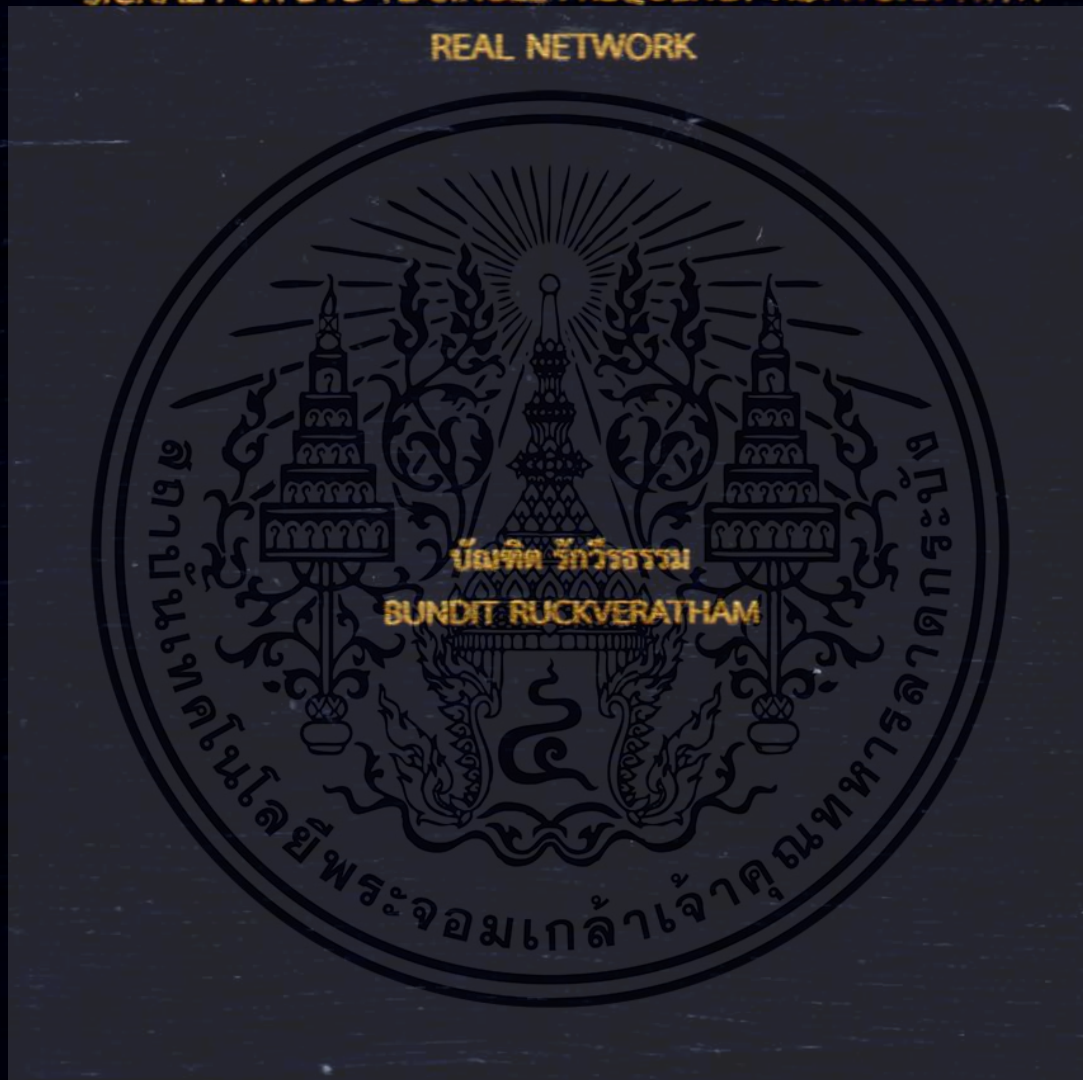


การประเมินผลและการชดเชยสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล
สำหรับโครงข่ายความถี่เดี่ยวมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยโครงข่ายจริง

EVALUATION AND COMPENSATION OF TERRESTRIAL TELEVISION
SIGNAL FOR DVB-T2 SINGLE FREQUENCY NETWORK WITH
REAL NETWORK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2563

KMITL-2020-EN-D-018-019

การประเมินผลและการชดเชยสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล
สำหรับโครงข่ายความถี่เดี่ยวมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยโครงข่ายจริง

EVALUATION AND COMPENSATION OF TERRESTRIAL TELEVISION
SIGNAL FOR DVB-T2 SINGLE FREQUENCY NETWORK WITH
REAL NETWORK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2563

KMITL-2020-EN-D-018-019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EVALUATION AND COMPENSATION OF TERRESTRIAL TELEVISION
SIGNAL FOR DVB-T2 SINGLE FREQUENCY NETWORK WITH
REAL NETWORK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2020-EN-D-018-019



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินผลและการชดเชยสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยโครงข่ายจริง
นักศึกษา	นายบัณฑิต รักวีรธรรม
รหัสประจำตัว	57601419
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประเมินผลและการชดเชยสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยโครงข่ายจริง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลในพื้นที่ทับซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามจริง โดยการปรับประวิงเวลาสัญญาณด้านเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งเสมือนการเปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งสถานีเครื่องส่งที่ระยะทางแตกต่างกันภายในพื้นที่ทับซ้อนสัญญาณของโครงข่ายความถี่เดียว ทำการตรวจสอบผลกระทบของสัญญาณตลอดช่วงเวลาป้องกัน และหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำโดยการวิเคราะห์ค่าสำคัญที่จำเป็นสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล เช่น ค่ากำลังงานที่ได้รับ MER CNR Noise margin และค่าความเบี่ยงเบนสเปกตรัม นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำเสนอค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำที่ได้จากการจำลอง และทำการทดลองในเขตพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณจากโครงข่ายความถี่เดียว เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำจากผลกระทบเนื่องจากลักษณะภูมิประเทศ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำที่ได้จากห้องปฏิบัติการ และสามารถนำไปใช้งานจริงโดยทำการชดเชยความแรงของสัญญาณจากผลกระทบเนื่องจากลักษณะภูมิประเทศ ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถใช้ในการปรับปรุงโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัท อสมท. จำกัด (มหาชน) ให้มีประสิทธิภาพในการออกอากาศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Evaluation and Compensation of Terrestrial Television Signal for DVB-T2 Single Frequency Network with Real Network
Student	Mr.Bundit Ruckveratham
Student ID.	57601419
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2020
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis proposes an evaluation and compensation of terrestrial television signal for DVB-T2 single frequency network with real network. For improve digital terrestrial television signal broadcasting efficiency in overlap area of single frequency network. In this research, the experiment was conducted by change the local delay time of the transmitter in the SFN network, which is likes a changing of the transmitter location within the overlap area of SFN to analyze the effect throughout guard interval. Moreover, the minimum threshold required for signal reception is present by the analysis of important values necessary for receiving digital television signals, e.g., received signal power, MER, CNR, noise margin, and spectrum variation. In addition, this research proposes the compensation model for the minimum received signal threshold from simulation. And experiment in the overlap areas of SFN network to use the obtained data for create a model to find the minimum threshold compensation, which effects of the terrain and the environment. The research results shows the minimum signal threshold from the laboratory and its can be used in practical by compensated the signal strength due to the effect by terrain and environment. The results of this research can be used to design and improve the digital terrestrial television broadcasting for the DTTV network service provider to get the optimum and highest efficiency. Especially, MCOT public company limited.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยมี ศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกตมา ลิน รศ.ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนถึงแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณณัฐพันธ์ สุวรรณสุข คุณธนดล เตียงทอง คุณอดิเทพ ชัยสังข์ ตลอดจน นักศึกษาระดับปริญญาตรี โท และเอก ทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัย UWB-RS Lab ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บริษัท อสมท จำกัด (มหาชน) ที่ให้โอกาสสำหรับอาชีพการงาน ให้ความรู้ และประสบการณ์ที่หาไม่ได้จากการทำงานในที่อื่น ๆ ตลอดจนการสนับสนุนด้านเครื่องมือตรวจวัด วิเคราะห์และอุปกรณ์เครื่องส่งโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สำหรับการทดลองวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ นักศึกษาสหกิจจาก สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ช่วยกันทำการทดลองวิจัย และเรียนรู้ไปพร้อมกัน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

บัณฑิต รักวีรธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 เทคโนโลยีโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินมาตรฐาน DVB-T2.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.1.1 การประมวลผลสัญญาณอินพุต.....	7
2.1.2 Physical layer pipes.....	10
2.1.3 BICM.....	11
2.1.4 การสร้างเฟรม (Frame Builder).....	14
2.1.5 การสร้างสัญญาณ OFDM	15
2.2 การส่งสัญญาณ.....	16
2.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย.....	19
2.3.1 กำลังส่งที่ใช้ในการทดสอบ.....	19
2.3.2 พารามิเตอร์ DVB-T2.....	19
2.4 ระบบโครงข่ายมาตรฐาน DVB-T2.....	22
2.4.1 โครงข่ายหลายความถี่.....	22
2.4.1.1 การจัดสรรความถี่สำหรับโครงข่ายหลายความถี่.....	22
2.4.1.2 การทำงานแบบไม่ต้องสัมพันธ์กัน.....	22
2.4.1.3 กำลังส่งที่เกินความจำเป็น.....	23
2.4.2 โครงข่ายความถี่เดียว.....	23
2.4.2.1 หลักการทำงาน.....	23
2.4.2.2 ประสิทธิภาพทางด้านความถี่.....	24
2.4.2.3 ประสิทธิภาพทางด้านกำลังส่ง.....	24
2.4.2.4 การทำงานแบบสัมพันธ์กัน.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 สถานีเสริมจุดบอด.....	25
2.5.1 มาตรฐานสำหรับการออกแบบสถานีเสริมจุดบอด.....	25
2.6 สรุป.....	26
บทที่ 3 การจำลองคุณภาพสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล.....	27
3.1 แบบจำลองโครงข่ายความถี่เดียว.....	27
3.2 การเลือกช่วงเวลาป้องกัน.....	28
3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ.....	28
3.3.1 การพยากรณ์ค่าเฉลี่ยกำลังงานที่รับได้ในพื้นที่การรับสัญญาณ.....	30
3.3.1.1 แบบจำลอง ITU-R [58].....	30
3.3.2 การจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากการถูกลบบัง	31
3.4 เทคโนโลยี OFDM	33
3.5 แบบจำลองการรบกวนสัญญาณ.....	35
3.6 การวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T2.....	37
3.6.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นโทรทัศน์ระบบดิจิทัล DVB-T2.....	37
3.6.2 แบบจำลองช่องสัญญาณ.....	38
3.6.2.1 กล่าวนำ.....	38
3.6.2.2 ช่องสัญญาณแบบ Gaussian.....	38
3.6.2.3 ช่องสัญญาณแบบ Rician	38
3.6.2.4 ช่องสัญญาณแบบ Rayleigh	39
3.6.2.5 ช่องสัญญาณการรับแบบเคลื่อนที่ มาตรฐาน TU-6.....	40
3.6.2.6 สัญญาณพื้นฐานแบบสองเส้นทาง 0 dB Echo.....	40
3.6.3 ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับแบนด์วิดท์ช่องสัญญาณ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์.....	40
3.6.3.1 การแก้ไขค่าให้ถูกต้องจากผลของการใช้งาน Pilot.....	41
3.6.4 ผลที่ได้จากการประมาณค่าช่องสัญญาณที่ใช้งานจริง.....	41
3.7 ฟังก์ชันของเกณฑ์โครงข่ายความถี่เดียว.....	43
3.8 การประเมินผลและการแก้ไขช่องสัญญาณ.....	46
3.9 การวิเคราะห์การรับสัญญาณ DVB-T2 ในห้องปฏิบัติการ.....	46
3.9.1 เกณฑ์ขั้นต่ำของสัญญาณที่ยังสามารถรับภาพได้.....	46
3.9.2 อัตราส่วนความผิดพลาดในการมอดูเลชัน.....	47
3.10 กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล.....	49
3.10.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังงานของสเปกตรัม.....	49
3.10.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	51
3.10.3 แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้น.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.10.3.1 กฎของคราเมอร์.....	53	
3.10.4 การวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ.....	53	
3.10.4.1 ผลรวมของค่ายกกำลังเนื่องจากความผิดพลาด.....	53	
3.10.4.2 R-Square.....	54	
3.10.4.3 Adjusted R-Square.....	54	
3.10.4.4 ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน.....	55	
3.10.5 การวิเคราะห์การถดถอย.....	55	
3.11 สรุป.....	57	
บทที่ 4 ค่าเกณฑ์ขั้นต่ำในการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล มาตรฐาน DVB-T2 สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว.....		59
4.1 บทนำ.....	59	
4.2 ขั้นตอนวิธีการทดลองและการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ.....	60	
4.2.1 ขั้นตอนการทดลองการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียว ใน ห้องปฏิบัติการ.....	60	
4.2.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สำหรับโครงข่าย ความถี่เดียว.....	62	
4.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	64	
4.3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดลองเพื่อประเมินเกณฑ์ของโครงข่ายความถี่เดียว....	65	
4.3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว.....	65	
4.4 การตรวจวัดสัญญาณ.....	66	
4.5 การหาค่าขีดเขตเกณฑ์ขั้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากผลกระทบอันเนื่องจากพื้นที่ใน การรับสัญญาณ.....	66	
4.5.1 แบบจำลอง ITU-R.P. 1546.....	67	
4.5.2 การกำหนดจุดวัดสัญญาณจากพื้นที่การรับสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว ใน ภาคสนาม.....	72	
4.5.3 ขั้นตอนการดำเนินการหาค่าขีดเขตเกณฑ์ขั้นต่ำของโครงข่ายความถี่เดียว.....	75	
4.5.3.1 การตรวจวัดสัญญาณและวิเคราะห์ข้อมูลการรับสัญญาณด้วยโครงข่าย ความถี่เดียว จากพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนาม.....	75	
4.5.3.2 การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความสูงของพื้นที่จากเส้นทางที่ สัญญาณเดินทางไปถึงพื้นที่ตรวจวัดสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว.....	76	
4.5.3.3 การวัดสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว จากพื้นที่รับสัญญาณใน ภาคสนาม.....	76	
4.6 สรุป.....	83	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	84
5.1 กล่าวนำ.....	84
5.2 ผลการทดลองการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการ..	84
5.3 ผลการทดลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับสัญญาณได้โครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการ.....	88
5.3.1 แบบจำลองการถดถอยพหุนามสำหรับความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับ ภาพได้.....	93
5.4 ค่าขีดเซยความแรงสัญญาณขั้นต่ำจากผลกระทบเนื่องจากพื้นที่การรับสัญญาณ.....	94
5.4.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับค่าขีดเซยความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับ ภาพได้.....	98
5.5 การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับแนวปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB และงานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง.....	98
5.6 สรุป.....	100
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
6.1 กล่าวนำ.....	102
6.2 สรุปผลการวิจัย.....	102
6.2.1 ผลการศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียว ใน ห้องปฏิบัติการ.....	102
6.2.2 ผลการศึกษาการทดลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ต่ำสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้ สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการ.....	103
6.2.3 ผลการหาค่าขีดเซยเกณฑ์ต่ำสุดโครงข่ายความถี่เดียว จากผลกระทบในพื้นที่การ รับสัญญาณ.....	103
6.2.4 การประเมินผลเปรียบเทียบผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	105
6.3 ข้อเสนอแนะ แนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคต.....	105
เอกสารอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประสิทธิภาพของ DVB-T2 [1].....	9
2.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ [1].....	18
2.3 พารามิเตอร์ที่ ITU แนะนำให้ใช้สำหรับการทดลองออกอากาศในระยะแรก [34].....	20
2.4 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยตามที่ กสทช กำหนด [34].....	21
2.5 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำหรับช่องรายการโทรทัศน์ [34].....	21
3.1 ช่วงเวลาป้องกัน (GI) ในหน่วย μS สำหรับช่องสัญญาณขนาดแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์.....	29
3.2 ความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมเปรียบเทียบกับลักษณะช่องสัญญาณ.....	50
4.1 ความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพื่อประเมินอัตราการขยายของโครงข่ายความถี่เดียว.....	65
4.2 พารามิเตอร์การมอดูเลตสำหรับการทดลองเพื่อประเมินจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำของ โครงข่ายความถี่เดียว.....	65
4.3 ความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพื่อประเมินจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำของโครงข่ายความถี่เดียว.....	66
4.4 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียวระหว่างสถานี กรุงเทพฯ และสถานีสมุทรสงคราม.....	70
4.5 พิกัดจุดวัดสัญญาณในพื้นที่ทับซ้อนทั้งหมดของการส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบ ดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว.....	74
4.6 ข้อมูลจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ณ สถานีส่งกรุงเทพฯ ถึง ตำแหน่งการวัดสัญญาณ.....	78
4.7 ข้อมูลจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ณ สถานีส่งสมุทรสงคราม ถึงตำแหน่งการวัดสัญญาณ.....	79
4.8 ข้อมูลจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ณ สถานีส่งกรุงเทพฯ และ สถานีส่งสมุทรสงคราม ถึงตำแหน่งการวัดสัญญาณ.....	80
4.9 ผลที่ได้จากวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่ เดียวสำหรับการรับสัญญาณด้วยความแรงปกติ.....	81
4.10 ผลที่ได้จากวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่ เดียว ที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ.....	82
5.1 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรับได้ แบ่งตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายหลายความถี่มาตรฐาน DVB-T2.....	87
5.2 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรับที่รับได้ภายในช่วงเวลาป้องกัน แบ่งตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับ การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2.....	88
5.3 จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล มาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว.....	93
5.4 ข้อมูลการตรวจวัดสัญญาณจากตำแหน่งการวัดพื้นที่จริงโครงข่ายความถี่เดียว สำหรับการรับ สัญญาณด้วยความแรงสัญญาณปกติ.....	95
5.5 ข้อมูลการตรวจวัดสัญญาณจากจุดทดสอบภาคสนามโครงข่ายความถี่เดียว สำหรับการรับ สัญญาณด้วยความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองวิจัยกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	99
6.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับ โครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ในห้องปฏิบัติการ.....	103
6.2 ผลการทดลองค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบ ดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว.....	104
6.3 ค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล มาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว.....	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมของมาตรฐานเทคโนโลยี DVB-T2	9
2.2 ลักษณะ Rotated และ Non-rotated constellation ในรูปแบบ 16-QAM.....	12
2.3 T2 เฟรมสำหรับ FFT size 4K (4 P2 Symbols) และ FEF.....	17
2.4 P1 สัญลักษณ์ข้อมูลและโครงสร้างทางเวลา.....	17
3.1 การประวิงเวลาของสัญญาณจากสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว ภายในช่วงเวลา ป้อนกัน.....	27
3.2 สเปกตรัมของ OFDM ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน จำนวน 5 ความถี่.....	33
3.3 การประวิงเวลาในช่องสัญญาณของการแพร่กระจายสัญญาณ.....	44
3.4 แผนภาพคอนสเทลเลชัน สำหรับการมอดูเลชันแบบ 16-QAM	48
3.5 ความผิดพลาดในการมอดูเลต.....	49
3.6 แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลโดยมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด.....	56
4.1 การทดลองวัดสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว.....	60
4.2 ผังการทดลองสำหรับการประเมินผลอัตราขยายของโครงข่ายความถี่เดียว.....	61
4.3 การเกิดปรากฏการณ์จุดวิกฤตสัญญาณดิจิทัลสำหรับการส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดิน ระบบดิจิทัล.....	62
4.4 ผังการทดลองจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำสำหรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินโครงข่ายความถี่ เดียว.....	62
4.5 เครื่องมือสำหรับการทดลองการหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับสัญญาณได้ ของการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2.....	64
4.6 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวิเคราะห์การสัญญาณมาตรฐาน DVB-T.....	67
4.7 มาตรฐานของ ITU-R P.1546-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าและ ระยะทาง.....	68
4.8 ภาพหน้าจอโปรแกรม ICS Telecom	69
4.9 ข้อมูลแผนที่ใช้สำหรับการคำนวณแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณด้วยมาตรฐาน ITU.R.P 1546.....	70
4.10 ข้อมูลสำหรับการคำนวณการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรม ATDI ICS Telecom	71
4.11 แบบรูปของสายอากาศส่ง (ก) กรุงเทพฯ (ใบหยก) (ข) สมุทรสงคราม.....	71
4.12 แบบรูปการแพร่กระจายสัญญาณด้วยโปรแกรม ATDI ICS Telecom โดยسیم่วงเป็นพื้นที่ทับ ซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว.....	72
4.13 การจำลองจุดวัดสัญญาณเพื่อหาค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพ ได้จากพื้นที่รับสัญญาณในพื้นที่จริง.....	73
4.14 ระยะห่างระหว่างสถานีส่ง (กรุงเทพฯ) และตำแหน่งการวัดสัญญาณในพื้นที่จริง.....	73
4.15 ระยะห่างระหว่างสถานีส่ง (สมุทรสงคราม) และตำแหน่งการวัดสัญญาณในพื้นที่จริง.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 สเปกตรัมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดี่ยวมาตรฐาน DVB-T2 ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากผลกระทบจากพื้นที่และสิ่งแวดล้อมในการรับสัญญาณ (ก) ไม่ถูกรบกวน (ข) ถูกรบกวน.....	75
4.17 ขั้นตอนการดำเนินการหาค่าชดเชยค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ของโครงข่ายความถี่เดี่ยว...	76
4.18 ระดับความสูงต่ำของพื้นที่สภาวะแวดล้อมจริงตลอดเส้นทางจากเครื่องส่งโทรทัศน์ฯ กรุงเทพฯ (ไบกย) ไปยังตำแหน่งการวัดสัญญาณ P08.....	77
4.19 ระดับความสูงต่ำของพื้นที่สภาวะแวดล้อมจริงตลอดเส้นทางจากเครื่องส่งโทรทัศน์ฯ สมุทรสงคราม ไปยังตำแหน่งการวัดสัญญาณ P08.....	77
4.20 การติดตั้งอุปกรณ์และการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดี่ยว ในพื้นที่รับสัญญาณจริง.....	80
4.21 ตัวอย่างสเปกตรัมสัญญาณจากตำแหน่งการวัดสัญญาณ P09 ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์.....	81
4.22 ตัวอย่างสเปกตรัมสัญญาณจากตำแหน่งการวัดสัญญาณ P12 ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์.....	82
5.1 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่าย ความถี่เดี่ยว ระหว่างความถี่ของแต่ละ MUX.....	85
5.2 การเปรียบเทียบอัตราขยายของอัตราผิดพลาดการมอดูเลต MER กับการประวิงเวลาในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างความถี่ของแต่ละ MUX.....	86
5.3 การเปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ในการรับสัญญาณภายในช่วงระยะเวลาป้องกัน.....	86
5.4 การเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดี่ยวมาตรฐาน DVB-T2	90
5.5 การเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดการมอดูเลต ภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดี่ยวมาตรฐาน DVB-T2	91
5.6 การเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดี่ยวมาตรฐาน DVB-T2.....	91
5.7 การเปรียบเทียบ Noise Margin ภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดี่ยวมาตรฐาน DVB-T2.....	92
5.8 การเปรียบเทียบอัตราคลื่นพาทต่อสัญญาณรบกวนภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐานโครงข่ายความถี่เดี่ยว DVB-T2.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 การหาค่าเฉลี่ยสำหรับชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากสถานีส่ง กรุงเทพฯ.....	97
5.10 การหาค่าเฉลี่ยสำหรับชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากสถานีส่ง สมุทรสงคราม.....	97
5.11 การหาค่าเฉลี่ยสำหรับชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากสถานีส่ง กรุงเทพฯ และสถานีส่งสมุทรสงคราม.....	97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโลกปัจจุบันระบบการส่งผ่านสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ภาคพื้นดิน ได้ปรับเปลี่ยนการส่งสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์เป็นระบบดิจิทัลแทนการส่งผ่านสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ในระบบแอนะล็อกเดิม ผลจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ทำให้การรับชมโทรทัศน์มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น การส่งผ่านสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล มีการใช้งานอยู่ 4 มาตรฐานด้วยกัน คือ ISDBT (Integrated Services Digital Broadcasting) ATSC (Advanced Television Systems Committee) DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) และ DVB (Digital Video Broadcasting) ซึ่งประเทศไทยใช้มาตรฐานการส่งสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่สอง (Digital Video Broadcasting - Second Generation Terrestrial: DVB -T2) [1] โดยมีสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช) เป็นหน่วยงานกำกับดูแลคลื่นวิทยุ โทรทัศน์ และโทรคมนาคมในประเทศไทย

การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 มีวิธีการส่งสัญญาณโทรทัศน์ 2 แบบ คือ การส่งแบบโครงข่ายหลายความถี่ (Multi Frequency Network: MFN) และการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว (Single Frequency Network: SFN) [2] ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการเลือกใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาเกี่ยวกับการส่งโทรทัศน์โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลในแบบโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งจะมีข้อดีว่าการส่งแบบโครงข่ายหลายความถี่และมีความเหมาะสมสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณที่ต้องการพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณมากขึ้นโดยใช้งานเพียงความถี่เดียว นอกจากนี้ การส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียวยังสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบเพื่อสร้างสถานีสำหรับเสริมจุดบอดได้ แต่ในทางกลับกันก็มีความซับซ้อนในการออกแบบ และการปรับแต่งทางเทคนิคสำหรับการติดตั้งเครื่องส่งโทรทัศน์มากพอสมควร

ในการรับสัญญาณโทรทัศน์ในระบบดิจิทัล ความแรงของคลื่นสัญญาณในการรับ ไม่ได้มีส่วนสำคัญที่สุดสำหรับการออกแบบโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการรับสัญญาณโทรทัศน์แบบดิจิทัลนั้น จะตัดสินจากผลการรับสัญญาณภาพและเสียงได้สำเร็จหรือไม่ การแพร่กระจายสัญญาณโดยใช้กำลังส่งที่มากเกินไป ทำให้ต้นทุนสำหรับโครงข่ายเพิ่มสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น เช่น ค่าไฟฟ้า รวมถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องส่งโทรทัศน์ สำหรับพื้นที่ที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้ก็จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์กำลังส่งในการแพร่กระจายสัญญาณทั้งพื้นที่เหล่านั้นว่ามีค่ามากน้อยเหมาะสมเพียงพอหรือไม่ ดังนั้น การหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับสัญญาณได้ จึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับวิเคราะห์และออกแบบโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ผลกระทบที่เกิดจากช่องสัญญาณสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์แบบโครงข่ายความถี่เดียว จะมีมากกว่าการรับสัญญาณโทรทัศน์แบบหลายความถี่ หรือแม้แต่การรับโทรทัศน์แบบแอนะล็อก เนื่องจากการรับสัญญาณโทรทัศน์แบบโครงข่ายความถี่เดียวนั้น สัญญาณที่รับได้มาจากหลายทิศทาง และมีค่าการประวิงเวลาของสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับที่แตกต่างกัน รวมไปถึงทิศทางของสัญญาณการแพร่กระจายสัญญาณที่ส่งมาจากแต่ละสถานีเครื่องส่งภายในโครงข่ายความถี่เดียว ปัจจัยเหล่านี้ล้วน

มีผลต่อการรับสัญญาณทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำ จากการศึกษาวิจัยพบว่าปัจจัยเหล่านี้ มีผลกระทบต่ออย่างยิ่งสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การออกแบบโครงข่ายการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลให้มีประสิทธิภาพสูงสุดมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงการหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำสำหรับการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว เนื่องจากการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลนั้น ใช้เทคนิคการส่งแบบโอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal frequency-division multiplexing: OFDM) ด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลจำนวนมากโดยใช้ความกว้างของแถบความถี่สเปกตรัมได้เต็มประสิทธิภาพ และยังสามารถประยุกต์ใช้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียวได้ การมอดูเลชันแบบ OFDM สามารถใช้ประโยชน์จากการรับสัญญาณที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกันหลายเส้นทาง (Multipath) ข้อดีคือถ้าสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางเหล่านี้อยู่ภายในช่วงเวลาป้องกัน (Guard interval) สัญญาณที่รับได้จะเสริมกันและไม่รบกวนกัน แต่ถ้าหากการรับสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางเหล่านี้ มีค่าประวิงเวลานานกว่าช่วงเวลาป้องกัน จะทำให้เกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณและการรบกวนกันได้ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการรับสัญญาณที่เครื่องรับ

การแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลด้วยโครงข่ายความถี่เดียวนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายหลายความถี่ มีข้อได้เปรียบหลายประการ คือ เครื่องรับที่รับสัญญาณจากโครงข่ายความถี่เดียว สามารถรับสัญญาณได้หลายทิศทางจากจำนวนเครื่องส่งที่อยู่ในโครงข่ายเดียวกัน ซึ่งหมายความว่า ถ้าเครื่องส่งหนึ่งเครื่องมีปัญหาในโครงข่ายความถี่เดียว พื้นที่ในการแพร่กระจายสัญญาณจะไม่ได้หายไปทั้งหมด เพราะเครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้จากเครื่องส่งอื่น ๆ ภายในโครงข่ายความถี่เดียว และการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว ยังสามารถแพร่กระจายสัญญาณได้ด้วยเครื่องส่งโทรทัศน์กำลังต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการส่งด้วยโครงข่ายหลายความถี่ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องส่งด้วยกำลังส่งสูงเพื่อให้ไปถึงพื้นที่ชายขอบของการแพร่กระจายสัญญาณ แต่สามารถไปตั้งสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ในบริเวณพื้นที่ที่ต้องการขยายขอบเขตการให้บริการหรือแม้แต่การตั้งสถานีเสริมจุดบอด (Gap filler) เพื่อให้สามารถขยายพื้นที่การให้บริการให้มากขึ้นได้

ในการออกแบบโครงข่ายการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ (Coverage area) ทั้งการส่งแบบหลายความถี่และโครงข่ายความถี่เดียว โดยใช้โปรแกรมจำลองการแพร่กระจายสัญญาณ ค่าที่ได้จากแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณที่มีอยู่ ในบางกรณีค่าที่คำนวณได้ อาจมีความแตกต่างจากการออกพื้นที่เพื่อตรวจวัดสัญญาณจริงในภาคสนาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว การรับสัญญาณจากเครื่องส่งหลายเครื่องโดยมีค่าประวิงเวลา (Delay) ที่สัญญาณเดินทางมายังเครื่องรับที่เวลาแตกต่างกัน มีความยากลำบากในการตรวจวัดจากพื้นที่รับสัญญาณในพื้นที่จริง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เห็นความสำคัญของปัญหาการรับสัญญาณสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยได้นำเสนอการประเมินผลจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำ ด้วยข้อมูลที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการและข้อมูลที่ได้จากการวัดในพื้นที่จริง

ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถช่วยอธิบายปรากฏการณ์เกี่ยวกับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว โดยการประเมินผลช่องสัญญาณจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและการตรวจวัดสัญญาณในพื้นที่จริงได้ โดยมุ่งเน้นไปที่การหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงข่ายการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ทำให้สามารถปรับลดกำลังส่งที่เหมาะสมได้ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบการติดตั้งและปรับแต่งเครื่องส่งสำหรับสถานีเสริมจุดบอดให้มีความเหมาะสม นอกจากนี้ยังใช้วิธีการที่ศึกษานี้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาผลจากการปรับแต่งพารามิเตอร์ในการส่งแบบอื่น ๆ ตลอดจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาการแพร่กระจายสัญญาณระบบดิจิทัลแบบเคลื่อนที่อื่น ๆ ได้ เช่น การแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 และการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุกระจายเสียงดิจิทัลมาตรฐาน DAB ซึ่งในอนาคต กสทช ได้มีนโยบายนำมาใช้สำหรับกิจการวิทยุกระจายเสียงในประเทศไทย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับการแพร่กระจายสัญญาณและการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ DVB-T2 ได้ข้อสรุปว่า ความแรงของสัญญาณที่รับได้ ไม่ได้บ่งชี้ถึงคุณภาพการรับสัญญาณเพียงอย่างเดียว เนื่องจากแถบความถี่ที่กว้างของการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 สำหรับประเทศไทยใช้ความกว้างของแถบความถี่ 8 เมกกะเฮิรตซ์ เพื่อส่งผ่านข้อมูลช่องรายการโทรทัศน์ที่หลากหลายช่องรายการในรูปของชุดข้อมูล (Data packets) คุณภาพการรับสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้น สเปกตรัมต้องไม่โดนรบกวนในตลอดช่วงแบนด์วิดท์ที่ใช้งาน การรบกวนสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากสภาพสิ่งแวดล้อมลักษณะภูมิประเทศบริเวณพื้นที่ในการรับสัญญาณ ซึ่งจะมีผลทำให้คุณภาพในการส่งสัญญาณถูกลดทอนลง สำหรับการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว นอกจากการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมและภูมิประเทศ ปัจจัยที่สำคัญอีกประการคือ การตั้งค่าช่วงเวลาป้องกันที่ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่รับสัญญาณ ซึ่งการตั้งค่าช่วงเวลาป้องกันที่ไม่สอดคล้องกัน เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพการรับสัญญาณลดลง

สมมติฐานการศึกษาสำหรับการรับสัญญาณการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล DVB-T2 สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ในงานวิจัยนี้ ทำการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัม (Spectrum variation) ค่า MER (Modulation error ratio) ค่า Noise margin และจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำที่ โดยทำการเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งเปรียบเสมือนการจำลองการรับสัญญาณในพื้นที่จริงที่เครื่องส่งอยู่ห่างจากจุดรับสัญญาณที่ระยะทางแตกต่างกัน ว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือสมมติฐานหรือไม่ รวมไปถึงการทดสอบจากพื้นที่รับสัญญาณจริง เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากลักษณะภูมิประเทศต่อการรับสัญญาณ โดยพิจารณาที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำภายในช่วงเวลาป้องกัน และนำเสนอค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำจากผลกระทบลักษณะภูมิประเทศ

1.4 การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา

การส่งโทรทัศนภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล DVB-T2 เป็นเทคโนโลยีล่าสุดสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ในปัจจุบัน ซึ่งมีงานวิจัยมากมายทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบคุณภาพของการแพร่กระจายสัญญาณ ได้มีการศึกษาวิจัยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำจากการออกอากาศจริงในช่วงการทดลองออกอากาศ [3] โดยทำการศึกษาดังผลกระทบบของการปรับพารามิเตอร์ในการส่งทั้งหมดของมาตรฐาน DVB-T2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ DVB-T และเปรียบเทียบผลการรับสัญญาณกับเอกสารอ้างอิงของ DVB ในงานวิจัย [4] มีการศึกษาวิจัยการตรวจการแพร่กระจายสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียวจากการใช้งานจริง นอกจากการนั้นยังมีการนำเสนอค่าอัตราขยายของโครงข่ายความถี่เดียว (SFN gain) โดยทำการตรวจวัดในพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณที่แพร่กระจายในโครงข่ายความถี่เดียว [5] และในงานวิจัย [6 - 7] ได้นำเสนอค่าอัตราขยายของโครงข่ายความถี่เดียว เมื่อค่า MER เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากผลของช่องสัญญาณการรับและผลกระทบจากการรับสัญญาณที่มีหลายเครื่องส่งพร้อมกัน

ในบางพื้นที่การครอบคลุมสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินโครงข่ายความถี่เดียวนั้นสัญญาณที่รับได้อาจถูกลดทอนเนื่องจากผลกระทบของช่องสัญญาณแบบโครงข่ายความถี่เดียว ได้มีการนำเสนอแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณด้วยแบบจำลองเซียเบอร์โทนี (XiaBertoni model) และแบบจำลองฮาตาเซ (Hata model) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากช่องสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว [8] จากนั้นมีงานวิจัยที่นำเสนอการทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์การมอดูเลตจาก 16 QAM ถึง 64 QAM เพื่อทดสอบถึงผลกระทบเกี่ยวกับการรับสัญญาณที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกัน [9] จากนั้นมีการทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียว เนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ที่ทำให้ความถี่เปลี่ยนไป (Doppler frequency shift) ซึ่งถูกนำเสนอในการทดลองจากห้องปฏิบัติการและการตรวจวัดในพื้นที่จริง [10] ในงานศึกษาวิจัย [11] นำเสนอคุณภาพการให้บริการ (Quality of service: QoS) โดยการพิจารณาจากพารามิเตอร์ตรวจสอบคุณภาพสัญญาณ เช่น ผลกระทบของ MER กับการรับสัญญาณ และผลกระทบจากการประวิงเวลาสัญญาณของเครื่องส่งภายในโครงข่ายความถี่เดียวกับค่า MER

สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ผลกระทบเนื่องจากการประวิงเวลาของสัญญาณภายในช่วงเวลาป้องกันมีผลโดยตรงต่อสัญญาณที่รับได้ ในงานวิจัย [12] นำเสนอการตรวจสอบค่าความผิดพลาดบิตเนื่องจากผลของการประวิงเวลาในช่วงเวลาป้องกัน นอกจากนี้การประวิงเวลาของสัญญาณที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกันหลายเส้นทาง ทำให้ระดับกำลังของสัญญาณ IQ มีความผิดเพี้ยนและไม่สมดุลกัน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ โดยมีงานวิจัย [13] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณ IQ ที่ไม่สมดุล (IQ imbalance) กับการชดเชยทางความถี่ (Center frequency offset: CFO) ว่ามีผลกระทบต่ออัตราความผิดพลาดของซิมโบล (Symbol error rate: SER) อย่างไร ซึ่งผลของการรบกวนกันระหว่างซิมโบล (Inter symbol interference: ISI) เกิดขึ้นเนื่องจากการประวิงเวลาของสัญญาณในโครงข่ายความถี่เดียว ในงานวิจัย [14] นำเสนอแบบจำลองสำหรับเทคนิคการประมาณค่าและการแก้ไขผลกระทบจากการหมุนเฟส (Phase rotation) โดยใช้วิธีการชดเชยซิมโบลทางเวลา (Symbol timing offset: STO) ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาการรบกวนระหว่างซิมโบลได้

อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาเกี่ยวกับจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำน้อยมากสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบเนื่องจากการประวิงเวลาในช่วงเวลาป้องกัน สำหรับงานวิจัยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิงที่ใช้ในการศึกษาและใช้เป็นข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้ ทั้งหมดเป็นการทดลองวิจัยจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศจริงสำหรับประเทศเหล่านั้น ซึ่งแต่ละประเทศก็มีข้อจำกัดสำหรับการทดลองกับทุกพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน DVB-T2 เพราะอาจส่งกระทบการออกอากาศได้เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการโดยมุ่งเน้นไปที่การทดสอบสำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย ตลอดจนวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบอันเนื่องมาจากสภาพสิ่งแวดล้อมและภูมิประเทศของประเทศไทย ซึ่งหากในอนาคตมีประเทศใด ต้องใช้พารามิเตอร์สำหรับการออกอากาศเหมือนประเทศไทย ก็จะสามารถนำผลการทดลองและแนวทางการทดลองจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการอ้างอิงได้ หรือแม้แต่การใช้เป็นแนวทางสำหรับการปรับแต่งการออกแบบโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

1.5 ขอบเขตการวิจัย

จากสมมติฐานและการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาได้นำไปสู่การกำหนดขอบเขตงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ ในการพิจารณาประสิทธิภาพของการแพร่กระจายสัญญาณการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 แบบโครงข่ายความถี่เดียว ได้มีการพิจารณาแบบจำลองช่องสัญญาณ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแพร่กระจายสัญญาณ และวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์การส่งสัญญาณในหลายวิธีการเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแพร่กระจายสัญญาณ แต่ยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่พิจารณาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ ซึ่งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งสำหรับการออกแบบโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ในงานศึกษาวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวโดยพิจารณาค่าการประวิงเวลาในช่วงเวลาป้องกันสำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศในประเทศไทย จากสองเครื่องส่งที่แพร่กระจายสัญญาณมายังเครื่องรับ ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยการจำลองการส่งสัญญาณแบบโครงข่ายความถี่เดียว ด้วยเครื่องส่งที่ใช้ในการออกอากาศจริงจำนวน 2 เครื่อง และทำการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการรับสัญญาณ ด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T2 เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ ทำการทดสอบการปรับค่าการประวิงเวลาของสัญญาณของเครื่องส่ง (Local delay) ว่ามีผลอย่างไรต่อจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ นำเสนอค่า MER ที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ นำเสนอค่าการเบี่ยงเบนของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไปเนื่องจากค่าการประวิงเวลาระหว่างเครื่องส่งสองเครื่องในโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณและการทบทวนประสิทธิภาพการส่งสัญญาณสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ได้นำเสนอเกณฑ์ขั้นต่ำของค่าระดับสัญญาณรบกวนเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ยังสามารถรับสัญญาณได้ (Noise margin) และสุดท้ายนำเสนอเกณฑ์ขั้นต่ำสำหรับอัตราส่วนของสัญญาณคลื่นพาห่ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to noise ratio: CNR) ที่ยังสามารถรับสัญญาณได้ โดยการเปรียบเทียบข้อมูลกับแนวทางการดำเนินการที่ DVB ได้นำเสนอไว้และเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา

นอกจากนี้ ได้ทำการตรวจวัดสัญญาณในพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนามจริง เพื่อปรับค่าที่ได้เนื่องจากตัวแปรผลกระทบเนื่องจากสภาพพื้นที่ ระยะทาง และระดับความสูงเฉลี่ยจากน้ำทะเลตลอดเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ ซึ่งมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการ โดยทำการตรวจสอบค่าที่วัดได้ในพื้นที่ที่สัญญาณเกิดการทับซ้อนกันของสัญญาณจากโครงข่ายความถี่เดียว ระหว่างสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลที่แพร่กระจายสัญญาณจากกรุงเทพฯ (อาคารใบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทยก) และสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลที่แพร่กระจายสัญญาณจากจังหวัดสมุทรสงคราม นำค่าที่ได้จากพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนามมาสร้างตัวแปรแบบจำลองสำหรับความเบี่ยงเบนของความแรงของสัญญาณที่รับได้อันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมและลักษณะภูมิประเทศในการรับสัญญาณ เพื่อชดเชยค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติ โดยท้ายสุดได้นำเสนอแบบจำลองจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ สำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับพารามิเตอร์การมอดูเลตที่ใช้ในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีประโยชน์สำหรับการออกแบบโครงข่ายและการวางแผนสำหรับตั้งสถานีเสริมจุดบอด เพื่อให้การออกอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอลำดับขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงการศึกษาที่มาและความสำคัญของปัญหา สมมติฐานของการศึกษาวิจัย ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย รวมถึงขอบเขตของงานวิจัย เป็นต้น

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงมาตรฐานและการทำงานของระบบส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 อธิบายบล็อกไดอะแกรมการทำงานของแต่ละระบบที่เกี่ยวข้องในเทคโนโลยีการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 กล่าวถึงพารามิเตอร์การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย รวมทั้งได้กล่าวถึงการแพร่กระจายสัญญาณด้วยโครงข่ายความถี่เดียวและโครงข่ายหลายความถี่ สถานีเสริมจุดบอด

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T2 หลักการตรวจสอบประสิทธิภาพของการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 การจำลองช่องสัญญาณแบบจำลองโพโลโนเมียล สำหรับการวิเคราะห์และประเมินผลสัญญาณในห้องปฏิบัติการ และการสร้างแบบจำลองค่าชดเชยจุดเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ ด้วยการตรวจวัดในพื้นที่จริงเพื่อนำปัจจัยผลกระทบจากระยะทาง และลักษณะภูมิประเทศ เพื่อนำมาสร้างตัวแปรสำหรับปรับปรุงค่าจุดเริ่มเปลี่ยนขั้นต่ำให้มีค่าแม่นยำมากที่สุด

บทที่ 4 ได้กล่าวถึงหลักการประมาณค่าช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล รวมถึงการอธิบายหลักการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองหาค่าสูญเสียเชิงวิถีแบบต่าง ๆ สำหรับการประเมินผลช่องสัญญาณ การศึกษาวิธีการหาค่าความแรงสัญญาณจุดเริ่มเปลี่ยนขั้นต่ำสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 การวิเคราะห์ค่าความแรงสัญญาณจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากค่าประวิงเวลาสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวในพื้นที่สัญญาณที่ทับซ้อนกัน โดยทำการตรวจสอบค่าการประวิงเวลาในช่วงเวลาป้องกันของ โครงข่ายความถี่เดียว

บทที่ 5 ได้กล่าวถึง ผลการประเมินผลและการชดเชยสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ซึ่งได้พิจารณาถึง อัตราขยายโครงข่ายความถี่เดียว การหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 และการหาค่าชดเชยสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวด้วยโครงข่ายจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 ได้สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ รวมถึงแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อในอนาคตที่เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบโครงข่ายโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัลภาคพื้นดิน โครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 และการตั้งสถานีเสริมจุดบอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีโทรทัศน์ระบบภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

มาตรฐาน DVB-T2

2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ที่ประกาศใช้ในประเทศไทยปัจจุบันนี้ได้ใช้เทคโนโลยีการมอดูเลชันแบบซีโอเอฟดีเอ็ม (Code Orthogonal Frequency Division Multiplex: COFDM) [15] ซึ่งการมอดูเลชันแบบนี้ก็มีการใช้ในระบบการกระจายเสียงวิทยุภาคพื้นดินระบบดิจิทัล DAB (Digital Audio Broadcasting) เช่นกัน ส่วนระบบการส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล (Digital Video Broadcast Terrestrial: DVB-T) ถือเป็นมาตรฐานรุ่นแรกที่ส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลด้วยวิธีการมอดูเลชันแบบนี้ ได้เริ่มใช้ครั้งแรกเมื่อคริสต์ศตวรรษ 1990 นับตั้งแต่มาตรฐาน DVB ได้นำเสนอมาตรฐานของการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลด้วยวิธีการนี้ การสื่อสารไร้สายชนิดอื่น ๆ อาทิเช่น มาตรฐาน IEEE 802.11 มาตรฐาน IEEE 802.16 และ มาตรฐาน LTE [16] ต่างก็ใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ OFDM เช่นกัน

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีในมาตรฐาน DVB-T2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้นสำหรับการส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ในย่านความถี่ UHF และ VHF มาตรฐานการส่งดังกล่าวมีความยืดหยุ่นสำหรับการทำมัลติเพล็กซ์ การเข้ารหัส การปรับเปลี่ยนมอดูเลชัน และการปรับแต่งความถี่คลื่นวิทยุด้วยพารามิเตอร์แบบต่าง ๆ ตารางที่ 2.1 เป็นภาพรวมของเทคโนโลยีใหม่ที่เพิ่มเข้ามาในบล็อกไดอะแกรม ซึ่งทำให้เพิ่มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นตามที่ระบุไว้ในตาราง และจากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงบล็อกการทำงานหลักของมาตรฐาน DVB-T2

มาตรฐานเทคโนโลยี DVB-T2 ได้พัฒนามาจากมาตรฐานเทคโนโลยี DVB-T [1] เพิ่มเติมรายละเอียดส่วนประกอบใหม่เข้ามาในสถาปัตยกรรมของระบบนั้นคือ T2-Gateway โดยส่วนประกอบนี้ติดตั้งอยู่ที่ภาค มอดูเลเตอร์ หรืออยู่ในส่วนของการมอดูเลตสำหรับการปรับแต่งระบบโครงข่ายความถี่เดียว (Single frequency network: SFN) โดยใช้ชื่อว่า T2-MI (T2 Modulator Interface) [17] T2-Gateway ต้องอยู่ในส่วนของการมอดูเลตเพื่อให้การสร้างสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว มีลักษณะเหมือนกันจากทุกเครื่องส่งภายในโครงข่าย หรือแม้กระทั่งในกรณีของการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียวแบบ MISO (Multi input single output) ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7

2.1.1 การประมวลผลสัญญาณอินพุต

มาตรฐาน DVB-T2 สามารถรองรับสัญญาณอินพุต ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

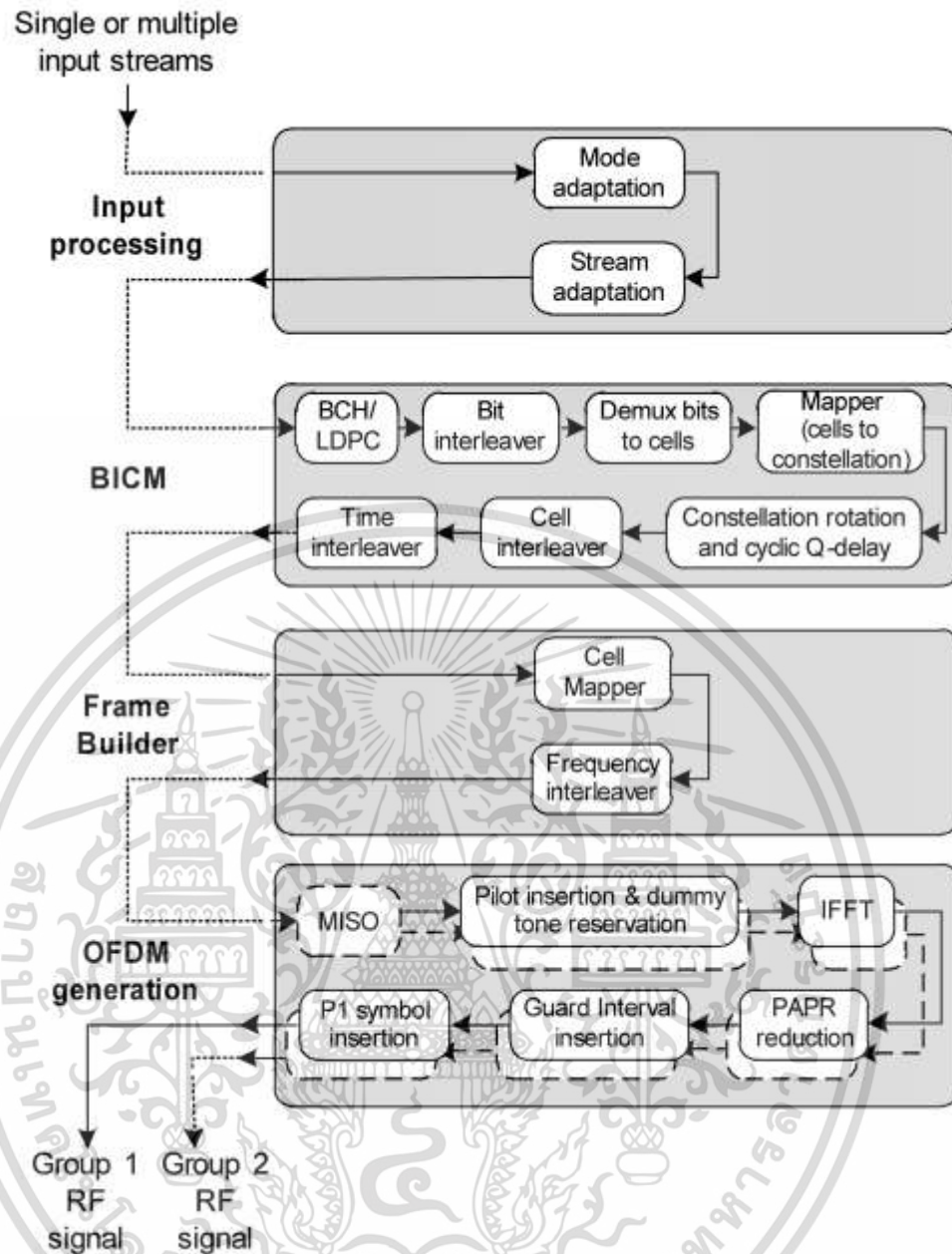
- Transport Stream (TS) สตรีมแพ็คเกจข้อมูลที่มีความยาวคงที่เช่นเดียวกับที่ใช้ใน DVB-T
 - Generic Encapsulated Stream (GSE) สตรีมแพ็คเกจข้อมูลที่มีความยาวแบบคงที่หรือแบบเปลี่ยนแปลงได้ โดยสามารถรับรู้ได้จากมอดูเลเตอร์ รูปแบบของข้อมูลแบบนี้มีวัตถุประสงค์สำหรับการใช้งานด้าน IP ที่ไม่มี TS-MPE (Multi-Protocol Encapsulation) [18]
 - Generic Continuous Stream (GCS) สตรีมแพ็คเกจข้อมูลที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ มอดูเลเตอร์ไม่สามารถรู้ความยาวของแพ็คเกจ
 - Generic Fixed-length Packetized Stream (GFPS)
- สำหรับ Transport Stream ทั่วไปยังคงสามารถใช้กับ DVB-T2 ได้ อย่างไรก็ตาม ตัวเลือกบางส่วนถูกออกแบบให้ลดขนาดของ Overhead โดยได้รับการแนะนำไว้ดังนี้
- การตรวจสอบแพ็คเกจที่ไม่ได้ใช้งาน สามารถถอดแพ็คเกจจำนวนมากมายังไม่ได้ใช้งานออกจาก ทรานสปอร์ตสตรีมได้
 - โหมดประสิทธิภาพสูง สามารถละทิ้งซิงค์ไบท์ได้จากทรานสปอร์ตสตรีม และยังสามารถใช้ได้ในรูปแบบของ GSE

เอาต์พุตของภาครับสามารถใส่เข้าได้หรือถอดออกได้ในส่วนของระบบได้อีกครั้งหากมีความจำเป็นสำหรับในส่วนของทรานสปอร์ตสตรีมที่ต้องใช้ โดยตัวเลือกเหล่านี้สามารถเลือกได้ รูปแบบสตรีมเหล่านี้ถูกจัดสรรด้วย T2 Baseband frame และในกรณีที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนข้อมูลของสตรีมแพ็คเกจใน BB frame เนื่องจากเนื้อหารายการใน BB frame ถูกเข้ารหัสไว้

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานเทคโนโลยี DVB-T2 [1]

Block	New features	Benefits
Input	<ul style="list-style-type: none"> - PLP - New input formats - High efficiency modes 	<ul style="list-style-type: none"> Flexibility Flexibility Less overhead
BICM	<ul style="list-style-type: none"> - LDPC - 256-QAM - Rotated constellations - Time interleaving 	<ul style="list-style-type: none"> Robustness Capacity Robustness Robustness / Mobile
frame builder	<ul style="list-style-type: none"> - FEF 	<ul style="list-style-type: none"> Flexibility
OFDM generation	<ul style="list-style-type: none"> - Larger FET sizes - New bandwidths - Pilot patterns - PAPR reduction - P1 Symbol 	<ul style="list-style-type: none"> Capacity Flexibility Better Performance / Mobile Energy efficiency Synchronization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของมาตรฐานเทคโนโลยี DVB-T2 [1]

