

แบบจำลองการทำนายสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดิน
ดิจิทัลในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย

PREDICTION MODEL FOR DIGITAL TERRESTRIAL TELEVISION (DTTV)
PROPAGATION IN URBAN AREA SOUTHERN THAILAND

พิทักษ์ แก้วบุญส่ง
PITAK KEAWBUNSONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-D-018-017

แบบจำลองการทำนายสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดิน
ดิจิทัลในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย

PREDICTION MODEL FOR DIGITAL TERRESTRIAL TELEVISION (DTTV)
PROPAGATION IN URBAN AREA SOUTHERN THAILAND

พิทักษ์ แก้วบุญส่ง
PITAK KEAWBUNSONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-018-017

PREDICTION MODEL FOR DIGITAL TERRESTRIAL TELEVISION (DTTV)
PROPAGATION IN URBAN AREA SOUTHERN THAILAND

PITAK KEAWBUNSONG

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
2019
KMITL-2019-EN-D-018-017

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองการทำนายสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย
นักศึกษา	นายพิทักษ์ แก้วบุญส่ง
รหัสประจำตัว	57601030
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการทำนายการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล สำหรับโครงข่ายแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย โดยแบบจำลองที่นำเสนอได้พัฒนาบนพื้นฐานการจำลองของฮาตา ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีใช้วิธีการปรับเทียบกับวิธีการอื่น ๆ และได้พิจารณาความเหมาะสมที่สุดบนพื้นฐานวิธีกำลังสองน้อยที่สุด การพัฒนาแบบจำลองที่นำเสนอได้นำเอาข้อมูลที่ได้รับการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลจริงในพื้นที่เขตเมืองภาคใต้ของประเทศไทย โดยการนำเอาความแรงสัญญาณที่รับได้ของช่องสัญญาณสี่โครงข่ายหรือสี่ช่องความถี่ ในพื้นที่เมืองหาดใหญ่จังหวัดสงขลา และพื้นที่เมืองจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยใช้เครื่องวัดวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T2 (DVB-T2 Analyzer) ในงานวิจัยนี้พบว่าแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีฮาตา (Hata Path Loss Model) มีความเหมาะสมในการนำมาพัฒนาเพื่อนำเสนอ โดยผลลัพธ์จากวิธีการปรับเทียบกับค่าสถิติ จะได้รับพารามิเตอร์ค่าชดเชย (Offset) เพื่อปรับเทียบ และผลลัพธ์จากความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้รับพารามิเตอร์ค่าชดเชยและค่าความโค้ง (Slop) เพื่อให้เหมาะสมที่สุด และการชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอใช้ค่าสถิติ ค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ค่ากลางผิดพลาดสมบูรณ์ (ME) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ (RE) งานวิจัยนี้พบว่าแบบจำลองฮาตาที่นำเสนอมีค่าสถิติ RMSE ME SD RE น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองฮาตาเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น ซึ่งหมายความว่า แบบจำลองที่นำเสนอเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานออกแบบโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทยได้เหมาะสมที่สุด

Thesis	Prediction Model for Digital Terrestrial Television (DTTV) Propagation in Urban Area Southern Thailand
Student	Mr. Pitak Keawbunsong
Student ID.	57601030
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Dr. Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis proposes a prediction model for digital terrestrial television (DTTV) propagation to be used for a broadcasting network design in urban areas of Southern Thailand. The prediction model was developed based on a path loss model through statistical calibration and optimization on the least square method. The development of such model depended on data collected from signal measurement of received signal strength within Had Yai urban area, Songkla Province along with in Suratthani urban area, Suratthani Province through 4 channels or 4 frequencies of the broadcasting network service providers in each area while DVB-T2 Analyzer was used as a signal analysis tool. The findings reveal that Hata path loss model is suitable for the development of prediction model considering offset parameters, slope parameters, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (ME), Standard Deviation of Error (SD) and Relative Error (RE). The proposed prediction model provides the lowest value of RMSE, ME, SD and RE compared to Hata path loss model and other models. Therefore, proposed model from this study is suitable to be used for a broadcasting network design in urban areas of Southern Thailand.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและให้คำปรึกษาของอาจารย์
ที่ปรึกษา ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล ดร.ศรัณู ดวงสุวรรณ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะ
แนวทางของงานวิจัยและแนวทางในการตีพิมพ์บทความวิจัย ขอขอบคุณ บริษัท อสมท จำกัด
(มหาชน) ที่ได้มอบโอกาสในการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโทและปริญญาเอก

สุดท้ายขอขอบคุณคุณรัตติยา แก้วบุญส่ง นางสาวพิชญานิน แก้วบุญส่ง และเด็กชาย
พิชญะ แก้วบุญส่ง ภรรยา บุตรสาว บุตรชาย ผู้เป็นกำลังใจและให้ความเข้าใจตลอดระยะเวลาของ
การศึกษา

พิทักษ์ แก้วบุญส่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.5 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 วรรณกรรมที่ได้ศึกษามา.....	6
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.2.2 สรุปวรรณกรรมที่ได้ทบทวน	8
2.3 เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล	9
2.3.1 มาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล.....	10
2.3.2 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล	13
2.4 มาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล DVB-T2.....	16
2.4.1 โครงสร้างมาตรฐาน DVB-T2.....	18
2.4.2 ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2	21
2.5 การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศไทย.....	25
2.6 การวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล.....	29
2.6.1 พารามิเตอร์การวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล	29
2.6.2 การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล	32
2.7 สรุป.....	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการจำลองการสูญเสียเชิงวิถึ.....	34
3.1 บทนำ.....	34
3.2 แบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึ.....	34
3.2.1 แบบจำลองอากาศว่าง.....	35
3.2.2 แบบจำลองโอกูมูระ.....	36
3.2.3 แบบจำลองฮาตะ.....	39
3.2.4 แบบจำลองอิกลิ.....	40
3.3 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	41
3.3.1 หลักการวิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	42
3.3.2 คุณสมบัติของตัวประมาณค่า b_0, b_1	43
3.3.3 คุณสมบัติของการทำนายและส่วนเหลือ.....	44
3.4 พารามิเตอร์เชิงสถิติสำหรับการจำลองสูญเสียเชิงวิถึ.....	45
3.4.1 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง.....	45
3.4.2 ค่ากลางผิดพลาดสัมบูรณ์.....	46
3.4.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	46
3.4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์.....	46
3.5 สรุป.....	47
บทที่ 4 การวัดสัญญาณโทรศัพท์ศนภาคพื้นดินระบบดิจิตัล.....	48
4.1 บทนำ.....	48
4.2 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึ.....	48
4.2.1 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึโดยวิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติ.....	48
4.2.2 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึโดยวิธีความเหมาะสมที่สุด.....	49
4.3 การเก็บข้อมูลและวัดสัญญาณโทรศัพท์ศนภาคพื้นดินดิจิตัล.....	50
4.3.1 สถานีส่งสัญญาณโทรศัพท์ศนภาคพื้นดินดิจิตัล.....	50
4.3.2 ระบบการวัดสัญญาณโทรศัพท์ศนภาคพื้นดินดิจิตัล.....	52
4.4 การจำลองสูญเสียเชิงวิถึจากการปรับเทียบ.....	54
4.5 แบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึจากความเหมาะสมที่สุด.....	54
4.6 สรุป.....	57
บทที่ 5 การประเมินผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองวิจัย.....	58

