แบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย

EXPERIMENTAL EVALUATION SCHEME OF DVB-T2 IN THAILAND

ณัฐพันธ์ สุวรรณสุโข
NATTAPAN SUWANSUKHO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-M-010-018

แบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย

EXPERIMENTAL EVALUATION SCHEME OF DVB-T2 IN THAILAND

ณัฐพันธ์ สุวรรณสุโข

NATTAPAN SUWANSUKHO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-010-018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย

Thesis Title Experimental Evaluation Scheme of DVB-T2 in Thailand

นักศึกษา นายณัฐพันธ์ สุวรรณสุโข

รหัสประจำตัว 59601135

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-010-018

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิธรรม	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวภาค	
ผศ.ดร.สิรภพ	ตู้ประกาย	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิตอลทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย

นักศึกษา นายณัฐพันธ์ สุวรรณสุโข

รหัสนักศึกษา 59601135

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

พ.ศ. 2561

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย ภายใต้ทฤษฎีและหลักการการส่งผ่านของฟรีส เพื่อให้สามารถใช้ได้เหมาะสมกับเทคโนโลยีโทรทัศน์ระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในส่วนของขั้นตอนการทดลองวิจัย ผ่านหลักการส่งผ่านของฟรีส สำหรับข้อมูลที่ได้จากการวัด นำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ เช่น อัตราความผิดพลาดต่อบิต, อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน, อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต และความผิดพลาดทางเวกเตอร์ ซึ่งได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์นี้แล้วอย่างครบถ้วนสมบูรณ์ ซึ่งแนวคิดหรือแบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์ที่มีความเหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 อีกทั้งในการประเมินผลคุณภาพของสัญญาณ ได้เปรียบเทียบกับค่าระดับมาตรฐานการให้บริการ และตามข้อกำหนดของสำนักงานกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Experimental Evaluation Scheme of DVB-T2 in Thailand
Student	Mr.Nattapan Suwansukho
Student ID.	59601135
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Dr.Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis provides experimental evaluation scheme of DVB-T2 in Thailand under theory to appropriately used to the new technology. In measurement aspect carried out via Friis transmission theory and for the measured data used to analyze the required parameters such as Bit Error Rate (BER), Carrier to Noise Ratio (C/N), Modulation Error Ratio (MER), Error Vector Magnitude (EVM) as were completely shown in this thesis. Concept or evaluation scheme for DVB-T2. In this thesis is the one of appropriately scheme that used to evaluate the DVB-T2 in Thailand. The results to compare with operating standard value, that have been defined by Office of The National Broadcasting and Telecommunications Commission and Quasi Error Free (QEF) value that has been defined by DVB.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Experimental Evaluation Scheme of DVB-T2 in Thailand
Student	Mr.Nattapan Suwansukho
Student ID.	59601135
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Dr.Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis provides experimental evaluation scheme of DVB-T2 in Thailand under theory to appropriately used to the new technology. In measurement aspect carried out via Friis transmission theory and for the measured data used to analyze the required parameters such as Bit Error Rate (BER), Carrier to Noise Ratio (C/N), Modulation Error Ratio (MER), Error Vector Magnitude (EVM) as were completely shown in this thesis. Concept or evaluation scheme for DVB-T2. In this thesis is the one of appropriately scheme that used to evaluate the DVB-T2 in Thailand. The results to compare with operating standard value, that have been defined by Office of The National Broadcasting and Telecommunications Commission and Quasi Error Free (QEF) value that has been defined by DVB.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาและคอยควบคุมกำกับดูแลการทำวิทยานิพนธ์นี้ ให้เป็นไปตามหลักการและความถูกต้อง ตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์จาก ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และ ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านโดยมี รศ.ดร.จิระศักดิ์ ชาญวุฒิธรรม ประธานกรรมการสอบ รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีวภาค รองประธานกรรมการสอบ ผศ.ดร.สิรภพ ตู้ประกาย เป็นกรรมการ และ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นได้อย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับข้าพเจ้า และขอขอบคุณ คุณบัณฑิต รักวีรธรรม และ คุณธนดล เตียงทอง ตลอดจนนักศึกษา ปริญญา ตรี, โท และเอก ทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัย UWB-RS Lab ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นกำลังใจและ ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุก ๆท่าน

ณัฐพันธ์ สุวรรณสุโข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........ I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ II
กิตติกรรมประกาศ........ III
สารบัญ........ IV
สารบัญตาราง........ VIII
สารบัญรูป........ IX
บทที่ 1 บทนำ........ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา........ 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา........ 2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย........ 3
1.5 ขอบเขตการศึกษา........ 3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา........ 3

บทที่ 2 เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2........ 5
2.1 กล่าวนำ........ 5
2.2 ประวัติความเป็นมา........ 6
2.3 ลักษณะโดยทั่วไปของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2........ 7
2.3.1 ความจุช่องสัญญาณสูงสุด........ 8
2.4 ภาพรวมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2........ 9
2.5 เบสแบนด์ อินเตอร์เฟส (Baseband Interface........ 10
2.6 การแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (Forward Error Correction)........ 10
2.7 COFDM........ 11
2.7.1 โหมดคลื่นพาห์ปกติ (Normal Carrier Mode)........ 14
2.7.2 โหมดขยายคลื่นพาห์ (Extended Carrier Mode)........ 15
2.8 รูปแบบการมอดูเลตและแถบป้องกัน........ 16
2.8.1 แผนภาพคอนสเตลเลชั่นแบบปกติ (Normal Constellation Diagram).... 17
2.8.2 คำนิยามของเซลล์........ 18
2.8.3 แผนภาพคอนสเตลเลชั่นแบบหมุน (Rotated Constellation Diagram)... 18
2.9 อัตราข้อมูล (Data Rate)........ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio;C/N).................... 22
2.10.1 กล่าวนำ... 22
2.10.2 หลักการของการได้มาซึ่งค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน......... 23
2.10.3 ช่องการรับสัญญาณทั่วไป... 23
2.10.4 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน
สำหรับช่องสัญญาณเกาส์เซียน.. 24
2.10.5 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับ
ช่องสัญญาณไรเชียน และ เรย์ลี 29
2.11 การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 30
2.12 ข้อกำหนดในการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย 32
2.12.1 ข้อกำหนดทางด้านความถี่.. 32
2.12.2 ข้อกำหนดทางด้านระบบส่งออกอากาศ.. 32
2.12.3 ข้อกำหนดทางด้านเทคนิค... 32
2.12.3.1 สัญญาณเบสแบนด์และการบีบอัดสัญญาณ......................... 33
2.12.3.2 การส่งผ่านสัญญาณ.. 33
2.12.3.3 การมัลติเพลกซ์สัญญาณ.. 33
2.12.3.4 การปรับปรุงซอฟต์แวร์ให้เป็นปัจจุบัน.................................. 34
2.12.3.5 คำบรรยายใต้ภาพ... 34
2.12.3.6 วิธีการวัด.. 34
2.13 มาตรฐานการให้บริการที่สำนักงาน กสทช. กำหนด 35
2.14 สรุป.. 36

บทที่ 3 ทฤษฎีการวิเคราะห์ของช่องสัญญาณการส่งผ่านโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2.......... 37
3.1 กล่าวนำ.. 37
3.2 ช่องสัญญาณการส่งผ่าน... 37
3.3 อัตราความผิดพลาดของบิต (bBER).. 38
3.4 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (C/N).. 39
3.5 อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต (MER).. 40
3.6 ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ (EVM)... 41
3.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น.. 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.1 Line of Sight (LOS).. 42
3.7.2 Non Line of Sight (NLOS).. 42
3.7.3 Near Line of Sight (nLOS).. 43
3.8 รูปแบบการพิจารณาสัญญาณที่รับได้.. 43
3.8.1 การพิจารณาช่องสัญญาณเกาส์เซียน.. 43
3.8.2 การพิจารณาช่องสัญญาณไรเชียน.. 43
3.8.3 การพิจารณาช่องสัญญาณเรย์ลี.. 43
3.9 เป้าหมายของประสิทธิภาพของการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล รุ่นที่ 2.. 44
3.10 ฟังก์ชั่นความน่าจะเป็นพื้นฐาน.. 44
3.11 สรุป.. 44

บทที่ 4 แบบจำลองและขั้นตอนการทดลองวิจัย.. 45
4.1 กล่าวนำ.. 45
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.. 45
4.2.1 สายอากาศ.. 44
4.2.2 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2............. 45
4.3 ขั้นตอนการวิจัย.. 47
4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง 48
4.5 กำลังส่งของเครื่องส่ง 48
4.6 สรุป.. 49

บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัย.. 50
5.1 บทนำ.. 50
5.2 ผลการทดลองวิจัยและประเมินผล.. 50
5.2.1 ผลของการเปรียบเทียบความแรงสัญญาณระหว่างผลการวัดได้และ ผลที่ได้จากการคำนวณ.. 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน.......... 52
5.2.3 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดของการมอดูเลต.......... 53
5.2.4 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์.......... 54
5.2.5 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์และระยะทาง.......... 55
5.2.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ในเชิงสถิติ.......... 58
5.3 บทสรุป.......... 61

บทที่6 บทสรุปงานวิจัยและแนวทางการวิจัยในอนาคต.......... 62
6.1 กล่าวนำ.......... 62
6.2 สรุปผลของการทดลองวิจัย.......... 62
6.2.1 สรุปผลวิเคราะห์ความแรงสัญญาณเปรียบเทียบจากค่าที่คำนวณได้จากสมการหลักการส่งผ่านของฟรีสกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนาม.......... 62
6.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน. 62
6.2.3 สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต.......... 63
6.2.4 สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์และการพิจารณางสถิติ.......... 63
6.3 ข้อเสนอแนะและการวิจัยในอนาคต.......... 63
เอกสารอ้างอิง.......... 65
ภาคผนวก.......... 68
ประวัติผู้เขียน.......... 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่แตกกัน........ 8
2.2 ความจุช่องสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2........ 9
2.3 ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2........ 12
2.4 ขนาดของช่วงป้องกันในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (8 MHz Channel)........ 13
2.5 ระยะของแถบป้องกันสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ใน 8 MHz channel Raster........ 17
2.6 ค่ามุมของการหมุน........ 19
2.7 อัตราบิต (Bit Rate) สูงสุด และ การตั้งค่าที่แนะนำสำหรับ 8 MHz, 32k 1/128, PP7 (จาก TS 102 831)........ 20
2.8 ค่า Raw อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณเกาส์เซียน (จากตาราง 47 ใน TS 102 831)........ 24
2.9 Correction factor B และ C ทศนิยม 1 ตำแหน่ง........ 26
2.10 การลดลงของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนของแฟคเตอร์ D จาก 15 ถึง 32........ 27
2.11 QEF ของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล รุ่นที่ 2 PP2 32k แบนด์วิธปกติ GI 1/8........ 28
2.12 ค่าผลต่างของช่องสัญญาณไรเซียน และช่องสัญญาณเรย์ลีแบบ Static ที่อ้างอิงช่องสัญญาณเกาส์เซียน........ 29
2.13 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ........ 35
3.1 แฟคเตอร์ D การเสื่อมสลายของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน........ 40
4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง........ 46
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง........ 48
4.3 กำลังส่งของเครื่องส่ง........ 49
5.1 ค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ (EVM) ในทางสถิติ........ 59
7.1 ตำแหน่งการวัด 20จุดในกรุงเทพมหานคร........ 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ระบบโทรทัศน์ที่ใช้งานอยู่ทั่วโลก	5
2.2	โครงสร้างโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	6
2.3	การป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	11
2.4	โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	11
2.5	ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	12
2.6	สัญลักษณ์และช่วงป้องกันในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	12
2.7	สเปกตรัมด้วยแถบป้องกันของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	14
2.8	สเปกตรัมของ OFDM	15
2.9	การเปรียบเทียบขอบของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในโหมด 32K และ 1K	15
2.10	การเปรียบเทียบขอบของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในโหมด 32K โหมดขยาย คลื่นพาห์ กับ โหมดคลื่นพาห์ปกติ	16
2.11	การเปรียบเทียบภาพรวมของขอบสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในโหมด 32K โหมดขยายคลื่นพาห์ กับ โหมดคลื่นพาห์ปกติ	16
2.12	แสดงรูปแบบการมอดูเลตที่สามารถใช้งานได้ในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล รุ่นที่ 2	17
2.13	ขั้นตอนการแมปปิ้งเซลล์	18
2.14	แผนภาพคอนสเตลเลชั่นที่ถูกหมุน	19
2.15	แสดงการแยกกันเป็นอิสระระหว่าง I และ Q ด้วยการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น	19
2.16	การแมปปิ้งของการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชันและการดีเลย์ Q	20
2.17	การดีเลย์ Q ระหว่างเซลล์	20
2.18	อัตราบิตสูงสุด และ อัตราบิตสำหรับการตั้งค่าที่แนะนำ ด้วย 8 MHz แบนด์วิดท์ และ 32k PP7 (จาก TS 102 831)	22
2.19	การลดลงของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับแฟคเตอร์ D	27
2.20	สายอากาศสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ชนิดติดตั้งบนหลังคา	30
2.21	สายอากาศและเครื่องรับสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ชนิดพกพา และเคลื่อนที่	31
2.22	ภาพเปรียบเทียบระหว่างความคมชัดแบบสูงและความคมชัดแบบมาตรฐาน	31
2.23	โครงสร้างของ MPEG-4/HE-AACv2	32
3.1	บล็อกไดอะแกรมของการวิเคราะห์สำหรับ DVB-T2	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า
3.2 บล็อคไดอะแกรม แสดงการตรวจวัดค่า bBER, LBER........ 38
3.3 แสดงกลุ่มของสัญลักษณ์บนแผนภาพคอนสเตลเลชัน........ 41
3.4 แสดงตำแหน่งของเวกเตอร์ที่ผิดเพี้ยน........ 42
3.5 การแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบต่าง ๆ........ 43
4.1 รูปแบบการทดลองและวิจัย........ 45
4.2 สายอากาศที่ใช้สำหรับการทดลองวัด........ 46
4.3 เครื่องมือวิเคราะห์แถบความถี่........ 47
4.4 การเตรียมอุปกรณ์การวัด........ 47
4.5 ตำแหน่งที่กำหนดการวัด 20 ตำแหน่งในพื้นที่กรุงเทพมหานคร........ 48
5.1 ผลเปรียบเทียบระหว่างความแรงสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและการคำนวณทั้ง 5 โครงข่ายของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2........ 51
5.2 คุณภาพของสัญญาณโครงข่าย NBT ARMY1 MCOT TPBS และ ARMY2........ 52
5.3 คุณภาพของสัญญาณโครงข่าย NBT ARMY1 MCOT TPBS และ ARMY2........ 53
5.4 คุณภาพของสัญญาณโครงข่าย NBT ARMY1 MCOT TPBS และ ARMY2........ 54
5.5 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย NBT ที่ความถี่ 514 MH........ 55
5.6 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย ARMY1 ที่ความถี่ 594 MHz........ 56
5.7 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย MCOT ที่ความถี่ 626 MHz........ 56
5.8 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย TPBS ที่ความถี่ 658 MHz........ 57
5.9 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย ARMY2 ที่ความถี่ 722 MHz........ 58
5.10 ฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ โครงข่าย NBT, ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2........ 59
5.10 ฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ โครงข่าย NBT, ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2........ 60
6.1 โทรทัศน์ไฮบริด (Hybrid broadcast broadband TV)........ 64
7.1 เอกสารบันทึกผลการตรวจวัดภาคสนามร่วมกับสำนักงาน กสทช. และ อสมท........ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการออกอากาศ และการให้บริการ โทรทัศน์ภาคพื้นดินในประเทศไทยปัจจุบันนั้น ถือได้ว่ามีบทบาทและความสำคัญมากสำหรับการให้บริการข้อมูลข่าวสารต่างๆ และทำให้ประชาชนได้รับข้อมูลข่าวสาร ความรู้ต่างๆ ได้อย่างทันท่วงที เพื่อนำเอาข้อมูลข่าวสาร หรือ สาระความรู้ต่างๆ เหล่านั้นมาพัฒนาคุณภาพชีวิต สังคม และ ประเทศชาติต่อไป ไม่ว่าจะอยู่บริเวณไหนของเขตเมือง และ ชุมชนต่างๆ ซึ่งในปัจจุบัน ประเทศไทยได้มีการพัฒนาระบบการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดิน จากระบบเดิมซึ่งเป็นระบบแอนะลอก พัฒนาเป็นระบบ ดิจิทัล เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของการให้บริการข้อมูลข่าวสารต่างๆ ได้มากขึ้น

เทคโนโลยีการออกอากาศ และ การให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ที่ถูกนำมาใช้งานในประเทศไทยคือ โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (Digital Video Broadcasting Terrestrial - Second Generation;DVB-T2) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ETSI EN 302 755 [1] ได้ถูกนำมาใช้งานในการให้บริการแก่ประชาชน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่สุด และ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ณ. ขณะนี้ โดยมีจุดเด่นคือ สัญญาณมีความคงทนต่ออุปสรรคต่างๆ มีระบบการเข้าสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูง และ มีความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถส่งออกอากาศจำนวนช่องโทรทัศน์ได้มากขึ้น และ มีระบบความคมชัดสูงเพิ่มเข้ามา ทำให้สามารถรองรับระดับความคมชัดต่างๆ ได้ดังนี้ โทรทัศน์ระดับความคมชัดมาตรฐาน (SDTV), โทรทัศน์ระบบความคมชัดสูง (HDTV) [2] และ โทรทัศน์ระบบความคมชัดสูงพิเศษ (UHD) [3] โดยผู้ให้บริการแต่ละรายสามารถที่จะเพิ่มช่องโทรทัศน์เข้าไปได้หลากหลายช่อง และ ระดับความคมชัดที่หลากหลายเช่นกัน โดยแต่ละช่องโทรทัศน์นั้นสามารถที่จะตั้งค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันออกไปได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและระดับของคุณภาพของสัญญาณและการให้บริการ รวมทั้งระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (DVB-T2) ยังสามารถให้บริการได้ทั้งการรับสัญญาณแบบประจำที่ พกพา และ แบบเคลื่อนที่อีกด้วย

ข้อดีของระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 อีกอย่างหนึ่งคือ ที่ภาครับต้องการระดับของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio) ที่ไม่สูง [1] ส่งผลให้ที่ภาคส่งไม่ต้องใช้กำลังส่งสูงมากเกินความจำเป็นดังเช่นระบบแอนะลอกเดิม ซึ่งเป็นการลดต้นทุนของการออกอากาศ แต่เนื่องจากระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นถูกนำมาใช้งานในการให้บริการแก่ประชาชนในประเทศไทยได้ไม่นาน จึงยังไม่มีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ อัตราส่วนความผิดพลาดของบิต และอื่นๆ จึงส่งผลให้ไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ในการส่งออกอากาศของผู้ให้บริการได้อย่างเหมาะสม

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาและประเมินผลประสิทธิภาพของสัญญาณในส่วน อัตราส่วนความผิดพลาดของบิต และ ระดับสัญญาณขั้นต่ำ ที่ภาครับต้องการ เพื่อปรับระดับของกำลังส่งของเครื่องส่ง ให้เหมาะสม เพื่อเป็นการลดต้นทุนของการให้บริการอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โดยพิจารณาในส่วนของอัตราส่วนความผิดพลาดของบิต ระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ภาครับต้องการ เพื่อปรับระดับความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ รวมทั้งฟังก์ชันการเพิ่มความคงทนของสัญญาณต่ออุปสรรคต่างๆ ในด้านของสถิติ ไม่ว่าจะเป็น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวน และ ผลของการใช้งานฟังก์ชั่นการเพิ่มความคงทนของสัญญาณที่ได้ผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติอีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการส่งผ่านโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ประสิทธิภาพช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 บนพื้นฐานหลักการส่งผ่านของฟรีส, อัตราความผิดพลาดต่อบิต, อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน, อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต และ ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์
3. เพื่อศึกษาออกแบบและทำการวัดช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร
4. เพื่อประเมินผลและเปรียบเทียบสัญญาณการส่งผ่านโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โดยพิจารณา อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต (Modulation Error Ratio;MER), อัตราความผิดพลาดต่อบิต (Bit Error Ratio;BER), ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ (Error Vector Magnitude;EVM)
5. เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาวิจัย มาวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และรายงานต่อสำนักงาน กสทช. และ สถานีโทรทัศน์

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากประเทศไทยได้เปลี่ยนถ่ายระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินจากแอนะลอกมาเป็นดิจิทัล สมมติฐานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พิจารณา ประสิทธิภาพของการส่งผ่านโทรทัศน์ในระบบดิจิทัลภาคพื้นดิน และมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการให้บริการข้อมูลข่าวสาร สาระความรู้ ที่เป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาและขับเคลื่อนประเทศไปสู่ยุคดิจิทัล และ เพื่อตอบสนองนโยบายรัฐ ไทยแลนด์ 4.0 ดังนั้นคุณภาพของการให้บริการและการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้ประชาชนสามารถที่จะได้รับข้อมูล ข่าวสาร สาระความรู้ ได้อย่างทั่วถึง และ ทันเหตุการณ์ เพื่อให้การให้บริการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพของช่องสัญญาณการส่งผ่าน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาวิเคราะห์ช่องสัญญาณการส่งผ่านมีความสำคัญยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นระบบแอนะลอกหรือระบบดิจิทัล เพราะฉะนั้นเพื่อทำการวิเคราะห์และประเมินผลให้ถูกต้องจึงจำเป็นอย่างยิ่งต้องพิจารณาศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านและประเมินผลประสิทธิภาพของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยุคที่ 2 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในพื้นที่เขตเมืองที่มีตึกหนาแน่น บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส และ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น แบบระยะเส้นสายตา โดยในการทดลองได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ทำการตรวจวัดและบันทึกผล ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการตรวจวัดของสำนักงาน กสทช. จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองวัดมาประเมินผล และ ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์และความแตกต่าง และได้ศึกษาถึงผลของการใช้งานการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น (Rotated Constellation) ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเรื่องนี้มาก่อน และผลจากการวิจัยนี้ ทำให้เราได้ทราบถึงปัญหาของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย ซึ่งเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่เกิดขึ้นและผลที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นไปตามหลักการทฤษฎีและมีประโยชน์ในอนาคต

1.5 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่นำมาใช้ในประเทศไทย และวิทยานิพนธ์นี้ได้เล็งเห็นความสำคัญ หลักการ หรือวิธีการวิเคราะห์ และประเมินผลเชิงประจักษ์ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อเป็นรูปแบบ ซึ่งมีแบบแผนในการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีหลักการส่งผ่านของฟรีส, อัตราความผิดพลาดต่อบิต, อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน, อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต และขนาดความผิดพราดทางเวกเตอร์ จึงได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

จากแนวคิดและหลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีและหลักการประเมินผลการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส จากนั้นกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัย ในส่วนของการวัดคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับนั้น ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองวิจัย และ รูปแบบวิธีการวัดโดยยึดหลักตามแบบแผนที่ออกแบบไว้ ให้มีความเหมาะสมและใช้ได้จริง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาเป็น 6 บท คือ

บทที่ 1 ได้กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการศึกษา และ ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึง เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ประกอบไปด้วยประวัติความเป็นมา ระบบหรือการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ข้อกำหนดต่างๆ ทฤษฎีความจุช่องสัญญาณสูงสุด ภาพรวมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (DVB-T2) เบสแบนด์อินเตอร์เฟส (Baseband Interface) วิธีแก้ไขความผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (Forward Error Correction), พารามิเตอร์ COFDM, Normal Carrier Mode Extended Carrier Mode รูปแบบการมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูเลตและแถบป้องกัน แผนภาพคอนสเตลเลชั่นแบบปกติ (Normal Constellation Diagrams) คำนิยามของเซลล์ แผนภาพคอนสเตลเลชั่นแบบหมุนด้วยการหน่วงเวลา Q (Rotated Q-delayed Constellation Diagrams) อัตราข้อมูล (Data Rate) อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier-to-noise ratio (C/N) โครงสร้างเฟรมข้อมูล (Frame Structure) การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

บทที่ 3 ได้กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย กล่าวนำ ช่องสัญญาณการส่งผ่าน อัตราความผิดพลาดของบิต (Bit Error Rate) ก่อน LDPC (bBER) อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio; C/N), อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต (Modulation Error Ratio; MER) ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ (Error Vector Magnitude;EVM) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น รูปแบบของการรับสัญญาณ (Reception Mode) แบบต่างๆ เป้าหมายของประสิทธิภาพของการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ฟังก์ชั่นควาน่าจะเป็นพื้นฐาน และ สรุป

บทที่ 4 ได้กล่าวถึง รูปแบบการจำลองและขั้นตอนวิจัย ประกอบด้วย กล่าวนำ รูปแบบในการวัด ขั้นตอนการวิจัย พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง กำลังส่งของเครื่องส่ง มาตรฐานการให้บริการที่สำนักงาน กสทช. กำหนด

บทที่ 5 ได้กล่าวถึง ผลการทดลองวิจัยและการประเมินผล ประกอบด้วย การนำผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแรงสัญญาณระว่างที่ตรวจวัดได้และผลที่ได้จากการคำนวณ คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดของการมอดูเลต คุณภาพของสัญญาณโดยพิจารณาความสัมพันธ์กับขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์และระยะทาง และผลการวิเคราะห์ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ในเชิงสถิติ

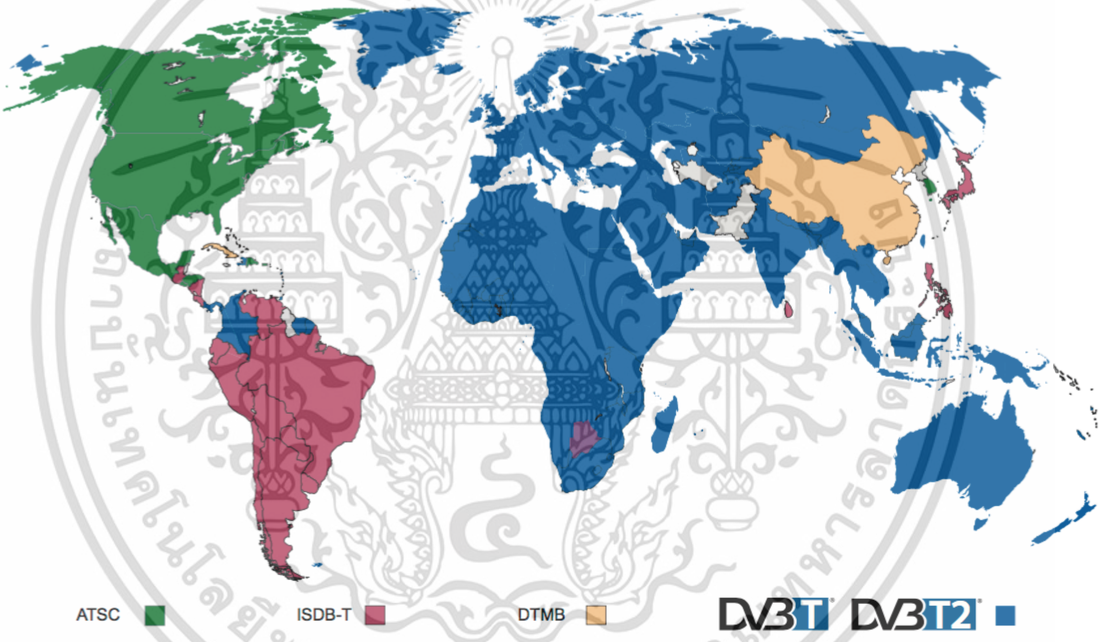
บทที่ 6 ได้สรุปและเสนอแนวทางการวิจัยในอนาคต โดยได้สรุปผลการศึกษาทดลองวิจัย และสรุปผลการวิเคราะห์ความแรงสัญญาณเปรียบเทียบจากค่าที่คำนวณได้จากสมการหลักการส่งผ่านของฟรีสกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนาม สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณในรูปแบบอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณหรืออัตราความผิดพลาดต่อบิตเมื่อใช้งานฟังก์ชั่นการหมนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น สรุปผลการวิเคราะห์ขนาดความผิดพลาดทางเวกเตอร์ และ ข้อเสนอแนะและการวิจัยในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีการส่งออกอากาศระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยุคที่ 2 (DVB-T2) ที่ได้ถูกนำมาใช้ทดแทนระบบการออกอากาศโทรทัศน์ระบบอนาล็อกเดิม ซึ่ง DVB-T เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาโดย DVB Project ในปี 2006 จุดประสงค์หลักเพื่อที่จะเพิ่มความจุ (Capacity), และความยืดหยุ่น (Flexibility) ให้กับระบบ DVB-T ซึ่งในเวอร์ชั่นแรกของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล (DVB-T) ถูกประกาศโดย ETSI ในชื่อ EN 302 755 ในปี 2009 [1].