2.1.2 Physical layer pipes

ความโดดเด่นของมาตรฐานเทคโนโลยี DVB-T2 ที่พัฒนาเพิ่มเติมขึ้นมา คือ สามารถเลือกระดับความทนทานของสัญญาณได้ ด้วยการปรับแต่งที่ท่อชั้นทางกายภาพ (Physical Layer Pipes: PLPs) ซึ่งมีความแตกต่างของระดับการป้องกันสัญญาณให้เลือกมากมาย โดยสามารถปรับแต่งได้ใน DVB-T2 รวมไปถึงการปรับแต่งพารามิเตอร์สำหรับการเข้ารหัสช่องสัญญาณ การปรับเปลี่ยนคอนสเทลชัน (Constellation) และการปรับแต่งสำหรับการสลับสอดแทรกข้อมูลเชิงลึก (Interleaving Depths) สัญญาณ DVB-T2 สามารถเลือกได้ว่าต้องการใช้งานการส่งท่อชั้นทางกายภาพเดียวหรือหลายท่อชั้นทางกายภาพไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งสามารถทำการปรับแต่งได้ ตัวอย่างเช่น ทำการส่งสองท่อชั้นทางกายภาพโดยท่อชั้นทางกายภาพแรกทำการส่งข้อมูลปริมาณมาก (เมื่อมีการส่งบิตข้อมูลจำนวนมากและมีรหัสการป้องกันต่ำในคอนสเทลชัน) เพื่อต้องการแพร่สัญญาณภาพแบบความคมชัดสูงๆ เอกสารนี้มากกว่า ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(High Definition: HD) ใช้สำหรับการรับสัญญาณในรูปแบบการติดตั้งสายอากาศบนหลังคาบ้าน ขณะเดียวกันอีกท่อนั้นทางกายภาพที่ทำการส่งที่มีความทนทานต่อการรบกวนสูง ด้วยการส่งข้อมูล ปริมาณน้อย สำหรับการรับแบบเคลื่อนที่ โดยพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์ในการเลือกใช้ ข้อมูลแบบโอเอฟดีเอ็ม (FFT size และ Guard Interval) ซึ่งในทุกท่อนั้นทางกายภาพมีการใช้ร่วมกัน

2.1.3 BICM

การแทรกสลับบล็อกและการมอดูเลตเข้ารหัส คือ ส่วนของการสอดแทรกสลับข้อมูล การเข้ารหัส และขั้นตอนการมอดูเลต มีหน้าที่สำหรับการสร้างสัญญาณแต่ละ BB frame โดยสุดท้ายจะได้เป็นสัญญาณ T2 ท่อนั้นทางกายภาพ ตามรูปที่ 2.1

ตามที่ได้กล่าวถึงการแทรกสลับบล็อกและการมอดูเลตเข้ารหัส นั้น สัญญาณอินพุต BB frame ของท่อนั้นทางกายภาพที่ทำการส่งจะถูกทำการเข้ารหัสก่อนเป็นอันดับแรกด้วยการเข้ารหัส ภายนอก BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghen) และการเข้ารหัสภายในด้วยการตรวจสอบรหัสที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Parity-Check: LDPC) การใช้ LDPC [19] มีผลต่อความทนทาน ต่อสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ เช่น DVB-T เป็นต้น โดย LDPC เป็น พื้นฐานของมาตรฐาน DVB ในรุ่นที่ 2 (DVB-S2 DVB-T2 และ DVB-C2) ขณะที่การเข้ารหัสภายนอก BCH สามารถลดความผิดพลาดของ LDPC ลงได้อีก [20] อัตราส่วนการเข้ารหัสป้องกัน (Code rates: CR) ทั้ง 6 แบบหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าระดับของการป้องกัน ประกอบไปด้วย 1/2 3/5 2/3 3/4 4/5 และ 5/6 (เรียงลำดับจากแบบการป้องกันสูงไปหาต่ำ) และสามารถเลือกได้สองรูปแบบใน ส่วนของขนาด LDPC FEC frames คือ 16K และ 64K ขนาดของ FEC ที่มีขนาดสั้นจะมีความทนทาน น้อย (ประมาณ 0.2 dB [21]) แต่ง่ายในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ โดยเฉพาะสำหรับการส่งข้อมูล ปริมาณน้อย

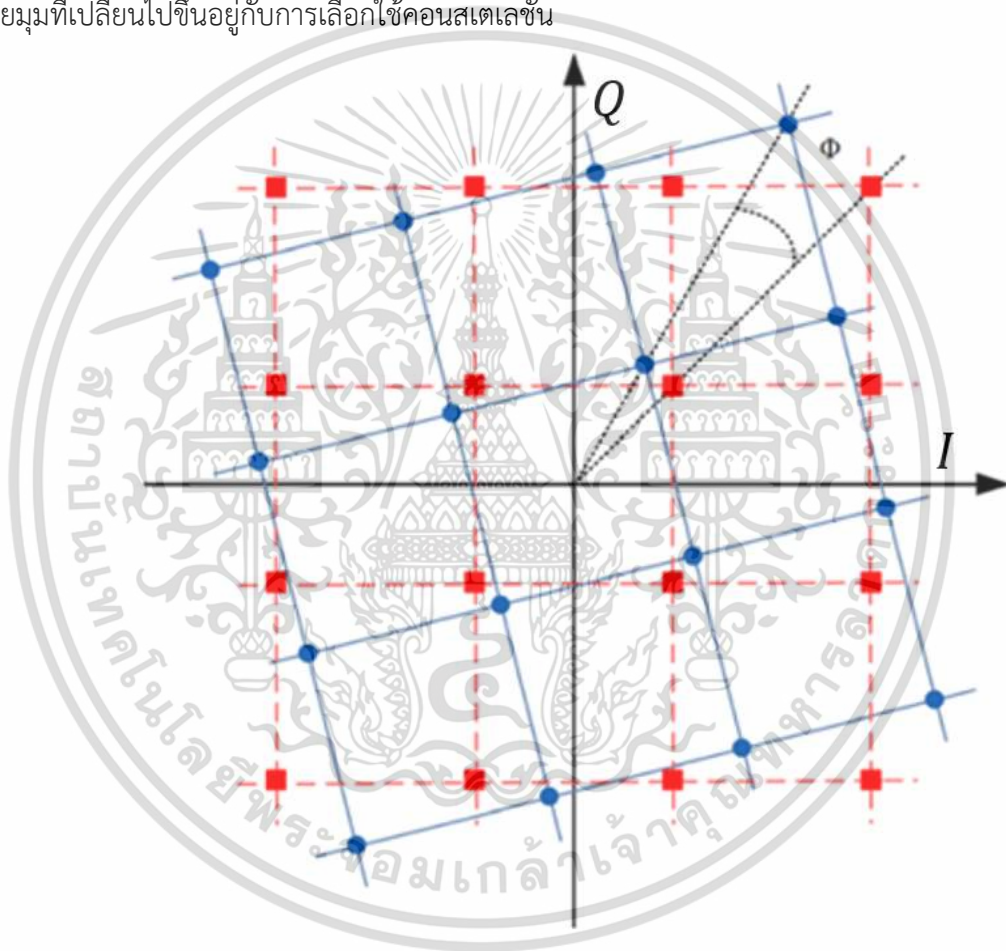
นับตั้งแต่ DVB-T2 ไม่ใช้การเข้ารหัสแบบ Convolution และ Reed Solomon แล้ว DVB-T2 ได้นำเสนอการมอดูเลตแบบ 256-QAM ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูลได้ ยิ่งขึ้น

ตามโครงสร้างขนาดของ BB frame ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของ FEC frame และอัตราส่วนการเข้ารหัส เพราะว่า FEC frame จะถูกทำให้มีขนาดคงที่สำหรับ 16K และ 64K สังเกตได้ว่า DVB-T2 Lite ได้กำหนดรูปแบบอัตราส่วนการเข้ารหัสเพิ่มขึ้นมาใหม่อีกสองแบบ (1/3 และ 2/5) และได้ นำออกไปสองแบบ (4/5 และ 5/6) และขนาดของ FEC frames ที่มีขนาดสั้นลง

สำหรับข้อมูลใน FEC frames จะถูกทำการสลับสอดแทรกตำแหน่งข้อมูล ยกเว้นถ้าใช้การ มอดูเลตแบบ QPSK วิธีการนี้ก็กำลังจะถูกนำมาใช้เช่นกัน โดยหลังจากนั้น ก็ทำการวางตำแหน่ง สัญลักษณ์ข้อมูลต่าง ๆ ลงบนคอนสเทลชันซึ่งเป็นวิธีการกำหนดรูปแบบของการจัดกลุ่มบนคอนสเทลชันสำหรับวิธีการสลับสอดแทรกตำแหน่งข้อมูลแบบใหม่ตามรูปแบบมาตรฐาน DVB-T2 ในทอม

นี้ของแต่ละเซลล์ อ้างอิงถึงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ตำแหน่งบนคอนสเตลชันซึ่งได้ถูกมอดูเลตกับความถี่ ในแต่ละเซลล์ถูกกำหนดขึ้นจากค่า $I + jQ$ โดย I คือ In-phase และ Q คือ Quadrature-phase

คุณลักษณะใหม่ของมาตรฐาน DVB-T2 คือการทำการหมุนของคอนสเตลชัน (Rotated Constellations) ซึ่งเทคนิคเดิมรู้จักกันในชื่อว่า Signal space diversity (SSD) [22] วัตถุประสงค์ของเทคนิคนี้ ทำขึ้นเพื่อให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้ในลักษณะหลากหลายทิศทางสำหรับข้อมูลที่ถูกลมอดูเลต วิธีการนี้ช่วยในการปรับปรุงการรับสัญญาณให้ดียิ่งขึ้นเมื่อมีการลดทอนสัญญาณอย่างรุนแรงในช่องสัญญาณ เมื่อใช้คุณลักษณะของวิธีการนี้ เซลล์ทั้งหมดจะถูกหมุนไป โดยแสดงให้เห็นตามรูปที่ 2.2 จากภาพแสดงให้เห็นถึงการมอดูเลตแบบ 16-QAM ทั้งแบบหมุนและไม่หมุนของคอนสเตลชัน โดยมุมที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับการใช้คอนสเตลชัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะ Rotated และ Non-rotated constellation ในรูปแบบ 16-QAM [1]

จากรูปที่ 2.2 สังเกตผลที่เกิดขึ้นจากการการหมุนนี้ แต่ละส่วนประกอบของสัญญาณ I และ Q จะเพียงพอต่อการให้ข้อมูลสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งของ สัญลักษณข้อมูลที่ถูกส่งมา อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้การหมุนของคอนสเตลชันไม่ได้เป็นวิธีการที่โดดเด่นที่ทำให้การรับสัญญาณทำได้ดีขึ้นมากนัก หากทั้งสัญญาณ I และ Q ประสบกับการสูญเสียไปอย่างมากมาจากการลดทอนในช่องสัญญาณการรับ เพื่อที่เอาชนะข้อจำกัดนี้ หลังจากทำการหมุนแล้วการทำการเลื่อนตำแหน่งของส่วนประกอบ I และ Q ซึ่งจะทำให้ได้ความแตกต่างทางความถี่และความแตกต่างทางเวลา วิธีการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยคณะกรรมาธิการฯ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า Q-delay และต้องทำให้แน่ใจว่าจุดต่างๆ ได้ถูกส่งไปในส่วนที่แตกต่างของเซลล์ T2 โดยวิธีการนี้รู้จักกันในชื่อว่าการหมุนของคอนสเตลเลชัน และ Rotation Constellation Cyclic Q-delay (RQD)

การแทรกสลับเป็นการรับประกันส่วนประกอบของสัญญาณ I และ Q ของแต่ละ สัญญาณ ข้อมูลเพื่อป้องกันการถูกรบกวนด้วยการลดทอนสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้น ถ้าส่วนหนึ่งส่วนใดของส่วนประกอบสัญญาณถูกทำลายไปหรือเกิดผลกระทบเนื่องจากการจางหายของช่องสัญญาณ ส่วนที่เหลืออยู่ของส่วนประกอบสามารถถูกสร้างกลับมาทดแทนได้ แต่ถ้าหากไม่ได้ทำการหมุนของคอนสเตลเลชัน ข้อมูลอาจสูญหายได้ เนื่องมาจากทั้งสองของส่วนประกอบ I และ Q ได้ถูกทำลายไปทั้งคู่จากการรบกวนในช่องสัญญาณ

สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการหมุนของคอนสเตลเลชัน นี้ ได้เพิ่มขีดความสามารถในการรับสัญญาณแบบหลากหลายทิศทาง สามารถช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของเครื่องรับ DVB-T2 โดยเฉพาะในเรื่องไขของการลดทอนและการจางหายในช่องสัญญาณ แบบจำลอง [23 - 24] แสดงให้เห็นเทคนิค RQD สามารถเพิ่มอัตราขยายได้ประมาณ 0.2 dB หรือมากกว่านั้น ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้โมเดมต่าง ๆ ของคอนสเตลเลชันการเลือกอัตราการเข้ารหัส (Code Rate: CR) และรูปแบบของช่องสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับ QAM คอนสเตลเลชันแบบต่าง ๆ

ในส่วนของการใช้เทคนิคนี้ ไม่มีการเพิ่มความจุของข้อมูลขึ้นมา แต่จะมีความซับซ้อนในการถอดรหัสของเครื่องรับเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการเลือกคอนสเตลเลชันแบบสูง ๆ อัลกอริทึมสำหรับการถอดรหัสได้ถูกพัฒนาเพื่อลดความซับซ้อนตามข้อมูลอ้างอิง [22 - 25] สำหรับ T2-Lite ได้หลีกเลี่ยงวิธีการที่ซับซ้อนนี้ การหมุนคอนสเตลเลชันนี้ไม่ได้มีใช้ในคอนสเตลเลชันแบบ 256-QAM

จากการแมปบิตคอนสเตลเลชันเข้าด้วยกัน (Constellation mapping) และการสลับสอดแทรกข้อมูลใหม่เรียบร้อยแล้ว การรวมสัญญาณเข้าด้วยกันอยู่ในส่วนของ FEC Block ชุดของการสลับสอดแทรกข้อมูลมีความแตกต่างกันในแต่ละ FEC block อันเนื่องมาจากการสลับ frame ทางด้านเวลา

ต่อมาเป็นส่วนสุดท้ายของการสลับสอดแทรกข้อมูล คือการสลับ frame ทางด้านเวลา การสลับสอดแทรกข้อมูลแบบนี้เป็นส่วนที่ยาวที่สุด เป็นการรวมกันของเซลล์ต่าง ๆ จาก FEC Blocks ต่าง ๆ ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นการเพิ่มความทนทานของสัญญาณจากผลของ Doppler ในช่องสัญญาณ แต่ก็ต้องแลกมากับการเพิ่มขึ้นของการชนกันทางด้านเวลา การเลือกใช้พารามิเตอร์การสลับสอดแทรกข้อมูลทางด้านเวลา ในทางปฏิบัตินั้น ต้องพิจารณาถึงเครื่องส่งและเครื่องรับว่ามีหน่วยความจำสำหรับการใช้งานนี้รองรับหรือไม่ การดำเนินการสลับสอดแทรกข้อมูลทางด้านเวลา จะต้องพิจารณาความต้องการของพื้นที่ใช้งานหน่วยความจำทางเครื่องรับให้น้อยที่สุด

การสลับสอดแทรกข้อมูลทางเวลาจะดำเนินการใน PLP โดยแต่ละ PLP สามารถทำการสลับสอดแทรกข้อมูลกันได้อย่างแตกต่างหลากหลายในทางเวลา ตัวอย่างเช่น ใน PLP ที่ใช้สำหรับข้อมูลแบบ HD ซึ่งใช้สำหรับการรับด้วยสายอากาศแบบติดตั้งบนหลังคาบ้าน ไม่ได้มีความจำเป็นสำหรับการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลับตำแหน่งข้อมูลทางด้านเวลา แต่สำหรับอีก PLP ที่ใช้ส่งข้อมูลสำหรับการรับแบบเคลื่อนที่ เป็นสิ่งที่ดีกว่าที่จะทำการสลับสอดแทรกข้อมูลทางด้านเวลา เพราะจะทำให้สามารถเพิ่มโอกาสมากขึ้นในการรับสัญญาณ แต่ก็ต้องแลกกับการชนกันของข้อมูลทางด้านเวลาที่จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

มาตรฐานในการเลือกใช้การสลับสอดแทรกข้อมูลทางด้านเวลามีอยู่ 3 สิ่งที่ต้องพิจารณา โดยขึ้นอยู่กับว่าเลือกใช้ FEC Blocks แบบใด โดยประกอบไปด้วย TI-Blocks interleaving frames และ T2-frames ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน TI Blocks คือผลของการสลับตำแหน่ง ของจำนวน FEC Blocks ดังนั้นการสลับตำแหน่งข้อมูลทางด้านเวลาขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของ TI-Blocks แต่สามารถเพิ่มขึ้นได้ เพราะว่า TI Blocks สามารถแยกและจัดสรรใหม่หรือใช้งาน T2 frames แบบไม่ต่อเนื่องได้

2.1.4 การสร้างเฟรม (frame Builder)

จากบล็อกไดอะแกรมนี้ นำข้อมูลของเซลล์ใน PLP ต่าง ๆ ใส่เข้าไปในความถี่ของ OFDM ด้วย สัญลักษณ์ข้อมูลต่าง ๆ จาก T2 เฟรมและเสร็จสิ้นขั้นตอน โดย T2 เฟรมนี้เรียกกันว่า T2 ซูเปอร์เฟรม นอกจากนี้ ยังมีข้อมูลของสัญญาณที่ได้รับการดำเนินการในขั้นตอนนี้

โครงสร้างของ T2 เฟรมเริ่มต้นจาก สัญลักษณ์ข้อมูลแรก คือ P1 สัญลักษณ์ข้อมูลซึ่งใช้สำหรับการติดต่อประสานงานของสัญญาณ ตามมาด้วย P2 สัญลักษณ์ข้อมูลซึ่งก็ดำเนินการเกี่ยวกับสัญญาณเช่นกัน และหลังจากนั้นก็เป็นจำนวนของ สัญลักษณ์ข้อมูลข้อมูล ตามรูปที่ 2.3 จำนวนของสัญลักษณ์ข้อมูลข้อมูลสามารถกำหนดได้ แต่ความยาวรวมของ T2 เฟรมต้องไม่เกินกว่า 250 มิลลิวินาที

ความแตกต่างทั้งสามแบบของ PLP ซึ่งจะได้รับการจัดสรร โดย Common PLPs ซึ่งจะขนย้ายข้อมูลข่าวสารและแบ่งปันข้อมูลร่วมกับ PLP อื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน (โดยกลุ่มต่าง ๆ ได้ถูกกำหนดไว้แล้ว) และทั้งหมดจะได้รับการจัดสรรหลังจากได้รับสัญญาณแล้ว

รูปแบบของ PLP1 จะถูกดำเนินการต่อมา ถ้าเครื่องรับถอดรหัสจากหนึ่งในจำนวน PLP ได้ เครื่องรับจะหยุดรับข้อมูลอื่น ครอบคลุมที่ยังพบชิ้นส่วนที่สอดคล้องกันของ Common PLP และยังสามารถถอดรหัส PLP ที่รับได้อยู่จนกระทั่ง T2 เฟรมอันต่อไปใน PLP ต่าง ๆ ปรากฏ นี่เป็นหนทางที่ทำให้การรับแบบเคลื่อนที่สามารถประหยัดแบตเตอรี่ได้

ชิ้นส่วนของรูปแบบ PLP2 เป็นส่วนที่ถูกดำเนินการต่อไป ผลของการตั้งค่าจำนวนของ Sub-slices นั้นถูกส่งไปในลำดับคองที่ร่วมกันกับส่วนที่เหลือของ Sub-slices ของ PLP2 ซึ่งเป็นหนทางที่จะทำให้เซลล์สอดคล้องกันสำหรับแต่ละ PLP โดยถูกกระจายไปใน สัญลักษณ์ข้อมูลข้อมูลของ T2 เฟรมแทนที่จะถูกส่งไปบางส่วนอย่างต่อเนื่อง เช่นที่เกิดขึ้นใน PLP1 ความหลายหลายทางเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้เปลืองแบตเตอรี่ในการรับ หากเครื่องรับต้องการรับข้อมูลบ่อย ๆ

ข้อมูลที่ได้จะทำให้รู้ว่า PLP จะดำเนินการในแต่ละ T2 เฟรมกับส่วนของสัญญาณ L1 เพื่อที่จะทำให้สามารถรับ PLP ต่าง ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องถอดรหัสสัญญาณนี้เป็นส่วนแรก

ในส่วน T2 ซูเปอร์เฟรมถูกสร้างขึ้นด้วยจำนวนของ T2 เฟรมและเพิ่มส่วนของตัวเลือกคือ Future Extension frames (FEFs) เข้าไปด้วย ในส่วนของ T2 ซูเปอร์เฟรมแสดงให้เห็นส่วนของ FEF สามารถใส่สัญญาณอื่น ๆ เพิ่มเข้าไปได้ โดยเครื่องรับ DVB-T2 จะมองข้ามในส่วนของนี้ไป

สำหรับเวอร์ชันใหม่ของ DVB-T2 ได้เพิ่มในส่วนของการรับแบบเคลื่อนที่ (Mobile Reception) ซึ่งเรียกว่า T2-Lite โดยสามารถส่ง DVB-T2 พร้อมกับข้อมูลในส่วนของ FEF ไปพร้อมกันได้ ยิ่งไปกว่านั้น การที่มีส่วนของ FEFs นั้นทำให้มีความยืดหยุ่นเป็นอย่างมากสำหรับการพัฒนา ระบบต่อไป

2.1.5 การสร้างสัญญาณ OFDM

ในส่วนสุดท้ายของบล็อกไดอะแกรมการส่ง DVB-T2 นั้น คือส่วนของ OFDM โดย DVB-T2 ได้นำเสนอความสามารถในการปรับแต่งในส่วนของ OFDM ดังนี้

- ขนาดของ FFT sizes มีทั้งหมด 6 แบบ ได้แก่ 1K 2K 4K 8K 16K และ 32K (1K และ 32K ไม่ได้อยู่ในส่วนของ T2-Lite)

- มีแบนด์วิดท์ทั้งหมด 6 แบบ คือ 1.7 เมกกะเฮิรตซ์ 5 เมกกะเฮิรตซ์ 6 เมกกะเฮิรตซ์ 7 เมกกะเฮิรตซ์ 8 เมกกะเฮิรตซ์ และ 10 เมกกะเฮิรตซ์

- มี Guard interval ให้เลือก 7 แบบ $1/128$ $1/32$ $1/16$ $19/256$ $1/8$ $19/128$ และ $1/4$

สำหรับ FFT ขนาด 8K 16K และ 32K สามารถเพิ่มความถี่ต่อ สัญลักษณ์ข้อมูลได้ เพื่อให้สามารถเพิ่มจำนวนของข้อมูลในการส่งได้ การเลือกพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับความต้องการในการให้บริการนั้นๆ อย่างเช่นในกรณีของการรับแบบเคลื่อนที่ การที่ใช้จำนวน FFT size ที่มีขนาดใหญ่ ไม่ได้มีความเหมาะสม ดังนั้นการลดจำนวนช่องว่างของความถี่ให้อยู่ในข้อจำกัดของ Doppler Frequency นั้น สามารถทนทานต่อการรบกวนกันระหว่างความถี่ (Inter Carrier Interference: ICI) ตัวอย่างเช่น สำหรับการรับสัญญาณแบบอยู่กับที่ในรูปแบบโครงข่ายความถี่เดียวที่มีพื้นที่การรับสัญญาณขนาดใหญ่สำหรับย่านความถี่ UHF ภายใต้มาตรฐาน ITU-R region 1 นั้น พารามิเตอร์ที่ต้องใช้ คือ 32K extended, แบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิรตซ์ และ Guard Interval $19/128$ ($1/4$ ไม่ได้เป็นปัญหาสำหรับการใช้ร่วมกับ 32K)

สำหรับ สัญลักษณ์ข้อมูลของข้อมูล (Data symbol) ตามปกติบางสัญลักษณ์ข้อมูลจะถูกใช้งานเป็น Pilot cells (Continual, Scattered) data cells หรือ dummy cells ในส่วนของ scattered Pilots ใช้สำหรับให้เครื่องรับใช้ในการประมาณค่าช่องสัญญาณ การกระจายตัวไปในสัญลักษณ์ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้มีทั้งหมด 8 รูปแบบ การใช้งานในรูปแบบของ Pilot ที่ไม่หนาแน่นจะทำให้ใช้ Overhead ที่มีขนาดเล็ก และหากใช้ในรูปแบบที่มี Pilot หนาแน่น ผลที่ได้ก็จะทำให้มีการประมาณค่าช่องสัญญาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงความต้องการในการรับสัญญาณ เพื่อที่จะได้สามารถเลือกใช้การตั้งค่า Pilot ได้อย่างเหมาะสม

ในจำนวนนี้ มี Pilot pattern แบบพิเศษอยู่หนึ่งแบบ (PP8) มีความหนาแน่นของ Pilot น้อย

ที่สุด ใช้สำหรับการประมาณค่าช่องสัญญาณที่เรียกว่า CD3 โดยข้อมูลในเซลล์หนึ่ง สัญลักษณ์ข้อมูล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกใช้เพื่อรับการตอบสนองความถี่ของ สัญญาณข้อมูลทั้งหมด [26 - 27] ซึ่ง Pilot pattern นี้ไม่ได้ใช้ร่วมกับการสลับสอดแทรกตำแหน่งข้อมูล หรือแม้แต่การส่งในรูปแบบ multiple PLPs [28]

หนึ่งในข้อเสียที่สำคัญของ OFDM คือ มีความผันผวนในช่องสัญญาณมาก ตามมาตรฐานของ DVB-T2 ได้เสนอวิธีการแก้ไขไว้ 2 วิธี คือ การเฉลี่ยค่าสูงสุดอัตราส่วนกำลัง (peak-to-average power ratio: PAPR) หรือ Active Constellation Extension (ACE) [29] และ Tone Reservation (TR) [30] การใช้งานวิธีการนี้ จะส่งผลให้ลดผลกระทบของ back-off reduction ที่ภาคขยายสัญญาณความถี่ของเครื่องส่ง และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องส่งได้

สำหรับ TR ในบางเซลล์ที่ไม่ได้มีข้อมูล แต่มีสัญญาณที่แรงจนถึงจุด peak power ของสัญญาณ OFDM จะถูกลดลงความแรงสัญญาณลง ผลจากการใช้ PAPR จะทำให้ความจุของมุลในการส่งสัญญาณลดลงประมาณ 1 %

ส่วน ACE ทำงานโดยการปรับแต่งค่าความแรงในแต่ละเซลล์โดยมองจากจุดที่อยู่ไกลสุดของ constellation จากการทำเช่นนี้จะทำให้ค่า peak power ลดลง ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในการที่ใช้งาน rotated constellation แต่มีความโดดเด่นกว่าการใช้ TR เพราะจะไม่สูญเสียข้อมูลไปเมื่อใช้งานในโหมดนี้

อย่างไรก็ตาม วิธีการ ACE นั้นมีข้อดีในการใช้งานที่มีการใช้คอนสเทลเลชันต่ำ ส่วนการใช้งาน TR จะดีในแง่ของการส่งคอนสเทลเลชันจำนวนมาก และทั้งสองวิธีการสามารถใช้งานได้พร้อม ๆ กัน

การปรับแต่ง OFDM นั้นมีผลกระทบโดยตรงต่อ PLP ดังนั้นความแตกต่างของประสิทธิภาพในการให้บริการการแพร่สัญญาณสัญญาณจะต้องแลกมาด้วยการเลือกการปรับแต่ง OFDM ให้มีเหมาะสม การใช้ DVB-T2 และ DVB-T2 Lite ในคลื่นพาห์เดียวกันโดยใช้ FEF สามารถทำได้โดยการเลือกปรับแต่งพารามิเตอร์ที่ต่างกัน

2.2 การส่งสัญญาณ

ข้อมูลของสัญญาณถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น (Layer) คือ ชั้น L1 และ ชั้น L2 โดย L1 เป็นพารามิเตอร์ของสัญญาณและข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการต่าง ๆ ขณะที่ชั้น L2 เป็นส่วนของข้อมูล เช่น สัญญาณ MPEG-2 TS และสัญญาณอื่น ๆ ที่ไม่ได้ระบุในมาตรฐานของ DVB-T2

ข้อมูลของสัญญาณ L1 ถูกแบ่งเป็น L1-pre และ L1-post สำหรับ L1-pre เป็นข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของ frame และในส่วนของ L1-post เป็นข้อมูลหลักเกี่ยวกับการตั้งค่า PLP ซึ่งถูกส่งไป โดยมี สัญญาณข้อมูลที่สำคัญสำหรับการส่ง L1 คือ P1 และ P2 ในส่วนของ P1 จะส่งค่าเริ่มต้นของแต่ละ T2 เฟรมและ FEF โดยใน T2 เฟรมหลังจาก P1 จะมีข้อมูลของ P2 ตามมา ตามรูปที่ 2.3 ในส่วนของ P1 จะทำหน้าที่คล้ายกับคำนำ โดยจะบอกค่าส่วนที่เหลือทั้งหมดของการตั้งค่า โดยใช้การส่งแบบ 1K OFDM แบบไม่มี cyclic prefix แต่ถูกแทนที่ด้วยการส่ง สัญญาณข้อมูลที่ถูก

ทำซ้ำ จาก สัญลักษณ์ข้อมูลที่ถูกทำซ้ำ ถูกแยกออกเป็นสองส่วนด้วยการเลื่อนความถี่ของแต่ละส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 T2 เฟรมสำหรับ FFT size 4K (4 P2 Symbols) และ FEF [1]



รูปที่ 2.4 P1 สัญลักษณ์ข้อมูลและโครงสร้างทางเวลา [1]

โครงสร้างของ P1 ถูกทำให้มีความแข็งแรงสำหรับการตรวจจับ และอาจใช้สำหรับการตรวจสอบซิงโครไนซ์เซชัน ทางด้านเวลาของสัญญาณ T2 ที่รับได้ [31 - 32] ซึ่ง P1 สามารถตรวจพบได้แม้กระทั่งอัตราส่วนคลื่นพาห่ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise ratio: CNR) ที่ประมาณ -6 dB [33] ยิ่งไปกว่านั้น โครงสร้างทางด้านโดเมนความถี่ ของ P1 สามารถรองรับการ synchronization ทางด้านความถี่ที่รวดเร็ว โดยที่การขดเซยความถี่ที่มากกว่า 500 เฮิร์ตซ์สามารถตรวจพบในช่วงแบนด์วิดท์ใช้งาน 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่ง P1 ได้ถูกมอดูเลตไปสองแบบ (S1 3 บิต และ S2 4 บิต) โดยสามารถให้ข้อมูล SISO/MISO T2-frame/FEF FFT size Guard Interval และรูปแบบของ FEF โดยข้อมูลเหล่านี้สามารถถอดรหัสได้ระดับความแรงสัญญาณที่ CNR ตีกลับ และมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับทำให้สามารถช่วยให้รับสัญญาณได้อย่างรวดเร็วในส่วนของ สัญลักษณ์ข้อมูลที่เหลือ

P2 จำนวนหนึ่ง สัญลักษณ์ข้อมูลหรือหลาย สัญลักษณ์ข้อมูลเป็นส่วนที่อยู่ต่อจาก P1 โดยจำนวนของ P2 จะถูกกำหนดตามขนาดของ FFT size โดยกำหนดตามรูปแบบจำนวนสัญลักษณ์ข้อมูลต่อขนาดของ FFT (มีหน่วยเป็น K) โดยจะมีจำนวน P2 มากสุดเท่ากับ 16 (ยกเว้นสำหรับ 32K ในที่นี้คือ 32) ตัวอย่างเช่นที่ 1K จะได้เท่ากับ 16 P2 นี้คือจำนวนของ P2 สัญลักษณ์ข้อมูลทั้งหมด ซึ่งเหมือน ๆ กัน (ยกเว้น 32K ซึ่งความจุเป็นสองเท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของ P2 จะส่งข้อมูลของ L1 และข้อมูลอื่น ๆ ถ้าหากมียังความจุเหลือ การมอดูเลชัน และการเข้ารหัสของ L1 ใน P2 สัญลักษณ์ข้อมูลแตกต่างจากส่วนที่เหลืออื่น ๆ ของระบบ โดยจะใช้ BPSK 1/4 สำหรับ L1-Pre และ BPSK QPSK 16-QAM และ 64-QAM CR 1/2 จะสามารถเลือกใช้ ได้สำหรับ L1-Post โดยสิ่งนี้มีความสำคัญสำหรับการตั้งค่าความทนทานของ L1-post ซึ่งต้องการให้ มีการป้องกันที่สูงกว่าส่วนของ PLP เพราะว่า หาก L1-post ไม่สามารถถอดรหัสได้ จะทำให้ PLP ไม่ สามารถถอดรหัสได้เช่นกัน แต่ด้วยความจุของ P2 สัญลักษณ์ข้อมูลนั้นมีขนาดจำกัดตามจำนวนของ เซลล์ที่สามารถใช้งานได้ ถ้าความแข็งแรงของคอนสเทลเลชันที่เลือกใช้โดยที่ส่วนของสัญญาณ L1- post มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ที่สามารถใช้งานได้ จะทำให้ไม่สามารถตั้งค่าได้ ในกรณีนี้ค่าคอนสเทล เลชันต้องเลือกค่าใหม่หรือลดจำนวนของ PLP เพื่อลดจำนวนข้อมูลใน L1-post

การใช้งาน P2 สัญลักษณ์ข้อมูลจำกัดความเป็นไปได้ของการใช้งาน time interleaving ของ สัญญาณ L1 และเป็นเหมือนจุดอ่อนสำหรับการรับสัญญาณ DVB-T2 แบบเคลื่อนที่

หากต้องการเพิ่มความทนทานในการรับสัญญาณให้กับ L1-post สามารถทำได้โดยการสร้าง เฟรมขึ้นซ้ำกัน 2 ครั้ง โดยเฟรม L1-post ที่ถูกสร้างขึ้นและสอดคล้องกันสามารถส่งไปพร้อมกันได้

ในส่วนของเวอร์ชันแรกของมาตรฐาน DVB-T2 ในส่วนของ P2 สัญลักษณ์ข้อมูลจะมีค่าระดับ สัญญาณสูงและ PAPR สูงหากใช้จำนวนของ PLP เป็นจำนวนมากและในรุ่นถัดมาได้มีการปรับปรุง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้

ตารางที่ 2.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ [1]

พารามิเตอร์	ค่า
Bandwidth (MHz)	1.7,5,6,7,8,10
FFT Size	1K ¹ , 2K, 4K, 8K, 16K, 32K ¹
Bandwidth extension	Yes/No (Allowed for 8K, 16K, 32K)
GIF	1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4
Pilot patterns	PP1, PP2, PP3, PP4, PP5, PP6, PP7, PP8 ¹ ,
PAPR reduction	None, TR, ACE (Not allowed with rot. const.)
Constellations	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Rotation	Yes ² /No
L1 Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
FEC size	16K, 64K ¹
Code rate	1/3 ³ , 2/5 ³ , 1/2, 3/5, 2/3 ² , 3/4 ² , 4/5 ¹ , 5/6 ¹
Input mode	A (Single PLP), B (Multiple PLP)
Input format	TS, GSE, GCS, GFPS

1. ไม่ได้ใช้สำหรับ T2-Lite
2. ไม่ได้ใช้สำหรับ 256-QAM in T2-Lite
3. มีใช้เฉพาะ T2-Lite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย

คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือ กสทช ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับดูแลการแพร่สัญญาณสัญญาณวิทยุโทรทัศน์ดิจิทัลในประเทศไทยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกอากาศ โดย กสทช ได้ร่วมดำเนินงานกับหน่วยงาน ITU (International Telecommunication Union) เพื่อทำการทดลองและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย [34] โดยได้ดำเนินการดังนี้

2.3.1 กำลังส่งที่ใช้ในการทดสอบ

เนื่องจากความต้องการที่จะแพร่สัญญาณสัญญาณครอบคลุมเทียบพื้นที่ให้ได้เทียบเท่ากับโทรทัศน์ระบบแอนะล็อกเดิมจึงเลือกใช้ค่า GI เท่ากับ 19/128 ซึ่งจะได้ช่วงเวลาป้องกันเท่ากับ 266 ไมโครวินาทีโดยไม่มีการรบกวนภายในกันเองสำหรับใช้ในการออกอากาศในรูปแบบโครงข่ายความถี่เดียว โดยสถานีเครื่องส่งสามารถอยู่ห่างกันสูงสุดได้ที่ประมาณไม่เกิน 80 กิโลเมตรทำการทดสอบโดยใช้เครื่องส่งออกอากาศที่ 5.2 กิโลวัตต์ ด้วยการส่งที่กำลังเท่านี้ ที่ระยะทางประมาณ 92 กิโลเมตร (มากกว่า 80 กิโลเมตร) สามารถรับสัญญาณได้โดยระดับของ link margin อยู่ที่ 4 dB ถึง 5 dB ที่พื้นที่ครอบคลุมการออกอากาศเท่าเดิม สามารถลดกำลังส่งลงได้อีกโดยใช้วิธีการ ESR5 [35] โดยค่าที่ดีที่สุดสำหรับกำลังส่งออกอากาศคือ 3.5 กิโลวัตต์

2.3.2 พารามิเตอร์ DVB-T2

วัตถุประสงค์ของการทดลองการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับประเทศไทย คือ เพื่อต้องการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการออกอากาศ โดยที่สามารถลดอัตราการส่งข้อมูล (Data rate) ของสัญญาณวิดีโอลงให้ได้มากที่สุด รวมถึงยังสามารถส่งผังรายการ (Electronic Program Guide : EPG), ซอฟต์แวร์สำหรับการอัปเดตรายการ (System Software Update: SSU) และข้อมูลที่จำเป็นไปพร้อมกันได้ โดยที่ยังสามารถรักษาคุณภาพของสัญญาณวิดีโอสำหรับการรับสัญญาณแบบอยู่กับที่จากสายอากาศที่ติดตั้งบนหลังคาบ้าน การรับสัญญาณแบบใช้อากาศภายในและการรับแบบเคลื่อนที่ พารามิเตอร์เริ่มต้นได้มาจากคำแนะนำจากคณะทำงานจาก ITU โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งสามารถส่งอัตราการส่งข้อมูลได้ 27.4 เมกกะบิตต่อวินาทีสำหรับการส่งด้วยหนึ่งเครื่องส่ง (Multiplex: MUX)

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่ ITU แนะนำให้ใช้สำหรับการทดลองออกอากาศในระยะแรก [34]

พารามิเตอร์	ค่า
FFT size	32K extended
Guard interval	19/256 (266 μ s)
Modulation scheme	64-QAM
Code rate	2/3
Pilot pattern	PP4
Rotated constellation	Off
Max bit rate	27.4 Mbps

ค่าพารามิเตอร์นี้ ได้จากการทดลองที่ประเทศเยอรมัน โดยสามารถส่งได้ทั้งหมด 8 ช่องรายการ ซึ่งจะได้ 2 ช่องรายการแบบความคมชัดสูง (High definition: HD) และ 6 ช่องรายการแบบความคมชัดปกติ (Standard definition: SD) โดยความต้องการสำหรับการส่งผ่านข้อมูลสำหรับช่องความคมชัดสูง อยู่ที่ประมาณ 5.92 เมกกะบิตต่อวินาที ถึง 7.2 เมกกะบิตต่อวินาที ในส่วนของความคมชัดปกติอยู่ที่ประมาณ 1.28 เมกกะบิตต่อวินาที ถึง 1.6 เมกกะบิตต่อวินาที โดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์เข้ารหัสสัญญาณ สำหรับการทดลองใช้เครื่องการมัลติเพล็กซ์แบบเชิงสถิติ เพื่อให้แบนด์วิดท์ในการส่งผ่านสัญญาณมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถลดอัตราการส่งผ่านข้อมูลของวิดีโอสดลงได้เหลือ 22.5 เมกกะบิตต่อวินาที และหากรวมทั้งภาพและเสียงจะอยู่ที่ประมาณ 23.6 เมกกะบิตต่อวินาที โดยสำหรับช่องรายการความคมชัดสูงอัตราการส่งผ่านข้อมูลจะอยู่ที่ 5.2 เมกกะบิตต่อวินาที และช่องรายการความคมชัดมาตรฐานจะอยู่ที่ 2.3 เมกกะบิตต่อวินาที การตรวจสอบคุณภาพ (Quality of experience: QoE) และประเมินคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (Estimate mean opinion score: EMOS) อยู่ในเกณฑ์ดี แต่สำหรับการรับแบบสายอากาศภายในบ้านและแบบเคลื่อนที่ซึ่งไม่ดีเพียงพอ เพื่อแก้ปัญหาพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องทำการปรับแต่งแก้ไข โดยการแก้ไขดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานที่ต้องสามารถส่งช่องรายการแบบความคมชัดสูงได้ 2 ช่องและช่องความคมชัดปกติได้ 6 ช่อง โดยท้ายสุดทางคณะทำงานได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 2.4 [36] และจำนวนช่องรายการและอัตราการส่งผ่านข้อมูลแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยตามที่ กสทช กำหนด [34]

พารามิเตอร์	ค่า
FFT size	16K emended
Guard interval	19/256 (266 μ s)
Modulation scheme	64-QAM
Code rate	3/5
Pilot pattern	PP2
Rotated constellation	On
Physical layer pipe (PLP)	Single
L1 post constellation	16-QAM
Number of T2 frame per super frame	2
Data symbols per T2 frame	83 symbols
A numbers of FEC block per interleaving frame	98
Number of interleaving block per interleaving frame	2
Max video bit rate per mux	21.975 Mbps
Time interleaving depth	86.5 ms
CNR for fixed rooftop	15.17 dB
CNR portable indoor	19.61 dB
Max range without interference in SFN	79.74 km

ตารางที่ 2.5 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำหรับช่องรายการโทรทัศน์ [34]

Data	Video data rate (Mbps)	
	min	max
SD	0.75	2.5
HD	2	7
Total 6SD+2HD	8.5	25.5
Video shaping	19	19.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ระบบโครงข่ายมาตรฐาน DVB-T2

2.4.1 โครงข่ายหลายความถี่

โครงข่ายโทรทัศน์ระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T แบบเดิมนั้น ประกอบไปด้วยเครื่องส่งจำนวนมากมายหลายเครื่องสำหรับการส่งช่องรายการที่หลากหลายโดยใช้ความถี่ในการส่งออกอากาศแต่ละเครื่องที่แตกต่างกัน รูปแบบการส่งแบบนี้เรียกว่า โครงข่ายแบบหลายความถี่ (Multiple Frequency Network: MFN) ซึ่งสามารถครอบคลุมพื้นที่การออกอากาศได้ตามความต้องการจำนวนช่องรายการที่ต้องการส่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสัญญาณคลื่นที่แพร่กระจายออกอากาศ ตัวอย่างเช่น การตั้งค่าการมอดูเลต การตั้งค่าอัตราส่วนการป้องกัน (Protection ratios) และวัตถุประสงค์อื่นที่ต้องการสำหรับการวางแผนในการจัดทำโครงข่าย (ความต้องการพื้นที่การครอบคลุมสัญญาณสูงสุดหรือครอบคลุมความหนาแน่นของประชากรสูงสุด ต้องถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบ)

2.4.1.1 การจัดสรรความถี่สำหรับโครงข่ายหลายความถี่

ความหนาแน่นของสัญญาณสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณเป็นพื้นฐานสำหรับการเลือกใช้อัตราส่วนการป้องกัน ซึ่งสำหรับมาตรฐาน DVB-T2 มีความต้องการที่จะใช้เครื่องส่งจำนวนน้อยกว่าสำหรับการแพร่สัญญาณสัญญาณแบบแอนะล็อกสำหรับการออกอากาศ โดยสามารถเลือกอัตราส่วนป้องกันที่เหมาะสมสำหรับการส่งสัญญาณแบบดิจิทัลได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสถานการณ์ที่สัญญาณจะขาดหายแบบทันทีเมื่อถึงจุดวิกฤตในการรับสัญญาณหรือที่เรียกว่า “brick-wall behavior” ซึ่งสามารถเกิดขึ้นกับการส่งสัญญาณแบบดิจิทัลและมีผลโดยตรงกับการวางแผนออกแบบโครงข่ายได้ โดยการส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกจะไม่มีผลจากปรากฏการณ์นี้ ซึ่งการออกแบบโครงข่ายต้องคำนึงถึงค่านี้ตั้งแต่ 10 dB ถึง 20 dB (ค่านี้ได้มาจากการวัดในภาคสนามจริง) สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสัญญาณอันเนื่องมาจากผลกระทบของพื้นที่บริเวณต่างๆ ดังนั้นจำนวนของความถี่ที่ใช้สำหรับการออกอากาศด้วยมาตรฐาน DVB-T แบบเดิมก็มีแนวโน้มที่ใช้เหมือนกับระบบแอนะล็อกแบบเดิมเช่นกัน ความต้องการทรัพยากรทางความถี่จึงมีความต้องการสูงกว่าสำหรับการส่งการกระจายสัญญาณแบบโครงข่ายหลายความถี่ เมื่อเปรียบเทียบกับการส่งสัญญาณด้วยโครงข่ายความถี่เดียว

การออกแบบโดยเทียบกับการใช้การส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกนั้น ในบางครั้งเครื่องส่งมาตรฐาน DVB-T อาจจะถูกนำมาวางลงในแผนโครงข่ายโดยไม่ได้มีความจำเป็นสำหรับพื้นที่การให้บริการ ดังนั้นในการออกแบบโครงข่ายที่เหมาะสมควรพิจารณาถึงพื้นที่ในบริเวณต่าง ๆ ที่สัญญาณเริ่มจางหาย การออกแบบที่ทำให้ได้ขอบเขตของพื้นที่การให้บริการที่มากขึ้น ต้องอาศัยการคำนวณการรบกวนกันจากผลกระทบของเครื่องส่งที่อยู่ทั้งภายนอกและภายในโครงข่ายตามระเบียบแบบแผน

2.4.1.2 การทำงานแบบไม่ต้องสัมพันธ์กัน

เครื่องส่งในโครงข่ายหลายความถี่ ไม่มีความจำเป็นที่ต้องทำงานสัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงมีความสะดวกในการออกแบบมากกว่าโครงข่ายความถี่เดียวซึ่งเครื่องส่งที่อยู่ภายในโครงข่ายเดียวกันต้องทำงานสัมพันธ์กัน อย่างไรก็ตามข้อดีของโครงข่ายความถี่เดียว คือจำนวนเครื่องส่งในโครงข่ายที่ออกแบบจะมีความต้องการจำนวนเครื่องส่งที่น้อยกว่า

2.4.1.3 กำลังส่งที่เกินความจำเป็น

เนื่องจากผลกระทบของการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดิน กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับในบางพื้นที่ที่ถูกส่งมาจากเครื่องส่งจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากอันเนื่องมาจากพื้นที่การรับสัญญาณ การส่งสัญญาณด้วยระบบดิจิทัลนั้น การลดทอนของสัญญาณที่รับได้ไม่ได้มีผลมากที่สุดโดยตรงสำหรับการขาดหายของสัญญาณ การเพิ่มกำลังส่งเป็นเพียงความต้องการที่จะชดเชยสำหรับการจางหายของสัญญาณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ชายขอบของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ ค่าที่เป็นไปได้ของการเพิ่มกำลังส่งมีลักษณะเดียวกับการเพิ่มในส่วนของการอัตราส่วนการป้องกัน คือประมาณ 10 dB ถึง 20 dB

2.4.2 โครงข่ายความถี่เดียว

2.4.2.1 หลักการทำงาน

สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว เครื่องส่งทุกเครื่องภายในโครงข่ายต้องทำงานสัมพันธ์กันด้วยการมอดูเลชันรูปแบบเดียวกัน ลักษณะสัญญาณที่ใช้ในการส่งต้องเหมือนกัน และความถี่ที่ใช้ในการส่งต้องเป็นความถี่เดียวกัน เนื่องจากการรับคลื่นจากหลายทิศทางจากการส่งด้วยความถี่ที่มากมายของการส่งแบบ OFDM ที่ได้จากแต่ละเครื่องส่งที่มาถึงยังสายอากาศของเครื่องรับจะถูกรวมกันเป็นความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับต้องการ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของผลกระทบจากส่งด้วยโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งถูกเรียกว่าการรบกวนสัญญาณกันเอง (Self-interference) ภายในโครงข่าย โดยถ้าสัญญาณจากเครื่องส่งที่อยู่ไกลออกไปมาถึงช้ากว่าช่วงเวลาป้องกัน (Guard interval) สัญญาณเหล่านั้นจะเปรียบเสมือนเป็นสัญญาณรบกวนกันมากกว่าเป็นสัญญาณที่ต้องการ ความเข้มของแต่ละสัญญาณขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการแพร่กระจายสัญญาณ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การเกิดการรบกวนกันเองของโครงข่ายความถี่เดียว จึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องส่งในพื้นที่ที่อยู่ในช่วงเวลาป้องกันเท่านั้น การติดตั้งเครื่องส่งที่อยู่นอกพื้นที่ช่วงเวลาป้องกันจะทำให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณอย่างเลี่ยงไม่ได้

การตั้งค่าช่วงเวลาการป้องกันของเครื่องส่งจะมีผลต่อจำนวนเครื่องส่งในพื้นที่ครอบคลุมการแพร่กระจายสัญญาณ การตั้งค่าช่วงเวลาป้องกันที่น้อยเกินไปจะทำให้ต้องใช้จำนวนเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว มากขึ้นในพื้นที่ใกล้เคียงกัน

2.4.2.2 ประสิทธิภาพทางด้านความถี่

โครงข่ายความถี่เดียว ขนาดใหญ่สามารถให้บริการหลากหลายช่องรายการโดยการใช้ความถี่หลักเพียงความถี่เดียว ดังนั้นโครงข่ายความถี่เดียว จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าโครงข่ายหลายความถี่ อย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามหากต้องการการส่งรายการที่หลายหลายในพื้นที่ที่แตกต่างกัน การใช้ความถี่อื่นมารวมด้วยสำหรับการส่งก็เป็นสิ่งที่จำเป็น จำนวนช่องรายการสำหรับการส่งสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว สามารถส่งได้อย่างน้อยประมาณ 4 ช่องรายการ สำหรับการใช้งานจริงอาจได้มากถึง 5 หรือ 6 ช่องรายการ การสร้างสถานีเสริมจุดบอด (Gaps filler) เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ครอบคลุมสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว สามารถทำได้โดยง่ายโดยไม่ต้องการเพิ่มการใช้งานความถี่อื่นใดเพิ่มเติม

2.4.2.3 ประสิทธิภาพทางด้านกำลังส่ง

การใช้งานโครงข่ายความถี่เดียว นอกเหนือจากประสิทธิภาพด้านการใช้งานความถี่แล้ว ยังมีการประสิทธิภาพด้านกำลังส่งด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาความแข็งแรงของสัญญาณอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มสัญญาณจากแต่ละเครื่องส่ง สำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบเดิมนั้น มุ่งเน้นไปที่การพิจารณาความสำคัญเฉพาะเครื่องส่งเดียว การประสบความสำเร็จสำหรับการออกแบบโครงข่ายขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของการครอบคลุมพื้นที่ในการออกอากาศและการคำนวณหา Link budget ดังนั้นการเพิ่มกำลังส่งของเครื่องส่งจึงเป็นส่วนที่สำคัญ อย่างไรก็ตามด้วยการรับด้วยสายอากาศรอบทิศทาง (Omni-directional) สำหรับโครงข่ายความถี่เดียวความต้องการของสัญญาณประกอบไปด้วยส่วนประกอบของสัญญาณที่หลากหลายที่ถูกส่งมาจากเครื่องส่งหลายเครื่อง ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงและจางหายของความเข้มสัญญาณที่แตกต่างกัน หรือแม้แต่กระทั่งการความเข้มของสัญญาณที่ไปเพิ่มความแรงของสัญญาณให้กับความเข้มของสัญญาณจากเครื่องส่งอื่น ๆ นี่คือผลกระทบของค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดของความเข้มสัญญาณ เนื่องจากโครงข่ายความถี่เดียว สามารถใช้กำลังส่งที่ต่ำจากเครื่องส่งได้ ดังนั้น ประสิทธิภาพของกำลังส่งของ โครงข่ายความถี่เดียว จึงมีความสำคัญสำหรับพื้นที่ชายขอบของสัญญาณ โดยถูกเรียกว่าอัตราขยายของโครงข่าย (Network gain) สำหรับโครงข่ายแบบเดิมเมื่อเปลี่ยนพื้นที่ในการรับสัญญาณจะใช้วิธีการค้นหาความถี่อื่นเพื่อรับสัญญาณที่แรงกว่า

2.4.2.4 การทำงานแบบสัมพันธ์กัน

การที่จะได้มาซึ่งประสิทธิภาพทางด้านกำลังส่งและประสิทธิภาพทางด้านความถี่ จำเป็นจะต้องทำให้เครื่องส่งทุกเครื่องต้องทำงานสัมพันธ์กันภายในโครงข่ายเดียวกัน การประสบความสำเร็จในการทำงานที่สัมพันธ์กันนั้น ทุกเครื่องส่งจะต้องการคุณสมบัติบางอย่าง ซึ่งได้กล่าวถึงต่อไป ในโครงข่ายขนาดใหญ่การทำงานที่ไม่สัมพันธ์กันในช่วงเวลาเพียง +/- 5 ไมโครวินาทีจะมีผลต่อการเสื่อมลงของสัญญาณเป็นอย่างมาก ความต้องการของการทำงานที่สัมพันธ์กันนั้น มีผลกระทบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการส่งสัญญาณของรายการไปยังเครื่องส่งที่ไม่พร้อมกันในทุกเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียวเดียวกัน ที่ระยะห่างกันของแต่ละเครื่องส่งที่ไม่เหมาะสมนี้ จะเกิดการรบกวนของสัญญาณกันเองได้

การทำงานที่สัมพันธ์ของแต่ละเครื่องส่งภายในโครงข่ายความถี่เดียว ต้องไม่มีการแก้ไขสัญญาณที่ใช้ในการมอดูเลตภายในโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งความแตกต่างของสัญญาณการมอดูเลตเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างเครื่องส่งตลอดช่วงเวลาที่สัญญาณนั้นมีความแตกต่างกัน

2.5 สถานีเสริมจุดบอด

การใช้งานสถานีเสริมจุดบอด (Gap-filler) ทำให้สามารถเติมเต็มสัญญาณในพื้นที่ที่สัญญาณต่ำได้ การที่โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 สามารถรับสัญญาณได้จากหลายทิศทางนั้น ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะสร้างสถานีเสริมจุดบอดซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้นสำหรับการรับสัญญาณ โดยมีหลักการดังนี้ นอกพื้นที่ของสถานีเสริมจุดบอด จะใช้สายอากาศแบบทิศทางรับสัญญาณมายังเครื่องส่งของสถานีเสริมจุดบอด หลังจากทำการกรองและขยายสัญญาณสัญญาณจะถูกนำมาสร้างใหม่อีกครั้งโดยใช้ความถี่เดิม และถูกส่งไปยังพื้นที่จุดบอดของการสัญญาณวิธีการนี้ทำได้โดยง่ายและถูกทดสอบมาแล้วหลายครั้ง อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดสำหรับการขยายสัญญาณเช่นกัน โดยข้อจำกัดนี้คือ การแยกสัญญาณไม่ให้รบกวนกันระหว่างสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณที่จะส่งออกไปด้วยสายอากาศ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ต้องไม่ให้เกิดการออสซิลเลชันของสถานีเสริมจุดบอด