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1 บทนำ.....	58
5.2 ผลการทดลองวิจัยแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีจากการปรับเทียบ	58
5.3 การสูญเสียเชิงวิถีที่มีความเหมาะสมที่สุด	61
5.4 สรุป.....	65
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	66
6.1 สรุปผลการวิจัย	66
6.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	74
ภาคผนวก ค.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์มาตรฐาน DVB-T กับ DVB-T2	16
2.2 อัตราบิตสูงสุดที่ BW 8 MHz FFT Size 32K GI 1/128 PP7	21
2.3 โหมดรับสัญญาณกับการเปลี่ยนแปลงคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต่ำสุด	23
2.4 ช่องความถี่สำหรับการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลของประเทศไทย.....	24
2.5 พารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบ DVB-T2 และอัตราบิต.....	26
2.6 ระดับความสัมพันธ์ต่าง ๆ สำหรับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	28
2.7 ระดับสัญญาณอินพุตต่ำสุดที่เครื่องรับโทรทัศน์ระบบดิจิทัล.....	33
4.1 ค่า RMSE ของการสูญเสียเชิงวิถิจากข้อมูลพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย.....	54
4.2 พารามิเตอร์ที่รับได้จากวิธีความเหมาะสมที่สุด.....	57
5.1 เปรียบเทียบค่า RE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึที่เปรียบเทียบที่ความถี่ต่างกัน	58
5.2 การเปรียบเทียบค่า ME ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะกับแบบจำลองฮา ตะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ	61
5.3 เปรียบเทียบค่า RMSE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะกับแบบจำลองฮา ตะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ.....	62
5.4 เปรียบเทียบค่า SD ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะกับแบบจำลองฮา ตะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ.....	62
5.5 เปรียบเทียบค่า RE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะกับแบบจำลองฮา ตะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ	63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... 4
2.1	มาตรฐานการแพร่ภาพโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล 10
2.2	สเปกตรัมการส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลมาตรฐาน ISDB-T..... 11
2.3	การใช้สเปกตรัมระบบโทรทัศน์สีแอนะล็อก NTSC กับโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล ATSC 12
2.4	การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล..... 13
2.5	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบรวมสัญญาณ 14
2.6	ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ..... 15
2.7	การเชื่อมต่อระบบเครื่องส่งโทรทัศน์ที่สถานีโครงข่าย 16
2.8	บล็อกไดอะแกรมของ DVB-T2 18
2.9	บล็อกไดอะแกรมส่วนประมวลผลอินพุต..... 18
2.10	บล็อกไดอะแกรมการทำงานโหมด B แบบหลาย PLP..... 18
2.11	บล็อกไดอะแกรมส่วน Bit Interleave Coding and Modulation 19
2.12	บล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างเฟรม..... 20
2.13	โครงสร้างเฟรมข้อมูลของ DVB-T2..... 20
2.14	บล็อกไดอะแกรมส่วนกำเนิดของ OFDM..... 21
2.15	จำนวนช่องรายการของการให้บริการโครงข่าย 25
2.16	หน้ากากสเปกตรัม (Spectrum Mask) สำหรับ DVB-T2 27
2.17	โครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลที่ใช้ในปัจจุบัน (a) รูปแบบการวางโครงข่ายแบบหลาย ความถี่ (b) รูปแบบการวางโครงข่ายแบบความถี่เดียว..... 28
2.18	เทคโนโลยีการแพร่กระจายสัญญาณคลื่นวิทยุประเภทต่าง ๆ..... 30
3.1	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การลดทอนสัญญาณ $A_{MU}(f, d)$ 37
3.2	อัตราขยายกำลังจากผลความสูงของสายอากาศด้านส่ง..... 38
3.3	อัตราขยายกำลังจากผลความสูงของสายอากาศด้านรับ 38
3.4	แฟคเตอร์ G_{Area} ที่ใช้ในการแก้ไขการลดทอนในพื้นที่ต่าง ๆ ของ $A_{MU}(f, d)$ 39
4.1	ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีโดยวิธีปรับเทียบด้วยค่าสถิติ 48
4.2	ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีวิธีความเหมาะสมที่สุด 49
4.3	โครงสร้างการออกอากาศสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ระบบดิจิทัล 51
4.4	แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโดยพิจารณาเฉพาะการสูญเสียเชิง วิถี 52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แบบแผนการจำลองการวัดช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล	53
4.6 การวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลในสถานะแวดล้อมจริง	53
5.1 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และ แบบจำลองอิกลิ ของ Ch40 ความถี่ 626 MHz	59
5.2 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และ แบบจำลองอิกลิ ของ Ch42 ความถี่ 642 MHz	59
5.3 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และ แบบจำลองอิกลิ ของ Ch44 ความถี่ 658 MHz	60
5.4 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และ แบบจำลองอิกลิ ของ Ch46 ความถี่ 674 MHz	60
5.5 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ ของ Ch40 ความถี่ 626 MHz	63
5.6 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ ของ Ch42 ความถี่ 642 MHz	64
5.7 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และ แบบจำลองอิกลิ ของ Ch44 ความถี่ 658 MHz	64
5.8 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ ของ Ch46 ความถี่ 674 MHz	65
6.1 โครงข่ายความถี่เดียวสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยและหลายประเทศกำลังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินจากระบบแอนะล็อกไปสู่ระบบดิจิทัล ด้วยข้อดีของเทคโนโลยีโทรทัศน์ระบบดิจิทัล คือ ประหยัดทรัพยากรความถี่ เนื่องจากหนึ่งความถี่สามารถออกอากาศได้หลายโปรแกรมทำให้สามารถนำความถี่เดิมกลับไปใช้ในกิจการอื่นได้ สามารถรับชมสัญญาณภาพและเสียงได้ชัดเจนในทุกพื้นที่เขตบริการเพราะความชัดเจนของสัญญาณไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง มีความคมชัดในการรับชมปราศจากสัญญาณรบกวนเนื่องจากการส่งสัญญาณในระบบดิจิทัลมีเทคนิคการเข้ารหัสป้องกันและกำจัดสัญญาณรบกวน สามารถส่งช่องรายการโทรทัศน์ที่มีความละเอียดสูง (High Definition : HD) และเพิ่มบริการเสริมในการออกอากาศได้เช่น การกระจายข้อมูล (Data Broadcasting) พังรายการอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Program Guide : EPG) บริการโทรทัศน์แบบโต้ตอบ (Interactive TV) บริการโทรทัศน์แบบเคลื่อนที่ (Mobile TV) เป็นต้น [1] สำหรับประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม หรือเรียกว่า สำนักงาน กสทช. ซึ่งเป็นหน่วยงานควบคุมกิจการได้วางแผนเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของประเทศไทย โดยเลือกมาตรฐานโทรทัศน์ดิจิทัลระบบ DVB-T2 (Digital Video Broadcasting - 2nd Generation Terrestrial) ของยุโรปเป็นมาตรฐานของประเทศตามข้อตกลงของประเทศในภูมิภาคอาเซียน และวางแผนออกแบบโครงข่ายการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล เบื้องต้นประกอบด้วยสถานีโครงข่ายหลัก 39 สถานี สถานีเสริม 132 สถานี และเพิ่มเติมสถานีเสริมจุดอับสัญญาณภายหลัง [2] ขณะนี้ประเทศไทยอยู่ในช่วงการติดตั้งสถานีเสริมและออกแบบสถานีเสริมจุดอับสัญญาณ ซึ่งพื้นที่เมืองมักจะพบปัญหาจุดอับสัญญาณจากการบดบังของสิ่งปลูกสร้างที่เป็นตึกสูงหนาแน่น เป็นผลให้ประชาชนในพื้นที่บดบังไม่สามารถรับชมสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลได้

การออกแบบโครงข่ายการส่งผ่านสัญญาณ DVB-T2 มีความจำเป็นต้องศึกษา และการจำลองสูญเสียเชิงวิถีเพื่อใช้ทำนายกำลังสัญญาณที่ลดทอนจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ ซึ่งกำลังสัญญาณจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทาง [3] โดยแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีควรมีความแม่นยำและเหมาะสมเพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมที่ถูกต้อง เป็นผลให้สามารถใช้กำลังส่งของเครื่องส่งและ

