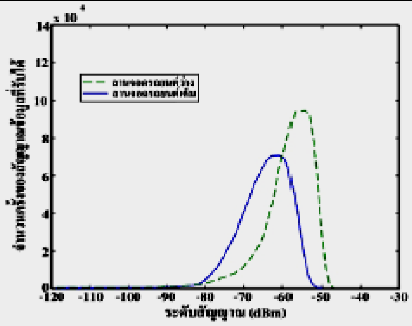
รูปที่ 6 ค่าของสัญญาณที่รับได้ในกรณีลานจอดรถยนต์เต็ม

3.1 ลานจอดรถยนต์

จากสัญญาณที่รับได้นำมาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณข้อมูลที่รับ โดยจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ PDF สำหรับสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK รูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า ค่าของระดับสัญญาณในกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็มจะมีค่าประมาณ -45.7 dBm และ -59.4 dBm ตามลำดับ ซึ่งระดับสัญญาณต่างกัน 13.7 dBm และสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK รูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ค่าของระดับสัญญาณในกรณีลานจอดรถยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถยนต์เต็มจะมีค่าประมาณ –54.3 dBm และ -61.7 dBm ตามลำดับ ซึ่งระดับสัญญาณต่างกัน 7.4 dBm โดยจากกราฟความน่าจะเป็นของสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK และแบบ FSK ซึ่งทั้งสองกรณี จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะแนวโน้มคล้ายกัน แต่ต่างกันที่ระดับสัญญาณเฉลี่ย



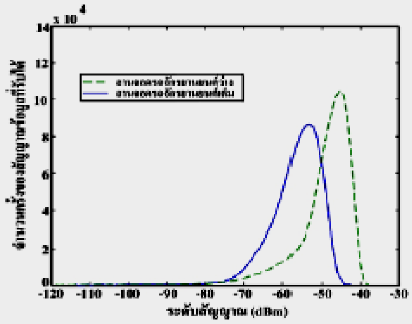
รูปที่ 7 PDF ของระดับสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK ที่รับได้ของลานจอดรถยนต์



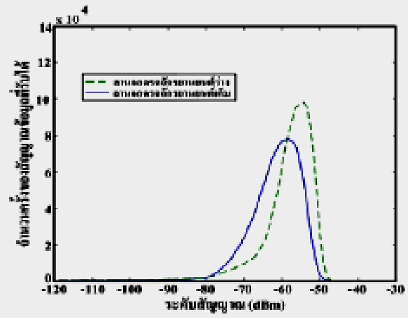
รูปที่ 8 PDF ของระดับสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK ที่รับได้ของลานจอดรถยนต์

3.2 ลานจอดรถจักรยานยนต์

ทำการวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบเดียวกันกับเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ โดยทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของสัญญาณข้อมูลที่รับได้เช่นกัน ซึ่งจากกราฟความน่าจะเป็นแบบ PDF สำหรับสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK รูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า ค่าของระดับสัญญาณในกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มจะมีค่าประมาณ -44.8 dBm และ –52.7 dBm ตามลำดับ ซึ่งระดับสัญญาณต่างกัน 7.9 dBm และสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK รูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า ค่าของระดับสัญญาณในกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและกรณีลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มจะมีค่าประมาณ -54.9 dBm และ -57.8 dBm ตามลำดับ ซึ่งระดับสัญญาณต่างกัน 2.9 dBm โดยจากผลการทดลองของสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK และแบบ FSK ในทั้งสองกรณี จะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณในกรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์เต็มมีค่าน้อยกว่ากรณีของลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างเหมือนกันกับลานจอดรถยนต์



รูปที่ 9 PDF ของระดับสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK ที่รับได้ของลานจอดรถจักรยานยนต์



รูปที่ 10 PDF ของระดับสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK ที่รับได้ของลานจอดรถจักรยานยนต์

จากการทดลองทั้งในรูปแบบของลานจอดรถยนต์และรถจักรยานยนต์ โดยใช้การมอดูเลตแบบ ASK และ FSK จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตแบบ ASK ให้ผลของความแตกต่างระหว่างสัญญาณข้อมูลที่สิมอดูเลตได้กับระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับได้กว้างกว่าทั้งในสภาพแวดล้อมของลานจอดรถยนต์และลานจอดรถจักรยานยนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการใช้ตรวจสอบปริมาณรถในลานจอดรถ คืออ้าความแรงสัญญาณที่รับได้อยู่ในช่วงความแตกต่างของสภาพแวดล้อมลานจอดรถว่างกับสภาพแวดล้อมลานจอดรถเต็ม แสดงว่ายังคงมีที่ว่างในลานจอดรถได้อีก เป็นต้น ดังนั้นจึงเหมาะที่จะเลือกการมอดูเลตแบบ ASK ที่ให้ความแตกต่างได้ชัดเจนมากกว่าการมอดูเลตแบบ FSK