สถานีเสริมจุดบอดถูกใช้สำหรับการให้บริการภายในอาคารเพื่อชดเชยสำหรับการสูญเสียของสัญญาณเป็นอย่างมากอันเนื่องมาจากผนังกำแพงห้องภายในตัวอาคาร ความเข้มของสัญญาณภายในตัวอาคารซึ่งไม่ได้มีสัญญาณแรงเท่ากับภายนอกตัวอาคาร จะเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานสถานีเสริมจุดบอด

2.5.1 มาตรฐานสำหรับการออกแบบสถานีเสริมจุดบอด

ในโครงข่ายความถี่เดียวปัญหาเรื่องความเสถียรในการติดตั้งสถานีเสริมอันเนื่องมาผลของการป้อนกลับ (Feedback) ระหว่างสัญญาณที่ทำการส่งออกจากเครื่องส่งกับสายอากาศที่รับสัญญาณเข้ามาของสถานีเสริมจุดบอด ต้องได้รับการพิจารณาเพื่อให้การออกแบบสถานีเสริมจุดบอดมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีสิ่งที่ต้องพิจารณาดังนี้

- อัตราการขยายสูงสุดที่สามารถทำได้เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ครอบคลุม
- สถานีที่ตั้งสายอากาศ
- แบบรูปการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศ (Antenna pattern)

การประวิงเวลาของสัญญาณที่สถานีเสริมจุดบอดมีผลต่อโครงข่ายความถี่เดียว ด้วยเช่นกัน ดังนั้นสำหรับการออกแบบโครงข่ายความถี่เดียว ต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- ความไวของการประมวลผลของสถานีเสริมจุดบอด

- กำลังส่งของสถานีเสริมจุดบอด
- ความเป็นเชิงเส้น รวมไปถึงการเกิดอินเตอร์มอดูเลชัน (Intermodulation)

2.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงภาพรวมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 การประมวลผลของสัญญาณอินพุตสำหรับการส่งสัญญาณ การส่งแบบที่ใช้การมอดูเลตที่มีความแตกต่างหลายแบบไปพร้อมกันโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า Physical layer pipes หลักการสร้างสัญญาณ OFDM ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโดยเฉพาะมาตรฐาน DVB-T2 รวมไปถึงขั้นตอนวิธีการสร้างสัญญาณสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 นอกจากนี้ ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน DVB-T2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกอากาศในประเทศไทยโดย กสทช อธิบายถึงพื้นฐานของระบบโครงข่ายสำหรับการส่งโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ซึ่งมีอยู่สองรูปแบบคือ โครงข่ายหลายความถี่ และโครงข่ายความถี่เดียว โดยในแต่ละรูปแบบของโครงข่ายได้อธิบายถึงข้อดีข้อเสียรวมถึงไปถึงประสิทธิภาพของแต่ละโครงข่าย และท้ายสุดได้อธิบายถึงสถานีเสริมจุดบอด และหลักการออกแบบที่ได้มาตรฐานสำหรับการติดตั้งสถานีเสริมจุดบอด

บทที่ 3

การจำลองคุณภาพสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

ในบทนี้ นำเสนอการรวบรวมสมมุติฐานแบบจำลอง และทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณการส่งโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินมาตรฐาน DVB-T2 ซึ่งใช้สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื้อหาประกอบไปด้วย การวิเคราะห์สัญญาณและการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายต่อไป

3.1 แบบจำลองโครงข่ายความถี่เดียว

โครงข่ายความถี่เดียวสร้างขึ้นจากการแพร่กระจายสัญญาณจากเครื่องส่งจำนวนหลายเครื่อง โดยการส่งข้อมูลดิจิทัลที่เหมือนกันทุกประการด้วยความถี่เดียวกัน ผลประโยชน์จากสัญญาณที่ได้รับได้จากเครื่องรับมาจากการรวมกันของสัญญาณจากหลายเครื่องส่งที่ถูกส่งมายังเครื่องรับของโครงข่ายความถี่เดียว ถ้าเครื่องส่งอยู่ไกลจากเครื่องรับมากเกินไป สัญญาณที่มาถึงเครื่องรับจะเกิดการรบกวนกันเองและกลายเป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากผลของการประวิงเวลา สำหรับการส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยี OFDM การควบคุมช่วงเวลาของการประวิงเวลาสัญญาณที่ได้รับได้ สามารถทำได้โดยการปรับแต่งให้ช่วงเวลาดังกล่าวให้มีระยะเวลามากกว่าระยะทางที่เครื่องส่งติดตั้งอยู่



รูปที่ 3.1 การประวิงเวลาของสัญญาณจากสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว ภายในช่วงเวลาป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเลือกช่วงเวลาป้องกัน

การส่งโทรทัศนระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 มีตัวเลือกสำหรับช่วงเวลาป้องกันเพื่อสนับสนุนการใช้งานสำหรับการออกอากาศที่เหมาะสม ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญหลักสองประการ ดังนี้

- ช่วงระยะเวลาป้องกัน (The guard-interval duration) T_g
- อัตราส่วนของช่วงเวลาป้องกัน (The guard-interval fraction: GIF) = T_g/T_u

สัญญาณทั้งหมดรวมทั้งช่วงเวลาป้องกันด้วย เรียกว่า T_s ประกอบไปด้วยส่วนของ Symbol ที่ใช้งาน T_u และส่วนของช่วงเวลาป้องกัน T_g ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ขนาดของช่วงเวลาป้องกันได้ต้องมีค่ามากกว่าการประวิงเวลาสูงสุดของความถี่ของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ การกำหนดช่วงเวลาป้องกัน (GI) เพื่อให้ช่องสัญญาณในการส่งมีความทนทานต่อสถานการณ์ต่าง ๆ สำหรับการแพร่กระจายสัญญาณ โดย T_g คือ ช่วงเวลาป้องกัน การกำหนดช่วงเวลาการป้องกันนั้น ขึ้นอยู่กับการพิจารณาเลือกใช้ขนาดของ FFT ด้วยเช่นกัน ความจุของข้อมูลสูงสุดสำหรับการส่งที่ได้ขึ้นอยู่กับค่าน้อยที่สุดของอัตราส่วนของช่วงเวลาป้องกัน (GIF) ซึ่งก็มีผลอันเกี่ยวเนื่องมาจากขนาดของ T_u เช่นกัน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ FFT ก็มีผลต่อการรบกวนแบบ Doppler effects ด้วย เพราะฉะนั้นการเลือกขนาดของ FFT ก็มีส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาเลือกใช้

ผลที่ได้จากการเลือกใช้ช่วงเวลาป้องกัน ถ้าสัญญาณที่รับได้อยู่ในช่วงเวลาป้องกัน สัญญาณที่รับได้จากเครื่องส่งหลาย ๆ เครื่องก็จะมีเวลาที่ซิงโครไนซ์กันอย่างถูกต้อง ซึ่งจะไม่เกิดการรบกวนกันระหว่าง Symbol (Intersymbol interference: ISI) แต่ถ้าหากสัญญาณที่รับได้เกินกว่าช่วงเวลาป้องกัน ก็จะทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่าง Symbol ได้ ดังนั้นต้องพิจารณาถึงค่าสูงสุดของการประวิงเวลาของสัญญาณจากแต่ละเครื่องส่งสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวที่ต้องการออกแบบ การประวิงเวลาที่เกิดในโครงข่ายความถี่เดียว เกิดขึ้นได้จากสัญญาณที่สะท้อนวัตถุต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อมของโครงข่ายความถี่เดียว นั้นการทำนายเกี่ยวกับสัญญาณสะท้อนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในพื้นที่การกระจายสัญญาณ ต้องใช้ข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศโดยละเอียด และการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม สำหรับภูมิประเทศที่มีความราบเรียบก็จะได้ไม่เกิดปัญหาเหล่านี้โดยอาจจะไม่มีปัญหาในเรื่องเกี่ยวกับการสะท้อนจากสิ่งก่อสร้างหรืออาคารแทน ดังนั้นการเลือกใช้ค่าของช่วงเวลาป้องกันจึงต้องให้ครอบคลุมสำหรับทุกสถานการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้

การเลือกค่าช่วงเวลาป้องกันขึ้นอยู่กับขนาดของ FFT ซึ่งอัตราส่วนของช่วงเวลาป้องกัน จะสามารถเลือกได้ด้วยค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยค่าช่วงเวลาป้องกันดังกล่าวใช้สำหรับการส่งโทรทัศนดิจิทัลด้วยขนาดแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์

3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ผลของกระทบอันเนื่องมาจากช่องสัญญาณแบบไร้สายสำหรับกำลังงานที่รับได้ที่เครื่องรับ ถูกแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ๆ คือ ผลกระทบจากพื้นที่ขนาดใหญ่ (Large-scale) และ พื้นที่ขนาดเล็ก (Small-scale) สำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ ผลกระทบเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่รับได้เฉลี่ยที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสัมพันธ์ของระยะทางกับความยาวคลื่น ในขณะที่สำหรับพื้นที่ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบในการรับสัญญาณเกิดจากความผันผวนของสัญญาณที่รับได้อันเนื่องมาจากระยะทาง เทียบเท่ากับความยาวคลื่น สองแบบจำลองนี้คือผลกระทบอันหลากหลายของการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (Transmitter and receiver: T-R) ซึ่งเราใช้เป็นพื้นฐาน สำหรับการคำนวณและออกแบบสำหรับการกระจายสัญญาณ

ตารางที่ 3.1 ช่วงเวลาป้องกัน (GI) ในหน่วย μs สำหรับช่องสัญญาณขนาดแบนด์วิดท์ 8 เมกะเฮิร์ตซ์

FFT size	Guard-interval fraction						
	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32 K	28	112	224	266	448	532	N/A
16 K	14	56	112	133	224	266	448
8 K	7	28	56	66.5	112	133	224
4 K	N/A	14	28	N/A	56	N/A	112
2 K	N/A	7	14	N/A	28	N/A	56
1 K	N/A	N/A	7	N/A	14	N/A	28

สำหรับผลกระทบของสัญญาณเนื่องจากพื้นที่ขนาดใหญ่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในสร้างแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีสำหรับการพยากรณ์และการวิเคราะห์ทางด้านสถิติ การพยากรณ์หาได้จากการสูญเสียเชิงวิถีเทียบกับระยะทาง ความก้าวหน้าของการวิเคราะห์ช่องสัญญาณสมัยใหม่สามารถนำข้อมูลภูมิประเทศมาใช้ในการคำนวณ ทำให้เพิ่มความเที่ยงตรงแม่นยำมากยิ่งขึ้น เช่นใช้ความสูงต่ำของภูมิประเทศหรือลักษณะของความสูงในพื้นที่ระหว่างเส้นทางที่สัญญาณส่งไปจากเครื่องส่งถึงเครื่องรับ ความน่าเชื่อถือของคำนวณขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลภูมิประเทศที่ได้จากฐานข้อมูล สำหรับข้อมูลความละเอียดของพื้นที่จะอยู่ระหว่าง 50 คูณ 50 เมตร และ 1,000 คูณ 1,000 เมตร

สำหรับพื้นที่ขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่น 100 คูณ 100 เมตร ความเข้มของสัญญาณที่รับได้จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงแบบอิสระของพื้นที่ที่ไม่ปกติ (Terrain irregularities) ทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากการบดบัง (Shadow fading) หลักสถิติที่ใช้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงนี้ โดยทั่วไปจากการแจกแจงปกติด้วยล็อก (Log-normal) ดังนั้น แบบจำลองช่องสัญญาณจึงถูกใช้สำหรับการประมาณค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ และการจางหายของสัญญาณถูกสร้างเป็นแบบจำลองโดยหลักการทางสถิติและเพิ่มเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณ โดยกำลังสัญญาณที่รับได้ P_r สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_p} \cdot 10^{\zeta_i/10} \quad (3.1)$$

$$= \bar{P}_r \cdot 10^{\zeta_i/10},$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้

P_t คือ กำลังส่งออกจากสายอากาศทางด้านส่ง (Effective radiated power: ERP),

G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องส่ง,

L_p คือ การสูญเสียเชิงวิถีจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับที่ถูกพยากรณ์จากแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณ,

G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ

ζ_i คือ แบบจำลองตัวแปรสุ่มเกาส์ค่าเฉลี่ยศูนย์ (zero mean Gaussian random variable modeling) ของการจางหายรอบ ๆ ตำแหน่งของเครื่องรับ มีหน่วยเป็น dB

โดยค่าคงตัวในสมการที่ 3.1 \bar{P}_r ถูกใช้อ้างอิงเสมอ ซึ่งเรียกว่า กำลังงานที่รับโดยเฉลี่ยในพื้นที่ (Received local mean power)

3.3.1 การพยากรณ์ค่าเฉลี่ยกำลังงานที่รับได้ในพื้นที่การรับสัญญาณ

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา มีการนำเสนอวิธีการมากมายสำหรับการประมาณค่าการพยากรณ์กำลังงานที่รับได้อันเนื่องมาจากพื้นที่การรับสัญญาณแบบต่าง ๆ เนื่องจากความซับซ้อนของสภาพสามมิติและแบบจำลองการแพร่กระจายการแพร่รังสี (Ray-tracing propagation models) ทำให้พื้นที่จำกัดของการคำนวณด้วยวิธีสองมิติ แบบจำลองของ ITU-R [35] ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับการกระจายสัญญาณในพื้นที่ต่าง ๆ ซึ่งถูกใช้เป็นหลักสำหรับการออกแบบการแพร่กระจายสัญญาณความถี่วิทยุโทรทัศน

3.3.1.1 แบบจำลอง ITU-R [58]

วิธีการของ ITU-R ได้นำพื้นที่ภูมิประเทศมาใช้เป็นตัวแปรทางสถิติ โดยมีพารามิเตอร์ คือ ความสูงของสายอากาศด้านส่ง ($h_{t,eff}$) และปัจจัยความสูงต่ำของพื้นที่ (Δh) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นพื้นฐานของข้อมูลจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยเพิ่มตัวแปรฐานข้อมูลของลักษณะภูมิประเทศร่วมกับแบบจำลองการพยากรณ์ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น dB μ V/m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากเครื่องส่งที่ระยะทางระหว่าง 10 กิโลเมตร ถึง 700 กิโลเมตร สมมติว่า ERP เท่ากับ 1 kW แพร่กระจายสัญญาณด้วยสายอากาศฮาฟเวฟไดโพล และพิจารณาที่ความสูง Δh เท่ากับ 50 เมตร ในระยะทางระหว่าง 1 กิโลเมตร ถึง 10 กิโลเมตร การประมาณค่าแบบเชิงเส้นถูกนำมาใช้ เส้นโค้งของการแพร่กระจายสัญญาณนำเสนอค่าความเข้มสัญญาณสำหรับ 50 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ (L) และ 1 เปอร์เซ็นต์, 10 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ของเวลา ในพื้นที่สำหรับช่วงความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 250 เมกกะเฮิร์ตซ์ (VHF) และ 450 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1000 เมกกะเฮิร์ตซ์ (UHF) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับ Δh เท่ากับ 50 เมตร ที่ความน่าจะเป็นของพื้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถให้เส้นโค้งที่ถูกต้องในช่วง Δh เท่ากับ 10 เมตร ถึง 500 เมตร ที่ความน่าจะเป็นสำหรับพื้นที่ ระหว่าง 1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ กำลังงานเฉลี่ยที่เครื่องรับในพื้นที่สามารถพิจารณาได้จากค่าความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับตามสมการที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{P}_r = \frac{E^2}{120\pi} \cdot \frac{c^2 \cdot G_r}{f^2 4\pi}, \quad (3.2)$$

กำหนดให้

E	คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/m
c	คือ ความเร็วแสง มีหน่วยเป็น m/s
f	คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น Hz

ดังนั้นกราฟเส้นโค้งของแบบจำลอง ITU-R สำหรับกำลังงานเฉลี่ยที่ได้รับในพื้นที่ต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$\bar{P}_r = (P_t - 30) + E[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})] - 120 + (G_t - 2.14) + G_r + 10\log(c^2/(480\pi^2 f^2)) + 10 \quad (3.3)$$

หรือสามารถเขียนการสูญเสียเชิงวิธีอีกแบบได้ตามสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$L_p = 142.14 - E[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})] + 10 \cdot \log(c^2/(480\pi^2 f^2)) \quad (3.4)$$

คำแนะนำจาก ITU-R P.370 นำเสนอเส้นโค้งของกราฟสำหรับการรับด้วยสายอากาศที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน อย่างไรก็ตาม สำหรับการให้บริการการแพร่กระจายสัญญาณแบบ DAB และ DVB ต้องคำนึงถึงการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ด้วย ซึ่งก็คือการรับสัญญาณที่ความสูงสายอากาศ 1.5 เมตร ผลที่ได้จากการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่าต้องเพิ่มค่าแก้ไขที่ถูกต้องอีก 10 dB ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็นสำหรับการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ ดังปรากฏอยู่ในเทอมสุดท้ายของสมการที่ 3.3

3.3.2 การจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากการถูกบดบัง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ผลจากการใช้ข้อมูลเกี่ยวกับภูมิประเทศมาช่วยในการคำนวณทำให้ได้ผลของความหลากหลายของกำลังงานที่ได้รับตามสภาพพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากการถูกบดบัง ผลของความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้รับได้ ตามสภาพพื้นที่ต่าง ๆ นี้ ใช้การแจกแจงปกติด้วยล็อก (Lognormal distribution) โดยอัตราขยายของการบดบังแสดงผลด้วยค่าตัวแปรสุ่มเกาส์ค่าเฉลี่ยศูนย์ด้วยการกระจายความหนาแน่นของค่าความน่าจะเป็น (Probability density function: PDF)

$$f_{\zeta}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\zeta}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_{\zeta}^2}\right), \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

σ_{ζ} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่จางหายจากการบดบัง

ดังนั้น กำลังงานที่รับได้ยังคงเป็นตัวแปรแบบล็อกปกติ เมื่อให้ W เป็นล็อกฐานสิบของ P_r จะได้ $W = 10 \cdot \log_{10}(P_r)$ การกระจายความหนาแน่นของค่าความน่าจะเป็นของ W แสดงในสมการที่ 3.6

$$f_{\zeta}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \cdot \exp\left(\frac{-(x - m_w)^2}{2\sigma_w^2}\right) \quad (3.6)$$

กำหนดให้

$$\sigma_w = \sigma_{\zeta}$$

$$m_w = 10 \cdot \log_{10}(\bar{P}_r)$$

สำหรับความเบี่ยงเบนเนื่องจากตำแหน่งพื้นที่จะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_w เท่ากับ 8.3 dB โดยแนะนำให้ใช้ค่านี้สำหรับการวางแผนออกแบบโครงข่ายการให้บริการแบบแอนะล็อกในย่าน VHF และให้ σ_w เท่ากับ 9.5 dB สำหรับย่าน UHF [38] อย่างไรก็ตาม การวัดการแพร่กระจายสัญญาณของสัญญาณดิจิทัลสำหรับแบนด์วิดท์ 1.5 เมกกะเฮิรตซ์ ถึง 8 เมกกะเฮิรตซ์ นั้นแสดงให้เห็นว่ามีความเปลี่ยนแปลงของค่าความเบี่ยงเบนของความเข้มของสัญญาณเป็น σ_w เท่ากับ 4 dB ถึง 6 dB ดังแสดงในงานวิจัย [39 - 41] โดยความผิดพลาดในการพยากรณ์ของ \bar{P}_r ยังคงเป็นส่วนสำคัญสำหรับการคำนวณพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการ ในงานวิจัย [42] แสดงให้เห็นค่าความเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดในการพยากรณ์ของการกระจายแบบล็อกด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_e เท่ากับ 3 ถึง 12 dB โดยขึ้นอยู่กับการใช้แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณ เช่นในงานวิจัย [43 - 44] ได้ใช้ค่าเท่ากับ 5.5 dB สำหรับการแพร่กระจายสัญญาณดิจิทัลแบบแบนด์วิดท์กว้าง

3.4 เทคโนโลยี OFDM

ในเทคโนโลยี OFDM ถูกประยุกต์ใช้สำหรับการส่งบิตข้อมูลจำนวนมากในเวลาที่มีความเร็วสูง ซึ่งถูกมอดูเลตด้วยความถี่ย่อยจำนวนมากที่อยู่ใกล้ชิดกันมากที่สุดโดยไม่มีกรรบกวนกันระหว่างความถี่ โดยความถี่ย่อยจำนวนมากนั้น จะทำให้การขนถ่ายข้อมูลที่มีอัตราความเร็วบิตที่ช้าลงต่อความถี่ ดังเขียนได้ตามสมการที่ 3.7

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(j)} g_k(t - jT_u), \quad (3.7)$$

เมื่อกำหนดให้ g_k เป็นสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular pulse) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ T_u

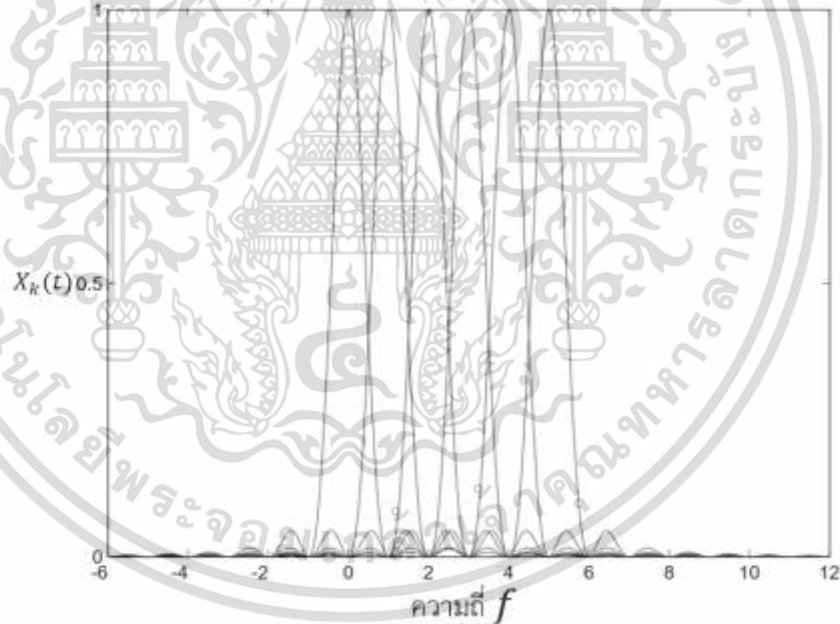
$$g_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k t} & \text{for } 0 \leq t < T_u \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.8)$$

กำหนดให้

N_c คือ จำนวนความถี่ย่อย

$a_k^{(j)}$ คือ Symbol ข้อมูลที่อยู่บนความถี่ย่อย k ระหว่างช่วงบล็อก OFDM j th

T_u คือ ระยะเวลาของ Symbol OFDM



รูปที่ 3.2 สเปกตรัมของ OFDM ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน จำนวน 5 ความถี่ [1]

การประยุกต์ใช้สัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมทำให้ Symbol ข้อมูลถูกแยกออกจากความถี่เพียงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น $f_k = f_c + k/T_u$ คือ ค่าความถี่ของแต่ละคลื่นพาห้ สัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมถูกใช้สำหรับมาตรฐานของ DAB และ DVB [45 - 46] นอกจากนี้ เนื่องจากการแยกตัวออกจากคลื่นพาห้เล็กน้อย ทำให้วิธีการ OFDM มีความไวต่อความผิดพลาดทางความถี่และปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler) [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังงาน $X_k(f)$ ของแต่ละความถี่คลื่นพาห้ $f_k = f_c + k/T_u$ เขียนได้ตามสมการที่ 3.9 และแสดงดังรูปที่ 3.2

$$X_k(f) = \left| \frac{\sin(\pi \cdot (f - f_k) \cdot T_u)}{\pi \cdot (f - f_k) \cdot T_u} \right|^2 \quad (3.9)$$

สำหรับ OFDM คลื่นพาห้ที่ถูกมอดูเลตจะอยู่ในรูปแบบของการตั้งฉากกัน ระยะห่างระหว่างความถี่เหล่านั้นเป็นส่วนกลับของกันและกันของช่วง Symbol ที่ใช้งาน แต่ละคลื่นพาห้เป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถึงแม้ว่าสเปกตรัมเหล่านั้นจะทับซ้อนกันในโดเมนความถี่ พลังงานความหนาแน่นของสเปกตรัมทั้งหมดของ OFDM คือผลรวมของความหนาแน่นสเปกตรัมของทุกคลื่นพาห้

การรบกวนกันระหว่าง Symbol อันเนื่องมาจากผลของการรับสัญญาณแบบหลายทิศทาง จะทำให้คุณสมบัติระหว่างสัญญาณจะไม่เหมือนเดิม เพื่อช่วยแก้ปัญหานี้ ช่วงเวลาป้องกัน T_g ถูกเพิ่มเข้ามาก่อนในแต่ละสัญญาณ $g_k(t - jT_u)$ ซึ่งจะช่วยลดทอนการรบกวนระหว่าง Symbol โดยการยอมเสียสละพลังงานที่ปล่อยออกมาบางส่วน โดยสามารถเขียนสมการ OFDM ได้ใหม่ดังนี้

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(j)} g'_k(t - jT_s), \quad (3.10)$$

เมื่อกำหนดให้ $T_s = T_u + T_g$ และรูปร่างของพัลส์ g'_k สามารถเขียนได้ดังนี้

$$g'_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k t} & \text{for } 0 \leq t < T_u \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.11)$$

เนื่องจากขนาดความกว้างของ OFDM Symbol มีขนาดใหญ่กว่าส่วนผกผันของความกว้างของความถี่ ในส่วนของพู่คลื่นหลัก (Main lobe) ของความหนาแน่นสเปกตรัมของแต่ละความถี่จะมีขนาดแคบกว่าสองเท่าของระยะห่างระหว่างความถี่ ดังนั้นความหนาแน่นของสเปกตรัมจึงไม่ใช่ค่าคงตัวภายในแบนด์วิดท์ขนาดเล็ก

3.5 แบบจำลองการรบกวนสัญญาณ

คุณลักษณะที่ใช้ในการชี้วัดถึงคุณภาพของแบบจำลอง คือ อัตราส่วนสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน (Signal to interference ratio: SIR) สำหรับการรับสัญญาณด้วยโครงข่ายความถี่เดียว สมการสำหรับ OFDM เขียนได้ตามสมการที่ 3.12

$$S_b(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(0)} e^{j2\pi k \frac{t}{T_u}}, \quad -T_g \leq t \leq T_u, \quad (3.12)$$

กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$a_k^{(0)}$ คือ Symbol ข้อมูลของที่อยู่บนคลื่นพาห่อย่อย k ระหว่างช่วงเวลาบล็อก OFDM ที่ 0^{th}

สัญญาณหลายวิธีที่เหมือนกันเดินทางมาถึงยังสายอากาศรับในเวลาที่แตกต่างกัน การกระจายทางเวลานี้จะเกิดจากผลกระทบจากสองสิ่ง คือ การกระจายเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณบริเวณเครื่องรับ และการล่าช้าของสัญญาณเล็กน้อยที่เกิดจากเครื่องส่งที่ต่างกัน เนื่องจากช่วงความกว้างของบล็อก $T_t = T_u + T_g$ ในโครงข่ายความถี่เดียวมีความกว้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับธรรมชาติของการกระจายทางเวลา ผลกระทบจากการกระจายทางเวลาตามธรรมชาติมีผลเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการรับสัญญาณจากเครื่องรับสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.13

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \delta_i s_b(t - \tau_i) + z(t) + n(t) \quad (3.13)$$

กำหนดให้

- N คือ จำนวนเครื่องส่งทั้งหมดในโครงข่ายความถี่เดียว
- τ_i คือ ค่าการประวิงเวลาการแพร่กระจายสัญญาณจากเครื่อง i ไปยังเครื่องรับ
- δ_i คือ อัตราขยายของสัญญาณซึ่งได้จากแบบจำลอง Gaussian ค่าเฉลี่ยศูนย์ จากการประมวลผลจากค่าเฉลี่ยกำลังงาน
- $z(t)$ คือ ค่าการรบกวนจากภายนอกที่มาจากโครงข่ายความถี่เดียว อื่น ๆ ที่ใช้ความถี่เดียวกัน
- $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวน

$$P_{r,i} = E\{|\delta_i|^2\} = \bar{P}_{r,i} \cdot 10^{\zeta_i/10} \quad (3.14)$$

กำหนดให้

- $P_{r,i}$ คือ กำลังงานที่รับได้จากเครื่องส่ง i
- ζ_i คือ แบบจำลองตัวแปรสุ่มเกาส์ค่าเฉลี่ยศูนย์
- $|\delta_i|^2$ คือ ค่าการจางหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมในพื้นที่

สัญญาณที่รับได้ $r(t)$ ได้มาจาก OFDM มอดูเลเตอร์ สมมติให้เครื่องรับซิงโครไนซ์สัญญาณที่รับได้รวมถึงสัญญาณที่มาถึงล่าช้าต่าง ๆ จำนวน N ถึง N^+ ซึ่งอยู่ในภายในช่วงเวลาป้องกัน แต่ก่อนที่จะหมดบล็อก OFDM ด้วยช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงช้า ความแรงสัญญาณที่เข้ามาจะมีค่าคงตัวระหว่างช่วงบล็อก OFDM โดยสัญญาณที่รับได้จากความถี่ย่อย [48] ดังแสดงตามสมการที่ 3.15

$$r_k = [H(k) - G'(k, k)]a_k^{(0)} - \sum_{l=0, l \neq k}^{N_c-1} G'(k, k)a_l^{(0)} + \sum_{l=0}^{N_c-1} G'(k, k)a_l^{(-1)} + z_k + n_k$$

เมื่อ $H(k)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของคลื่นพายุย่อย k

$$H(k) = \sum_{i=1}^N \delta_i e^{-j2\pi k \frac{\tau_i}{T_u}} \quad (3.16)$$

$$G'(k, l) = \frac{e^{-j2\pi(l-k)\frac{\tau_i}{T_u}}G(k) - G(l)}{j2\pi(l-k)} \quad (3.17)$$

เมื่อ $G(k)$ คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านของ N ถึง N^+

$$G(k) = \sum_{i=1+N^+}^N \delta_i e^{-j2\pi k \frac{\tau_i}{T_u}} \quad (3.18)$$

สัญญาณสุ่มที่รับได้ r_k ประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ส่วนสำหรับการใช้งานในการส่งข้อมูล (Useful part) ซึ่งขนถ่ายข้อมูล $a_k^{(0)}$ และส่วนของสัญญาณรบกวน ซึ่งรวมไปถึงสัญญาณรบกวนภายใน สัญญาณรบกวนภายนอก สัญญาณรบกวนภายในช่องสัญญาณ และสัญญาณรบกวนระหว่าง Symbol โดยทุกส่วนของสัญญาณเดินทางมาถึงภายในช่วงเวลาป้องกันโดยเฉพาะในส่วนที่ใช้งานในการส่งข้อมูล สำหรับในส่วนอื่น ๆ อาจเป็นได้ทั้งส่วนที่เป็นประโยชน์และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณได้

อัตราส่วนระหว่างกำลังงานเฉลี่ยกับสองส่วนของสัญญาณรบกวนถูกนำเสนอด้วยค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อการรบกวน สัญลักษณ์ คือ Γ ซึ่งใช้สำหรับวัดประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณที่ได้จากพื้นที่ต่าง ๆ แสดงดังสมการที่ 3.19

$$\Gamma = \frac{E\{|H(k) - G'(k, k)|^2\}}{E\{|G'(k, k)|^2\} + 2 \sum_{l=0, l \neq k}^{N_c-1} E\{|G'(k, l)|^2\} + Z_0 + N_0} \quad (3.19)$$

เมื่อสมมติให้ $E\{|a_l|^2\} = 1, \forall l$. N_0 คือ กำลังงานของสัญญาณรบกวนภายในเครื่องรับ และ Z_0 คือ การรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากเครื่องส่งอื่น ๆ ในโครงข่ายความถี่เดียว ที่ใช้บล็อกความถี่เดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.20

$$Z_0 = \sum_{i=N+1}^{N+E} P_{r,i} \quad (3.20)$$

แทน $H(k)$ และ $G'(k, l)$ เข้าไปในสมการที่ 3.19 จะได้ค่าเฉลี่ยของ SIR ตามสมการที่ 3.21

$$\Gamma = \frac{U}{I} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{r,i} w(\tau_i - \tau_0)}{\sum_{i=1}^N P_{r,i} [1 - w(\tau_i - \tau_0)] + \sum_{i=N+1}^{N+E} P_{r,i} + N_0} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ U และ I คือส่วนของกำลังงานที่รับได้ทั้งหมดและกำลังงานของสัญญาณรบกวนทั้งหมดตามลำดับ ฟังก์ชัน $(\tau_i - \tau_0)$ ฟังก์ชันน้ำหนักซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงขอบเขตรูปแบบของเครื่องรับและรูปแบบการถอดรหัส [49 - 51] และฟังก์ชันการประวิงเวลาของสัญญาณ τ_i สัมพันธ์กับจุดเริ่มต้นกรอบของการตรวจพบสัญญาณ τ_0 สำหรับฟังก์ชันน้ำหนัก $w(\Delta\tau)$ สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.22

$$w(\Delta t) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq \Delta t < T_g \\ \left(\frac{T_u - \Delta t + T_g}{T_u}\right)^2 & \text{if } T_g \leq \Delta t < T_u \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.22)$$

เมื่อ $w(\cdot)$ คือ T_f สำหรับ DVB จะมีค่าเท่ากับ $2T_g$ [49] สัญญาณที่รับได้จากเครื่องส่ง i จะอยู่ในช่วงที่ใช้งานจนถึงช่วงที่สัญญาณรบกวนหรือแม้กระทั่งอยู่ในทั้งสองช่วง พลังงานทั้งหมดในช่วงที่ใช้งานได้จะเริ่มต้นที่เวลา τ_0 ของกรอบเวลาที่เครื่องรับถอดสัญญาณได้ ความแม่นยำของการซิงโครไนซ์พิกัดได้จากเฟรมและ Symbol ในกรอบของ FFT สำหรับการตรวจจับการซิงโครไนซ์ด้วยเฟรมจะใช้ Symbol พิเศษซึ่งอยู่ในเฟรม สำหรับการซิงโครไนซ์ Symbol จะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับค่า SIR สูงสุด เครื่องรับต้องเลือกจุดเริ่มต้นของกรอบการรับจากสัญญาณที่มีความแรงมากที่สุดจะทำให้ค่ากำลังงานของสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยที่สุด จุดที่เริ่มต้นนี้เรียกว่าจุดเวลาสำหรับการซิงโครไนซ์ ความยุ่งยากของการซิงโครไนซ์ที่เรียกว่า Pre-echoes และ Post-echoes ได้มีการอธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง [50]

3.6 การวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T2

3.6.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล

มาตรฐาน DVB-T2

ประสิทธิภาพของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ในส่วนของการแพร่กระจายสัญญาณทางภาคพื้นดิน ได้มาจากพื้นฐานของการคำนวณจากแบบจำลองและทำการปรับแต่งเพื่อสร้างเป็นมาตรฐานของ DVB-T2 [51] โดยได้กำหนดวิธีการไว้ดังนี้

- กำหนดคุณลักษณะของช่องสัญญาณสำหรับสำหรับแบบจำลองในการทดสอบ
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองในแต่ละส่วน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความจุของการส่งผ่านข้อมูลที่ได้
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับการสูญเสียที่น้อยที่สุดสำหรับการใช้งานหน่วยความจำเมื่อใช้ช่องสัญญาณแบบ Rayleigh สำหรับช่องสัญญาณในลักษณะนี้ใช้ทดสอบสำหรับในส่วนของ BICM เท่านั้น
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพสำหรับช่องสัญญาณแบบ TU-6

- เปรียบเทียบกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงในช่องสัญญาณกับผลการทดสอบจากแบบจำลอง
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับ P1 สำหรับการตรวจจับและการถอดรหัส
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองของสัญญาณ L1-pre และ post
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองของสัญญาณ L1-pre และ post ในช่องสัญญาณแบบ TU-6

3.6.2 แบบจำลองช่องสัญญาณ

3.6.2.1 กล่าวนำ

ในระหว่างการพัฒนาในระบบ DVB-T2 ความแตกต่างของช่องสัญญาณถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อแสดงผลของประสิทธิภาพ จากความรู้เกี่ยวกับช่องสัญญาณใน DVB-T ที่ผ่านมาได้ทำการเพิ่มรูปแบบช่องสัญญาณ สำหรับ DVB-T2 โดยรูปแบบช่องสัญญาณที่ถูกเลือกมานั้น เพื่อใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพสำหรับเงื่อนไขการรับสัญญาณที่กว้างยิ่งขึ้น ซึ่งรวมไปถึงการรับในรูปแบบสำหรับการรับแบบอยู่กับที่การรับแบบเคลื่อนที่ หรือแม้กระทั่งการรับในโหมดโครงข่ายความถี่เดียว และโหมด MISO

3.6.2.2 ช่องสัญญาณแบบ Gaussian

แบบจำลองช่องสัญญาณลักษณะนี้จะมีสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian ซึ่งถูกรวมไปกับสัญญาณ โดยไม่มีการรับสัญญาณแบบหลายวิถี

3.6.2.3 ช่องสัญญาณแบบ Rician

การจางหายแบบของช่องสัญญาณแบบ Rician ถูกกำหนดไว้ในคุณลักษณะการรับสัญญาณของ DVB-T ใช้สำหรับการอธิบายเงื่อนไขการรับสัญญาณแบบอยู่กับที่ สำหรับการรับสัญญาณแบบใช้สายอากาศติดตั้งบนหลังคาที่อยู่ภายนอกอาคาร โดยช่องสัญญาณในการรับนั้น ไม่ได้รวมผลของการเกิดดอปเพลอร์ ดังนั้นจึงพิจารณาเพียงความแปรปรวนในช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณนี้มีทั้งหมด 21-tabs

$$y(t) = \frac{\rho_0 x(t) + \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\theta_i} x(t - \tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \rho_i^2}} \quad (3.23)$$

กำหนดให้

$x(t)$ คือ สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ โดยเทอมแรกเป็นสัญญาณที่รับได้โดยตรง

$y(t)$ คือ สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ โดยเทอมแรกเป็นสัญญาณที่รับได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N คือ จำนวนของคลื่นสะท้อนโดย θ_i คือ เฟสที่เปลี่ยนไปของการกระจัดกระจายของสัญญาณตามจำนวนเส้นทาง i th

ρ_i คือ การลดทอนของเส้นทาง i th

τ_i คือ ค่าประวิงเวลาของเส้นทาง i th

ค่า Rician factor K คืออัตราส่วนของกำลังงานที่รับได้ในทางตรงส่วนด้วยที่กำลังงานที่รับได้จากการสะท้อน โดยแสดงตามสมการที่ 3.24

$$K = \frac{\rho_0^2}{\sum_{i=1}^N \rho_i^2} \quad (3.24)$$

โดยหากให้ค่า Rician factor $K = 10$ dB ก็ได้จะตั้งสมการที่ 3.25

$$\rho_0 = \sqrt{10 \sum_{i=1}^N \rho_i^2} \quad (3.25)$$

3.6.2.4 ช่องสัญญาณแบบ Rayleigh

การจางหายแบบของช่องสัญญาณแบบ Rayleigh ซึ่งได้ถูกกำหนดไว้ในคุณลักษณะของ DVB-T ถูกใช้ในการอธิบายเงื่อนไขการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ทั้งภายในและภายนอกอาคาร โดยช่องสัญญาณการรับไม่ได้รวมผลของการเกิดตอปเฟลอร์ ดังนั้นจึงพิจารณาเพียงความแปรปรวนในช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณมีทั้งหมด 20-tabs

$$y(t) = k \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\theta_i} x(t - \tau_i) \quad (3.26)$$

กำหนดให้

$x(t)$ และ $y(t)$ คือ สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต โดย K คือ สมการที่

3.27

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \rho_i^2} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.5 ช่องสัญญาณการรับแบบเคลื่อนที่ มาตรฐาน TU-6

ช่องสัญญาณประเภทนี้ คือลักษณะของการรับสัญญาณการแพร่กระจายสัญญาณภาคพื้นดินในเขตชุมชนเมือง โดยกำหนดตามมาตรฐาน COST 207 ซึ่งมีรูปแบบเดียวกับ TU-6 โดยสร้างขึ้นจากการกระจายตัวของการประวิงเวลาที่สัมพันธ์กับค่ากำลังงานที่รับได้ โดยสเปคตรัมของการเกิดดอปเพลอร์ แสดงตามสมการที่ 3.28

$$K(f; f_D) = \frac{1}{\sqrt{1 - (f/f_D)^2}} \quad (3.28)$$

3.6.2.6 สัญญาณพื้นฐานแบบสองเส้นทาง 0 dB Echo

เป็นลักษณะการรับสัญญาณแบบมีเพียงสองเส้นทางเท่านั้น โดยแต่ละเส้นทาง i ได้ให้ค่า α_i , τ_i , และ Δf_i ซึ่งคือ ความแรงของสัญญาณ, ค่าการประวิงเวลา และความถี่ที่เลื่อนออกไปอันเนื่องมาจากเส้นทาง i ค่าพารามิเตอร์ Δ หมายถึงค่าช่วงเวลาป้องกัน มีหน่วยเป็น μs

3.6.3 ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับแบนด์วิดท์ช่องสัญญาณ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์

การประเมินช่องสัญญาณสำหรับการรับสัญญาณและการชิงโครไนท์ที่ความสมบูรณ์ ไม่มีการรบกวนทางเฟส นั้น ถูกยืนยันผลลัพธ์ได้จากการทดสอบ โดยผลการทดสอบเหล่านี้แสดงในช่องสัญญาณแบบ Gaussian Rician Rayleigh 0 dB echo และ TU-6 ซึ่งได้จากการตรวจสอบค่า BER หลังจากผ่านการแก้ไขความผิดพลาดด้วย LDPC จะต้องมีค่าไม่เกิน 10^{-7} และ BCH ไม่เกิน 10^{-11}

เพื่อให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด การทดสอบแบบจำลองจะดำเนินการตามวิธีการสองเงื่อนไขดังนี้

- มีความผิดพลาดต่ำสุด 100 ครั้ง ที่ FEC block
- มีความผิดพลาดของบิตต่ำสุด 1,000 ครั้ง สำหรับการตรวจพบ

พารามิเตอร์ OFDM ของ DVB-T2 ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง ถูกเลือกจากความเป็นไปได้จากมาตรฐาน DVB-T พารามิเตอร์เหล่านี้คือ FFT size ที่ 8K โดยใช้ช่วงเวลาป้องกัน ที่ 1/32 และแบนด์วิดท์เท่ากับ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือกโหมดคลื่นพาห่ปกติ ไม่ได้ใช้โหมดการหมุนคอนสเทลเลชัน และ PAPR สำหรับการทดสอบนี้สมมติให้ทุกอย่างอยู่ในอุดมคติ ตัวอย่างเช่น เรื่องของการชิงโครไนท์เซชันและการประเมินช่องสัญญาณในอุดมคติ

ในแบบจำลองนี้ สัญญาณที่ใช้ในการส่งไม่ได้รวมสัญญาณ Pilots และ Symbol ที่ใช้ในการเริ่มต้น (P1 และ P2) และตัวปิดเฟรม (frame closing symbol) ดังนั้นค่าของ CNR_0 ควรจะมีความถูกต้องสำหรับ FFT size และ Pilot pattern ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.6.3.1 การประมาณค่านี้ไม่ได้รวมผลของช่องสัญญาณที่แท้จริง ในหัวข้อที่ 3.6.6 จะแสดงให้เห็นในรายละเอียดต่อไป

3.6.3.1 การแก้ไขค่าให้ถูกต้องจากผลของการใช้งาน Pilot

ค่า CNR_0 เป็นค่าเริ่มต้นที่ยังไม่ได้รวมการรบกวนที่เกิดกับ CNR เนื่องจากการใช้งาน Pilot โดยผลการรบกวนที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้งาน Pilot Pattern โดยผลของ CNR ที่ได้ในท้ายสุดจะได้จาก การคำนวณโดยการชดเชยค่า Δ_{BP} ดังแสดงในสมการที่ 3.29

$$CNR = CNR_0 + \Delta_{BP} \quad (3.29)$$

โดยค่า Δ_{BP} หาได้จากสมการที่ 3.30

$$\Delta_{BP} = 10 \log_{10} \frac{(N_{data} + N_{NBP} + N_{BP} \cdot B_{BP} + N_{CP} \cdot B_{CP})}{N_{data} + N_{NBP} + N_{BP} + N_{CP}} \quad (3.30)$$

กำหนดให้

N_{data}	คือ จำนวน เซลล์ข้อมูล ต่อ OFDM Symbol
N_{NBP}	คือ จำนวนที่ไม่ใช่ Boot Pilot ต่อ OFDM Symbol
N_{BP}	คือ จำนวน Boot Pilot (scattered และ Edge Pilots) ต่อ OFDM Symbol
B_{BP}	คือ กำลังของ Boost Pilot ที่สัมพันธ์กับ เซลล์ข้อมูล มีค่าเท่ากับ A_{BP}^2
N_{CP}	คือ จำนวนของ Continual Pilot ต่อ OFDM Symbol
B_{CP}	คือ กำลังของ Continual Pilot ที่สัมพันธ์กับ เซลล์ข้อมูล มีค่าเท่ากับ A_{CP}^2

สมการที่ 3.29 และ 3.30 ได้มาจาก Symbol ข้อมูลแบบปกติ แต่ P1 P2 และข้อมูล สำหรับการปิดเฟรม ถูกออกแบบมาให้ใช้กำลังงานเทียบเท่ากับ Symbol แบบปกติ (มีความแตกต่างกันเพียง 0.1 dB) ดังนั้นสมการจึงสามารถใช้ได้กับ T2-frame ค่า Δ_{BP} จะอยู่ระหว่าง 0.29 dB – 0.53 dB โดยค่าที่ได้เป็นการรวมกันระหว่างค่า FFT size กับค่าของ Scattered Pilot Pattern PP1-PP8

3.6.4 ผลที่ได้จากการประมาณค่าช่องสัญญาณที่ใช้งานจริง

ผลที่ได้จากแบบจำลองจากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ผลของการสันนิษฐานว่าภาครับมีความสมบูรณ์ ปราศจากการรบกวนในช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นเพียงทางอุดมคติและไม่สามารถใช้งานจริงได้ ในการใช้งานจริง เครื่องรับมีความหลากหลายในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม ต้องนำมาพิจารณาว่าทำอย่างไรจะให้ผลของการรับใกล้เคียงกับทางผลของทางอุดมคติภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องรับในทางปฏิบัติใช้สำหรับการรับสัญญาณให้ได้เหมือนกับ คอนสเทลเลชัน ที่ถูกส่งมา ดังนั้นสัญญาณที่รับได้สามารถนำมาเปรียบเทียบความเป็นไปได้ของจุด คอนสเทลเลชัน ต่าง ๆ ที่ทำการส่งไป เพื่อให้ภาครับสามารถรับข้อมูลที่ถูกต้องของแต่ละเซลล์ ซึ่งการตีמודูเลเตอร์ความแรงสัญญาณที่รับได้ของแต่ละเซลล์ จะบอกถึงการประมาณค่าการตอบสนองช่องสัญญาณ ถ้าการประมาณค่ามีความถูกต้องแม่นยำ (ไม่มีความผิดพลาดและไม่มีสัญญาณรบกวน) ค่านี้จะใช้อ้างอิงกับสัญญาณที่ถูกส่งมาบวกกับสัญญาณรบกวนที่เพิ่มเข้ามาที่สัญญาณที่รับได้

ในทางปฏิบัติ การประมาณค่ามีความยุ่งยากอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของการแก้ไข และการเกิดการรบกวนสัญญาณ Pilot การรบกวนที่เกิดขึ้นทำให้ได้ช่องสัญญาณไม่สมบูรณ์และมีความไม่เป็นเชิงเส้น ผลกระทบจากการประมาณค่าที่ไม่สมบูรณ์จะมีผลเป็นอย่างมากต่อจุดบน คอนสเทลเลชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของด้านนอกมากกว่าส่วนที่อยู่ด้านใน อย่างไรก็ตาม การแก้ไขให้ถูกต้องนั้น จะสามารถทำได้ก็ต่อเมื่อมีการประมาณค่าสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณถูกรวมเข้าว่าเป็นผลกระทบ ถ้าหากไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในการคำนวณได้นั้น จะทำให้ไม่สามารถหาเหตุผลในการหาความสูญเสียประสิทธิภาพในช่องสัญญาณ และไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องได้

อย่างไรก็ตาม การใช้งานเซลล์ Pilot ในระบบ DVB-T2 โดยทั่วไป การเพิ่มกำลังถูกเปรียบเทียบกับเซลล์ข้อมูล ซึ่งหมายความว่า อัตราส่วนของสัญญาณที่รับได้ส่วนด้วยสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ จะได้รับการแก้ไขได้ดีที่สุดมากกว่าการแก้ไขโดยเซลล์ข้อมูล ช่องสัญญาณในการวัดนั้นจะใช้เซลล์ Pilots ที่ถูกสอดแทรกเข้ามา เพื่อใช้ในการประมาณค่าช่องสัญญาณสำหรับเซลล์ข้อมูลทั้งหมด สัญญาณรบกวนของการประมาณค่าช่องสัญญาณเป็นฟังก์ชันของการเพิ่มความแรงของสัญญาณ Pilot และการออกแบบแก้ไข สมมติว่าการแก้ไขดังกล่าวเปลี่ยนระดับกำลังของสัญญาณรบกวนพื้นฐานของสัญญาณ Pilot ซึ่งตรวจวัดได้จากอัตราการขยายของสัญญาณรบกวน f_{INT} ดังนั้น ถ้า $f_{INT} < 1$ สอดคล้องกับการลดระดับของสัญญาณรบกวน สมมติให้สัญญาณรบกวนถูกเพิ่มเข้าไปในทุกเซลล์ทั้งเซลล์ Pilot และเซลล์ข้อมูลด้วยความแรงที่เท่ากัน ดังนั้นจะสามารถหาค่า SNR ในลักษณะอัตราส่วนกำลังงานแบบเชิงเส้นสำหรับเซลล์ข้อมูล และการสอดแทรกในช่องสัญญาณเพื่อการประมาณค่า ดังสมการที่ 3.31

$$SNR_{Channel-Estimate} = \frac{(A_{SP}^2)SNR_{Data}}{f_{INT}} = \frac{B_{BP}SNR_{Data}}{f_{INT}} \quad (3.31)$$

จากการประมาณค่ากำลังงานของสัญญาณรบกวนที่เพิ่มเข้าไปเราสามารถประมาณค่า SNR ของเซลล์ข้อมูล ที่ทำให้เสมอกันได้ดังสมการที่ 3.32

$$\frac{1}{SNR_{EQ-data}} \approx \frac{1}{SNR_{data}} + \frac{1}{SNR_{Channel-Estimate}} \approx \frac{1}{SNR_{data}} \left(1 + \frac{f_{INT}}{B_{BP}}\right) \quad (3.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น Δ_{BP} คือ ผลกระทบจาก Pilot boosting บนความสัมพันธ์ของ SNR ระหว่างเซลล์ข้อมูล และ SNR ทั้งหมด หลังจากนั้นการกำหนดตัวแปรสำหรับการแก้ไขต่อไป คือ Δ_{RCE} ดังนั้นจะได้ค่าทั้งหมดของ CNR ที่ต้องการสำหรับการใช้งานจริง การประมาณค่าสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณสามารถสรุปได้ดังสมการที่ 3.33 และ 3.34

$$CNR = [CNR]_0 + \Delta_{BP} + \Delta_{RCE} \quad (3.33)$$

$$\Delta_{RCE} = 10 \log_{10} \frac{SNR_{data}}{SNR_{EQ-data}} = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{f_{INT}}{B_{BP}} \right) \quad (3.34)$$

การกำหนด B_{BP} จะถูกกำหนดโดยการเลือกรูปแบบ Pilot pattern ซึ่งจะได้ค่า 16/9, 49/16, 49/9 ซึ่งได้จากการเลือก Pilot pattern PP1 และ 2, PP3 และ 4, PP5 ถึง 8 ตามลำดับ f_{INT} ขึ้นอยู่กับการสอดแทรก ในความเป็นจริงได้กำหนดอย่างชัดเจนสำหรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเซลล์ต่อเซลล์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เหล่านี้ในลักษณะ 2 มิติของ Scatter Pilot โดยจะสอดคล้องกันสำหรับเฟสของความถี่และการแก้ไขข้อผิดพลาด ซึ่งรูปแบบของค่าเฉลี่ยจะใช้เพียงค่าเดียว โดยรวมเข้าไปในสมการสำหรับค่าของความถี่และการแก้ไขข้อผิดพลาด

ตามหลักการ การออกแบบความกว้างของเวลา/แบนด์วิดท์ (สำหรับความถี่/การแก้ไขข้อผิดพลาด) ได้ลดการเปรียบเทียบกับข้อจำกัดของ Nyquist ดังนั้นความสอดคล้องของอัตราขยายของการรบกวนจะลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Pilot patterns ที่ถูกเลือกจะสัมพันธ์กับค่า Guard intervals ที่ใช้ เพื่อให้สามารถใช้งานได้ภายใต้ข้อจำกัดของ Nyquist ซึ่งจะมีสัญญาณรบกวนต่ำมาก และสามารถทำให้บรรลุผลโดยการแก้ไขความถี่ เว้นแต่จะปรับช่วงกว้างของเวลาเพื่อให้ได้ช่องสัญญาณที่เหมาะสม

เมื่อใช้การแก้ไขข้อผิดพลาด ซึ่งคาดว่าจะได้รับการแก้ไขในแบบเชิงเส้น ซึ่งมีประโยชน์สำหรับอัตราการขยายของสัญญาณรบกวนสำหรับสัญญาณ Pilot เหล่านี้

สำหรับ Pilot pattern ที่ $D_T = 4$ (PP1, PP3, PP5 และ PP7) จะทำให้เกิดอัตราขยายของสัญญาณรบกวน (1, 0.625, 0.5, 0.625) ซึ่งค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.6875

สำหรับ Pilot pattern ที่ $D_T = 2$ (PP2, PP4 และ PP6) จะทำให้เกิดอัตราขยายของสัญญาณรบกวน (1, 0.5) ซึ่งค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.75