อุปกรณ์ส่วนควบสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนของโครงข่าย ทั้งนี้แบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีที่นิยมใช้งานทั่วไป เช่น แบบจำลองฮาทะ (Hata Model) แบบจำลองโอกูมูระ (Okumura Mode) แบบจำลองฮาทะ Cost-231 (Cost-231 Hata Model) แบบจำลองลี (Lee Model) เป็นต้น ยังมีความแม่นยำไม่เพียงพอเมื่อนำมาออกแบบใช้งานเฉพาะพื้นที่เนื่องจากสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยพัฒนาและนำเสนอแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีที่มีความแม่นยำเฉพาะพื้นที่ เช่น งานวิจัยของ [4] ได้พัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีฮาทะเพื่อใช้งานในพื้นที่ชนบทของมาเลเซีย พัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple : CDMA) โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 460 MHz 800 MHz 900 MHz 1,800 MHz และหาความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด งานวิจัย [5] ได้พัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีโอกูมูระ เพื่อใช้งานในพื้นที่เมืองของมาเลเซีย พัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซีดีเอ็มเอโดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 822 MHz และการหาความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด งานวิจัย [6] ได้พัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีฮาทะ Cost-231 เพื่อใช้งานในพื้นที่ชนบทของไนจีเรีย พัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 900 MHz และหาความเหมาะสมด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด งานวิจัย [7] ได้พัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีลี เพื่อใช้งานในพื้นที่เมืองของจอร์แดน พัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม (Global System for Mobile : GSM) โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 900 MHz 1,800 MHz และใช้วิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error : RMSE) งานวิจัย [4] - [7] ซึ่งวัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอด้วยค่าสถิติคือ ค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error : RE) ค่ากลางความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation : MAD) และค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น ทั้งนี้งานวิจัยการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นเพื่อใช้งานเฉพาะพื้นที่ ที่นำเสนอส่วนใหญ่พัฒนามาบนพื้นฐานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยังไม่มีงานวิจัยที่พัฒนามาบนพื้นฐานการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 และสำหรับประเทศไทยยังไม่มีงานวิจัยพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีบนพื้นฐานการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล DVB-T2 เพื่อใช้งานเฉพาะพื้นที่ในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ แบบจำลองการทำนายสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย โดยแบบจำลองที่นำเสนอพัฒนามาบนพื้นฐานการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี ซึ่งใช้วิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติและวิธีความเหมาะสมที่สุดบนพื้นฐานวิธีกำลังสองน้อยที่สุด การพัฒนาแบบจำลองอาศัยข้อมูลจากการวัดสัญญาณโทรทัศน์บนช่องสัญญาณ 4 โครงข่ายหรือ 4 ความถี่ ในพื้นที่เมืองหาดใหญ่จังหวัดสงขลา และพื้นที่เมืองจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยใช้เครื่องวัดวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T2 แบบจำลองที่นำเสนอเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานออกแบบโครงข่ายแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทยได้อย่างแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ แบบจำลองการทำนายของการสูญเสียเชิงวิถีสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลในพื้นที่เขตเมืองภาคใต้ของประเทศไทย มีวัตถุประสงค์การศึกษาดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาปัญหาการส่งผ่านโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลบนมาตรฐาน DVB-T2 สำหรับประเทศไทย

1.2.2 เพื่อศึกษาทดลองวัดคุณลักษณะช่องสัญญาณการสูญเสียเชิงวิถีของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลตามข้อกำหนด กสทช.

1.2.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีบนพื้นฐานของฮาดะ และแบบจำลองอื่น ๆ ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ แบบจำลองการทำนายของการสูญเสียเชิงวิถีสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลสำหรับพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย โดยจำกัดขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 การวัดสัญญาณที่รับได้ ในพื้นที่เมืองหาดใหญ่จังหวัดสงขลา และพื้นที่เมืองจังหวัดสุราษฎร์ธานี ช่วงระยะห่างจากสถานีส่ง 2 – 7 กิโลเมตร โดยใช้เครื่องมือวัด DVB-T2 Analyzer ยี่ห้อ PROMAX รุ่น HD Ranger+ พร้อมระบบระบุตำแหน่ง (Global Positioning System : GPS) และยูเอสบีไดรฟ์ (USB Drive) บันทึกค่าทุก 20 วินาที และใช้สายอากาศโทรทัศน์รับสัญญาณระบบ Digital UHF รุ่น D7E ของบริษัท SAMART ประเทศไทย ติดตั้งบนขาตั้งปรับความสูงได้รวมความสูง 10 เมตร

1.3.2 การสร้างแบบจำลองใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณจำนวน 6,000 จุดต่อหนึ่งความถี่

1.3.3 การศึกษาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีเพื่อใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบ ทำการศึกษาแบบจำลองอากาศว่าง (Free Space Model) แบบจำลองโอกูมูระ (Okumura Model) แบบจำลองฮาดะ (Hata Model) และแบบจำลองอีกลี (Egli Model)

1.3.4 การเลือกแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาใช้ค่า RMSE ของแบบจำลองที่มีค่าน้อยที่สุดเป็นเกณฑ์ตัดสินใจ

1.3.5 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี โดยการปรับเทียบใช้ค่าสถิติ RMSE

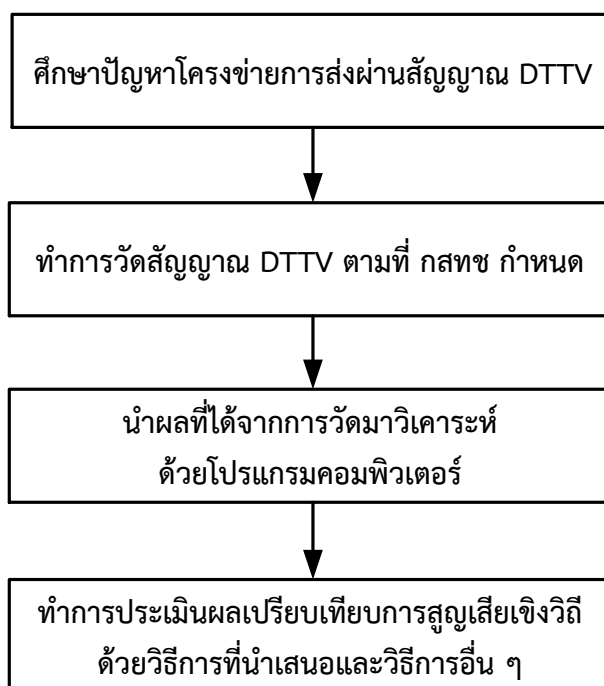
1.3.6 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี โดยวิธีความเหมาะสมที่สุดใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

1.3.7 การชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอใช้ค่าสถิติ RMSE, ME, SD และ RE เป็นตัวชี้วัด

1.3.8 การแสดงผลด้วยกราฟใช้โปรแกรม MATLAB และการวิเคราะห์ผลทางสถิติใช้โปรแกรม Microsoft Excel

1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เริ่มต้นจากการศึกษาปัญหา และทฤษฎีต่าง ๆ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำการวัดสัญญาณเก็บค่าข้อมูลที่ต้องการใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลเพื่อสร้างแบบจำลองนำเสนอ โดยมีขั้นตอนสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.5 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท คือ

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์และขั้นตอนการศึกษาวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล มาตรฐานโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T2 และระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศไทย

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีโดยวิธีปรับเทียบด้วยค่าสถิติ วิธีความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และค่าสถิติที่ใช้ชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองที่นำเสนอ

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีที่นำเสนอ ซึ่งได้รับจากวิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติและวิธีความเหมาะสมที่สุด

บทที่ 5 กล่าวถึงผลลัพธ์ค่าสถิติของการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม ผลลัพธ์ค่าสถิติและกราฟแสดงผลเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึจากวิธีการปรับเทียบ ผลลัพธ์ค่าสถิติและกราฟแสดงผลเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึจากวิถึความเหมาะสมที่สุด

บทที่ 6 บทสรุปของวิทยานิพนธ์และนำเสนอข้อเสนอแนะ เพื่อการพัฒนาในงานวิจัยต่อไป

บทที่ 2

เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

2.1 บทนำ

บทนี้ได้กล่าวถึงวรรณกรรมที่ผ่านมาซึ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเป็นแนวคิดและได้อ้างอิงและการนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัย โดยภาพรวมที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลและการส่งผ่านสัญญาณ ตามมาตรฐานเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล DVB-T2 ซึ่งเป็นรายละเอียดมาตรฐานที่ใช้งานในประเทศไทย การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศไทยซึ่งเป็นรายละเอียดทางเทคนิคสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณของประเทศ

2.2 วรรณกรรมที่ได้ศึกษามา

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ใช้อ้างอิงและเป็นแนวคิดของวิทยานิพนธ์มีดังนี้

บทความของ R. Mardeni และ K. F. Kwan เรื่อง Optimization of Hata Propagation Model in Suburban Area in Malaysia [4] ได้ปรับปรุงแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสหาคะ ให้มีความแม่นยำใช้งานเฉพาะพื้นที่ชนบทของประเทศมาเลเซีย โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 460 MHz 800 MHz 900 MHz และ 1,800 MHz ในพื้นที่แพร่กระจายคลื่นของสถานีฐานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซีดีเอ็มเอและจีเอสเอ็มของเมืองไซเบอร์จายา (Cyberjaya) และบุตรจายา (Putrajaya) การเลือกแบบจำลองเพื่อปรับปรุงใช้การพิจารณาค่า RE ที่น้อยที่สุดพบว่าแบบจำลองสหาคะมีความเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอิกลีและแบบจำลองสหาคะ Cost-231 การปรับปรุงแบบจำลองใช้ความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอด้วยค่า RE