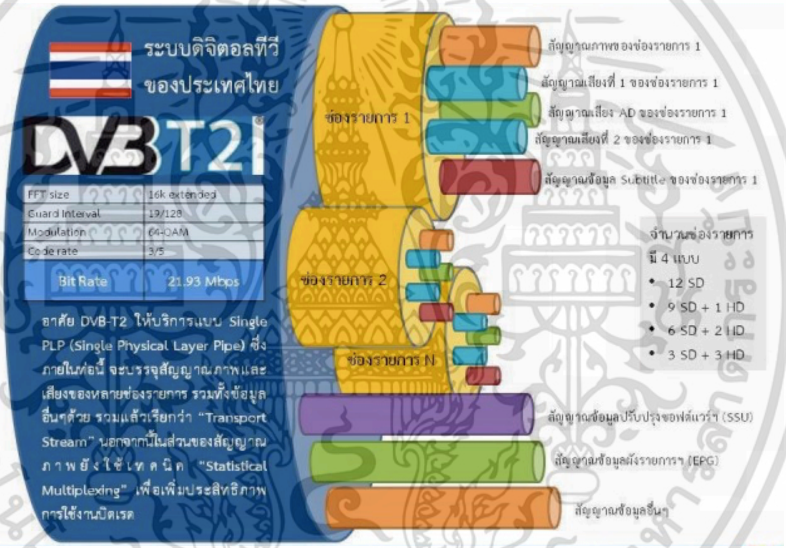
รูปที่ 2.1 ระบบโทรทัศน์ที่ใช้งานอยู่ทั่วโลก [4]

DVB-T2 เป็นระบบการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ถูกพัฒนาต่อจาก DVB-T ซึ่งการกำเนิดขึ้นของระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นได้รับการผลักดันจาก Higher Spectral Efficiency เพื่อให้สามารถเปลี่ยนถ่ายจากระบบอนาล็อกเดิมได้ เพื่อให้สามารถเปลี่ยนถ่ายจากระบบ DVB-T เดิมได้ Higher Spectral Efficiency หมายถึง ด้วยจำนวน Spectrum ที่เท่ากันสามารถที่จะส่งออกอากาศช่องโทรทัศน์ได้มากกว่า หรือ สามารถที่จะส่งออกอากาศจำนวนช่องเท่าเดิมได้ในคุณภาพของสัญญาณภาพและเสียงที่สูงกว่า และ คุณภาพของพื้นที่ให้บริการที่ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานต่างๆ ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินที่ถูกใช้งานอยู่ทั่วโลก ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งมาตรฐานแรก เป็นมาตรฐาน Advance Television System Committee in USA (ATSC) ซึ่งถูกใช้งานอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และ เกาหลีใต้ มาตรฐานต่อมาคือ Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB) ซึ่งถูกใช้งานอยู่ในประเทศญี่ปุ่น บลาซิล และกลุ่มประเทศอเมริกาใต้ มาตรฐานถัดมาเป็น Digital Multimedia Broadcasting (DMB-T) ที่ถูกพัฒนาและใช้งานอยู่ในประเทศจีน และมาตรฐานสุดท้ายคือ Digital Video Broadcasting (DVB) เป็นมาตรฐานที่ถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในหลายๆ ประเทศ รวมทั้งประเทศไทย

ในเงื่อนไขของการพัฒนา Source Coding (MPEG-4) ถูกนำมาใช้งาน อัตราขยายในการส่งออกอากาศนั้นเป็นที่น่าสังเกตุ ยกตัวอย่างเช่น สามารถที่จะส่งออกอากาศหลายๆ โปรแกรม หรือ ช่องได้ภายใน 1 มัลติเพลกซ์ ในขณะที่ยังคงคุณภาพของสัญญาณเสียงและภาพอยู่เช่นเดิม หรือ สามารถที่จะส่งได้หลายๆ ช่องสัญญาณหรือโปรแกรมในคุณภาพแบบมาตรฐานความคมชัดสูง HD (High Definition) [2]



รูปที่ 2.2 โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ของประเทศไทย [5]

และอีกประการหนึ่งคือ พื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณที่ถูกส่งออกจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถที่จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ยังคงคุณลักษณะของเครื่องส่ง เช่น รูปแบบการรับสัญญาณ คุณภาพของสัญญาณภาพ และ จำนวนของช่องสัญญาณ

2.2 ประวัติความเป็นมา

ในปี ค.ศ. 2006 DVB ตัดสินใจที่จะศึกษาทางเลือกสำหรับการอัพเกรดระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐานหรือยุคที่ 1 โดยตั้งชื่อกลุ่มการศึกษานี้อย่างเป็นทางการว่า TM-T2 (Technical Module on Next Generation DVB-T) เพื่อที่จะพัฒนาโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยี ในเฟสแรกของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รุ่นที่ 2 ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2007 เพื่อที่จะทำให้การรับสัญญาณแบบประจำที่และแบบพกพาได้ดีที่สุด โดยใช้ระบบสายอากาศเดิม เนื่องจากในเฟสที่ 2 และ 3 จะทำการศึกษาเรื่องการให้บริการข้อมูลที่มีคุณภาพสูง (ด้วยโครงสร้างสายอากาศใหม่) และ การรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ โดยระบบใหม่นี้จะให้ความจุช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 30% เมื่อเทียบกับระบบเดิม ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานช่องสัญญาณที่โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยุคที่ 1 ใช้งานอยู่ [6]

สถานีโทรทัศน์ BBC ITV Channel 4 Channel 5 ได้บรรลุข้อตกลงร่วมกับหน่วยงานที่ออกข้อกำหนดคือ OFCOM ประเทศอังกฤษเพื่อที่จะเปลี่ยนผู้ให้บริการ Multiplexer 1 รายในประเทศอังกฤษไปใช้งานระบบ DVB-T2 เพื่อที่จะเพิ่มความจุช่องสัญญาณสำหรับโทรทัศน์ความคมชัดสูงหรือ HDTV ผ่านทางการออกอากาศภาคพื้นดิน โดยพวกเขาคาดหวังภูมิภาคแรกที่ให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที Granada ในเดือน พ.ย. ปี ค.ศ. 2009 และ OFCOM ได้ประกาศใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในวันที่ 3 เม.ย. ค.ศ. 2008 [6]

2.3 ลักษณะโดยทั่วไปของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

ในระบบ DVB-T หรือ โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล นั้นได้ใช้วิธีการมอดูเลทสัญญาณแบบ COFDM แต่ด้วยแผนภาพคอนสเตลเลชั่น (Constellation Diagram) ที่เปลี่ยนแปลงและขยายออกไป การป้องกันข้อผิดพลาดที่ถูกนำมาใช้งานคือ วิธีแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (FEC) ถูกกำหนดอยู่ใน DVB-S2 เช่น การเข้ารหัส BCH ที่ส่วนนอกของการป้องกันข้อผิดพลาด และ การเข้ารหัส LDPC ที่ส่วนในของการป้องกันข้อผิดพลาดการด้วยการสับเปลี่ยนบิต (Bit Interleaving) [6]

โครงสร้างของการแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (FEC) ทั้งหมดสอดคล้องกับโครงสร้างเฟรมของ DVB-S2 รหัส LDPC (Low Density Parity Check Codes) เป็นที่รู้จักตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 แต่ต้องใช้กำลังในการประมวณผลในเครื่องรับสัญญาณมาก และสามารถใช้งานได้เมื่อเร็วๆ นี้ เนื่องจากเทคโนโลยีชิพประมวณผลที่พัฒนาขึ้นมา ตั้งแต่ช่วงฤดูใบไม้ผลิของปี ค.ศ. 2006 จนถึงเดือน มี.ค. ปี ค.ศ. 2008 มีการประชุมโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 จำนวน 7 ครั้ง นานหลายวัน การประชุมในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2008 ได้มีการนำเอกสารเบื้องต้นมาใช้ซึ่งได้รับการตีพิมพ์โดย ETSI เป็นฉบับร่างเมื่อเดือน พ.ค. ปี ค.ศ. 2008 และในฤดูใบไม้ร่วง ปี ค.ศ. 2008 ได้มีการนำแนวทางการดำเนินงานและ T2-MI (T2-Modulator Interface) มาใช้ [6]

โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 อาจจะมาช้าหรือเร็วเกินไปสำหรับหลายๆ ประเทศซึ่งขึ้นอยู่กับมุมมอง เนื่องจากโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล (DVB-T) ได้รับการแนะนำในประเทศเหล่านั้นแล้ว และการเปลี่ยนแปลงไปโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (DVB-T2) อาจจะไม่เหมาะในช่วงเวลานั้นหรือไม่อาจยอมรับได้ โครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลยุคที่ 1 ในประเทศอังกฤษเป็นโครงข่ายแรกที่ใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ.1998 การก้าวกระโดดของเทคโนโลยีจากโทรทัศน์มาตรฐานความคมชัดปกติ (SDTV) [2] ไปสู่โทรทัศน์มาตรฐานความคมชัดสูง (HDTV) [2] อาจเป็นเหตุผลที่เหมาะสมในการนำเสนอคู่ขนานของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการออกอากาศภาคพื้นดินเป็นสิ่งสำคัญที่นี่

ในประเทศต่าง ๆ เช่น เยอรมนี ซึ่งพื้นที่ครอบคลุมของการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินไม่ได้เป็นเส้นทางหลักมานานหลายปีแล้วโทรทัศน์มาตรฐานความคมชัดสูง (HDTV) [2] ภาคพื้นดิน และด้วยเหตุผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 จึงดูเหมือนจะไม่มีผลใดๆ ในขณะนี้ โดยทางหลักการสถานการณ์ที่เหมาะสำหรับการนำโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มาใช้งาน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- เป็นประเทศที่ใช้โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลอยู่แล้ว
- ประเทศที่ยังคงใช้งานระบบแอนะลอกทั้งประเทศ
- ประเทศที่ต้องการใช้ระบบใหม่ที่ไม่สามารถใช้งานได้ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

2.3.1 ความจุช่องสัญญาณสูงสุด

อย่างไรก็ตามก่อนที่จะกล่าวถึงโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในรายละเอียดขอบเขตทางทฤษฎีของ ช่องการส่งสัญญาณภาคพื้นดิน จะถูกนำมาพิจารณาเป็นอย่างแรก บนพื้นฐานของช่องสัญญาณขนาด 8 MHz พิจารณาไปที่เงื่อนไขการรับสัญญาณในรูปแบบต่างๆ จากการรับสัญญาณแบบพกพาภายในอาคารไปจนถึงการรับสัญญาณประจำที่ด้วยสายอากาศแบบภายนอกโดยมีลักษณะที่รู้จักกันในชื่อโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล อัตราข้อมูลสูงสุดที่เป็นไปได้ในทางทฤษฎี ถูกแสดงไว้อย่างประมาณการโดย Shannon-Limit ผ่านทางสมการดังต่อไปนี้ ถ้าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) มีค่าประมาณหรือมากกว่า 10 dB [6]

$$C = BW\mathbf{Log_2}\,(1+SNR) \qquad (2.1)$$

ซึ่ง C = ความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity)
BW = แบนด์วิดท์ (Bandwidth)
SNR = อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) (dB)

ตารางที่ 2.1 ค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่แตกต่างกัน [6]

SNR (dB)	Max channel capacity(Mbit/s)	Comment
10	26.7	
12	32	Poor portable indoor reception
15	40	Portable indoor reception
18	48	Good portable indoor reception
20	53.3	Poor reception with outdoor antenna
25	66.7	Good roof antenna reception
30	80	Very good roof antenna reception

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป้าหมายของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ให้การเพิ่มอัตราข้อมูลให้สูงกว่าเดิม 30%-50% จึงสามารถคาดหวังว่าเมื่อได้รับเงื่อนไขที่เทียบเท่าอัตราข้อมูลต่อไปนี้สามารถที่จะทำได้

การป้องกันข้อผิดพลาดเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำให้ได้ความจุช่องสัญญาณเพิ่ม 30% และความสามารถเพิ่มเติม เช่น

- 16K และ 32K โหมด
- Extended carrier mode
- 256QAM Modulation
- The rotated Q-delayed constellation diagrams

โดยในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นมีแบนด์วิดท์เพิ่มเข้ามาใหม่เมื่อเปรียบเทียบกับโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลยุคที่ 1 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความจุช่องสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [6]

DVB-T	DVB-T2
-	1.7 MHz
-	5 MHz
6 MHz	6 MHz
7 MHz	7 MHz
8 MHz	8 MHz
-	10 MHz

2.4 ภาพรวมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นสามารถที่จะรองรับสัญญาณขาเข้า MPEG-2 ได้หลายสัญญาณ หรือสัญญาณเบสแบนด์ทั่วไปไม่เกิน 255 และอัตราข้อมูลสูงขึ้นอย่างน้อย 30% เนื่องจากการพัฒนาการป้องกันข้อผิดพลาด BCH และ LDPC ซึ่งมีความเข้ากันได้กับแผนความถี่ Geneva ปี ค.ศ. 2007 (8, 7, 6 MHz bandwidths) โดยมีแบนด์วิดท์เพิ่มเติม 1.7 MHz และ 10 MHz สามารถที่จะรับสัญญาณแบบประจำที่และแบบเคลื่อนที่ได้ โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นใช้งานการมัลติเพล็กสัญญาณแบบ COFDM ซึ่งมีขนาดของ FFT โหมดให้เลือกใช้งานมากเช่น 1K, 2K, 4K, 16K และ 32K และ Guard Interval 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 19/256 และ 1/128 และรูปแบบการมอดูเลตดังนี้ QPSK 16 QAM 64QAM และ 256QAM โดยในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นได้เพิ่มคุณสมบัติการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น (Rotated constellation diagram) เข้าไปเพื่อเพิ่มคุณภาพของสัญญาณ และมีการปรับใช้งานไพลอต (Pilot) ที่หลากหลายเพื่อความเหมาะสมของการรับสัญญาณในแต่ละรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เบสแบนด์ อินเตอร์เฟส (Baseband Interface)

เบสแบนด์อินเตอร์เฟสของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลให้สัญญาณขาเข้าได้มากกว่า 1 สัญญาณ ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลนั้นไม่ได้มุ่งเป้าไปที่สัญญาณขาเข้าแบบ MPEG-2 เท่านั้น แต่ยังคงรองรับการใช้งาน Generic-Stream ตามที่สัญญาณขาเข้าสามารถที่จะส่งเข้ามาได้ สูงสุดได้ถึง 255 Input Stream ในเบื้องต้นสัญญาณสตรีมเหล่านี้ที่จะถูก Multiplexed เข้าด้วยกันด้วยมาตรฐาน T2-MI ซึ่งเป็นตัวมอดูเลชั่นของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สัญญาณสตรีมจะถูกรวมเข้าด้วยกันใน Playout center และ DVB-T2 Modulator จะถูกจ่ายให้เพียงแค่หนึ่งสัญญาณสตรีมผ่านทาง DVB-T2-MI คล้ายกับ ETI สตรีมใน DAB ข้อมูลสตรีมนี้ จะถูกป้อนด้วยข้อมูลที่จำเป็นทั้งหมดสำหรับตัวมอดูเลเตอร์ นอกจากนี้ยังมีการประทับเวลาสำหรับการซิงโครไนส์เครือข่ายความถี่เดียว มีสองโหมดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ได้แก่ โหมด A = Single PLP (Physical Layer Pipe) และโหมด B = หลายๆ PLP เฉพาะในกรณี Mode A เท่านั้นที่ขั้นตอนการประมวลผลทั้งหมดเกิดขึ้นใน modulator เอง ในขณะที่ในกรณีของ Mode B อินเตอร์เฟซ T2-MI จะทำงานตามตารางเวลาทันที

มีคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่มีผลต่อการประมวลผลสัญญาณอินพุต ในโหมด B คุณสามารถทำงานกับการเข้ารหัสและการมอดูเลตตัวแปรและสามารถทำได้แบบไดนามิค ตัวอย่างเช่น ในโครงสร้างโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ถัดไป พารามิเตอร์การส่งอาจเปลี่ยนแปลงและอาจต้องมีการส่งสัญญาณแบบไดนามิค นี้จะกระทำในช่อง padding ของส่วนหัวเบสแบนด์ และมีทางเลือกร่วมของ PLP ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลสำหรับ PLP ทั้งหมดหรือบาง PLP ในโหมด B ความโดดเด่นเพิ่มเติมถูกสร้างขึ้นระหว่าง

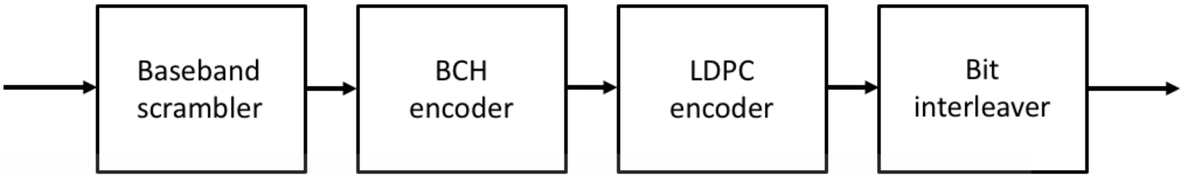
- HEM = High Efficiency Mode (สำหรับ MPEG-2 transport stream และ GSE) และ
- NM = Normal Mode

2.6 การแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (Forward Error Correction)

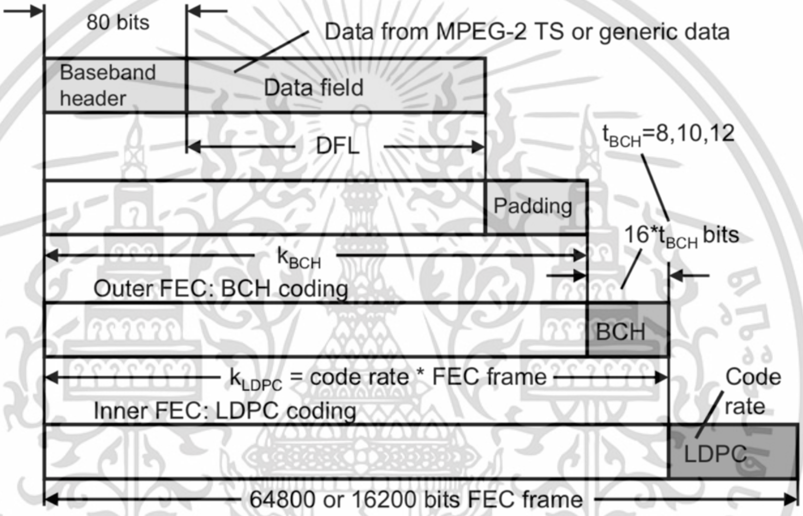
ในส่วนของการป้องกันข้อผิดพลาดที่ปรับเปลี่ยน ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ที่นำไปสู่อัตราขยายของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N) ที่มากขึ้นจนเข้าใกล้ Shannon-Limit โดยรวม อัตราการส่งข้อมูลสุทธิถูกเพิ่มขึ้นถึง 30% เช่นเดียวกับในโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมรุ่นที่ 2 การป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ประกอบด้วย baseband scrambler, BCH-block encoder, LDPC-block encoder และตามด้วย Bit Interleaver ในส่วนของ มอดูเลเตอร์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โครงสร้างของเบสแบนด์ (baseband) ประกอบไปด้วย baseband header และ padding-block จะถูก scrambled แรก (baseband scrambler) และส่งไปยังบล็อก FEC ซึ่งจะมีการเพิ่มรหัส BCH(Bose Chaudhuri Hoquenghem) ไว้ก่อน และส่งต่อไปยัง FEC บล็อก โดยจะมีการใส่ BCH เป็นอันดับแรก หลังจากนั้นการป้องกันข้อผิดพลาดเพิ่มเติม ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตรารหัส (Code rate) ที่สามารถเลือกได้จะถูกเพิ่มลงในตัวเข้ารหัส LDPC (Low Density Parity Check Code) อัตราที่เป็นไปได้คือ 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5 และ 5/6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอัตรารหัส 1/2 หมายถึงการป้องกันข้อผิดพลาดสูงสุด และ อัตรารหัส 5/6 หมายถึงการป้องกันข้อผิดพลาดต่ำสุด



รูปที่ 2.3 การป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [6]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [6]

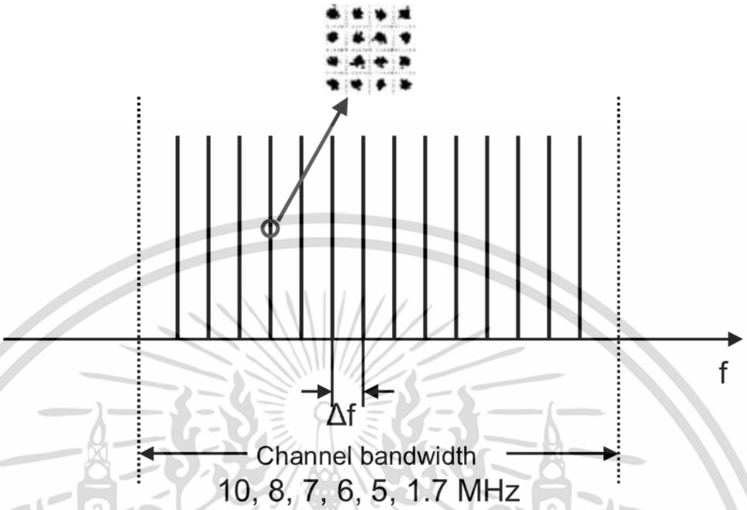
สามารถใช้โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (FEC) ตั้งแต่ระยะสั้น 16K จนถึงระยะ 64K ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ความแตกต่างของสมรรถนะการทำงานด้วย LDPC encoder Bit interleaver เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio) ที่ต้องการอยู่ในระดับต่ำ โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (FEC) แบบสั้นอาจเป็นประโยชน์สำหรับข้อมูลที่มีอัตราต่ำและแบบยาวจะดีกว่าสำหรับสตรีมข้อมูลที่มีอัตราสูงขึ้น อัตราข้อมูลที่เป็นไปได้ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (DVB-T2) อยู่ระหว่าง 7.49 Mbit/s (QPSK, CR = 1/2) และ 50.32 Mbit/s (256QAM, CR = 5/6) [6]

2.7 COFDM

ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นสามารถรองรับแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่ 1.7, 5, 6, 7, 8 และ 10 MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แบนด์วิดท์สัญญาณที่แท้จริงจะแคบลงเล็กน้อยเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

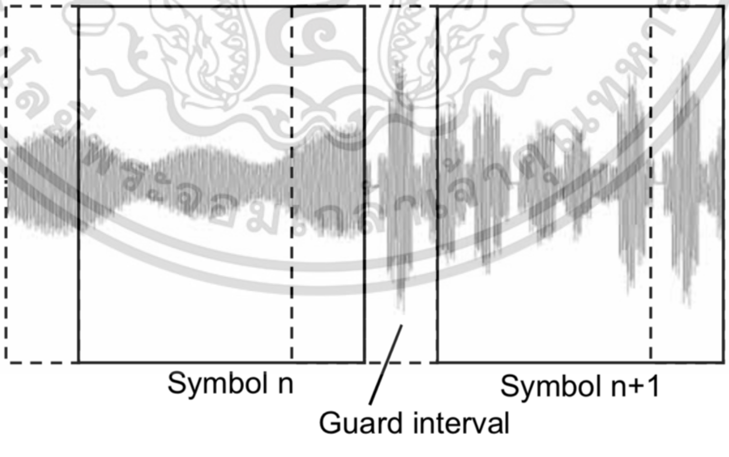
แถบป้องกันที่ด้านบนและด้านล่างของช่อง DVB-T2 ดังแสดงในตาราง 2.2 และที่นอกเหนือจากข้อยกเว้น (สัญลักษณ์ P1) ช่วงป้องกัน (Guard interval) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ยังเป็น cyclic prefix (CP) ใน DVB-T2 นั่นคือการทำซ้ำของสัญลักษณ์ปลายในความยาวที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 2.5 ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [6]

ตารางที่ 2.3 ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [6]

Bandwidth (MHz)	1.7	5	6	7	8	10
Elementary period [us]	71/131	7/40	7/48	1/8	7/64	7/80
Signal bandwidth [MHz]	1.54	4/76	5.71	6.66	7.61	9.51



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์และช่วงป้องกันในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [6]

โหมด 16K และ 32K ถูกจัดเตรียมไว้เพื่อให้ได้ time overhead ที่น้อยลงและทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลสูงขึ้น (Overhead 6% ในโหมด 32K, 25% ในโหมด 8K) โดยมีช่วงความปลอดภัยเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการป้องกันของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ที่ยาวนานที่สุดอยู่ในช่วง 0.224 ms และมีค่าเท่ากับ 0.532 ms ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2, 32K, g = 19/128 ให้ระยะห่างของเครื่องส่งสัญญาณสูงสุด 160 กิโลเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แบนด์วิดท์สัญญาณแคบ (7, 6, 5 และ 1.7 MHz) นำไปสู่สัญลักษณ์ที่มีความยาวมากยิ่งขึ้น และยังนำไปสู่ช่วงการป้องกันที่ยาวขึ้นอีกด้วย และด้วยความสามารถในการรักษาความปลอดภัยเหล่านี้ ทำให้โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถใช้โครงข่ายความถี่เดียว (Single Frequency Network;SFN) ทั่วประเทศได้ โหมด 32K เป็นโหมดที่มีสัญลักษณ์ที่ยาวที่สุดและมี Overhead น้อยที่สุดในช่วงป้องกัน ในเวลาเดียวกันมันทำหน้าที่ในการใช้เครือข่ายความถี่เดียวที่ใหญ่ที่สุด อย่างไรก็ตามในโหมด 32K นั้นเนื่องจากระยะห่างของคลื่นพาห์ย่อย (Sub Carrier) แคบมากดังนั้นโหมดที่เหมาะสำหรับการใช้งานบนโทรศัพท์มือถือคือโหมด 1K ที่มีระยะห่างของคลื่นพาห์ย่อยที่กว้าง แต่ก็มีสัญลักษณ์ที่สั้นที่สุดด้วยดังนั้นจึงเป็นหนึ่งที่เหมาะสำหรับการสร้างโครงข่ายความถี่เดียวที่มีขนาดใหญ่

ตารางที่ 2.4 ขนาดของช่วงป้องกันในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (8 MHz Channel)

Mode with Symbol duration [ms]		g=1/128	g=1/32	g=1/16	g=19/256	g=1/8	g=19/128	g=1/4
32K (3.584ms)	Duration [ms]	0.028	0.112	0.224	0.266	0.448	0.532	-
	Distance [km]	8.4	33.6	67.2	79.7	134.3	159.5	-
16K (1.792ms)	Duration [ms]	0.014	0.056	0.112	0.133	0.224	0.266	0.448
	Distance [km]	4.2	16.8	33.6	39.9	67.2	79.75	134.3
8K (0.896ms)	Duration [ms]	0.007	0.028	0.061	0.067	0.112	0.133	0.224
	Distance [km]	2.1	8.4	16.8	19.8	33.6	39.89	67.2
4K (0.448ms)	Duration [ms]	-	0.014	0.031	-	0.056	-	0.112
	Distance [km]	-	4.2	8.4	-	16.8	-	33.6

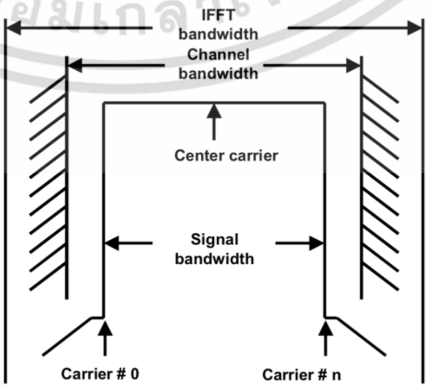
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

Mode with Symbol duration [ms]		g=1/128	g=1/32	g=1/16	g=19/256	g=1/8	g=19/128	g=1/4
2K (0.224ms)	Duration [ms]	-	0.07	0.016	-	0.028	-	0.056
	Distance [km]	-	2.1	4.2	-	8.4	-	16.8
1K (0.112ms)	Duration [ms]	-	-	-	-	0.014	-	0.028
	Distance [km]	-	-	-	-	4.2	-	8.4

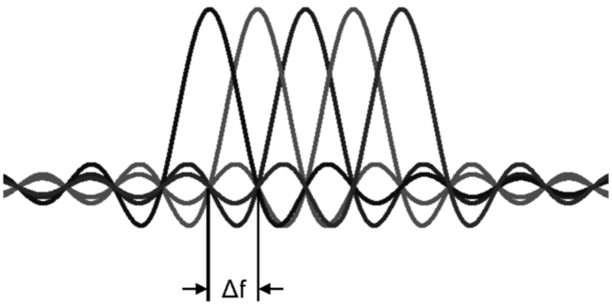
2.7.1 โหมดคลื่นพาห์ปกติ (Normal Carrier Mode)

ในโทรทัศน์ภาคพื้นดิระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นโหมดคลื่นพาห์ปกติ (Normal Carrier Mode) แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกใช้งานจะสอดคล้องกับแบนด์วิดท์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยุคที่ 1 ระหว่าง สเปกตรัมที่ใช้งาน และ จุดเริ่มต้นของช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน จะมีทั้งหน้าและหลังของช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งเรียกว่า แถบป้องกัน (Guard Band) ซึ่งมีความกว้างประมาณ 200 kHz หน้าที่ของแถบป้องกันนั้นมีอยู่หลายหลายหน้าที่ ซึ่งหน้าที่ที่สำคัญที่สุดคือการป้องกันช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ขอบของสัญญาณ OFDM ต้องสลายตัวภายในแถบป้องกัน สาเหตุหนึ่งของขอบคือ การทับซ้อนกันของหางแต่ละคลื่นพาห์ที่ถูกมอดูเลตมา ในรูปที่ 2.8 สามารถแสดงให้เห็นว่าเมื่อการใช้งานคลื่นพาห์มากขึ้นก็จะมีผลของขอบที่ทับซ้อนมากขึ้น เช่นในโหมด 1K จะมีขอบที่สูงกว่าโหมด 32K ขอบเหล่านี้ถูกทำให้ลดลงมากเท่าที่จะเป็นไปได้โดยการกรองแบบดิจิทัลในมอดูเลเตอร์ อย่างไรก็ตาม ยังสามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยเครื่องส่งสัญญาณที่ดีมากๆ ว่าในช่วงสั้นๆ นั้นขอบของโหมด 32K จะต่ำกว่าในโหมด 1K ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 มีเหตุผลทางคณิตศาสตร์ที่เรียบง่ายสำหรับเรื่องนี้ ยิ่งมีการใช้งานพาหะมาก การทับซ้อนของขอบจะลดลง

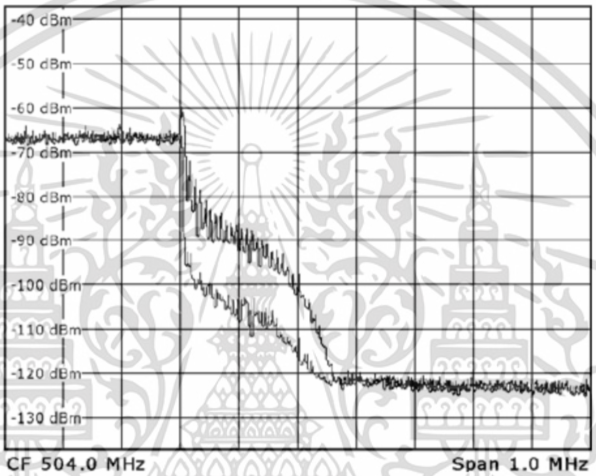


รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของแถบป้องกันของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของ OFDM [6]

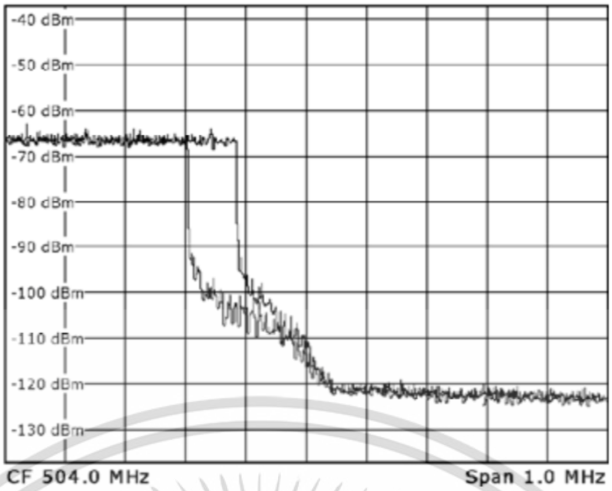


รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบขอบของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในโหมด 32K และ 1K [6]

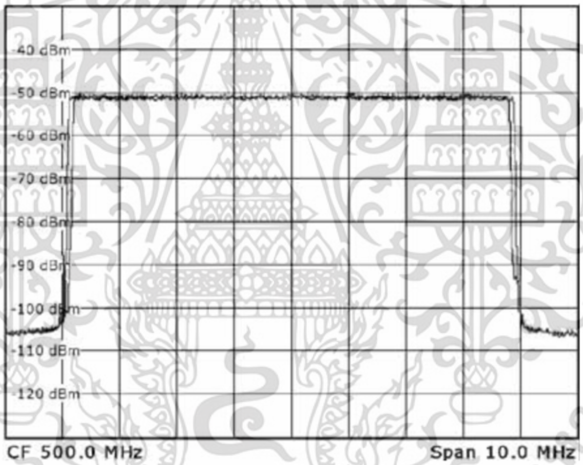
2.7.2 โหมดขยายคลื่นพาห์ (Extended Carrier Mode)

เนื่องจากขอบได้ตกลงมาเรื่อยๆ ที่ช่องสัญญาณข้างเคียง ในโหมดนี้จะมีพาหะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถให้ได้โดยโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อที่จะรองรับสเปกตรัมที่กว้างขึ้นมากกว่าโหมด 8K ในโหมดที่เรียกว่า โหมดขยายคลื่นพาห์ ข้อดีก็คือมันสามารถที่จะเพิ่มอัตราของข้อมูลภายในสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในรูปที่ 2.10 และ 2.11 แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมที่กว้างกว่าในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในโหมดคลื่นพาห์ปกติ เปรียบเทียบกับโหมดขยายคลื่นพาห์ โดยผลของการใช้งานโหมดขยายคลื่นพาห์ ส่งผลให้มีอัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้น 1 Mbps ซึ่ง 32K Normal Carrier Mode ให้ อัตราข้อมูลที่ 35.246 Mbit/s ส่วนใน 32K โหมดขยายคลื่นพาห์ ให้อัตราข้อมูลที่ 36.140 Mbps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบขอบของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในโหมด 32K โหมดขยายคลื่นพาห์ กับโหมดคลื่นพาห์ปกติ [6]

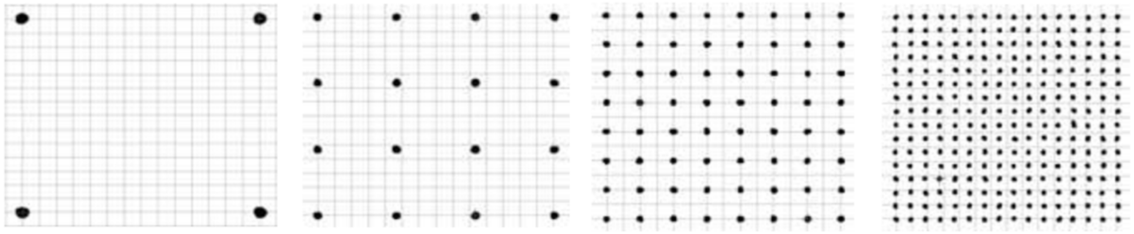


รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบภาพรวมของขอบสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในโหมด 32K โหมดขยายคลื่นพาห์ กับ โหมดคลื่นพาห์ปกติ [6]