3.7 ฟังก์ชันของเกณฑ์โครงข่ายความถี่เดียว

รูปแบบการสัญญาณแบบไร้สาย แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ช่องสัญญาณแบบราบเรียบ (Flat-fading channel) และช่องสัญญาณแบบเลือกความถี่ (Frequency-selective fading channel) [52] สำหรับช่องสัญญาณแบบราบเรียบ ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการจางหายแบบแบนด์กว้าง โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของความแรงสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดจะจางหาย การจางหายเหล่านี้ สามารถแสดงให้เห็นได้โดยไดอะแกรมของการกระจายตัวทางเวลา ซึ่งสามารถใช้ตรวจวัดการกระจายตัวทางเวลาของสัญญาณแบบหลายวิถี การตรวจวัดการกระจายตัวของช่องสัญญาณสามารถใช้ในการพิจารณาเกณฑ์ของโครงข่ายความถี่เดียว ได้โดยผมตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.35

$$h_s(t) = \sum_{i=1}^L \alpha_i \delta(t - \tau_i), \quad (3.35)$$

กำหนดให้

h_s คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ

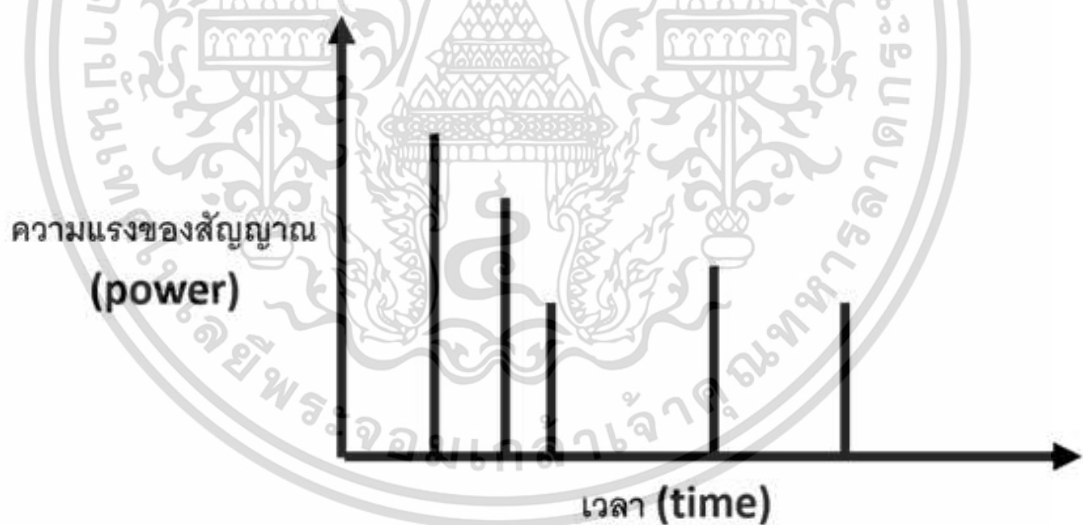
L คือ จำนวนของคลื่นสะท้อน

α_i คือ ค่าอัตราการขยาย

δ คือ ฟังก์ชันเดลต้าดิแรก (Dirac delta function)

τ_i คือ ค่าการประวิงเวลา

การประวิงเวลาของสัญญาณที่รับได้เกิดขึ้นจาก การสะท้อนจากสิ่งกีดขวาง อาคาร ภูเขา และสิ่งแวดล้อมอื่น การสะท้อนสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้สัญญาณเดินทางมาถึงล่าช้า แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การประวิงเวลาในช่องสัญญาณของการแพร่กระจายสัญญาณ [2]

ในแต่ละผลตอบสนองสัญญาณอิมพัลส์สอดคล้องกับความล่าช้าของแต่ละเส้นทางที่สัญญาณเดินทางมาถึงเครื่องรับ ในกรณีสำหรับความถี่ของสัญญาณคงที่ ผลของความล่าช้าสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณเกิดจากการหมุนของเฟสของสัญญาณ แต่ละการประวิงเวลาของสัญญาณจะสอดคล้องกับการหมุนของเฟส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการเสริมและการหักล้างของสัญญาณ อันจะนำไปสู่การสร้างหรือลดการเกิดการรบกวน สัญญาณเหล่านี้ถูกนำเสนอในรูปของเฟส โดยแต่ละเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณจะแสดงในรูปแบบความยาวของเวกเตอร์โดยสอดคล้องกับกำลังงานของสัญญาณและมุมที่สอดคล้องของเฟส สัญญาณที่รับได้จะสอดคล้องกับผลรวมของเวกเตอร์ของเฟสของสัญญาณหลายวิถี

เมื่อผลรวมของเฟสใหญ่กว่าสัญญาณที่เฟสศูนย์ (Direct path signal) ซึ่งจะทำให้มีอัตราการขยายโดยจะได้อาจมาจากสัญญาณเดิมที่สะท้อนมาหรือจากเครื่องส่งซึ่งอยู่ในโครงข่ายเดียวกัน เช่น ในกรณีการส่งสัญญาณแบบโครงข่ายความถี่เดียว เส้นทางของสัญญาณเมื่อมีหลากหลายความถี่ถูกส่งมาในรูปแบบจำนวน n ซิมโบลย่อย s_k เขียนได้ตามสมการดังนี้

$$S_{MT}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} s_k h_t(t) e^{j\omega_k t} \quad (3.36)$$

สำหรับ OFDM $\omega_k = 2\pi k f_0$ และ N คือจำนวนความถี่ย่อยซึ่งถูกมอดูเลตด้วยข้อมูลสตรีมแบบขนานจำนวน N โดยจำนวนความถี่ย่อย แสดงรายละเอียดตามเอกสารอ้างอิง [53]

$$\phi_k(t) = e^{j2\pi f_k t} \quad (3.37)$$

เมื่อ f_k คือ ความถี่หมายเลข k จากจำนวนความถี่ย่อยของ OFDM โดย OFDM Symbol เดียวที่ถูกมอดูเลตเข้ากับความถี่ย่อยทั้ง N จำนวน แสดงดังสมการที่ 3.38

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \phi_k(t) \quad (3.38)$$

เมื่อกำหนดให้ x_k คือ ซิมโบลข้อมูลของหมายเลข k สูตรนี้จะถูกต้องเมื่อค่าของ t สั้นกว่าความยาวของ Symbol เพื่อที่จะให้จำนวนความถี่ย่อยที่ตั้งฉากกันอยู่ภายในขอบเขต ค่า f_t ควรจะเท่ากับค่า k ทหารด้วยความยาวของ Symbol จากสมการนี้ สัญญาณรบกวนและการจางหายของสัญญาณถูกยกเว้นไม่ได้นำมาคำนวณด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการเสื่อมถอยของกำลังงานได้ในกรณีที่พลังงานส่วนประกอบบางส่วนหายไป โดยจะเห็นได้ค่าค่า SNR ที่ได้มักจะมีค่าต่ำกว่าพลังงานรวมแบบหลายวิถี [54] โดย Symbol นั้นจะถูกตีมอดูเลตด้วย DFT ด้วยวิธีการ FFT ซึ่งได้มาจากแปลงลาปลาซในทางปฏิบัติ

การที่จะสามารถประสบความสำเร็จในการรับสัญญาณในช่วงเวลาป้องกันนั้น อ้างอิงได้จากจุด QEF (Quasi Error Free) [55] ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องรับสามารถทำการแก้ไขสัญญาณที่รับมาได้ภายใต้ผลกระทบจากสัญญาณสะท้อนหรือไม่ โดยมีสองตัวแปรที่สำคัญ คือ ค่าประวิงเวลาของสัญญาณสะท้อน และค่ากำลังงานของสัญญาณสะท้อน ซึ่งจะมีผลอย่างยิ่งสำหรับประสิทธิภาพของการรับสัญญาณของโครงข่ายความถี่เดียว

3.8 การประเมินผลและการแก้ไขช่องสัญญาณ

ถึงแม้ว่าการรับสัญญาณที่เครื่องรับอาจมีความสมบูรณ์เรียบร้อย แต่สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากภาค FFT ดิมอดูเลเตอร์อาจไม่ได้เหมือนกับสัญญาณอินพุทต้นฉบับ สัญญาณคลื่นพาห์ที่รับได้อยู่ในเทอมของแอมพลิจูดและเฟสที่ถูกดิมอดูเลชันอาจได้ผลกระทบจากผลการตอบสนองช่องสัญญาณ ความซับซ้อนของความแรงสัญญาณของคลื่นพาห์สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.39

$$Y_{k,l} = H_{k,l}X_{k,l} + N_{k,l} \quad (3.39)$$

กำหนดให้

- $Y_{k,l}$ คือ ความแรงของสัญญาณที่รับได้
- $H_{k,l}$ คือ ผลตอบสนองความถี่
- $X_{k,l}$ คือ สัญญาณมอดูเลชัน Symbol ที่ส่งมา
- $N_{k,l}$ คือ สัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ
- k คือ ความถี่
- l คือ Symbol

เนื่องจากเครื่องรับสามารถรับสัญญาณอ้างอิงได้จาก Continual Pilots และ Scattered Pilots การประมาณช่องสัญญาณจะประสบความสำเร็จได้จากการรับรู้ข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งมาจาก Pilot cells เหล่านั้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$H'_{k,l} = \frac{Y_{k,l}}{C_{k,l}} = H_{k,l} + \frac{N_{k,l}}{C_{k,l}} \quad (3.40)$$

กำหนดให้

- $C_{k,l}$ คือ ความแรงของสัญญาณอ้างอิง Pilot cells
- $H'_{k,l}$ คือ ผลตอบสนองช่องสัญญาณที่ได้รับการแก้ไขที่ดีที่สุด

3.9 การวิเคราะห์การรับสัญญาณ DVB-T2 ในห้องปฏิบัติการ

ในหัวข้อนี้ จะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณและอธิบายถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยจะแบ่งเป็นหัวข้อย่อย เพื่ออธิบายถึงค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ค่าความผิดพลาดในการมอดูเลต (MER) รวมไปถึงวิธีการตรวจวัดสัญญาณและเก็บข้อมูล

3.9.1 เกณฑ์ขั้นต่ำของสัญญาณที่ยังสามารถรับภาพได้

เนื่องจากการมอดูเลตของการส่งโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัลต้องใช้ในการส่งข้อมูลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้การมอดูเลตแบบ QAM (Quadrature amplitude modulation) หรือ PSK (Phase-shift keying) พื้นฐานในการส่งสัญญาณลักษณะนี้เป็นแบบคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous wave: CW) โดยประกอบไปด้วยสัญญาณ IQ ซึ่งสัญญาณ IQ นี้ ตามปกติจะมีลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนตัวออกนอกเฟสของคลื่นความถี่คลื่นหาท์ ผลจากการที่เฟสและแอมพลิจูดของ IQ เปลี่ยนไปนี้ จะทำให้สามารถสร้างจุดบน แผนภาพคอนสเทลเลชัน โดยจุดนั้น ๆ เป็นตำแหน่งของ Symbol ของ ข้อมูลที่ต้องการส่งไป ด้วยเหตุนี้สำหรับการส่งโทรทัศนแบบดิจิทัลนั้น การวัดความแรงของคลื่นพาห้ ต่อสัญญาณรบกวนจึงมีสำคัญ เนื่องจากถ้าคลื่นที่วัดได้มีความแรงกว่าสัญญาณรบกวนมาก ก็จะทำให้ การสร้างจุดบน แผนภาพคอนสเทลเลชัน มีความเที่ยงตรงและทำให้สามารถถอดรหัสได้อย่างถูกต้อง หรืออาจได้กล่าวได้ว่าเป็นการแสดงถึงคุณภาพของการมอดูเลชัน ดังนั้นการหาค่าความแรงสัญญาณ ชั้นต่ำของ CNR (Carrier-to-noise ratio) จึงมีความสำคัญต่อการรับรู้ถึงประสิทธิภาพของการรับ สัญญาณ โดยค่า CNR ชั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้คำนวณได้ตามสมการที่ 3.41

$$\text{CNR} = P_{min} - F - 10\log(kT_0B) \quad (3.41)$$

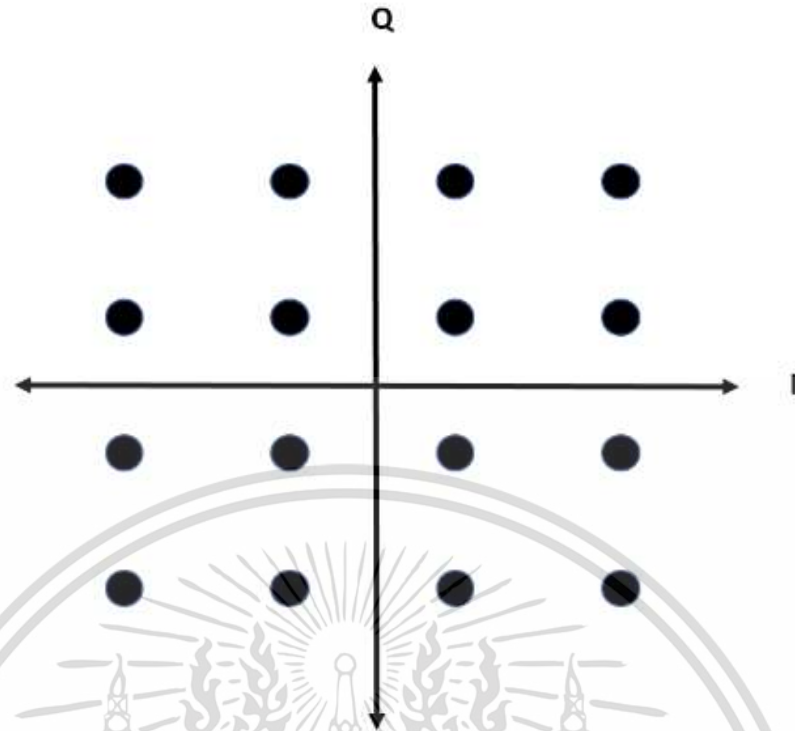
กำหนดให้

CNR	คือ สัญญาณคลื่นหาท์ต่อสัญญาณรบกวน (dB)
P_{min}	คือ สัญญาณชั้นต่ำที่อินพุทของเครื่องรับ (dB μ V)
F	คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องรับ (dB)
k	คือ Boltzmann constant = 1.38×10^{-23} Ws/K
B	คือ แบนด์วิดท์สัญญาณรบกวนของเครื่องรับ (Hz)
T_0	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ = 290 K

3.9.2 อัตราส่วนความผิดพลาดในการมอดูเลต

อัตราส่วนความผิดพลาดในการมอดูเลต (Modulation Error Ratio: MER) ใช้เป็นตัวชี้วัด ประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณสำหรับโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ไม่ว่าจะเป็นการตรวจวัดจาก จุดคัปปลิงมอนิเตอร์ของเครื่องส่ง หรือแม้กระทั่งการตรวจวัดจากการรับสัญญาณที่ออกอากาศ รูปแบบสัญญาณเป็นแบบ QAM โดยสัญญาณที่ทำการตรวจวัดจะอยู่ในรูปแบบของ แผนภาพคอนสเทลเลชัน ดังรูปที่ 3.4 โดยสามารถทำการตรวจวัดค่าที่สำคัญอื่น ๆ ได้อีกเช่น เช่น สัญญาณรบกวน ความผิดพลาดทางเฟส ความผิดพลาดทางความถี่ และการผิดเพี้ยนต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นความผิดพลาดในการมอดูเลต ซึ่งก็คือค่าความผิดพลาดของ เวกเตอร์ (Error Vector) ซึ่งสามารถอ่านได้จากสัญญาณ IQ โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าในอุดมคติกับค่าที่วัดได้จริง โดยได้จากผลรวมกำลังสองของขนาดเวกเตอร์สัญญาณในอุดมคติ (I_j, Q_j) หาร ด้วยผลรวมกำลังสองของขนาดเวกเตอร์สัญญาณที่ผิดพลาด ($\delta I_j, \delta Q_j$) โดยจะมีหน่วยเป็น dB ดังนั้น ค่า MER จึงเท่ากับ อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square: RMS) ระหว่างสัญญาณ อ้างอิงกับสัญญาณที่มีเวกเตอร์ผิดพลาดไปจากสัญญาณอ้างอิง ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.42



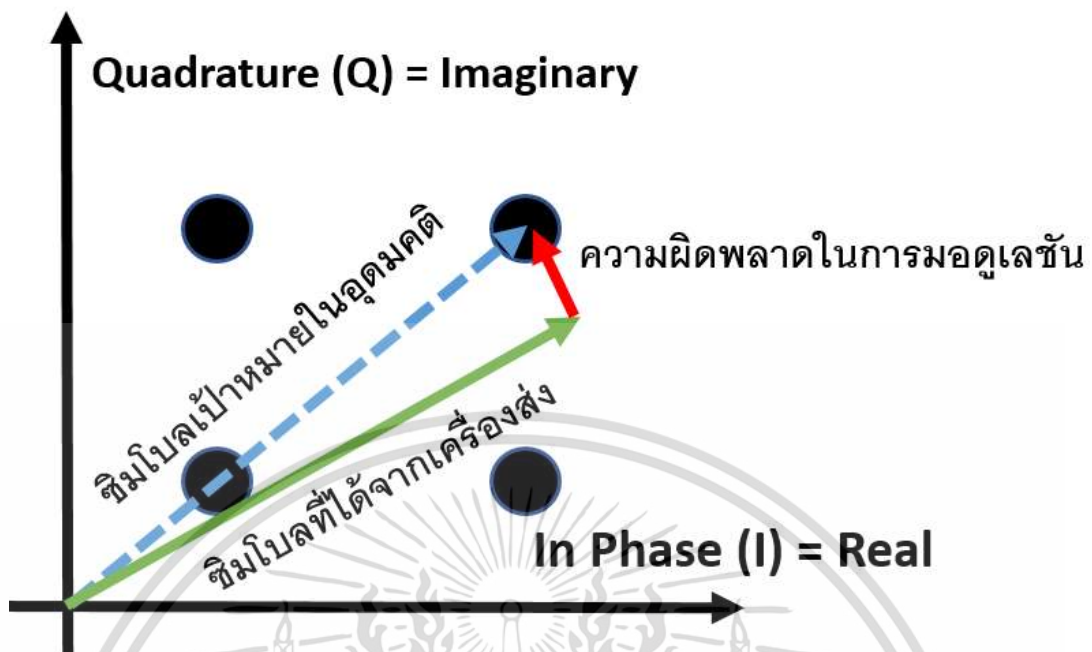
รูปที่ 3.4 แผนภาพคอนสเทลเลชัน สำหรับการมอดูเลชันแบบ 16-QAM [1]

$$MER = 10 \log \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right\} \quad (3.42)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ MER ใช้สำหรับการตรวจสอบผลของการรบกวนในช่องสัญญาณการรับ ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ MER มีค่าสูง หมายความว่าช่องสัญญาณในการรับมีการรบกวนมาก และเมื่อการรบกวนในช่องสัญญาณน้อยจะแสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ MER มีค่าต่ำเช่นกัน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ MER แสดงดังสมการที่ 3.43

$$\sigma_{MER} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{MERi} - \bar{x}_{MER})^2}{N}} \quad (3.43)$$

เมื่อ σ_{MER} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ MER, x_{MERi} คือ ค่า MER ที่ได้ที่ตำแหน่งความถี่คลื่นพาห์ย่อย i ต่าง ๆ, \bar{x}_{MER} คือ ค่าเฉลี่ยของ MER จากความถี่ย่อยทุกตำแหน่ง และ N คือจำนวนคลื่นพาห์ย่อย ทั้งหมด



รูปที่ 3.5 ความผิดพลาดในการมอดูเลต [7]

3.10 กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล

การประมวลผลประสิทธิภาพการส่งโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัล DVB-T2 สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว นั้น ใช้การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแถบสเปกตรัมความถี่ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของแต่ละ MUX ซึ่งในที่นี้คือแบนด์วิดท์ขนาด 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างความแรงของสัญญาณที่รับได้ในระดับปกติกับความแรงขั้นต่ำของสัญญาณที่ยังคงสามารถถอดรหัสสัญญาณภาพได้ โดยอ้างอิงจากจุด QEF ทำการทดสอบความสัมพันธ์ของทั้งสองสัญญาณด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หลังจากนั้นได้เลือกใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Polynomial regression model) เพื่อทำนายพฤติกรรมของการแพร่กระจายสัญญาณแบบโครงข่ายความถี่เดียว จากผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าประวิงเวลาระหว่างสถานีในโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งจะมีผลทำให้เครื่องรับได้รับสัญญาณจากแต่ละเครื่องส่งในเวลาไม่เท่ากัน แต่มีข้อแม้ว่าต้องอยู่ในช่วงเวลาป้องกันเดียวกัน การตรวจสอบแบบจำลองที่เลือกใช้ว่ามีความเหมาะสมอย่างไร ใช้วิธีการวิเคราะห์ส่วนที่เหลือ (Residual analysis) รายละเอียดกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.10.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังงานของสเปกตรัม

ผลของการประวิงเวลาของสัญญาณจากเครื่องส่งสองเครื่องหรือหลาย ๆ เครื่องที่ส่งมาถึงเครื่องรับในเวลาที่ไม่เท่ากันมีผลกระทบโดยตรงกับการรับสัญญาณจากโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การรับสัญญาณที่เครื่องรับมีคุณภาพที่ต่ำลง โดยผลกระทบจะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อการไม่เท่ากันนี้เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดเบือนของสัญญาณ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวิงเวลาของสัญญาณเข้าใกล้ $0 \mu\text{s}$ หรือที่เรียกว่าช่องสัญญาณ 0 dB echo ซึ่งเป็นจุดที่สัญญาณที่รับได้จากทั้งสองเครื่องส่งจะมีการหักล้างกันอย่างรุนแรง ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสเปกตรัมแบนด์วิดท์ในช่วง 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของช่องสัญญาณถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ที่สัญญาณการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว เมื่อค่าการประวิงเวลาระหว่างสองเครื่องส่งเปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาป้องกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของแถบสเปกตรัมใช้แบ่งแยกลักษณะช่องสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมเปรียบเทียบกับลักษณะช่องสัญญาณ [3]

Spectrum Variation (dB)	Channel
$0 \leq \sigma_{sp} \leq 1$	Gaussian
$1 \leq \sigma_{sp} \leq 3$	Rician
$\sigma_{sp} \geq 3$	Rayleigh

การหาค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมในแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของแต่ละ MUX ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าการประวิงเวลาระหว่างเครื่องส่งทั้งสองที่ใช้ในการทดลองการส่งสัญญาณแบบโครงข่ายความถี่เดียว ตัวอย่างเช่นการทดลองความถี่ 514 เมกกะเฮิร์ตซ์ จะมีช่วงอัตราการสุ่มจากความถี่ 509.701 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 517.943 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยจะมีช่วงคาบที่ห่างกันเท่ากับ 86 kHz จะได้เท่ากับ 94 ตัวอย่างตลอดช่วงแบนด์วิดท์สเปกตรัม 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ทำการเก็บข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมทั้งหมด 20 ครั้งสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าการประวิงเวลาแต่ละครั้ง ทำให้ได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมทั้งสิ้น 1,880 ตัวอย่าง ทำการเก็บข้อมูลโดยเปลี่ยนแปลงการประวิงเวลาไปทุก ๆ $10 \mu\text{s}$ จนถึง $270 \mu\text{s}$ ครอบคลุมตลอดช่วงเวลาป้องกันที่ $266 \mu\text{s}$ สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว แสดงตามสมการที่ 3.44 และ 3.45

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n), \quad (3.44)$$

กำหนดให้

\bar{p} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังงานแถบสเปกตรัมแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ หน่วยเป็น dB

N คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างกำลังงานในแถบสเปกตรัม

$p(n)$ คือ ตัวอย่างกำลังงานในแถบสเปกตรัมสเปกตรัมแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{sp} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (p_i - \bar{p})^2}{N-1}} \quad (3.45)$$

กำหนดให้

- σ_{sp} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังงานแถบสเปกตรัมแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ หน่วยเป็น dB
- N คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างกำลังงานในแถบสเปกตรัม
- p_i คือ ตัวอย่างกำลังงานในแถบสเปกตรัมแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์
- \bar{p} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังงานแถบสเปกตรัมแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ หน่วยเป็น dB

3.10.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ความสัมพันธ์ของผลการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินระบบ DVB-T2 สำหรับการส่งแบบโครงข่ายความถี่เดียว ระหว่างการรับสัญญาณด้วยความแรงปกติกับการรับสัญญาณด้วยค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สามารถตรวจสอบได้โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) การทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างสองสัญญาณดังกล่าวนี้ จะทำให้เข้าใจถึงลักษณะทางพฤติกรรมและผลกระทบของสัญญาณที่รับได้ ว่ามีความเหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทั้งสองแบบ แสดงดังสมการที่ 3.46

$$\rho_{X,Y} = \text{corr}(X,Y) = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3.46)$$

เมื่อกำหนดให้ ρ คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดย X และ Y คือ ค่าตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ ในขณะที่ μ_X กับ σ_X คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ X โดยที่ μ_Y กับ σ_Y คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Y

เมื่อข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเป็นข้อมูลลักษณะเป็นชุดข้อมูล X และ Y สามารถเขียนได้เป็น x_i และ y_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$, ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตัวอย่างสามารถใช้ในการประมาณค่าสหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation) r ระหว่าง X และ Y ซึ่งสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.47

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.47)$$

เมื่อกำหนดให้ \bar{x} และ \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม X และ Y ส่วน s_x และ s_y คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร X และ Y

3.10.3 แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

การประมาณค่าของการทำนายคุณภาพสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้นสำหรับการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของสัญญาณที่ได้จากการทดลอง โดยทำการตรวจวัดค่าการประวิงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาป้องกัน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดสัญญาณในช่วงการประวิงเวลาต่าง ๆ มีค่าที่แตกต่างกันเป็นอย่างมากในบางช่วงของการประวิงเวลา การเลือกใช้แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมสอดคล้องเป็นอย่างดีสำหรับข้อมูลของสัญญาณที่ได้ซึ่งมีความผันผวนสูง

แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ ถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม ค่า CNR สำหรับความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ค่า MER และ Noise margin โดยสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 3.48

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_m x^m + \varepsilon \quad (3.48)$$

เมื่อกำหนดให้ $i = 1, 2, \dots, n$ โดย y คือ ผลตอบสนองของแบบจำลองถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ในขณะที่ x คือ ค่าตัวแปรพารามิเตอร์ β คือ ค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์ และ ε คือ ค่าความผิดพลาด ดังแสดงตามสมการที่ 3.49

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^m \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \dots & x_3^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

เมื่อเขียนในรูปแบบเมทริกซ์จะได้รูปแบบดังสมการที่ 3.50 หลังจากนั้นทำการคูณด้วยทรานสโพสเมทริกซ์ของ $[X]$ จะได้ตามสมการที่ 3.51 เพื่อนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ของเมทริกซ์ $[\beta]$ ตามสมการที่ 3.52 ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้งาน

$$[Y] = [X][\beta] + [\varepsilon] \quad (3.50)$$

$$[Y] = [X][\beta] \quad (3.51)$$

$$[\beta] = [X]^{-1}[Y] \quad (3.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.3.1 กฎของคราเมอร์

กฎของคราเมอร์ (Cramer's rule) ใช้ในการแก้ปัญหาสมการเชิงเส้น เพื่อใช้ในการหาค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยใช้การหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ X ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ β_i ดังแสดงตามสมการที่ 3.53

$$\beta_i = \frac{\det(X_i)}{\det(X)} \quad (3.53)$$

เมื่อกำหนดให้ X_i คือ เมทริกซ์ X ซึ่งแทนค่าด้วยคอลัมน์ i th จากคอลัมน์เวกเตอร์ Y หรือเมทริกซ์ Y

3.10.4 การวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ

หลังจากเลือกแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายแล้ว สิ่งที่ต้องทำต่อมาคือการทดสอบแบบจำลองที่เลือกว่ามีความเหมาะสมเพียงใดสำหรับการใช้งาน การตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าที่ตรวจวัดได้จริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองว่ามีความผิดพลาดอย่างไร ใช้วิธีการที่เรียกว่า การวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ (Residual analysis) ดังแสดงตามสมการที่ 3.54

$$e = y - \hat{y} \quad (3.54)$$

กำหนดให้

e คือ ค่าความผิดพลาดของการวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ

y คือ ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง

\hat{y} คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลองการทำนาย

โดย $\sum e = 0$

การพิจารณาความเหมาะสมของเส้นกราฟที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถตรวจสอบโดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางสถิติ ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียด ดังนี้

3.10.4.1 ผลรวมของค่ายกกำลังเนื่องจากความผิดพลาด

ค่าสถิตินี้ใช้สำหรับตรวจวัดความเบี่ยงเบนทั้งหมดของค่าตอบสนองของเส้นกราฟที่เหมาะสม หรือเรียกว่า ผลรวมของค่ายกกำลังของค่าเศษเหลือ โดยแสดงตามสมการที่ 3.55

$$SSE = \sum_{i=1}^n \{w_i(y_i - f_i)^2\} \quad (3.55)$$

กำหนดให้

y_i คือ ค่าที่ตรวจวัดได้จริง

f_i คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

w_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละข้อมูล ตามปกติมีค่าเท่ากับ 1

ค่าที่เข้าใกล้ศูนย์จะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย และสามารถนำมาใช้เพื่อการทำนายได้

3.10.4.2 R-Square

ค่าทางสถิตินี้ใช้เพื่อตรวจสอบการประสบความสำเร็จในการเลือกใช้เส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลในการอธิบายข้อมูลที่มีเปลี่ยนแปลง หรือกล่าวได้ว่า R-Square คือ กำลังสองของค่าสหสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองข้อมูลและค่าผลตอบสนองของการทำนาย โดยยังสามารถเรียกว่าค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์พหุสหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์ของพหุดีเทอร์มิแนนต์ แสดงให้เห็นดังสมการที่ 3.56

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \{w_i (y_i - f_i)^2\}}{\sum_{i=1}^n \{w_i (y_i - y_{av})^2\}} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.56)$$

กำหนดให้

f_i คือ ค่าการทำนายที่ได้จากเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล

y_{av} คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากข้อมูลที่สังเกต

y_i คือ ค่าที่ตรวจวัดได้จริง

w_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละข้อมูล ตามปกติมีค่าเท่ากับ 1

SSE คือ ผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาด

SST คือ ผลรวมกำลังสองทั้งหมด

R-Square สามารถมีค่าได้จาก 0 ถึง 1 โดยเมื่อมีค่าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงในการทำนายข้อมูลจริง

3.10.4.3 Adjusted R-Square

การตรวจสอบค่า R-Square ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ใช้วิธีการที่เรียกว่า Adjusted R-Square ซึ่งทำได้โดยการลดจำนวนข้อมูลลง 1 ชุด แล้วทำการคำนวณค่า R-Square ใหม่ โดยหากผลที่ได้มีค่าต่ำกว่า R-Square มากเกินไปก็สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่เลือกใช้มีโอกาสที่จะมีความผิดพลาดสูงในการทำนาย อันเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์และจำนวนพารามิเตอร์อาจมีค่าน้อยเกินไป ค่าที่เหมาะสมสำหรับ Adjusted R-Square สำหรับแบบจำลองที่ดีควรจะมีค่าต่ำกว่า R-Square เล็กน้อย สมการ Adjusted R-Square และค่าที่เหมาะสมควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ดังแสดงตามสมการที่ 3.57

$$\text{Adjusted R} - \text{Square} = 1 - SSE(n - 1)/SST \quad (3.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ $SSE(n - 1)$ คือการลดจำนวนข้อมูลลง 1 ชุด

3.10.4.4 ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error :MSE) ใช้สำหรับแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอย โดยใช้การประมาณค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนประกอบอิสระของข้อมูล โดยเขียนได้ดังสมการที่ 3.58

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{SSE}{v}} \quad (3.58)$$

เมื่อกำหนดให้ MSE คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของส่วนที่เหลือ และ v คือ จำนวนของชุดข้อมูลทั้งหมด

3.10.5 การวิเคราะห์การถดถอย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเบี่ยงเบนของลักษณะพื้นที่ภูมิประเทศในเส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปยังเครื่องรับจากเส้นทางต่าง ๆ ที่สัญญาณเดินทางไปถึงจากสองสถานีส่งสัญญาณในโครงข่ายความถี่เดียว เปรียบเทียบกับค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมอันเนื่องมาจากผลของเส้นทางที่สัญญาณเดินทางมาถึงยังเครื่องรับ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ดังแสดงในสมการที่ 3.59 และรูปที่ 3.6

$$g(x) = a_0 + a_1 x \quad (3.59)$$

โดย a_0 และ a_1 เป็นค่าคงตัวซึ่งจำเป็นต้องคำนวณหาค่าสำหรับการสร้างสมการเส้นตรงที่ลากผ่านข้อมูลทั้งหมดและมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

การหาค่าความผิดพลาดของเส้นตรงถดถอยแบบเชิงเส้นที่สร้างขึ้น หรือค่า E ที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูล สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

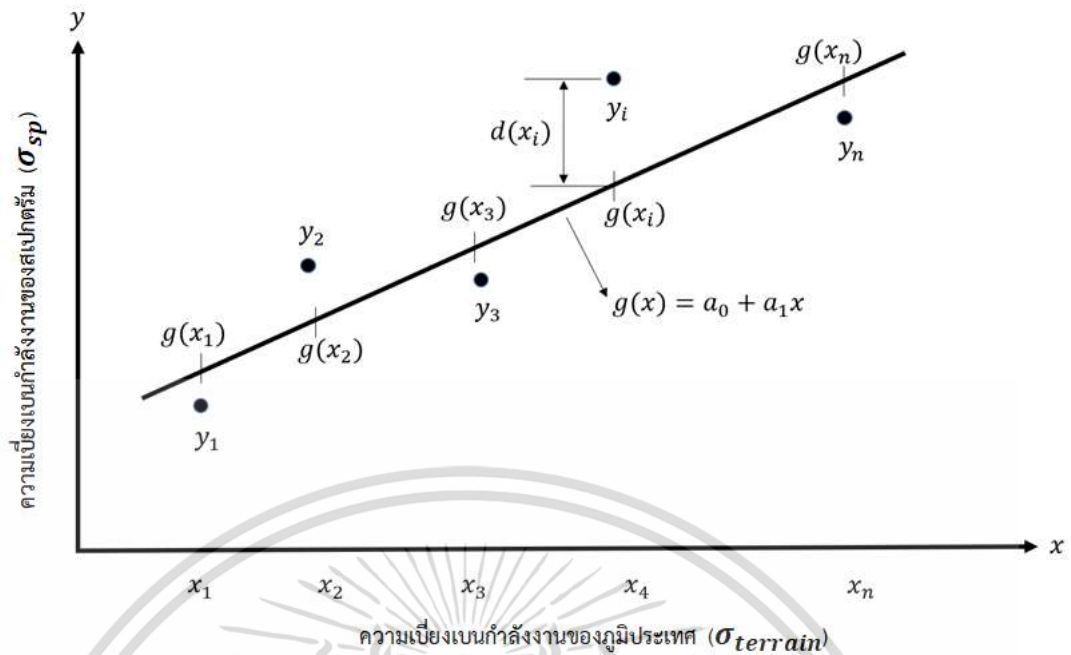
$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \quad (3.60)$$

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 \quad (3.61)$$

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 \quad (3.62)$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least-squares) ซึ่งได้จากวิธีการหาค่าขั้นต่ำ (Minimization) ของค่าความผิดพลาด จะได้ดังสมการที่ 3.63 และ 3.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลโดยมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด [3]

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0 \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0 \quad (3.64)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ 3.63 จะได้สมการที่ 3.64

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)](-1) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n a_0 - \sum_{i=1}^n a_1 x_i &= 0 \\ na_0 + (\sum_{i=1}^n x_i)a_1 &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \quad (3.63)$$

และจากเงื่อนไขในสมการที่ 3.64 จะได้สมการที่ 3.65

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)](-x_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n a_0 x_i - \sum_{i=1}^n a_1 x_i^2 &= 0 \\ (\sum_{i=1}^n x_i)a_0 + (\sum_{i=1}^n x_i^2)a_1 &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \quad (3.64)$$

สมการที่ 3.63 และ 3.64 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ สมการที่ 3.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

ใช้กฎของคราเมอร์เพื่อแก้สมการหาค่าคงตัว a_0 และ a_1 ได้ดังสมการที่ 3.66 และ 3.67

$$a_0 = \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.66)$$

$$a_1 = \frac{n(\sum_{i=1}^n x_i y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.67)$$

3.11 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์หลัก คือ การศึกษาแบบจำลองโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ศึกษาหลักการเลือกช่วงเวลาป้องกัน สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว การศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณของ ITU-R 1546 รวมไปถึงการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยกำลังที่สามารถรับได้ในพื้นที่ภูมิประเทศที่แตกต่างกัน การศึกษาการจางหายของสัญญาณจากการถูกบดบัง ศึกษาการทำงานของเทคโนโลยี OFDM ซึ่งเป็นพื้นฐานหลักสำหรับการมอดูเลชันในการส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล นอกจากนี้ยังมีการศึกษาแบบจำลองของการรบกวนสัญญาณโทรทัศน์ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพการออกอากาศของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

ในบทนี้ได้มีศึกษาการวิเคราะห์ช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 5 ช่องสัญญาณคือ ช่องสัญญาณ Gaussian ช่องสัญญาณ Rician ช่องสัญญาณ Rayleigh ช่องสัญญาณสำหรับการรับแบบเคลื่อนที่ตามมาตรฐาน TU-6 ช่องสัญญาณแบบ 0 dB Echo นอกจากนั้นได้อธิบายถึง ฟังก์ชันของอัตราขยายโครงข่ายความถี่เดียว การประเมินผลและการแก้ไขช่องสัญญาณ วิธีการวิเคราะห์การรับสัญญาณ DVB-T2 ในห้องปฏิบัติการ การหาจุดเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำของการรับสัญญาณ ได้อธิบายถึงการหาอัตราส่วนความผิดพลาดในการมอดูเลต นอกจากนั้น ได้อธิบายถึงวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เช่น การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังงานของสเปกตรัม การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการรับสัญญาณด้วยความแรงสัญญาณปกติและการรับสัญญาณด้วยความแรงสัญญาณขั้นต่ำ การประยุกต์ใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น การใช้เครื่องมือทางสถิติเพื่อวิเคราะห์จุดเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยการใช้วิธีการทางสถิติ เช่น การวิเคราะห์ด้วย R-Square การวิเคราะห์ด้วย Adjusted R-Square การใช้งานกฎของคราเมอร์ การวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ การประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน และในท้ายสุดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอการใช้งานการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการหาค่าชดเชยเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับ
สัญญาณได้จากข้อมูลการวัดสัญญาณในภาคสนามจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเกณฑ์ขั้นต่ำในการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบ ดิจิทัล มาตรฐาน DVB-T2 สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว

4.1 บทนำ

การรับสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียวในพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนามนั้น ค่าการประวิงเวลาของสัญญาณจะมีความแตกต่างหลากหลายเป็นอย่างมาก ซึ่งความล่าช้าของสัญญาณที่มาถึงยังเครื่องรับจากเครื่องส่งหลายเครื่องภายในโครงข่ายความถี่เดียว จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความเหมาะสมในช่วงการประวิงเวลาดังกล่าวในช่วงเวลาป้องกัน ตามที่ได้ทำการตั้งพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการออกอากาศไว้ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าสัญญาณที่มาจากหลายเครื่องส่งจะมีค่าประวิงเวลาที่ต่างกัน แต่หากสัญญาณที่รับได้จากเครื่องส่งเหล่านั้น ยังอยู่ภายใต้ช่วงเวลาป้องกัน เครื่องรับก็จะสามารถรับสัญญาณได้ตามปกติ งานวิจัยนี้นำเสนอเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยพิจารณาจากการรับสัญญาณจากเครื่องส่งหลายเครื่องที่ส่งสัญญาณมาภายในช่วงเวลาป้องกันเดียวกัน โดยในงานทดลองวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการส่งในแบบโครงข่ายความถี่เดียว โหมด SISO (Single Input Single Output) ทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าที่สำคัญต่าง ๆ คือ ค่ากำลังงานที่รับได้ อัตราความผิดพลาดต่อการมอดูเลต ความเป็ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัม Noise margin และอัตราส่วนคลื่นพาทต่อสัญญาณรบกวน (CNR) โดยการทดลองวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัญญาณที่รับได้แบบปกติกับค่าสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ด้วยวิธีการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เพื่อให้ทราบว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้แบบปกติกับสัญญาณที่รับได้แบบค่าขั้นต่ำมีความแตกต่างหรือเหมือนกันอย่างไร

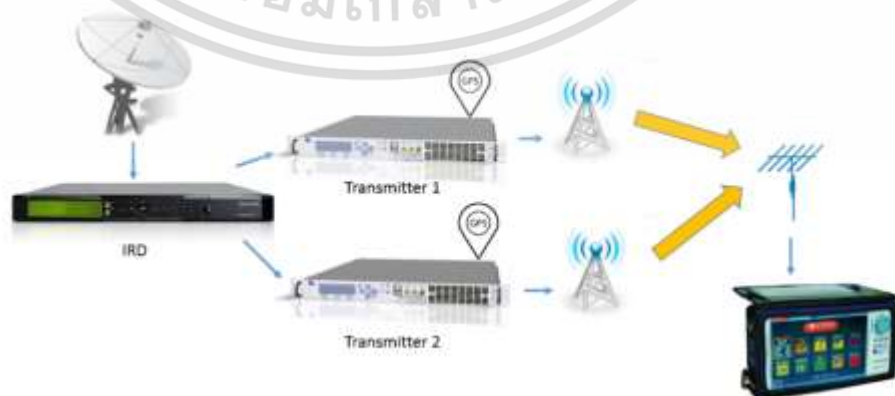
เนื่องจากการวิเคราะห์การประวิงเวลาการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 มีพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งมีความยุ่งยากสำหรับการตรวจวัดในพื้นที่การออกอากาศจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้จำลองการประวิงเวลาระหว่างเครื่องส่งภายในโครงข่ายความถี่เดียว ตลอดช่วงเวลาป้องกัน การทดลองใช้เครื่องส่งสองเครื่องโดยทำการเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาภายในเครื่องส่ง (Static delay) หลังจากนั้นทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์นำเสนอค่าขั้นต่ำของสัญญาณที่เครื่องรับยังสามารถรับภาพได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้กำลังงานในการออกอากาศที่เหมาะสมรวมถึงการวางแผนงานตั้งสถานีเสริมจุดต่อไป

4.2 ขั้นตอนวิธีการทดลองและการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีทดลองการส่งแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลด้วยโครงข่ายความถี่เดียว การทดลองจัดทำขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการชิงโครโนซ์ระหว่างเครื่องส่งสอง เครื่องภายใต้โครงข่ายความถี่เดียว ที่ทำการส่งสัญญาณมายังเครื่องรับในช่วงเวลาป้องกันเดียวกัน โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการจะแบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะทดลองประสิทธิภาพและคุณภาพของการส่งสัญญาณ ทำการตรวจสอบคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ค่าเกณฑ์โครงข่ายความถี่เดียว ค่าเกณฑ์ของ MER ค่าความผิดพลาดบิตก่อนทำการแก้ไขด้วย LDPC และค่า Noise margin [11] ในส่วนที่สอง เป็นการทดลองเพื่อนำเสนอค่าขั้นต่ำที่สามารถรับสัญญาณภาพได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว โดยทำการตรวจสอบค่าขั้นต่ำที่สามารถรับสัญญาณภาพได้ตลอดช่วงเวลาป้องกัน [56 – 57] และทำการนำเสนอแบบจำลองการทำนาย (Prediction model) สำหรับค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ของโครงข่ายความถี่เดียว ตลอดช่วงเวลาป้องกัน

4.2.1 ขั้นตอนการทดลองการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 4.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการใช้เครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล DVB-T2 สองเครื่องเพื่อทำการทดลองการแพร่กระจายสัญญาณแบบโครงข่ายความถี่เดียว โดยใช้เครื่องส่งยี่ห้อ Syes รุ่น PCM-1 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการทดลอง ได้มาจากห้อง Head-end จากส่วนกลางของ บมจ.อสมท สัญญาณที่ใช้ในการทดลองเป็นสัญญาณที่ใช้ในการออกอากาศจริง เนื่องจากการทดลองสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ต้องใช้สัญญาณ T2-MI ซึ่งเป็นสัญญาณที่ส่งพารามิเตอร์การมอดูเลตมาพร้อมกับการประทับเวลา (Time stamp) จากอุปกรณ์ GPS เพื่อให้สถานีเครื่องส่งที่ปลายทางสามารถใช้ในการชิงโครโนซ์กันของแต่ละเครื่องส่งในระหว่างโครงข่ายได้ สำหรับการทดลองนี้ ใช้สัญญาณ T2-MI ของ บมจ.อสมท ที่ถูกส่งมาจากห้อง Head-end ส่วนกลางผ่านดาวเทียมไปยังเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ที่เครือข่ายปลายทางเพื่อใช้ในการออกอากาศ



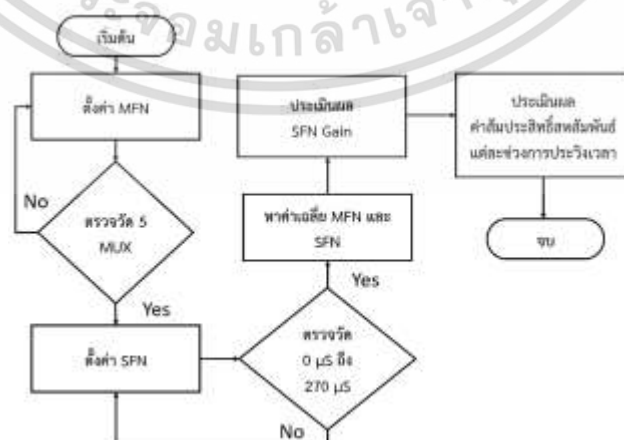
รูปที่ 4.1 ระบบการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ได้รับได้จากเครื่องรับดาวเทียมถูกส่งเข้าไปยังเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ทั้งสองเครื่อง โดยเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลจะเชื่อมต่ออุปกรณ์ GPS เพื่อให้เครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลแต่ละเครื่องสามารถส่งสัญญาณออกไปซึ่งใครในซีกกันได้ที่เครื่องรับ ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับค่าการประวิงเวลาของการส่งสัญญาณของเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล เพื่อให้สามารถใช้ในการทดลองการชิงใครในซีกกันของสัญญาณที่ช่วงเวลาต่างๆ กันภายในช่วงเวลาป้องกันได้ สำหรับการทดลองในครั้งนี้ ช่วงเวลาป้องกันสูงสุดมีค่าเท่ากับ 266 ไมโครวินาทีโดยช่วงเวลาป้องกันนี้ได้มาจากการตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ซึ่งค่าช่วงเวลาป้องกันนี้ คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช) เป็นหน่วยงานที่กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลภายในประเทศไทย

ความแรงของสัญญาณที่ใช้ในการทดลองออกอากาศจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ทั้งสองเครื่องจะใช้กำลังส่งในการทดลองที่ 100 มิลลิวัตต์ เนื่องจากการใช้กำลังส่งจากเฉพาะภาค Drive ของ Exciter เพียงเท่านั้น อีกประการหนึ่งเพื่อไม่ให้สัญญาณที่ทำการทดลองออกไปรบกวนการออกอากาศภายนอกห้องปฏิบัติการได้ โดยกำลังส่งจากทั้งสองเครื่องต่อเข้ากับสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการแมทช์ความถี่สายอากาศให้เข้ากับความถี่ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องรับที่ใช้ในการทดลองวิจัยนี้ คือ ROVER รุ่น HD pro tab ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งเครื่องรับและวิเคราะห์สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 สามารถเก็บข้อมูลที่สำคัญเพื่อนำไปประมวลผลประสิทธิภาพและคุณภาพของการรับสัญญาณได้ เช่น ค่ากำลังงานที่ได้รับ MER bBER LBER Noise margin ค่าการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวัด การประวิงเวลาระหว่างเครื่องส่ง และสามารถเก็บข้อมูลลงในอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเพื่อนำกลับวิเคราะห์ที่ได้ภายหลัง รูปที่ 4.2 แสดงผังการทดลองสำหรับการประเมินอัตราขยายของโครงข่ายความถี่เดียว

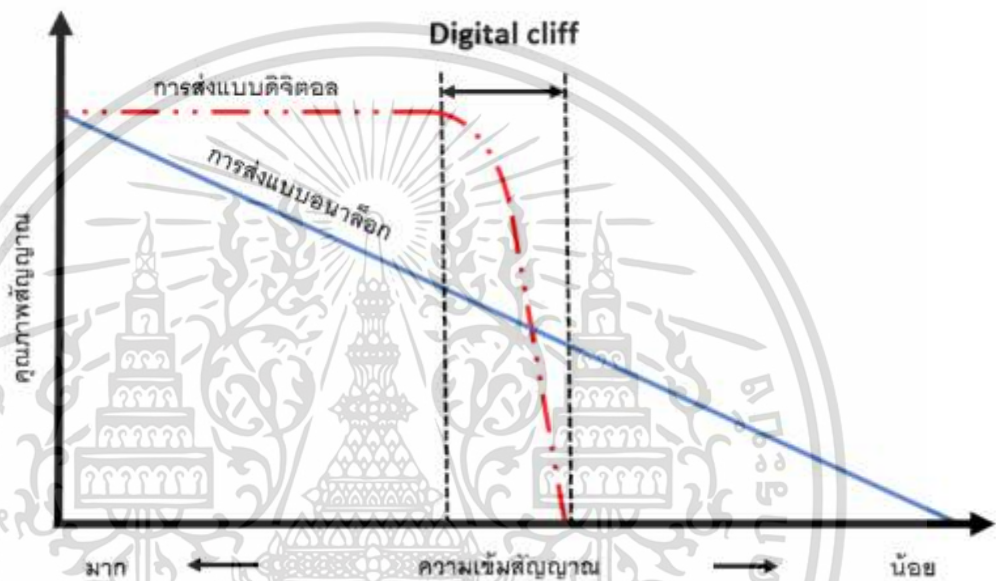


รูปที่ 4.2 ผังการทดลองสำหรับการประเมินผลอัตราขยายของโครงข่ายความถี่เดียว

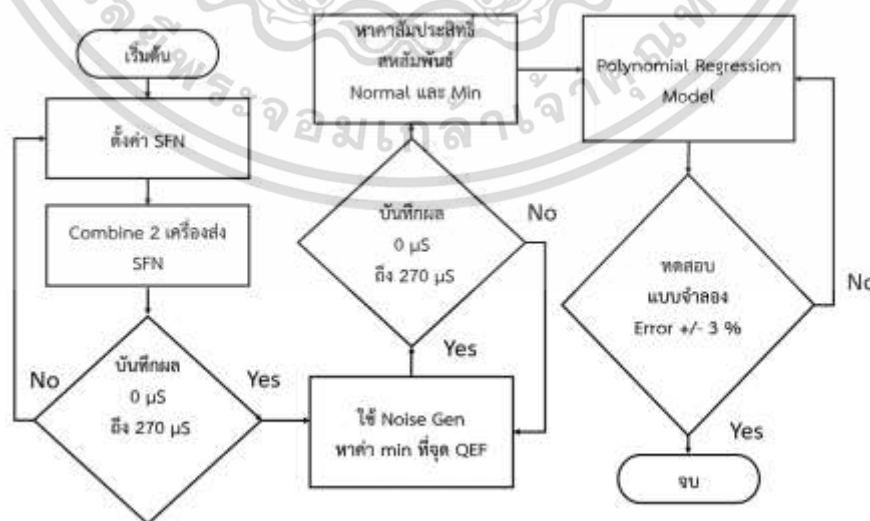
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว

การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ความแรงสัญญาณที่รับได้ไม่ได้เป็นปัจจัยสำคัญเพียงประการเดียวที่ทำให้สามารถรับสัญญาณได้ เนื่องจากการรับสัญญาณแบบดิจิทัลมีจุดวิกฤตที่ทำให้สัญญาณรับได้หรือรับไม่ได้เรียกว่าจุดวิกฤตสัญญาณดิจิทัล (Digital cliff) ซึ่งเป็นจุดที่ความแรงสัญญาณระดับที่ต่ำระดับหนึ่งจะทำให้สัญญาณที่รับได้ไม่เสถียร นั่นคือสัญญาณจะลดคุณภาพลงอย่างรวดเร็วจนอาจรับสัญญาณไม่ได้ทันที ซึ่งแตกต่างกับการส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกที่สัญญาณจะยังรับได้ต่อไปถึงแม้ความแรงจะลดลง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเกิดปรากฏการณ์จุดวิกฤตสัญญาณดิจิทัลสำหรับการส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล [7]



รูปที่ 4.4 ผังการทดลองจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสำหรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินโครงข่าย

ความถี่เดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงผังการทดลองจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำสำหรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยสัญญาณที่ใช้ในการทดลองคือสัญญาณที่ใช้ในการออกอากาศจริง รูปแบบสัญญาณคือ T2-MI ในการทดลองครั้งนี้ใช้สัญญาณที่ได้จาก Mux ของ บมจ. อสมท โดยสัญญาณ T2-MI นี้ถูกสร้างจากห้อง Head end ในส่วนกลาง และถูกส่งผ่านตัวกลางสามเส้นทางคือ ระบบดาวเทียม การเชื่อมโยงระบบไมโครเวฟ และระบบไอพี สำหรับการทดลองครั้งนี้รับสัญญาณที่ใช้ในการทดลองได้มาจากระบบดาวเทียม สัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับดาวเทียม (Integrated Receiver & Decoder: IRD) จะถูกแปลงเป็นข้อมูลแบบ ASI (Asynchronous Serial Interface) ในรูปแบบของ T2-MI MPEG-2 transport stream สัญญาณที่ได้จะถูกแยกออกเป็นสองสัญญาณที่เหมือนกัน และถูกส่งเข้าเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลยี่ห้อ Syes รุ่น PCM-1 ทั้งสองเครื่อง คือ เครื่องส่ง A และเครื่องส่ง B โดยเครื่องส่งแต่ละเครื่องถูกต่อกับสัญญาณ GPS เพื่อให้เครื่องส่งทั้งสองเครื่องสามารถส่งสัญญาณออกมาซิงโครไนซ์กันได้ กำลังส่งของเครื่องส่งที่ใช้ในการทดลองคือ 100 มิลลิวัตต์ เหตุผลที่ใช้กำลังส่งต่ำเนื่องจากไม่ต้องการให้กำลังส่งจากการทดลองออกไปรบกวนการออกอากาศจริงกับเครื่องส่งภายนอก โดยที่กำลังส่งด้านเอาท์พุทได้ถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ Dummy load