บทความของ R. Mardeni เรื่อง Path Loss Model Optimization for Urban Outdoor Coverage Using Code Division Multiple Access (CDMA) System at 822 MHz [5] ได้ปรับปรุงแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสหาคะ ให้มีความแม่นยำใช้งานเฉพาะพื้นที่เมืองของประเทศมาเลเซีย โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 822 MHz ในพื้นที่แพร่กระจายคลื่นของสถานีฐานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซีดีเอ็มเอในเมืองกัวลาลัมเปอร์ การเลือกแบบจำลองเพื่อปรับปรุงใช้การพิจารณาค่า RE ที่น้อยที่สุดพบว่าแบบจำลองโอกูมูระ มีความเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสหาคะ และแบบจำลองอิกลี การปรับปรุงแบบจำลองใช้ความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดและชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอด้วยค่า RE

บทความของ A. Ekeocha N. Onyebuchi L. Uzoechi และ G. Ononiwu เรื่อง Optimization of Cost-231 Model for 3G Wireless Communication Signal in Suburban Area of Port Harcourt, Nigeria [6] ได้พัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสหะ Cost-231 เพื่อใช้งานในพื้นที่ชนบทของไนจีเรีย โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 900 MHz ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G และความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดและชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอด้วยค่า MAD

บทความของ L. Nissirat M. Ismail และ M.A. Nisirat เรื่อง Macro-Cell Path Loss Prediction, Calibration, and Optimization by Lee's Model for South of Amman City, Jordan at 900 and 1800 MHz [7] ได้พัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสหะ (Lee Model) เพื่อใช้งานในพื้นที่เมืองของจอร์แดน พัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 900 MHz 1,800 MHz และใช้วิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติ RMSE แบบจำลองที่นำเสนอเปรียบเทียบกับค่าสถิติ RMSE กับแบบจำลองฮาดะและแบบจำลองอิกลิ ซึ่งแบบจำลองนี้มีค่า RMSE น้อยที่สุดจึงมีความเหมาะสมในการนำมาพัฒนา และเมื่อผ่านกระบวนการพัฒนาแบบจำลองให้ค่า RMSE ที่น้อยที่สุดเช่นกันเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเดิม ดังนั้นจึงมีความแม่นยำสำหรับการนำมาใช้งานเพราะเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด

บทความของ I. Joseph และ C.C. Konyeha เรื่อง Urban Area Path Loss Propagation Prediction and Optimization Using Hata Model at 800 MHz [8] นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองฮาดะ เปรียบเทียบกับแบบจำลองลี แบบจำลองเอสยูไอ (Stanford University Interim : SU) แบบจำลองฮาดะ Cost-231 และแบบจำลองอิกลิ เพื่อใช้งานในพื้นที่เมืองของไนจีเรีย การเลือกแบบจำลองเพื่อพัฒนาใช้หลักการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงวิถีสหะ (Path Loss Exponent) ที่มีค่าน้อยที่สุด และใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซีดีเอ็มเอความถี่ 800 MHz ในพื้นที่เมืองเบนิน (Benin) การชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอใช้ค่าสถิติ ME RMSE และ SD

บทความของ A. Bhuvaneshwari R. Hemalatha และ T. Satyasavithri เรื่อง Statistical Tuning of The Best Suited Prediction Model for Measurements Made in Hyderabad City of Southern India [9] นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองฮาดะ Cost-231 เพื่อใช้งานในพื้นที่เมือง Hyderabad ของอินเดีย บนพื้นฐานข้อมูลการวัดสัญญาณระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ความถี่ 900 MHz โดยความเหมาะสมที่สุดใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด การเลือกแบบจำลองเพื่อพัฒนาใช้หลักการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงวิถีสหะที่มีค่าน้อยที่สุด การชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอใช้ค่าสถิติ ME RMSE SD และ RE

บทความของ W. Bhupuok และ K. Dejhan เรื่อง A New Method for Prediction 3G Path Loss Propagation in Suburban of Thailand [10] ได้พัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสหะ เพื่อใช้งานในพื้นที่ชนบทของประเทศไทย พัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

3G โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณความถี่ 2100 MHz และใช้วิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติ RMSE และชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่พัฒนาด้วยค่า RMSE ที่มีค่าน้อยที่สุด

รายงาน EBU Tech 3348 ของหน่วยงาน European Broadcasting Union (EBU) เรื่อง Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2 [11] สรุปรายละเอียดพารามิเตอร์การแพร่กระจายคลื่นโทรทัศน์ภาคพื้นดินมาตรฐาน DVB-T2 สำหรับการออกแบบวางแผนโครงข่าย เช่น การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การส่ง ความต้องการสัญญาณต่ำสุดของเครื่องรับ ซึ่งได้แก่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio : C/N) อัตราผิดพลาดมอดูเลต (Modulate Error Rate) และแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในรูปแบบการรับสัญญาณที่แตกต่างกันเช่น การรับสัญญาณแบบอยู่กับที่ (Fixed Rooftop) การรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ (Portable Reception) แบบภายในและภายในอาคาร เป็นต้น

บทความของ I. Eizmendi G. Prieto G. Berjon-Eriz I. Landa และ M. Velez เรื่อง Empirical DVB-T2 Thresholds for Fixed Reception [12] ศึกษาค่าอัตราคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต่ำสุดของการรับสัญญาณ DVB-T2 ในรูปแบบอยู่กับที่ โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณ 33 จุดในพื้นที่เมืองขนาดกลางเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์กับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำพารามิเตอร์การส่งที่เหมาะสมคือค่าอัตราเข้ารหัส (Code Rate) ขนาด FFT (FFT Size) รูปแบบสัญญาณนำร่อง (Pilot Pattern) การหมุนคอนสเทลเลชัน (Rotate Constellation) และช่องสัญญาณแพร่กระจายคลื่น (Propagation Channel) นำเสนอผู้ให้บริการโครงข่ายแพร่กระจายคลื่น (Broadcaster)

บทความของ C. Regueiro U. Gil M. Velez I. Eizmendi และ P. Angueira เรื่อง Field Trials Based Planning Parameters for DVB-T2 Indoor Reception [13] ศึกษาเพื่อหาค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR) ของการรับสัญญาณ DVB-T2 และ T2-Lite ภายในอาคารโดยใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณในพื้นที่เมืองบิลบาโอ (Bilbao) ประเทศสเปน ผลการศึกษานำเสนอแก่ผู้ให้บริการโครงข่ายเพื่อใช้วางแผนพัฒนาโครงข่าย DVB-T2

2.2.2 สรุปวรรณกรรมที่ได้พบทวน

จากบทความงานวิจัยและเอกสารที่ใช้อ้างอิงต่างๆ สามารถสรุปเป็นแนวคิดหลักของวิทยานิพนธ์ คือ

2.2.2.1 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถิให้มีความแม่นยำใช้งานเฉพาะพื้นที่สามารถใช้ข้อมูลความแรงสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวัดสัญญาณในพื้นที่

2.2.2.2 การเลือกแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถิที่มีความเหมาะสม เพื่อนำมาพัฒนาสามารถพิจารณาจากค่าสถิติ RMSE ME SD และ RE ที่มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากค่าที่น้อยที่สุดหมายความว่า ค่าสูญเสียเชิงวิถิที่ได้จากแบบจำลองเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด

2.2.2.3 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึให้มีความแม่นยำ สามารถใช้วิธีความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และสามารถใช่วิธีการปรับเทียบด้วยค่าทางสถิติ

2.2.2.4 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถึที่ได้จากการพัฒนา มีการเปรียบเทียบค่าสถิติชี้วัดประสิทธิภาพกับแบบจำลองเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น

2.2.2.5 การชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึที่ผ่านกระบวนการพัฒนาให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น สามารถใช้ค่าสถิติ RMSE ME SD และ RE ที่มีค่าน้อยที่สุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึให้มีความแม่นยำใช้งานเฉพาะพื้นที่ เพื่อใช้งานสำหรับการออกแบบโครงข่ายแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณที่ออกอากาศแพร่กระจายคลื่นในพื้นที่ การพัฒนาแบบจำลองใช้วิธีความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และวิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติ RMSE การเลือกแบบจำลองเพื่อนำมาพัฒนาและการชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอใช้ค่าสถิติ RMSE ME SD และ RE ที่มีค่าน้อยที่สุด