2.8 รูปแบบการมอดูเลตและแถบป้องกัน

รูปแบบการมอดูเลตที่ถูกนำมาใช้งานในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.12 เป็นลำดับ QAM โดยตำแหน่งที่สามารถเป็นไปได้ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มีดังต่อไปนี้ QPSK, 16QAM, 64QAM และ 256QAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงรูปแบบการมอดูเลตที่สามารถใช้งานได้ในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (QPSK, 16QAM, 64QAM และ 256QAM ตามลำดับ) [6]

แบบรูปการมอดูเลชั่นที่แตกต่างจากนี้ ไม่ได้รับการรองรับการใช้งาน ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 การมอดูเลชั่น QAM สามลำดับแรกนั้นสอดคล้องกับการใช้งานในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยุคที่ 1 และในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 จะมีความสามารถพิเศษคือ แผนภาพคอนสเตลเลชัน สามารถที่จะถูกกลับหรือหมุนได้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14 เศษส่วนช่วงเวลาป้องกันที่เพิ่มเติมเข้ามาในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นทำให้สะดวกในการใช้งานการรวมกันของ Symbol Length เช่น FFT Mode และ เศษส่วนช่วงเวลาป้องกันทำให้เกิดการลดลงของ Overhead โดย แถบป้องกัน

ตารางที่ 2.5 ระยะของแถบป้องกันสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ใน 8 MHz channel raster [6]

		GI-Fraction						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
FFT	T_u(ms)	GI(μs)						
32k	3.584	28	112	224	266	448	532	n/a
16k	1.792	14	56	112	133	224	266	448
8k	0.869	7	28	56	66.5	112	133	224
4k	0.448	n/a	14	28	n/a	56	n/a	112
2k	0.224	n/a	7	14	n/a	28	n/a	56
1k	0.112	n/a	n/a	7	n/a	14	n/a	28

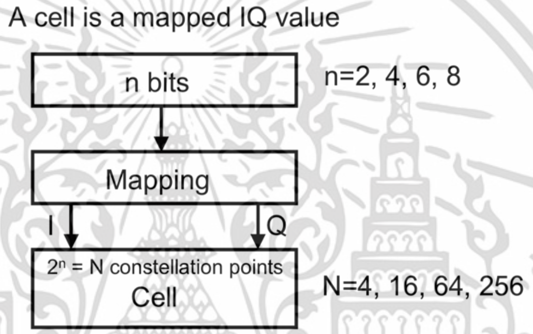
2.8.1 แผนภาพคอนสเตลเลชั่นแบบปกติ (Normal Constellation Diagrams)

ในกรณีของ QPSK, 16QAM และ 64QAM นั้น กรณีปกติที่แผนภาพคอนสเตลเลชั่นไม่ถูกหมุนจะเหมือนกับกับรูปแบบของการมอดูเลตของระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ในส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาคือรูปแบบการมอดูเลตลำดับที่ 256QAM เนื่องจาก 256QAM ได้ให้การป้องกันข้อผิดพลาดที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 คำนิยามของเซลล์

คำว่า "เซลล์" รูปที่ 2.13 จะต้องถูกกำหนดขึ้นคำนี้มีการกล่าวถึงครั้งแล้วครั้งเล่าในมาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ดังนั้นจึงมีตัวอย่างเช่นเซลล์ที่เรียกว่า interleaver เซลล์ที่แทรก (Interleaver cell) และ เซลล์ เป็นเพียงผลของการทำแมปปิ้งเข้ากับคลื่นพาห์ ในทางตรงกันข้ามกับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยุคที่ 1 นั้นการแมปปิ้งไม่ถูกนำออกมาหลังจากขั้นตอนการแทรก แต่ค่อนข้างเร็วหลังจากการป้องกันข้อผิดพลาด และ หลังจากแทรกสลับบิต (Bit interleaver) อย่างไรก็ตาม ก็ยังคงถูกตามด้วย การแทรกสลับเซลล์ (Cell interleaver), การแทรกสลับเวลา (Time interleaver) และ การแทรกสลับความถี่ (Frequency interleaver) ซึ่งเป็นสาเหตุว่าทำไมการทำแมปปิ้งไม่สามารถที่จะถูกจัดสรรไปที่พาหะ และ เป็นสาเหตุว่าทำไม เซลล์ถูกนำมาใช้งาน เซลล์จึงเป็นจำนวนเชิงซ้อนประกอบไปด้วย ค่า I และ Q เข้าด้วยกัน



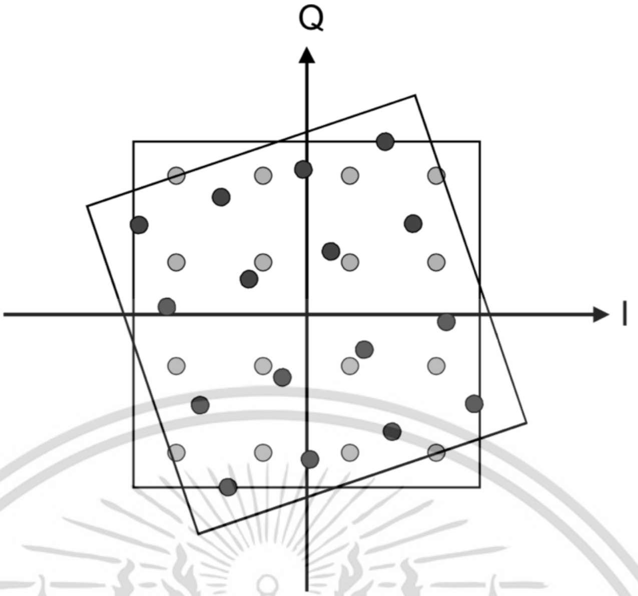
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการแมปปิ้งเซลล์ [6]

2.8.3 แผนภาพคอนสเตลเลชั่นแบบหมุน (Rotated Constellation Diagrams)

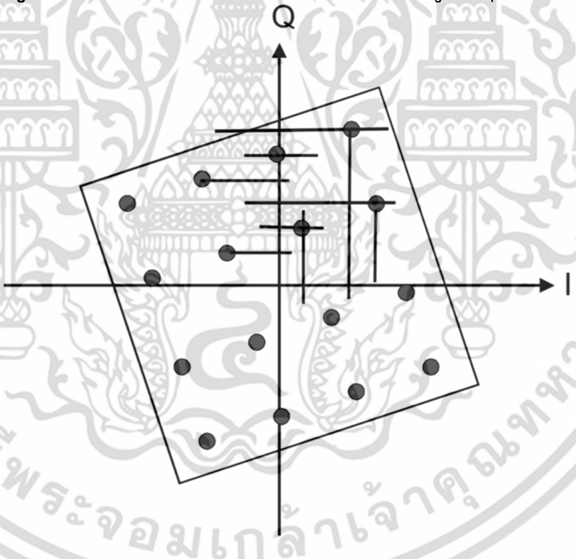
ถ้าการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่นถูกนำมาใช้งาน ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของคอนสเตลเลชั่นประกอบไปด้วยองค์ประกอบ I และ องค์ประกอบ Q ของสัญญาณ ในกรณีที่เกิดการรบกวนมันสามารถที่จะถูกนำมาใช้งานเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ ของข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของคอนสเตลเลชั่น และช่วยให้ถอดรหัสได้ดีขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามคอนสเตลเลชั่นที่ไม่ถูกหมุน ข้อมูลของตำแหน่ง I และ Q ที่ถูกแยกออกจากกัน สามารถที่จะใช้ในการตัดสินใจอย่างง่าย ถ้าจำเป็น ในทางปฏิบัติจะแสดงให้เห็นว่าประโยชน์ที่ได้รับมากเพียงใด

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง กระบวนการทั้งหมดนั้นมีความซับซ้อนกว่าเล็กน้อย ด้วยแผนภาพคอนสเตลเลชั่นที่ถูกหมุน องค์ประกอบ Q จะไม่ถูกส่งออกไปยังคลื่นพาห์เดียวกันหรือไม่ตรงเซลล์เดียวกัน แต่จะถูกหน่วงเวลาไปกับพาหะอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แผนภาพคอนสเตลเลชั่นที่ถูกหมุน [6]

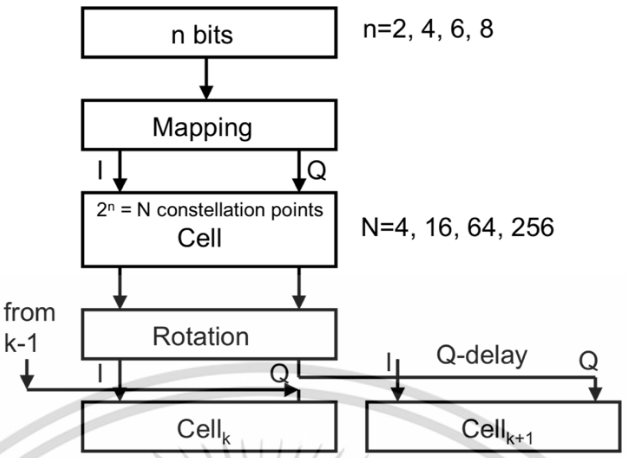


รูปที่ 2.15 แสดงการแยกกันเป็นอิสระระหว่าง I และ Q ด้วยการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น [6]

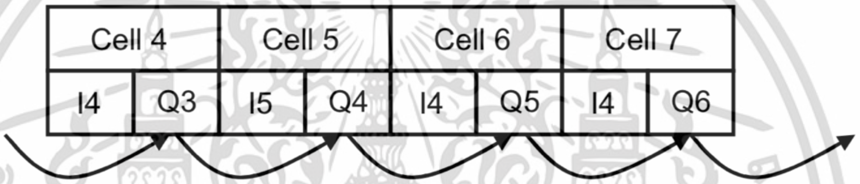
ตารางที่ 2.6 ค่ามุมของการหมุน [6]

คอนสเตลเลชัน	**องศาการหมุน (degree)**
QPSK	29.0
16-QAM	16.8
64-QAM	8.6
256-QAM	3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การแมปปิ้งของการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชันและการดีเลย์ Q [6]



รูปที่ 2.17 การดีเลย์ Q ระหว่างเซลล์ [6]

2.9 อัตราข้อมูล (Data Rate)

ในตารางที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงตัวเลขจำนวนมากของอัตราข้อมูลที่สามารถใช้งานได้ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

ตารางที่ 2.7 อัตราบิตสูงสุด และการตั้งค่าที่แนะนำสำหรับ 8 MHz, 32k 1/128, PP7 (จาก TS 102 831) [4]

<table>
<tr><th rowspan="2">Modulation</th><th rowspan="2">Code rate</th><th colspan="3">Absolute maximum bit-rate</th><th colspan="3">Recommended configuration</th></tr>
<tr><th>Bit rate Mbit/s</th><th>Frame length, L_F</th><th>FEC blocks per frame</th><th>Bit rate Mbit/s</th><th>Frame length, L_F</th><th>FEC blocks per frame</th></tr>
<tr><td rowspan="6">QPSK</td><td>1/2</td><td>7.49225</td><td rowspan="6">62</td><td rowspan="6">52</td><td>7.4442731</td><td rowspan="6">60</td><td rowspan="6">50</td></tr>
<tr><td>3/5</td><td>9.003747</td><td>8.9457325</td></tr>
<tr><td>2/3</td><td>10.01867</td><td>9.9541201</td></tr>
<tr><td>3/4</td><td>11.27054</td><td>11.197922</td></tr>
<tr><td>4/5</td><td>12.02614</td><td>11.948651</td></tr>
<tr><td>5/6</td><td>12.53733</td><td>12.456553</td></tr>
</table>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) [4]

Modulation	Code rate	Absolute maximum bit-rate			Recommended configuration		
		Bit rate Mbit/s	Frame length, L_F	FEC blocks per frame	Bit rate Mbit/s	Frame length, L_F	FEC blocks per frame
	4/5	12.02614			11.948651		
	5/6	12.53733			12.456553		
16-QAM	1/2	15.03743	60	101	15.037432	60	101
	3/5	18.07038			18.07038		
	2/3	20.10732			20.107323		
	3/4	22.6198			22.619802		
	4/5	24.13628			24.136276		
	5/6	25.16224			25.162236		
64-QAM	1/2	22.51994	46	116	22.481705	60	151
	3/5	27.06206			27.016112		
	2/3	30.11257			30.061443		
	3/4	33.87524			33.817724		
	4/5	36.1463			36.084927		
64-QAM	5/6	37.68277			37.618789		
256-QAM	1/2	30.08728	68	229	30.074863	60	202
	3/5	18.07038			18.07038		
	2/3	20.10732			20.107323		
	3/4	22.6198			22.619802		
	4/5	24.13628			24.136276		
	5/6	25.16224			25.162236		

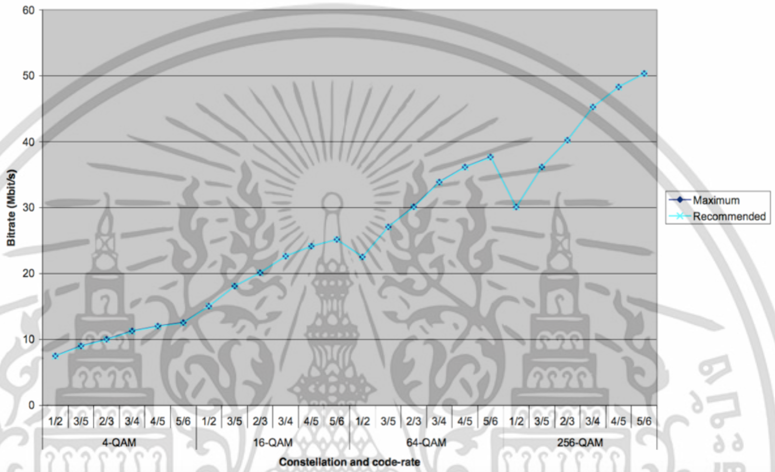
ซึ่งส่งผลให้ Symbol Time มีประโยชน์มากขึ้น 2-4 เท่า เมื่อเทียบกับกรณี 8k ตัวอย่างเช่น ที่ 8 MHz channel raster 2 และ 4 เท่าของ 896 μs คือ 1,792 และ 3,584 μs ตามลำดับ

ช่วงเวลาสัญลักษณ์ (Symbol Time) ที่ยาวขึ้นมากนั้นจะเป็นผลให้ประสิทธิภาพของดอปเพลอร์ (Doppler) ลดลง เนื่องจากระยะ คลื่นพาห์ภายใน (Inter Carrier) ที่สั้น ในสัญญาณ OFDM นั้นโหมด 32k จึงมุ่งเน้นไปที่การรับสัญญาณแบบประจำที่บนหลังคา การทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามแสดงให้เห็นว่า 32k mode ไม่เหมาะที่จะถูกนำมาใช้สำหรับการให้บริการเครื่องรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่สำหรับย่าน UHF หรือแม้แต่ ในเครื่องรับแบบพกพา (ภายในและภายนอกอาคาร) ที่มี ความถี่ดอปเพลอร์ต่ำ ยังคงจำเป็นที่จะต้องได้รับการยืนยันว่าโหมด 32k เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ประสิทธิภาพของดอป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพลอร์จะดีกว่าถึง 4 เท่าในการใช้งานย่าน VHF เมื่อเทียบกับ UHF แถบ V และ VHF แถบ III มีความน่าสนใจที่จะให้บริการเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 แบบเคลื่อนที่

ความแตกต่างอีกสิ่งหนึ่งระหว่างโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล และ โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 คือ จำนวนตัวเลขที่เพิ่มขึ้นของ สัดส่วนช่วงเวลาป้องกัน โดยใช้ 1/128, 19/256 และ 19/128 ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะให้นำความยาวของช่วงเวลามาใช้ในขนาดของโครงข่ายความถี่เดียว ตัวอย่างเช่น ในตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นค่าสูงสุดของอัตราบิต และการตั้งค่าที่แนะนำสำหรับ 8 MHz, 32K 1/128, PP7



รูปที่ 2.18 อัตราบิตสูงสุด และอัตราบิตสำหรับการตั้งค่าที่แนะนำ ด้วย 8 MHz แบนด์วิดท์ และ 32k PP7 (จาก TS 102 831) [7]

พารามิเตอร์ของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา 2 อย่าง ที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของ FFT และ OFDM Modulation ที่สามารถมีอิทธิพลต่อการวางโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ได้ดังนี้ ระยะห่างระหว่างคลื่นพาห์ (Inter-Carrier Spacing) และสัญลักษณ์ช่วงเวลา (Symbol Duration)

2.10 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier-to-noise ratio; C/N)

2.10.1 กล่าวนำ

ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน แสดงถึง ความทนทานของระบบส่งออกอากาศที่เกี่ยวกับการรบกวนจาก สัญญาณรบกวน (Noise) และ การรบกวน (Interference) อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนถูกใช้เพื่อกำหนดระดับของสัญญาณที่มีการรบกวน ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณรบกวน และการรบกวนภาครับ และในขั้นตอนต่อมา การกำหนดอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนมีความสำคัญในขั้นพื้นฐานสำหรับงานวางแผนโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 หลักการของการได้มาซึ่งค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน

ขั้นตอนดังต่อไปนี้มักจำเป็นที่จะถูกใช้งานเมื่อต้องการวางแผนกำหนดค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่จะต้องใช้งาน

ขั้นตอนที่ 1 ระบุพื้นและสภาพแวดล้อมที่เป้าหมายที่ต้องการให้สามารถรับสัญญาณ เพื่อที่จะกำหนดช่องทางการรับสัญญาณ ซึ่งหมายถึงทั้งการรับสัญญาณแบบประจำที่บนหลังคา, แบบพกพาภายในอาคาร, แบบพกพาภายนอกอาคาร และ แบบเคลื่อนที่ และ สำหรับตัวอย่าง ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนด ไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน สำหรับช่องสัญญาณแบบไรเชียน (Ricean Channel) หรือเรย์ลี (Rayleight Channel) ที่มีความเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 2 เลือกโหมดการส่งสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ขั้นตอนนี้มักจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการซ้ำซ้อน ที่ความต้องการของความจุ, พื้นที่ให้บริการ, ต้นทุน ถูกแลกเปลี่ยนหรือปรับให้เหมาะสม และเมื่อโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โหมดถูกเลือก การจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน ขั้นพื้นฐานสำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียน (Gaussian Channel) สามารถที่จะพบได้ในตารางที่ 2.9 และ ถูกใช้แทนค่าพื้นฐานสำหรับวิธีที่นำเสนอ

ขั้นตอนที่ 3 ใช้วิธีการดังต่อไปนี้เพื่อที่จะปรับค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียนที่ระบุให้ถูกต้อง สำหรับปัจจัยการสร้างภาครับจริง และ เพื่อที่จะจับคู่ระหว่างช่องสัญญาณภาคส่งและสภาพแวดล้อมของภาครับ

2.10.3 ช่องการรับสัญญาณทั่วไป

ช่องสัญญาณหลักที่พบได้ในการออกอากาศภาคพื้น ดินแต่ละแบบจะต้องมีค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน การได้มาซึ่งค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนได้อธิบายไว้ดังต่อไปนี้

ช่องสัญญาณเกาส์เซียน ช่องสัญญาณนี้ถูกกำหนดคุณลักษณะโดย สัญญาณที่ต้องการที่ภาครับแบบเดี่ยว และไม่มีการรบกวน มีเพียงแค่สัญญาณรบกวนเกาส์เซียน (Gaussian Noise) ช่องสัญญาณนี้เป็นช่องสัญญาณที่ต้องการน้อยที่สุด และมักถูกนำมาใช้เพื่ออ้างอิงเท่านั้นไม่ได้นำมาใช้ในทางปฏิบัติ

ช่องสัญญาณไรเชียน ใช้สำหรับวางแผนการรับสัญญาณประจำที่บนหลังคา ที่มีสัญญาณส่วนมากเป็นแบบเดี่ยว และ สัญญาณสะท้อนเล็กน้อยเท่านั้น

ช่องสัญญาณเรย์ลี แบ่งออกได้ดังนี้

ช่องสัญญาณเรย์ลีแบบ static ถูกใช้งานหลักในการออกแบบการรับสัญญาณชนิดพกพาภายในอาคารและภายนอกอาคาร การช่องการรับสัญญาณชนิดนี้ สัญญาณที่รับได้นั้นประกอบด้วยสัญญาณที่สะท้อนเท่านั้น ไม่มีสัญญาณที่ได้รับโดยตรงปรากฏ ในการจำลองในคู่มือการใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 DVB-T2 ETSI Implementation Guideline [TS 102 831, Table 39] ใช้ช่องสัญญาณเรย์ลี ด้วย 20 สัญญาณสะท้อน เนื่องจากรูปแบบที่คงที่ของรูปแบบช่องสัญญาณ (Channel Model) นี้ควรที่จะถูกถือว่าเป็น “กรณีที่ดีที่สุด” เมื่อทำการออกแบบสำหรับการรับสัญญาณแบบพกพา และควรจะถูกใช้งานเมื่อเครื่องรับเป็นแบบประจำที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องสัญญาณเรย์ลีแบบ slowly time varying, low Doppler frequency: channel model ประเภทนี้ควรจะถูกนำมาใช้งานเป็นปกติสำหรับการออกแบบการรับสัญญาณแบบพกพาภายนอกอาคารและแบบพกพาภายในอาคาร ในกรณีที่ slow channel ไม่สามารถที่จะเลี่ยงได้ แม้แต่ถ้าตัวเครื่องรับเองประจำที่ก็ตาม ก็มักจะมีวัตถุอื่นๆ ซึ่งอยู่ใกล้ๆ เครื่องรับนั้นเคลื่อนที่ เช่น รถ, ต้นไม้, ผู้คน และเมื่อความถี่ดอปเพลอร์ต่ำนั้น ค่าการสลับทางเวลา (Time interleaving) ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มีผลน้อยลง เช่น เมื่อความถี่ดอปเปลอร์น้อยกว่า 1/(interleaving time) จะทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ที่ความถี่ดอปเปลอร์ ที่สูงกว่ารูปแบบช่องสัญญาณนี้มักถูกนำมาพิจารณาในกรณีเลวร้ายที่สุดสำหรับภาครับโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

ช่องสัญญาณเรย์ลีแบบ mobile, high Doppler frequency: ถูกใช้งานสำหรับการออกแบบการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่โดยใช้สายอากาศแบบภายนอก หรือ อุปกรณ์ชนิดพกพา ควรสังเกตว่าบางโหมดของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ไม่เหมาะสำหรับการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ เช่น การมอดูเลตแบบ 256-QAM และ 32k เป็นโปรไฟล์ที่ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับการรับสัญญาณของ โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 แบบ Lite (DVB-T2-Lite)

2.10.4 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณเกาส์เซียน

วิธีการต่อไปนี้ได้รับการนำเสนอสำหรับการปรับปรุงที่กำลังมาถึงของ IEC 62216 และสอดคล้องกับข้อกำหนดการรับของ Nordig2010

จุดเริ่มต้นสำหรับการได้รับมาของค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน สุดท้าย เพื่อที่จะสามารถกำหนดช่องสัญญาณการส่งผ่าน (transmission channel) และโหมด คือ การกำหนดอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสุดท้ายสำหรับช่องสัญญาณเกาส์เซียน ขั้นตอนแรกให้ดูตารางที่ 2.9 ซึ่งถูกนำมาจากคู่มือการปฏิบัติของ ETSI [TS 102 831] [7] เพื่อที่จะหาค่าของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียน ตารางที่ 2.7 นี้ได้รับมาจากการจำลองของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องได้รับการแก้ไข

ตารางที่ 2.8 ค่า Raw อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณเกาส์เซียน (จากตารางที่ 47 ใน TS 102 831) [7]

คอนสเตลเลชัน	อัตรารหัส	อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียน
QPSK	1/2	1.0
QPSK	3/5	2.2
QPSK	2/3	3.1
QPSK	3/4	4.1
QPSK	4/5	4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

คอนสเตลเลชัน	อัตรารหัส	อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียน
QPSK	5/6	5.2
16-QAM	1/2	6.2
16-QAM	3/5	7.6
16-QAM	2/3	8.9
16-QAM	3/4	10.0
16-QAM	4/5	10.8
16-QAM	5/6	11.3
64-QAM	1/2	10.5
64-QAM	3/5	12.3
64-QAM	2/3	13.6
64-QAM	3/4	15.1
64-QAM	4/5	16.1
64-QAM	5/6	16.7
256-QAM	1/2	14.4
256-QAM	3/5	16.7
256-QAM	2/3	18.1
256-QAM	3/4	20.0
256-QAM	4/5	21.3
256-QAM	5/6	22.0

A = 0.1 dB ประมาณค่าเพิ่มเติมของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนเพื่อให้บรรลุอัตราความผิดพลาดต่อบิต (BER) = 10^{-7} คือจุด (Quasi Error Free;QEF) ที่เหมาะสมในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ตารางที่ 2.7 ถูกคำนวณไปสู่ อัตราความผิดพลาดต่อบิตที่สูงขึ้น ปัจจัยนี้ได้แก้ไขการคำนวณ

B = การแก้ไขสำหรับ Pilot boosting เพื่อให้สอดคล้องกับตาราง 2.8 การแก้ไขเป็นไปตามคู่มือการใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ของ ETSI แต่ได้รับการปัดเศษทศนิยม 1 ตำแหน่ง ค่า Pilot ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ถูกเพิ่มขึ้น หมายความว่าค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน สำหรับพาหะข้อมูล (Data Carrier) ถูกลดลง อย่างไรก็ตาม ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ค่าแบบรูปไพลอต (pilot pattern) หลายๆ ค่ามีให้ใช้งาน และ การแก้ไขที่แตกต่างกัน จำเป็นต้องใช้สำหรับแบบรูปไพลอตที่แตกต่างกัน

C = ในกรณีค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสูญเสียเนื่องจากการประเมินช่องสัญญาณจริง การถอดรหัส LDPC ที่ไม่สมบูรณ์และการไม่สมบูรณ์อื่นๆ ไม่ใช่ส่วนของการพิจารณาของ back-stop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

noise ค่าที่จะใช้นี้ถูกแสดงในตารางที่ 2.10 ค่าเหล่านี้ได้มากจากคู่มือการใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และรวมถึงค่า Implement Margin (IM) ที่แนะนำจากโรงงานด้วยเช่นกัน

D = ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่เพิ่มเติม สอดคล้องกับระดับของ back-stop noise ที่ -33 dBc การสนับสนุนหลักไปสู่ back-stop คือ tuner phase noise และ quantization noise ในตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกสู่ดิจิทัล ตัว back-stop noise นี้ได้รับมาจากการคำนวณแรก ในส่วนของ A, B, C และจากนั้นทำการตรวจสอบจำนวนที่ลดลงของค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่เป็นสาเหตุมาจาก ค่า -33 dBc back-stop noise ของเครื่องรับ เทอม D เหมือนกับการลดลงนี้ ควรสังเกตุว่าการเปลี่ยนแปลง ของแบบรูปไพลอต เช่นจาก PP4 ไปสู่ PP2 ทำให้ C เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น จาก 1.5 ไปที่ 2.0 dB และจะทำให้ D เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

สรุปขั้นตอนการหาค่าสุดท้ายของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียน คือ

$$C/N_{\text{Gauss-dvb}} = C/N' + D(dB) \tag{2.2}$$

$$C/N'_{\text{dvb}} = C/N_{\text{Gauss-DVB}} + A + B + C(dB) \tag{2.3}$$

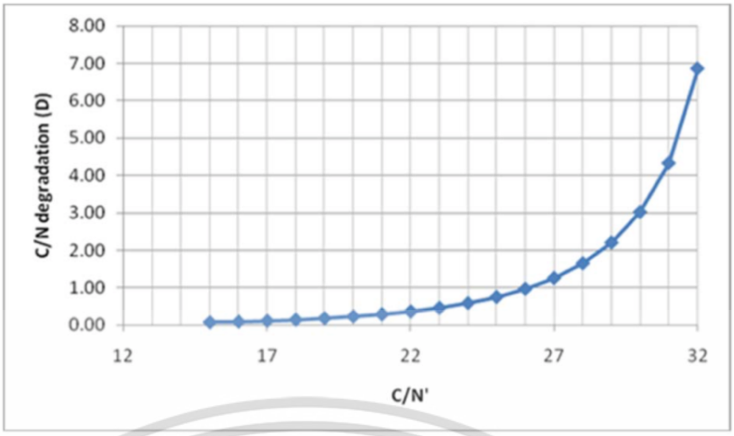
ตารางที่ 2.9 Correction factors: B และ C ทศนิยม 1 ตำแหน่ง [7]

แบบรูปไพลอต	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8
A = BER 10^{-7}Correction	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
B = Pilot Boost Correction	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.4
C = Real Channel Estimation	2.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0

เครื่องรับบางเครื่องอาจทำงานได้ดีกว่าหรือแย่กว่าตัวที่นำเสนอ ณ.ที่นี้อยู่เล็กน้อย กับเครื่องรับที่ดีที่สุดบางครั้งอาจจะดีกว่า 0.5-1 dB แต่จะแตกต่างกันไปเมื่อใช้งานเครื่องรับและโหมดโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ถ้าคิดว่าเครื่องรับที่มีอยู่ในท้องตลาดดีกว่าที่แสดงข้างต้นแล้วการแก้ไข factor C ก็จะถูกลดลงอย่างสอดคล้องกัน การลดลงเช่นนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ D เล็กน้อย ซึ่งควรจะถูกคำนวณใหม่

จากรูปที่ 2.19 แสดงค่า D ปริมาณการลดลงของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับ back-stop noise ระดับ -33 dBc เป็นที่ชัดเจนว่าระดับที่สูงขึ้นของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (C/N) เช่นระดับการมอดูเลตที่สูง และ อัตราการเข้ารหัสที่สูง D จะมีความสำคัญและควรคำนึงถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การลดลงของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับแฟคเตอร์ D [4]

ตารางที่ 2.10 การลดลงของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับแฟคเตอร์ D จาก 15 ถึง 32 [7]

อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (dB)	ค่า D (dB)
15	0.07
16	0.09
17	0.11
18	0.14
19	0.18
20	0.22
21	0.28
22	0.36
23	0.46
24	0.58
25	0.75
26	0.97
27	1.26
28	1.65
29	2.20
30	3.02
31	4.33
32	6.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวอย่างในตารางที่ 2.10 แสดงประสิทธิภาพของค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนโดยประมาณสำหรับช่องสัญญาณเกาส์เซียนสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ 256-QAM, 32k, GI=1/8 ใช้แบนด์วิดท์ปกติ และ PP2

ตารางที่ 2.11 QEF ของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 PP2 32k แบนด์วิดท์ปกติ GI 1/8 [7]

คอนสเตลเลชัน	**อัตรารหัส**	**Gaussian raw value (ตาราง 2.9)**	**อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณเกาส์เซียน**
QPSK	1/2	1.0	3.5
QPSK	3/5	2.2	4.7
QPSK	2/3	3.1	5.6
QPSK	3/4	4.1	6.6
QPSK	4/5	4.7	7.2
QPSK	5/6	5.2	7.7
16-QAM	1/2	6.2	8.7
16-QAM	3/5	7.6	10.1
16-QAM	2/3	8.9	11.4
16-QAM	3/4	10.0	12.5
16-QAM	4/5	10.8	13.3
16-QAM	5/6	11.3	13.9
64-QAM	1/2	10.5	13.0
64-QAM	3/5	12.3	14.9
64-QAM	2/3	13.6	16.2
64-QAM	3/4	15.1	17.7
64-QAM	4/5	16.1	18.8
64-QAM	5/6	16.7	19.4
256-QAM	1/2	14.4	17.0
256-QAM	3/5	16.7	19.4
256-QAM	2/3	18.1	20.9
256-QAM	3/4	20.0	22.9
256-QAM	4/5	21.3	24.4
256-QAM	5/6	22.0	25.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.5 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับช่องสัญญาณแบบไรเชียนและเรย์ลี