สัญญาณที่ใช้ในการทดลองได้มาจากจุดทดสอบของเครื่องส่ง ซึ่งที่จุดสำหรับการทดสอบนี้เครื่องส่งได้ทำการลดทอนกำลังงานให้เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบและมอนิเตอร์ได้ โดยความแรงของกำลังส่งที่ 100 มิลลิวัตต์ จะให้ค่าความแรงของสัญญาณที่จุดมอนิเตอร์หรือที่จุดคัปปลิง (Coupling) มีค่าประมาณ -3 dBm ที่อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ซึ่งค่าความแรงสัญญาณของทั้งสองเครื่องส่งที่ใช้ในการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน สัญญาณที่ได้จากเครื่องส่งทั้งสองเครื่องจะถูกนำมา รวมกันด้วยอุปกรณ์ อุปกรณ์รวมสัญญาณ ซึ่งเปรียบเสมือนการรวมกันของสัญญาณในการออกอากาศจริง สำหรับการแพร่กระจายสัญญาณในโครงข่ายความถี่เดียว จากเครื่องส่งสองเครื่องในโครงข่ายความถี่เดียว ผลของการลดทอนความแรงสัญญาณจากอุปกรณ์รวมสัญญาณ ทำให้ความแรงสัญญาณลดลงเหลือ -7 dBm หลังจากนั้น สัญญาณจะถูกต่อผ่านอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ (Attenuator) โดยมีค่าการลดทอนที่ 13 dB เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์มีความแรงมากเกินไปก่อนเข้าเครื่องมอดูเลเตอร์ ความแรงสัญญาณสุดท้ายก่อนเข้าเครื่องมอดูเลเตอร์จะมีความแรงของสัญญาณที่ประมาณ -20 dBm หรือ 87 dBμV ซึ่งเป็นความแรงของสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมอดูเลเตอร์และสำหรับการทดลองในครั้งนี้ โดยสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณนี้จะถูกนำไปผสมกับสัญญาณรบกวนที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวน (Noise generator) สำหรับเครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวนนี้ สามารถปรับระดับความแรงของสัญญาณรบกวนได้ โดยมีความละเอียดที่ 0.1 dB ในการทดลองจะทำการเพิ่มความแรงของสัญญาณรบกวนเข้าไปจนทำให้ระดับ CNR ถึงจุดขั้นต่ำที่เครื่องรับและวิเคราะห์สัญญาณยังคงสามารถทำการรับสัญญาณได้ โดยอ้างอิงจากค่า QEF คือ ค่าความแรงของสัญญาณขั้นต่ำที่รับได้ ที่ให้อัตราความผิดพลาดของบิตก่อนผ่านบล็อก LDPC (bBER) ไม่เกิน 1×10^{-2} หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากผ่านบล็อก LDPC (LBEP) ไม่เกิน 1×10^{-7} หรือสามารถตรวจสอบได้อีกวิธีการ คือ ใช้การสังเกตผลของการรับภาพ โดยที่ค่าความแรงของสัญญาณขั้นต่ำที่ยังรับภาพต้องไม่ทำให้สัญญาณภาพขาดหายภายใน 20 วินาทีที่จุด QEF นี้ ได้ทำการเก็บข้อมูลตลอดช่วงการประวิงเวลาระหว่างเครื่องส่งสองเครื่องในโครงข่ายความถี่เดียว ตลอดช่วงเวลาที่ป้องกัน สำหรับการทดลองนี้ค่าช่วงเวลาที่ป้องกันมีค่าเท่ากับ 266 ไมโครวินาทีโดยการทดลองจะทำการเปลี่ยนค่า Static delay ภายในเครื่องส่งครั้งละ 10 ไมโครวินาทีหรือเปรียบเสมือนเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว ถอยห่างกันไปประมาณ 3.03 กิโลเมตร

ข้อมูลที่ได้จะถูกตรวจวัดและเก็บข้อมูลด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ยี่ห้อ ROVER รุ่น HD Pro tab ซึ่งจะเก็บข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ เช่น ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ MER bBER LBEP Noise margin และ CNR โดยทุกช่วงการประวิงเวลาทุก 10 ไมโครวินาทีตั้งแต่ 0 ไมโครวินาทีถึง 270 ไมโครวินาทีครอบคลุมในช่วงเวลาการป้องกันที่ 266 ไมโครวินาทีนั้น จะทำการตรวจวัดซ้ำกัน 20 ครั้ง เพื่อให้ได้ความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดมากที่สุด รูปที่ 4.5 แสดงการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลอง



รูปที่ 4.5 เครื่องมือสำหรับการทดลองการหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับสัญญาณได้ของการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2

4.3 การกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ไว้ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างในรายละเอียดการทดลอง ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงพารามิเตอร์สำหรับการทดลองทั้งสองแบบโดยแบ่งเป็น 2 หัวข้อดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษา เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองเพื่อประเมินเกณฑ์ของโครงข่ายความถี่เดียว

การทดลองเพื่อประเมินเกณฑ์ของโครงข่ายความถี่เดียว ใช้การทดลองทั้งหมด 5 ความถี่เพื่อเปรียบเทียบผลของความถี่ที่เปลี่ยนไปมีผลอย่างไรต่อเกณฑ์ของโครงข่ายความถี่เดียว โดยความถี่ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นความถี่ที่ใช้ออกอากาศจริงสำหรับผู้ให้บริการโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลภาคพื้นดิน (Mux) จากทั้ง 5 ราย ประกอบไปด้วย กรมประชาสัมพันธ์ Mux1 วิทยุโทรทัศน์กองทัพบก จำนวน 2 Mux คือ Mux2 และ Mux5 บมจ อสมท Mux3 และ ไทยพีบีเอส Mux4 [62] โดยรายละเอียดความถี่ แสดงดังตารางที่ 4.1 และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานที่ กสทช กำหนด แสดงตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพื่อประเมินอัตราการขยายของโครงข่ายความถี่เดียว [62]

Mux	Channel	Frequency (MHz)
NBT	47	682
ARMY 1	39	618
MCOT	35	586
TPBS	28	530
ARMY 2	51	714

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์การมอดูเลตสำหรับการทดลองเพื่อประเมินจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำของโครงข่ายความถี่เดียว [62]

พารามิเตอร์	ค่า
Bandwidth	8 MHz
FFT Mode	16k Extended
Pilot Pattern	PP2
Guard Interval	19/128
Constellation	64 QAM
Constellation Rotation	Off
Code Rate	3/5

4.3.2 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองหาค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียวนั้น ใช้การตั้งค่าที่เครื่องส่งมีลักษณะใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ตามหัวข้อที่ 4.3.1 สิ่งที่แตกต่างกันสำหรับการทดลองในหัวข้อนี้คือ การใช้ความถี่ที่ใช้งานจริงในการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดิน

ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินมาตรฐาน DVB-T2 สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ของกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่ใช้ในการออกอากาศที่อาคารโบหยกสำหรับการทดลอง โดยหลังจากทำการทดลองหาค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ก็จะได้นำค่าที่ได้จากการทดลองนี้ ไปทดสอบในพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนามเพื่อหาค่าชดเชยเนื่องจากสภาพแวดล้อมเพื่อปรับปรุงค่าที่ได้ในแม่นยำและสามารถนำไปอ้างอิงสำหรับการใช้งานจริงได้ ตารางที่ 4.3 แสดงความถี่ที่ใช้ในการทดลองสำหรับหัวข้อนี้ ส่วนพารามิเตอร์ในการทดลองเหมือนกับหัวข้อที่ 4.3.1 โดยแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพื่อประเมินจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำของโครงข่ายความถี่เดียว [62]

Mux	Channel	Frequency (MHz)
NBT	26	514
ARMY 1	36	594
MCOT	40	626
TPBS	44	658
ARMY 2	52	722

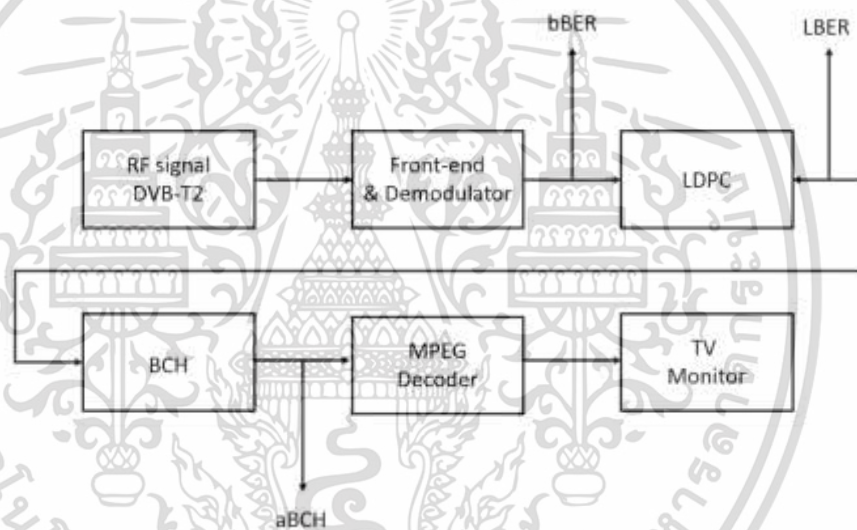
4.4 การตรวจวัดสัญญาณ

อัตราผิดพลาดการมอดูเลต (Modulation Error Ratio: MER) จากการตรวจวัดได้มาจากสัญญาณที่รับได้ผ่านการดีมอดูเลต สัญญาณที่รับได้หลังจากการดีมอดูเลตนี้ จะถูกทำการตรวจวัดอัตราผิดพลาดการมอดูเลต โดยที่อัตราผิดพลาดการมอดูเลตประมาณ 20 dB จะให้ค่าอัตราการผิดพลาดบิต (Bit error rate : BER) ที่ประมาณ 2×10^{-2} ซึ่งถือเป็นค่าขั้นต่ำโดยประมาณที่ยังทำให้สามารถรับสัญญาณและถอดรหัสภาพจากสัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ได้ตามปกติ ซึ่งสัญญาณที่รับได้จะไม่สะดุดหรือสัญญาณภาพไม่มีการขาดหาย โดยค่า BER ที่ได้จากจุดนี้ถูกเรียกว่า ค่า bBER (Before bit error rate) หรือ Channel bit error rate ค่า bBER จะถูกส่งผ่านเข้าสู่บล็อกการถอดรหัสแบบ LDPC (Low-density parity-check) ซึ่งจุดนี้ถูกเรียกว่า LBER (LDPC bit error rate) โดย BER ที่ถูกแก้ไขแล้วจะมีความผิดพลาดลดลงต่ำกว่าหรือเท่ากับ 2×10^{-7} โดยหลังจากผ่านเข้าสู่ส่วนของบล็อกการถอดรหัสแบบ BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghen) ซึ่งจะทำให้ได้ค่า BER ลดลงต่ากว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-11} จากรูปที่ 4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานภาครับของเครื่องวัดและวิเคราะห์สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2

4.5 การหาค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากผลกระทบอันเนื่องมาจากพื้นที่ในการรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้หลังจากทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ สำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โค้งข่ายความถี่เดียว การนำผลที่ได้จากการทดลองไปใช้งานจริงจะต้องทำการหาค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำดังกล่าว เนื่องจากผลกระทบจากพื้นที่สิ่งแวดล้อมในการรับสัญญาณ โดยงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ICS telecom เพื่อจำลองพื้นที่ครอบคลุมในการรับสัญญาณด้วยโค้งข่ายความถี่เดียว ระหว่างการแพร่กระจายสัญญาณจากสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ ฦ อาคารใบหยก และสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สมุทรสงคราม โดยใช้แบบจำลอง ITU-R.P. 1546 สำหรับการคำนวณหาพื้นที่ที่ทับซ้อนจากโค้งข่ายความถี่เดียว หลังจากนั้น นำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมดังกล่าว ไปทำการตรวจวัดในพื้นที่ทับซ้อนดังกล่าว เพื่อนำไปสร้างค่าชดเชยค่าชั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้จากผลของสิ่งแวดล้อมในการใช้งานจริง



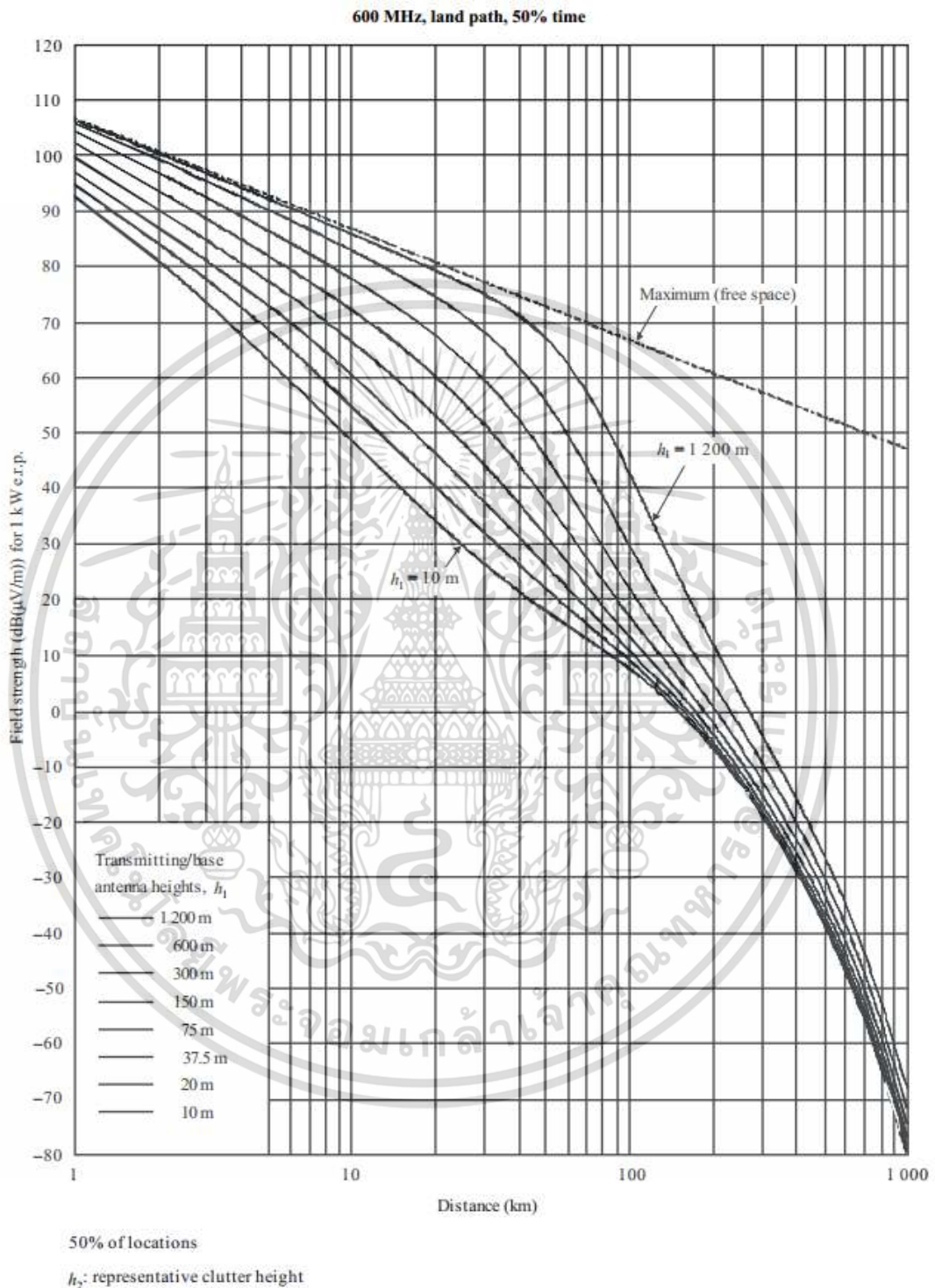
รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวิเคราะห์การสัญญาณมาตรฐาน DVB-T [18]

4.5.1 แบบจำลอง ITU-R.P. 1546-5 [58]

ในการออกแบบสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณสัญญาณวิทยุ แบบจำลอง ITU-R.P. 1546-5 ถูกใช้สำหรับการทำนายการแพร่กระจายสัญญาณทางภาคพื้นดินแบบจุดต่อพื้นที่ โดยใช้งานสำหรับย่านความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 3,000 เมกกะเฮิร์ตซ์ แบบจำลองนี้ได้จากการวัดเชิงประจักษ์จากการวัดสัญญาณในพื้นที่ขนาดใหญ่ และใช้วิธีการทางสถิติจากการเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง แบบจำลองนี้ถูกใช้งานแทน ITU-R.370 โดยฟังก์ชันกราฟเส้นโค้งได้มาจากตัวแปรที่สำคัญ คือ ความถี่ ความสูงของสายอากาศ เเปอร์เซ็นต์ของระยะทางและเวลาที่ใช้การการวัดสำหรับเก็บข้อมูล มีหน่วยวัด คือ dB μ V/m โดยคำนวณจากกำลังการแผ่ประสิทธิผล (Effective Radiated Power: ERP) ที่ 1 กิโลวัตต์ ทำการเก็บข้อมูลการวัดสัญญาณจากลักษณะภูมิประเทศแบบ พื้นดิน

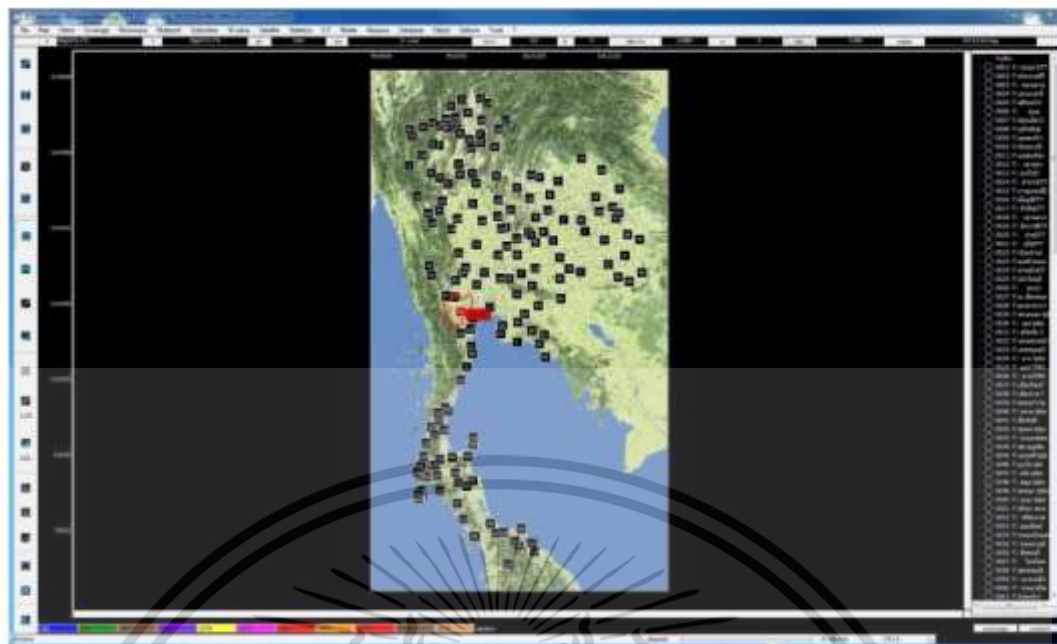
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทะเลเขตอบอุ่น และทะเลเขตกึ่งหนาวเย็น โดยแสดงผลในลักษณะเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ 1 เปอร์เซ็นต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ [59]



รูปที่ 4.7 มาตรฐานของ ITU-R P.1546-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะทาง [58]

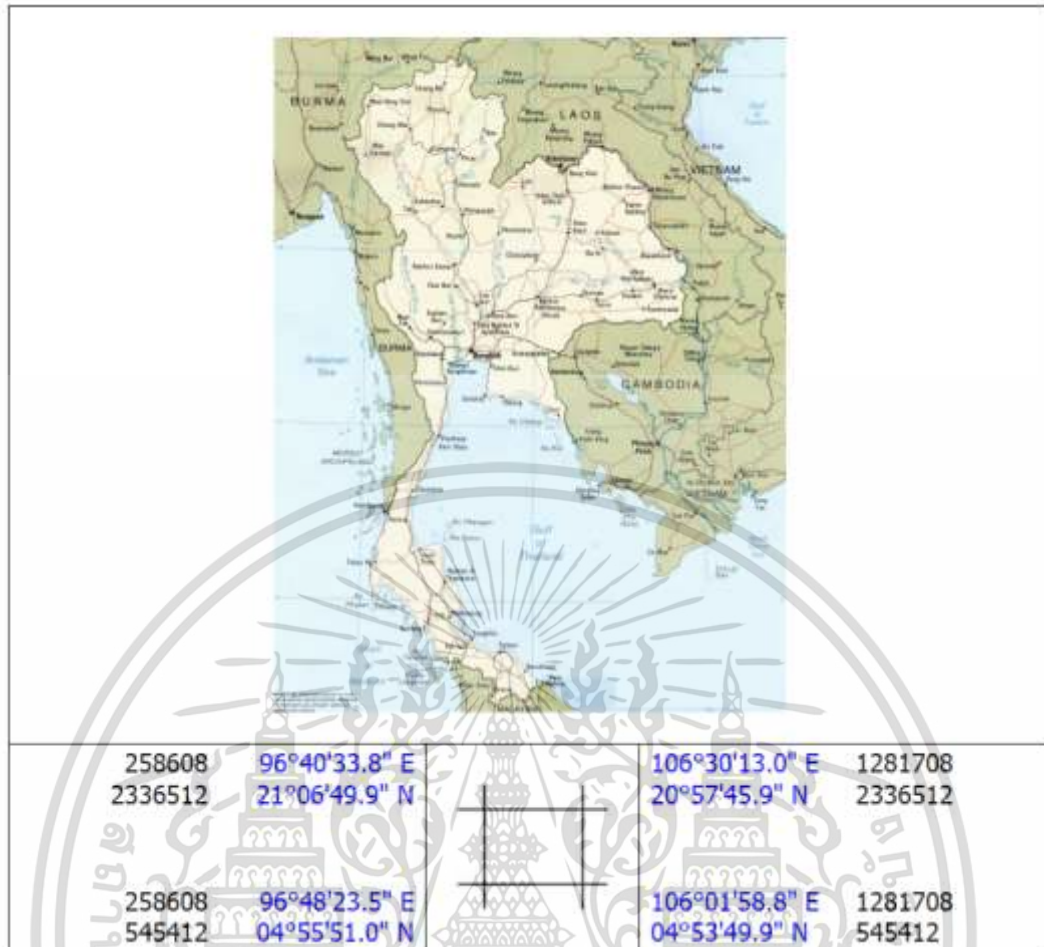
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพหน้าจอโปรแกรม ICS Telecom [62]

การปรับพารามิเตอร์สำหรับการจำลองการแพร่กระจายสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว ระหว่างโครงข่ายจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ (ไบหยก) และสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สมุทรสงคราม ซึ่งเป็นสถานีเสริม เพื่อค้นหาจุดอ่อนที่บของการแพร่กระจายสัญญาณ ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการจำลองการแพร่กระจายสัญญาณระหว่างสองสถานี

รูปที่ 4.10 แสดงการกรอกพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อให้โปรแกรมทำการจำลองการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล จากในรูปเป็นการกรอกข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณของสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ (ไบหยก) โดยมีรูปแบบแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังรูปที่ 4.11 สำหรับการจำลองการแพร่กระจายสัญญาณแบบโครงข่ายความถี่เดียว นั้น ต้องทำการจำลองสัญญาณของทั้งสองสถานี ผลที่ได้จากการจำลองการแพร่กระจายสัญญาณด้วยโปรแกรม ATDI ICS Telecom โดยตั้งค่าความแรงจุดตัดพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณขั้นต่ำที่ 35 dBμV/m ที่ความสูงสายอากาศรับ 6 เมตร ซึ่งเป็นความแรงขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ตามปกติ จะได้ดังรูปที่ 4.12 หลังจากนั้น นำผลที่ได้จากการจำลองสัญญาณ มาทาบทับเข้ากับแผนที่จากโปรแกรม Google Earth เพื่อจะให้เห็นรายละเอียดลักษณะสิ่งแวดล้อมในพื้นที่มากยิ่งขึ้น และสามารถกำหนดจุดวัดสัญญาณในพื้นที่ที่บอ่อนเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองสำหรับสร้างค่าชดเชยค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้จากผลกระทบของพื้นที่รับสัญญาณจริงต่อไป

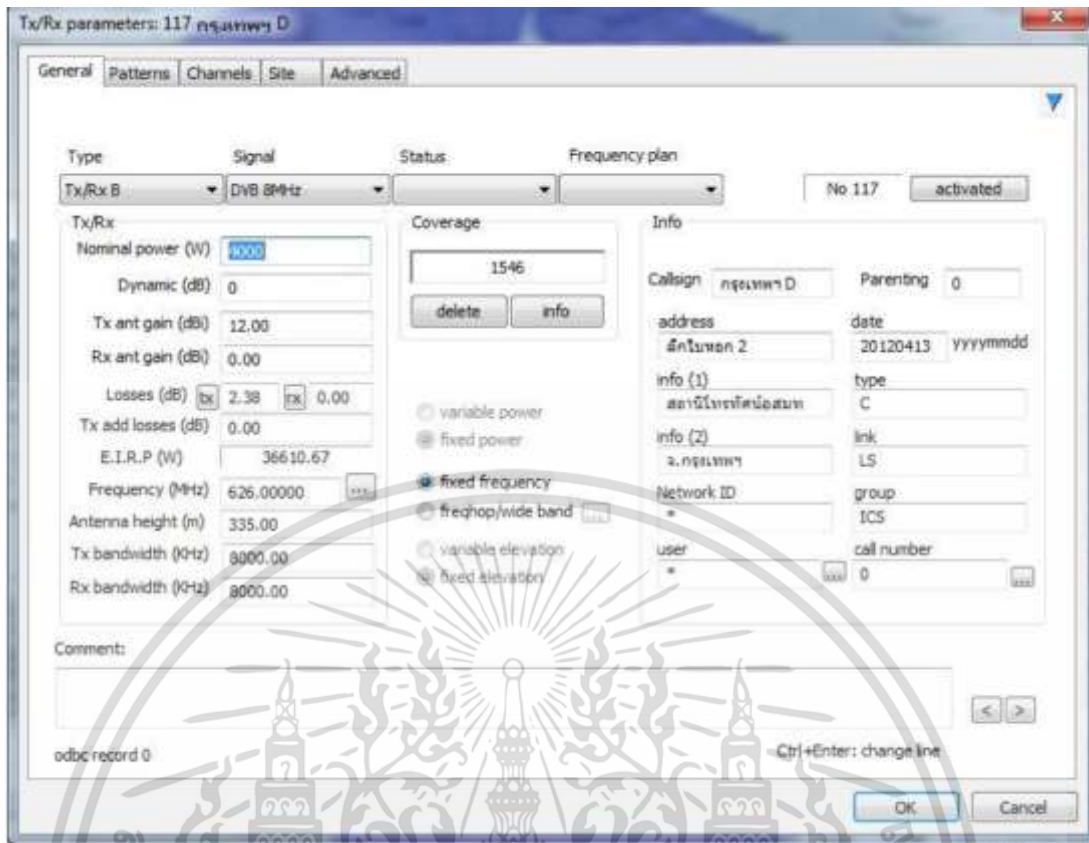


รูป 4.9 ข้อมูลแผนที่สำหรับการคำนวณแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณด้วยมาตรฐาน ITU.R.P 1546 [58]

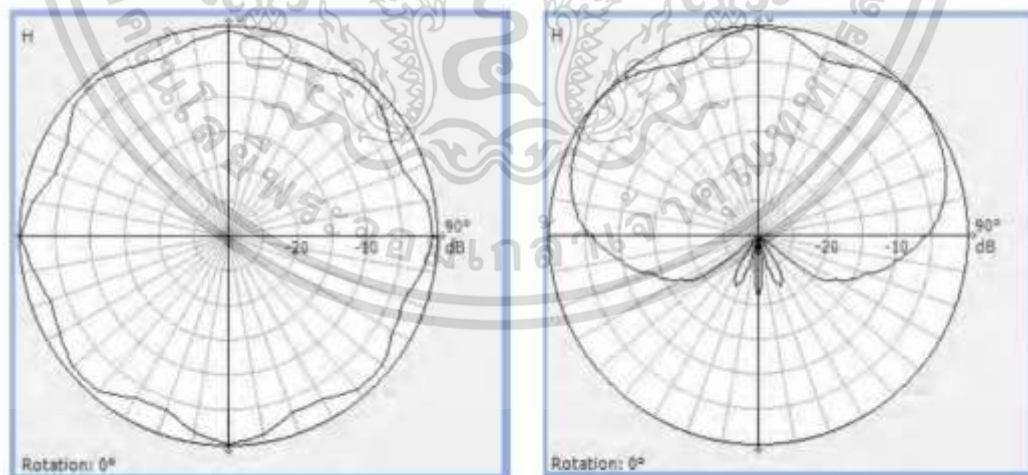
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียวระหว่าง สถานีกรุงเทพฯ และสถานีสมุทรสงคราม [62]

พารามิเตอร์	สถานีกรุงเทพ (ใบหยก)	สถานีสมุทรสงคราม
กำลังส่ง	4.5 kW	0.1 kW
ERP	100 kW	0.5 kW
ความถี่	626 MHz	626 MHz
ความสูงสายอากาศส่ง	325 เมตร	70 เมตร
รูปแบบการกระจายสัญญาณทาง แนวนอน (HRP)	รอบทิศทาง	270
พิกัด ลองจิจูด / ละติจูด	100.540270 / 13.754300	99.994444 /13.385428

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 ข้อมูลสำหรับการคำนวณการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรม ATDI ICS Telecom [62]



(ก)

(ข)

รูป 4.11 แบบรูปของสายอากาศส่ง (ก) กรุงเทพฯ (ไบกหยก) (ข) สมุทรสงคราม [62]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.12 แบบรูปการแพร่กระจายสัญญาณด้วยโปรแกรม ATDI ICS Telecom โดยสีม่วงเป็นพื้นที่ทับซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว [62]

จากรูปที่ 4.12 สีส้มคือพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน กรุงเทพฯ ซึ่งออกอากาศจากอาคารไบเทค รัศมีครอบคลุมรอบตัวประมาณ 80 กิโลเมตร ส่วนพื้นที่สีเขียว คือ พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สมุทรสงคราม โดยมีพื้นที่ทับซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว คือ สีม่วง ซึ่งคือพื้นที่ที่จะนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างค่าชดเชยค่าขั้นต่ำที่สามารถรับสัญญาณภาพได้สำหรับงานวิจัยนี้

4.5.2 การกำหนดจุดวัดสัญญาณจากพื้นที่การรับสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว ในภาคสนาม

หลังจากได้ผลจากการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม ATDI ICS Telecom จากการคำนวณด้วยแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณ ITU-R.P. 1546 แล้ว ขั้นตอนต่อไป คือการกำหนดจุดวัดสัญญาณในพื้นที่ทับซ้อน (พื้นที่สีม่วงจากรูปที่ 4.12) เพื่อทำการวัดสัญญาณและเพื่อนำไปสร้างค่าชดเชยสำหรับค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ของการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลแบบโครงข่ายความถี่เดียว โดยกำหนดตำแหน่งการวัดสัญญาณทั้งหมด รูปที่ 4.13 แสดงจุดวัดสัญญาณ

กำหนดตำแหน่งการวัดสัญญาณทั้งหมด 15 ตำแหน่งซึ่งครอบคลุมพื้นที่การทับซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว ระหว่างสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน กรุงเทพฯ และสมุทรสงคราม แต่ละจุดวัดสัญญาณห่างกันประมาณ 2 กิโลเมตรถึง 3 กิโลเมตร พื้นที่วัดสัญญาณสีม่วงในรูปที่ 4.13 ห่างจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ ประมาณ 70 กิโลเมตร และห่างจาก

สถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สมุทรคราม ประมาณ 5-15 กิโลเมตร รายละเอียดข้อมูลจุดวัดสัญญาณ แสดงในรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.13 การจำลองจุดวัดสัญญาณเพื่อหาค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้จากพื้นที่รับสัญญาณในพื้นที่จริง



รูปที่ 4.14 ระยะห่างระหว่างสถานีส่ง (กรุงเทพฯ) และตำแหน่งการวัดสัญญาณในพื้นที่จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ระยะห่างระหว่างสถานีส่ง (สมุทรสงคราม) และตำแหน่งการวัดสัญญาณในพื้นที่จริง

ตารางที่ 4.5 พิกัดจุดวัดสัญญาณในพื้นที่ที่ทับซ้อนทั้งหมดของการส่งผ่านสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โค้งขยายความถี่เดียว

จุดวัด	ละติจูด	ลองจิจูด
1	13°30'56.27"เหนือ	99°57'10.91"ตะวันออก
2	13°31'18.52"เหนือ	99°58'18.11"ตะวันออก
3	13°32'1.35"เหนือ	99°59'18.27"ตะวันออก
4	13°29'43.44"เหนือ	99°57'52.77"ตะวันออก
5	13°30'20.91"เหนือ	99°59'15.90"ตะวันออก
6	13°31'4.36"เหนือ	100° 0'22.93"ตะวันออก
7	13°28'29.97"เหนือ	99°58'33.16"ตะวันออก
8	13°29'11.68"เหนือ	99°59'56.94"ตะวันออก
9	13°30'2.12"เหนือ	100° 1'28.11"ตะวันออก
10	13°27'30.54"เหนือ	99°59'27.96"ตะวันออก
11	13°28'11.58"เหนือ	100° 0'53.38"ตะวันออก
12	13°28'53.49"เหนือ	100° 2'23.37"ตะวันออก
13	13°26'21.07"เหนือ	100° 0'21.78"ตะวันออก
14	13°27'1.23"เหนือ	100° 1'45.07"ตะวันออก
15	13°27'41.96"เหนือ	100° 3'2.99"ตะวันออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหาค่าชดเชยในงานวิจัยนี้ นำเสนอผลกระทบของสัญญาณอันเนื่องมาจากพื้นที่ที่สัญญาณเดินทางผ่านมาจนถึงสายอากาศเครื่องรับ ซึ่งจะผ่านพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ลักษณะภูมิประเทศที่มีความสูงต่ำเปลี่ยนแปลงไปตลอดเส้นทาง ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณเกิด การสะท้อนกลับ (Reflection) การหักเห (Refraction) การแพร่กระจายคลื่น (Diffraction) และการแทรกสอดของสัญญาณ (Interference) ผลที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าว ทำให้สัญญาณเกิดลดทอนในส่วนต่าง ๆ ของสเปกตรัม ซึ่งมีผลทำให้ค่า CNR และ MER รวมไปถึงค่าสำคัญอื่น ๆ ในการรับสัญญาณลดลง ซึ่งนำไปสู่การที่ต้องชดเชยสัญญาณให้แรงขึ้นเพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ รูปที่ 4.16 แสดงผลของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไปเนื่องจากผลกระทบของพื้นที่ในการรับสัญญาณ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากผลกระทบจากพื้นที่และสิ่งแวดล้อมในการรับสัญญาณ (ก) ไม่ถูกรบกวน (ข) ถูกรบกวน

4.5.3 ขั้นตอนการดำเนินการหาค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำของโครงข่ายความถี่เดียว

ดำเนินการตรวจวัดสัญญาณจากพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนามที่ได้จากการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรมจำลองสัญญาณ ATDI ICS telecom ขั้นตอนการดำเนินการ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

4.5.3.1 การตรวจวัดสัญญาณและวิเคราะห์ข้อมูลการรับสัญญาณด้วยโครงข่ายความถี่เดียว จากพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนาม

ทำการเก็บข้อมูลตรวจวัดสัญญาณตามพิกัดที่กำหนดไว้ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการรับสัญญาณด้วยโครงข่ายความถี่เดียว บันทึกข้อมูลด้วยเครื่องวัดและวิเคราะห์สัญญาณจากตำแหน่งวัดสัญญาณที่กำหนดไว้ทั้งสิ้น 15 ตำแหน่ง โดยกำหนดตำแหน่งวัดสัญญาณ P01 ถึง P15 รายละเอียดแสดงในรูป 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.2 การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความสูงของพื้นที่จากเส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปถึงพื้นที่ตรวจวัดสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียว

เส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ จะผ่านพื้นที่ที่มีความสูงต่ำไม่เท่ากัน ในจุดวัดสัญญาณบางจุด เส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปถึงอาจมีความแปรปรวนของความสูงต่ำของพื้นที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการลดทอนของสัญญาณที่สามารถรับได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรับสัญญาณจากโครงข่ายความถี่เดียว ที่ใช้การรับสัญญาณจากเครื่องส่งมากกว่าหนึ่งเครื่อง เส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปถึงยังเครื่องรับก็จะมีมากกว่าหนึ่งเส้นทางเช่นกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลกระทบเนื่องความแปรปรวนของพื้นที่สำหรับค่าความแรงของจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างความแปรปรวนความสูงต่ำของพื้นที่ในเส้นทางกรรับสัญญาณระหว่างสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ (ไบหยก) กับตำแหน่งการวัดสัญญาณ P08 โดยใช้ข้อมูลจากโปรแกรม Google Earth ส่วนรูปที่ 4.19 แสดงความแปรปรวนความสูงต่ำของพื้นที่ในเส้นทางรับสัญญาณระหว่างสถานีโทรทัศน์ สมุทรสงคราม กับจุดวัดสัญญาณ P08 ข้อมูลความสูงต่ำของพื้นที่ในแต่ละเส้นทาง จะได้จากข้อมูลความสูงต่ำของพื้นที่ในทุกระยะทาง 500 เมตร นำมาหาค่าเฉลี่ยและหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความสูงต่ำของพื้นที่ เนื่องจากจุดวัดสัญญาณมีทั้งหมด 15 จุดในบริเวณพื้นที่ทับซ้อนของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณทั้งสองเครื่องส่ง ข้อมูลความเบี่ยงเบนมาตรฐานระดับความสูงของพื้นที่ที่สัญญาณเดินทางไปถึงเครื่องส่งจะมีทั้งสิ้น 30 ข้อมูล โดยแสดงในแต่ละเส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปถึงจุดวัดในตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

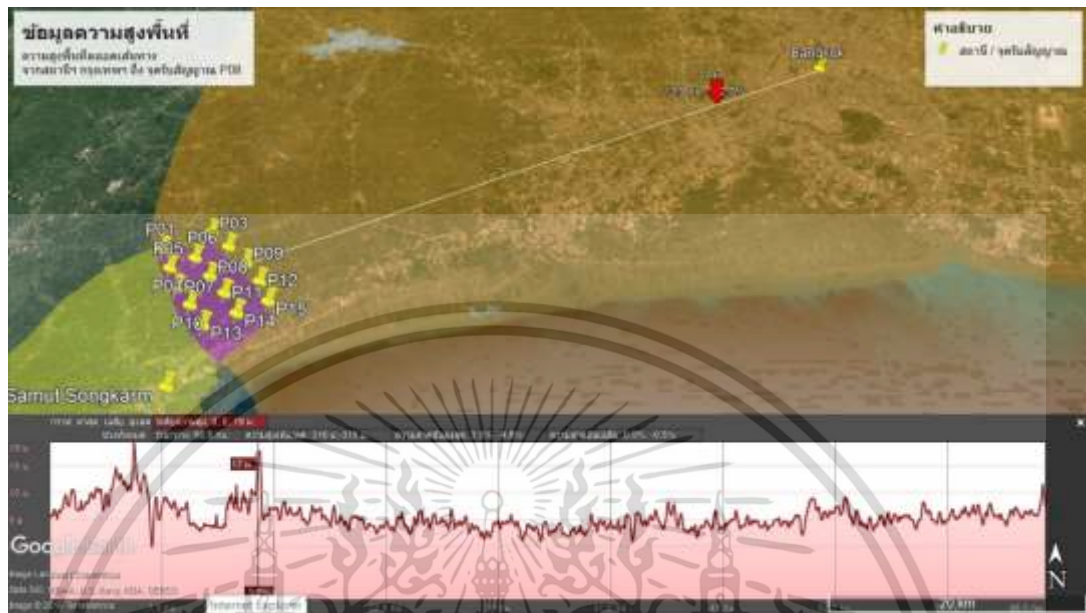


รูปที่ 4.17 ขั้นตอนการดำเนินการหาค่าชดเชยค่าขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ของโครงข่ายความถี่เดียว

4.5.3.3 การวัดสัญญาณโครงข่ายความถี่เดียวจากพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนาม

เครื่องวัดและวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ยี่ห้อ ROVER รุ่น HD Pro tab ข้อมูลสำหรับการตรวจวัดที่สำคัญเพื่อทำการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วย ค่ากำลังงานที่รับได้ CNR MER Noise margin bBER LBER Spectrum และ Echo เพื่อให้การเก็บผลการวัดมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ได้ทำการเก็บค่าของข้อมูลซ้ำกัน 20 ครั้งต่อการตรวจวัดในแต่ละจุดวัดสัญญาณ และนำมาหาค่าเฉลี่ย รูปที่ 4.20 แสดงพื้นที่วัดสัญญาณ เครื่องมือวัด สายอากาศ เสาวัดสัญญาณ และอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณเพื่อใช้ในการหาค่าขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ในตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลจากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดสัญญาณความแรงสัญญาณแบบปกติ และตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลจากการวัดสัญญาณความแรงสัญญาณที่ค่าขั้นต่ำที่สามารถรับภาพได้โดยแต่ละข้อมูลได้จากหาค่าเฉลี่ยจากวัดซ้ำกัน 20 ครั้งในแต่ละจุดสัญญาณ



รูปที่ 4.18 ระดับความสูงต่ำของพื้นที่สภาวะแวดล้อมจริงตลอดเส้นทางจากเครื่องส่งโทรทัศน์ฯ กรุงเทพฯ (ใบหยก) ไปยังตำแหน่งการวัดสัญญาณ P08



รูปที่ 4.19 ระดับความสูงต่ำของพื้นที่สภาวะแวดล้อมจริงตลอดเส้นทางจากเครื่องส่งโทรทัศน์สมุทรสงคราม ไปยังตำแหน่งการวัดสัญญาณ P08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ณ สถานีส่ง กรุงเทพฯ ถึงตำแหน่งการวัดสัญญาณ

ตำแหน่งการวัด สัญญาณ	สัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ		
	ระยะทาง (กม.)	ความสูงเฉลี่ย (ม.)	ค่าเบี่ยงเบนความสูง (ม.)
1	68.73	5.953	2.284
2	66.60	6.379	2.755
3	64.42	5.953	2.129
4	68.48	5.837	2.589
5	65.73	6.127	2.948
6	63.34	6.000	3.165
7	68.39	6.162	2.973
8	65.56	5.924	3.347
9	62.41	6.068	2.896
10	67.80	6.269	3.258
11	64.94	5.769	2.967
12	61.95	5.568	2.519
13	67.48	5.698	2.626
14	64.69	5.929	4.050
15	62.04	5.256	2.733

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ณ สถานีส่ง
สมุทรสงคราม ถึงตำแหน่งการวัดสัญญาณ

ตำแหน่งการวัด สัญญาณ	สัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สมุทรสงคราม		
	ระยะทาง (กม.)	ความสูงเฉลี่ย (ม.)	ค่าเบี่ยงเบนความสูง (ม.)
1	15.18	7.773	2.423
2	15.39	7.400	2.292
3	16.52	6.699	2.213
4	12.67	7.712	2.558
5	13.43	7.115	2.375
6	14.80	7.287	1.604
7	10.18	7.524	2.606
8	11.28	7.865	1.873
9	13.23	7.779	1.801
10	8.15	7.176	2.320
11	9.66	7.556	1.785
12	11.77	7.737	1.630
13	6.13	8.000	1.886
14	8.15	7.709	1.493
15	10.45	5.277	2.566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ณ สถานีส่ง กรุงเทพฯ และสถานีส่งสมุทรสงคราม ถึงตำแหน่งการวัดสัญญาณ

จุดวัดสัญญาณ	สัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ และสมุทรสงคราม	
	ความสูงเฉลี่ย (ม.)	ค่าเบี่ยงเบนความสูง (ม.)
1	6.863	2.353
2	6.890	2.524
3	6.326	2.171
4	6.774	2.574
5	6.621	2.662
6	6.644	2.384
7	6.843	2.790
8	6.894	2.610
9	6.924	2.348
10	6.723	2.789
11	6.662	2.376
12	6.653	2.075
13	6.849	2.256
14	6.819	2.772
15	5.266	2.649

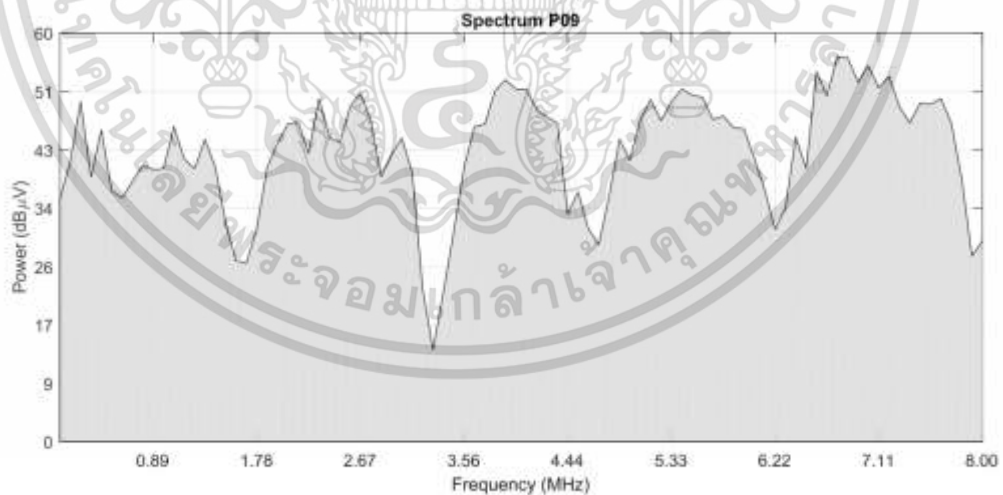


รูปที่ 4.20 การติดตั้งอุปกรณ์และการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว ในพื้นที่รับสัญญาณจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

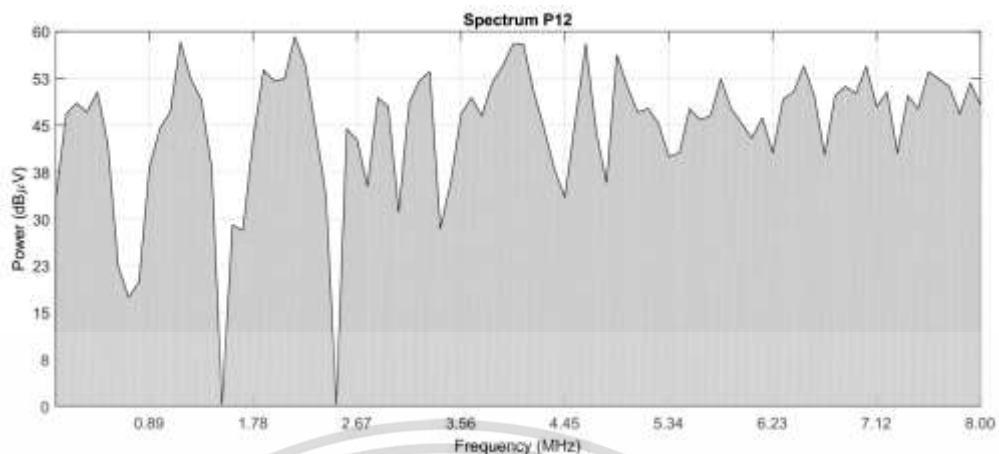
ตารางที่ 4.9 ผลที่ได้จากวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียวสำหรับการรับสัญญาณด้วยความแรงปกติ

Point	Power (dB μ V)	MER (dB)	Noise margin (dB)	CNR (dB)	bBER	LBER
1	28.67	9.45	-4.05	23.12	1.70E-03	2.00E-09
2	41.27	16.65	3.15	29.59	1.60E-03	2.00E-09
3	45.57	21.45	7.95	32.53	1.60E-03	2.00E-09
4	34.77	14.25	0.75	26.36	1.60E-03	2.00E-09
5	45.77	21.34	7.84	32.30	1.60E-03	2.00E-09
6	46.97	21.84	8.34	33.94	1.60E-03	2.00E-09
7	34.17	9.31	-4.19	20.78	1.60E-03	2.00E-09
8	41.77	18.66	5.16	29.87	1.60E-03	2.00E-09
9	45.77	18.66	5.16	30.85	1.60E-03	2.00E-09
10	41.77	16.09	2.59	29.73	1.60E-03	2.00E-09
11	30.17	10.40	-3.10	23.63	1.60E-03	2.00E-09
12	42.67	18.31	4.81	28.57	1.60E-03	2.00E-09
13	33.57	11.28	-2.22	22.21	1.60E-03	2.00E-09
14	39.46	15.98	2.48	27.96	1.60E-03	2.00E-09
15	44.71	21.76	8.26	36.49	1.60E-03	2.00E-09



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างสเปกตรัมสัญญาณจากตำแหน่งการวัดสัญญาณ P09 ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างสเปกตรัมสัญญาณจากตำแหน่งการวัดสัญญาณ P12 ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4.10 ผลที่ได้จากวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โค้งข่ายความถี่เดียว ที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ

Point	Power (dBµV)	MER (dB)	Noise margin (dB)	CNR (dB)	bBER	LBER
1	22.65	8.24	-5.26	21.59	1.00E-02	2.00E-09
2	35.98	8.20	-5.30	20.87	1.00E-02	2.00E-09
3	42.12	8.11	-5.39	19.02	1.00E-02	2.40E-09
4	30.31	8.16	-5.34	20.04	1.00E-02	4.00E-05
5	42.45	8.10	-5.40	18.89	1.00E-02	3.30E-05
6	42.51	8.16	-5.34	20.03	1.00E-02	2.70E-05
7	30.34	8.13	-5.37	19.40	1.00E-02	2.20E-05
8	38.21	8.11	-5.39	19.14	1.00E-02	2.20E-06
9	41.22	8.16	-5.34	20.12	1.00E-02	2.60E-06
10	35.77	8.24	-5.26	21.57	1.00E-02	4.40E-07
11	24.59	8.22	-5.28	21.16	1.00E-02	1.10E-07
12	40.05	8.06	-5.44	18.19	1.00E-02	4.10E-08
13	30.28	8.10	-5.40	18.86	1.00E-02	1.90E-08
14	35.11	8.15	-5.35	19.91	1.00E-02	3.30E-08
15	37.62	8.29	-5.21	22.65	1.00E-02	1.70E-08

สเปกตรัมที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่งการวัดสัญญาณ มีการลดทอนและหักล้างของสัญญาณเนื่องจากสถานะแวดล้อมพื้นที่จริงที่ตำแหน่งวัดสัญญาณ รวมไปถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากสถานะแวดล้อมพื้นที่จริงต่อเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากทั้งสองเครื่องส่งภายในโครงข่ายความถี่เดียว ผ่านลักษณะภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวางไม่เหมือนกันในแต่ละเส้นทาง ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลระบบได้ดำเนินการวัดค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมของสัญญาณในช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่ตรวจวัดได้ที่จากทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ

ความแตกต่างของสเปกตรัมสัญญาณที่ได้รับได้ ถูกนำมาหาค่าเบี่ยงเบนของสเปกตรัมตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าทางสถิติเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนของลักษณะพื้นที่ในเส้นทางต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวข้างต้น ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างแบบจำลองเพื่อสร้างค่าชดเชยของค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ เนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองหาค่าขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว จากห้องปฏิบัติการนั้น ไม่ได้รวมค่าความแปรปรวนอันเนื่องมาจากพื้นที่สำหรับการรับสัญญาณตลอดจนผลกระทบอันเนื่องมาจากเส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปถึงยังจุดรับสัญญาณ

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำในการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 อธิบายถึงวิธีการทดลองและการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วน ดังนี้

การทดลองเพื่อประเมินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยได้กล่าวถึงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และได้ข้อมูลจากการวัดจากเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และการทำงานจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำของสัญญาณที่ยังสามารถรับได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ช่วงการประจวบเวลาในช่วงต่าง ๆ ของสัญญาณที่ได้รับได้จากสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2

การหาค่าชดเชยสัญญาณเมื่อนำไปใช้งานสำหรับการรับสัญญาณจากพื้นที่รับสัญญาณในพื้นที่จริง ซึ่งผลกระทบเนื่องจากสภาวะแวดล้อมมีผลต่อค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ โดยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง ITU-R.P 1546-5 และใช้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศที่สัญญาณเดินทางผ่านไปยังเครื่องรับจากข้อมูลของโปรแกรม Google Earth ร่วมกับผลของการวัดสัญญาณจากพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนามเพื่อหาค่าชดเชยดังกล่าว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสเปกตรัมกับความเบี่ยงเบนเนื่องจากความสูงของพื้นที่ที่สัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในพื้นที่จริงเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายค่าชดเชยอันเนื่องมาจากพื้นที่รับสัญญาณในพื้นที่

บทที่ 5

การประเมินผลและการอภิปรายผลการทดลองวิจัย

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลของการศึกษาหรือการวิจัยจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและผลการตรวจวัดสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียวในพื้นที่การรับสัญญาณพื้นที่จริง สำหรับหาค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ โดยแบ่งเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ ผลการทดลองประสิทธิภาพของสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 จากห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองการหาค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ของโครงข่ายความถี่เดียว และผลการนำเสนอแบบจำลองค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำในพื้นที่รับสัญญาณจริงโดยใช้ข้อมูลจากลักษณะภูมิประเทศสิ่งแวดล้อมจริงที่สัญญาณเดินทางไปถึงยังจุดวัดสัญญาณ

5.2 ผลการทดลองการประเมินอัตราขยายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ในห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนในการทดลองเพื่อประเมินผลประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการแสดงรายละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.2.1 โดยทำการทดลองจากทั้งหมด 5 ความถี่ ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในการออกอากาศจริงสำหรับผู้ให้บริการโครงข่ายทั้ง 4 บริษัท จากรูปที่ 5.1 แสดงประสิทธิภาพของ อัตราขยายของ โครงข่ายความถี่เดียว จากผลการเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาของเครื่องส่ง อัตราขยายของ โครงข่ายความถี่เดียวที่ ผลการทดลองค่าเฉลี่ยอัตราขยายประมาณ 4 dB เมื่อเปรียบเทียบกับการออกอากาศด้วยโครงข่ายหลายความถี่ สังเกตได้ว่า ที่ค่าการประวิงเวลาในช่วง 0 ไมโครวินาทีถึง 40 ไมโครวินาทีอัตราขยายของ โครงข่ายความถี่เดียว มีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยที่ได้ เนื่องจากผลกระทบของช่องสัญญาณ 0 dB echo และเป็นช่วงการประวิงเวลาที่อยู่ใกล้ช่วงขอบของระยะเวลาป้องกัน