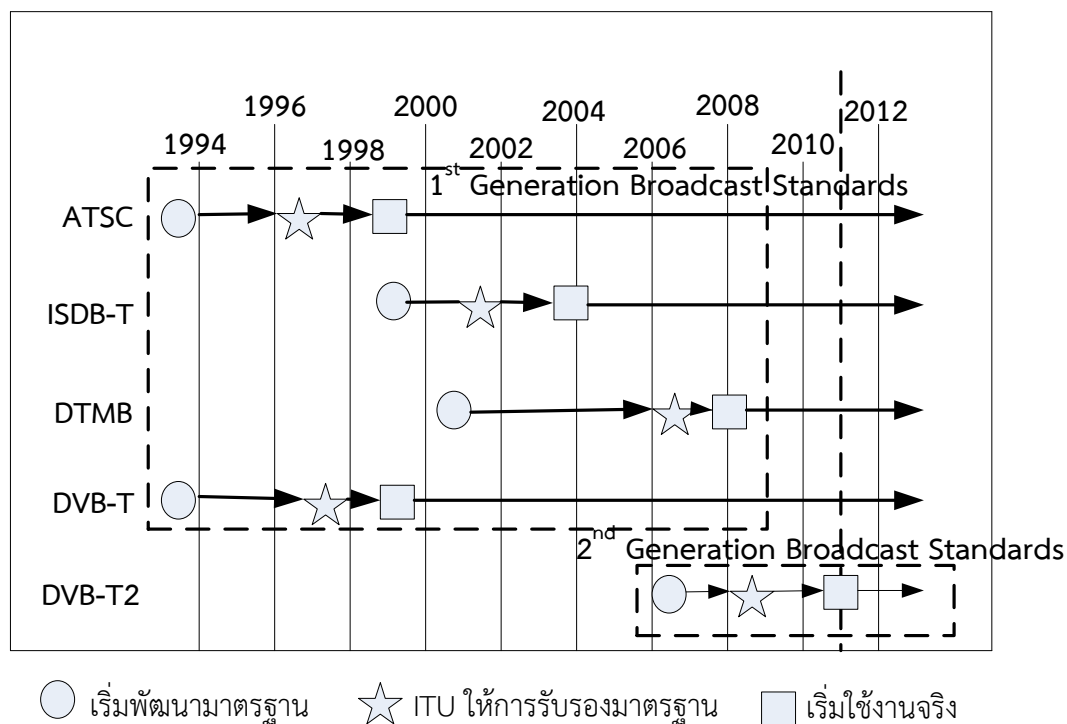
2.3 เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

หลายประเทศทั่วโลกได้เปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินจากระบบแอนะล็อกไปสู่ระบบดิจิทัลเช่น อเมริกา ญี่ปุ่น ประเทศส่วนใหญ่แถบยุโรป และอีกหลายประเทศกำลังอยู่ในช่วงดำเนินการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี ทั้งนี้การกระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมีข้อดี [14] คือ

- สามารถประหยัดทรัพยากรความถี่ของประเทศ เนื่องจากในหนึ่งความถี่สามารถออกอากาศจำนวนช่องรายการได้มากกว่าหนึ่งช่องรายการ
- สามารถรับชมสัญญาณโทรทัศน์ได้ชัดเจนปราศจากสัญญาณรบกวน เนื่องจากการส่งสัญญาณในระบบดิจิทัลมีเทคนิคการเข้ารหัสสำหรับป้องกันและกำจัดสัญญาณรบกวน
- สามารถรับชมสัญญาณโทรทัศน์ภาพและเสียงได้ชัดเจนหรือมีคมชัดเหมือนกันในทุกพื้นที่ของเขตบริการ เนื่องจากความคมชัดของสัญญาณภาพและเสียงไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง
- สามารถส่งช่องรายการโทรทัศน์ที่มีความคมชัดสูงแบบ HD ของภาพและเสียงได้
- สามารถเพิ่มบริการเสริมในการออกอากาศได้ เช่น บริการโทรทัศน์แบบโต้ตอบ การกระจายข้อมูล หรือบริการโทรทัศน์เคลื่อนที่ เป็นต้น

ประเทศไทยกำลังอยู่ในช่วงดำเนินการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินจากระบบแอนะล็อกไปสู่ระบบดิจิทัล โดยเลือกมาตรฐาน DVB-T2 ของยุโรปเป็นมาตรฐานการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศตามข้อตกลงในประเทศภูมิภาคอาเซียน ซึ่งมาตรฐานที่สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union : ITU) ให้

การรับรองมี 5 ระบบ คือ ISDB-T ATSC DTMB DVB-T และ DVB-T2 ช่วงเวลาของการพัฒนา มาตรฐานที่ได้รับการรับรองแสดงดังรูปที่ 2.1



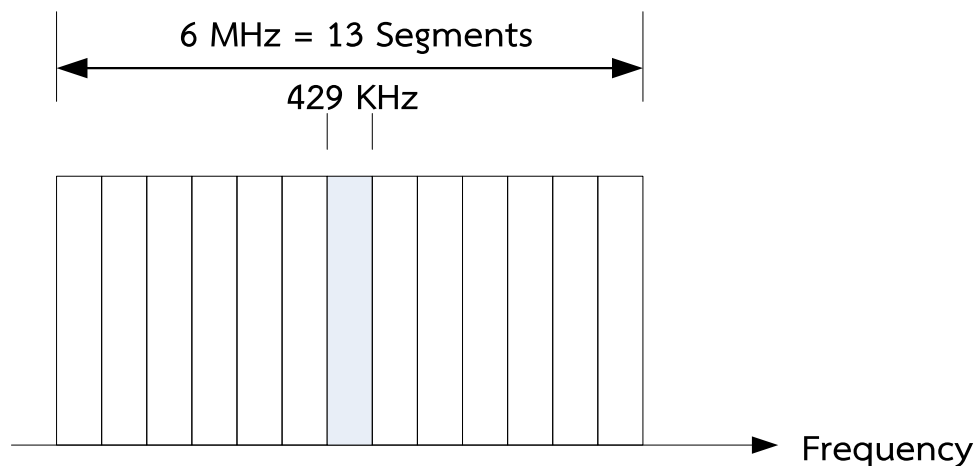
รูปที่ 2.1 มาตรฐานการแพร่ภาพโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล [1]

2.3.1 มาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล

มาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลที่ทั่วโลกยอมรับและ ITU ให้การรับรองมีที่มาจาก 4 แหล่ง [14] คือ

- มาตรฐาน ISDB-T (Integrated Service Digital Broadcasting Terrestrial) พัฒนาโดยสมาคมอุตสาหกรรมวิทยุและธุรกิจ ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) ของประเทศญี่ปุ่น เริ่มต้นใช้งานในปี ค.ศ. 2003 และประเทศบราซิลได้นำไปพัฒนาต่อเนื่องบนโครงสร้างเดิมเป็นมาตรฐาน ISDB-Tb (Integrated Service Digital Broadcasting Terrestrial Brazil) มีการใช้งานในประเทศแถบลาตินอเมริกา ขณะนี้มีการใช้งานมาตรฐาน ISDB-T 19 ประเทศทั่วโลก และในปี ค.ศ. 2013 ARIB ได้พัฒนา ISDB-T เป็นมาตรฐาน ISDB-Tmm สำหรับการส่งโทรทัศน์มัลติมีเดียแบบเคลื่อนที่บนย่านความถี่ VHF (207.5 – 222 MHz) ของย่านทีวีแอนะล็อกเดิม จุดเด่นทางด้านเทคนิคของมาตรฐาน ISDB-T จะมีความยืดหยุ่นในการให้บริการสูง เนื่องจากมีการจัดแบ่งแถบความถี่ (6 MHz) ออกเป็นแถบช่องสัญญาณเล็กๆ จำนวน 14 ช่องสัญญาณหรือเรียกว่าเซกเมนต์ (Segments) เท่ากัน ($6\text{MHz}/14 = 429\text{ KHz}$) มีการใช้งาน 13 เซกเมนต์แสดงดังรูปที่ 2.2 และอีก 1 เซกเมนต์จะใช้เป็นแถบป้องกัน (Guard Band) ระหว่าง