ตารางที่ 2.7 ได้แสดงข้อมูลของช่องสัญญาณเกาส์เซียน เท่านั้น ซึ่งไม่ได้กล่าวถึงช่องสัญญาณไรเชียน หรือ ช่องสัญญาณเรย์ลี ความแตกต่างของค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่ต้องการนั้นอยู่ที่ 0.2 ถึง 0.5 dB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเกาส์เซียน กับช่องสัญญาณไรเชียน และ 1.0 ถึง 3.4 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ช่องสัญญาณเกาส์เซียน กับช่องสัญญาณไรเชียน การเพิ่มขึ้นนี้จะพบได้ในโหมดที่มีความคงทนของสัญญาณน้อยหรือโหมดที่ใช้ระดับของการมอดูเลชั่นที่สูงหรืออัตราการเข้ารหัสสูง ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับ ช่องสัญญาณไรเชียน และช่องสัญญาณเรย์ลีสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C/N'_{\text{Rice-dvb}} = C/N_{\text{Gauss-raw}} + DELTA_{\text{Rice}} + A + B + C \quad (2.4)$$

$$C/N_{\text{Rice-dvb}} = C/N'_{\text{Rice}} + D \quad (2.5)$$

$$C/N'_{\text{Rayleigh-dvb}} = C/N_{\text{Gauss-raw}} + DELTA_{\text{Rayleigh}} + A + B + C \quad (2.6)$$

$$C/N_{\text{Rayleigh-dvb}} = C/N'_{\text{Rayleigh}} + D \quad (2.7)$$

ซึ่งผลต่างของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (DELTA) ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.12 ค่าผลต่างของช่องสัญญาณไรเชียน และช่องสัญญาณเรย์ลีแบบ Static ที่อ้างถึงช่องสัญญาณเกาส์เซียน [7]

คอนสเตลเลชัน	อัตรารหัส	DELTA $\boldsymbol{C/N}_{\textbf{Rice}}$ (dB)	DELTA $\boldsymbol{C/N}_{\textbf{Rayleigh}}$ (dB)
QPSK	1/2	0.2	1.0
QPSK	3/5	0.2	1.3
QPSK	2/3	0.3	1.8
QPSK	3/4	0.3	2.1
QPSK	4/5	0.3	2.4
QPSK	5/6	0.4	2.7
16-QAM	1/2	0.2	1.5
16-QAM	3/5	0.2	1.7
16-QAM	2/3	0.2	1.9
16-QAM	3/4	0.4	2.4
16-QAM	4/5	0.4	2.8
16-QAM	5/6	0.4	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 (ต่อ)

คอนสเตลเลชัน	อัตรารหัส	DELTA C/N_{Rice} (dB)	DELTA C/N_{Rayleigh} (dB)
64-QAM	1/2	0.3	2.0
64-QAM	3/5	0.3	2.0
64-QAM	2/3	0.3	2.1
64-QAM	3/4	0.3	2.6
64-QAM	4/5	0.5	3.1
64-QAM	5/6	0.4	3.4
256-QAM	1/2	0.4	2.4
256-QAM	3/5	0.2	2.2
256-QAM	2/3	0.3	2.3
256-QAM	3/4	0.3	2.6
256-QAM	4/5	0.4	3.0
256-QAM	5/6	0.4	3.4

2.11 การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถสามารถใช้สายอากาศแบบเดิมที่ใช้กับช่อง 3, 5, 7, 9, 11 และ TPBS ได้หากสายอากาศนั้นรองรับย่านความถี่ UHF ได้ สายอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถใช้งานทั้งแบบภายในบ้านหรือภายนอกบ้าน

รูปที่ 2.20 สายอากาศสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ชนิดติดตั้งบนหลังคา [8]

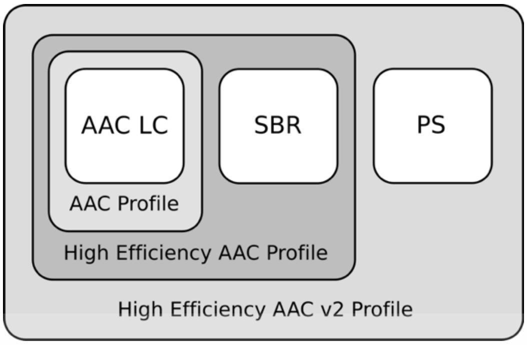
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 สายอากาศและเครื่องรับสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ชนิดพกพาและเคลื่อนที่ [9]

โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ใช้ในประเทศไทยนั้น เป็นระบบ MPEG-4 ซึ่งที่โทรทัศน์ทุกระบบสามารถรับสัญญาณได้โดยใช้ร่วมกับกล่องรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และหากโทรทัศน์ที่ใช้มีช่องรับสัญญาณ HDMI ภาพที่ได้จะมีความคมชัดสูง ซึ่งสูงกว่าการใช้ช่องรับสัญญาณชนิด AV อย่างที่ใช้กันในอดีต และ มาตรฐานการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ MPEG-4/H.264 AVC ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการบีบอัดที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยสามารถให้คุณภาพสูงสุดระดับ 4K UHD [3] และมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณเสียงแบบ MPEG-4/HE-AACv2 [8] ที่ได้รับการพัฒนามาจาก AAC Profile และ HE-AACv1 ตามลำดับซึ่งประกอบไปด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายในการเข้ารหัสสัญญาณเสียง ทั้งในแบบ โมโน สเตอริโอ และ multichannel ที่ให้ช่องสัญญาณได้สูงถึง 48 ช่องสัญญาณที่คุณภาพสูง

รูปที่ 2.22 ภาพเปรียบเทียบระหว่างความคมชัดแบบสูงและความคมชัดแบบมาตรฐาน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของ MPEG-4/HE-AACv2 [11]

2.12 ข้อกำหนดในการออกอากาศของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย

เนื่องจากการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทยนั้น อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของ สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือที่รู้จักกันในนาม สำนักงาน กสทช. ซึ่งได้ทำการกำหนดมาตรฐานทางด้านเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อให้ประชาชนได้รับบริการโทรทัศน์ที่ได้มาตรฐาน มีคุณภาพ มีความหลากหลาย โดยอาศัยเทคโนโลยีที่ทันสมัยและใช้คลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในมาตรฐานทางด้านเทคนิคนี้ ได้ระบุข้อกำหนดทางด้านเทคนิคขั้นต่ำของอุปกรณ์สำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ใช้ระบบการส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่ซึ่งที่ให้บริการเป็นการทั่วไป (Free to Air) ซึ่งได้ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 129 ตอนพิเศษ 189ง เมื่อวันที่ 18 ธันวาคม 2555 โดยมีรายละเอียดตามมาตรฐานเลขที่ กสทช. มส. 4001 – 2555 [12]

2.12.1 ข้อกำหนดทางด้านความถี่

การให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทยนั้น สำนักงาน กสทช. ได้กำหนดช่วงความถี่ใช้งานให้อยู่ระหว่าง 510 – 790 MHz โดยมีความกว้างช่องสัญญาณ 8 MHz

2.12.2 ข้อกำหนดทางด้านระบบส่งออกอากาศ

เครื่องส่งวิทยุโทรทัศน์และระบบสายอากาศสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทยนั้น ต้องมีกำลังส่งออกอากาศ (Effective Radiated Power : ERP) และข้อกำหนดอื่นๆ ตามที่กำหนดไว้ในแผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

2.12.3 ข้อกำหนดทางเทคนิค

มาตรฐานทางเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.3.1 สัญญาณเบสแบนด์และการบีบอัดสัญญาณ (Baseband Signal and Compression)

2.12.3.1.1 การเข้ารหัสสัญญาณภาพ (Video Coding) ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ISO/IEC 14496-10:2012 : Information technology – coding of audio – visual objects – Part 10 : Advanced Video Coding (MPEG 4 AVC/H.264) [13]

ทั้งนี้กำหนดให้มีสัญญาณภาพ 2 มาตรฐาน ดังนี้

1.) มาตรฐานความคมชัดปกติ (Standard Definition – SD) สำนักงาน กสทช. ได้กำหนดให้คุณภาพของภาพมีความละเอียดที่ 720x576 แบบ interlace (576i) ที่มีอัตราเฟรม (frame rate) 25 ภาพต่อวินาที และ อัตราส่วนภาพ (aspect ratio) 16:9 และ 4:3

2.) มาตรฐานความคมชัดสูง (High Definition – HD) ทางสำนักงาน กสทช. ได้กำหนดให้คุณภาพของภาพมีความละเอียด 1920x1080 แบบ interlace (1080i) ที่มีอัตราเฟรม (frame rate) 25 ภาพต่อวินาที และ อัตราส่วนภาพ (aspect ratio) 16:9 หรือมีความละเอียด 1280x720 แบบ Progressive (720p) ที่มีอัตราเฟรม (frame rate) 50 ภาพต่อวินาที และ อัตราส่วนภาพ (aspect ratio) 16:9

3.) การเข้ารหัสสัญญาณเสียง (Audio Coding) แบบสองช่องเสียง (Stereo) ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ISO/IEC 14496-3:2009 : Information technology –Coding of audio – visual object – Part 3: Audio (MPEG 4 HE AACv2) [14]

2.12.3.2 การส่งผ่านสัญญาณ (Transmission)

2.13.3.2.1 โครงสร้างเฟรม (Framing Structure), การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding) และ การมอดูเลตสัญญาณ (Modulation) ทางสำนักงาน กสทช. ได้ระบุให้เป็นไปตามที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI EN 302 755 V1.3.1 (2012-04) [15]

2.12.3.2.2 ในส่วนของการใช้งานเมกะเฟรมสำหรับการซิงโครไนซ์โครงข่ายแบบความถี่เดียว ทางสำนักงาน กสทช. ได้ระบุให้เป็นไปตามที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI TS 101 191 V1.4.1 (2004-06) [16]

2.12.3.2.3 ในส่วนของการประยุกต์ใช้ระบบส่งสัญญาณภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลตามมาตรฐานในข้อที่ 2.13.3.2.1 และ ข้อที่ 2.13.3.2.2 ซึ่งสามารถที่จะอ้างอิงได้ตามเอกสาร ETSI TS 102 831 V1.2.1 (2012-08) [7]

2.12.3.3 การมัลติเพลกซ์สัญญาณ (Multiplexing)

2.12.3.3.1 ในข้อกำหนดสำหรับข้อมูลข่าวสารการให้บริการ (Service Information: SI) สำนักงาน กสทช. นั้นได้ระบุให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI EN 300 478 V1.13.1 (2012-08) [17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.3.3.2 การประยุกต์ใช้งานในส่วนของข้อกำหนดสำหรับข้อมูลข่าวสารการให้บริการตามข้อที่ 2.13.3.3.1 สามารถอ้างอิงได้ตามเอกสาร ETSI TS 101 211 V1.11.1 (2012-04) [18]

2.12.3.3.3 ข้อกำหนดการกระจายข้อมูล (Data Broadcasting) ทางสำนักงาน กสทช. นั้นได้ประกาศให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI EN 301 192 V1.4.2 (2008-04) [19]

2.12.3.3.4 การประยุกต์ใช้งานข้อกำหนดสำหรับการกระจายข้อมูลตามข้อ 2.13.3.3.3 สามารถอ้างอิงได้ตามเอกสาร ETSI TR 101 202 V1.2.1 (2003-01) [20]

2.12.3.3.5 ระบบการเข้ารหัสสัญญาณสำหรับกระแสขนส่ง MPEG-2 (MPEG-2 Transport Stream) สำนักงาน กสทช. ประกาศให้เป็นไปตามที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI TS 101 154 V1.10.1 (2011-06) [21] รวมทั้งสามารถอ้างอิงได้ตามมาตรฐาน ISO/IEC 13818-1:2007 [22]

2.12.3.3.6 ในกรณีการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลแบบโครงข่ายความถี่เดียว หรือ กรณีการให้บริการแบบ Multiple PLP (Multiple Physical Layer Pipe) การต่อร่วมกับอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (Modulator Interface T2-IM) สำนักงาน กสทช. ได้ระบุให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI TS 102 773 V1.3.1 (2012-01) [23]

2.12.3.4 การปรับปรุงซอฟต์แวร์ให้เป็นปัจจุบัน (System Software Update: SSU)

ข้อกำหนดสำหรับการปรับปรุงซอฟต์แวร์ให้เป็นปัจจุบัน สำนักงาน กสทช. ได้ประกาศให้เป็นไปตามที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI 102 006 V1.3.2 (2008-07): [24]

2.12.3.5 คำบรรยายใต้ภาพ (Subtitling)

ในส่วนของข้อกำหนดสำหรับระบบคำบรรยายใต้ภาพนั้น ทางสำนักงาน กสทช. ได้ประกาศให้เป็นไปตามที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ETSI EN 300 743 V1.4.1 (2011-10) [25]

2.12.3.6 วิธีการวัด (Measurement)

วิธีการวัดสัญญาณหรือการทดสอบค่าของสัญญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 หรือพารามิเตอร์อื่นๆ ของการให้บริการสามารถอ้างอิงได้ตามเอกสาร ETSI TR 101 290 V1.2.1 (2001-05): Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement Guidelines for DVB system และ เอกสาร DVB Document A14-2 (July 2012) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 มาตรฐานการให้บริการที่สำนักงาน กสทช กำหนด

ในการให้บริการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทยนั้นอยู่ภายใต้การควบคุมกำกับดูแลของสำนักงาน กสทช. โดยมีการกำหนดค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต้องไม่ต่ำกว่า 15.17 dB ค่าอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต บนสถานีส่งต้องไม่ต่ำกว่า 33 dB ค่าความผิดพลาดของบิตหลังการแก้ไข LDPC (LBER) ไม่สูงกว่า 10^{-7} โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 2.13 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ [27-28]

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
FFT size	16k extended
Guard Interval	19/128
Modulation	64QAM
Code Rate	5-Mar
Pilot Pattern	PP2
Rotated Constellation Off	MUX 1(NBT), 2(ARMY1), 4(TPBS), 5(ARMY2)
Rotated Constellation On	MUX 3(MCOT)
พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
Physical Layer Pipe (PLP)	Single
L1-Post Constellation	BPSK
T2 Frame per Super Frame	2
Data Symbol per T2 Frame	84 symbol/T2 frame
Max FEC block per Interleaving Frame	99 block
Time Interleaving Block per Interleaving Frame	2 block
ความสูงสายอากาศเครื่องส่ง	328 เมตร
ความสูงสายอากาศเครื่องรับ	6 เมตร
ความถี่	514, 594, 626, 658 และ 722 MHz
ผลที่ได้จากการปรับพารามิเตอร์	
ค่าความจุต่อมัลติเพล็กซ์สูงสุด	21.86 Mbps
Time Interleaving Depth	87.58 msec
C/N Fixed Rooftop	15.17 dB
C/N Portable Indoor	16.91 dB
ระยะสูงสุดของเสาส่งในกรณีการทำโครงข่ายความถี่เดียว	79.74 km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 สรุป

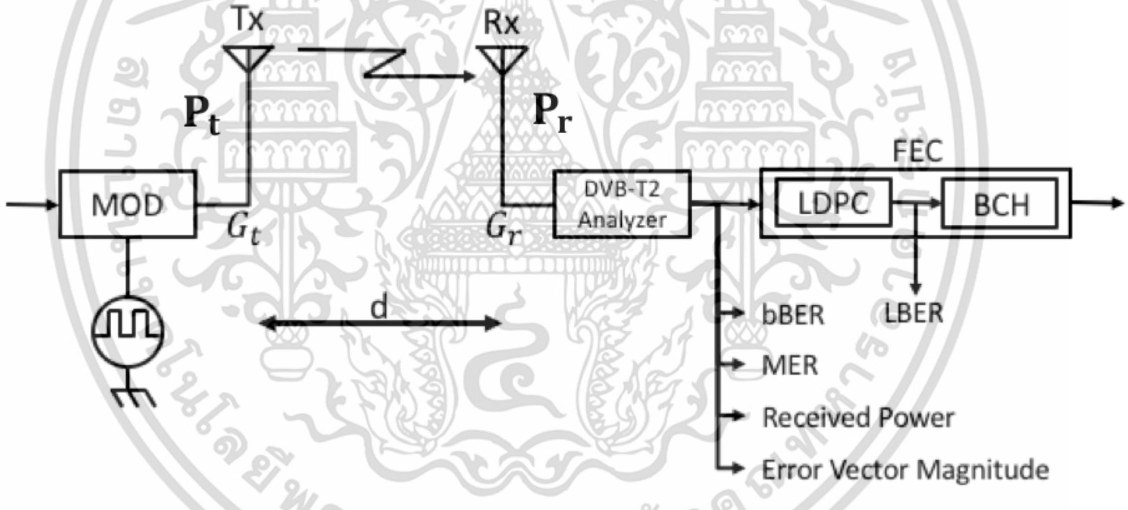
ในบทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คุณสมบัติและการกำหนดการใช้งาน คุณสมบัติเด่นของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในการถ่ายทอดสัญญาณภาพและเสียงโดยกระบวนการดิจิทัลซึ่งใช้การแบ่งช่องสัญญาณหลายๆ ช่องทำให้สามารถรองรับรายการโทรทัศน์ได้มากกว่า 1 รายการภายใน 1 ช่องสัญญาณ ทำให้มีช่องรายการที่เพิ่มขึ้นมากและหลากหลาย ทำให้ประชาชนได้รับข้อมูลข่าวสารที่มีสารประโยชน์มากขึ้น และนอกจากภาพและเสียงที่มีคุณภาพสูงแล้ว การออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ยังสามารถส่งข้อมูลอื่นๆ เช่น ผังรายการและคำบรรยาย มาในเวลาเดียวกันได้อีกด้วย ถือเป็นเทคโนโลยีที่เพิ่มศักยภาพและคุณภาพในการให้บริการอย่างแท้จริง และ ยังสามารถรับสัญญาณได้ทั้งในรูปแบบการรับสัญญาณประจำที่บนหลังคา การรับสัญญาณแบบพกพา และ การรับสัญญาณแบบคลื่นที่ในขณะอยู่บนรถที่กำลังคลื่นที่ได้อีกด้วย เนื่องจากสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มีความคงทนต่อสิ่งรบกวนมาก ทั้งหมดนี้เป็นองค์ความรู้เบื้องต้นของระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 รวมทั้งข้อกำหนดต่าง ๆ ของสำนักงาน กสทช.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีการวิเคราะห์ของช่องสัญญาณการส่งผ่านโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

3.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันมาตรฐานการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินได้ถูกกำหนดให้เป็นระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบการส่งออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลที่เป็นที่นิยม ซึ่งถูกใช้งานอยู่ทั่วโลก เพื่อทดแทนระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบเดิม (แอนะลอก) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงคุณภาพของการส่งผ่านของช่องสัญญาณ ความผิดพลาดของการมอดูเลต อัตราความผิดพลาดของบิต ค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการด้อยลง ของคุณภาพสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของการวิเคราะห์สำหรับ DVB-T2

3.2 ช่องสัญญาณการส่งผ่าน

เพื่อที่จะเปรียบเทียบและวิเคราะห์ ผลความแตกต่าง ระหว่าง ผลการลดทอนจากการตรวจวัด และ การคำนวณ โดยสูตรการส่งผ่านของฟรีส (Friis Transmission Formula) ซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย และ สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ การรับสัญญาณแบบ Line of Sight ระหว่าง สายอากาศภาคส่ง และ สายอากาศภาครับ

$$G_{\mathrm{Friis}}(f) = \frac{P_{\mathrm{r}}(f)}{P_{\mathrm{t}}(f)} = G_{\mathrm{f}}(f)G_{\mathrm{t}}(f)G_{\mathrm{r}}(f) \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{\mathrm{f}}(f) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$P_{\mathrm{r}}(f) = P_{\mathrm{t}}(f)\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_{\mathrm{t}}(f)G_{\mathrm{r}}(f) \quad (3.3)$$

โดยที่ $G_{\mathrm{Friis}}(f)$ คือ อัตราขยายการส่งผ่านของฟรีส
$P_{\mathrm{r}}(f)$ คือ กำลังของสัญญาณด้านรับ
$P_{\mathrm{t}}(f)$ คือ กำลังของสัญญาณด้านส่ง
$G_{\mathrm{f}}(f)$ คือ อัตราขยายของช่องสัญญาณในอวกาศว่าง
$G_{\mathrm{r}}(f)$ คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ
$G_{\mathrm{t}}(f)$ คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง
λ คือ ค่าความยาวคลื่น
d คือ ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ

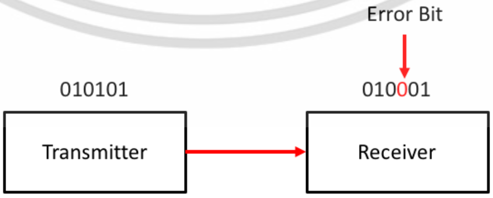
และสามารถคำนวณหาค่าความยาวคลื่นได้จากสมการที่ 3.4

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.4)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วแสง $(3x10^8 m/s)$
f คือ ความถี่ (Hz)

3.3 อัตราความผิดพลาดของบิต (bBER)

ในการวัดคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการชี้วัดคุณภาพของสัญญาณของสัญญาณ คือ อัตราความผิดพลาดของบิต ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนบิตที่ผิดพลาดต่อจำนวนบิตที่ถูกส่งทั้งหมด โดยสำนักงาน กสทช. ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำกับดูแลการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย และ หน่วยงาน DVB ได้กำหนดอัตราความผิดพลาดของบิตก่อน LDPC ไว้ที่ 10^{-7} [26]



รูปที่ 3.2 บล็อคไดอะแกรม แสดงการตรวจวัดค่า bBER, LBER

โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ได้ใช้งานการเข้ารหัส LDPC (Low-Density Parity-Checked) ร่วมกับ BCH (Bose – Chaudhuri - Hocquengham) เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ซึ่งให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงของ สัญญาณภาครับสูง ในเงื่อนไขการส่งสัญญาณแบบต่างๆ ประโยชน์ในด้านอื่นๆ คือ เพิ่มประสิทธิภาพ ของการแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (FEC - Forward Error Correction) ซึ่งทำให้ความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น ในการตรวจวัด สัญญาณครั้งนี้ รวมไปถึงการวิเคราะห์ bBER ซึ่งเป็นอัตราความผิดพลาดบิตก่อน LDPC คุณภาพของสัญญาณ ที่ได้รับถูกชี้วัดไปที่ การตรวจวัดค่าของ bBER

$$BER_{dvb} = \frac{(number\ of\ error\ bits)}{(total\ number\ of\ bits)} \quad (3.5)$$

3.4 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (C/N)

ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน นั่นเป็นค่าที่บอกระดับของสัญญาณ ที่ได้รับเทียบกับสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการชี้วัดคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับที่ภาครับได้ และ ที่ภาครับจะมีค่าขั้นต่ำของระดับสัญญาณที่ได้รับเพื่อให้ผ่าน ตามค่ากำหนดมาตรฐานที่ถูกใช้งานในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [4]

$$\mathrm{C/N'_{Rice-dvb}} = \mathrm{C/N_{Gauss-raw}} + \mathrm{Delta_{Rice}} + \mathrm{A} + \mathrm{B} + \mathrm{C} \quad (3.6)$$

$$\mathrm{C/N_{Rice-dvb}} = \mathrm{C/N'_{Rice}} + \mathrm{D} \quad (3.7)$$

โดยที่ A คือ 0.1 dB เป็นค่าประมาณของค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มเติม เพื่อที่จะให้บรรลุค่าความผิดเพี้ยน BER=10^{-7} หลังจาก LDPC ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ PP2 = 0.1 dB

B คือ การแก้ไขสำหรับค่า pilot boosting เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางการใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ของ ETSI (implementation guideline) [6] ที่ PP2 = 0.4 dB

C คือ การประมาณค่าช่องสัญญาณจริงตามแนวทางการใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลที่ 2 ของ ETSI (implementation guideline) [6] ที่ PP2 = 2.0 dB

D คือ การเสื่อมสลายของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนตามแนวทางการใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ของ ETSI (implementation guideline) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แฟคเตอร์ D การเสื่อมสลายของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน [4]

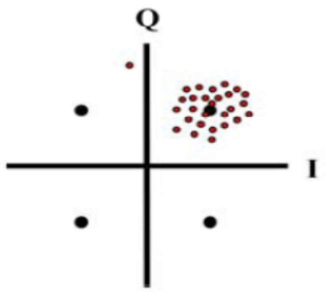
C/N (dB)	D (dB)
15	0.07
16	0.09
17	0.11
18	0.14
19	0.18
20	0.22
21	0.28
22	0.36
23	0.46
24	0.58
25	0.75
26	0.97
27	1.26
28	1.65
29	2.20
30	3.02
31	4.33
32	6.87

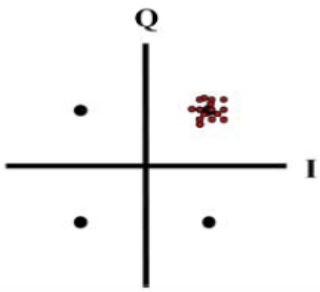
การคำนวณค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน สำหรับพารามิเตอร์การมอดูเลตของประเทศไทย มีค่าเท่ากับ 14.9 dB และ 15.2 dB สำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียนและไรเซียนตามลำดับ โดยสอดคล้องกับระดับมาตรฐานการให้บริการที่อัตราความผิดพลาดต่อบิตต่ำสุดที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาด (Quasi Error Free; QEF) ที่ถูกใช้งานสำหรับระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

3.5 อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต (Modulation Error Ratio;MER)

อัตราส่วนความผิดพลาดของการมอดูเลต ถูกใช้งานสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของการมอดูเลตสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โดยรูปแบบการมอดูเลตสัญญาณที่ใช้งานคือ QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ตำแหน่งของคอนสเตเลชั่นถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเพี้ยนของแอมปลิจูดและเฟส โดยสำนักงาน กสทช. ได้กำหนดค่าความผิดพลาดของการมอดูเลตมาตรฐานที่เครื่องส่งไว้ที่ 33 dB [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





(a) (b)

รูปที่ 3.3 (a)แสดงกลุ่มของสัญลักษณ์บนแผนภาพคอนสเตลเลชันที่มีค่าความผิดพลาดสูง (b)แสดงกลุ่มของสัญลักษณ์บนแผนภาพคอนสเตลเลชันที่มีค่าความผิดพลาดต่ำ [26]

กลุ่มของสัญลักษณ์ขนาดใหญ่ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.3 ทางด้านซ้ายมือ (a) ชี้ให้เห็นว่าค่าอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต (MER) มีค่าต่ำ หรือมีค่าความผิดเพี้ยนสูง และ ในรูปที่ 3.3 ทางด้านขวา (b) มือแสดงให้เห็นถึงกลุ่มของสัญลักษณ์ขนาดเล็ก ที่ให้ค่าอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลตสูงหรือมีค่าความผิดเพี้ยนต่ำ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MER_{dvb} = 10log\left\{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(I_j^2+Q_j^2\right)}{\sum_{j=1}^{N}\left(\delta I_j^2+\delta Q_j^2\right)}\right\} \tag{3.8}$$

เมื่อ

I_j, Q_j คือ ตำแหน่งพิกัด I และ Q ในอุดมคติ

$\delta I, \delta Q$ คือ ตำแหน่งพิกัด I และ Q ที่ผิดพลาด

N คือ จำนวนจุดข้อมูล

3.6 ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ (EVM)

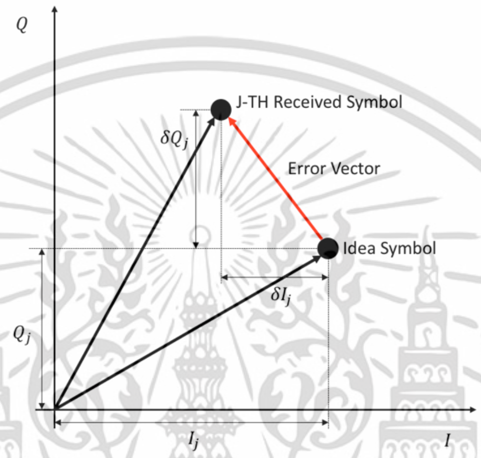
ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ คือ การวัดค่าความแม่นยำของสัญลักษณ์ที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องส่ง ภายในแผนภาพคอนสเตลเลชั่น และนี่คือแฟคเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของการมอดูเลตของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ด้วยการมอดูเลตแบบ QAM และ ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์นั้น จะเป็นตัวชี้วัดการเสื่อมคุณภาพของตำแหน่งเวกเตอร์บน แผนภาพคอนสเตลเลชันระหว่างสัญญาณในอุดมคติและสัญญาณที่สามารถรับได้จริงขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนของแมกนิจูดของเวกเตอร์ที่ผิดเพี้ยน และขนาดของเวกเตอร์ไปยังด้านนอกสุดของคอนสเตลเลชัน แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.4 และมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อ OFDM 64QAM ถูกใช้งานสำหรับการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์จำเป็นที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาเพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพของการให้บริการ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$EVM(\%)_{\mathrm{DVB}} = \left(\frac{EVM_{\mathrm{RMS}}}{S_{\mathrm{MAX}}}\right)100\% \qquad (3.9)$$

$$EVM_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\delta I_j^2+\delta Q_j^2\right)\delta}{S_{\mathrm{MAX}}^2}} \qquad (3.10)$$

เมื่อ S_{MAX} คือ แอมปลิจูดสูงสุดของตำแหน่งคอนสเตลเลชั่นในอุดมคติ



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งของเวกเตอร์ที่ผิดเพี้ยน

3.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

ในการแพร่กระจายคลื่นโดยทั่วไประหว่างภาคส่งและภาครับ สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบได้ดังนี้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและทดลองโดยใช้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบ Line of Sight [27]

3.7.1 Line of Sight (LOS)

ในการแพร่กระจายคลื่นแบบ Line of Sight นั้น ระหว่าง สายอากาศภาคส่ง และ สายอากาศภาครับ สามารถที่จะรับส่งกันได้ตรงๆโดยไม่มีสิ่งกีดขวางและในพื้นที่ Fresnel ไม่มีสิ่งกีดขวางด้วยเช่นกัน[27]

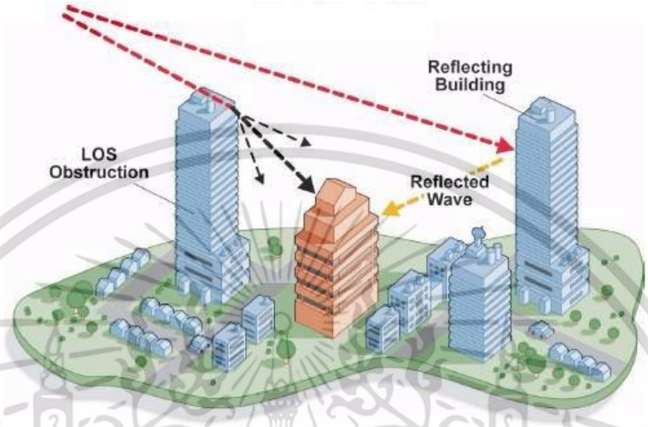
3.7.2 Non Line of Sight (NLOS)

ในการแพร่กระจายคลื่นแบบ Non Line of Sight นั้น สายอากาศภาคส่ง และ สายอากาศภาครับ ไม่สามารถที่จะส่งหากันได้เป็นเส้นตรง สัญญาณจากเครื่องส่งวิ่งผ่านอุปสรรค และได้รับผลกระทบหลายๆอย่าง เช่น การสะท้อน, การแตกกระจาย ก่อนสัญญาณจะถึงภาครับ และ พื้นที่ Fresnel ถูกขวางเต็มพื้นที่ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 Near Line of Sight (nLOS)

ในการแพร่กระจายคลื่นแบบ Near Line of Sight กรณีนี้แสดงให้เห็นถึงสถานการณ์ระหว่าง LOS และ NLOS โดยระหว่างสายอากาศในภาครับและสายอากาศภาคส่งสามารถที่จะมองเห็นซึ่งกันและกัน แต่ บางส่วนในพื้นที่ Fresnel ถูกกีดขวาง สัญญาณที่มาจากเครื่องส่งได้แพร่กระจายผ่านการเลี้ยวเบนและสะท้อนเป็นหลายๆส่วน ในหลายๆด้านของอาคารและตึกสูง [27]