ค่าอัตราขยายของ MER เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการประวิงเวลาในช่วงป้องกัน แสดงดังในรูปที่ 5.2 ค่าอัตราขยายของ MER สำหรับการออกอากาศด้วยโครงข่ายความถี่เดียว ได้มาจากการเปรียบเทียบกับอัตราผิดพลาดการมอดูเลต ที่ออกอากาศด้วยโครงข่ายหลายความถี่ ผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราขยายของ MER สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว จะมีค่าติดลบเมื่อเปรียบเทียบกับออกอากาศด้วยโครงข่ายหลายความถี่ โดยมีค่าเฉลี่ยที่ประมาณ -5 dB สังเกตได้ว่า ค่าความแตกต่างของอัตราขยายของ MER จะมีค่าลดลงมากขึ้นในช่วงการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีถึง 20 ไมโครวินาทีและ 220 ไมโครวินาทีถึง 270 ไมโครวินาที

การตรวจสอบผลกระทบจากการประวิงเวลาของสัญญาณอันเนื่องมาจากระยะเวลาที่สัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสองเครื่องในโครงข่ายความถี่เดียวมายังเครื่องรับไม่พร้อมกัน ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร ใช้วิธีการทดสอบด้วยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสำคัญต่าง ๆ สำหรับการรับสัญญาณตลอดช่วงการประวิงเวลาของสัญญาณในช่วงเวลาป้องกัน ค่าสำคัญต่าง ๆ ในการรับสัญญาณที่

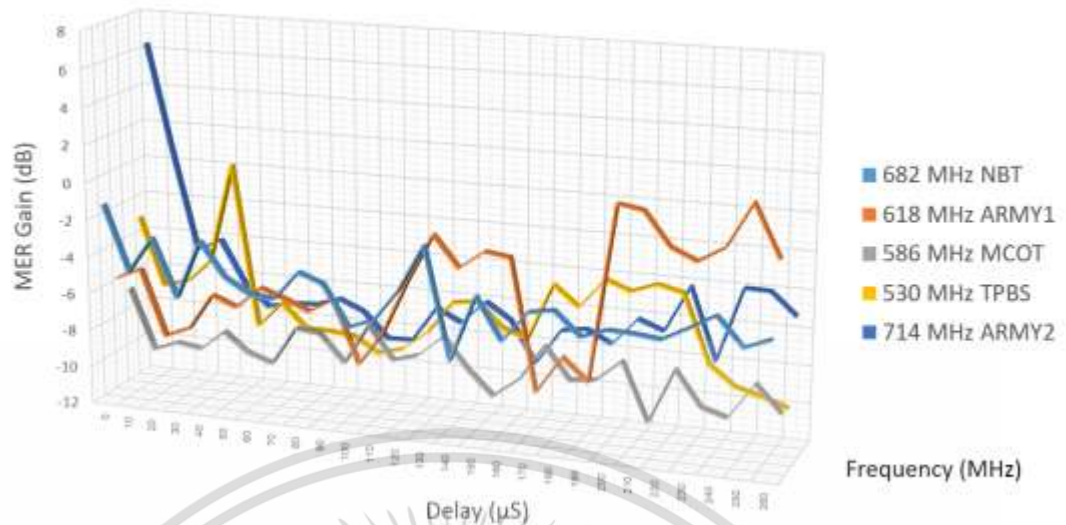
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องรับดังกล่าว ประกอบไปด้วย ค่ากำลังงานที่รับได้ อัตราขยายของ โครงข่ายความถี่เดียว MER อัตราขยายของ MER และ Noise margin โดยเปรียบเทียบกันในช่วงการประวิงเวลาต่าง ๆ ภายในช่วงเวลาป้องกันจาก 0 ไมโครวินาทีถึง 270 ไมโครวินาทีการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สามารถอธิบายได้ถึงพฤติกรรมของสัญญาณและผลกระทบของสัญญาณของสัญญาณที่รับได้เมื่อค่าการประวิงเวลาเปลี่ยนไปภายในช่วงเวลาป้องกัน ว่ามีคุณลักษณะอย่างไร รูปที่ 5.3 แสดงผลที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการสำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สังเกตได้ว่าในช่วงการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีถึง 20 ไมโครวินาทีและ 220 ไมโครวินาทีถึง 270 ไมโครวินาทีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าเข้าใกล้ 1 น้อยกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ ซึ่งหมายความว่าผลกระทบอันเนื่องจากการประวิงเวลาในช่วงเวลาดังกล่าวมีมากกว่าช่วงเวลาประวิงเวลาอื่น ๆ และเป็นช่วงเวลาสัญญาณมีความสูญเสียอันเนื่องจากผลกระทบของการประวิงเวลามากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ เช่นกัน

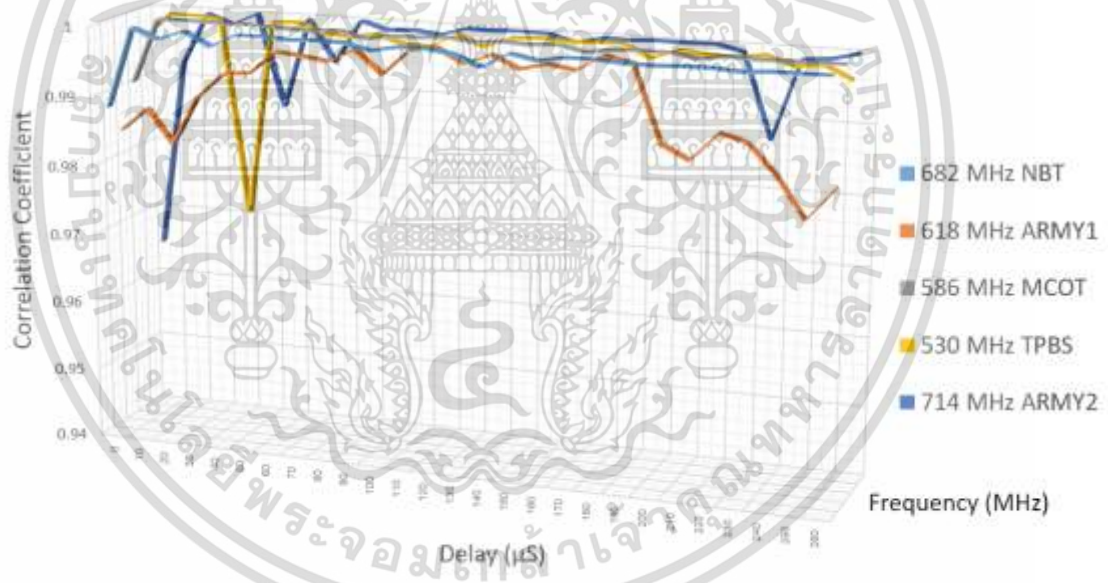


รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่าย ความถี่เดียว ระหว่างความถี่ของแต่ละ MUX

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสำคัญต่าง ๆ ในการรับสัญญาณของแต่ละ MUX ในแบบโครงข่ายหลายความถี่ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่ากำลังงานที่รับได้ อัตราขยายของโครงข่ายความถี่เดียว MER อัตราขยายของ MER Noise margin bBER และ LBER เปรียบเทียบกับตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสำคัญต่าง ๆ ในการรับสัญญาณของแต่ละ MUX ในแบบโครงข่ายความถี่เดียว จากข้อมูลการรับสัญญาณภายในช่วงเวลาป้องกันที่ 0 ไมโครวินาทีถึง 270 ไมโครวินาทีแสดงให้เห็นว่าสำหรับการออกอากาศด้วยโครงข่ายความถี่เดียว ค่าอัตราขยายของโครงข่ายความถี่เดียวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 3.61 dB ถึง 5.41 dB ได้จากการทดลองพบว่าอัตราผิดพลาดการมอดูเลต ที่เปลี่ยนไปดังกล่าวจะลดลงในช่วงประมาณ -4.42 dB ถึง -8.79 dB



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบอัตราขยายของอัตราผิดพลาดการมอดูเลต MER กับการประวิงเวลาในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างความถี่ของแต่ละ MUX



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ในการรับสัญญาณภายในช่วงระยะเวลาป้องกัน

ในส่วนของอัตราผิดพลาดการมอดูเลต สำหรับการรับสัญญาณด้วยโครงข่ายความถี่เดียวจะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของผลกระทบของการรับสัญญาณที่มีการประวิงเวลาที่ต่างกันและจากการส่งสัญญาณจากเครื่องส่งที่ต่างกัน ทำให้สัญญาณที่รับได้จากทั้งสองเครื่องส่งอาจไม่ได้เหมือนกันโดยสิ้นเชิง ทำให้ผลรวมของสัญญาณมีผลทำให้แผนภาพคอนสเทลชัน (Constellation diagram) เปลี่ยนไป ส่งผลให้อัตราผิดพลาดการมอดูเลตลดลง จากสาเหตุที่อัตราผิดพลาดการมอดูเลตที่ต่ำลง เพราะสัญญาณที่รับได้จากพื้นที่จริงส่งผลให้อัตราผิดพลาดการมอดูเลตลดลง ซึ่งอาจส่งผลทำให้ไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถรับสัญญาณได้หรืออาจรับสัญญาณยากขึ้น ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบและติดตั้งโครงข่ายความถี่เดี่ยวต่อไป

ค่า bBER และ LBER สำหรับการรับสัญญาณด้วยการส่งสัญญาณแบบโครงข่ายหลายความถี่เทียบกับ โครงข่ายความถี่เดี่ยว ก็มีความผิดพลาดของข้อมูลเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับอัตราผิดพลาดการมอดูเลตเช่นกัน สำหรับการรับสัญญาณแบบโครงข่ายหลายความถี่ ค่า bBER จะมีความผิดพลาดของข้อมูลที่ $2.09E-04$ ถึง $7.64E-04$ และสำหรับการรับสัญญาณแบบ โครงข่ายความถี่เดี่ยวจะมีความผิดพลาดของข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 1.00×10^{-2} ถึง 9.97×10^{-3} สำหรับ LBER เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายหลายความถี่ และโครงข่ายความถี่เดี่ยวจะไม่มี ความแตกต่างกัน เนื่องจากถ้าเครื่องรับสัญญาณถ้าสามารถรับสัญญาณได้สูงกว่า ค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่จุด Quasi Error Free (QEF) ตัวถอดรหัส LDPC ก็จะสามารถแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลกลับมาได้ที่ 2.00×10^{-9} ซึ่งภาพที่ปรากฏที่หน้าจอก็มีลักษณะปกติ แต่ถ้าหากค่า bBER ที่รับได้มีค่าความผิดพลาดเข้าใกล้จุดขั้นต่ำของ QEF ภาพก็จะขาดหายเป็นช่วง ๆ ได้ ดังนั้นการออกแบบติดตั้งโครงข่ายความถี่เดี่ยว ก็จะเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบนี้ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบเกิดขึ้นจากผลของการติดตั้งโครงข่ายความถี่เดี่ยว ซึ่งถึงแม้จะให้พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้น แต่ก็อาจแลกมาด้วยการทำให้บางจุดรับสัญญาณในพื้นที่ครอบคลุมนั้นรับสัญญาณได้ยากยิ่งขึ้น ถ้าไม่ได้ รับการวิเคราะห์อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรับได้ แบ่งตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายหลายความถี่มาตรฐาน DVB-T2

MUX	Frequency (MHz)	Average Power (dB μ V)	Average MER (dB)	Average Noise Margin (dB)	Average bBER	Average LBER
1	682	42.88	19.35	6.35	5.41×10^{-3}	2.00×10^{-9}
2	618	42.75	26.75	13.75	7.64×10^{-4}	2.00×10^{-9}
3	586	42.42	24.77	11.77	5.61×10^{-4}	2.00×10^{-9}
4	530	42.75	26.75	13.75	2.09×10^{-4}	2.00×10^{-9}
5	714	42.93	22.48	9.48	5.94×10^{-4}	2.00×10^{-9}

ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรับที่รับได้ภายในช่วงเวลาป้องกัน แบ่งตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียว มาตรฐาน DVB-T2

MUX	Frequency (MHz)	Average Power Gain(dB)	Average MER (dB)	Average MER Gain (dB)	Average Noise Margin (dB)	Average bBER	Average LBER
1	682	3.61	14.59	-4.75	1.59	9.97×10^{-3}	2.00×10^{-9}
2	618	5.41	16.67	-4.42	6.67	7.65×10^{-9}	2.00×10^{-9}
3	586	3.91	15.98	-8.79	2.97	1.00×10^{-2}	2.00×10^{-9}
4	530	5.48	20.31	-6.44	7.31	3.36×10^{-9}	2.00×10^{-9}
5	714	4.47	16.58	-5.89	3.58	9.41×10^{-9}	2.00×10^{-9}

5.3 ผลการทดลองเพื่อหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับสัญญาณได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียวในห้องปฏิบัติการ

การติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการแสดงรายละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2.2 ความถี่ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3 ความถี่ที่เลือกใช้ในการทดลอง อ้างอิงจากหนังสือ กสทช เรื่องแนวปฏิบัติทางเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล (Technical Guidelines for Digital Terrestrial Television Broadcasting) ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560 [62]

การเสริมกันของสัญญาณ โครงข่ายความถี่เดียว จากสองเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล โดยมีค่าการประวิงเวลาต่างกันระหว่างทั้งสองเครื่องส่งที่ 0 μ s จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความแรงของสัญญาณมีการลดทอนอย่างรุนแรงในตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิรตซ์ ของช่องสัญญาณ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการประวิงเวลาของสัญญาณของสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว มีค่าน้อยเกินไปหรือเข้าใกล้ 0 ไมโครวินาทีซึ่งเป็นจุดขอบเขตวิกฤตของช่วงเวลาป้องกัน ทำให้บางครั้งสัญญาณมีโอกาสที่จะไม่ชิงโครโนซกันทำให้เกิดการรบกวนและลดทอนกันอย่างรุนแรงได้ เรียกว่าช่องสัญญาณ 0 dB echo จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความแรงของสเปกตรัมสัญญาณลดลง มีค่าที่ประมาณ 20 dB เมื่อเปรียบเทียบกับความแรงสัญญาณสูงสุดของแถบสเปกตรัม ผลกระทบอันเนื่องมาจากจุดที่สเปกตรัมสัญญาณลดลง จะทำให้ข้อมูลที่ถูส่งผ่านในช่วงสเปกตรัมนั้นขาดหายไป ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้ที่ภาครับไม่ครบถ้วน ซึ่งจะทำให้การถอดรหัสสัญญาณภาพไม่มีเสถียรภาพ หรืออาจนำไปสู่สาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถถอดรหัสสัญญาณภาพได้เลย

การประวิงของสัญญาณจากทั้งสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่ที่เวลา 60 μ s มีความแตกต่างจากการรับสัญญาณที่ค่าการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีของระหว่างสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว โดยสามารถสังเกตเห็นได้ชัดที่ค่าความเบี่ยงเบนของแถบสเปกตรัมตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิรตซ์ สำหรับการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีนั้น การเปลี่ยนแปลงของแถบสเปกตรัมจะมีค่ามากกว่าค่าการประวิงเวลาที่ 60 ไมโครวินาทีซึ่งทำให้การรับสัญญาณที่ค่าการประวิงเวลาในโครงข่ายความถี่เดียว ที่ 60 ไมโครวินาทีนั้น สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่า เนื่องจากข้อมูลที่ถูส่งมอดูเลตในช่วง

ความถี่ย่อยของ OFDM ไม่ได้ถูกทำลายหรือถูกลดทอนสัญญาณลงไปจนไม่สามารถรับสัญญาณได้เมื่อเปรียบเทียบกับการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาที

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินด้วยโครงข่ายความถี่เดียว แสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความแรงของสัญญาณที่รับได้ตามปกติ กับความแรงของสัญญาณขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ โดยทำการเปรียบเทียบผลการวัดตลอดช่วงการประวิงเวลาในช่วงเวลาป้องกันจาก 0 ไมโครวินาทีถึง 270 ไมโครวินาที ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้ มีค่าเท่ากับ 0.6266 โดยที่การประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีการลดทอนของสัญญาณสำหรับการรับสัญญาณด้วยความแรงปกติ ถูกลดทอนไปประมาณ 12 dB จากความแรงของสัญญาณเฉลี่ยภายในช่วงเวลาป้องกันที่ประมาณ 87 dB μ V แบบจำลองการถดถอยพหุนามถูกใช้สำหรับการทำนายความแรงของสัญญาณที่รับได้จากพื้นฐานข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ค่าความแรงของสัญญาณขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้สำหรับการส่งแบบ โครงข่ายความถี่เดียว มีค่าประมาณ 66 dB μ V โดยที่ค่าการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีการลดทอนของสัญญาณจะอยู่ที่ประมาณ 3 dB

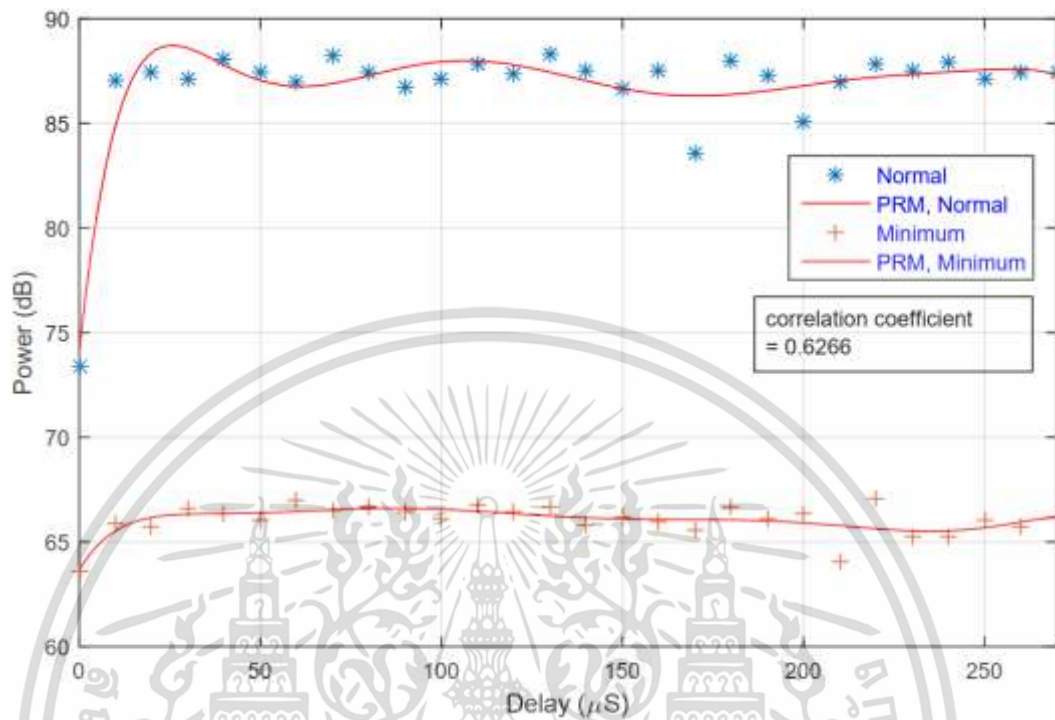
จากรูปที่ 5.5 แสดงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับอัตราผิดพลาดการมอดูเลตสำหรับการรับสัญญาณด้วยความแรงปกติ จะได้อัตราผิดพลาดการมอดูเลต ประมาณ 17 dB และที่ค่าการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีอัตราผิดพลาดการมอดูเลต จะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 6 dB สาเหตุเนื่องจากช่องสัญญาณ 0 dB echo ซึ่งจะเกิดสัญญาณหักล้างกันอย่างรุนแรงเป็นช่วง ๆ ทำให้ต้องการอัตราผิดพลาดการมอดูเลต เพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ สำหรับอัตราผิดพลาดการมอดูเลตขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ มีค่าประมาณ 8 dB ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความแรงของสัญญาณตามปกติกับความแรงสัญญาณขึ้นต่ำ เท่ากับ 0.6973 ซึ่งหมายความว่า ทั้งสองสัญญาณมีรูปแบบคล้ายคลึงกันและมีคุณลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

การตรวจสอบผลกระทบเนื่องจากการประวิงเวลาที่เปลี่ยนไปต่อการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมตลอดช่วงแบนด์วิดท์ 8 เมกกะเฮิรตซ์ สำหรับการแพร่กระจายสัญญาณด้วยโครงข่ายความถี่เดียว จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ แสดงในรูปที่ 5.6 ความแตกต่างระหว่างการรับสัญญาณด้วยความแรงปกติกับการรับสัญญาณที่ความแรงขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.8970 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสเปกตรัมมีค่าประมาณ 3.5 dB ความเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมจะมีค่าสูงสุดที่ค่าการประวิงเวลา 0 ไมโครวินาทีโดยมีค่าเบี่ยงเบนที่ประมาณ 7 dB

เสถียรภาพของการรับสัญญาณสามารถตรวจสอบได้จากค่า Noise margin ถ้าหากค่า Noise margin มีค่าสูง สัญญาณก็จะมีเสถียรภาพสูง สัญญาณการรับจะไม่ขาดหาย แต่หาก Noise margin มีระดับต่ำ สัญญาณภาพที่รับได้ก็อาจจะมีการกระตุกหรือขาดหายเป็นช่วง ๆ ได้ จากรูปที่ 5.7 ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่า Noise margin สำหรับการรับสัญญาณที่ความแรงในระดับปกติ กับการรับสัญญาณที่ความแรงขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.6987 ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะของสัญญาณทั้งสองว่ามีรูปแบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ค่า Noise margin ของความแรงสัญญาณขึ้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้มีค่าเฉลี่ยจากภายในช่วงเวลาป้องกันประมาณ -6 dB โดยมีค่าสูงสุดที่ช่วงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

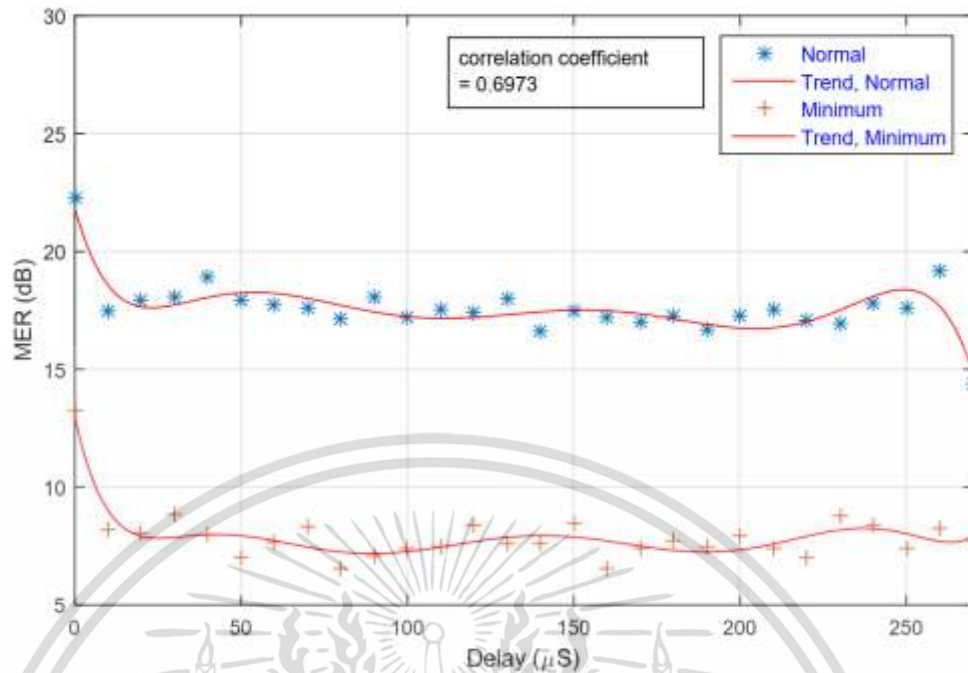
ประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีโดยมีค่าประมาณ 0 dB โดยค่า Noise margin จากในรูปแสดงถึงค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับค่าการประวิงเวลาต่าง ๆ ในช่วงเวลาป้องกัน



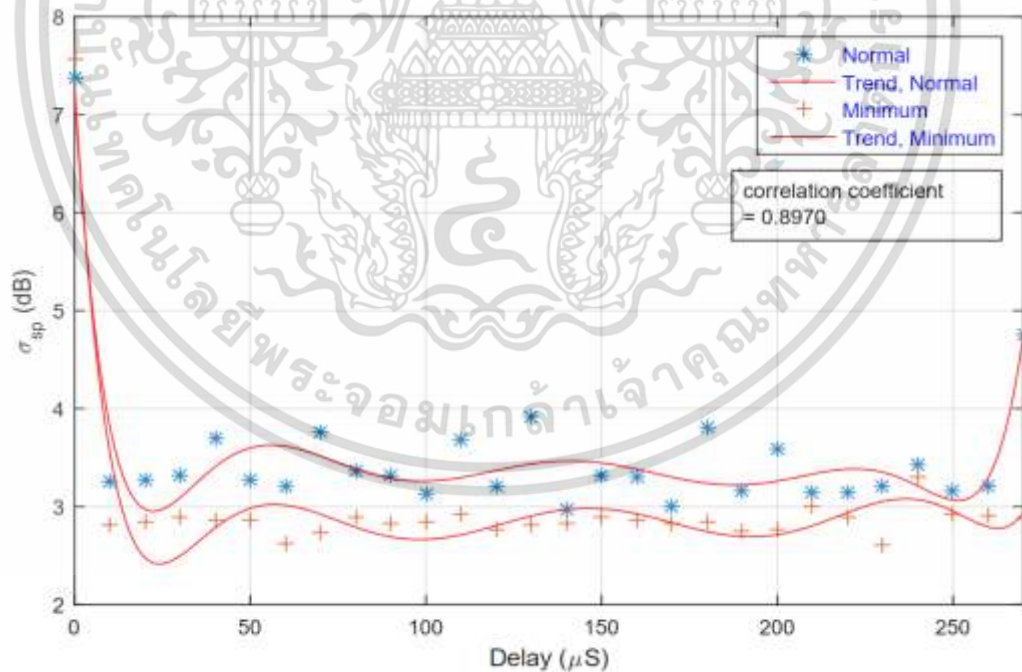
รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2

จากรูปที่ 5.8 แสดงค่า CNR ภายในช่วงเวลาป้องกัน การเปรียบเทียบค่า CNR สำหรับการรับสัญญาณด้วยความแรงปกติกับความแรงขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ทั้งสองถึงแม้จะมีทิศทางไปในทางเดียวกัน แต่ก็ได้ไม่ได้เหมือนกันโดยสิ้นเชิง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองเท่ากับ 0.0756 เหตุที่ค่า CNR ทั้งสองไม่ได้มีลักษณะที่เหมือนกัน เนื่องจากการประวิงเวลาที่ 0 ไมโครวินาทีถึงแม้จะมีการลดทอนของกำลังงานของการรับสัญญาณลงอย่างมาก แต่ก็ยังมี Margin ของ CNR มากพอ จึงทำให้การลดลงของ CNR ไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากเท่ากับการรับสัญญาณแบบความแรงขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ค่าความแรงของสัญญาณขั้นต่ำของ CNR มีค่าเฉลี่ยที่ประมาณ 22.94 dB ภายในช่วงเวลาป้องกัน โดยที่การประวิงเวลา 0 ไมโครวินาทีมีความต้องการค่า CNR เพิ่มขึ้นประมาณ 6 dB

ความแรงสัญญาณที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐานโครงข่ายความถี่เดียว DVB-T2 แสดงในตารางที่ 5.3 ข้อมูลที่แสดงในตารางประกอบไปด้วย ค่ากำลังงานขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ อัตราผิดพลาดการมอดูเลต ค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัม ค่า Noise margin และ ค่า CNR ถูกแสดงผลเป็น ค่าเฉลี่ย ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากช่วงการประวิงเวลาภายในเวลาป้องกัน ที่ 0 ไมโครวินาที ถึง 270 ไมโครวินาที

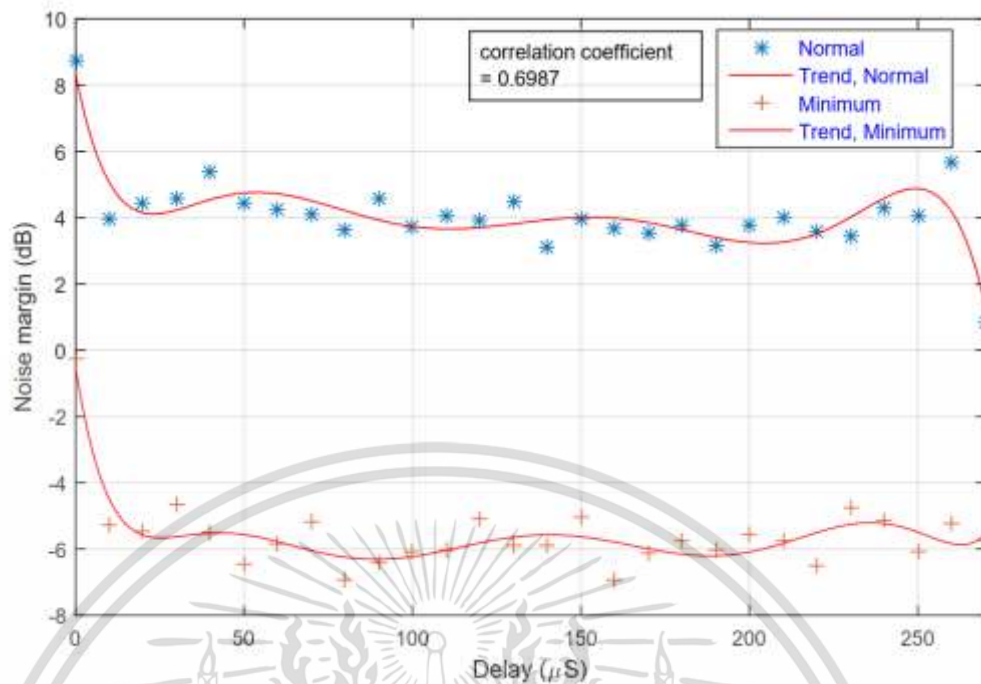


รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดการมอดูเลต ภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2

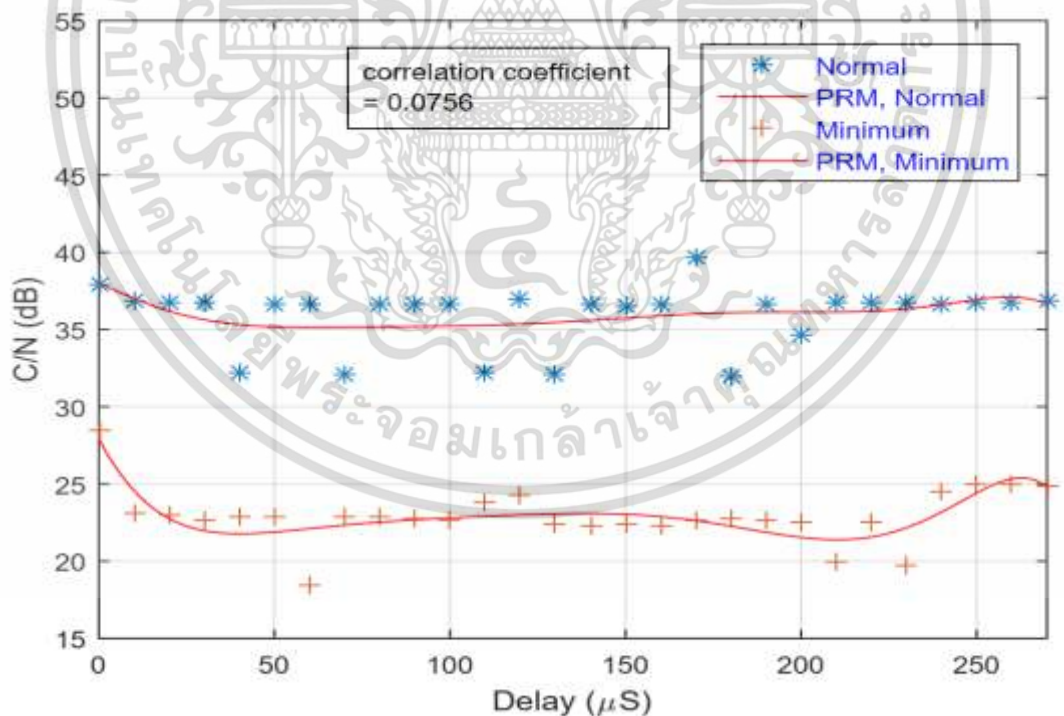


รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบ Noise Margin ภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโครงข่ายความถี่เดียว มาตรฐาน DVB-T2



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบอัตราคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนภายในช่วงเวลาป้องกัน ระหว่างค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณและค่าปกติสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐานโครงข่ายความถี่เดียว DVB-T2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้น ยังมีการนำเสนอค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการรับสัญญาณด้วยความแรงสัญญาณแบบปกติและการรับสัญญาณด้วยความแรงขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะของสัญญาณที่รับได้ด้วยความแรงปกติกับความแรงขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้นั้น มีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัม ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะเป็นไปในสอดคล้องกัน โดยมีค่า R-squared เท่ากับ 0.8970 ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดของการเลือกใช้แบบจำลองการถดถอยพหุนามกำลังแปดที่เลือกใช้ โดยค่า R-square ทุกค่าในตารางมีค่ามากกว่า 0.5 ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสำหรับการทำนายที่เลือกใช้ มีค่าเข้าใกล้กับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ สามารถนำมาใช้สำหรับการทำนายพฤติกรรมของสัญญาณได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 5.3 จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดิน ระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว

Minimum Requirement	Mean	STD	Normal vs Min correlation	R-squared
Power (dBμV)	66.03	0.7695	0.6266	0.5255
MER (dB)	7.93	1.1786	0.6973	0.7791
Spectrum Variation (dB)	3.02	0.8822	0.8970	0.9263
Noise Margin (dB)	-5.34	1.6144	0.6987	0.7789
CNR (dB)	22.94	0.7695	0.0756	0.5949

5.3.1 แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลสำหรับความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้

ในหัวข้อนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลองการถดถอยพหุนามกำลังแปด ซึ่งสามารถใช้สำหรับการทำนายพฤติกรรมความแรงของสัญญาณขั้นต่ำที่ต้องการ ได้อย่างใกล้เคียงกับข้อมูลจริงจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองสำหรับ ค่ากำลังงานขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ อัตราผิดพลาดการมอดูเลต ค่าความเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม ค่า Noise margin และ ค่า CNR โดยนำเสนอตามสมการที่ 5.1 ถึงสมการที่ 5.5 ดังนี้

$$y_{Pmin}(x) = (-1.615e - 16)x^8 + (1.847e - 13)x^7 + (-8.689e - 11)x^6 + (2.17e - 08)x^5 + (-3.103e - 06)x^4 + (0.0002559)x^3 + (-0.01175)x^2 + (0.2786)x + 63.69 \quad (5.1)$$

$$y_{MERmin}(x) = (4.976e - 16)x^8 + (-5.618e - 13)x^7 + (2.602e - 10)x^6 + (-6.369e - 08)x^5 + (8.859e - 06)x^4 + (-0.0007017)x^3 + (0.03016)x^2 + (-0.6371)x + 12.97 \quad (5.2)$$

$$y_{SPVmin}(x) = (3.099e - 16)x^8 + (-3.603e - 13)x^7 + (1.732e - 10)x^6 + (-4.443e - 08)x^5 + (6.56e - 06)x^4 + (-0.0005594)x^3 + (0.02615)x^2 + (-0.5864)x + 7.308 \quad (5.3)$$

$$y_{NMmin}(x) = (5.023e - 16)x^8 + (-5.654e - 13)x^7 + (2.61e - 10)x^6 + (-6.373e - 08)x^5 + (8.846e - 06)x^4 + (-0.0006996)x^3 + (0.03006)x^2 + (-0.6354)x + -0.5304 \quad (5.4)$$

$$y_{CNmin}(x) = (-1.403e - 16)x^8 + (1.165e - 13)x^7 + (-3.395e - 11)x^6 + (3.116e - 09)x^5 + (3.974e - 07)x^4 + (-0.000119)x^3 + (0.011)x^2 + (-0.4337)x + 27.92 \quad (5.5)$$

กำหนดให้

$y_{Pmin}(x)$	คือ ค่ากำลังงานขั้นต่ำของสัญญาณที่ยังสามารถรับภาพได้ มีหน่วยเป็น dB
$y_{MERmin}(x)$	คือ อัตราผิดพลาดการมอดูเลต ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ มีหน่วยเป็น dB
$y_{SPVmin}(x)$	คือ ค่าความเบี่ยงเบนสเปกตรัมขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ มีหน่วยเป็น dB
$y_{NMmin}(x)$	คือ ค่า Noise margin ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ มีหน่วยเป็น dB
$y_{CNmin}(x)$	คือ ค่า CNR ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ มีหน่วยเป็น dB
x	คือ ค่าการประวิงเวลาภายในช่วงเวลาป้องกัน

5.4 ค่าขีดเขตความแรงสัญญาณขั้นต่ำจากผลกระทบเนื่องจากการรับสัญญาณ

ขั้นตอนและวิธีการหาสร้างค่าขีดเขตจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำ โครงข่ายความถี่เดียว ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ อันเนื่องมาจากผลกระทบเนื่องจากการรับสัญญาณ ได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อ 4.5 ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการเท่านั้น

ข้อมูลที่ได้การตรวจวัดในพื้นที่รับสัญญาณในภาคสนาม ณ จุดทดสอบจำนวน 15 จุดด้วยการรับสัญญาณที่ความแรงสัญญาณปกติ แสดงในตารางที่ 5.4 และสำหรับความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้แสดงในตารางที่ 5.5 ข้อมูลสำคัญที่ตรวจวัดได้ประกอบไปด้วย ค่ากำลังงานที่รับได้ อัตราผิดพลาดการมอดูเลต ค่า Noise margin ค่า CNR ค่า bBER ค่า LBER และค่า Delay หรือค่าการประวิงเวลาระหว่างสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว ค่ากำลังงานที่รับได้ด้วย ความแรงสัญญาณตามปกติที่ตรวจวัดได้จากจุดทดสอบทั้ง 15 จุด มีค่าอยู่ระหว่าง 28.67 dBμV ถึง 46.97 dBμV อัตราผิดพลาดการมอดูเลต มีค่าระหว่าง 9.31 dB ถึง 21.84 dB ค่า CNR มีค่าระหว่าง 20.78 dB ถึง 36.49 dB และค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัม (Spectrum variation :SPV) มีค่าระหว่าง 2.62 dB ถึง 7.09 dB ส่วนในตารางที่ 5.7 แสดงข้อมูลการตรวจวัดจากจุดทดสอบ โครงข่ายความถี่เดียว สำหรับการรับสัญญาณด้วยความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ โดยค่ากำลัง

งานขั้นต่ำที่สามารถรับสัญญาณได้ มีค่าอยู่ระหว่าง 22.65 dB ถึง 42.51 dB อัตราผิดพลาดการมอดูเลต มีค่าระหว่าง 8.06 dB ถึง 8.29 dB ค่า CNR มีค่าระหว่าง 18.19 dB 22.65 dB และค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัม มีค่าระหว่าง 2.62 dB ถึง 7.08 dB โดยค่าการประวิงเวลาระหว่างสัญญาณจากสองสถานีส่ง มีค่าระหว่าง 158.07 μ s ถึง 202.47 μ s

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลการตรวจวัดสัญญาณจากตำแหน่งการวัดพื้นที่จริงโครงข่ายความถี่เดียว สำหรับการรับสัญญาณด้วยความแรงสัญญาณปกติ

Point	Power (dB μ V)	MER (dB)	Noise margin (dB)	CNR (dB)	Delay (μ s)	σ_{sp} (dB)
1	28.67	9.45	-4.05	23.12	176.72	6.03
2	41.27	16.65	3.15	29.59	168.99	5.30
3	45.57	21.45	7.95	32.53	158.07	3.45
4	34.77	14.25	0.75	26.36	184.17	4.47
5	45.77	21.34	7.84	32.30	172.59	3.32
6	46.97	21.84	8.34	33.94	160.18	4.46
7	34.17	9.31	-4.19	20.78	192.09	3.83
8	41.77	18.66	5.16	29.87	179.12	3.57
9	45.77	18.66	5.16	30.85	162.29	4.55
10	41.77	16.09	2.59	29.73	196.84	6.00
11	30.17	10.40	-3.10	23.63	182.41	5.59
12	42.67	18.31	4.81	28.57	165.59	2.62
13	33.57	11.28	-2.22	22.21	202.47	3.29
14	39.46	15.98	2.48	27.96	186.59	4.34
15	44.71	21.76	8.26	36.49	170.25	7.09

การสร้างแบบจำลองชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้จากผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการนั้น ได้มาจากข้อมูลจากสภาพพื้นที่ที่สัญญาณเดินทางผ่านสภาวะแวดล้อมจริงไปยังจุดรับสัญญาณ ซึ่งจะได้ค่าความเบี่ยงเบนของระดับความสูงและความต่ำของพื้นที่ โดยปัจจัยดังกล่าวส่งผลกระทบต่อความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมสัญญาณในการรับที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่งการวัด ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้สร้างแบบจำลองการถดถอยสำหรับการวิเคราะห์ค่าชดเชยเนื่องจากพื้นที่รับสัญญาณภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 5.9 เป็นแบบจำลองการถดถอยสำหรับเส้นทาง การรับสัญญาณจากสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ ต่อความเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ จากแบบจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ความเบี่ยงเบนของพื้นที่ที่มีค่าน้อย และส่งผลให้ความเบี่ยงเบนสเปกตรัมน้อยเช่นกัน โดยค่าชดเชยความแรงของสัญญาณประณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้จะมีค่าที่ระหว่าง 4.45 dB ถึง 4.6 dB รูปที่ 5.10 เป็นแบบจำลองการถดถอย

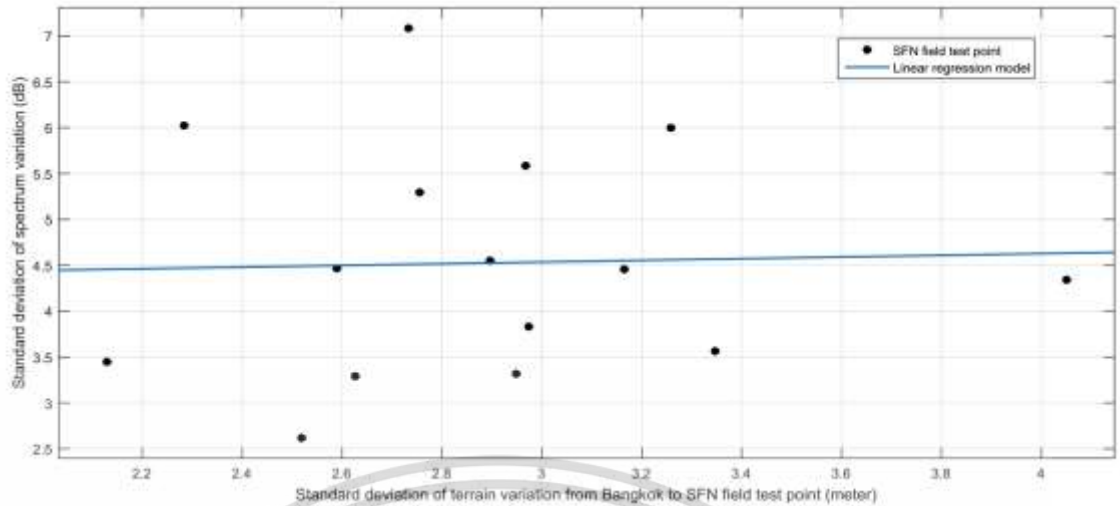
ตารางที่ 5.5 ข้อมูลการตรวจวัดสัญญาณจากจุดทดสอบภาคสนามโครงข่ายความถี่เดียว สำหรับการรับ สัญญาณด้วยความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นจำเป็นต้องใช้เอกสารฉบับนี้ กรุณาแจ้งให้ทราบก่อนการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้

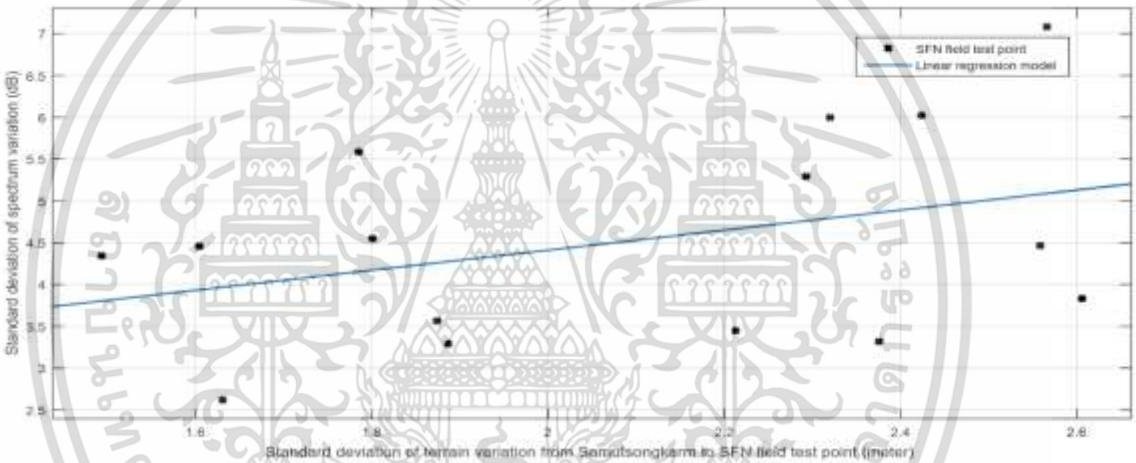
Point	Power (dB μ V)	MER (dB)	Noise margin (dB)	CNR (dB)	Delay (μ s)	σ_{sp} (dB)
1	22.65	8.24	-5.26	21.59	176.72	6.02
2	35.98	8.20	-5.30	20.87	168.99	5.29
3	42.12	8.11	-5.39	19.02	158.07	3.45
4	30.31	8.16	-5.34	20.04	184.17	4.47
5	42.45	8.10	-5.40	18.89	172.59	3.32
6	42.51	8.16	-5.34	20.03	160.18	4.46
7	30.34	8.13	-5.37	19.40	192.09	3.83
8	38.21	8.11	-5.39	19.14	179.12	3.56
9	41.22	8.16	-5.34	20.12	162.29	4.55
10	35.77	8.24	-5.26	21.57	196.84	6.00
11	24.59	8.22	-5.28	21.16	182.41	5.58
12	40.05	8.06	-5.44	18.19	165.59	2.62
13	30.28	8.10	-5.40	18.86	202.47	3.29
14	35.11	8.15	-5.35	19.91	186.59	4.34
15	37.62	8.29	-5.21	22.65	170.25	7.08

สำหรับเส้นทางการรับสัญญาณจากสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สมุทรสงคราม ต่อความเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางมาจากเครื่องส่งถึงจุดทดสอบวัดสัญญาณในภาคสนามมีระยะทางที่ไกลกว่าการรับสัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ มาก โดยมีระยะทางประมาณ 15 กิโลเมตร เมื่อเทียบกับการรับสัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ ซึ่งมีระยะทางห่างถึงประมาณ 69 กิโลเมตร ผลกระทบเนื่องจากพื้นที่ต่อความแปรปรวนของสเปกตรัมจึงมีมากกว่า จากรูปค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัม จะมีค่าที่ระหว่าง 3.7 dB ถึง 5.2 dB

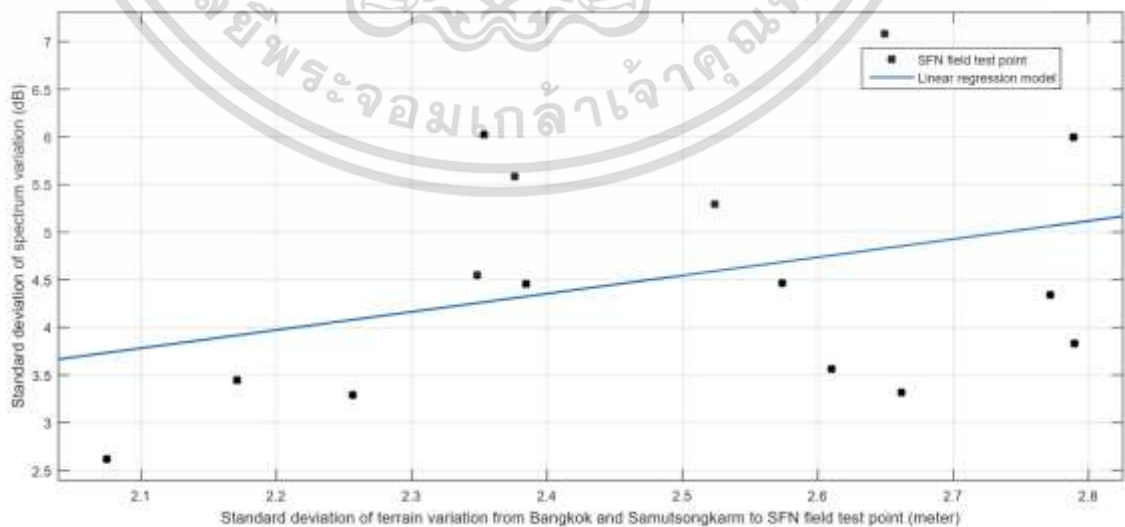
เนื่องจากผลกระทบของลักษณะพื้นที่ที่สัญญาณเดินทางไปยังเครื่องรับสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว นั้น ต้องพิจารณาจากเส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปถึงเครื่องรับจากทั้งสองเครื่องส่ง ภายในพื้นที่ทับซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว จากรูปที่ 5.11 แสดงผลกระทบอันเนื่องมาจากพื้นที่ที่สัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งภายในพื้นที่ทับซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว เดินทางไปยังเครื่องรับทั้งสองเส้นทาง ค่าความเบี่ยงเบนที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย มีค่าระหว่าง 3.65 dB ถึง 5.15 dB



รูปที่ 5.9 การหาค่าเฉลี่ยสำหรับชุดเซตจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากสถานีส่งกรุงเทพฯ



รูปที่ 5.10 การหาค่าเฉลี่ยสำหรับชุดเซตจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากสถานีส่งสมุทรสงคราม



รูปที่ 5.11 การหาค่าเฉลี่ยสำหรับชุดเซตจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขึ้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียว จากสถานีส่งกรุงเทพฯ และสถานีส่งสมุทรสงคราม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1 การจำลองค่าถดถอยสำหรับการชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณชั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ แบบจำลองที่ได้สร้างจากข้อมูลเส้นทางที่สัญญาณเดินทางผ่านสภาวะแวดล้อมจริงไปยังจุดรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว โดยใช้ข้อมูลจากเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจาก สถานีส่งกรุงเทพมหานคร และสถานีส่งสมุทรสงคราม และผลของการเบี่ยงเบนสเปกตรัมเนื่องจากผลกระทบของเส้นทางที่สัญญาณเดินทางไปถึง ซึ่งแสดงเป็นสมการการวิเคราะห์การถดถอยดังสมการที่ 5.6 ถึงสมการที่ 5.8 ดังนี้

$$y_{SPV} = (0.09201)x_{TRV_bkk} + 4.259 \quad (5.6)$$

$$y_{SPV} = (1.199)x_{TRV_ss} + 2.012 \quad (5.7)$$

$$y_{SPV} = (1.909)x_{TRV_bkk_ss} - 0.2265 \quad (5.8)$$

กำหนดให้

y_{SPV}	คือ ค่าการเบี่ยงเบนของสเปกตรัม หน่วยเป็น dB
x_{TRV_bkk}	คือ ค่าเบี่ยงเบนของความสูงต่ำของพื้นที่ตลอดเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ ไปยังตำแหน่งรับสัญญาณ
x_{TRV_ss}	คือ ค่าเบี่ยงเบนของความสูงต่ำของพื้นที่ตลอดเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สมุทรสงคราม ไปยังตำแหน่งรับสัญญาณ
$x_{TRV_bkk_ss}$	คือ ค่าเบี่ยงเบนของความสูงต่ำของพื้นที่ตลอดเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล กรุงเทพฯ และสมุทรสงคราม ไปยังจุดรับสัญญาณ

5.5 การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับแนวปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทดลองวิจัยจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 สำหรับประเทศไทย [60] การเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยอื่นจึงยังไม่มีข้อมูลให้เปรียบเทียบมากนัก เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศของแต่ละประเทศ ไม่ได้ใช้พารามิเตอร์สำหรับการออกอากาศที่เหมือนกัน ในช่วงเริ่มต้นก่อนที่จะได้กำหนดพารามิเตอร์การออกอากาศนี้สำหรับประเทศไทย กสทช ได้ร่วมดำเนินการทดลองและปรับแต่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยร่วมกับ ITU โดยพิจารณาจาก จำนวนช่องรายการ อัตราการส่งข้อมูล ทำให้พารามิเตอร์สำหรับประเทศไทย จึงไม่ได้เหมือนกับพารามิเตอร์ที่ใช้งานในประเทศอื่น ๆ จากเหตุผลการพิจารณาดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ กับแนวปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB ที่ได้ตีพิมพ์ไว้ใน [21] [61] โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการอ้างอิงการนำเสนอค่า CNR ชั้นต่ำที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงข่าย โดยได้ทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับเฉพาะค่าพารามิเตอร์ในการออกอากาศที่มีความใกล้เคียงกันกับที่ประเทศไทยใช้ในการออกอากาศ

จากตารางที่ 5.6 ได้ทำการเปรียบเทียบในสามส่วนที่สำคัญ คือ ค่า CNR ขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับ ช่องสัญญาณแบบเกาส์ ค่า CNR ขั้นต่ำที่ต้องการ สำหรับ 0 dB echo และค่า CNR ขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการรับสัญญาณแบบ โครงข่ายความถี่เดียว รวมถึงนำเสนอค่า CNR ขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการรับสัญญาณจากพื้นที่รับสัญญาณภาคสนามและค่าชดเชยสเปกตรัมที่ต้องการ จากตารางค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแนวปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB ที่ได้นำเสนอไว้ ค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 17.4 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้นำเสนอไว้เพียง 0.1 dB เท่านั้น สำหรับค่า CNR ขั้นต่ำที่ต้องการที่ 0 dB echo ในงานวิจัยอ้างอิงไม่มีผลการทดลองสำหรับพารามิเตอร์สำหรับประเทศไทย จึงไม่มีค่าสำหรับเปรียบเทียบในหัวข้อนี้ โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 28.5 dB สำหรับค่า CNR ขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียวมีค่าเท่ากับ 22.94 dB และสำหรับการชดเชยการเบี่ยงเบนของแถบสเปกตรัมและความแรงของสัญญาณที่ต้องการสำหรับการรับสัญญาณในพื้นที่รับสัญญาณจริง มีค่าเท่ากับ 4.5 dB

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองวิจัยกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

DVB-T2 Mode	EBU Tech 3348 r4 [61]		Empirical
	EDP247 (Table A4.2)	NorDig2013 (Table A4.5)	
Constellation	64-QAM	64-QAM	64-QAM
Code rate	3/5	3/5	3/5
Carrier	16k	32k	16k
CNR in Gaussian channel			
Simulation *1	15.1	12.0	15.1
Calculated CNR *2	17.3	14.5	17.3
Average measured	15.6	14.4	17.4
Difference to simulation	0.5	2.4	2.3
Difference to calculated CNR *2	-1.7	-0.1	0.1
CNR in 0 dB echo			
Simulation *1	-	13.9	-
Calculated CNR *2	-	15.9	-
Average measured	-	17.6	28.5
Difference to simulation	-	3.7	-
Difference to calculated CNR *2	-	1.7	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