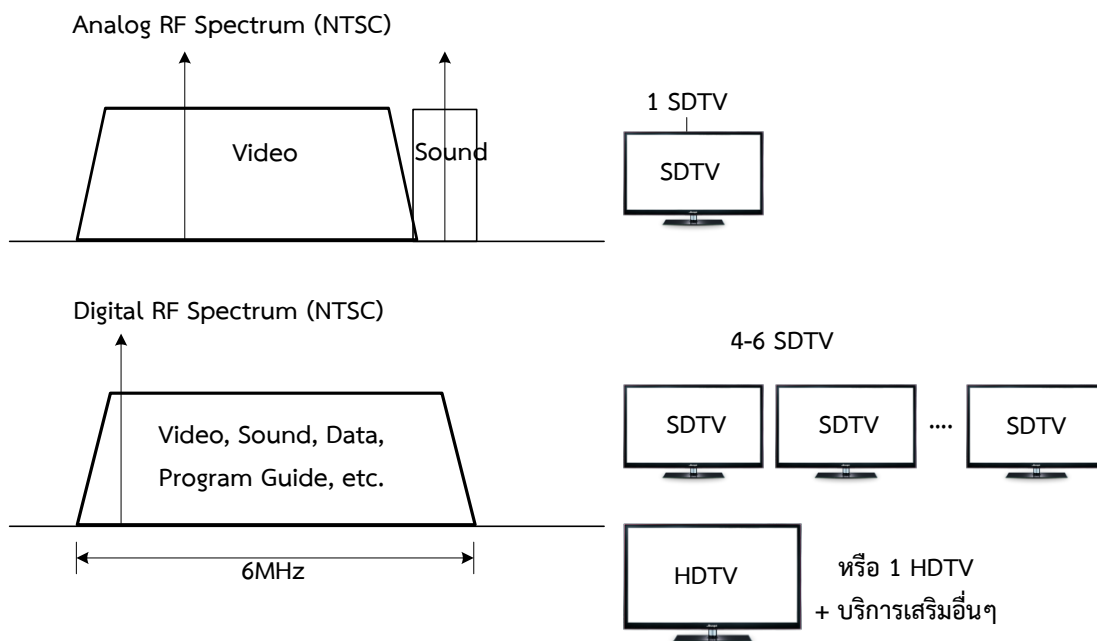
ช่องสัญญาณที่ติดกัน ทำให้สามารถเลือกแถบช่องสัญญาณให้มีความเหมาะสมสำหรับการออกอากาศ แต่ละชนิด ในระบบ ISDB-T จะใช้ความถี่ 1 เซกเมนต์สำหรับการส่งโทรทัศน์แบบพกพา และ 12 เซกเมนต์จะใช้ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ความคมชัดสูง HD ได้ 1 ช่องรายการหรือส่งสัญญาณโทรทัศน์ความคมชัดปกติ SD (Standard Definition) ได้ 3-4 ช่องรายการบนมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณ MPEG-2 ถ้าใช้มาตรฐานการบีบอัดสัญญาณแบบ MPEG-4 ใน 12 เซกเมนต์สามารถส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบ HD ได้ 2 ช่องรายการและส่งสัญญาณแบบ SD ได้ 7-8 ช่องรายการ นอกจากนี้มาตรฐาน ISDB-T สามารถให้บริการแจ้งผังรายการอิเล็กทรอนิกส์ (EPG) บริการกระจายข้อมูล บริการโทรทัศน์แบบโต้ตอบ บริการโทรทัศน์แบบเคลื่อนที่ และข้อดีของการส่งสัญญาณแบบเซกเมนต์บนมาตรฐาน ISDB-T จะมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสูง ทำให้สามารถรับสัญญาณได้ดีในสภาพภูมิประเทศที่หลากหลาย และมาตรฐาน ISDB-T ยังรองรับการใช้งานโครงข่ายความถี่เดียวหรือ SFN (Single Frequency Network)



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมการส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลมาตรฐาน ISDB-T [1]

- มาตรฐาน ATSC (Advanced Television Systems Committee) พัฒนาขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีข้อกำหนดหลักในการพัฒนาเพื่อใช้แทนที่ระบบโทรทัศน์สีแอนะล็อก NTSC 525 เส้น 60 Hz และต้องครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ จำนวนประชากร เทียบเท่ากับการให้บริการโทรทัศน์สี NTSC แบบเดิม และต้องไม่มีการรบกวนกับระบบโทรทัศน์สีแอนะล็อกเดิม เริ่มต้นใช้งานในปี ค.ศ. 1999 จุดเด่นทางด้านเทคนิคมาตรฐาน ATSC ใช้การส่งสัญญาณแบบคลื่นพาห์เดียว 8VSB (8 Vestigial Side Band) ทำให้ป้องกันการรบกวนจากระบบโทรทัศน์สีแอนะล็อก NTSC ได้ดี และในช่องสัญญาณ 6 MHz รองรับการส่งข้อมูลได้ 19.2 Mbps สามารถส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบ HD ได้ 1 ช่องรายการหรือส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบ SD ได้ 4-6 ช่องรายการบนมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณภาพ MPEG-2 และการบีบอัดสัญญาณเสียง Dolby AC-3 ปัจจุบัน

มาตรฐาน ATSC กำลังพัฒนาไปสู่รุ่น ATSC 3.0 เพื่อรองรับการส่งโทรทัศน์แบบเคลื่อนที่และการส่งโทรทัศน์รูปแบบสามมิติ (3D-TV) การใช้งานสเปกตรัมระบบโทรทัศน์สีแอนะล็อก NTSC กับโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล ATSC สามารถเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การใช้สเปกตรัมระบบโทรทัศน์สีแอนะล็อก NTSC กับโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล ATSC [1]

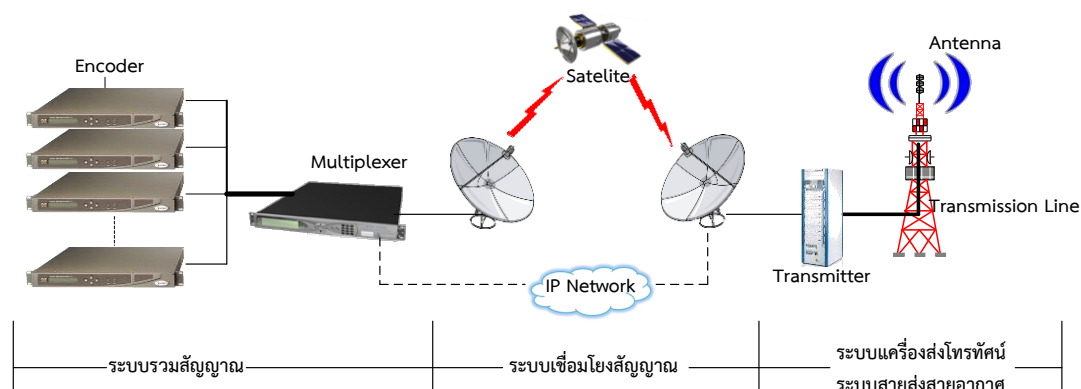
- มาตรฐาน DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting) พัฒนาโดยประเทศจีนซึ่งใช้เวลาพัฒนาถึง 12 ปีและประกาศใช้งานเป็นมาตรฐานของประเทศเมื่อปี ค.ศ. 2006 มีเป้าหมายในการพัฒนาให้เป็นโทรทัศน์ดิจิทัลเพื่อให้บริการภาคพื้นดินแบบรับอยู่กับที่และแบบเคลื่อนที่ มาตรฐาน DTMB พัฒนามาจาก 2 มาตรฐานซึ่งมีระบบที่มีการส่งสัญญาณ 2 รูปแบบคือการส่งแบบคลื่นพาห์เดียว (Single Carrier Modulation) กับการส่งแบบหลายคลื่นพาห์ (Multi Carrier Modulation) โดยการส่งแบบคลื่นพาห์เดียวใช้เทคโนโลยี ADBT-T (Advanced Digital Broadcasting–Terrestrial) พัฒนามาบนพื้นฐานระบบ ATSC โดยมหาวิทยาลัยเจียวทง (Jiaotong University) เมืองเซี่ยงไฮ้ ใช้รูปแบบการส่งสัญญาณคลื่นพาห์เดียว 8VSB สำหรับการส่งแบบหลายคลื่นพาห์ พัฒนามาบนพื้นฐานของมาตรฐาน DVB-T/ISBD-T ใช้รูปแบบการส่งสัญญาณ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) ระบบ DTMB เป็นการเชื่อม 2 เทคโนโลยีเข้าด้วยกันมีผลให้เครื่องรับต้องสามารถรับสัญญาณและถอดรหัสได้ทั้ง 2 รูปแบบ

- มาตรฐาน DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial) เริ่มต้นใช้งานในปี ค.ศ. 1998 พัฒนาโดยกลุ่มประเทศยุโรปโดยองค์กร DVB Project (Digital Video Broadcasting Project) ซึ่งก่อตั้งในปี ค.ศ. 1993 เป็นองค์กรความร่วมมือระหว่างโรงงานผลิตอุปกรณ์ กลุ่มพัฒนา