รูปที่ 3.5 การแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบต่าง ๆ [38]

3.8 รูปแบบของการพิจารณาสัญญาณที่รับได้

ช่องทางในการรับสัญญาณที่พบในระบบกระจายภาพและเสียงภาคพื้นดิน สามารถแบ่งแยกตามประเภทได้ 3 ประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะมีค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio) ที่แตกต่างกันออกไป

3.8.1 การพิจารณาช่องสัญญาณเกาส์เซียน

ช่องนี้มีลักษณะเป็นสัญญาณที่ต้องการรับเพียงอย่างเดียวโดยปราศจากการรบกวนของช่องสัญญาณ มีเพียงแต่เกาส์เซียนเท่านั้นเป็นช่องทางการรับสัญญาณที่มีความต้องการน้อยที่สุด และมักถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเท่านั้น ไม่ใช่ในทางปฏิบัติหรือในการวางแผนโครงข่าย

3.8.2 การพิจารณาช่องสัญญาณไรเซียน

ช่องสัญญาณไรเซียนมักถูกใช้ในการวางแผนการรับสัญญาณบนชั้นดาดฟ้าอาคารที่มีสัญญาณมากกว่าช่องสัญญาณเกาส์เซียนจากเครื่องส่ง และมีขนาดของสัญญาณสะท้อนขนาดเล็ก

3.8.3 การพิจารณาช่องสัญญาณการกระจายเรย์ลี

ช่องสัญญาณเรย์ลีส่วนใหญ่ใช้สำหรับการรับสัญญาณกลางแจ้งในร่มและแบบพกพา โดยการรับสัญญาณในช่องสัญญาณนี้ จะมีเพียงแต่สัญญาณสะท้อนเท่านั้น และไม่มีสัญญาณจากเครื่องส่งโดยตรงเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 เป้าหมายของประสิทธิของการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

ในการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้น ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพของสัญญาณที่ออกอากาศ โดยสำนักงาน กสทช. โดยได้กำหนดระดับมาตรฐานการให้บริการที่อัตราความผิดพลาดของบิตต่ำสุด ที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งหมายถึง ความผิดพลาดของบิตน้อยกว่าหนึ่งครั้งต่อหนึ่งชั่วโมงหรือมีค่าผิดพลาดบิตน้อยกว่า 1×10^{-7} ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนไม่ต่ำกว่า 15.17 dB และอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลตหลังเครื่องส่งต้องไม่ต่ำกว่า 33 dB

3.10 ฟังก์ชั่นความน่าจะเป็นพื้นฐาน

สำหรับการทดลองวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในงานวิจัยนี้ ได้นำมาพิจารณาทางสถิติเพื่อหาโอกาศความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโอกาศในการเกิดค่าที่ชี้วัดคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ว่ามีโอกาสเกิดขึ้นได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ P คือความน่าจะเป็น โดยได้แบ่งเป็นฟังก์ชั่นพื้นฐานสองฟังก์ชั่นดังนี้ [32]

3.10.1 ฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function; PDF)

ข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากการทดลองวิจัยนี้เป็นตัวแปรสุ่ม ซึ่งสามารถหาค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มได้ โดยแทนค่าความน่าจะเป็นด้วย P(X=x) ซึ่งมีคุณสมบัติความน่าจะเป็นคือ $0 \leq P(X = x) \leq 1$

3.10.2 ฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม (Cumulative distribution function; CDF)

ตัวแปรสุ่ม X ซึ่งเป็นค่าต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง ถ้า F(x) คือฟังก์ชั่นความน่าจะเป็นสะสมของตัวแปรสุ่ม X แล้ว $F(x) = P(X \leq x)$ และในกรณีที่ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องนั้น $F(x) = \sum_x f(x)$ และในกรณีที่ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง $F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)\,dx$

3.11 สรุป

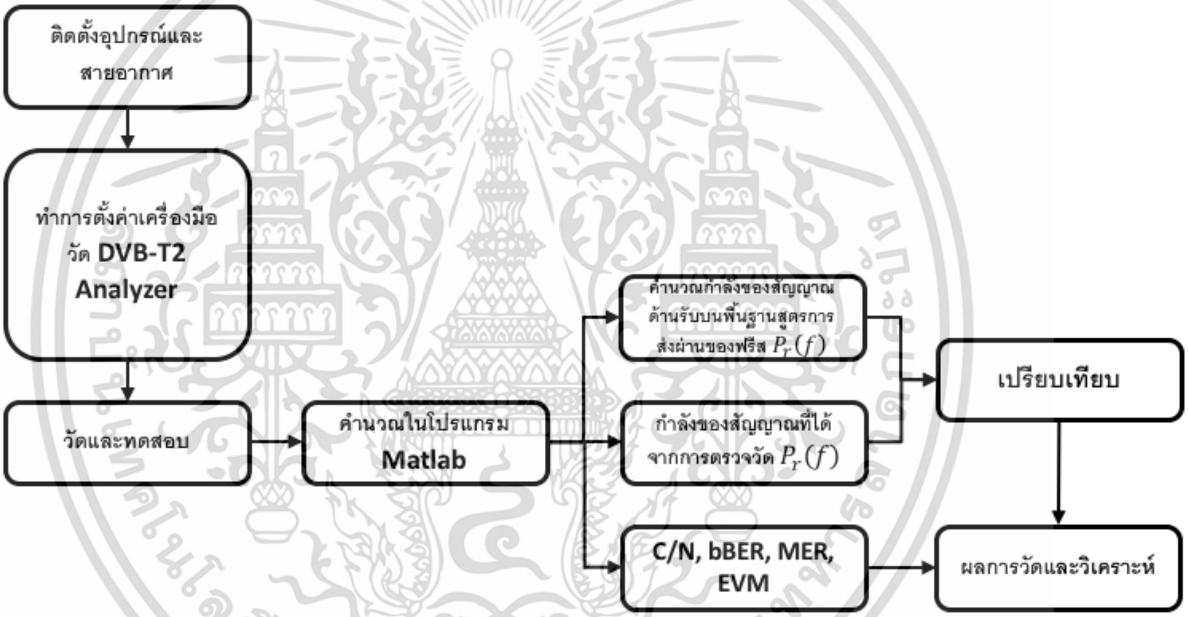
ในบทนี้ได้กล่าวถึง หลักการ และ ทฤษฎี ที่นำมาศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณภาพของระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ให้บริการในประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของหลักการของฟรีสที่นำมาคำนวณและ ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน รวมทั้งขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ด้วย ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถที่จะเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของการให้บริการได้ เพื่อพัฒนาคุณภาพของสัญญาณต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
แบบจำลองและขั้นตอนการทดลองวิจัย

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองของการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในการทดลองซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะ และประเมินประสิทธิภาพ ของการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งในการตรวจวัดสัญญาณในครั้งนี้ได้มีหลายหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเข้ามามีส่วนร่วมในการตรวจวัดภาคสนามด้วย เช่น บมจ.อสมท และ กสทช. เป็นต้น ซึ่งรูปแบบการทดลองและวิจัยสามารถแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรม รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการทดลองและวิจัย

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 สายอากาศ

พิจารณาสายอากาศที่เหมาะสมกับการทดลองและการตรวจวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดิน ระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.4 ยี่ห้อ Samart รุ่น D15E เป็นสายอากาศยากิ 15 องค์ประกอบ สามารถรองรับความถี่ในช่วง 470 – 862 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และเป็นสายอากาศชนิดติดตั้งบนหลังคาภายนอกอาคาร มีอัตราขยาย 11 dBd มาพร้อมกับสายนำสัญญาณความยาว 10 เมตร ติดตั้งบนขาตั้งที่สามารถปรับระดับความสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 สายอากาศที่ใช้สำหรับการทดลองวัด [36]

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้สำหรับทดลองวัด

องค์ประกอบ (Element)	15
แถบความถี่ (Reception Range)	UHF 470-862 MHz
ช่องโทรทัศน์ (Chanel)	CH. 21-69
อัตราขยาย (Gain)	11 dB
ความกว้างของคลื่นตามขวาง (Beamwidth Horizontal Degree)	45
อัตราส่วนหน้าต่อหลัง (Front to Back Ratio)	> 20 dB
อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)	<1.5 : 1
ความยาวของบูม (Boom Dimension)	123 cm.
วัสดุ (Boom Material)	Aluminum
อิมพีแดนซ์ (Impedance)	75 Ohm

4.2.2 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

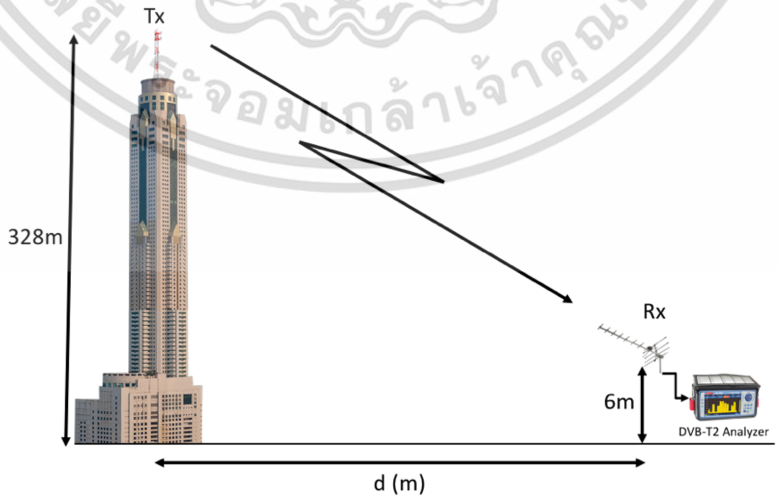
ในการศึกษาทดลองในครั้งนี้ได้พิจารณาการใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (Spectrum Analyzer) ยี่ห้อ Rover รุ่น HD Pro เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราความผิดพลาดบิตทั้งก่อนและหลัง LDPC, Noise Margin, อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต, อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ [37]

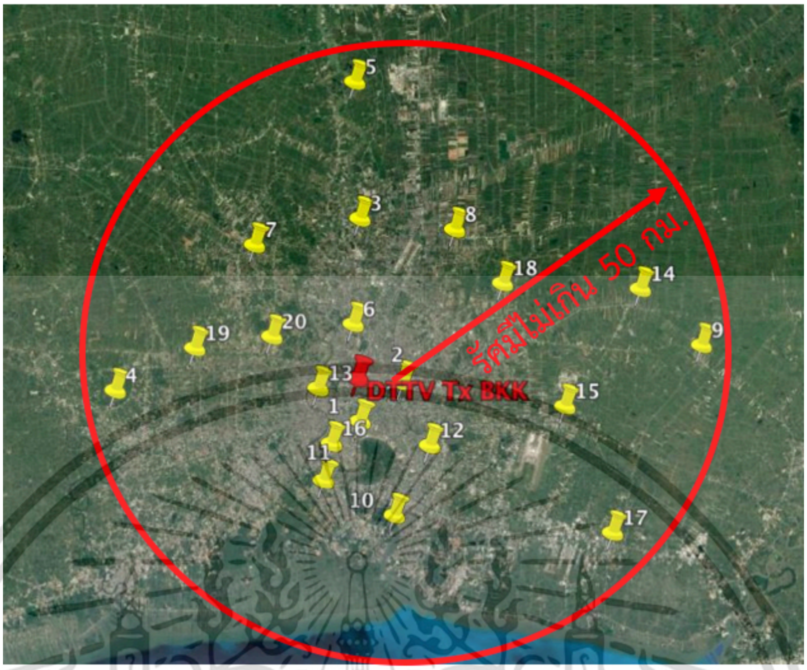
4.3 ขั้นตอนการวิจัย

ในการศึกษาและตรวจวัดได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่สำหรับโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สำหรับการวิเคราะห์ โดยในการศึกษาทดลองและตรวจวัด ได้เชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดดังรูปที่ 4.2 โดยการติดตั้งสายอากาศทิศทางเดียวที่มีอัตราขยายของสายอากาศ 11 dBd อยู่ที่ความสูงจากระดับพื้น 6 เมตร โดยที่รูปแบบการรับสัญญาณเป็นการรับแบบประจำที่ภายนอกอาคาร ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยวัดสัญญาณในทิศทาง Line of Sight ระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ ซึ่งปราศจากสิ่งกีดขวางใด ๆ โดยตรวจวัดสัญญาณ 20 จุดในพื้นที่กรุงเทพมหานครดังรูปที่ 4.5 ซึ่งได้สรุปจากที่ประชุมคณะทำงานสำนักงาน กสทช.ซึ่งในแต่ละจุดตรวจวัดจะตรวจวัดซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อนำค่ามาพิจารณาในเชิงสถิติ ซึ่งเป็นวิธีการตรวจวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยุคที่ 2 ที่ถูกกำหนดโดยสำนักงาน กสทช.



รูปที่ 4.4 การเตรียมอุปกรณ์การวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งที่กำหนดการวัด 20 ตำแหน่งในพื้นที่กรุงเทพมหานคร

4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลองซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดวิธีการวัดของ สำนักงาน กสทช. ที่ได้กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทยไว้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยกำหนดให้ความสูงสายอากาศเครื่องส่งอยู่ที่ระดับความสูง 328 เมตร และความสูงสายอากาศเครื่องอยู่ที่ระดับความสูง 6 เมตร ที่ความต่าง 514, 594, 626, 658 และ 722 MHz ซึ่งเป็นของโครงข่าย กรมประชามสัมพันธ์, ททบ 5 เครื่องส่งที่ 1, อสมท, ไทยพีบีเอส และ ททบ. 5 เครื่องส่งที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง [27-28]

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
ความสูงสายอากาศเครื่องส่ง	328 เมตร
ความสูงสายอากาศเครื่องรับ	6 เมตร
ความถี่	514, 594, 626, 658 และ 722 MHz

4.5 กำลังส่งของเครื่องส่ง

เนื่องจากในประเทศไทยผู้ให้บริการโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มีอยู่ 4 ราย และ 5 เครื่องส่ง กำลังส่งของเครื่องส่งในการตรวจวัดสัญญาณในครั้งนี้จะแตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 กำลังส่งของเครื่องส่ง [27-28]

Operator	Frequency (MHz)	Channel	Power Output (kW)
NBT	514	26	4
ARMY1	594	36	4.3
MCOT	626	40	4
TPBS	658	44	3.91
ARMY2	722	52	4.3

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการตรวจวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในสภาวะแวดล้อมแบบเขตเมือง ที่ประกอบไปด้วยตึกสูงเป็นจำนวนมาก พื้นที่เปิด และ พื้นที่ชานเมือง โดยมีการกำหนดจุดตรวจวัดจำนวน 20 จุดตรวจวัด โดยแต่ละจุดจะตรวจวัดซ้ำเป็นจำนวน 2 ครั้ง และบันทึกผลด้านรับเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณและผลกระทบที่เกิด โดยในการตรวจวัดภาคสนามนั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เป็นอุปกรณ์หลักในการวัดเพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบต่างๆ ที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมในพื้นที่ต่างๆ โดยใช้สายอากาศแบบยากิ 15 องค์ประกอบที่สามารถตอบสนองความถี่ในช่วง 470 – 862 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โดยติดตั้งสายอากาศภาครับที่ความสูง 6 เมตร และ สายอากาศภาคส่งที่ระดับความสูง 328 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล โดยใช้ทิศทาง Line of Sight เป็นทิศทางในการรับสัญญาณ ปลายสายอากาศภาครับหันทิศทางไปที่สถานีส่งซึ่งตั้งอยู่ที่อาคารใบหยก 2 โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปวิเคราะห์และแสดงผลในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลองวิจัย

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลของช่องสัญญาณ ที่ได้รับจากการวัดโดยแสดงในพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ความแตกต่างระหว่างค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับจากการตรวจวัดภาคสนามในทิศทางเส้นสายตา จากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ และ ค่าที่ได้จากการคำนวณ, ขนาดความผิดพลาดทั้งก่อน LDPC ค่า Noise Margin, อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต ค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ และผลลัพธ์ของการใช้งานฟังก์ชันการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น

5.2 ผลการทดลองวิจัยและประเมินผล

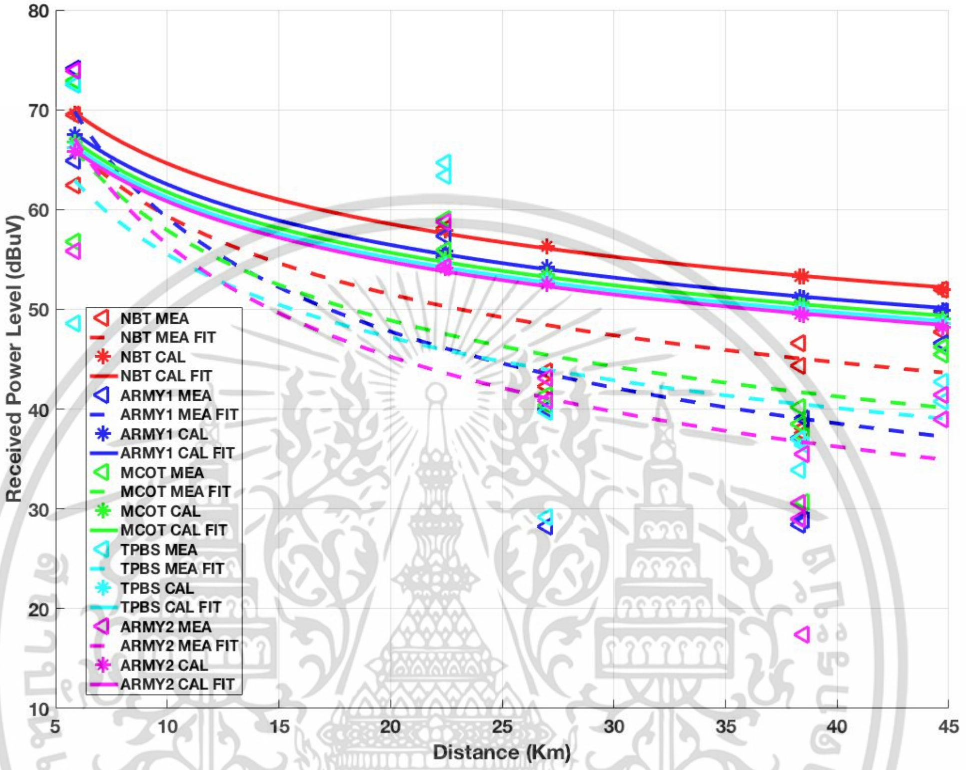
จากการทดลองการตรวจวัดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ผลที่ได้จากการตรวจวัดประกอบด้วย ผลของการเปรียบเทียบความแรงสัญญาณที่ตรวจวัดได้และผลที่ได้จากการคำนวณ คุณภาพของสัญญาณโดยพิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดของบิตก่อนการแก้ไข และค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพของสัญญาณดังต่อไปนี้ ขนาดความผิดพลาดของการมอดูเลต และอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งจะส่งผลกระทบกับคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และ ได้พิจารณาถึงขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ ซึ่งมีความสำคัญและเป็นปัจจัยที่ทำให้คุณภาพของสัญญาณเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้

5.2.1 ผลของการเปรียบเทียบความแรงสัญญาณระหว่างผลการวัดได้และผลที่ได้จากการคำนวณ

การตรวจวัดภาคสนามทั้งหมดได้ทำการวัดภายใต้โครงข่ายความถี่เดียว นั่นหมายความว่า แต่ละจุดตรวจวัดนั้น ได้ทำการวัดสัญญาณที่มาจากเครื่องส่งเดียวกัน ผลของการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่ได้มาจากการตรวจวัด และ ผลที่ได้มาจากการคำนวณ ถูกแสดงในรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า ทั้ง 5 เครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย กรมประชาสัมพันธ์ (NBT) ออกอากาศที่ความถี่ 514 MHz, ททบ5-1 (ARMY1) ออกอากาศที่ความถี่ 594 MHz, อสมท. (MCOT) ออกอากาศที่ความถี่ 626 MHz, ไทยพีบีเอส (TPBS) ออกอากาศที่ความถี่ 658 MHz และ ททบ 5-2 (ARMY2) ออกอากาศที่ความถี่ 722 MHz แสดงให้เห็นว่า หากระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ ความแรงของสัญญาณลดลง ระยะในการทดสอบครั้งนี้สูงสุดอยู่ที่ 45 กิโลเมตรจากเครื่องส่งและเส้นแนวโน้มถูกแสดงไว้เป็นเส้นประ ในการตรวจวัดภาคสนามครั้งนี้ ทิศทางระหว่างเครื่องส่ง และเครื่องรับเป็นชนิดระดับเส้นสายตา ทำให้เส้นแนวโน้มจะอยู่ใกล้กับผลที่ได้จากการคำนวณ บางจุดตรวจวัดที่ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับโดย ประมาณ 20 กิโลเมตร ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากการตรวจวัดอยู่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยประมาณ 55 $\mathrm{dB}\mu V$ อย่างไรก็ตามที่ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ประมาณ 18 กิโลเมตร ค่าความแรงสัญญาณที่วัดได้อยู่ที่ 43 $\mathrm{dB}\mu V$ เนื่องจากในพื้นที่ตรวจวัดนี้ มีสิ่งกีดขวางและสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าที่จุดตรวจวัดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร เนื่องจากบางจุดตรวจวัดสัญญาณนั้นประกอบไปด้วยตึกสูงหลายตึก ทำให้การรับสัญญาณเป็นไปได้ยาก

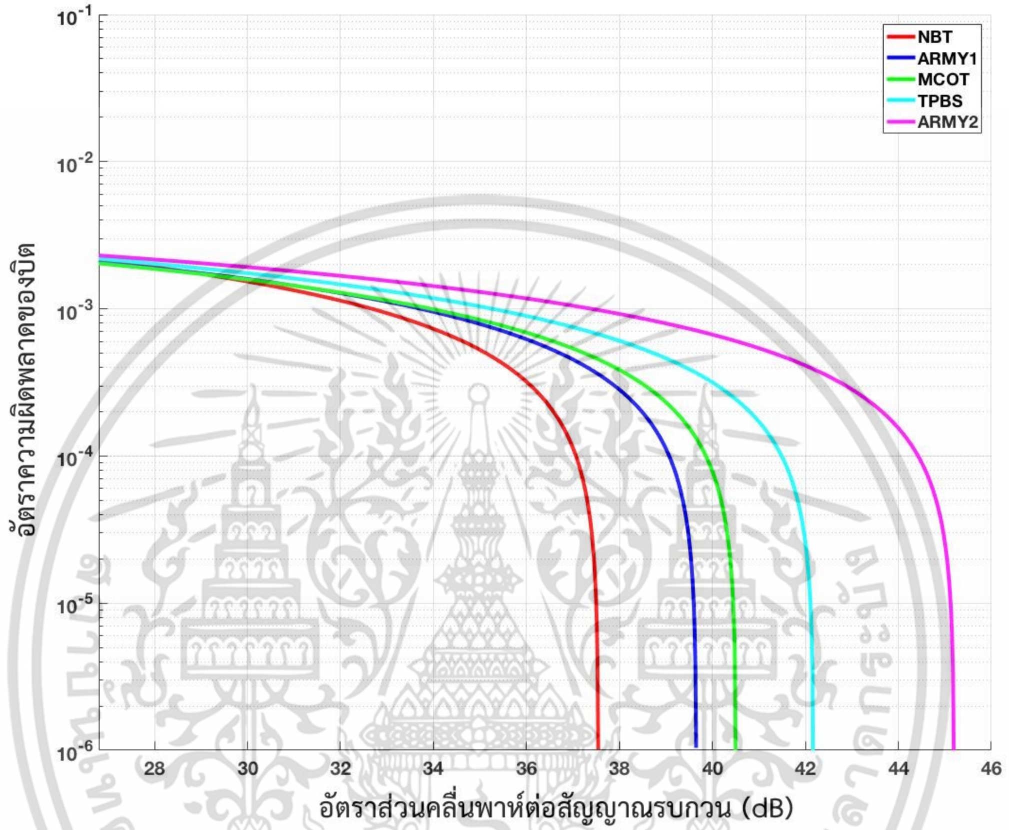


รูปที่ 5.1 ผลเปรียบเทียบความแรงสัญญาณระหว่างการวัดและการคำนวณทั้ง 5 โครงข่ายของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

จากผลการตรวจวัดรูปที่ 5.1 เป็นผลการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าความแรงสัญญาณที่คำนวณได้จากสูตรการส่งผ่านของฟรีส ในทิศตะวันออกของกรุงเทพมหานคร ช่วงระยะห่างจากสถานีส่งที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้แตกต่างกันมาก อยู่ที่ระยะห่างจากสถานีส่งประมาณ 38 กิโลเมตร ซึ่งในจุดที่รับสัญญาณได้ค่าความแรงสัญญาณต่ำกว่าเส้นแนวโน้ม อยู่ที่จุดวัดที่ 14 ซึ่งมีระยะห่างจากสถานีส่ง 38.34 กิโลเมตร และจุดวัดที่ 17 ซึ่งมีระยะห่างจากสถานีส่ง 38.49 กิโลเมตร ซึ่งทั้ง 2 จุดนี้อยู่ในทิศตะวันออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน

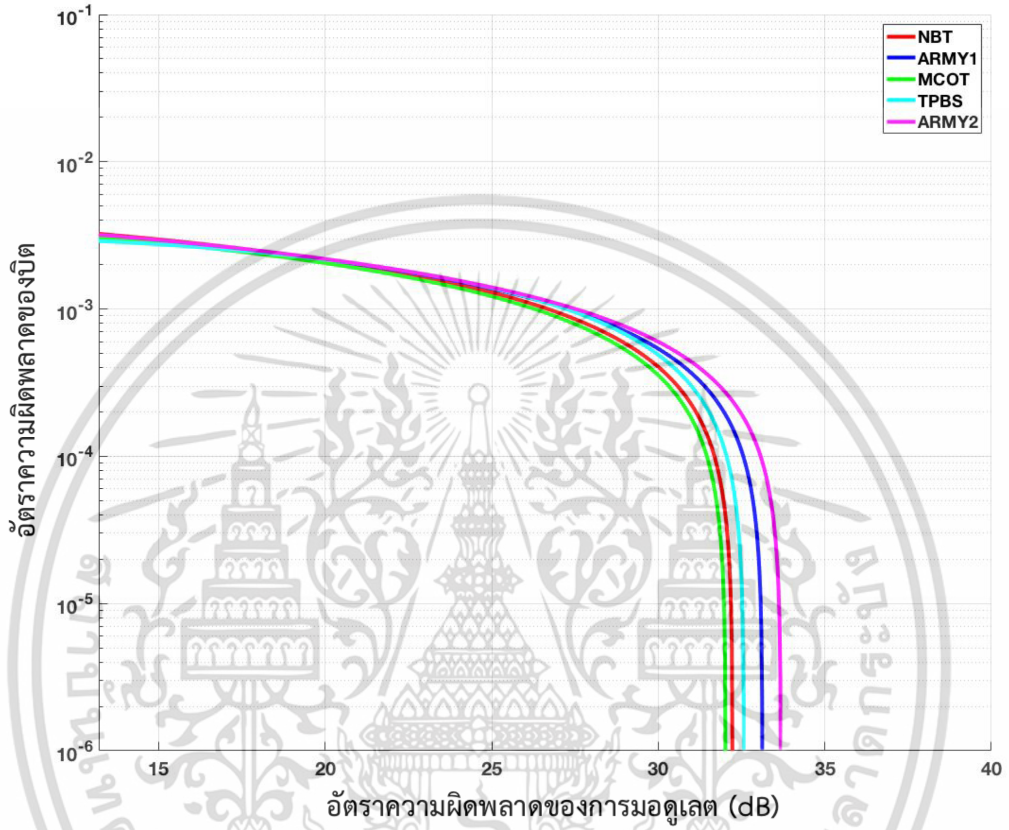


รูปที่ 5.2 คุณภาพของสัญญาณโครงข่าย NBT, ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2

จากรูปที่ 5.2 แสดงคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราความผิดพลาดของบิต และ อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน พร้อมทั้งแสดงเส้นแนวโน้มของทั้ง 5 โครงข่าย พิจารณาเฉพาะผลด้านทิศตะวันออก จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนมีค่าที่สูงขึ้น จะส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้น หรืออัตราความผิดพลาดของบิตที่ต่ำลง ในทางกลับกันถ้าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ จะส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณลดลง หรือทำให้อัตราความผิดพลาดของบิตนั้นสูงขึ้น โครงข่ายที่มีอัตราความผิดพลาดต่อบิตน้อยที่สุดเมื่อมีค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนเท่ากันคือ โครงข่ายของกรมประชาสัมพันธ์ (NBT) ออกอากาศที่ความถี่ 514 MHz และโครงข่ายที่มีอัตราความผิดพลาดต่อบิตมากที่สุดเมื่อมีค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนเท่ากันคือ โครงข่าย ททบ. 5 เครื่องส่งที่ 2 ออกอากาศที่ความถี่ 722 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต

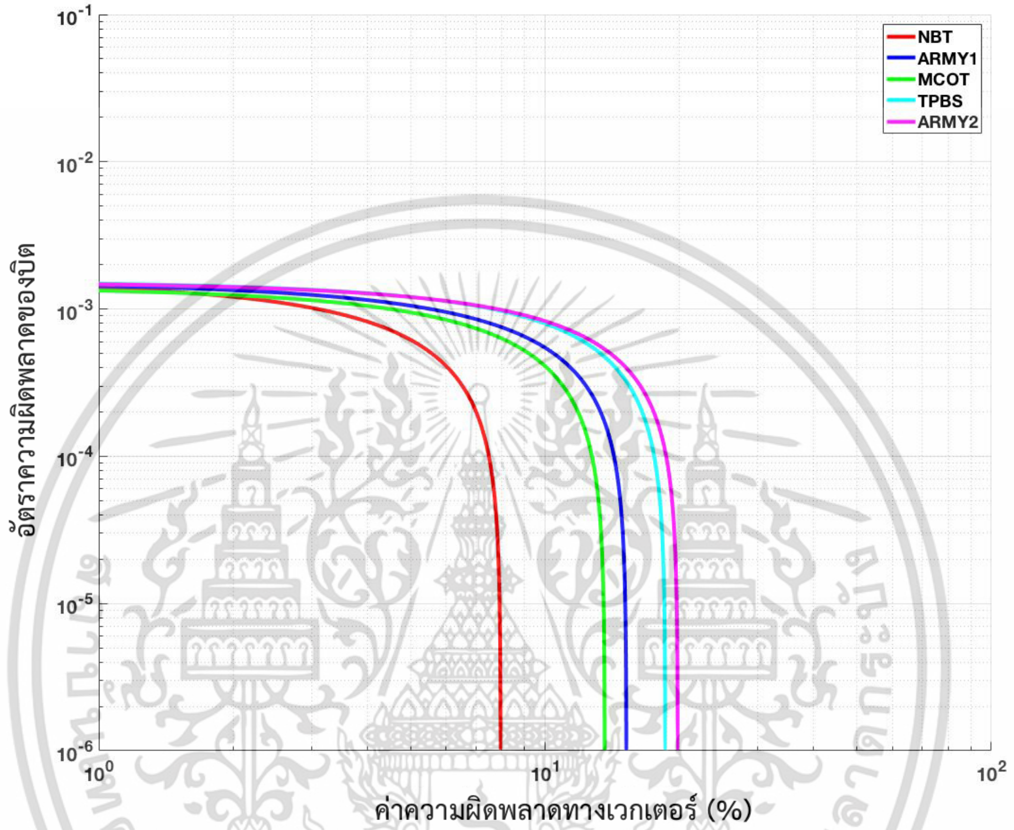


รูปที่ 5.3 คุณภาพของสัญญาณโครงข่าย NBT, ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2

จากรูปที่ 5.3 แสดงคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราความผิดพลาดของบิต และอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต ซึ่งมีผลกับคุณภาพของสัญญาณ ซึ่งพิจารณาเฉพาะผลด้านทิศตะวันออก เมื่ออัตราความผิดพลาดของการมอดูเลตมีค่าที่สูงขึ้น หรือมีการผิดพลาดต่ำ ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้น หรืออัตราความผิดพลาดของบิตที่ต่ำลง ในทางกลับกัน เมื่ออัตราความผิดพลาดของการมอดูเลตมีค่าต่ำหรือมีความผิดพลาดมาก จะส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลง หรือทำให้อัตราความผิดพลาดของบิตสูงขึ้น และสามารถอธิบายได้ว่าโครงข่ายที่มีอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลตต่ำที่สุดคือโครงข่าย อสมท และทำให้มีค่าอัตราความผิดพลาดของบิตต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์