CNR ในโครงข่ายความถี่เดียว (ผลจากห้องปฏิบัติการ)			
Average measured	-	-	22.9
CNR ในโครงข่ายความถี่เดียวขดเขยโดยระดับความสูงและระดับต่ำของสถานะแวดล้อม (ผลจากการวัดจริง)			
Max measured	-	-	22.7
Min measured	-	-	18.2
Average measured	-	-	20.1
Average spectrum variation	-	-	4.5
Data rate (bit/s)	22,038,376	22,038,376	22,038,376

หมายเหตุ

*1 ETSI TS 102831 V1.1.1 Tab.44 [21]

*2 EBU Tech 3348 V2.0 Table A4.2 [61]

5.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลที่ได้จากการทดลองวิจัยและการอภิปรายผลสำหรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว โดยแบ่งเป็นสี่ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียวในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการทดลองด้วยการออกอากาศจริงด้วยกำลังส่งต่ำ เพื่อดูผลกระทบจากค่าการประวิงเวลาระหว่างสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว เปรียบเทียบผลกระทบจากการออกอากาศด้วยความถี่ต่าง ๆ ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณที่ชิงโครโนซันกันในช่วงการประวิงเวลาต่าง ๆ ตลอดช่วงเวลาป้องกัน ตามขอบเขตแนวปฏิบัติทางเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลของ กสทช

ในส่วนที่สอง นำเสนอผลการทดลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับสัญญาณได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการ การทดลองดำเนินการในระบบปิดเพื่อและมีการทำซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่นำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่ากำลังงานขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ ค่าความเบี่ยงเบนกำลังงานของสเปกตรัมเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของช่องสัญญาณ อัตราผิดพลาดการมอดูเลต ค่า Noise margin และค่า CNR

ในส่วนที่สาม นำเสนอวิธีการหาค่าขดเขยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำโครงข่ายความถี่เดียวจากผลกระทบเนื่องจากการรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดในพื้นที่ตัวอย่างจริง และข้อมูลจากโปรแกรม Google earth สำหรับค่าความสูงต่ำของพื้นที่ที่สัญญาณเดินทางผ่านจากเครื่องส่งไปยังจุดวัดสัญญาณตัวอย่าง โดยใช้ข้อมูลพื้นที่จากเส้นทางสัญญาณทั้งสองเครื่องส่งในโครงข่ายความถี่เดียว เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการสร้างแบบจำลองเพื่อขดเขยค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำที่ยังสัญญาณรับสัญญาณได้ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นแนวทางประยุกต์สำหรับการออกแบบโครงข่ายความถี่เดียว สำหรับพื้นที่การรับสัญญาณอื่น ๆ ได้ต่อไป

ในส่วนสุดท้าย นำเสนอการเปรียบเทียบผลการวิจัยกับแนวปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้สำหรับประเทศไทยเท่านั้น

ข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองมีไม่มากนัก ได้ทำการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับกับแนวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB ซึ่งผลที่ได้สำหรับค่า CNR ขั้นต่ำที่ยังสามารถรับภาพได้ในกรณีช่องสัญญาณแบบเกาส์มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าผิดพลาดเพียง 0.1 dB วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในส่วนของค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งได้แสดงผลที่ได้จากการทดลองไว้ครบถ้วน และสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบการให้บริการโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โครงข่ายความถี่เดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประเมินผลและการชดเชยสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการออกอากาศของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ในพื้นที่ทับซ้อนของโครงข่ายความถี่เดียว ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดของสัญญาณที่ยังสามารถรับสัญญาณได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว และการหาค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณอันเนื่องมาจากผลกระทบจากพื้นที่รับสัญญาณ โดยผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการรวมถึงการทดลองวัดสัญญาณในภาคสนามด้วยโครงข่ายจริง เพื่อนำมาปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบโครงข่ายการให้บริการโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบสำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ซึ่งจะได้อธิบายไว้ในส่วนของการสรุปผลการวิจัยต่อไป

6.2 สรุปผลการวิจัย

6.2.1 ผลการศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการ

การทดลองในห้องปฏิบัติการดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์ในการออกอากาศจริง ออกอากาศด้วยกำลังงานต่ำ 100 มิลลิวัตต์ เพื่อทดสอบผลการชิงโครโมสโคปของสัญญาณจากสองเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน โครงข่ายความถี่เดียว โดยทำการเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาระหว่างสองเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลภายในช่วงเวลาป้องกัน เนื่องจากการทดลองนี้ใช้พารามิเตอร์ในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย จะมีค่าช่วงเวลาป้องกันสูงสุดเท่ากับ 266 ไมโครวินาทีสำหรับการตรวจวัดผลกระทบจากการประวิงเวลาภายในช่วงเวลาป้องกัน จะดำเนินการเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดทุก 10 ไมโครวินาทีตลอดช่วงประวิงเวลาจาก 0 ไมโครวินาทีถึง 270 ไมโครวินาทีโดยทำการตรวจวัดซ้ำทั้งหมด 20 ครั้ง เพื่อให้ผลการวัดมีความน่าเชื่อถือและผิดพลาดน้อยที่สุด ผลที่ได้จากการทดลองดังที่แสดงในตารางที่ 6.1 คือ อัตราขยายโครงข่ายความถี่เดียวสำหรับกำลังงานที่รับได้ที่เครื่องรับระหว่างการออกอากาศด้วยโครงข่ายหลายความถี่ และ โครงข่ายหลายความถี่ จะมีความแตกต่างกันที่ประมาณ 3.61 dB ถึง 5.48 dB จากการทดลองด้วยความถี่ออกอากาศทั้ง 5 ความถี่ มีแนวโน้มว่ายิ่งความถี่การออกอากาศสูงขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างอัตราขยายโครงข่ายความถี่เดียว ก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน ค่าเกณฑ์ของอัตราผิดพลาดการมอดูเลต จะมีค่าอยู่ระหว่าง -4.42 dB ถึง -8.79 dB สำหรับอัตราผิดพลาดการมอดูเลตต่ำ เมื่อมีการชิงโครโมสโคประหว่างเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ซึ่งที่ความถี่ออกอากาศต่ำมีแนวโน้มที่จะมีค่าติดลบมากขึ้น สำหรับการประวิงเวลา 0 ไมโครวินาทีหรือที่ช่องสัญญาณ 0 dB echo อัตราขยายโครงข่ายความถี่เดียว สำหรับกำลังงานที่รับได้ที่เครื่องรับจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำลงจากค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาป้องกันประมาณ 3 dB ส่วนค่าเกณฑ์ของอัตราผิดพลาดการมอดูเลต จะมีค่าประมาณ 0 dB

ตารางที่ 6.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 ในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบ	ค่า
ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณโหมดโครงข่ายหลายความถี่	42.76 dB
ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณโหมดโครงข่ายความถี่เดียว	47.36 dB
อัตรายายโครงข่ายความถี่เดียว	3.61 dB ถึง 5.58 dB
อัตรายาย MER	-4.42 dB ถึง -8.79 dB
การสูญเสียที่ช่องสัญญาณ 0 dB echo	-3 dB

6.2.2 ผลการศึกษาการทดลองเพื่อหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ในห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองวิจัยในหัวข้อก่อนหน้านี้ ใช้การออกอากาศจริงสำหรับการทดลอง ปัญหาที่พบคือทำให้ได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมที่ไม่ต้องการภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดสัญญาณได้ การทดลองในหัวข้อนี้จึงแก้ไขโดยทำการทดลองในระบบปิด โดยใช้สัญญาณจากจุด Directional Coupler ต่อเข้ากับอุปกรณ์รวมสัญญาณและต่อเข้ากับอุปกรณ์สำหรับลดทอนแบบปรับค่าได้เพื่อให้สามารถหาค่าเกณฑ์ต่ำสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้สำหรับโครงข่ายความถี่เดียว ดำเนินการตรวจวัดแต่ละช่วงการประวิงเวลา 20 ครั้งซ้ำกันเช่นเดียวกับการทดลองวิจัยในหัวข้อก่อนหน้านี้ ผลการศึกษาวิจัยได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 6.2 คือ การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการรับสัญญาณจากโครงข่ายความถี่เดียว ที่ระดับสัญญาณปกติ กับระดับจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้ ผลที่ได้มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้ เพื่อเป็นการยืนยันว่าระดับความแรงสัญญาณทั้งสองมีรูปแบบเดียวกัน ค่ากำลังงานต่ำสุดที่รับได้ที่เครื่องรับมีค่าประมาณ 66.03 dB μ V ค่า อัตราผิดพลาดการมอดูเลต มีค่าประมาณ 7.93 dB ค่าการเปลี่ยนแปลงของแถบสเปกตรัม มีค่าประมาณ 3.02 dB ค่า Noise margin มีค่าประมาณ -5.34 dB และค่า CNR มีค่าประมาณ 22.94 dB แบบจำลองสำหรับการทำนายสัญญาณตลอดช่วงเวลาป้องกัน ใช้แบบจำลองการถดถอยพหุนามเลขยกกำลังแปด ซึ่งได้เส้นแนวโน้มการทำนายเข้าใกล้ผลการทดลองมากที่สุด สามารถใช้แบบจำลองนี้สำหรับการทำนายพฤติกรรมของสัญญาณได้

6.2.3 ผลการหาค่าขีดเขตจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดโครงข่ายความถี่เดียว จากผลกระทบในพื้นที่การรับสัญญาณ

สัญญาณที่รับได้จากการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับโครงข่ายความถี่เดียวมาตรฐาน DVB-T2 โดยพิจารณาจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสำหรับการใช้งานจริงนั้น ผลกระทบจากพื้นที่ในการรับสัญญาณ มีองค์ประกอบจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การหาค่าขีดเขตจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดโครงข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โคร่งข่ายความถี่เดียว

จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
ความแรงสัญญาณ	66.03 dB μ V
ค่า MER	7.93 dB
ค่าเบี่ยงเบนกำลังงานสเปกตรัม	3.02 dB
ค่า Noise margin	-5.34 dB
ค่า CNR	22.94 dB

ความถี่เดียว จากผลกระทบเนื่องจากพื้นที่การรับสัญญาณ จึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้ค่าความแรงสัญญาณต่ำสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้นั้นมีความเที่ยงตรงมากที่สุด การดำเนินการใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมพื้นที่จากโปรแกรม Google earth โดยทำการตรวจสอบเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลทั้งสองเครื่องในโครงข่ายความถี่เดียวผ่านระดับความสูงและระดับความต่ำของสถานะแวดล้อมต่าง ๆ โดยแปลข้อมูลดังกล่าวเป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่ตลอดเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ไปยังตำแหน่งรับสัญญาณ ที่ได้นำมาหาความสัมพันธ์กับค่าการเบี่ยงเบนของสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้จากพื้นที่วัดสัญญาณ ในบริเวณพื้นที่ทับซ้อน โดยมีตำแหน่งการทดสอบตัวอย่างทั้งสิ้น 15 ตำแหน่ง การตรวจวัดในแต่ละตำแหน่งทำการตรวจวัดซ้ำกัน 20 ครั้ง เพื่อให้ค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ข้อมูลที่ได้จากพื้นที่และความเบี่ยงเบนของสเปกตรัมถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองการถดถอยสำหรับค่าชดเชยความแรงสัญญาณต่ำสุดที่ยังสามารถรับภาพได้ โดยผลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 6.3 คือ ผลกระทบเนื่องจากพื้นที่ต่อความแปรปรวนของสเปกตรัมสำหรับเส้นทางสัญญาณจากสถานีส่งกรุงเทพฯ (อาคารใบหยก) ถึงตำแหน่งการวัดสัญญาณ มีค่าความเบี่ยงเบนของสเปกตรัมประมาณ 4.45 dB ถึง 4.6 dB ผลกระทบเนื่องจากพื้นที่ต่อความแปรปรวนของสเปกตรัมสำหรับเส้นทางสัญญาณจากสถานีส่งสมุทรสงคราม ถึงจุดทดสอบวัดสัญญาณ มีค่าความเบี่ยงเบนของสเปกตรัมประมาณ 3.7 dB ถึง 5.2 dB และ ผลกระทบเนื่องจากพื้นที่ต่อความแปรปรวนของสเปกตรัมสำหรับเส้นทางสัญญาณจากทั้งสถานีกรุงเทพฯ และสถานีสมุทรสงคราม ถึงจุดทดสอบวัดสัญญาณ มีค่าความเบี่ยงเบนของสเปกตรัมประมาณ 3.65 dB ถึง 5.15 dB ซึ่งค่าที่ได้จากแบบจำลองนี้ สามารถนำมาใช้เป็นค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุด โคร่งข่ายความถี่เดียว จากผลกระทบเนื่องจากพื้นที่การรับสัญญาณได้

ตารางที่ 6.3 ค่าชดเชยจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โคร่งข่ายความถี่เดียว

พื้นที่ทับซ้อนการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 โคร่งข่ายความถี่เดียว	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	พื้นที่ภูมิประเทศ (เมตร)	กำลังงานสเปกตรัม (dB)
ระหว่าง สถานีฯ กรุงเทพฯ และ สถานีฯ สมุทรสงคราม	2.08 - 2.79	3.65 - 5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.4 การประเมินผลเปรียบเทียบผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลการทดลองวิจัยที่ได้นำเสนอมีลักษณะเฉพาะสำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศในประเทศไทย และงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การแก้ไขปัญหาในการออกแบบโครงข่ายความถี่เดียว จากการใช้งานจริง จึงมีข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบน้อย โดยการเปรียบเทียบหลัก ใช้การเปรียบเทียบกับกับแนวปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB [61] โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการอ้างอิงการนำเสนออัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต่ำสุดที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงข่ายสำหรับค่าที่ได้จากการหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่ำสุดของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนสำหรับโครงข่ายหลายความถี่ นั้นมีความใกล้เคียงกันมาก มีค่าที่ 17.4 dB ซึ่งแตกต่างจากค่าที่ได้จากเอกสารแนวปฏิบัติสำหรับการออกแบบโครงข่าย DVB เพียง 0.1 dB เท่านั้น ในส่วนของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต่ำสุดของ โครงข่ายความถี่เดียว ไม่ได้มีข้อมูลในเอกสารดังกล่าว และบางส่วนก็เป็นข้อมูลที่ไม่ได้ทำการทดสอบที่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย

6.3 ข้อเสนอแนะ แนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคต

ผลการศึกษาวิจัยมุ่งเน้นไปที่ การทดลองสำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกอากาศในประเทศไทย และข้อมูลที่ได้จากลักษณะภูมิประเทศสำหรับการวัดสัญญาณที่ยังไม่ครอบคลุมทั่วประเทศ ทำให้การสร้างแบบจำลองค่าชดเชยในพื้นที่วัดสัญญาณจริงอาจยังไม่มีรายละเอียดมากพอ อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนออีกสามสามารถใช้เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพและทำนายได้อย่างถูกต้องแม่นยำต่อไปได้

แนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคต จะได้ทำการทดลองสำหรับความแรงของสัญญาณต่ำสุดที่ยังสามารถรับภาพได้ของสัญญาณ โครงข่ายความถี่เดียว จากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ที่มากกว่าสองเครื่อง จะได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงระดับความแรงของสัญญาณจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล แต่ละเครื่องในโครงข่ายความถี่เดียว ให้มีความแตกต่างกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะตรงตามปรากฏการณ์ในการรับสัญญาณที่ได้จากการออกอากาศจริงมากที่สุด รวมไปถึงการเปลี่ยนช่วงการประวิงเวลาให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงใกล้กับช่องสัญญาณ 0 dB echo ซึ่งเป็นช่วงการประวิงเวลาที่สัญญาณมีการสูญเสียและหักล้างกันมากที่สุด จะได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกอากาศ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย จะได้ทำการทดลองสำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้ในการออกอากาศเพื่อสร้างเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบติดตั้งโครงข่ายความถี่เดียว ด้วยค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่นอกเหนือจากงานวิจัยนี้ สำหรับการหาค่าชดเชยค่าต่ำสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณนั้น จะได้ทดลองเก็บข้อมูลในพื้นที่อื่น ๆ ตลอดจนที่ระยะทางที่แตกต่างกัน จากจุดแพร่กระจายสัญญาณไปยังจุดรับสัญญาณ เพื่อให้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อการทำนายแนวโน้มของค่าชดเชยและแนวโน้มของระดับความแรงของสัญญาณที่ต้องการให้มีความถูกต้องมากที่สุด ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพและไม่สูญเสียกำลังงานที่มากเกินไปสำหรับการออกอากาศ และสุดท้ายสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบโครงข่ายความถี่เดียว ได้อย่างสมบูรณ์แบบมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] I. Eizmendi, M. Velez, D. Gómez-Barquero, J. Morgade, V. Baena-Lecuyer, M. Slimani, and Zoellner J, "DVB-T2: The second generation of terrestrial digital video broadcasting System," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 60, no. 2, pp. 258-271, June 2014.
- [2] A. Mattsson, "Single frequency networks in DTV," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 51, no. 4, pp. 413-422, Dec. 2005.
- [3] I. Eizmendi, G. Prieto, G. Berjon-Eriz, I. Landa, and M. Velez, "Empirical DVB-T2 thresholds for fixed reception." IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 59, no. 2, pp. 306-316, June 2013.
- [4] M.V. Guerra, C.V.R. Ron, L. da Silva Mello, "Experimental characterization of a SFN digital broadcast channel," 2012 IEEE Latin-America Conference on Communications, April 2013.
- [5] D. Plets, W. Joseph, P. Angueira, J.A. Arenas, L. Verloock, and L. Martens, "On the methodology for calculating SFN gain in digital broadcast systems," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 56, no. 3, pp. 331-339, Sep. 2010.
- [6] E. Kroon and Penttinen J.T.J., "SFN gain estimations based on frequency response," 2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), May 2010.
- [7] I. Udriou, I. Tache, N. Angelescu, and I. Caciula, "The analyze of MER variation concerning the quality of transmission for DVB-T signals," Proceedings of the 8th WSEAS international conference on Data networks, communications, computers., Morgan State University, Baltimore, USA: WSEAS. pp. 169-172.
- [8] A. Saliato, G. Roig, D. Gómez-Barquero, and N. Cardona, "Propagation model calibration for DVB-SH in terrestrial single frequency networks," Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, pp. 1-5, 2010
- [9] S.L. Linfoot, "A comparison of 64-QAM and 16-QAM DVB-T under long echo delay multipath conditions," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 49, no 4, pp. 978-982, Nov 2003.
- [10] M. Tomos, C. Tanougast, A. Dandache, P. Bertillon, and P. Kasser, "Experimental performance of mobile DVB-T2 in SFN and distributed MISO network," 2012 19th International Conference on Telecommunications (ICT), Jounieh, Lebanon, pp. 1-5, June 2012.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] B. Ruckveratham and S. Promwong, "Evaluation of SFN gain for DVB-T2," International Conference on Digital Arts, Media and Technology, Chiang Mai, Thailand, pp. 85-88, April 2017.
- [12] B. Miskovic, D.M. Lutovac, "Influence of guard interval duration to interchannel interference in DVB-T2 signal," 2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Bar, Montenegro, pp. 220-223, August 2012.
- [13] V.K.V. Gottumukkala and H. Minn, "Capacity analysis and pilot-data power allocation for MIMO-OFDM with transmitter and receiver IQ imbalances and residual carrier frequency offset," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no 2, pp. 553-565, Feb. 2012.
- [14] H.R. Tanhaei and S.A. Ghorashi, "A novel channel estimation technique for OFDM systems with robustness against timing offset," IEEE Transactions on Consumer Electronics., vol 57 , no 2, pp. 348-356, May 2011.
- [15] G. Abdalla, "Orthogonal Frequency Division Multiplexing Theory and Challenges," University Of Khartoum Engineering Journals, vol. 1, no. 2, pp. 1-8, Oct. 2011.
- [16] T. Worku, H. Youngnam, and D.H. Lee, "LTE technology deployment strategy for mobile telecom operators: A techno-economic analysis," AFRICON 2015, Addis Ababa, Ethiopia, Nov. 2015.
- [17] U. Ladebusch and C.A. Liss, "Terrestrial DVB (DVB-T): A Broadcast Technology for Stationary Portable and Mobile Use," Proceedings of the IEEE, vol. 94, no 1, pp. 183-193, Jan 2006.
- [18] ETSI Tech. Spec. TS 102 773 V1.3.1, "Digital Video Broadcasting Modulator Interface (T2-MI) for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)," Jan. 2012.
- [19] T.J. Richardson, M. Shokrollahi, and R. Urbanke, "Design of capacity approaching-irregular low-density parity-check codes," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 47, no 2, pp. 619-637, Feb 2001.
- [20] T. Richardson, "Error floors of LDPC codes," Proc. Annu. Allerton Conf. Commun. Contr. Comput, vol. 41, no. 3, pp. 1426-1435, Oct. 2003.
- [21] ETSI Tech. Spec. TS 102 831 V1.1.1, "Digital Video Broadcasting. Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)," Oct. 2010.
- [22] K. Boulle and j. Belfiore, "Modulation schemes designed for the Rayleigh channel," Proc. CISS., pp. 288-293, 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] D. Perez-Calderon, C. Oria, J. Garc ´ ıa, P. Lopez, V. Baena, and I. Laca- ´ dena, “Rotated constellations for DVB-T2,” Proc. XXIV Conf. DCIS., vol. 1, pp. 128–133, Nov. 2009.
- [24] D. Perez-Calderon, V. Baena-Lecuyer, A. Oria, P. Lopez, and J. Doblado, “Simplified rotated constellation demapper for second generation terrestrial digital video broadcasting,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 59, no. 1, pp. 160–167, Mar. 2013.
- [25] K. Kim, N. Basutkar, K. Bae, P. Xue, and H. Yang, “One-dimensional soft-demapping algorithms for rotated QAM and software implementation on DSP,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 61, no. 15, pp. 3918–3930, Aug. 2013.
- [26] S. Tomasin and M. Butussi, “Low complexity demapping of rotated and cyclic Q delayed constellations for DVB-T2,” IEEE Wireless Commun. Letter, vol. 1, no. 2, pp. 81–84, Apr. 2012.
- [27] V. Mignone and A. Morello, “CD3-OFDM: A novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers,” IEEE Trans. Commun., vol. 44, no. 9, pp. 1144–1151, Sep. 1996.
- [28] A. Vigato, S. Tomasin, L. Vangelista, V. Mignone, N. Benvenuto, and A. Morello, “Coded decision directed demodulation for second generation digital video broadcasting standard,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 55, no. 3, pp. 607–615, Sep. 2009.
- [29] B. Krongold and D. Jones, “PAR reduction in OFDM via active constellation extension,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 49, no. 3, pp. 258–268, Sep. 2003.
- [30] J. Tellado and J. Cioffi, “Efficient algorithms for reducing PAR in multicarrier systems,” Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory, pp. 525–528, Aug. 1998.
- [31] J. G. Doblado, V. Baena, A. C. Oria, D. Perez-Calderon, and P. Lopez, “Coarse time synchronisation for DVB-T2,” Electron. Lett., vol. 46, no. 11, pp. 797–799, May 2010.
- [32] M. Rotoloni, S. Tomasin, and L. Vangelista, “On correlation-based synchronization for DVB-T2,” IEEE Commun. Lett., vol. 14, no. 3, pp. 248–250, Mar. 2010.
- [33] T. Jokela, M. Tupala, and J. Paavola, “Analysis of physical layer signaling transmission in DVB-T2 systems,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 56, no. 3, pp. 410–417, Sep. 2010.
- [34] A. Ingun, “DVB-T2 field trial and optimized parameters in Thailand,” Electrical Engineering Congress (iEECON), pp. 1-4, Oct. 2014.
- [35] ITU-R. Document 6E/64E, “The ESR5 Criterion for the Assessment of DVB-T Transmission Quality,” April 2004.
- [36] NBTC report 2012, “NBTC DVB-T2 trial report,” 2012.
- [37] C. D. Wilson, “Propagation Prediction Methods for International Regulation: the Work of ITU-R Study Group 3,” 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 59, Jan. 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [38] Recommendation ITU-R P.370-7, "VHF and UHF Propagation Curves for Frequency Range from 30 MHz to 1000 MHz," ITU, 1995.
- [39] A. Lau, M. Pausch, and W. Wutschner, "First results of field tests with the DAB single frequency network in Bavaria," EBU Technical Review, Autumn 1994.
- [40] M.C.D. Maddocks, I.R. Pullen, and J.A. Green, "Field trials with a high power VHF single frequency network for DAB; Measurement techniques and network performance," EBU Technical Review, Autumn 1994.
- [41] C. R. Nokes, I. R. Pullen, J. E. Salter, "Evaluation of a DVB-T Compliant Digital Terrestrial Television System," Proc. International Broadcasting Convention, pp. 331-336, Sep. 1997.
- [42] R. Grosskopf, "Comparison of Different Methods for the Prediction of the Field Strength in the VHF Range," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. Ap-35, no. 7, pp. 852-859, July 1987.
- [43] R. Brugger, "DAB Coverage of Interfering Single Frequency Networks," CCETT GT R1/DIG 167, June 1993.
- [44] ETSI document ETSI TR 101 190, "Digital Video Broadcasting (DVB): Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects," ETSI, June 1998.
- [45] ETSI document Draft prevision ETS 300 401, "Radio broadcast systems: Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers," ETSI, Mar. 1994.
- [46] ETSI document Final Draft pr. ETSI 300 744, "Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure channel coding and modulation for digital Terrestrial television (DVB-T)," ETSI, Nov. 1996.
- [47] G. Malmgren, "Single Frequency Broadcasting Networks," Ph.D. thesis, Dept. of Signals, Sensors and Systems, Royal Institute of Technology, 1997.
- [48] S. B. Slimane, "Performance of OFDM systems with time-limited waveforms over multipath radio channels," IEEE GLOBECOM 1998 (Cat. NO. 98CH36250), pp. 962-967. Aug. 2002.
- [49] V. Mignone, A. Morello, and M. Visintin, "An Advanced Algorithm for Improving DVB-T Coverage in SFN," 1997 International Broadcasting Convention IBS 97, pp. 534-540, Aug. 2002.
- [50] J. C. Rault, D. Pillet, and D. Castelain, "Time Synchronisation of the DAB receiver in a SFN network," CCETT SRL/DHN/089/94/JCR, Apr. 1994.
- [51] ETSI TS 102 831 V1.2.1, "Digital Video Broadcasting. The performance of DVB-T2 in a range of terrestrial Channels," ETSI, Jan. 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [52] E. Kroon and Penttinen J.T.J., “SFN gain estimations based on frequency response.” 2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Shanghai, China, pp. 1-6, May 2010.
- [53] Jan-Jaap van de Beek, “Synchronization and Channel Estimation in OFDM Systems,” Lulea University of Technology, Division of Signal Processing, Lulea, Sweden. 1998.
- [54] H. Minn and V.K. Bhargava, “An investigation into Time-Domain approach for OFDM channel estimation,” IEEE trans. Broadcasting, vol 46 no 4, pp 240-248, Dec. 2000.
- [55] P. Ladistav and T. Kratochvil, “Influence of IQ-errors on DVB-T2 performance and its suppression by different methods,” 2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Cagliari, Italy, pp. 1-5, July 2017.
- [56] B. Ruckveratham and S. Promwong, “A Study of Single Frequency Network for DVB-T2 Base on Measurement Data,” 2018 Global Wireless Summit (GWS), Chiang Rai, Thailand, pp. 379-382, Apr. 2019.
- [57] B. Ruckveratham and S. Promwong, “Empirical single frequency network threshold for DVB-T2 based on laboratory experiments,” Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences., vol 27, no 5, pp. 3342-3355, Sep. 2019.
- [58] Recommendation ITU-R P.1546-5, “Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz,” ITU-R, 2013.
- [59] Recommendation ITU-R P.370-7, “VHF AND UHF PROPAGATION CURVES FOR THE FREQUENCY RANGE FROM 30 MHz TO 1 000 MHz,” ITU-R, 1995.
- [60] B. Ruckveratham and S. Promwong, “Performance evaluation of DVB-T2 propagation for fixed reception,” 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, June. 2016.
- [61] EBU. Report, version 4.1.1 Tech 3348, “Frequency and network planing aspects of DVB-T2,” EBU, Geneva October 2014.
- [62] กสทช “แนวปฏิบัติทางเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล (Technical Guidelines for Digital Terrestrial Television Broadcasting) ฉบับปรับปรุง ปี พ.ศ. 2560
- [63] S.J. Morrison - Statistics for engineers an introduction-Wiley (2009)
- [64] ETSI. ETSI TECHNICAL REPORT ETR 290, “ Digital Video Broadcasting (DVB) Measurement guidelines for DVB systems,” May 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [65] B. Ruckveratham and S. Promwong, "Evaluation of SFN gain for DVB-T2," 2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT), Chiang Mai, Thailand, March 2017.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

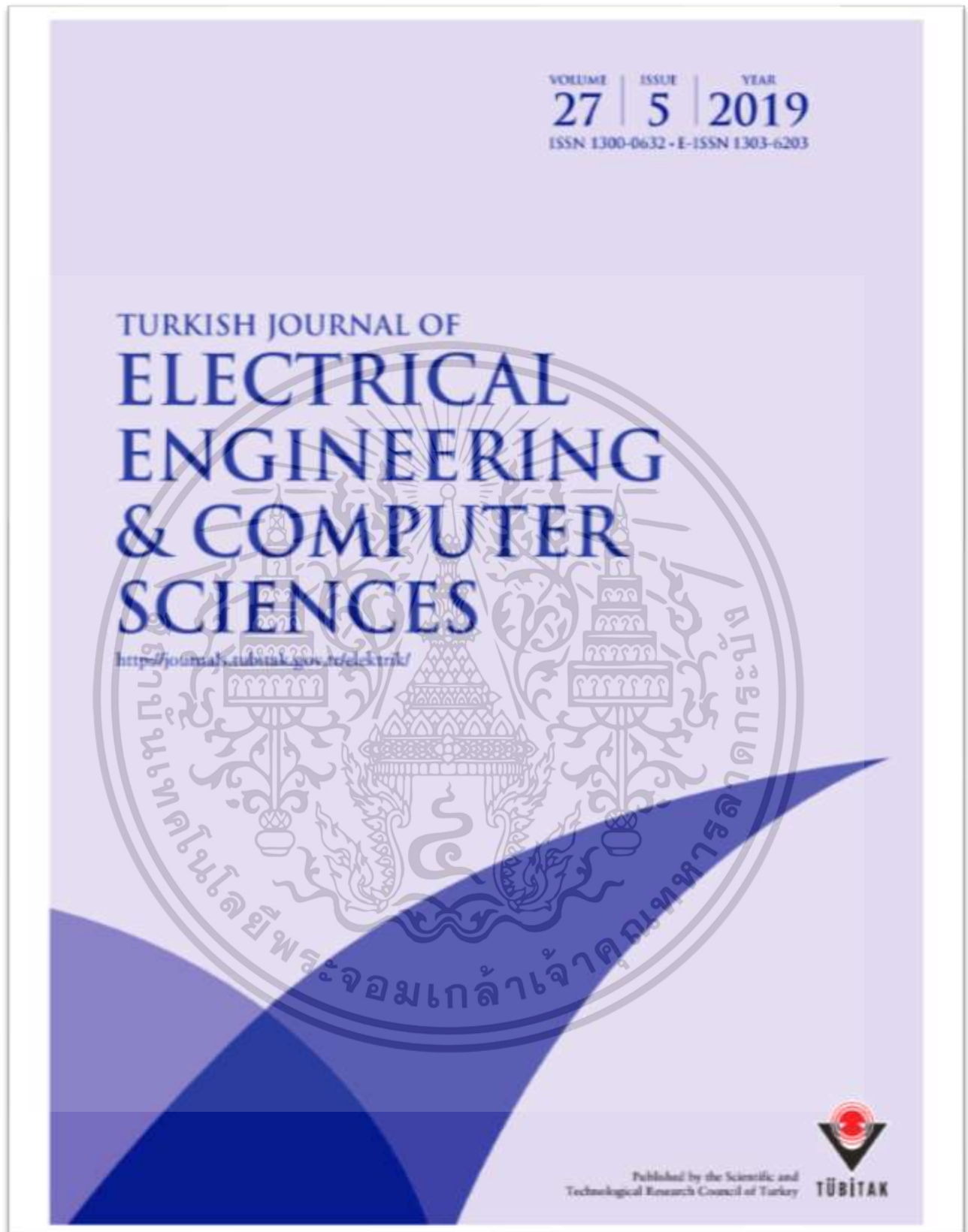
ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

1. B. Ruckveratham and S. Promwong, "Empirical single frequency network threshold for DVB-T2 based on laboratory experiments," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences., vol 27, no 5, pp. 3342-3355, Sep. 2019.

ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. B. Ruckveratham and S. Promwong, "A Study of Single Frequency Network for DVB-T2 Base on Measurement Data," 2018 Global Wireless Summit (GWS), Chiang Rai, Thailand, pp. 379-382, Apr. 2019.
2. B. Ruckveratham and S. Promwong, "Performance evaluation of DVB-T2 propagation for fixed reception," 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, June. 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Empirical single frequency network threshold for DVB-T2 based on laboratory experiments

Bundit RUCKVERATHAM¹, Sathaporn PROMWONG

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Received: 28.07.2018

Accepted/Published Online: 08.01.2019

Final Version: 18.09.2019

Abstract: DVB-T2 broadcasting with a single frequency network (SFN) allows an efficient management of frequency utilization and extends the coverage area, which will enable more people to view a broadcast. The SFN mode also increases the concentration of the signal in overlap areas. However, some difference of overlap areas in actual use of SFN networks may have some degradation of the received signal due to the effect of the SFN. In this research, we analyze SFN broadcasting in SISO mode. This paper represents the effects of delays on the SFN signal over different delay times within the guard interval (GI) by analyzing the minimum reception threshold. The analysis of received signal power, MER, MBER, LBER, and noise margin are studied using an actual digital television transmitter for the experiment. The results show that the minimum thresholds for a delay time at 0 microseconds will require higher receive signal power than other delay times within the GI. The results of this experiment are useful in designing the SFN network and make it possible to determine the appropriate C/N threshold for the design of the digital terrestrial television network.

Key words: DVB-T2, single frequency network, reception threshold

1. Introduction

In this paper, we study the broadcasting of DVB-T2 digital terrestrial television [1]. In addition to multifrequency network (MFN) broadcasting, there is another transmission broadcasting mode called single frequency network (SFN) [2], which has more advantages than the MFN mode. The SFN system can manage the proper frequency and bandwidth efficiently. Another advantage of the SFN mode is that the coverage area can be easily expanded using the same frequency. Using a low-power transmitter makes the SFN system highly flexible. For example, if one of the main transmitters fails, then the coverage area does not entirely disappear because some areas can receive signals from other SFN transmitters. For example, the viewer may still be able to receive signals from another transmitter in the network area if the signal is stronger than the minimum threshold requirement.

Many studies have analyzed SFN transmissions for DVB-T2 by finding the minimum carrier-to-noise (C/N) requirement for real broadcasts compared with implementation guidelines and laboratory measurements [3]. The SFN channel was determined by finding the path loss gain by analyzing and evaluating the effects of the multipath channel. In [4], the authors studied and investigated the SFN gain from real broadcast measurements. In [5], authors propose the SFN gain calculation of the difference of signals received from various overlap transmitters. In [6, 7], authors proposed an analysis of the SFN gain when the modulation error ratio (MER) changed due to the propagation channel with reception of a signal from more than one transmitter.

*Correspondence: bundit1979@hotmail.com

3342



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In some SFN coverage areas, the quality of the received signal may deteriorate due to the effect of the SFN propagation channel. The work in [8] proposed the Xia-Bertoni model and a model based on the Hata for analyzing SFN propagation. The work in [9] proposed the analysis of long path delays for received signal multipath in SFNs. The performance of SFNs depending on different Doppler frequencies was presented by laboratory and field measurement in [10]. The quality of service (QoS) was shown by the result of MER at the receiver, and the delay of received signals from the SFN network will especially affect the MER. [11]. The effect of interference in the SFN of DVB-T2 depends on the influence of the guard interval (GI) duration. In [12], authors presented the result of bit error rate due to the GI duration. Furthermore, many echo delays produce the power and IQ imbalance that causes degradation of the signal quality. In [13], IQ imbalance and residual carrier frequency offset (CFO) affected the capacity symbol error rate (SER). Intersymbol interference (ISI) also occurs due to the echo delay effect. In [14], authors proposed a new channel estimation and an interpolation technique to eliminate the effect of phase rotation caused by symbol timing offset (STO), which can help to solve ISI problems.

However, there are few studies on receiving signal threshold requirements, especially for SFNs, and particularly studies on the effects of echo delay within GI protection. The results of this research show the effect of the relative delay and relative amplitude, which is important and useful for SFN network design to set the transmission power and to calibrate the echo delay to an appropriate setting for the coverage area.

2. Single frequency network

A SFN is the transmission of the same data at the same frequency and time on multiple transmitters. Consequently, the receiver will receive the signal from several transmitters. However, the signal looks like multipath signals. The receiver can receive the signal successfully when all of the signals from all transmitters arrive at the same time within the GI range. In the DVB-T2 system, the GI can be appropriately configured to the coverage area with suitable design of the SFN. However, it may still be necessary to analyze the performance to achieve the best performance. The received signal of a SFN is shown in Figure 1.

In DVB-T2, there are several setting modulation parameters to select appropriate multipath protection.

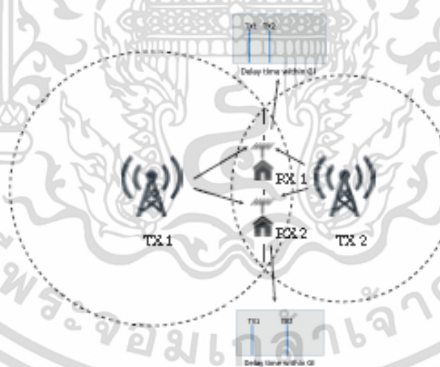


Figure 1. Received SFN signal

The field test of the DVB-T2 modulation parameter was presented in [16]. Choosing the right GI will solve the ISI and multipath problems because the multiple carrier has a fixed value per symbol. The value of the reflections that are shorter than the GI indicates the error of the pilot frequency response. If the pilot signal inserted in the symbol fails, the receiver cannot estimate and correct the frequency response. If the multipath is longer than the GI, then the received signal will suffer from ISI. The gap between the carrier prevents the Doppler shift effect caused by ISI. If the Doppler shift is very small compared to spacing, then the signal will be fairly immune to ISI. The symbol period and the number of frequencies can be adjusted according to the DVB-T2 standard and GI depending on this parameter setting. Consequently, the implementation of the SFN has many different settings. The best reception of DVB-T2 occurs when the appropriate equalization value is chosen. The signal delay time within the GI is shown in Figure 2.

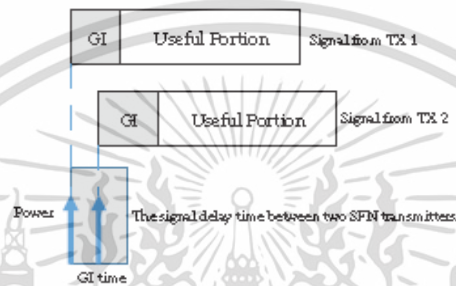


Figure 2. Signal delay time within the GI.

2.1. SFN signal model

Many factors can affect the SFN gain value. The major factors are the power imbalance (PI), relative delay (Δt), propagation channel (σ_p), pilot pattern (PP), and code rate (CR). These parameters involve SFN signaling in both SISO and MISO modes [16, 17]. However, there are differences in the impact of different network features. The number of transmitters in the SFN is $\mathcal{N} = 1, \dots, T$. For general SISO transmission, this can be expressed as

$$r_S(t) = \sum_{i=1}^m h_i(t - \tau_i) * w(t), \quad (1)$$

where h_i and τ_i are the channel impulse responses and delays from each transmitter in the SFN system that are visible from the receiver, and m is the number of received multipath components.

2.2. SFN measurement

In the measurement of the SFN signal, the received signal is the same as the reception of the echo signal. The channel response can be written as follows:

$$r_S(t) = \sum_{i=1}^L \alpha_i \delta(t - \tau_i), \quad (2)$$

where L is the number of echoes, while α_i and τ_i are the complex gain and delay.

Within the GI time, successful reception in terms of the quasi-error free (QEF) criteria [18] depends on whether the receiver can equalize the signal and overcome the effects of echoes. The correction efficiency depends on two main factors: the echo delay and the echo power. This is important to guarantee the effectiveness of the SFN network.

2.3. Channel estimation and equalization

Even though the input signal of the receiver is properly synchronized, the output signal after FFT demodulation may not be the same as the original signal. The carrier signal derived from reception in terms of the amplitude and phase from FFT demodulation may be affected by the channel response. The complexity of the amplitude carrier can be written as follows:

$$Y_{k,l,t} = H_{k,l,t} X_{k,l,t} + N_{k,l,t}, \quad (3)$$

where $X_{k,l,t}$ is the complex modulation symbol constellation of carrier k and symbol l of the original transmitted signal. $Y_{k,l,t}$ is the amplitude of the received signal, $H_{k,l,t}$ is the complex frequency response of the channel in symbol l by sampling frequencies k , and $N_{k,l,t}$ is the noise signal on the receiver added to the system. Since DVB-T2 receivers can receive reference signals from continual pilots and scattered pilots, channel evaluations can be achieved by perceiving that the information was sent by those the pilot cells, which can be expressed by the following equation:

$$H'_{k,l,t} = \frac{Y_{k,l,t}}{C_{k,l,t}} = H_{k,l,t} + \frac{N_{k,l,t}}{C_{k,l,t}}, \quad (4)$$

where $C_{k,l,t}$ is the complex amplitude of the reference pilot cells. In the maximum channel correction value, the channel response is defined as $H'_{k,l,t}$. There are only reference cells k, l . The channel response $H_{k,l,t}$ varies with frequency and time.

3. Objective

The objective of this work is to obtain digital TV reception in the SFN mode in different areas. The receivers can receive signals from multiple transmitters that transmit within the same GI time. In each reception area, the echo delay is different. Although the echo delay is different, the echo delay is still inside the GI, and the receivers can receive the signal. The main objective of this research is an analysis of the minimum threshold reception of DVB-T2 in SFN mode and the development of an experimental model for the SFN in SISO. The analysis of the delay effects during the GI is done with measures such as the SFN gain, received signal power, and modulation error ratio (MER). In our analysis, comparison between the normal received signal power result and the minimum received signal power result was used for evaluation, and the minimum threshold of the SFN signal of DVB-T2 was obtained. Correlation was used to analyze the effect of the minimum signal delay requirement within the GI time. Measuring the difference in the echo delay is difficult in field tests. Therefore, in this research, a laboratory measurement model was used to simulate all delay time situations in the GI. Two SFN transmitters were used, and the static local delay time of both transmitters was changed during the GI time to analyze and find the minimum threshold reception for the desired SFN signal.

4. Laboratory measurements

The experimental equipment is shown in Figure 3. The MPEG 2 Transport Stream (TS) is derived from the MUX provider. This experiment uses TS signals from the MCOT MUX provider. MCOT is one of the four

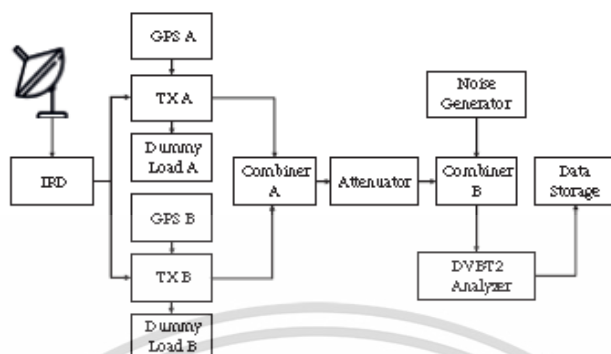


Figure 3. Block diagram of SFN measurement system for DVB-T2.

MUX providers in Thailand. TS signals are sent to the DVB-S2 modulator from the head-end center and sent to satellites for distribution to the DTV network. Integrated receiver/decoder (IRD) receives signals from the head-end center via satellites. The received signal output is the TS signal, which is sent via the asynchronous serial interface (ASI) port to both output ports of the IRD. The signal from the IRD is the modulator interface signal (T2-MI). This T2-MI signal of DVB-T2 is based on DVB Document A136. The modulation parameter of the T2-MI signals is shown in Table 1. T2-MI signals are sent to both DVB-T2 transmitters. The transmitter has an RF output power of approximately 1 W because the transmitter used to generate the exciter function as an output signal does not have high RF power. In the actual broadcast, the exciter will use RF power PA to drive a high RF power output. The DVB-T2 transmitter used in the experiment was a Syes PCM 1, and both transmitters are connected to the global positioning system (GPS) to lock the time base to synchronize the signals. Due to the inevitability of SFN transmission, there must be a consistent time base. The output from both transmitters for this experiment can be obtained from the RF monitor port, which is coupled to the transmitter output. This experiment uses 100 mW transmit power. The coupling signal at the RF monitor port is -3 dBm. By combining the RF signals from both transmitters, the RF power is approximately -7 dBm after combining with two transmitters, and this RF signal is connected to a 13 dB attenuator to reduce the RF signal to roughly -20 dBm (signal loss in the cable and the combiner) or approximately 87 dB μ V at 50 ohm impedance, which is suitable for experiments and analysis. This research uses a ROVER HD PROTAB DVB-T

Table 1. DVB-T2 parameters for Thailand

Parameter	Values
Frequency	614 MHz
Bandwidth	8 MHz
Pilot pattern	PP2
Guard interval	19/128
Constellation	64 QAM
Constellation rotation	On
Code rate	3/5

/DVB-S / T / C analyzer for the experiment. The signal is measured and stored in two ways. The measurement data with normal signal strength and minimum signal strength are recorded. The minimum signal requirement is based on the low signal threshold at the quasi-error free (QEF) criteria. The bit error rate before LDPC (bBER) must have error bit less than 1×10^{-2} or 1×10^{-7} after LDPC (LEER). Another method used to measure the QEF criteria is the measurement of minimum signal strength that makes the quality of experience (QoE) not missing continuously for no more than 20 s. All of the measurement data are obtained by changing the static local delay of the transmitter from 0 μ s to 270 μ s, divided into 10 μ s steps. Each step is stored 20 times, and each time, the received signal power, MER, bBER, LEER, and noise margin are collected. All data are analyzed and evaluated using the polynomial regression model (PRM), and the correlation coefficient of the normal signal strength and minimum signal strength has been analyzed and presented. The minimum SFN signal requirements are then verified for DVB-T2. The equipment of the SFN experiment is shown in Figure 4.

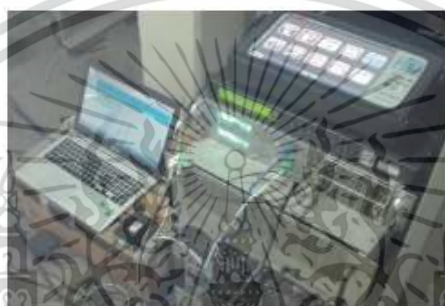


Figure 4. Equipment of the SFN experiment.

4.1. Experimental parameters of DVB-T2 for SFN

The minimum signal requirement threshold for the SFN was tested using the modulation parameters broadcast in Thailand. Digital television terrestrial broadcasting in Thailand is regulated by the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NETC), which assigns parameters for broadcasts. The frequency range in Thailand is 610 MHz to 790 MHz. This experiment uses a frequency of 614 MHz for transmission. The maximum bit rate that can be sent with this parameter is 27.4 Mbps. One multiplexer (MUX) can broadcast 8 channels, divided into six standard definition (SD) and two high definition (HD) channels. The transmission rate of each data channel is approximately 1.28-1.6 Mbps for SD and 5.92-7.2 for HD. The change in the data transfer rate depends on the performance of the parameter modulation encoding. For Thailand, the results are as shown in Table 1.

4.2. Minimum received signal required

Due to the modulation of digital TV transmission, much data transmission is required, so quadrature amplitude modulation (QAM) is used for modulation, which consists of I/Q signals. The phase shift of the I and Q signals makes a constellation point, and the data symbol will send by reference all of the dots in the constellation point. For this reason of digital television transmission, the carrier wave strength measurement is important for inspection of the signal quality. Therefore, the minimum signal strength of C/N is important for the perceived

receiver efficiency with the minimum C/N signal, which can be expressed by the following equation:

$$C/N = P_{s_{\min}} - F - 10 \log(kT_0 B), \quad (5)$$

where C/N is the signal to noise ratio (dB), $P_{s_{\min}}$ is the minimum signal at the receiver input (dB μ V), F is the noise generated by the receiver (dB), K is the Boltzmann constant = 1.38×10^{-23} Ws/K, B is the receiver noise bandwidth (Hz), and T_0 is the absolute temperature = 290 K.

4.3. Modulation error ratio

The modulation error ratio (MER) is a measure of modulation quality performance for digital television. It is measured from the coupling RF test port at the transmitter or even from the broadcast reception. For QAM transmission, the measured signal is in the form of a constellation diagram. The MER measurements can be shown, such as the dot amplitude and phase error in the constellation diagram. The vector error of the IQ signal is the value obtained from the comparison of the measurement of the ideal IQ signal and error IQ signal, given the sum of the squares of the ideal signal vector size (I_i, Q_i) divided by the sum of the squares of the error vector ($\delta I_i, \delta Q_i$). The MER has units of dB. Consequently, the MER is equal to the ratio of the mean square (RMS) between the reference signal and the error vector, as calculated from the following equation:

$$MER = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^N (I_i^2 + Q_i^2)}{\sum_{i=1}^N (\delta I_i^2 + \delta Q_i^2)} \right]. \quad (6)$$

5. Channel process

The processing efficiency of the SFN signal can be obtained from the analysis of spectrum variation. The comparison between the normally received signals and minimum received signal required is done by using the correlation coefficient method. The polynomial regression model is used to predict the behavior of SFN signals due to the change of delay time within the GI. Verification of the chosen model is done to see whether it is appropriate or not by residual analysis. Details are shown as follows.

5.1. Spectrum variation

The delay time between two transmitters and multiple transmitters has a significant effect on SFN channels. The factor most affected by the delay time is the degradation of the received signal. The most severe impact is the delay time at 0 dB, which is called the 0 dB echo. The receiver is most affected when the signal from two transmitters arrives at the receiver at the same time with the same power level, as found from the experimental model. The standard deviation of the spectrum in the 8 MHz bandwidth range is used to analyze the spectrum variation at each delay time within the GI. The spectrum variation is used to describe the channel [8], as shown in Table 2.

The equations used to evaluate the variation of the spectrum due to the effect of delay time shift are gathered from the data collection of the SFN transmission experiment at 514 MHz and 8 MHz. The sampling rate is from 509.791 MHz to 517.943 MHz, with a sample spacing of 86 kHz for 94 samples throughout the 8 MHz bandwidth range. Each delay time session is collected 20 times to obtain reliable data. A total of 1880 samples are collected every 10 μ s throughout the GI delay time, which are then used for calculating the spectral

Table 2. Channel classification.

Spectrum variation (dB)	Channel
$0 \leq \sigma_{sp} \leq 1$	Gaussian
$1 \leq \sigma_{sp} \leq 3$	Rician
$\sigma_{sp} \geq 3$	Rayleigh

variation for each delay time. Eqs. (7) and (8) describe the spectrum variation:

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n), \quad (7)$$

where \bar{p} is the mean of the spectrum power, N is the number of spectrum power samples in the 8 MHz bandwidth, and $p(n)$ is each power sample in the spectrum bandwidth range.

$$\sigma_{sp} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (p_n - \bar{p})^2}{N-1}}, \quad (8)$$

where σ_{sp} is the spectrum variation, N is the number of power samples within the 8 MHz spectrum bandwidth, p_n is each power sample within the 8 MHz spectrum bandwidth, and \bar{p} is the mean of the spectrum power.

5.2. Correlation coefficient

The correlation of the typical strength of the DVE-T2 signal for SFN transmission during normal signal strength and minimum signal strength can be verified by a correlation coefficient. Knowing the correlation makes it possible to understand how the two signal strengths affect the same reception or difference.

$$\rho_{X,Y} = \text{corr}(X,Y) = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (9)$$

where ρ is the correlation coefficient, X and Y are the variables that are compared, μ_X and σ_X are the mean and standard deviations of X , and μ_Y and σ_Y are the mean and standard deviation of Y .

If we have serial data of the measurements, X and Y can be written as x_i and y_i , where $i = 1, 2, \dots, n$, for which the sample correlation coefficient can be used to estimate the Pearson correlation ρ between X and Y , which is the sample correlation. The coefficient can be written as

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (10)$$

where \bar{x} and \bar{y} are the mean of the random variables of X and Y , and s_x and s_y are the standard deviations of the variables X and Y .

5.3. Polynomial regression model

For estimation and prediction, the polynomial regression model is used to inspect and predict the variation of the experimental data measurements. In this experiment, the measured values change over the delay time in

the GI, in which the measurement data are very different. The use of this model is very useful for analyzing data with different fluctuations.

The measurement data are given as $\{(X_t, Y_t), t = 1, \dots, T\}$, where X_t is the delay time in the GI, and Y_t is the predicted value. Therefore, the polynomial regression model can be written as

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^p \alpha_i X_t^i + \varepsilon_t, \quad (11)$$

where c is a constant, ε_t is the random error condition of X_t , α_i is a parameter of the model, and p is the order of the model.

The order of the polynomial regression model in this study is 3. In addition, to improve the numerical properties of the polynomial regression model, X is centralized and resized:

$$\hat{X} = \frac{X - \mu}{\sigma}, \quad (12)$$

where μ is the mean of X and σ is the standard deviation of X .

5.4. Residual analysis

After choosing the appropriate prediction model, validation of the selected model is very important to be able to know whether the model chosen is appropriate or not. Model validation by checking the difference between the actual measured values and the prediction value is called residual analysis, which uses the following equation:

$$e = y - \hat{y}, \quad (13)$$

where e is the error value or residual, y is the actual measured value or the observed value, and \hat{y} is the value from the prediction model according to $\sum e = 0$.

6. Results and discussion

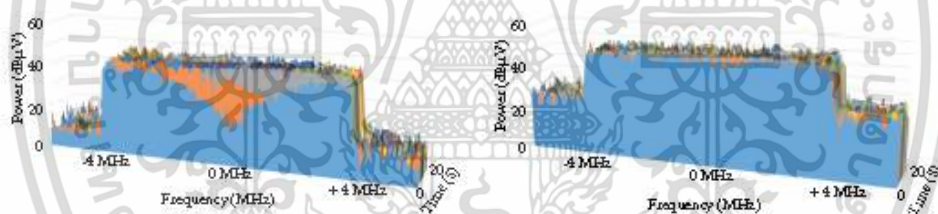
The result from the DVB-T2 signal analyzer is shown in Figure 5. The signal spectrum resulting from SFN reception with a signal delay of 0 μ s is shown in Figure 6. It can be seen that the signal is greatly reduced throughout the 8 MHz spectrum bandwidth range, which results from the 0 dB echo phenomenon. The spectral value varied, and the power amplitude was not the same throughout the range of the 8 MHz bandwidth over the 20-s period of measurement recording. The maximum degradation value is approximately 20 dB from the received signal threshold at roughly 40 dB μ V. The received signal at delay 0 μ s exhibits a great reduction, where the signal strength power from two transmitters is equal. The result is that there is no received signal or intermittent reception.