4. สรุป

ในบทความนี้ ศึกษาการวัดสัญญาณข้อมูลที่รับได้จากการแพร่กระจายคลื่นในลานจอดรถ โดยทำการแสดงการวัดในสองเหตุการณ์ที่แตกต่างกัน คือสภาพแวดล้อมลานจอดรถว่างกับสภาพแวดล้อมลานจอดรถยนต์เต็ม ซึ่งจากผลการวัดที่ได้นั้นจะนำมาวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นแบบ PDF ซึ่งผลการวัดในเหตุการณ์ของลานจอดรถยนต์ว่างและลานจอดรถยนต์เต็ม แสดงให้เห็นว่าสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK ค่าของระดับสัญญาณต่างกัน 13.7 dBm และสำหรับสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK ค่าของระดับสัญญาณต่างกัน 7.4 dBm ส่วนเหตุการณ์ของลานจอดรถจักรยานยนต์ว่างและลานจอดรถยนต์เต็ม สำหรับสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK ค่าของระดับสัญญาณต่างกัน 7.9 dBm และสำหรับสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK ค่าของระดับสัญญาณต่างกัน 3.5 dBm เมื่อนำสัญญาณมอดูเลตแบบ ASK และแบบ FSK มาทำการวิเคราะห์แล้วพบว่ากราฟความน่าจะเป็นมีแนวโน้มที่คล้ายกัน โดยที่สัญญาณมอดูเลตแบบ ASK ให้ความแตกต่างของสัญญาณในเหตุการณ์ลานจอดรถยนต์ว่างกับลานจอดรถยนต์เต็มที่มากกว่าสัญญาณมอดูเลตแบบ FSK ซึ่งถ้าระดับสัญญาณข้อมูลที่รับได้ของการมอดูเลตทั้งสองแบบอยู่ในช่วงของความแตกต่างแสดงว่าลานจอดรถยังมีที่ว่างให้จอดรถได้อีก และจากผลการวัดนี้สามารถนำไปใช้เพื่อการพัฒนาระบบสื่อสารหรือระบบเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจสอบปริมาณรถในลานจอดรถแบบอัตโนมัติได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

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

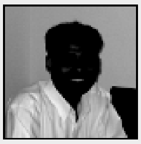
[2] C. Thongsopa, A. Intarapanich, M. Maungrat, "Temporal Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicle," 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, July 20-24, 2009

[3] T. S. Rappaport , *Wireless Communication: Principles & Practice*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2000.

[4] M. Hadzialic, V.Lipovac, N. Behlilovic, "Fading and Propagation Attenuation Based Explicit Analytical Model for the PDF of Mobile Channel Composite Envelope," Proceedings of the 18th International Conference, ICECom, Oct. 12-14, 2005: pp. 1-4 , 2005.

มังคลา ปวงรัตน์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2549 ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ การแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุและการออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง

ประพล จาระตะคุ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยสยาม ปี 2536 ปริญญาโท วิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2550 ปัจจุบันเป็นพนักงานองค์กรของรัฐในตำแหน่งวิศวกร สังกัดศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ การออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง



ชาญชัย ทองโสภา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี อิเล็กทรอนิกส์ (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2535 ปริญญาโท ไฟฟ้า-สื่อสาร จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ปี 2539 และปริญญาเอก ไฟฟ้า จากจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2542 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้าน วงจรทางด้านความถี่สูง สายอากาศแอคทีฟ และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ภาคผนวก ข

รายละเอียดทางเทคนิคของวงจรดิจิตอลมอดูเลชัน

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรดิจิตอลมอดูเลชันแบบ ASK และ FSK

ความถี่	433 MHz
อัตราเร็วแซมเปิล	512 ksps
กำลังส่งของสัญญาณ	-15 dBm
อัตราขยายสายอากาศ	1.2 dB

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรดิจิตอลมอดูเลชันแบบ BPSK

ความถี่	2.45 GHz
อัตราเร็วแซมเปิล	320 ksps
กำลังส่งของสัญญาณ	-10 dBm
อัตราขยายสายอากาศ	4 dB

ประวัติผู้เขียน

นายมังคลา ม่วงรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2525 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2549 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ ดังต่อไปนี้

1. ระดับชาติ ในงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7 (PEC-7) ในหัวข้อ *"Measurement of UHF Radio Wave Propagation in Parking"*, May 21-23, 2009, Songkha, Thailand.

2. ระดับชาติ ในงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32) ในหัวข้อ *"Measurement of ASK and FSK Wave Propagation in Parking"*, Octorber 28-30, 2009 Prajeenburi, Thailand.

3. ระดับนานาชาติ ในงาน International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEC 2009) ในหัวข้อ *"Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicle"*, July 20-24, 2009, Kyoto, Japan.