รูปที่ 5.4 คุณภาพของสัญญาณโครงข่าย NBT, ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2

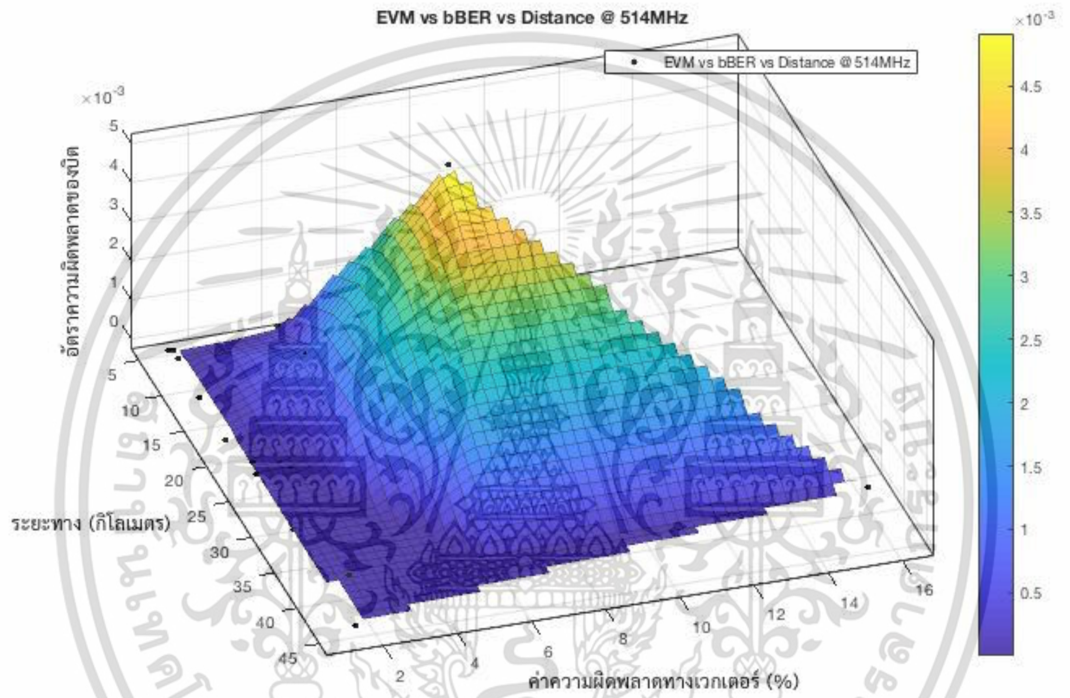
จากรูปที่ 5.4 แสดงคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราความผิดพลาดต่อบิต และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ พร้อมทั้งแสดงเส้นแนวโน้ม พบว่าเมื่อขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์มีค่าต่ำ ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้น หรือค่าอัตราความผิดพลาดของบิตที่ต่ำ และเมื่อขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลง หรืออัตราความผิดพลาดของบิตที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้ม จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่การออกอากาศที่สูงขึ้น ทำให้ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์สูงขึ้น และส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลง หรืออัตราความผิดพลาดของบิตที่สูงขึ้น และ โครงข่ายที่มีขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ที่ต่ำและให้คุณภาพของสัญญาณดีที่สุด คือ โครงข่าย MCOT ออกอากาศที่ความถี่ 626 MHz แสดงในเส้นสีเขียว และโครงข่ายที่มีขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ที่สูงที่สุดคือโครงข่าย ARMY2 ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีความถี่ออกอากาศที่สูงที่สุด โดยออกอากาศที่ความถี่ 722 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์และระยะทาง

คุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางระหว่างสถานีส่ง และภาครับ และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับในจุดทดลองวัดต่าง ๆ จากระยะทาง 5 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร พบว่าระยะทางมีผลกับคุณภาพของสัญญาณเล็กน้อย ส่วนปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับคุณภาพของสัญญาณอย่างชัดเจน คือ ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์

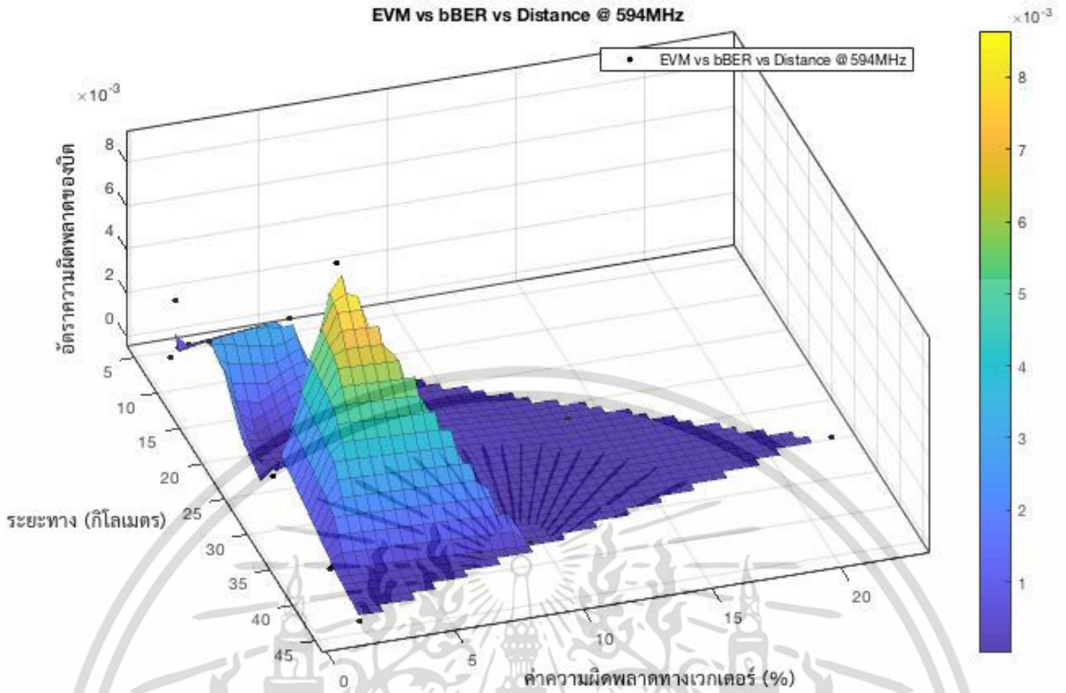


รูปที่ 5.5 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย NBT ที่ความถี่ 514 MHz

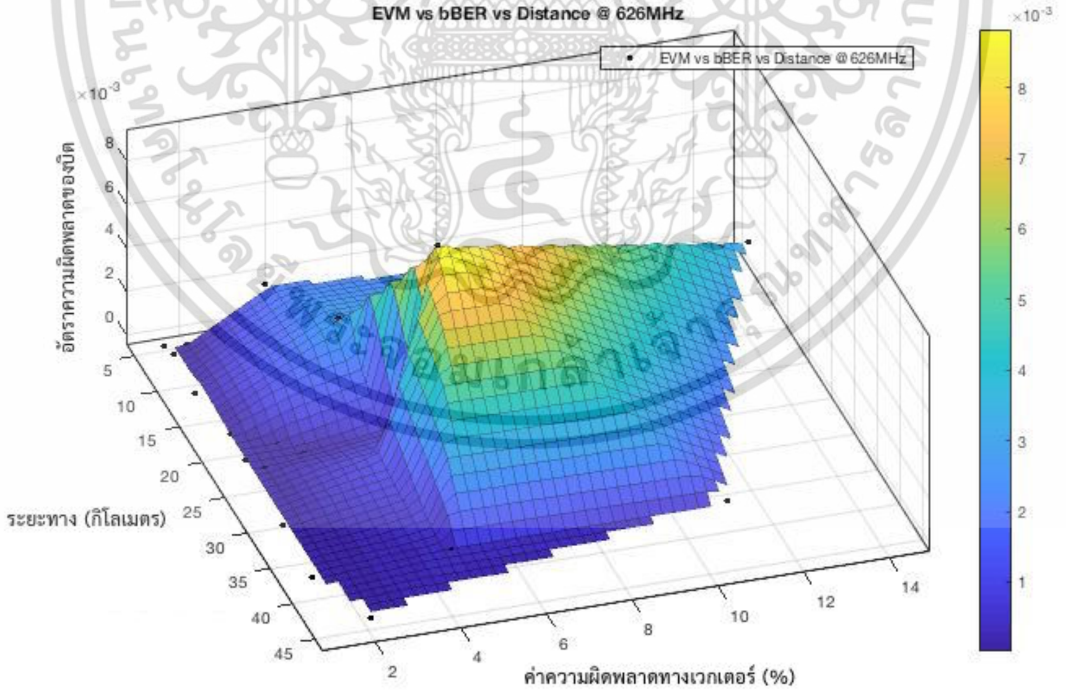
จากรูปที่ 5.5 แสดงคุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางระหว่างสถานีส่งและภาครับ และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ ของโครงข่าย NBT ออกอากาศที่ความถี่ 514 MHz พบว่าเมื่อระยะทางที่ไกลออกจากสถานีส่ง ที่จุดที่ให้ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ต่ำ ยังคงมีคุณภาพของสัญญาณที่ดี หรือมีอัตราความผิดพลาดของบิตต่ำ และที่ระยะห่างประมาณ 10 กิโลเมตรจากสถานีส่ง พบว่ามีจุดที่เกิดขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ที่สูง ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลง ถึงแม้ว่าจะอยู่ใกล้สถานีส่งก็ตาม ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่า ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ลดต่ำลง

โดยในคุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางระหว่างสถานีส่งและภาครับ และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ ของโครงข่าย ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2 ถูกแสดงดังรูปที่ 5.6, 5.7, 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย ARMY1 ที่ความถี่ 594 MHz

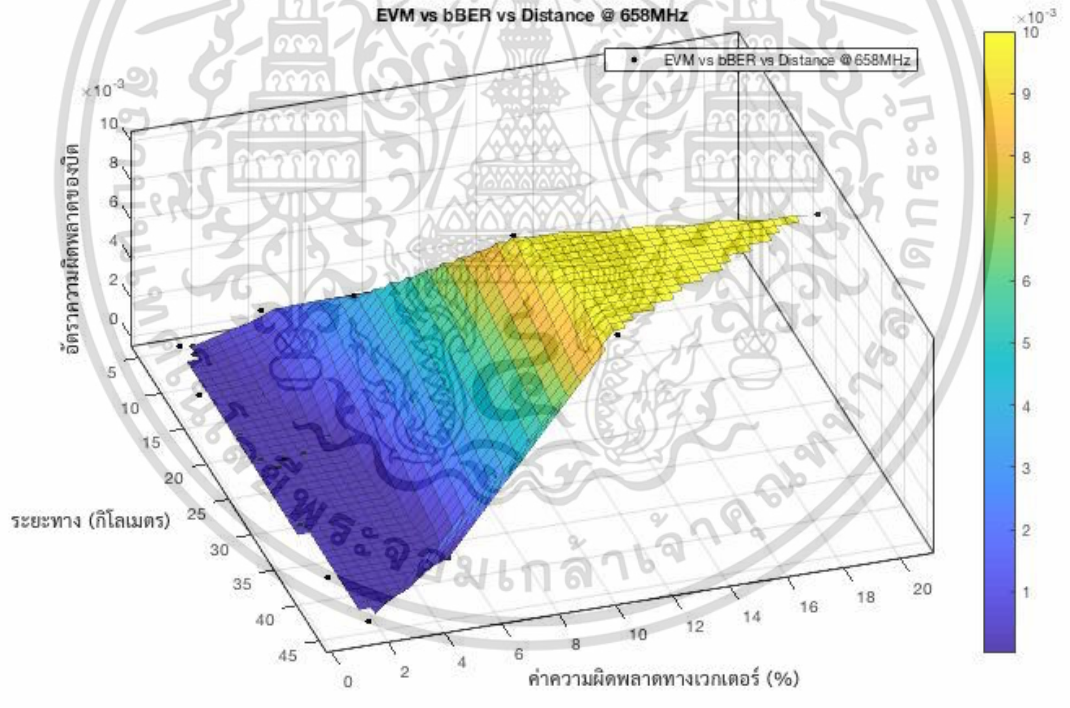


รูปที่ 5.7 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย MCOT ที่ความถี่ 626 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 แสดงคุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางระหว่างสถานีส่งและภาครับ และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ ของโครงข่าย ARMY1 ออกอากาศที่ความถี่ 594 MHz พบว่าในจุดที่ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์จะสูงสามารถทำให้เกิดอัตราผิดพลาดของบิตหรือคุณภาพของสัญญาณต่ำได้ โดยเกิดขึ้นที่ระยะทางประมาณ 10 กิโลเมตร และที่ระยะทางประมาณ 30 กิโลเมตร ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าอัตราความผิดพลาดสูงหรือคุณภาพของสัญญาณต่ำที่สุด

จากรูปที่ 5.7 แสดงคุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางระหว่างสถานีส่งและภาครับ และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ ของโครงข่าย MCOT ออกอากาศที่ความถี่ 626 MHz พบว่าในจุดที่ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์จะสูงสามารถทำให้เกิดอัตราผิดพลาดของบิตหรือคุณภาพของสัญญาณต่ำได้ โดยเกิดขึ้นที่ระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร ซึ่งเป็นจุดที่มีขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ที่สูง จึงส่งผลให้เกิดอัตราความผิดพลาดของบิตที่สูงขึ้น หรือทำให้คุณภาพของสัญญาณมีค่าต่ำ สำหรับในโครงข่าย MCOT นั้นได้เปิดใช้งานฟังก์ชั่นการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่นเพื่อเพิ่มคุณภาพของสัญญาณทำให้ในจุดที่มีระยะทางไกลนั้นมีขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ที่

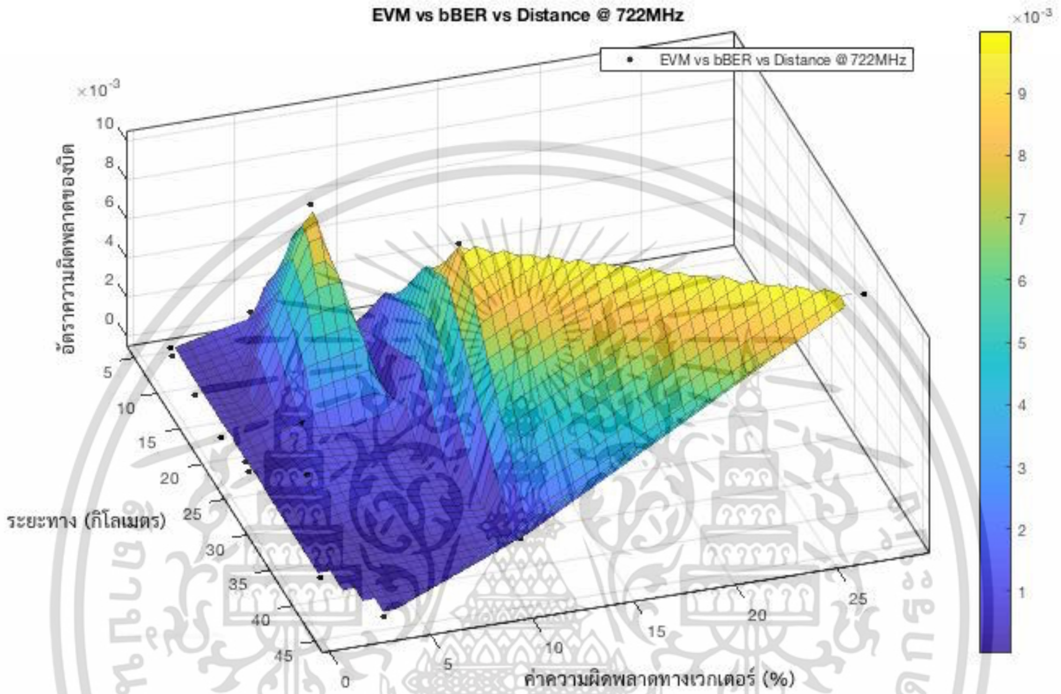


รูปที่ 5.8 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย TPBS ที่ความถี่ 658 MHz

จากรูปที่ 5.8 แสดงคุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางระหว่างสถานีส่งและภาครับ และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ ของโครงข่าย TPBS ออกอากาศที่ความถี่ 658 MHz พบว่าในจุดที่ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์จะสูงสามารถทำให้เกิดอัตราผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของบิตหรือคุณภาพของสัญญาณต่ำได้ โดยเกิดขึ้นที่ระยะทางในช่วงประมาณ 15 ถึง 45 กิโลเมตร ซึ่งเกิดขึ้นในจุดที่มีขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ที่สูง และพบว่าเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้นขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นและช่วงระยะทางกว้างกว่าในช่วงความถี่ต่ำ



รูปที่ 5.9 คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับของโครงข่าย ARMY2 ที่ความถี่ 722 MHz

จากรูปที่ 5.9 แสดงคุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางระหว่างสถานีส่งและภาครับ และขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ ของโครงข่าย ARMY2 ออกอากาศที่ความถี่ 722 MHz พบว่าในจุดที่ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์จะต่ำสามารถทำให้เกิดอัตราผิดพลาดของบิตหรือคุณภาพของสัญญาณต่ำได้ โดยเกิดขึ้นเป็นช่วงกว้างตั้งแต่ที่ระยะทางประมาณ 15 กิโลเมตร ถึงระยะทาง 40 กิโลเมตร ในโครงข่ายที่ใช้งานความถี่ส่งออกอากาศที่สูงพบว่าขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์สูงขึ้นมากกว่าโครงข่ายที่ใช้งานความถี่ส่งออกอากาศที่ต่ำ

5.2.6 ผลการวิเคราะห์ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ในเชิงสถิติ

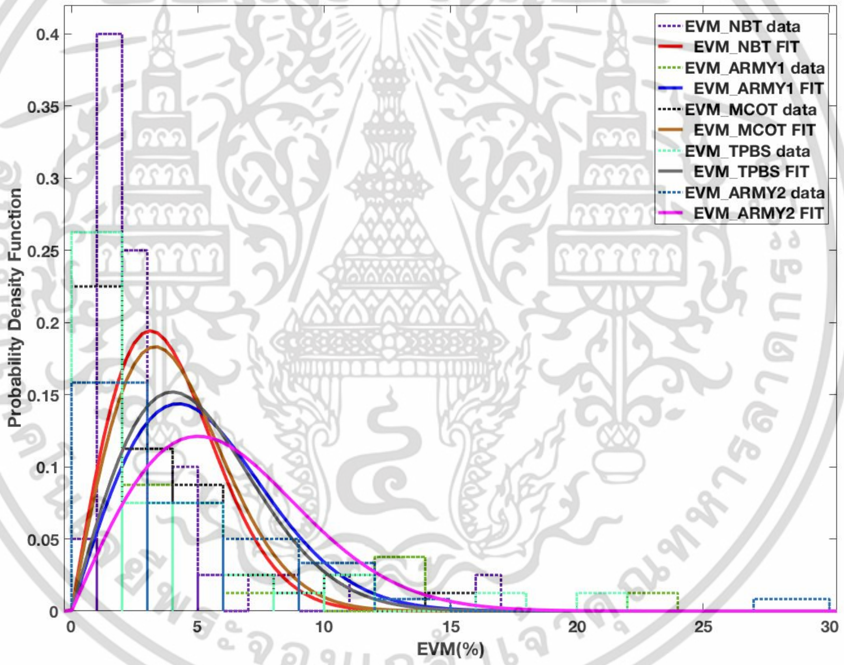
ในส่วนนี้จะเป็นการนำผลการตรวจวัดขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์มาวิเคราะห์ในทางสถิติ เพื่อพิสูจน์ว่าผลของการใช้ฟังก์ชันการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่นของผู้ให้บริการโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าผู้ให้บริการโครงข่ายที่ไม่ได้ใช้งานฟังก์ชันนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมีนัยยะสำคัญ หรือ มีความแตกต่างอย่างชัดเจน เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาโครงข่ายต่อไป โดยได้พิจารณาถึงค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน

ตารางที่ 5.1 ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ในทางสถิติ

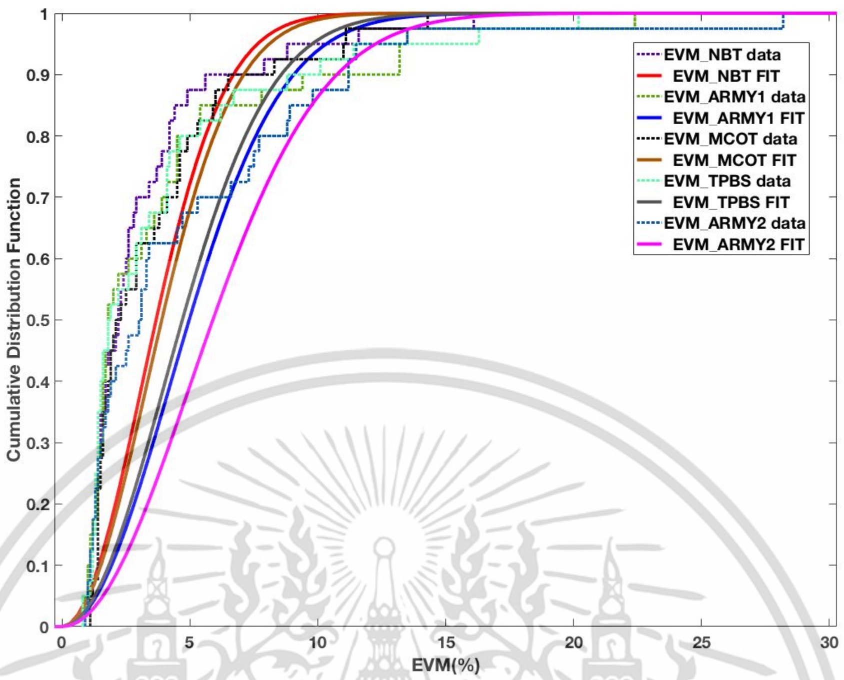
ความถี่ (MHz)	ค่าเฉลี่ย	ค่าความแปรปรวน
514	3.19	12.19
594	4.35	28.13
626	3.75	11.16
658	4.17	22.87
722	5.4	41.32



รูปที่ 5.10 ฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ โครงข่าย NBT, ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2

จากรูปที่ 5.10 แสดงค่าฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ทั้ง 5 โครงข่าย พบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นขนาดความผิดพลาดของบิตมีการกระจายตัวออกไปค่อนข้างมาก แต่เมื่อพิจารณาที่โครงข่าย MCOT ออกอากาศที่ความถี่ 626 MHz ซึ่งมีการใช้งานฟังก์ชันการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น (Rotated Constellation) การกระจายตัวของขนาดความผิดพลาดของบิต จะมีค่อนข้างต่ำซึ่งมีค่าอยู่ใกล้เคียงโครงข่ายที่ออกอากาศที่ความถี่ต่ำสุด ที่ความถี่ 514 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ โครงข่าย NBT, ARMY1, MCOT, TPBS และ ARMY2

จากรูปที่ 5.11 แสดงฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ทั้ง 5 โครงข่าย อธิบายได้ว่าค่าเฉลี่ยสะสมของผู้ให้บริการจะสัมพันธ์กับความถี่ที่ออกอากาศ กล่าวคือยิ่งความถี่สูงมากเท่าใด ค่าเฉลี่ยสะสมจะมีค่าลดลงเท่านั้น หรือ ที่ความถี่สูงจะมีความแปรปรวนที่สูงกว่าที่ความถี่ต่ำ สำหรับผู้ให้บริการโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ใช้งานฟังก์ชันการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น จะมีค่าเฉลี่ยสะสมที่สูงที่สุด และ ผู้ให้บริการโครงข่ายที่ใช้งานที่ความถี่สูงสุด จะมีค่าเฉลี่ยสะสมที่ต่ำ

ซึ่งจากผลของค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบต่อเนื่อง และค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อนำมาวิเคราะห์ในทางสถิติเพื่อพิสูจน์ว่าผลของการใช้งานฟังก์ชันการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่นนั้นมีผลทำให้คุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ดีขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ

และจากตารางที่ 5.1 สามารถอธิบายได้ว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่ที่ใช้งานสูงขึ้น และจะทำให้ค่าความแปรปรวนสูงขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ข้อสังเกตคือ ที่ความถี่ 626 MHz ไม่ได้เป็นไปตามทิศทางของเทรน ทั้งในส่วนของค่าเฉลี่ยของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ และค่าความแปรปรวน อันเนื่องมาจากเครื่องส่ง อสมท. นั้นได้เปิดการใช้งานฟังก์ชั่นการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 บทสรุป

ในบทนี้ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแรงสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนามในทิศทางเส้นสายตา เฉพาะผลตรวจวัดในพื้นที่ด้านทิศตะวันออกของกรุงเทพมหานคร โดยมีรูปแบบการรับสัญญาณเป็นแบบประจำที่บนหลังคา จากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ และค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสูตรการส่งผ่านของฟรีสซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย และสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในการคำนวณครั้งนี้ได้ และได้แสดงการพิจารณาคุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน, อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต, ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์, ขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์และระยะทาง, ฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ และ ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและแนวทางการวิจัยในอนาคต

6.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเทคโนโลยีการส่งผ่านโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 รวมทั้งทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ประสิทธิภาพช่องสัญญาณ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส, อัตราความผิดพลาดต่อบิต, อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน, อัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต และ ความผิดพลาดทางเวกเตอร์ ทำออกแบบและทำการวัดช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร และได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลเชิงประจักษ์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ให้บริการอยู่ในประเทศไทย โดยในการตรวจวัดสัญญาณภาคสนามได้มีการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณผ่านสมการสูตรการส่งผ่านของฟรีส และ เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ที่ถูกกำหนดโดยหน่วยงาน DVB และ ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และผลของคุณภาพสัญญาณ ที่ได้รับจากการใช้งานฟังก์ชั่น การหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชั่น (Rotated Constellation) เพื่อพิสูจน์ว่าฟังก์ชันนี้สามารถที่จะนำมาใช้งานเพื่อเพิ่มคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ให้บริการอยู่ในประเทศไทยได้โดยมีความความแตกต่างกับโครงข่ายที่ไม่ได้ใช้งานฟังก์ชั่นนี้อย่างมีนัยยะสำคัญ

6.2 สรุปผลของการศึกษาทดลองวิจัย

6.2.1 สรุปผลวิเคราะห์ความแรงสัญญาณเปรียบเทียบจากค่าที่คำนวณได้จากสูตรการส่งผ่านของฟรีสกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนาม

พบว่าค่าของสัญญาณทั้งจากที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนามนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีเพียงบางพื้นที่เท่านั้น ที่ผิดเพี้ยนไปอันเนื่องมาจากพื้นที่ในการตรวจวัด เช่น สิ่งกีดขวาง และ สัญญาณรบกวน เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์นี้ ทำให้เป็นข้อมูลเพื่อที่จะสามารถนำหลักการสูตรการส่งผ่านของฟรีสไปคำนวณเพื่อออกแบบโครงข่ายและพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในอนาคตได้

6.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อเทียบกับค่าขั้นต่ำของคุณภาพในการให้บริการมาตรฐาน ปรากฏว่าพื้นที่ในการตรวจวัดสัญญาณเกือบทั้งหมดอยู่เหนือกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำ ซึ่งมีเพียงบางพื้นที่เท่านั้นที่คุณภาพอยู่ต่ำกว่ามาตรฐาน อันเนื่องมาจากสิ่งกีดขวางหรือสิ่งรบกวนเป็นต้น ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวนั้น สามารถนำเป็นข้อมูลเพื่อการวางโครงข่ายสถานีเสริมเพื่อให้พื้นที่ในการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ครอบคลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต

จากผลของการศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลต สามารถกล่าวได้ว่า ที่ตำแหน่งของอัตราความผิดพลาดต่อบิตจุดหนึ่งนั้น โครงข่ายที่สามารถรองรับค่าความผิดพลาดของการมอดูเลตได้สูงที่สุดคือโครงข่าย อสมท.ในขณะที่โครงข่ายอื่นนั้นต้องการค่าความผิดพลาดของการมอดูเลตที่ต่ำกว่าเพื่อให้ได้คุณภาพในระดับเดียวกับโครงข่าย อสมท. ซึ่งเป็นผลจากการใช้งานฟังก์ชั่นการหมุนแผนภาพคอนสเคลเลชัน ซึ่งมีเพียงโครงข่าย อสมท. ที่เปิดใช้งาน ในขณะที่โครงข่ายอื่นไม่ได้เปิดใช้งาน

6.2.4 สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ และการพิจารณาในเชิงสถิติ

จากผลของการตรวจวัดคุณภาพสัญญาณแต่ละผู้ให้บริการ และนำข้อมูลในจุดการวัดต่างๆ มาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ ทำให้ทราบถึงค่าที่เกี่ยวข้องกับทางสถิติหลายค่า เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน สามารถสรุปได้ว่า เมื่อความถี่ใช้งานส่งออกอากาศสูง จะส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดทางเวกเตอร์ที่สูงขึ้นกว่าความถี่ใช้งานส่งออกอากาศที่ต่ำกว่า และที่ความถี่ใช้งานส่งออกอากาศที่สูงจะเกิดค่าความแปรปรวนที่สูงกว่าความถี่ใช้งานส่งออกอากาศต่ำกว่าด้วยเช่นกัน โดยแสดงในรูปฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นของขนาดความผิดพลาดของเวกเตอร์ และฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของขนาดตวามผิดพลาดทางเวกเตอร์เปรียบเทียบทั้ง 5 โครงข่าย และโครงข่าย MCOT ที่ได้เปิดใช้งานฟังก์ชั่นการหมุนแผนภาพคอนสเตลเลชันนั้น มีค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดทางเวกเตอร์ที่ต่ำกว่าโครงข่ายที่ใช้งานความถี่ส่งออกอากาศที่ใกล้เคียงกัน และมีความแปรปรวนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 5 โครงข่าย

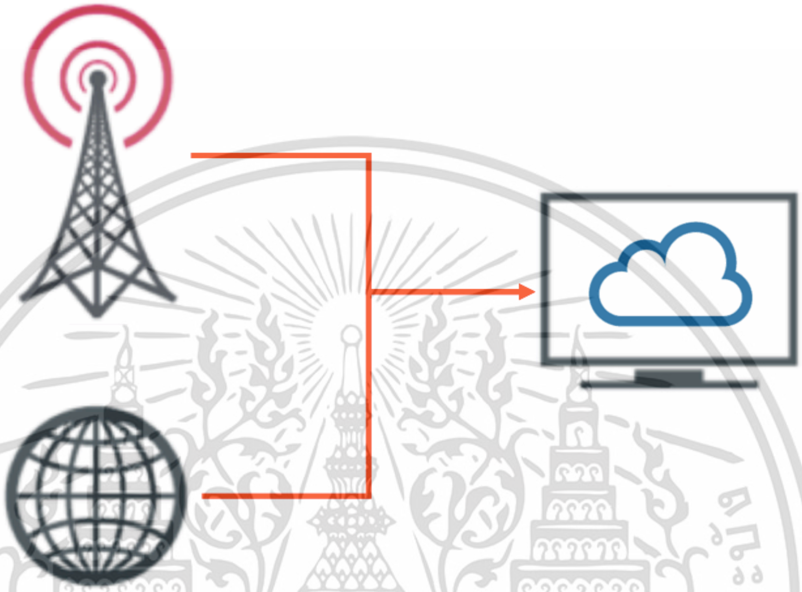
6.3 ข้อเสนอแนะและการวิจัยในอนาคต

จากการศึกษาถึงคุณลักษณะและคุณภาพของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ให้บริการในประเทศไทย โดยการประยุกต์ใช้หลักการส่งผ่านของฟรีสเพื่อพิจารณาระดับความแรงของสัญญาณทางด้านเครื่องรับ และระยะครอบคลุมการให้บริการ เพื่อสามารถนำไปออกแบบโครงข่ายและพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการได้ต่อไปในอนาคต และ ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเปรียบเทียบกับคุณภาพของสัญญาณ ในรูปแบบการรับสัญญาณแบบประจำที่ภายนอกอาคาร เท่านั้น