Figure 7 shows the spectrum of the reception at a 60 μ s delay. It is evident that the spectrum is significantly less than that at the 0 μ s delay. The signal has a slight deviation in the spectrum. This is similar to the MFN receiving signal. This figure shows the spectrum result of the threshold received signal of the SFN transmission.

Figure 8 shows the results of the simulation experiments based on the laboratory measurements to find the received signal strength compared with the delay time between two transmitters for SFN transmission. At 0 μ s of delay time in GI, the degradation of the received signal is approximately 12 dB from 37 dB μ V of approximate signal strength. The PRM is used to display the predictive value of the received signal based



Figure 5. Display from the DVB-T2 signal analyzer.

Figure 6. Spectrum of the SFN receiving with a delay of 0 μ s. Figure 7. Spectrum of SFN receiving with a delay of 60 μ s.

on the experiment. The minimum threshold requirement of the DVB-T2 received signal in the SFN system is roughly 66 dB μ V. The degradation rate is also significant during the delay period of 0 μ s. The degradation is reduced to approximately 3 dB compared to the delay time in other time periods. The correlation coefficient was used to compare the correlation between the normal strength and the minimum received signal required threshold strength and it was 0.6266, which is considered to be in the same direction but not exactly the same. This experimental test of the delay times between 0 μ s and 270 μ s covers the delay time of the GI. The GI of the SFN parameter setting for this experiment is 266 μ s.

Figure 9 shows that the MER of the received signal at normal strength is approximately 17 dB, which, at a delay time of 0 μ s, requires an increase of the MER by approximately 6 dB because at this delay time the effect of the 0 dB echo causes interference and degradation. For the MER at the minimum received signal threshold, the average value for all of the delay times in the GI is approximately 8 dB, and a higher MER at a delay time of 0 μ s of approximately 6 dB is required. The correlation coefficient is 0.6973. The correlation is in the same direction for the normal signal and the minimum signal required.

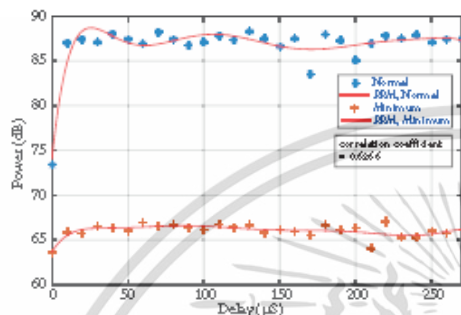


Figure 8. Comparison of delay and power.

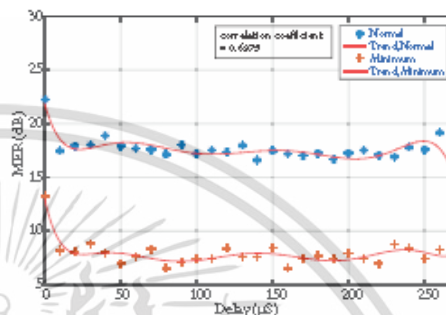


Figure 9. Comparison of delay and MER.

The spectral variation value is shown in Figure 10. The spectrum of the received signal in the 8 MHz bandwidth range changes with the time delay of the SFN transmission between two experimental transmitters. The spectrum deviation for the received signal at the normal received signal strength and the minimal received signal strength has a very small difference and a high deviation as the delay time approaches 0 μ s in the same form. The spectral deviation is in the range of approximately 3 dB to 3.5 dB, and there is a greater deviation at the end of the GI. The correlation coefficient indicates that both signals are similar and change following the same pattern during the various delays.

Figure 11 shows the signal stability from the noise margin that can be obtained. If the value is high, the signal is stable enough and is not lost. The margin to the minimum received signal requirement is approximately -6 dB, and when the delay time approaches 0 μ s, the higher noise margin is approximately 0 dB.

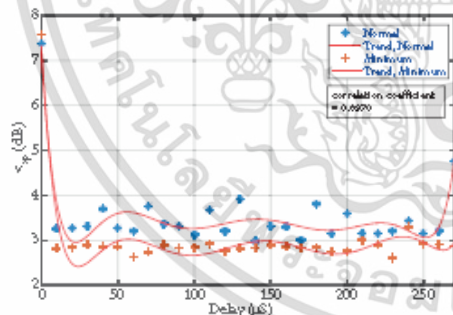


Figure 10. Comparison of delay and spectrum variation.

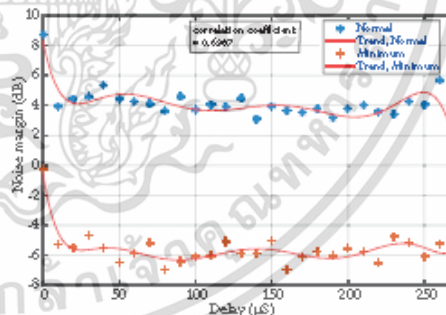


Figure 11. Comparison of delay and noise margin.

Figure 12 shows the laboratory measurements of experimental results, where the C/N at the minimum received signal strength is approximately 23 dB throughout the delay time range. The delay time period approaching 0 μs will be roughly 20 dB, which means a 3 dB loss. Therefore, this signal strength is more difficult to obtain, and at this point, an additional 3 dB is needed to allow the receiver to resume normal reception.

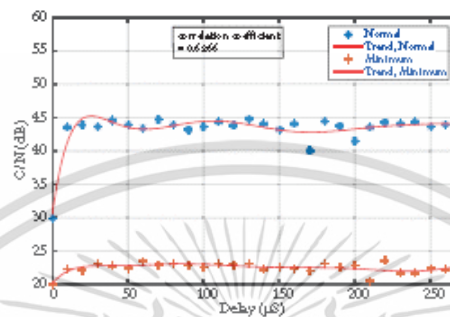


Figure 12. Comparison of the delay and C/N .

The minimum requirements for DVB-T2 to receive signals in the SFN mode are shown in Table 3. The information in the table includes the minimum values that can be received in terms of the power, MER, spectrum variation, noise margin, and C/N . These values are expressed as the mean and standard deviation (STD) throughout the delay range between 0 μs and 270 μs . Normal vs. min. correlation is the relation between the normal received signal and the minimum received signal. All values show that the relationships are in the same direction, especially the values of the spectrum variation of the normal received signal reception and the minimum received signal reception, with a correlation coefficient of 0.8970. The R-squared value shows the FRM order of 8 in error tests. All values of R-squared are greater than 0.5, which means that this prediction model produces results close to the actual experimental data, proving its prediction success.

Table 3. Minimum requirement for DVB-T2 to receive signals in the SFN mode.

Minimum requirement	Mean (dB)	STD (dB)	Normal vs. min. correlation	R-squared
Power (dB μ W)	66.03	0.7695	0.6266	0.5255
MER	7.93	1.1786	0.6973	0.7791
Spectrum variation	3.02	0.8822	0.8970	0.9263
Noise margin	-0.53	1.6144	0.6987	0.7789
C/N	21.03	0.7695	0.6266	0.5255

7. Conclusion

In this research, the minimum requirement of DVB-T2 reception for a SFN was presented. Laboratory measurements were performed by modeling a synchronization test of DVB-T2 signals from two transmitters. The experiment was performed by changing the static delay of the transmitter for a performance test in the

GI range to analyze the effect of the SFN. The experiment was recorded and the received signal was inspected by the DVB-T2 analyzer. This research uses DVB-T2 modulation parameters for broadcast digital terrestrial television in Thailand for the SFN mode. The minimum received signal threshold of the SFN was confirmed by the QEF criteria test.

The experimental data are stored in large numbers to ensure reliability. Every 10 μ s of delay time is repeatedly measured 20 times, dividing the delay time into 27 ranges from 0 μ s to 270 μ s. We measured both the normal reception and minimum receiving signal. The measurement data were the power, MER, spectrum variation, noise margin, and C/N . The total number of measurements was 5400 times. The received signal threshold at the QEF criteria throughout the delay time within the GI corresponded to the received signal power of 66.03 dB, MER of 7.93 dB, a noise margin of 3.02 dB, and C/N of 21.3 dB. Since the experiment was a closed system, no multipath and external noise existed; the measurement channel is equivalent to a Rician channel. The limitation of this experiment is that the modulation parameters are used for broadcasting in Thailand only. The evaluation of the SFN specifically analyzes the received signal power from two transmitters that broadcast to the receiver at equal signal strength levels. This scenario is the most likely to affect the received SFN signal. In reality, the signals from both transmitters may reach the receiver with different signal strengths. Even in a real propagation channel, the received signal will be affected by the environment and terrain, which may be different from these results. However, the experimental results can be used as a guide for network planning design and network efficiency improvement for SFN broadcasting, as well as for designing a gap filler system.

Future work will investigate the SFN effect in various delay time periods, in which the signal strengths from two transmitters are unequal. Additionally, experiments with various types of multipath channels with the SFN will be performed to analyze the effects of Rician and Rayleigh channels, as well as experiments in various frequency ranges. All of this can be used as a guideline for designing a single frequency network nicely.

Acknowledgments

This research was partially supported by MCOT Public Company Limited. We thank our colleagues from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) who provided insight and expertise that greatly assisted the research. We also thank the engineering student from KMUTL for assistance with the single frequency network of the DVB-T2 test, and Dr Sathaporn Promwong at KMUTL for comments that greatly improved the manuscript.

References

- [1] Ezrimenti I, Velez M, Gómez-Barquero D, Morgade J, Baena-Leayer V, Slimani M, Zoellner J. DVB-T2: The second generation of terrestrial digital video broadcasting system. *IEEE T Broadcast* 2014; 60: 258-271.
- [2] Mattsson A. Single frequency networks in DTV. *IEEE T Broadcast* 2005; 51: 413-422.
- [3] Ezrimenti I, Prieto G, Benjon-Eriz G, Landa I, Velez M. Empirical DVB-T2 thresholds for fixed reception. *IEEE T Broadcast* 2013; 59: 306-316.
- [4] Guerra MV, Ron CVR, da Silva Mello L. Experimental characterization of a SFN digital broadcast channel. In: *IEEE Latin-America Conference on Communications*; 2012; Quesada, Ecuador. New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-4.
- [5] Pleto D, Joseph W, Angueira P, Arenas JA, Verboock L, Martens L. On the methodology for calculating SFN gain in digital broadcast systems. *IEEE T Broadcast* 2010; 56: 331-339.
- [6] Kroon E, Penttinen JTV. SFN gain estimations based on frequency response. In: *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*; 2010; Shanghai, China. New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-6.

- [7] Udrotu I, Tache I, Angelescu N, Caciula I. The analyze of MER variation concerning the quality of transmission for DVB-T signals. In: WSEAS International Conference on Data Networks, Communications, Computers; 2009; Baltimore, MD, USA. pp. 169-172.
- [8] Salieto A, Rotg G, Gómez-Barquero D, Cardona N. Propagation model calibration for DVB-SH in terrestrial single frequency networks. In: Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation; 2010; Barcelona, Spain. New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-5.
- [9] Linfoot SL. A comparison of 64-QAM and 16-QAM DVB-T under long echo delay multipath conditions. *IEEE T Consumer Electronics* 2003; 49: 978-982.
- [10] Torrice M, Tanougast C, Dandache A, Bertillon P, Kaccer P. Experimental performance of mobile DVB-T2 in SFN and distributed MISO network. In: International Conference on Telecommunications; 2012; Jouneh, Lebanon. New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-5.
- [11] Ruckveratham B, Promwong S. Evaluation of SFN gain for DVB-T2. In: International Conference on Digital Arts, Media and Technology; 2017; Chiang Mai, Thailand. New York, NY, USA: IEEE. pp. 85-88.
- [12] Miskovic B, Lutovac DM. Influence of guard interval duration to interchannel interference in DVB-T2 signal. In: Mediterranean Conference on Embedded Computing; 2012; Bar, Montenegro. New York, NY, USA: IEEE. pp. 220-223.
- [13] Gotumulkala VKV, Mirin H. Capacity analysis and pilot-data power allocation for MIMO-OFDM with transmitter and receiver IQ imbalance and residual carrier frequency offset. *IEEE T Vehicular Technology* 2011; 61: 553-565.
- [14] Tanhaei HR, Ghorashi SA. A novel channel estimation technique for OFDM systems with robustness against timing offset. *IEEE T Consumer Electronics* 2011; 57: 342-356.
- [15] Regueiro C, Gil U, Velez M, Eizmendi I, Angueta P. Field trials-based planning parameters for DVB-T2 indoor reception. *IEEE T Broadcast* 2015; 61: 251-262.
- [16] Morgade J, Angueta P, Arrinda A, Pfeffer R, Steinmann V, Frank J, Brugger R. SFN-SISO and SFN-MISO gain performance analysis for DVB-T2 network planning. *IEEE T Broadcast* 2014; 60: 272-286.
- [17] Zhang L, Gu L, Qiao Y, Zhang W. Obtaining diversity gain for DTV by using MIMO structure in SFN. *IEEE T Broadcast* 2004; 50: 82-90.
- [18] Ladistav P, Kratochvil T. Influence of IQ-errors on DVB-T2 performance and its suppression by different methods. In: IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting; 2017; Cagliari, Italy. New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-5.

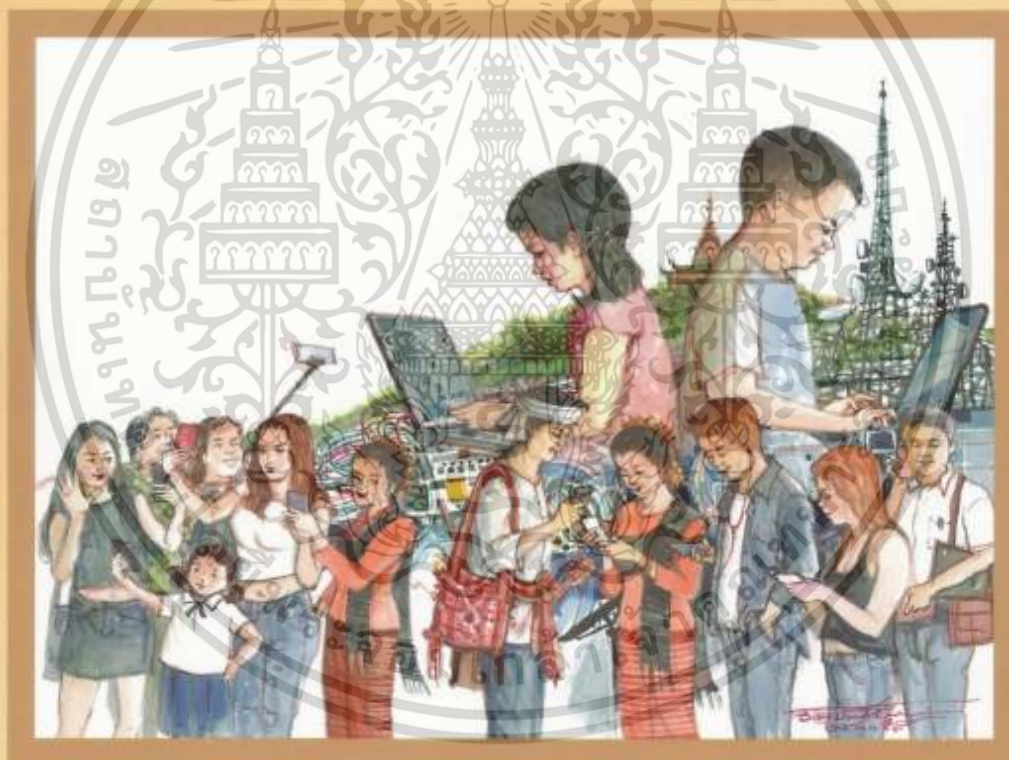
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Program

ECTI-CON 2016

Chiang Mai Thailand, June 28 - July 1 , 2016

13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics
Computer, Telecommunications and Information Technology



Illustrated by Assoc.Prof. Wichit Chomtaveewiroot

Rajamangala University of Technology Lanna
Chiang Mai, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance Evaluation of DVB-T2 Propagation for Fixed Reception

Bundit Ruckveratham and Sathaporn Promwong

¹Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand
bundit1973@hotmail.com and sathaporn.pr@kmitl.ac.th

Abstract - The performance of propagation analysis of DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial) is very significant for digital television broadcasting. That will analyze the effectiveness of the setting parameters that use for suitable of broadcasting. This paper provides the performance evaluation of DVB-T2 for fixed reception by the received signal measurement. The field measurements were taken in Bangkok of Thailand, along 20 locations. The receiver used to analyze the DVB-T2 signal providing several quality measurements (Power, C/N, MER, BER, constellation diagram, etc.). The results of the study could be useful for the improvement of DVB-T2 broadcast such as transmitter adjustment and gap filler transmitter installation to optimize the efficiency of digital television broadcasting.

Keywords— DVB-T2, Field strength, C/N, MER, BER

I. INTRODUCTION

The standard television broadcasting for today have been chosen to digital transmission. DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial) [1] system is the one of the popular digital television broadcasting system that used around the world. This system was developed from DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) [2] by DVB (Digital Video Broadcasting). DVB-T2 system can simultaneous transmission of multiple services and can be set different configuration and resistant for interference by the configuration selected. DVB-T2 system is capable of broadcasting either fixed reception or mobile reception, depending on the configuration parameter. Therefore, it supports for SD (Standard-definition television), HD (high-definition television), UHD (Ultra-high-definition television), mobile TV, radio, or any combination of multiple digital broadcasting.

The broadcast efficiency evaluation is necessary for monitoring the results of the broadcasting. In other research, there are research papers for evaluation minimum C/N signal can be received by the variation configuration parameters [3]. The measurement performance of the portable reception [4] as

well as the measurement for different location of urban and rural area. However, few studies have reported on performance evaluation of DVB-T2 especially for fixed reception. The field measurements were taken in Bangkok of Thailand, along 20 locations. The main topic for research are analyze the efficiency of the broadcast and evaluation the suitable configuration parameters of DVB-T2 that NBTC (National Broadcasting and Telecommunication Commission) recommend for broadcast the digital television in Thailand [5].

The rest of the paper is organized as follows. Section II explain about the parameter used for broadcasting. Section III proposes the field measurement and analysis. Additionally, Section IV shows performance of the result of measurement signals. Finally, conclusions are drawn in Section V.

II. THE PARAMETERS USED FOR BROADCASTING

The Parameters of broadcasting is very important for the effect of received signal. The DVB-T2 modulation parameters for transmission in Thailand was set by the NBTC. The total of transmit data is 27.4 Mbps. Each of the multiplexer (MUX) contain for eight channels. There are divided by the standard definition television for 4 channels with transfer data rate of each channel is approximately 1.28 -1.6 Mbps. The High-definition television for 2 channels with data transfer data rates of each channel is approximately 5.92-7.2 Mbps. The transmission data rate depending on the modulation parameters configuration. The parameters for DVB-T2 broadcasting summarized in Table I.

Table I. The DVB-T2 modulation parameters for Thailand

Parameter	Value
Bandwidth	8 MHz
FFT Mode	16k Extended
Pilot Pattern	PP2
Guard Interval	19/128
Constellation	64 QAM
Constellation Rotation	Off
Code Rate	3/5

III. THE FIELD MEASUREMENT AND ANALYSIS.

A. The transmitter and antenna.

The field measurements were taken in Bangkok of Thailand, along 20 locations in Bangkok, from the 25th to 29th of April, 2016.

Bangkok is a large city with a population of about 10 million people. This city provides different reception environments, from dense urban areas to open space in the suburbs environments.

The main transmitter is located at the Baiyoke 2, latitude 13° 45' 16.77 "N, longitude 100° 32' 25.34" E. The antenna height is 328 meters above the sea level, the antenna beam is 0.3 degrees. The transmitter consisted with the DVB-T2 modulator and power amplifier. The frequency of broadcasting comprising 5 MUX. There are channel 35 (514 MHz), channel 36 (594 MHz), 40 (626 MHz), 44 (658 MHz) and 52 (722 MHz) and the transmitter power is 5 kW for each of MUX. The antenna gain is 14.31 dBd and radiation pattern is horizontal polarization.

B. Modulation Error Ratio

The Modulation Error Ratio (MER) is used to indicate the efficiency of digital television transmission [6]. The MER can be measured from the samples terminal of the transmitter and can be measured from the receiver of the field as well. The Modulation format is QAM (Quadrature amplitude modulation). The quality thresholds for single constellation in the I/Q plane shown in figure 1. The constellation points used to inspect the errors amplitude and phase. Those errors of vector are the result of the distortion frequency.



Figure 1. Quality thresholds for single constellation in the I/Q plane

The error Vector of the IQ signal that comparison between the ideal signal and the errors signal [7]. The sum of the squares of the magnitudes of the ideal symbol vectors (I_j, Q_j) is divided by the sum of the squares of the magnitudes of the symbol error vectors $(\delta I_j, \delta Q_j)$. The result, expressed as a power ratio in dB, is defined as the Modulation Error Ratio (MER). The equation is shown in equation 1.

$$MER = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

C. Minimum receiver signal input levels

Due to the modulation of digital television transmission system required to transmit large amounts of data. It uses a modulation type QAM (Quadrature amplitude modulation) or PSK (Phase-shift keying) based on signals such as CW (Continuous wave) will be equipped with IQ signal. Normally, The signal IQ have moved out of the frequency spectrum for the phase. From the phase and amplitude of IQ signal that change. It will be created on the spot Constellation diagram by a point that will be the position of the data sent to symbol. For this reason, for the transmission of digital television. To measure the strength of the carrier to interference is important. To demonstrate the quality of the digital modulation. Therefore, finding the minimum signal strength of the C/N (Carrier-to-noise ratio) is important to the understanding of the performance of the receiver and C/N as low as they can get a signal. The equation is shown in equation 2, 3 and 4.

$$P_n \text{ (in dBW)} = F + 10 \log (k \cdot T_0 \cdot B) \quad (2)$$

$$P_{s \text{ min}} \text{ (in dBW)} = P_n + C/N \quad (3)$$

$$U_{s \text{ min}} \text{ (in dBuV)} = P_{s \text{ min}} + 120 + 10 \log (Z_i) \quad (4)$$

When B is Receiver noise bandwidth [Hz], C/N is RF signal to noise ratio required by the system [dB], F is Receiver noise figure [dB], P_n is Receiver noise input power [dBW], $P_{s \text{ min}}$ is Minimum receiver signal input power [dBW], $U_{s \text{ min}}$ is Minimum equivalent receiver input voltage into Z_i [dBuV], Z_i is Receiver input impedance (75Ω) and k is Boltzmann constant = 1.38×10^{-23} Ws/K.

D. Signal Detection

The MER was measured from the DVB-T2 receiver analyzer via the antenna. The received signal after demodulation will be measurement. The approximate of MER at 20 dB to give Bit error rate (BER) about 2×10^{-4} . This is the estimate of minimum threshold that accept to receive the digital television of DVB-T2 and television can watch normally. By this point, is defined as the bBER or BER before LDPC (low-density parity-check). The BER after LDPC decoding is defined as the aBER or after BER that can be reduced the BER to 2×10^{-7} . After that, BEH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) can be reduced the BER to 2×10^{-11} [8]. The block diagram of measurement is shown in figure 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

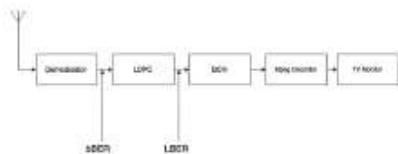


Figure 2. The block diagram of the measurement signal

Those of measurement used receive antenna high 6 meters above the ground level. The receiver analyzer measurement is ROVER HD Pro tab that is used for measurement for 20 locations around Bangkok. The measurement taken from different distances and different environment from 1 km to 45 km. The locations of measurement are shown in figure 3.



Figure 3. The positions of measurement, green mark is field measurement and red mark is transmitter station

IV. THE RESULT OF MEASUREMENT

All of field measurements are use SFN (Single frequency network) [9]. That means each of measurement point was measured by the one signal source and addition with reflect signal (Multipath). In some cases, the received signal strength in some locations are equal but the MER of received signal may not equal. Because those areas are obscured by Interference of environment.

Figure 4 shows the comparison between the distance and C/N. The trend lines are shown when the distance increases the C/N are reduced. Although in some cases for example, at the distance of approximately 31 kilometers. The C/N is approximately 47 dB from the measurement, while at the distance of 14 km the C/N is approximately 33 dB. It shows that at a distance closer than the received signal is below. Because the point of measurement location at distance of 14 km have more obscure and interference by environment more than the measurement point at distance of 31 km. This is the obstruction and interference caused by the area where measurement, because some location has tall buildings and density of buildings. That was making difficult for signal reception. The comparison of 5 frequencies is presented by the frequency of

594 MHz have more attenuation by distance more than the another frequency as the trend lines are shown.

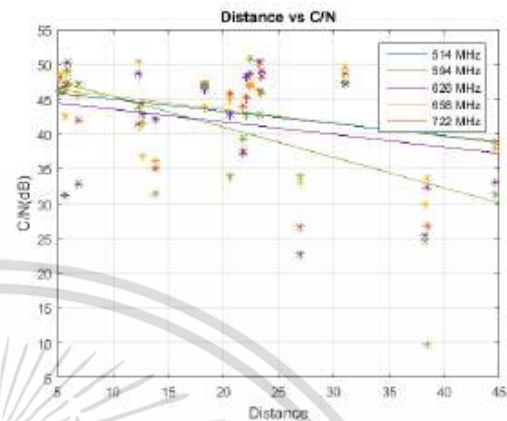


Figure 4. The comparison of distance and C/N

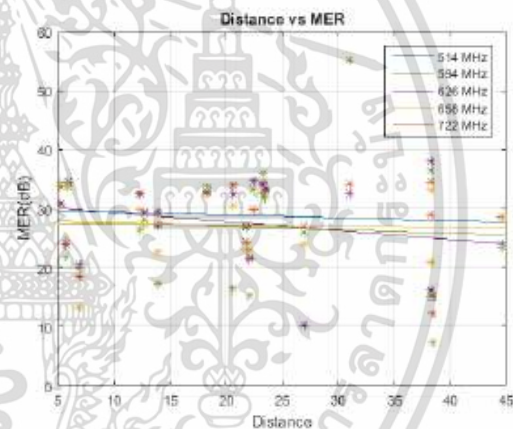


Figure 5. The comparison of distance and MER

The comparison of distance and MER is presented by if the distance increase the MER will decrease because the delay time of signal and the reflections of multipath effect on the environment is effect for received signal. The delay time and the multipath effect making the phase and amplitude of frequency is shifted. Those of results making the IQ signal were changed. The results of MER affected from the distance change is shown in figure 5. For example at the location point of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

distance is approximately 38 kilometers is presented by the MER is approximately 38 dB while at the location point of distance is approximately 6 kilometers the MER is approximately 15 dB, because the area of the measurement at distance is approximately 38 kilometers the location is open space and no interference, as a results that give the MER measurements is approximately 38 dB, while at a distance is approximately 6 kilometers the MER is quite low and approximately 15 dB, because that area has been overshadowed by interference. The results as shown in Figure 5. The trend lines shows the frequency of 658 MHz is increases the distance will make the MER is dropping faster than the another frequency.

The before Bit Error Rate (bBER) is used to measurement the BER before sent to the LDPC block. The performance quality of received signal for digital television transmission DVB-T2 is indicated by the measurement of bBER. The results are shown in figure 7. When the MER is higher will make the bBER is decreased. For example, at the point of MER is approximately 7.5 dB that make the bBER is approximately 9×10^{-3} that is shown the bBER is more error very quickly. The comparison between the MER at 18 dB to 35 dB will make the bBER is approximately 3×10^{-3} and the error of bBER is very low. That means the minimum of MER is approximately 18 dB can be normally for receive DVB-T2 signal. The comparison of 5 frequencies is not different from the measurement. The trend lines are shown in figure 6.

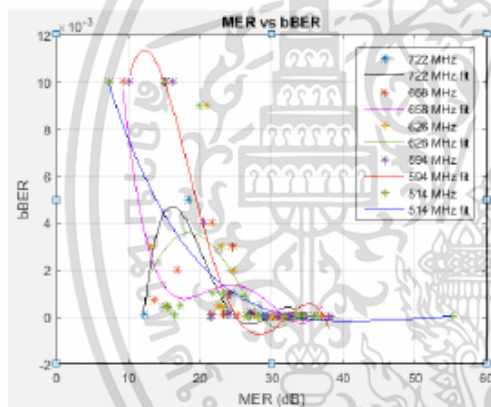


Figure 6 The comparison of MER and bBER

From The measurement signal frequency of 20 locations and 5 frequencies of MUX for this research. Previous the results that represents when the MER is approximately 18 dB that is suitable for received signal normally and few video error. Therefore, the probability of cumulative distribution function (CDF) of received signal that's shown in figure 7. The frequency of 514 MHz can be given the MER is approximately 29 dB. The frequency of 594 MHz, 626 MHz, 658 MHz and 722 MHz can be given the MER is approximately 27 dB That means the

frequency of 514 MHz provide the MER for received signal is higher than other frequencies because the lower frequency can be hardly from interference than the higher frequency.

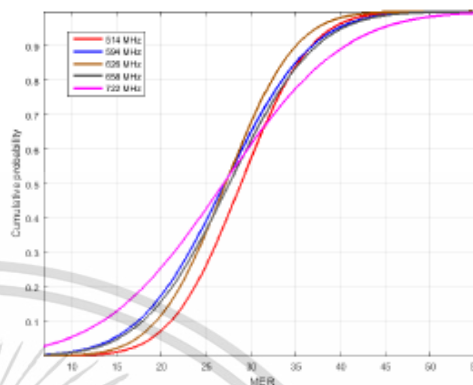


Figure 7 The cumulative distribution function of MER

V. CONCLUSION.

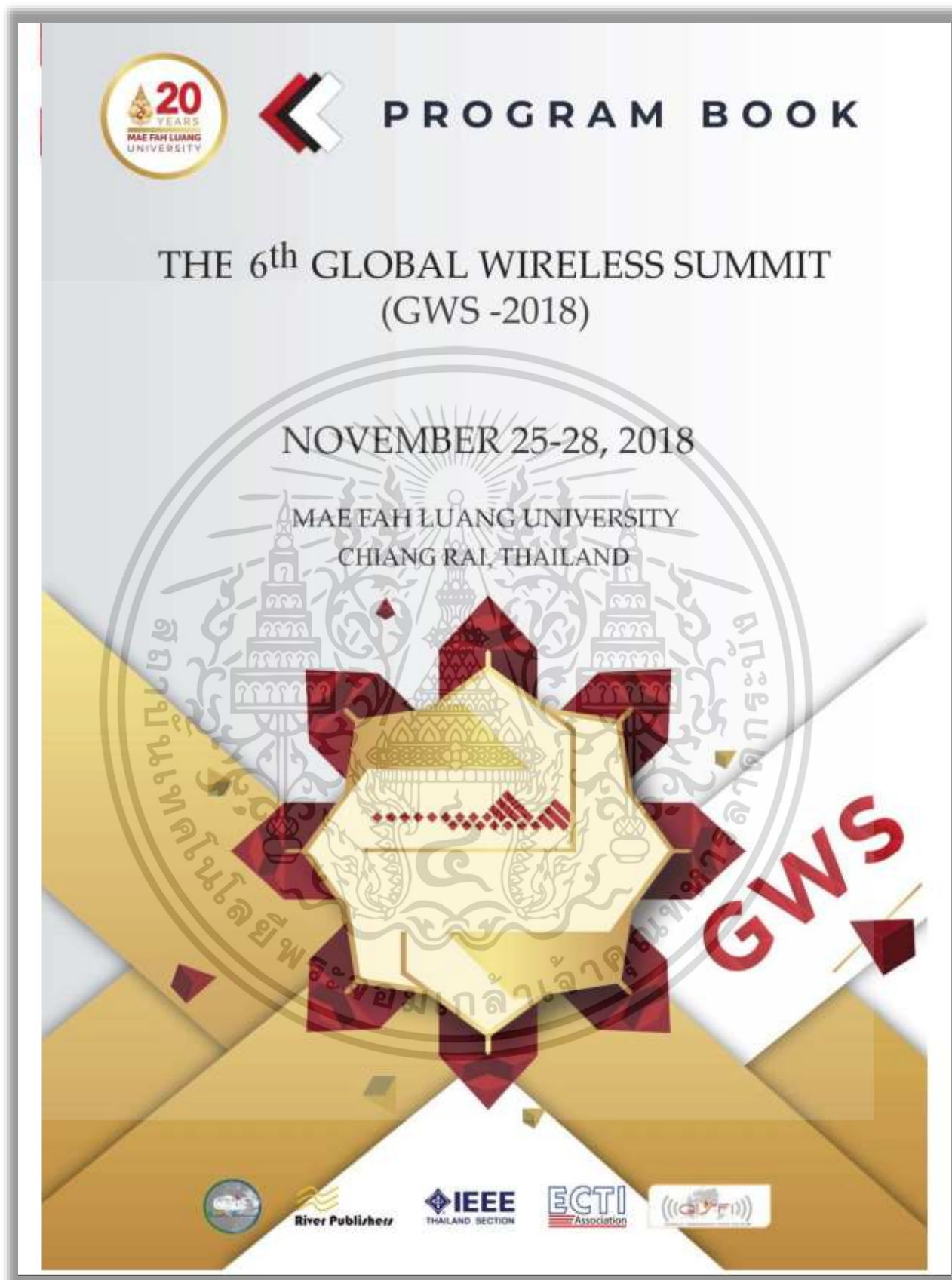
This paper presents the performance evaluation of DVB-T2 for fixed reception, which was conducted after the NBTC has set the appropriate parameter for broadcast the digital television in Thailand. The signal analysis from this paper demonstrated the effect of C/N, MER and bBER from received signal by the different distance, locations and environment. The frequencies of the transmitter for broadcasting represent the difference of frequencies have different effect and attenuation in the propagation channels. The results of this study represents the efficiency signal of high frequency will be reduced by attenuation rather than the low frequency at the distance equally. This study of signal analysis was measured in Bangkok metropolitan area. In this city have tall buildings and dense urban areas. This analysis provide information for fixed reception characteristics therefore may not cover the measurement and analysis for rural area. The area outside the Bangkok have the low noise and low interference, for this reason the results of this analysis could not covered the above mentioned. The future research will analyze and evaluate the signal in areas outside the city and rural areas, which have not density of building and population. However, for this research. The results of the study could be useful for the improvement of DVB-T2 broadcast such as transmitter adjustment and gap filler transmitter installation to optimize the efficiency of digital television broadcasting.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Digital Video Broadcasting(DVB): Frame Structure Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television, ETSI Standard EN 300 744 V1.6.1, Jan. 2009.
- [3] Eizmendi, I.; Prieto, G.; Berjare-Eriz, G.; Landa, I.; Velez, M., "Empirical DVB-T2 Thresholds for Fixed Reception," *Broadcasting, IEEE Transactions on* (Volume:59, Issue: 2), pp. 306 - 316, 13 March 2013
- [4] Berjare-Eriz, G.; Perez de Aberniz, I.; Eizmendi, I.; Prieto, G.; Velez, M., "DVB-T2 field trials results for portable indoor reception using T2-Lite and multiple PLP," *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2013 IEEE International Symposium*, pp. 1-5, 5-7 June 2013.
- [5] 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
- [6] TR 101 290 V1.2.1 (2001-05), Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems, Tech. Report ETSI, 2001.
- [7] Eizmendi, I.; Velez, M.; Gómez-Barquero, D.; Morgade, J.; Baena-Lecuyer, V.; Slimani, M.; Zoelker, J., "DVB-T2: The Second Generation of Terrestrial Digital Video Broadcasting System," *Broadcasting, IEEE Transactions on* (Volume:60, Issue: 2), pp. 259-271, 1 April 2014
- [8] 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
- [9] Morgade, J.; Arqueira, P.; Aranda, A.; Pfeiffer, R.; Stekman, V.; Frank, J.; Brugger, R., "SFN-SISO and SFN-MISO Gain Performance Analysis for DVB-T2 Network Planning," *Broadcasting, IEEE Transactions on* (Volume:60, Issue: 2), pp. 272-286, 9 January 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Single Frequency Network for DVB-T2 base on Measurement Data

Bundit Ruckveratham
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
bundit1973@hotmail.com

Sathaporn Phomwong
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
sathaporn.pr@kmit.ac.th

Abstract—In this research presents laboratory experiments for analyzing the Single Frequency Network transmission of DVB-T2 by using the real transmitter and receiver in the experiment. The main objective of the research was to study the SFN threshold reception for broadcasting by analyzing and evaluating the effects of the delay time between two SFN transmitters within the guard interval time. The results of this laboratory experiment provide the information for customizing the SFN broadcasting system to optimization and design for Single Frequency Network broadcasting system.

Index Terms—Single Frequency Network, DVB-T2, Threshold Signal Requirement

I. INTRODUCTION

The Single Frequency Network (SFN) [1] of Digital Video Broadcasting-Second Generation (DVB-T2) [2] system is very significant because the SFN broadcast can be reduced the cost of broadcasting for large reception coverage areas. The SFN system can reduce the RF power transmission at the station by adding a sub-station instead of using a high power transmitter. This technique is different from the old days that must use the broadcasting with high power transmission to cover the coverage areas. Nevertheless, the broadcasting of the SFN system is more complex than the Multi-Frequency Network (MFN) transmission especially the improper installation and configuration may be the reason why broadcasting is not performing as desired. This problem can be caused by interference during the delay time within the guard interval time, also known as inter-symbol interference (ISI), which will cause the coverage area to fail.

There are many kinds of research on the effectiveness of SFN. In [3], the SFN efficiency analysis is compared with the simulation results. In [4], there are studies on the development of several parameters of small-scale fading of a digital TV transmission for SFN portable and mobile reception. In [5], the net gross SFN analysis was performed in the SISO transmission mode to calculate Single Frequency Network Gain (SFNG) and there are many more studies at evaluation and analysis SFN gain [6-10]. However, there is

little research on the effect of delays between transmitters in SFN systems, especially the finding of SFN thresholds that can be received the signal because of the delays changed. This research presents the received signal threshold because of echo delay between two SFN transmitters.

The rest of the paper is organized as follows. Section II presents our laboratory experiments model. The SFN signal model is explained in Section III. The propose and apply evaluate and analysis technique based on laboratory experiments in Section IV. The result is discussed in Section V, and the conclusion is presented in Section VI.

II. LABORATORY EXPERIMENT

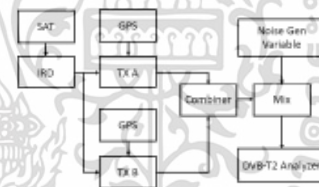


Fig. 1. SFN experiment system.

Figure 1 shows the SFN laboratory experiment block diagram. The T2-MI signal was sent via satellite to IRD receiver, the brand of the receiver is Harmonic. The T2-MI signal was sent to the transmitter which in the T2-MI signal contain the modulation index as shown in table 1. This experiment uses two transmitters, the brand of the transmitter is Syes. The key to SFN experiment is the signal of all of the transmitter in an SFN network must be same frequency, same time and same data. So, we use one signal from IRD with two SFN transmitters for this laboratory experiment. Both transmitters use GPS to synchronize. The signals were combined at the combiner and were mixed again with the Noise Generator to reduce the C/N for finding the SFN threshold receive signal. The received signals were analyzed and data recorded by the

DVB-T2 Analyzer. The brand of the analyzer is ROVER HD PROTAB.

TABLE I
MODULATION INDEX IN T2-MI SIGNAL.

Parameter	Value
Frequency	514 MHz
Bandwidth	8 MHz
Pilot Pattern	PE2
Guard Interval	19/128
Constellation	64 QAM
Constellation Rotation	0°
Code Rate	3/5

A. Data Process

The equations used to evaluate the variation of the spectrum that due to the effect of delay time shift is getting from the data collection of the SFN transmitting experiment at frequency 514 MHz BW at 8 MHz. The sampling rate is from 509.791 MHz to 517.943 MHz with the sample spacing of 86 kHz at 94 samples throughout the 8 MHz bandwidth range. Each Delay time session was repeated measurement for 20 times to credible information. All samples for each delay time equals 1880 samples and collected every 10 μ s throughout within the CI time. The sample data that use for calculating the spectral variation of each delay time are shown in equation (7) and (8) where describes mathematically the spectrum variation.

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n) \quad (1)$$

where \bar{p} is the mean of the spectrum power, N is the number of samples in the 8 MHz bandwidth and $p(n)$ is the power of each sample.

$$\sigma_{sp} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (p_n - \bar{p})^2}{N-1}} \quad (2)$$

where σ_{sp} is the spectrum variation, N is the number of samples in the 8 MHz bandwidth, p_n is the sample power, and \bar{p} is the mean of the spectrum power.

III. SFN SIGNAL MODEL

SFN reception is caused by the signal reception from the multiple transmitters within the same CI time. The SFN signals received from multiple transmitters are the difference in signal strength and the phase shift of frequency as well as the Doppler effect which makes the signal distorted in the propagation channel. The received signal of SFN is shown as an equation.

$$r(t)_S = \sum_i h_{iS}(t - \tau_i) * w(t) \quad (3)$$

where defining h_{iS} and τ_i is the channel impulse responses and delays from each transmitter in the SFN system are visible from the receiver.

A. Channel Estimation

Even though the input signal of the receiver is properly synchronized. However, the output signal after FFT demodulation may not be the same as the original signal. The carrier signal derived from reception in terms of amplitude and phase from FFT demodulation may be affected by the channel. The complexity of the amplitude carrier writes the equation as follows.

$$Y_{k,l,t} = H_{k,l,t} X_{k,l,t} + N_{k,l,t} \quad (4)$$

where $X_{k,l,t}$ is the complex modulation symbol constellation of the carrier k and the symbol l of the originally transmitted signal. $Y_{k,l,t}$ is the amplitude of the received signal and $H_{k,l,t}$ is the complex frequency response of the channel in symbol l by sampling frequencies $f_{k,l}$ and $N_{k,l,t}$ is the noise signal on the receiver is added to the system. Since DVB-T2 receivers can receive signals from Continual Pilots and Scattered Pilots. Channel evaluations can be achieved by perceiving the information sent by those the pilot cells can be expressed by the following equation.

$$H'_{k,l,t} = \frac{Y_{k,l,t}}{C_{k,l,t}} = H_{k,l,t} + \frac{N_{k,l,t}}{C_{k,l,t}} \quad (5)$$

where $C_{k,l,t}$ is the complex amplitude of the reference pilot cells. When defending the maximum channel correction value, the channel response is defined as $H'_{k,l,t}$. There are only reference cells k,l In fact, the channel response $H_{k,l,t}$ varies with frequency and time.

IV. POLYNOMIAL REGRESSION MODEL

In this paper, we use the polynomial regression model to estimate and predict the change of significant values for SFN threshold signal reception of DVB-T2. We use this model to analyze the spectrum variation, C/N of minimum receive signal requirement, MER, and noise margin as shown in the following equation.

$$z_i = \beta_0 + \beta_1 \omega + \beta_2 \omega^2 + \beta_3 \omega^3 + \dots + \beta_n \omega^n + \varepsilon_i \quad (6)$$

where $i = 1, 2, \dots, n$, z_i is polynomial regression model response, ω is variable parameter and β is coefficient parameter.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_1 & \omega_1^2 & \dots & \omega_1^n \\ 1 & \omega_2 & \omega_2^2 & \dots & \omega_2^n \\ 1 & \omega_3 & \omega_3^2 & \dots & \omega_3^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_n & \omega_n^2 & \dots & \omega_n^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\vec{z} = X\vec{\beta} + \vec{\varepsilon} \quad (8)$$

$$\vec{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{z} \quad (9)$$

Can be written in Matrix in terms of X , \vec{z} is the response, $\vec{\beta}$ is parameters and $\vec{\varepsilon}$ is vector of an unobserved random

error which are independent values. The rows of X and \hat{y} are composed of x and y for each i -th of the data sample. The model is based on Equation (5), (6) and (7).

$$\begin{aligned} \hat{z}_{sp} = & 0.6492x^8 - 0.6533x^7 - 2.852x^6 \\ & + 2.354x^5 + 3.29x^4 - 2.297x^3 \\ & - 1.676x^2 + 0.5434x + 2.944 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \hat{z}_{C/N} = & -0.3385x^8 + 0.2632x^7 + 1.636x^6 \\ & - 0.253x^5 - 2.519x^4 + 0.9462x^3 \\ & + 1.065x^2 - 0.7174x + 22.69 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{z}_{MER} = & 1.043x^8 - 0.6222x^7 - 5.216x^6 \\ & + 2.209x^5 + 8.434x^4 - 2.231x^3 \\ & - 4.322x^2 + 0.6096x + 7.918 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{z}_{\sigma_{rms}} = & 1.053x^8 - 0.5823x^7 - 5.232x^6 \\ & + 2.025x^5 + 8.382x^4 - 2.012x^3 \\ & - 4.207x^2 + 0.5795x + -5.594 \end{aligned} \quad (13)$$

where \hat{z}_{sp} , $\hat{z}_{C/N}$, \hat{z}_{MER} , and $\hat{z}_{\sigma_{rms}}$ are the polynomial regression model response of spectrum variation, C/N, MER and noise margin for SFN threshold receive signal of DVB-T2 as shown following equation (8), (9), (10) and (11).

A. Residual Analysis

After choosing the appropriate prediction Model, Validation of the selected model is very important. In order to be able to know whether the model chosen is appropriate or not, Model validation by checking the difference between the actual measured values with the Prediction value is called Residual Analysis with the following equation.

$$e = y - \hat{y} \quad (14)$$

where e is the error value or Residual, y is the actual measured value or the observed value and \hat{y} is the value from the Prediction Model by $\sum e = 0$

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

In figure 2, presents the Spectrum Variation of 8 MHz bandwidth, which is the BW of the DVB-T2 transmission of this research. The variation of the received signal spectrum is displayed as the standard deviation of the power spectrum of the 8 MHz bandwidth. The power magnitude variation throughout the BW ranges compared to the delay within CI times. The result of the received signal from laboratory experiments, it is evident that at 0 μ s of delay time, the spectral variation is vastly changed as shown is approximate 8 dB while the spectrum variation of the delay time ranges from 10 μ s to 270 μ s as is in the range of 2.5 dB - 3.5 dB throughout the CI time. For the verify of the polynomial regression model using the residuals error analysis. The comparison of the Polynomial Regression Model and actual experiment value have a similar

value as shown in the figure can be seen as the minimum error is approximate - 0.8 dB and maximum error not more than 0.4 dB.

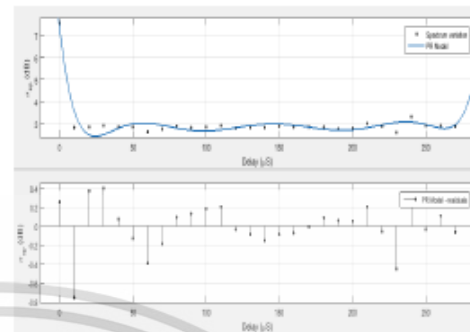


Fig. 2. The comparison of Delay and Spectrum variation.

In figure 3, shows a comparison of delay values across the CI range and C/N values from laboratory experiments. In this experiment, the 0 μ s delay signal is significantly reduced as shown in Fig. In fact, at this point, the signal strength is more required as the effect of 0 dB echo. The value of C/N throughout the delay period is approximately 22.5 dB. The PR model validation has a minimum error of about -1.5 dB and a maximum of about 1.5 dB and the average error of not more than 0.5 dB.

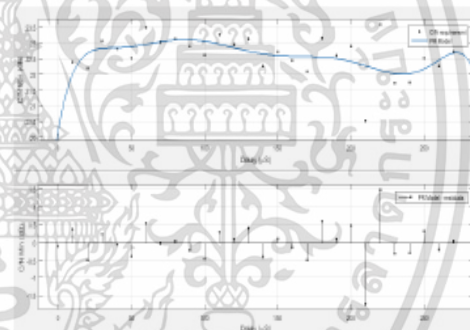


Fig. 3. The comparison of Delay and C/N.

In figure 4, the MER value which represents the quality and efficiency of the received signal at the receiver. The minimum MER that can be received at approximately 8 dB throughout within CI time. At 0 μ s, the signal is subject to severe fluctuations because of the effect of 0 dB echo, it requires a very high MER to the received signal success, so the receiver required the MER at approximately 13.5 dB, which is higher than the average of 5.5 dB for the success of signal reception.

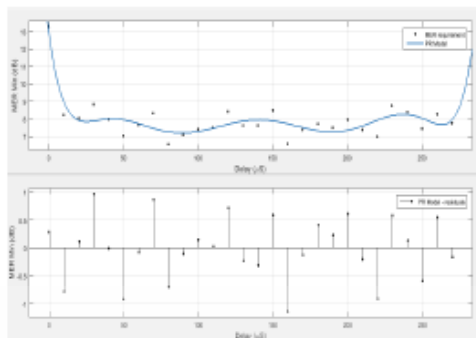


Fig. 4. The comparison of Delay and MER.

In figure 5, shows the comparison of the delay and Noise margin. The minimum value that can be received by the noise margin is approximate -8 dB along within the CI time. In the delay 0 μ s, requires a maximum noise level of 0 dB. At 0 μ s the signal will fluctuate dramatically because of the effect of 0 dB echo, thus increasing the demand for the noise margin to be able to receive the signal. The residual error of verifying PR model is about 0.5 dB, the maximum is about 1 dB, and the minimum is around -1 dB.

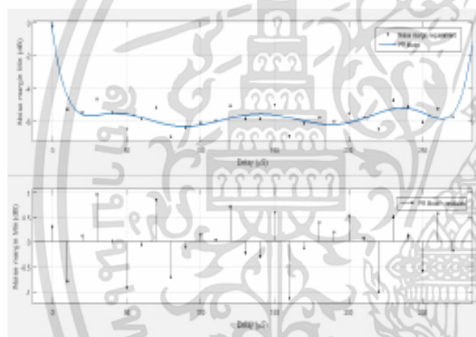


Fig. 5. The comparison of Delay and Noise margin.

VI. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this paper, present experiment in the laboratory using real transmitters in the broadcast. We experiment with the SFN transmission on the SISO mode of DVB-T2. This experiment has shown the effect of receiving signal delays between two SFN transmitters throughout the CI range of 0 μ s to 270 μ s and finding the minimum receive signal require or threshold receives signals for the SFN reception by using DVB-T2 modulation parameters for digital terrestrial television broadcasting in Thailand.

The significant values for SFN Threshold or minimum requirement receive signal was Spectrum Variation, MER, Noise margin. We use the digital television analyzer for saving the experimental data and using the polynomial regression model for data evaluation and analysis. Based on the results of the experiment, the average value of the spectrum variation is approximately 2 dB, the C/N value is approximately 23 dB. The MER value is around 8 dB and the noise margin is about -6 dB. The data obtained from this research is especially useful for the design and optimize improvement the SFN system.

The future work research is the experiment in broadcasting from the real environment. This will be the extension of the real propagation channel model, which will bring about improved the evaluation of SFN signal model in more reliable.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported/partially supported by MCOT public company limited. We thank our colleagues from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang who provided insight and expertise that greatly assisted the research.

REFERENCES

- [1] A. Mattsson, "Single frequency networks in DTV," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 51, Dec 2005, pp. 413 - 422.
- [2] I. Elizendi, M. Velez, D. Gómez-Bargueso, J. Mogade, V. Baena-Lecroyes, M. Slimani, J. Zoellner, "DVB-T2: The Second Generation of Terrestrial Digital Video Broadcasting System," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 60, June 2014, pp. 258 - 271.
- [3] J. Mogade, B. Angueta, A. Asinza, R. Pfeiffer, V. Steinmann, J. Frank, R. Bauges, "SFN-SISO and SFN-MISO Gain Performance Analysis for DVB-T2 Network Planning," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 60, June 2014, pp. 272 - 286.
- [4] G. Coenza, P. Angueta, M.M. Velez, D. Coenza, G. Pido, J.L. Cortales, A. Asinza, "Field measurement based characterization of the wideband urban multipath channel for portable DTV,"
- [5] S. Jeon, J. Kim, J.S. Han, S.H. Kim, J.D. Kim, J.S. Seo, "Numerical analysis on the net Coex MISO-SFNC in DVB-T2 system," 2015 *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 17-19 June 2015, pp. 1 - 7.
- [6] J. Qi, J. Robert, K.L. Chee, M. Slimani, J. Zoellner, "DVB-T2 MISO field measurements and a calibrated coverage gain predictor," *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 27-29 June 2012, pp. 1 - 6.
- [7] S. Jeon, J. Kim, J.S. Han, J.S. Seo, "Formulating the Net Gain of SISO-SFN in the Presence of Echo Effect," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 61, June 2015, pp. 325 - 326.
- [8] L. Zhang, L. Cui, Y. Qiao, W. Zhang, "Obtaining diversity gain for DTV by using MIMO structure in SFN," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 50, March 2004, pp. 83 - 90.
- [9] D. Plets, W. Joseph, P. Angueta, J.A. Aznar, L. Vezloock, L. Matens, "On the Methodology for Calculating SFN Gain in Digital Broadcast Systems," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 56, September 2010, pp. 334 - 339.
- [10] D. Plets, W. Joseph, L. Vezloock, L. Matens, P. Angueta, J.A. Aznar, "SFN gain in broadcast networks," 2011 *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 8-10 June 2011, pp. 1-6.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายบัณฑิต รักวีรธรรม
วัน เดือน ปีเกิด	18 กุมภาพันธ์ 2516 ที่ สมุทรปราการ
ที่อยู่	235/191 หมู่บ้านเฟื่องฟ้า 15 ซอย มังกร-นาคดี ถนน เทพารักษ์ ตำบล แพรกษา อำเภอ เมือง จังหวัด สมุทรปราการ 10280
ประวัติการศึกษา	2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2557 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบการออกอากาศวิทยุ FM 2.) ระบบการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล 3.) ระบบสตูดิโอสถานีวิทยุ
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2537-2538	ตำแหน่งช่างอิเล็กทรอนิกส์ สถานีดาวเทียมศรีราชา การสื่อสารแห่งประเทศไทย - ควบคุมดูแลการทำงานระบบ Low Noise Amplifier (LNA)
พ.ศ.2538-2547	ตำแหน่งช่างอิเล็กทรอนิกส์ องค์กรสื่อสารมวลชนแห่งประเทศไทย - ควบคุมระบบออกอากาศสถานีวิทยุ และสถานีโทรทัศน์ จังหวัดระนอง - แผนกซ่อมบำรุง ศูนย์วิศวกรรมภาคกลางและตะวันออก
พ.ศ.2547-ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรอาวุโส บริษัท อสมท จำกัด (มหาชน) - แผนกซ่อมบำรุง ศูนย์วิศวกรรมภาคกลางและตะวันออก - แผนงานธุรกิจวิศวกรรม - งานบริการวิศวกรรม สำหรับสถานีทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้