ในการประยุกต์งานวิจัยไปพัฒนาต่อยอดการศึกษาในอนาคตนั้น สามารถที่จะทำการศึกษาคุณลักษณะและการประเมินคุณภาพของการให้บริการในรูปแบบการรับสัญญาณภายในอาคาร, การรับสัญญาณแบบพกพา และ การรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ เพื่อนำผลจากการศึกษามาพัฒนาคุณภาพของการให้บริการต่อไป และสามารถที่จะนำมาศึกษาผลกระทบในจุดที่เกิดสัญญาณสะท้อนทำให้สัญญาณเกิดการกระจัดกระจายออกเป็นหลายๆ สัญญาณในตัวเมืองที่มีตึกหนาแน่นและทำให้สัญญาณมาถึงเครื่องรับในเวลาที่แตกต่างกันทำให้เกิดผลกระทบหรือข้อดีที่แตกต่างจากในระบบอนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยังสามารถนำเอางานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อยอดเรื่องการให้บริการโทรทัศน์ไฮบริด (Hybrid broadcast broadband TV ;HbbTV) ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจมากทั่วโลก ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อและเป็นการเข้าถึงเนื้อหาผ่านทางเว็บไซต์ของผู้ผลิตรายการโทรทัศน์ ซึ่งทำให้สามารถโต้ตอบกันได้ระหว่างผู้ผลิตรายการโทรทัศน์และผู้รับชม



รูปที่ 6.1 โทรทัศน์ไฮบริด (Hybrid broadcast broadband TV)

อีกทั้งยังสามารถนำเอางานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อยอดเรื่องการให้บริการ TV White Space (TVWS) ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจมากทั่วโลก ซึ่งเป็นการนำเอาคลื่นความถี่ในย่านของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มาประยุกต์ใช้งานสำหรับอินเตอร์เน็ตความเร็วสูง ซึ่ง TVWS จะทำให้ผู้ที่รับชมโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นสามารถที่จะใช้งานระบบอินเตอร์เน็ตได้อีกด้วย โดยข้อดีของระบบ TVWS ที่ดีกว่าระบบ WiFi ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนั้นคือ การใช้งานคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า ทำให้พื้นที่ครอบคลุมการให้บริการสูงกว่าการใช้งานระบบอินเตอร์เน็ตผ่าน WiFi ทั่วไป อีกทั้งยังรองรับการใช้งานในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบ Non Line of Sight (NLOS) ระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ ที่ไม่สามารถจะส่งหากันเป็นเส้นตรงได้ ซึ่งสามารถใช้งานได้พร้อมๆ กันทั้งโทรทัศน์และอินเตอร์เน็ต หรือแม้กระทั่งการใช้งานระบบ LTE บนโครงข่าย TVWS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ETSI EN 302 755 Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) V1.4.1 (2015-07)

[2] ITU-R BT.2022 General viewing conditions for subjective assement of quality of SDTV and HDTV television pictures on flat panel displays (08/2012)

[3] ITU-R BT.2020-2 Parameter values for ultra high definition television and International program exchange (10/2015)

[4] ETSI TR 101 290 Digital Video Broadcasting (DVB) Measurement Guidelines for DVB system V1.2.1 (2001-05)

[5] สำนักงาน กสทช "มีอะไรในท่อสัญญาณดิจิตอลทีวี," [Online] Available : www.nbtcrights.com/2015/10/5642

[6] Walter Fischer Digital Video and Audio Broadcasting Technology Third Edition London Springer 2009

[7] ETSI TS 102 831 Digital Video Broadcasting (DVB) Implementation Guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) V1.2.1 (2012-08)

[8] Digital Home"Digital Home Helpful Information," [Online] Available : www.digitalhome.ca/forum/186-antenna-research-development/147432-old-cm-4228a-4248a-3023-hardware-hacks.html 2018

[9] ThaiDigitalTelevision "ผลทดสอบภาคสนามเครื่อง DVB-T2 แบบพกพา," [Online] Available : http://www.thaidigitaltelevision.com/ผลทดสอบภาคสนามเครื่อง-dvb-t2/

[10] POP CULTURE LAB "4k's marketing team gets replaced by that one neighbor who has a 60 inch," [Online] Available : https://popculturelab.wordpress.com/2015/03/13/4ks-marketing-team-gets-replaced-by-that-one-neighbor-who-has-a-60-inch/

[11] Wikipedia "High-Efficiency Advanced Audio Coding," [Online] Available : https://en.wikipedia.org/wiki/High-Efficiency_Advanced_Audio_Coding 2018

[12] กสทช. ข้อกำหนดทางด้านเทคนิคขั้นต่ำของอุปกรณ์สำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบ ดิจิตอลยุคที่ 2 ที่ใช้ระบบการส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่ซึ่งที่ให้บริการเป็นการทั่วไป (Free to Air) ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 129 ตอนพิเศษ 189ง 18 ธันวาคม 2555 รายละเอียดตามมาตรฐานเลขที่ กสทช.มส.4001 – 2555

[13] ISO/IEC 14496-10: Information technology-coding of audio-visual objects-Part 10 : Advanced Video Coding (MPEG 4 AVC/H.264) 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[14] ISO/IEC 14496-3 : Information technology-coding of audio-visual objects-Part 3 : Advanced Video Coding (MPEG 4 HE AACv2) 2009

[15] ETSI EN 302 755: Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) V1.3.1 (2012-04)

[16] ETSI TS 101 191: Digital Video Broadcasting (DVB); DVB mega-frame for Single Frequency Network (SFN) synchronization V1.4.1 (2004-06)

[17] ETSI EN 300 478: Digital Video Broadcasting (DVB);Specification for Service Information (SI) in DVB systems V1.13.1 (2012-08)

[18] ETSI TS 101 211: Digital Video Broadcasting (DVB): Guidelines on implementation and usage of Service Information (SI) V1.11.1 (2012-04)

[19] ETSI EN 301 192: Digital Video Broadcasting (DVB); DVB specification for data broadcasting V1.4.2 (2008-04)

[20] ETSI TR 101 202: Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for Data Broadcasting V1.2.1 (2003-01)

[21] ETSI TS 101 154: Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for the use of Video and Audio Coding in Broadcasting Applications based on the MPEG-2 Transport Stream V1.10.1 (2011-06)

[22] ISO/IEC 13818-1: Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: System 2007

[23] ETSI TS 102 773: Digital Video Broadcasting (DVB); Modulator Interface (T2-MI) for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) V1.3.1 (2012-01)

[24] ETSI 102 006: Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for System Software Update in DVB Systems V1.3.2 (2008-07)

[25] ETSI EN 300 743: Digital Video Broadcasting (DVB); Subtitling systems V1.4.1 (2011-10)

[26] Ron Hranac BER and MER Fundamentals Cisco Systems, Inc 2007

[27] Bundit Ruckveratham, Sathaporn Promwong “Evaluation of SFN gain for DVB-T2,” International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT) 2017

[28] A. Ingun, “DVB-T2 field trial and optimized parameters in Thailand,” in Electrical Engineering Congress (iEECON), 2014 International, pp. 1-4, 19-21 March 2014

[29] S.Meltzer and G. Moser MPEG-4 HEAAC V2 EBU Technical Review 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[30] John G. Proakis, Masoud Salehi 2008 Digital Communications Fifth Edition New York :McGraw-Hill Higher Education

[31] Krešimir Ruščić, Andrej Skenderović Measurements and Propagation Model Tuning in DVB T2 Network ELMAR (ELMAR), 2014 56th International Symposium

[32] รองศาสตราจารย์ชูศรี วงศ์รัตนะ ม.ป.ป. เทคนิคการใช้สถิติเพื่อการวิจัย พิมพ์ครั้งที่ 13 กรุงเทพ อมรการพิมพ์

[33] D.Perez-Calderon, C.Oria, J.Garcia, P.Lopez, V.Baena, I.Lacadena "Rotated Constellations for DVB-T2" XXIV Design of Circuits and Interated Systems Conference Zaragona Nov 19-20 2009

[34] ETSI TS 102 992 Digital Video Broadcasting (DVB) Structure and Modulation of optional transmitter signatures (T2-Tx-SIG) for use with the DVB-T2 second generation digital terrestrial television broadcasting system V1.1.1 (2010-09)

[35] ITU-R 09/2012 Frequency and network planning aspects of DVB-T2

[36] SAMART ENGINEERING "เสาอากาศ Digital TV ภายนอกอาคาร," [Online] Available : https://www.samartstore.com/new-products/p011.html

[37] SIRTE "Analizzatore professionale," [Online] Available : http://www.sirte.biz/prodotto/analizzatore-professionale-hd-flash-per-dvbs-s2-t-t2/1886/

[38] RFS Wireless World"LOS vs NLOS Difference between LOS and NLOS wireless channels," [Online] Available : http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LOS--vs-NLOS-wireless-channel.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการนำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ

[1] Nattapan Suwansukho and Sathaporn Promwong "Experimental Study of DVB-T2 in Thailand," The 20th International Computer Science and Engineering Conference 2016" Smart Ubiquitous And Knowledge." 14-17 December 2016, Chiang Mai Orchid Hotel, Chiangmai,

[2] Nattapan Suwansukho and Sathaporn Promwong "EVM analysis for DVB-T2 in Thailand," 2017 International Symposium on Multimedia and Communication Technology August 23-25, 2017 Classic Kameo Hotel & Serviced Apartments, Ayutthaya, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental Study of DVB-T2 in Thailand

Nattapan Suwansukho
Department of Telecommunication Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
59601135@kmitl.ac.th

Sathaporn Promwong
Department of Telecommunication Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
Sathaporn.pr@kmitl.ac.th

***Abstract*—This paper presents an analysis of digital television broadcasting, that used DVB-T2 standard, in Bangkok Thailand. The result of analysis has derived from signal measurement 20 location in Bangkok. The measurement location consists of several difference areas such as an urban area, high building area, open area. The measurement's result are consists of signal strength, C/N, MER, SNR, NsMAR, bBER, LBER, power output after combiner. The measurement illustrates the effect of attenuation and interference in propagation channel. The propose of this study is checking DVB-T2 channel characteristic approximately attenuation between transmitted antenna at base station and received antenna at far field. The result of the analysis could be useful for improve and design the digital television broadcasting network.**

Keywords—DVB-T2; Experimental; Field strength; bBER

I. INTRODUCTION

Today in Thailand the standard of television broadcasting has been chosen to digital transmission in DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial) system, that is one of the popular digital television broadcasting system which have been used around the world and it has been developed from DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial). The advantage of DVB-T2 are it can simultaneous transmit the multiple services which different configuration and the robustness of system that can resist for interference. Therefore, DVB-T2 system can be supports for SDTV (Standard–definition television), HDTV (High–definition television), UHD (Ultra–high–definition television), mobile TV and many multiple digital broadcasting.

The field measurement had taken in Bangkok Thailand for 20 locations. The main object for this research are study and analyze the characteristic and efficiency of DVB-T2 broadcasting in Thailand.

The parameter that have been used for DVB-T2 in Thailand has recommended by NBTC (National Broadcasting and Telecommunication Commission) in this measurement many participants were involved, e.g., MCOT Public Company Limited (MCOT) (Formerly known as the Mass Communication Organization of Thailand (M.C.O.T.), NBTC, and customer whose used these network for broadcasting. [3]-[6]

The rest of the paper is structured as follows: Section II Parameter that use for broadcasting. Section III introduces the DVB-T2 field measurement. Section IV presents the results of the field measurements Finally, the conclusion in Section V.

II. PAREMETER USED FOR BROADCASTING

A. Transmitter and antenna

The transmitter of Bangkok is located at the Baiyoke 2 building 13°45` 16.77`` N, longitude 100 °32` 25.34`` E the antenna high is 328 meter above sea level, antenna beam is 0.3 degree in Thailand the DVB-T2 operator have 4 organize and 5 MUX belong to government. The antenna gain is 14.31 dBd and radiation pattern is horizontal polarization. [1]

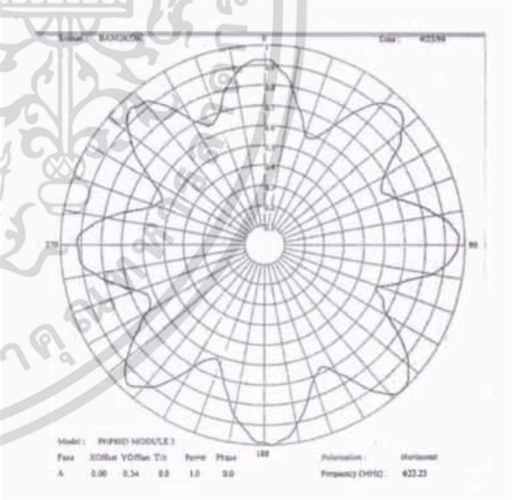


Fig1 Horizontal antenna pattern in Bangkok, Thailand

B. Transmitted power

Due to in Thailand the DVB-T2 operator have 4 organize and 5 MUX belong to government The power of transmitter in this measurement are used separate by frequency. NBT channel 26 at frequency 514 MHz transmitted power output is 4 kW, Army1 channel 36 at frequency 594 MHz transmitted power

978-1-5090-4420-7/16/$31.00 ©2016 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

output is 4.3 kW, MCOT channel 40 at frequency 626 MHz transmitted power output is 4.0 kW, TPBS channel 44 at frequency 658 MHz transmitted output is 3.91 kW, Army2 channel 52 at frequency 722 MHz transmitted output is 4.3 kW

III. FIELD MEASUREMENT AND ANALYSIS

A. Measurement setup

The measure is importance for checking and analysis the quality of service DVB-T2 in Thailand because the DVB-T2 is new broadcasting technology that has been selected for replace the existing system (analog) in Thailand. [5] For this measurement carried out within the DVB-T2 network focused on fixed reception for 20 measurement location. The equipment and procedure was defined as follows.

- Antenna dose not move when receiving the signal and not to close with the big object.
- Antenna is 11 dBd.
- Antenna high is 6 meter above the ground.
- Line of Sight direction between transmitted antenna and received antenna dose not have any obstruction in the direction to transmitted antenna.
- The portable measurement is Rover Pro HD.

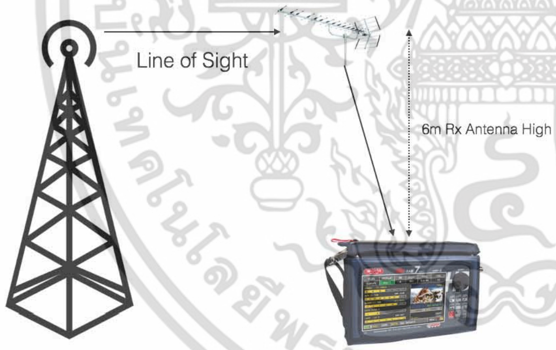


Fig.2 Measurement setup

The 20 measurement location, which have been defined by working group member at NBTC conference, in Bangkok Thailand, where are several environment area consists of dense urban areas, open space in the suburban environments is showed in Fig 3.

Due to Bangkok is capital city of Thailand which consists of many tall building. The resolution from working member are defined 20 measurement location with line of sight measurement method with the receiver antenna high 6 meter above the ground and direction to transmitter at Baiyoke tower2.

Fig.3 The 20 Measurement location in Bangkok, Thailand

B. General propagation case

There are three propagation scenario [10] between transmitter and receiver sites is presented in Fig.4

- Line of Sight (LOS) propagation. The transmitter and receiver are direct visibility between 2 side and Fresnel area is clear.
- Non Line of Sight (NLOS) propagation. The transmitter and receiver aren't visible between 2 side. The signal from the transmitter pass through several effect such as diffraction, diffusion before reach to the receiver. The Fresnel area is fully obstructed.
- Near Line of Sight (nLOS) propagation. This case represents intermediate situation between the LOS and NLOS. The transmitter and receiver are visible between 2 side. Nevertheless, some part of Fresnel area is obstructed. In this case the signal from transmitter propagate via diffraction or multi-path reflection on many building sides.

In this measurement the Line of Sight (LOS) has been selected for measurement.

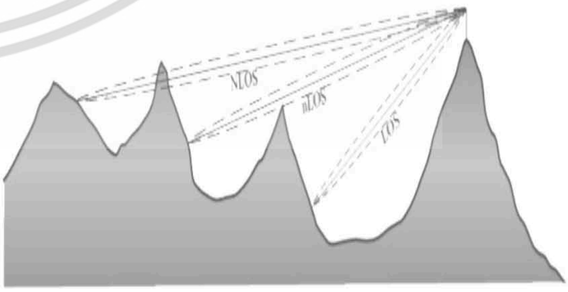


Fig.4 Propagation scenarios

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C. Fading Channel

The objective of this measurement is to compare and analysis the difference between fading result from measurement and fading from calculation as Friis transmission formula, [7]-[9] that has been widely used and can be applied to calculation of these Line of Sight channels between transmitted antenna and received antenna. dose not have any obstruction in the direction to transmitted antenna.

The receiving antenna pointed in direction of radiate power. The received power extracted by the antenna can be expressed as

$$P_R = \frac{P_T G_T A_R}{4\pi d^2} \quad (1)$$

A_R is the effective area of the antenna. From electromagnetic field theory, we obtain the basic relationship between the gain G_R of antenna and its effective area as

$$A_R = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \; m^2 \quad (2)$$

$\lambda = \frac{c}{f}$ is wavelength, c is the velocity of the light, f is the operating frequency,

$$G_{Friis}(f) = \frac{P_R(f)}{P_T(f)} \quad (3)$$

$$G_{Friis}(f) = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}\right) \quad (4)$$

where G_T, G_R are TX and RX antenna gain respectively d is distance between transmitter and receiver.

The product $P_T G_T$ is usually called the effective radiated power (ERP/EIRP)

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (5)$$

The factor L_s is called the free-space path loss.[9]

Convert (4) to dB as (6)

$$G_{Friis}(f)(dB) = \frac{P_R(f)}{P_T(f)} = 10 \log \left[P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \right) \right] \quad (6)$$

d is the separation between transmitter and receiver antennas, P_T is transmitted power, G_T is transmitted antenna gain, G_R is received antenna gain.

D. bBER

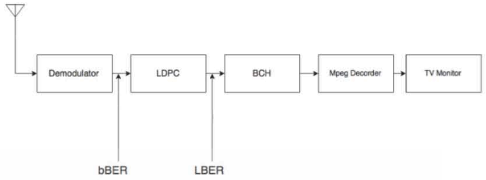


Fig.5 Blog diagram of bBER, LBER field measurement.

DVB-T2 used LDPC (low-density parity-checked) coding, combined with BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquengham) coding used as protection against interference and noise, which offer excellent performance resulting in a very robust signal reception in various signal transmission condition. Another benefit is improved forward error correction (FEC) which gives a major capacity increase. In this measurement include analyze the bBER, that is BER before LDPC or BER before sent to LDPC block. The performance quality of received signal are indicated to the measurement of bBER. [1][2]

IV. Result of the Field Measurement

In this section the results of the measurement are presented organized in different studies according to the parameter that have been tested.

A. The result of received power between measurement and calculation

All the field measurements are used SFN (Single frequency network). That mean each of measurement point was measure by the one signal source for each location.

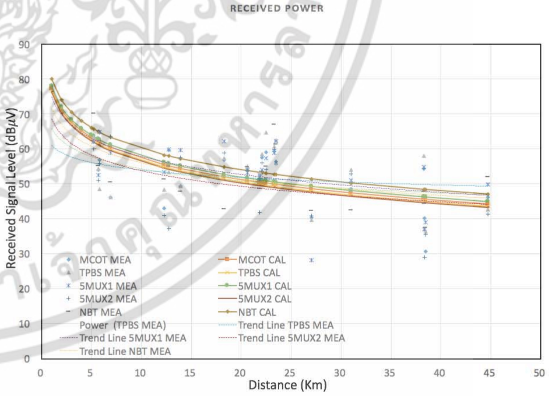


Fig.6 The comparison of received power between measurement and calculation for 5 MUX

The comparison of received power between measurement and calculation is presented in Fig.6 illustrate that 5 MUX consists of NBT, ARMY1, MCOT, TPBS, ARMY2 illustrate that the distance between transmitter and receiver are increase therefore the received power level will decrease. The range of this measurement approximately 45 km from transmitter the trend lines are presented in dash line. As the field

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

measurement direction between transmitter and receiver is line of sight therefore the trend line is closely with the calculation lines. Although in some case for example in Fig.7 at distance approximately 20 km the received power is too closely to the calculation line approximately 55 $dB\mu V$ nevertheless at distance approximately 18 km the received is 43 $dB\mu V$. Because at the measurement location at distance 18 km have some obstruction and interference by environment more than the measurement location at distance 20 km. This is the obstruction and interference caused by some location have tall building. That was making difficult for signal reception.

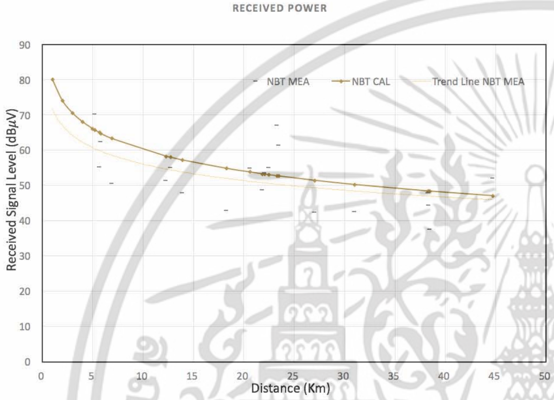


Fig.7 The comparison of received power between measurement and calculation for NBT frequency 514 MHz

The comparison of received power from calculation and measurement of ARMY1 MUX, frequency 594 MHz broadcasted with power output 4.3 kW, is presented in Fig.8 illustrate that the both from calculation and field measurement result are rather close together. Trend line of received power calculation is presented in dash line. From first measurement location approximately 5 km from transmitter the result from calculation is 64.4 $db\mu V$ and result from field measurement is 62.1 $db\mu V$.

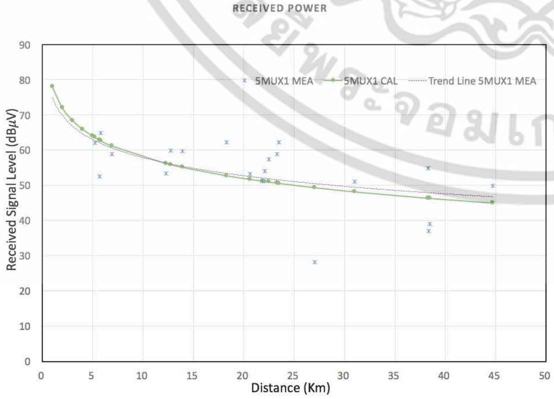


Fig.8 The comparison of received power between measurement and calculation for ARMY1 frequency 594 MHz

The comparison of received power from calculation and measurement for the other MUX NBT, MCOT, TPBS, AMRY2 at frequency 514 MHz, 626 MHz, 658 MHz, 722 MHz respectively are illustrated that both results from calculation and field measurement result are rather close together. The calculation result is present in trend line with dash line.

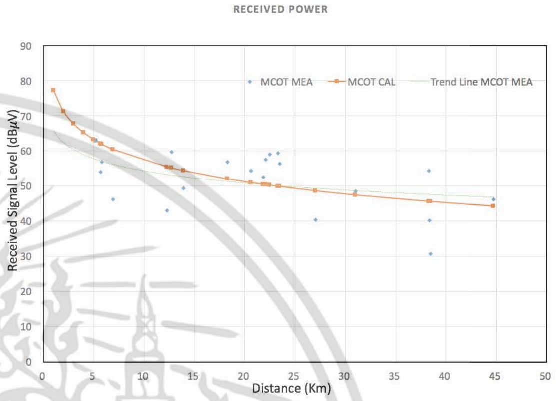


Fig.9 The comparison of received power between measurement and calculation for MCOT frequency 626 MHz

From the measurement result of MCOT MUX at channel 40 frequency 626 MHz transmitted power out is 4.0 kW presents in Fig.9 at distance approximately 31 km. Received power calculation from Friis formula equation is 48.52 $db\mu V$ and received power from field measurement is approximately 48.6 $db\mu V$ rather closely to each other due to this measurement location is open area have no any obstruction near the received antenna therefore the result from field measurement is closely with the result from calculation.

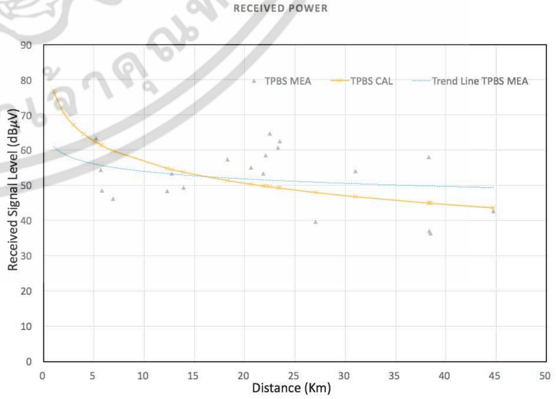


Fig.10 The comparison of received power between measurement and calculation for TPBS frequency 658 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

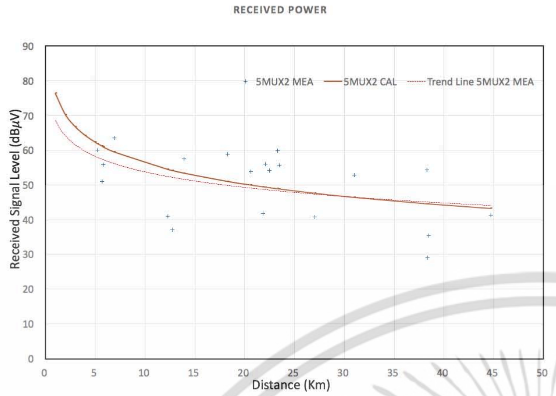


Fig.11 The comparison of received power between measurement and calculation for ARMY2 frequency 722 MHz

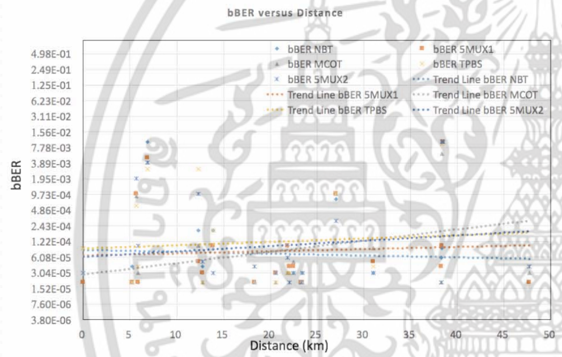


Fig.12 The comparison of bBER and distance of 5 MUX

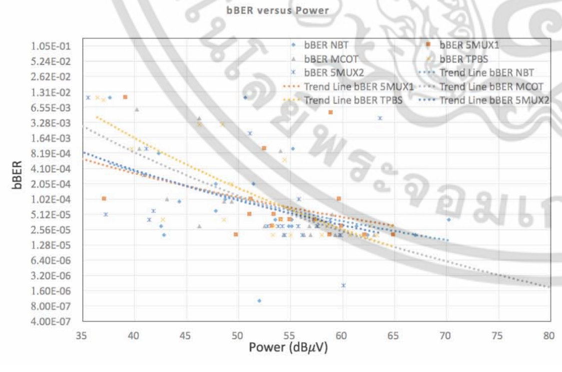


Fig.13 The comparison of bBER and power of 5 MUX

The result of bBER comparison with distance, received power, MER, C/N, SNR are presents in Fig.12-16 that are consists of 5 MUX. The Trend lines are presents as dash line

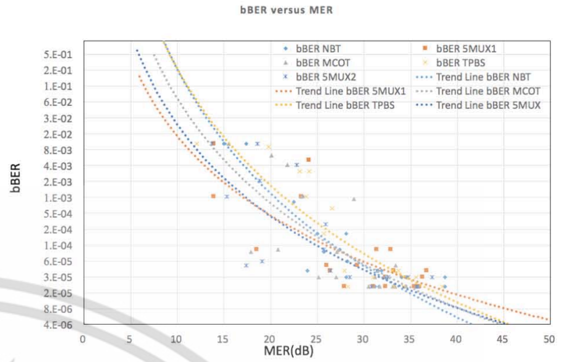


Fig.14 The comparison of bBER and MER of 5 MUX

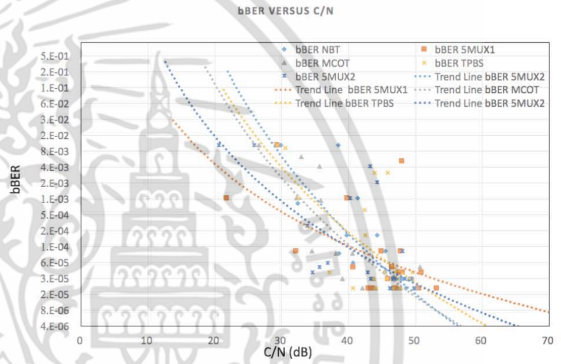


Fig.15 The comparison of bBER and C/N of 5 MUX

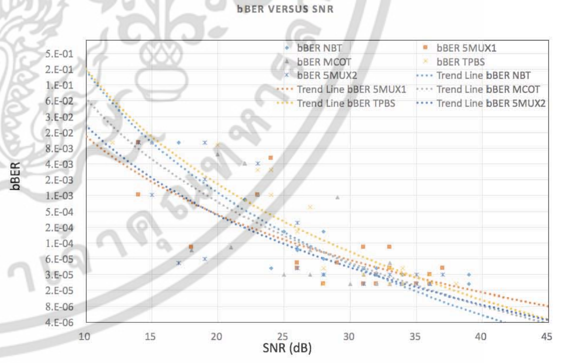


Fig.16 The comparison of bBER and SNR of 5 MUX

From the results of bBER field measurements are presents. The comparison between bBER with distance is present in Fig.12 have a bit effect to distance nevertheless the comparison between bBER with received power in Fig.13 as illustrate that if the received powers are increase therefore the bBER are decrease.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. Conclusion

This paper presents the comparison the difference between received power from measurement with field measure in line of sight direction form transmitter to receiver via Friis transmission formula, that has been widely used and can be applied to calculation for this measurement. From the results that illustrate the results of calculation and field measurement are closely. However, some location the results of power measurement are lower than calculation due to the obstruction and interference by environment are effect to the received power level. The difference of the transmitter's frequency has difference effect and attenuation result. From the calculation and field measurement represent performance signal of high frequency will be reducing by any attenuation more than low frequency at the same distance. The all of location measurement area are located in Bangkok, the capital of Thailand, which consists of many tall building and dense urban area. This paper provides channel characteristic of DVB-T2 in Bangkok Thailand include the information for fix outdoor reception in line of sight direction and analysis of bBER that have been compared with distance, received power. For this reason, the results of this paper cloud not cover the non-line of sight analysis that effect to the received signal power. The future research will analyze the non-line of sight. However, this research, DVB-T2 characteristic channel in Thailand cloud useful for improvement of DVB-T2 broadcast such as power adjustment at the transmitter, network planning.

References

[1] A. Ingun, DVB-T2 field trial and optimized parameters in Thailand, in Electrical Engineering Congress (iEECON), 2014 International, pp. 1-4, 19-21 March 2014

[2] B. Ruckveratham,S. Promwong, Performance evaluation of DVB-T2 for outdoor reception, 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016 pp.1-5

[3] Digital Video Broadcasting (DVB): Implementation Guidelines for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2), ETSI Technical Specification TS 102 831 V1.1.1, Oct. 2010.

[4] Digital Video Broadcasting (DVB): Implementation guildline for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2), ETSI Standard EN 102 831 V1.2.1, Aug.2012.

[5] Digital Video Broadcasting (DVB): Frame Structure Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2), ETSI Standard EN 302 755 V1.3.1, Apr.2012.

[6] TR 101 290 V1.2.1 (2001-05). Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems, Tech. Report ETSI, 2001.

[7] W.Fischer, Digital Video and Audio Broadcasting Technology A Practical Engineering Guide Third Edition.

[8] A. Goldsmith, Wireless Communications, Stanford University.

[9] J. G. Proakis, Masoud Salehi, Digital Communications Fifth Edition.

[10] Krešimir Ruščić, Andrej Skenderović, Measurements and Propagation Model Tuning in DVB-T2 Network, ELMAR (ELMAR), 2014 56th International Symposium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EVM analysis for DVB-T2 in Thailand

Nattapan Suwansukho and Sathaporn Promwong
Department of Engineering Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

Abstract— **This paper describes the analysis of modulation error in term of EVM (Error Vector Magnitude) that will affect to quality of service of DVB-T2, that is broadcasting in Thailand. The transmitter of DVB-T2 in Thailand is used OFDM with high order modulation scheme, which is 64 QAM. The EVM is the one of tool, that also used to quantify the quality of digital modulated signal. In this paper will illustrate the correlation between the EVM and bBER that will affect to DVB-T2 quality of service and the performance of rotated constellation function in term of statistic. Regarding to DVB-T2 system in Thailand have been chosen to replaced the analog system and there will be improved the quality of service.**

I. INTRODUCTION

The second-generation terrestrial of Digital Video Broadcasting or DVB-T2 has been selected to operate instead of the existing system, which is analog system that has been used for long time in Thailand. The DVB-T2 is the popular system that has been used around the world there are many countries in the world are using the DVB-T2 for broadcasting. The advantages of DVB-T2 are it can simultaneously transmit the multiple signal, which are difference configuration in the same time and the immunity or the robustness of interference or multipath. The offering of DVB-T2 are High Definition Television (HDTV), Standard Definition Television (SDTV), Ultra High Definition Television (UHD) services. DVB-T2 also includes a new technique of constellation, so called rotated constellation, which is one of the main feature in DVB-T2 system configuration. It is an optional feature to improve signal performance at the receiver side.

Although, there are so many ways to evaluate the quality of service of DVB-T2 in this paper will describe the evaluation by EVM method. The data that used in this paper was carried out from field measurement in Bangkok Thailand for 20 measurement locations that consists of urban area, sub urban area and open area and there is the information about correlation between EVM and bBER that will be affected to the quality of service have been provided in this paper as well. There were many participants involved this measurement e.g. MCOT Public Company Limited and National Broadcasting and Telecommunication Commission of Thailand.

The rest of paper is structured as follows: Section II Error Vector Magnitude. Section III EVM and MER correlation. Section IV present the result of analysis. Finally, the conclusion in Section V.

II. TRANSMISSION STRUCTURE OF DVB-T2

A. OFDM

DVB-T2 used the function of the OFDM generation module that has been used to take the cells produced by frame builder and mapping by 64QAM in frequency domain to produce to time domain signal for transmission. There are many sub carriers have been multiplexed into single carrier by used guard intervals, which is OFDM generator module's function used to protect the interference to another sub carrier. The number of sub carrier depending on FFT size, that there are many FFT size such as 1K, 2K, 4K, 8K, 16K and 32K on 8 MHz channel. However, the DVB-T2 system in Thailand selected 16K with extended mode, which is 13,921 sub carrier to broadcast DVB-T2 signal. [3]

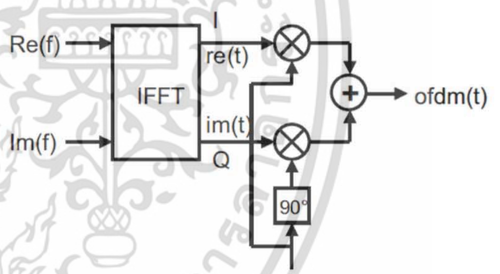


Fig. 1 Block Diagram of OFDM in DVB-T2 [4]

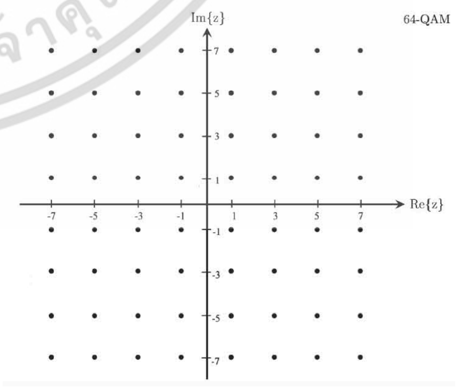


Fig. 2 64 QAM Constellation Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Each sub carrier is modulated independently of the others all sub carriers are spaced by the spacing of the null in spectrum. The OFDM modulator could be imagined as up to thousands of QAM modulators and the OFDM symbol is generated by a multiple mapping. These two tables, that are real and imaginary table are now input signals for the signal processing block, which is IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Then these symbols are available in the time domain.

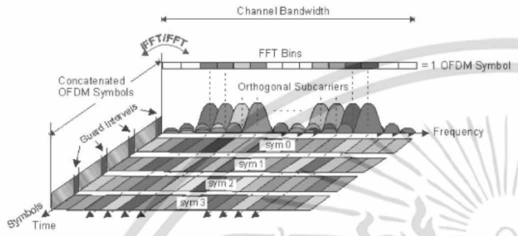


Fig. 3 Frequency and Time Domain in OFDM

B. *Rotated Constellation*

The non – rotated constellation the receiver need the both of I (In-phase) and Q (Quadrature) components of the one constellation point to identify that what the data have been transmitted from the transmitter. I value doesn't give the information about Q.[7][8]

In case of rotated constellation, a rotation angle has been applied to the classic signal constellation. Therefore, there are enough information for each I and Q components by its own to guess which were the transmitted data. The appearance of rotated constellation is shown in Fig 4 that the red square point represents the conventional constellations on the other hand the blue circles shown the constellation point after rotation.

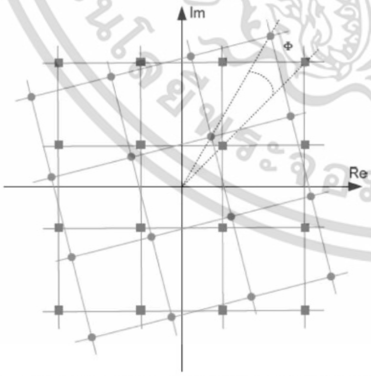


Fig. 4 Rotated and Classic 16 QAM constellations[7]

The rotated constellation technique will improve the performance of signal at the receiver in all fading channels therefore the signal robustness will be increased it lead to the signal can resist to the fading channel or any interference. In Bangkok, Thailand there is only one operator which is MCOT at the frequency 626 MHz that used the rotated constellation function.

III. Error Analysis

A. *EVM (Error Vector Magnitude)*

EVM is a measurement of how accurately symbol are transmitted within its constellation and that is the important factor used to assess the modulation quality of DVB-T2 system with QAM transmission. The EVM that will indicate the impairment of vector point on symbol map between the ideal signal and received signal. EVM is defined as the ratio of error vector magnitude and magnitude of the vector to the outermost state of the constellation as shown in Fig 3 and it will be reported as percentage.

When OFDM with 64 QAM is used to broadcast the DVB-T2 in Thailand, EVM (error vector magnitude) need to be evaluated the quality of service as well.

$$EVM = \frac{E_{RMS}}{S_{max}} x100 \quad (1)$$

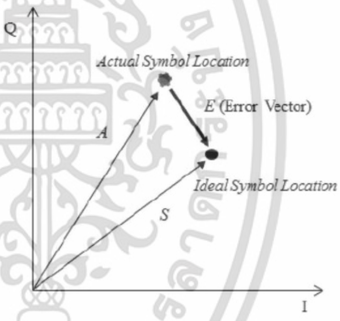


Fig. 5 Error Vector on I,Q constellation diagram[2]

C. *MTA (Maximum to Average Constellation Power Ratio)*

The MTA, that is ratio of the peak constellation symbol power to the average constellation power.

$$P_{peak} = 2x(\sqrt{M} - 1)^2 \quad (2)$$

$$P_{avg} = \frac{2}{3}(M - 1) \quad (3)$$

Where P_{peak} is peak constellation power or the squared magnitude of the outermost QAM symbol and M is the number of constellation point

The maximum to average constellation power ratio can be then computed as follows.

$$\text{MTA} = \frac{P_{peak}}{P_{avg}} = 3\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}+1} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The conversion formula from MER to EVM as follows

$$EVM(\%) = 100x10^{\frac{-(MER+MTA_{dB})}{20}} \quad (5)$$

D. BER

BER is the ratio of error transmitted bits number to total transmitted bits number in DVB-T2 there are 2 type of BER that will be used to indicate the quality of service that are bBER and LBER. The difference of these 2 type are bBER will be used to measure the bit error rate before LDPC (Low Density Parity Checked top) and LBER will be used to measure the bit error rate after passed LDPC. In this paper the bBER value will be used to analyze.

$$BER = \frac{(number\ of\ error\ bits)}{(total\ number\ of\ bits)} \quad (6)$$

E. DVB-T2 Modulation Parameter

There are many significant parameters used, that relate to quality of service. In table 1 is shown the parameter used for DVB-T2 in Thailand that have been defined by NBTC. The total bit rate for each operator is 27.4 Mbps and for each operator are consisting of 5 standard definition television (SDTV) and 2 high definition television (HDTV) with bitrate 1.28 – 1.6 Mbps and 5.92 – 7.2 Mbps respectively. [5]

The DVB-T2 transmitter of Bangkok Thailand has been located at Baiyoke tower 2 building The measurement was carried out by 5 frequencies from 5 operators. The first frequency is 514 MHz belong to NBT channel transmitted power is 4 kW, the second is 594 MHz belong to ARMY channel mux number 1 transmitted power is 4.3 kW, the third is 626 MHz belong to MCOT channel transmitted power is 4.0 kW, the fourth is 658 MHz belong to TPBS channel transmitted power is 3.91 kW, and the last one is 722 MHz belong to ARMY channel mux number 2 transmitted power is 4.3kW. There was the combiner to combine these 5 RF output from each transmitter to 1 antenna set with 14.31 dBd gain and the radiation pattern is horizontal polarization.

TABLE I
TABLE OF DVB-T2 PARAMETER IN THAILAND

Parameter	Value
Constellation	64QAM
FFT Mode	16k Extended
Guard Interval	19/128
Code Rate	3/5
Frequency	514,594,626,658,722 MHz

IV. RESULT AND ANALYSIS

In this section will describe the result of EVM compare to the bit error rate, distance and the analysis in term of statistical such as PDF (Probability Density Function) and CDF (Cumulative Distribution Function). That will show the correlation between these parameter, which affect the quality of service of DVB-T2 in Thailand.

The first result is EVM in percentage compared to bBER in x axis and y axis respectively, as shown in fig. 6 illustrate the EVM value for 5 frequencies that relate to bBER. When the percentage of error vector magnitude are low it will lead the bBER value will come to low value or close to 0.

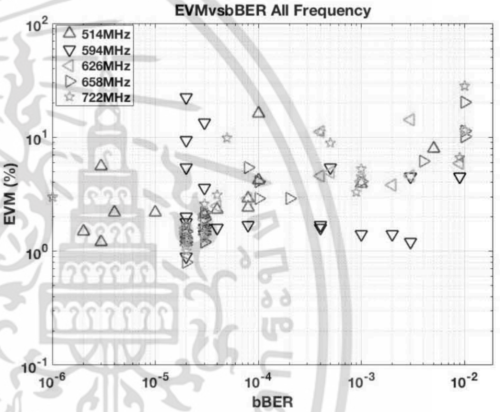


Fig. 6 Comparison between EVM and bBER for all frequency

The comparison between EVM in range 1e-1% to 10e2% and bBER in range 1e-6 to 1e-2 both of these parameter has been shown in log scale for each frequency have been shown in fig 6, 7, 8, 9, 10, that are 514 MHz, 594 MHz, 626 MHz, 658 MHz, 722 MHz respectively the symbol represents the EVM and bBER value for each point with trend line. From these result has can be illustrated that when the percentage of EVM increased it will lead to bBER value will increased as well.

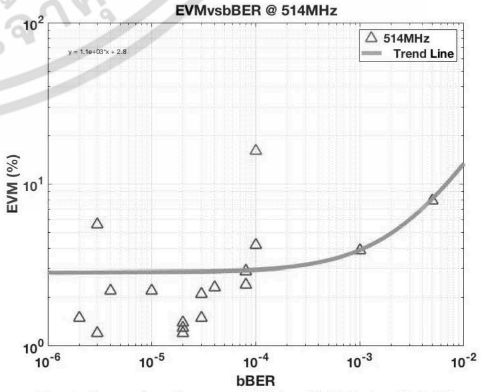


Fig. 7 Comparison between EVM and bBER for 514MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

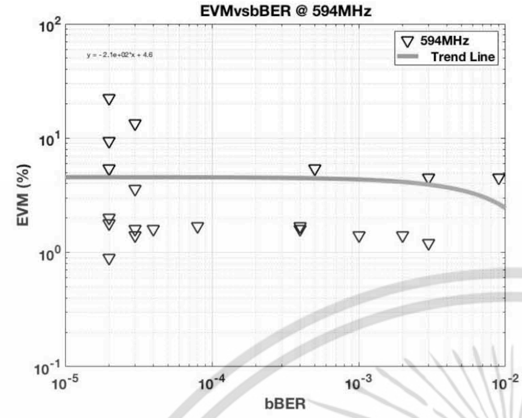


Fig. 8 Comparison between EVM and bBER for 594MHz

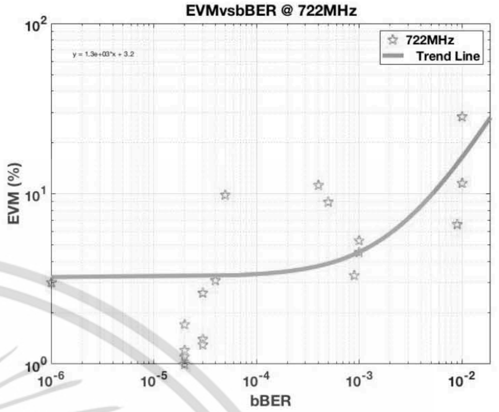


Fig. 11 Comparison between EVM and bBER for 722MHz

Although, almost the high EVM value lead to high bBER some the high EVM value are still give the low bBER value as shown in fig 8 at the EVM is 22.4% it still gave the bBER for 2e-5. However, at the EVM equal to 4.5% the bBER is equal to 9e-3.

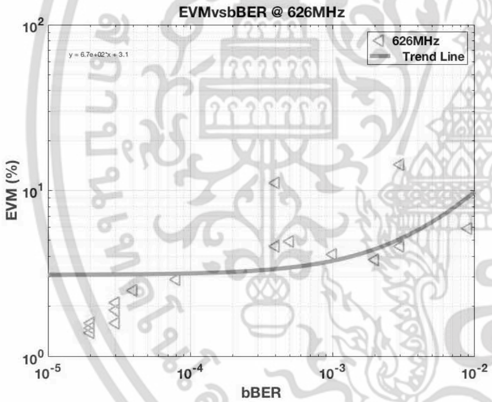


Fig. 9 Comparison between EVM and bBER for 626MHz

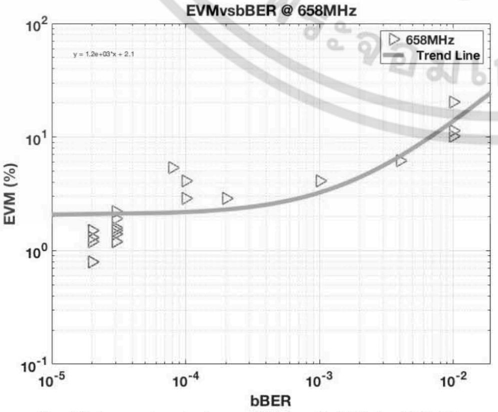


Fig. 10 Comparison between EVM and bBER for 658MHz

From these comparisons between EVM percentage and bBER can be summarized that the EVM value is significant relate to bBER no mater what frequency will be used the tendency of bBER will be high when the EVM value increased

The comparison between 3 factor, that are EVM, bBER and distance have been shown in fig 12, 13, 14, 15, 16 separate by frequency illustrated the correlation for each other between these 3 factor. This results were carried out from the measurement between transmitter and receiver from 1 to 45 Km with Line Of Sight direction.

Although, the distance from transmitter increased almost EVM and bBER value weren't affected. From these result can be summarized that the distance between transmitter and receiver will not affect to bBER value. However, there were some location that are not too far from transmitter that the EVM are high it will lead to high bBER as well.

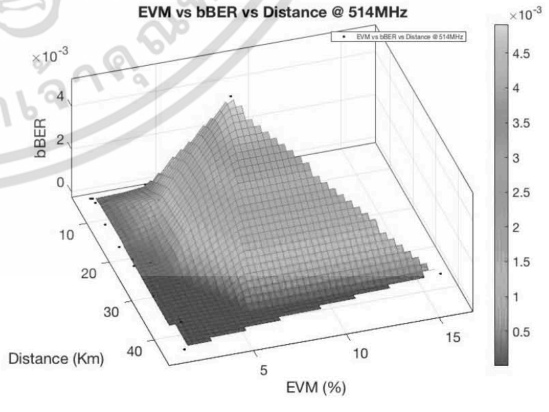


Fig. 12 Comparison between EVM and bBER and Distance for 514MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

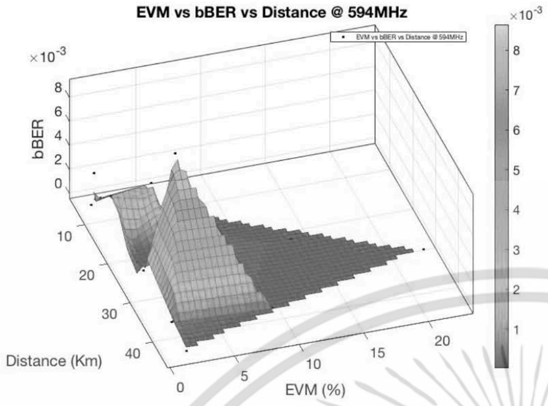


Fig. 13 Comparison between EVM and bBER and Distance for 594MHz

In fig 14 illustrated that at the distance 23.45 Km the EVM percentage is 5.9% that gave the bBER for 9e-3. However, at the distance 44.72 Km from the transmitter the EVM percentage is 2.1% that gave the bBER value for 3e-5.

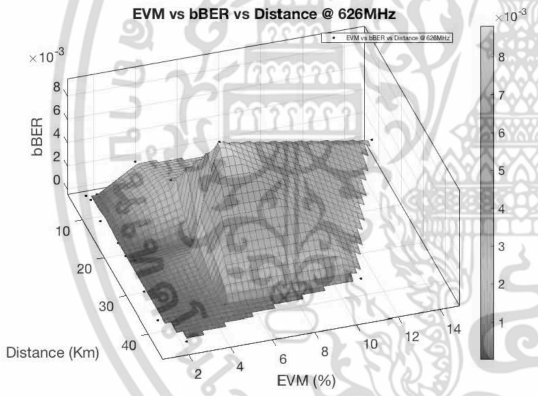


Fig. 14 Comparison between EVM and bBER and Distance for 626MHz

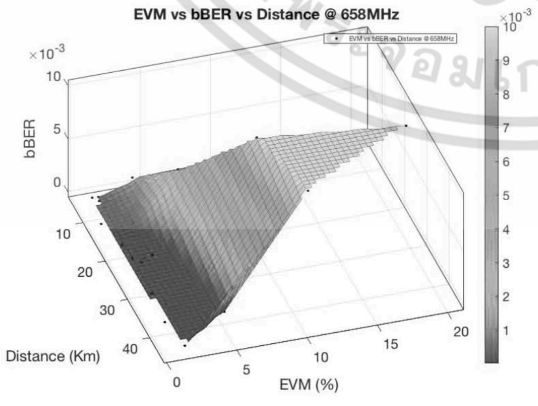


Fig. 15 Comparison between EVM and bBER and Distance for 658MHz

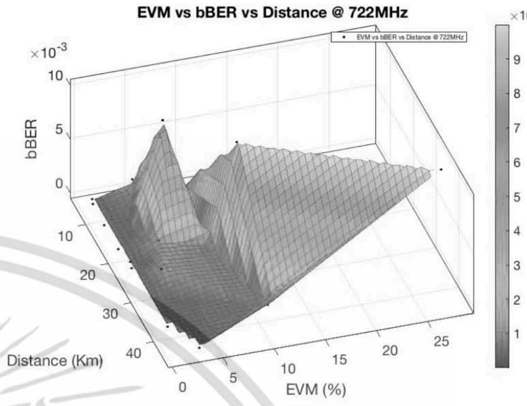


Fig. 16 Comparison between EVM and bBER and Distance for 722MHz

Although, the distance from transmitter increased almost EVM and bBER value were not affected by the distance. From these result can be summarized that the distance will not significant affect to EVM value, which is the parameter that directly affect to quality of bBER value.

The analysis in term of statistical were carried out by 2 factor, that are PDF (Probability Density Function) and CDF (Cumulative Distribution Function) the results have been shown in table 2 and fig 17, 18.

The following value in table 2 are consists of mean value, variance and standard deviation for each 5 frequency or 5 DVB-T2 operator in Bangkok, Thailand. And the Fig 17 is shown the probability density function for each 5 frequency as well. The value distribution of higher frequency will more than the lower frequency. Fig 18 shown the cumulative distribution function for each 5 frequency.

TABLE II
TABLE OF EVM STATISTICAL RESULT

Frequency (MHz)	Mean	Variance	Standard Deviation
514	3.19	12.19	0.78
594	4.35	28.13	1.18
626	3.75	11.61	0.76
658	4.17	22.87	1.06
722	5.4	41.32	1.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

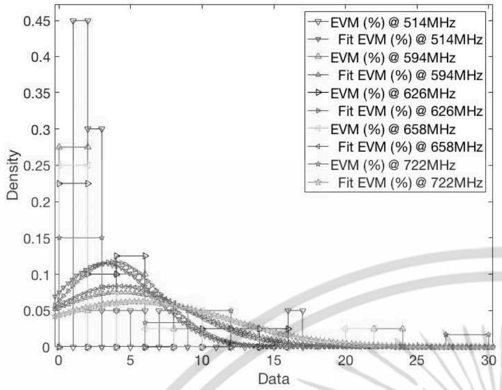


Fig. 17 Probability Density Function result of EVM for all frequency

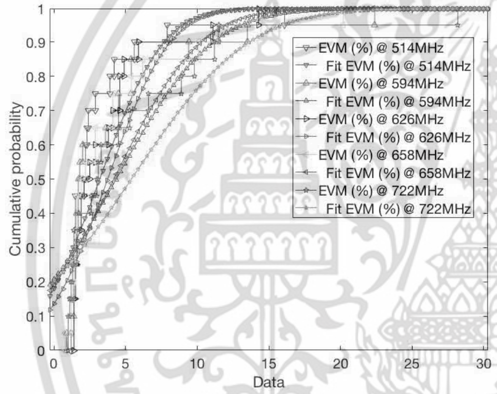


Fig. 18 Cumulative Distribution Function result of EVM for all frequency

The result in table 2 and fig 17, 18 illustrate that at the lowest frequency, which is 514 MHz will give the lowest mean of EVM value, that is 3.19% of EVM. On the other hand, at the highest frequency will give the highest mean of EVM value.

The standard deviation of EVM can be described that from the result regarding to the frequency at 626 MHz which is MCOT operator will give the lowest standard deviation. And at the highest frequency will give the highest standard deviation as well.

From this result the frequency 626 MHz which is MCOT MUX is lowest standard deviation and variance of EVM regarding to the rotated constellation function that improved the signal quality to robustness signal and it is significant difference in term of statistic. From this result can be clarified that that rotated constellation function can be used to improved the DVB-T2 signal.

V. Conclusions

From the result there are the significant correlation between EVM and bBER. These result that have been shown can be summarized that the EVM percentage or error vector magnitude will significant affect to bBER, which is the DVB-T2 quality of service indicator. Although the distance increased there was no significant affect to bBER. However, there were some affect from environment at the some of location lead to the low quality of bBER as the result that shown at some short distance between transmitter and receiver.

The EVM percentage in term of statistical shown that the frequency that has been used is significant affect to EVM. Especially at the high frequency will give the high standard deviation more that the lower frequency. At the same time the higher frequency will give the high variance more than lower frequency such as at the frequency 722 MHz the variance equal to 41.32 on the other hand, at the frequency 626 MHz the variance is equal to 11.61 regarding to the rotated constellation function that MCOT operator used to broadcast in Bangkok, Thailand. This function can be clarified that can be used to improve the DVB-T2 signal quality.

Finally, this paper is presented the analysis of DVB-T2 in term of EVM that can be used to improved the DVB-T2 quality of service such as parameter adjustment then.

References

[1] Daniele Fortin, Matteo Bertocco, Alessandro Sona, and Silvano Pupolin, “Performance assessment of DVB-T and wireless communication systems by means of cross-layer measurements,” *Bioelettromagnetismo e Compatibilità Elettromagnetica.*

[2] Mitsuhito Iwamoto, Shingo Matsuoka, Hiroki Iwasaki, and Hiroyuki Otsuka, “Transmission Performance of OFDM with 1024-QAM in the Presence of EVM Degradation,” *APWiMob 2014, Bali 28-30 Augustus 2014*

[3] Digital Video Broadcasting (DVB); Frame Structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), *ETSI Standard EN 302 755 V1.4.1 (2015-07)*

[4] W.Fischer, “Digital Video and Audio Broadcasting Technology A practical Engineering Guide” *Third EditionSpringer.*

[5] B.Ruckveratham, S.Promwong, “Performance evaluation of DVB-T2 for outdoor reception,” *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronocs, Computer, Telecommunications and Information Technology pp.1-5 (ECTI-CON), 2016*

[6] http://rfmw.em.keysight.com

[7] D. Perez-Calderón, C. Oria, J. García, P. López, V. Baena, I. Lacadena, “Rotated Constellation for DVB-T2” *XXIV Design of Circuits and Integrated Systems Conference Zaragoza, Nov. 18-20, 2009*

[8] Ladislav Polak, Tomas Kratochvil, “Performance of the Rotated Constellation in DVB-T2” ICDT 2012 : *The Seventh International Conference on Digital Telecommunications*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จุดตรวจวัดสัญญาณ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด เครื่องมือวัด Rover HD Protab, สายอากาศ 15E และเสาสูง 6 เมตร

ลำดับ	พิกัด		Mux	Channel	ค่าจากเครื่องมือวัด							Quality	วันที่ / เวลา
	ละติจูด	ลองติจูด			Power (dBuV)	C/N (dB)	MER (dB)	SNR (dB)	NsMAR (dB)	bBER	LBER	(0,1)	
1	13°42'20.59"N	100°32'35.36"E	1	26	59.8	46.9	23.8	24	10.8	1×10^{-4}	<10-8	1	26/4/59 11.30
			2	36	52.2	39.4	24.5	24	11.5	3×10^{-3}	<10-8	1	
			3	40	57.0	42.5	24.7	25	11.7	2×10^{-3}	<10-8	1	
			4	44	49.5	31.1	24.0	24	11.0	1×10^{-3}	<10-8	1	
			5	52	54.0	46.3	21.8	22	8.8	1×10^{-3}	<10-8	1	
1.1			1	26	55.2	41.4	23.4	23	10.4	1×10^{-3}	<10-8	1	
			2	36	52.5	39.8	23.2	23	10.3	1×10^{-3}	<10-8	1	
	ห่างจากสถานี	5.7 กม.	3	40	54.0	35.8	28.9	29	15.9	9×10^{-4}	<10-8	1	
	สิ่งแวดล้อม		4	44	54.4	42.4	26.6	27	13.6	6×10^{-4}	<10-8	1	
			5	52	51.1	47.3	18.8	19	5.8	2×10^{-3}	<10-8	1	

รายชื่อผู้รับรองผลการตรวจวัด

1. ผู้ให้บริการโครงข่าย ลงนาม ....
2. ผู้แทน กสทช ลงนาม ....
3. บมจ อสมท ลงนาม ....

โนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด

รูปที่ 7.1 เอกสารบันทึกผลการตรวจวัดภาคสนามร่วมกับสำนักงาน กสทช. และ อสมท.

ตางรางที่ 7.1 ตำแหน่งการวัด 20 จุดในกรุงเทพมหานคร

ตำแหน่งที่	สถานที่
1	ช่องนนทรี
2	บางกะปิ
3	รร.นวมินทร์ฯหอวังนนท์
4	รพ.เมตาประชารักษ์ อ้อมน้อย
5	บ้านงิ้ว ปทุมธานี
6	บางซื่อ
7	บางรักพัฒนา บางบัวทอง
8	ถนนสายไหม
9	ถนนสุวินทวงศ์
10	พระสมุทรเจดีย์ สมุทรปราการ
11	ทุ่งครุ
12	อุดมสุข
13	สน.พระราชวัง
14	หนองจอก
15	ลาดกระบัง ซ.50
16	ราษฎร์บูรณะ ซ.28
17	รพ.บางบ่อ
18	คลองสามวา
19	ศาลายา
20	ซ.สวนผัก 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายณัฐพันธ์ สุวรรณสุโข
วัน เดือน ปีเกิด 22 พฤษภาคม 2527
ที่อยู่ 3372/1 ซ.ลาดพร้าว 101 แยก 48 ถ.ลาดพร้าว 101 แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิกรุงเทพ 10240
ประวัติการศึกษา 2551 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2552-2554 วิศวกรระบบสื่อสาร บ.เอ เอ็ม อาร์ เอเชีย จำกัด
- ติดตั้งระบบสื่อสาร SDH ให้กับ บ.ปตท จำกัด (มหาชน) ตามแนวท่อก๊าซโครงการ YADANA ราชบุรี-พม่า
- ติดตั้งระบบสื่อสาร SDH ให้กับ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โครงการ EGAT-TNRP-COMM09
- ติดตั้งระบบสื่อสาร SDH ให้กับ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โครงการ EGAT-TNRP-COMM10

พ.ศ. 2554-2556 วิศวกรระบบสื่อสาร บมจ.ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ
- อำนวยการใช้งานระบบสื่อสารของระบบรถไฟฟ้า BTS

พ.ศ. 2556-2557 วิศวกรอาวุโส บมจ.ซี ที เอช
- ออกแบบระบบ FTTH

พ.ศ. 2557-2559 ผู้เชียวชาญระบบ บ.ทริปเปิล วี บรอดคาส จำกัด
- ออกแบบระบบวิทยุสื่อสาร DMR Radio สำหรับงานข่าวไทยรัฐทีวี
- ติดตั้งระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมสำหรับงานข่าวไทยรัฐทีวี

พ.ศ. 2560 วิศวกรออกแบบระบบวิทยุสื่อสาร บ.เอส ที อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด
- ออกแบบระบบวิทยุสื่อสาร TETRA Radio ให้กับโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายสายสีเขียว แบริ่ง-สมุทรปราการ เฟสที่ 1
- ออกแบบระบบวิทยุสื่อสาร TETRA Radio ให้กับโครงรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายสายสีเขียว แบริ่ง-สมุทรปราการ เฟสที่ 2

ผลงานวิจัย

พ.ศ. 2559 Nattapan Suwansukho and Sathaporn Promwong “Experimental Study of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DVB-T2 in Thailand" The 20th International Computer Science and Engineering Conference 2016"Smart Ubiquitous Computing And Knowledge." 14-17 December 2016, Chiang Mai Orchid Hotel, Chiangmai, Thailand

พ.ศ. 2560 Nattapan Suwansukho and Sathaporn Promwong "EVM analysis for DVB-T2 in Thailand" 2017 International Symposium on Multimedia and Communication Technology August 23-25, 2017 Classic Kameo Hotel & Serviced Apartments, Ayutthaya, Thailand.

ใบอนุญาต

พ.ศ. 2552 ระดับ ภาคีวิศวกร สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้าสื่อสาร

พ.ศ. 2555 ระดับ สามัญวิศวกร สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและไฟฟ้าสื่อสาร

รับการฝึกอบรม

พ.ศ. 2552 Project management Training

พ.ศ. 2552 Operating Training Course of EXFO OTDR Model FTB-200

พ.ศ. 2552 Operating Training Course of Fujikura Fusion Splicer FSM-60S

พ.ศ. 2553 Training Course on SDH Fiber Home Fonsweaver 780B

พ.ศ. 2553 Training Course on OTN back bone system OTN-X3M

พ.ศ. 2554 Training Course on Hi-Path-4000 IP Communication system

พ.ศ. 2554 Training Course on LTU-Shelf-AP-3700-13SAPP Telephone system

พ.ศ. 2555 Training Course on SELEX TETRA Radio and Base Station System

พ.ศ. 2555 Training Course on BOSCH PA

พ.ศ. 2555 Training Course on Motorola TETRA Radio and Base Station

การบรรยาย

พ.ศ. 2560 บรรยายอบรมวิธีการใช้งานระบบวิทยุสื่อสารโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยาย สายสีเขียว แบริ่ง-สมุทรปราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้