ซอฟต์แวร์ สถานีโทรทัศน์ หน่วยงานควบคุมต่างๆ กว่า 300 องค์กรและกำกับดูแลมาตรฐานโดย คณะกรรมการร่วมของ ETSI (European Telecommunication Standards Institute) CENELEC (European Committee for Electro technical Standardization) และ EBU (European Broadcasting Union) มาตรฐาน DVB-T มีการส่งสัญญาณแบบหลายคลื่นพาห์ ใช้รูปแบบการส่งสัญญาณ OFDM สามารถเลือกจำนวนคลื่นพาห์ได้ในโหมด 2K และ 8K ซึ่งบนช่องสัญญาณแถบความถี่ 7 และ 8 MHz จะส่งข้อมูลได้สูงสุด 16.59 Mbps สามารถส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบ HD ได้ 1 ช่องรายการหรือส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบ SD ได้ 3-5 ช่องรายการบนมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณภาพและเสียงแบบ MPEG-2 โดยมาตรฐาน DVB-T ได้พัฒนาไปสู่ยุคที่สองเป็นมาตรฐาน DVB-T2

2.3.2 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล

ระบบส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล มีอุปกรณ์หลักประกอบด้วย ระบบรวมสัญญาณ ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ ระบบเครื่องส่งโทรทัศน์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล [15]

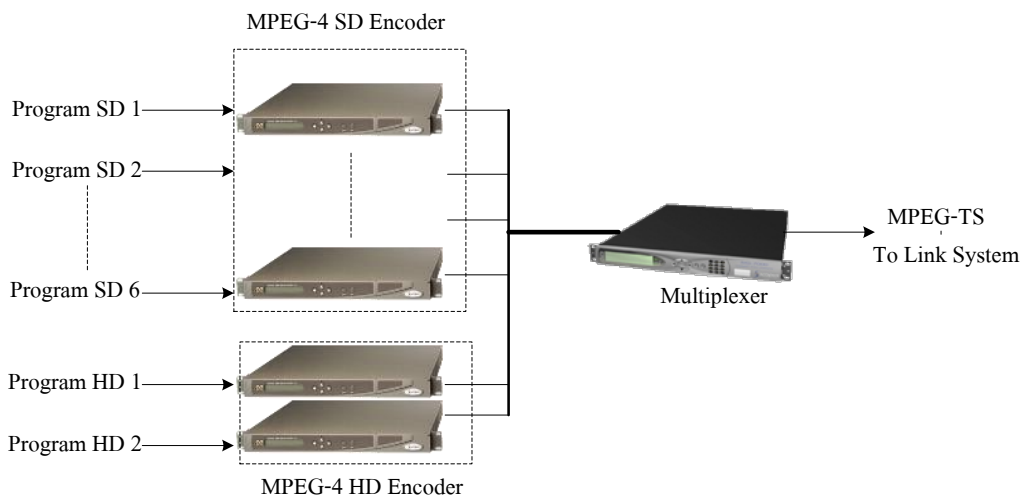
2.3.2.1 ระบบรวมสัญญาณ

ระบบรวมสัญญาณถูกติดตั้งใช้งานที่สำนักงานส่วนกลาง (Office Center) มีรูปแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.5 มีรายละเอียดการใช้งานดังนี้

- อุปกรณ์เข้ารหัส MPEG-4 แบบ SD ทำหน้าที่รับสัญญาณช่องรายการโทรทัศน์ความละเอียดปกติ (SD) จากผู้ประกอบการช่องรายการโทรทัศน์และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณ MPEG-4 ป้อนเข้าสู่อุปกรณ์รวมสัญญาณรวมสัญญาณ (Multiplexer)

- อุปกรณ์เข้ารหัส MPEG-4 แบบ HD ทำหน้าที่รับสัญญาณช่องรายการโทรทัศน์ความละเอียดสูง (HD) จากผู้ประกอบการช่องรายการโทรทัศน์ และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณ MPEG-4 ป้อนเข้าสู่อุปกรณ์รวมสัญญาณรวมสัญญาณ

- อุปกรณ์รวมสัญญาณ (Multiplexer) ทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์เข้ารหัส MPEG-4 แบบ SD และ MPEG-4 แบบ HD และทำหน้าที่รวมสัญญาณทั้งหมดให้เป็นสัญญาณเดียวกันเรียกว่า MPEG-TS (MPEG - Transport Stream) ป้อนเข้าสู่ระบบเชื่อมโยงสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณไปยังสถานีโครงข่าย



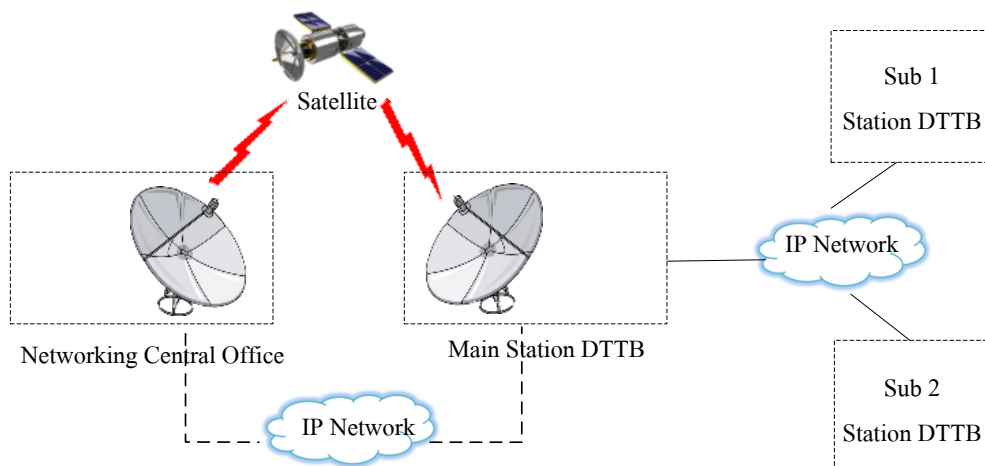
รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบรวมสัญญาณ [15]

2.3.2.2 ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ

เทคโนโลยีระบบเชื่อมโยงสัญญาณในยุคปัจจุบันที่นิยมใช้งานส่งผ่านสัญญาณมี 2 รูปแบบ ได้แก่ การส่งผ่านช่องสัญญาณดาวเทียมและระบบอินเทอร์เน็ต หรือเรียกว่า ระบบ IP (Internet Protocol) มีรูปแบบการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2.6 มีรายละเอียดดังนี้

- การส่งผ่านช่องสัญญาณระบบดาวเทียม ด้านส่งซึ่งเป็นต้นทางติดตั้งที่สำนักงานส่วนกลางประกอบด้วยอุปกรณ์ ระบบแปลงสัญญาณส่ง หรือเรียกว่าระบบ Up Link ด้านรับปลายทางจะต้องมีจานรับสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม หรือเรียกว่า IRD (Integrated Receiver Digital) ใช้งาน

- การส่งสัญญาณผ่านระบบ IP เป็นลักษณะการเช่าใช้งานเครือข่าย จากผู้ให้บริการสำหรับในประเทศไทยเช่น บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) หรือ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน)

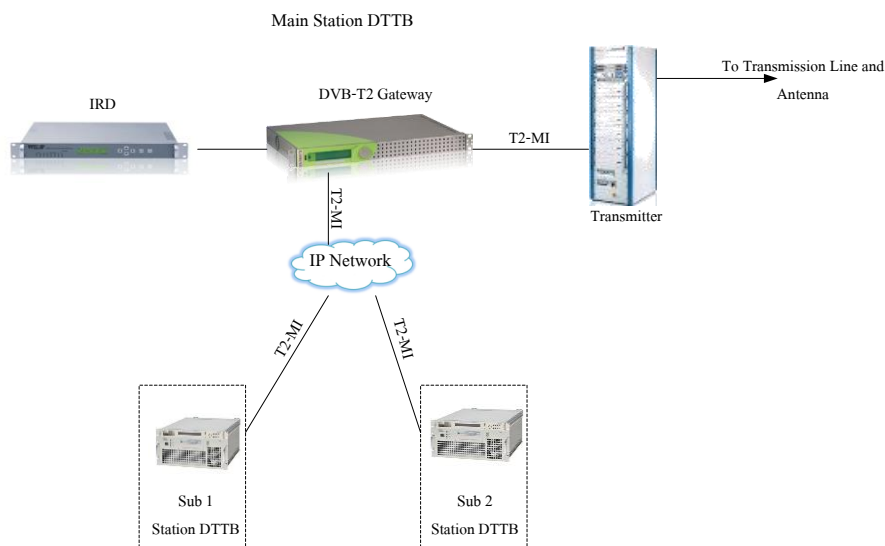


รูปที่ 2.6 ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ [15]

2.3.2.3 ระบบเครื่องส่งโทรทัศน์

ระบบเครื่องส่งโทรทัศน์ติดตั้งใช้งานที่สถานีโครงข่ายทั่วประเทศ มีรูปแบบการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2.7 มีรายละเอียดอุปกรณ์ดังนี้

- อุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม หรือเรียกว่า IRD ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้รับจากสัญญาณดาวเทียมให้กลับเป็นสัญญาณ MPEG-TS ป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ DVB-T2 Gateway
- อุปกรณ์ DVB-T2 Gateway ทำหน้าที่รับสัญญาณ MPEG-TS จากอุปกรณ์ IRD แปลงเป็นสัญญาณ T2-MI ซึ่งเป็นสัญญาณสำหรับโครงข่ายแบบความถี่เดียว ป้อนเข้าสู่เครื่องส่งโทรทัศน์ของสถานีหลักและส่งสัญญาณ T2-MI ไปยังสถานีเสริม เพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องส่งโทรทัศน์ของสถานีเสริมด้วย
- เครื่องส่งโทรทัศน์ ทำหน้าที่รับสัญญาณ T2-MI จากอุปกรณ์ DVB-T2 Gateway และแปลงให้เป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังส่งสูง ส่งผ่านไปยังสายส่งสายอากาศ แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่ครอบคลุม



รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อระบบเครื่องส่งโทรทัศน์ที่สถานีโครงข่าย [15]

2.4 มาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล DVB-T2

มาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล DVB-T2 เป็นยุคที่สองของมาตรฐาน DVB-T ได้รับการรับรองมาตรฐานจาก ITU เมื่อปี ค.ศ. 2009 และมีการนำมาใช้งานจริงในปี ค.ศ. 2011 การพัฒนามาตรฐาน DVB-T2 ใช้เงื่อนไขความต้องการเชิงพาณิชย์เป็นข้อกำหนดในการออกแบบระบบ และให้ดีกว่ามาตรฐาน DVB-T ขณะนี้มีมากกว่า 40 ประเทศที่ใช้งานมาตรฐาน DVB-T2 [16] โดยเฉพาะประเทศแถบยุโรปที่ใช้งาน DVB-T เดิมได้วางแผนปรับเปลี่ยนไปสู่มาตรฐานใหม่ ซึ่งจุดเด่นของ DVB-T2 ที่ DVB นำเสนอคือ มีความทนทานต่อการรับสัญญาณสูง มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และประสิทธิภาพการใช้งานสเปกตรัมสูงมากกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลอื่น มาตรฐาน DVB-T2 สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลสูงมากกว่า 40 Mbps ทำให้รองรับการให้บริการโทรทัศน์แบบ SD HD UHD บริการโทรทัศน์แบบเคลื่อนที่ วิทยุ เป็นต้น และให้พื้นที่ครอบคลุมที่กว้างเนื่องจากสามารถใช้งานโครงข่ายความถี่เดียว โดยความสามารถที่เพิ่มขึ้นของ DVB-T2 ด้วยการขยายพารามิเตอร์จาก DVB-T ตามตารางที่ 2.1 และเปรียบเทียบได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์มาตรฐาน DVB-T กับ DVB-T2 [16]

	DVB-T	DVB-T2
FEC	Convolution Coding +Reed Solomon 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC+BCH 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Modes	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

	DVB-T	DVB-T2
Guard Interval	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128
FFT Size	2K, 8K	1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K
Scattered Pilots	8% of total	1%, 2%, 4%, 8% of total
Continual Pilots	2.0% of total	0.4% - 2.4% (0.4%-0.8% in 8K - 32K)
Bandwidth	6, 7, 8 MHz	1.7, 5, 6, 7, 8, 10 MHz
Typical data rate (UK)	24 Mbps	40 Mbps
Max. data rate (20 dB C/N)	31.7 Mbps (using 8 MHz)	455 Mbps (using 8 MHz)
Required C/N Ratio (24 Mbps)	16.7 dB	10.8 dB

- เพิ่มพารามิเตอร์ FEC (Forward Error Correction) และขยายพารามิเตอร์คอนสเทเลชัน (256QAM) ทำให้อัตราขยายความจุเพิ่มขึ้น 25-30%

- เพิ่มรูปแบบมอดูเลชัน (Modulation) คือ 256QAM
- เพิ่มจำนวนคลื่นพาห์ OFDM ขยายจาก 8k ถึง 32k
- เพิ่มสัดส่วนของแถบป้องกัน (Guard Interval) ใหม่คือ 19/128, 19/256, 1/128
- สามารถปรับแบบแผนนำร่อง Scattered (Scattered Pilots) ให้เหมาะสมกับแถบป้องกัน ทำให้เฟรมโอเวอร์เฮด (Overhead Frame) ลดลง 10%

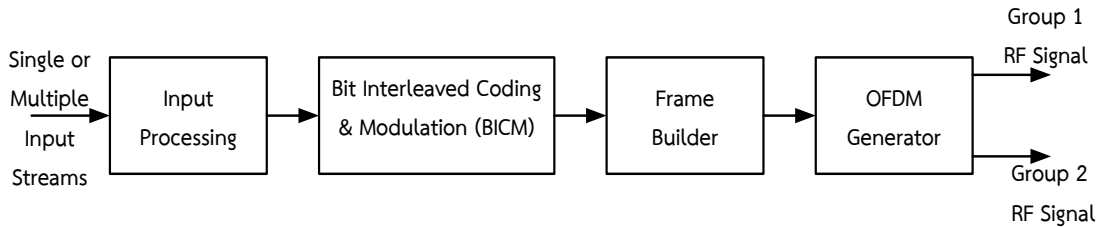
- เพิ่มการใช้งานแถบความถี่ 1.7 5 และ 10 MHz

- ขยายเทคนิคการสลับ (Interleaving) บิต (Bit) เซลล์ (Cell) เวลา (Time) และ ความถี่ (Frequency)

การขยายพารามิเตอร์ขนาด FFT ทำให้ DVB-T2 สามารถเพิ่มความจุได้มากกว่า DVB-T 50% ซึ่งความจุเพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีความทนทานต่อการรบกวนจากสัญญาณหลายเส้นทาง (Multi Path) และการแทรกสอดแบบอิมพัลซีฟ (Impulsive Interference) มากกว่า DVB-T เพราะใช้วิธีเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบ LDPC (Low Density Parity Check) ร่วมกับแบบ BCH (Bose–Chaudhuri–Hocquenghem) และขยายพารามิเตอร์ FEC

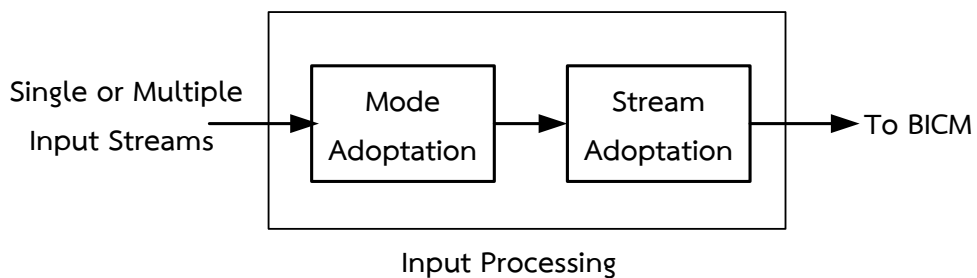
2.4.1 โครงสร้างมาตรฐาน DVB-T2

โครงสร้างมาตรฐาน DVB-T2 ที่ระบุตามมาตรฐาน ETSI 302 755 V1.3.1[17] มีบล็อกไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 2.8

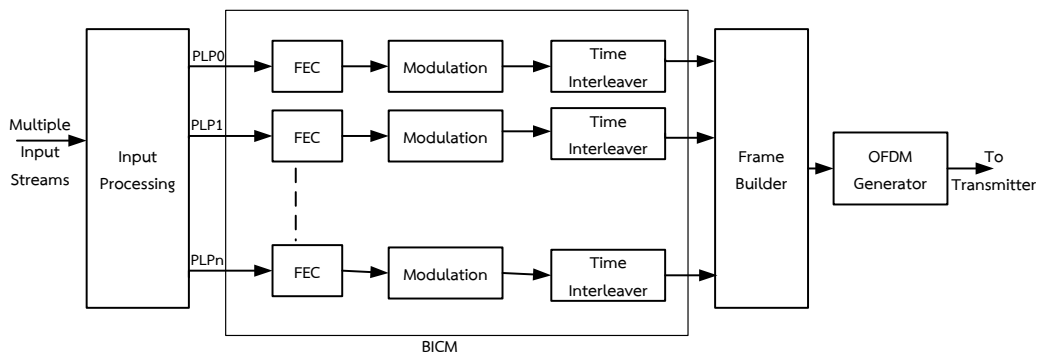


รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของ DVB-T2 [17]

2.4.1.1 ส่วนประมวลผลอินพุท (Input Processing) เป็นส่วนที่กำหนดโหมดการทำงานของมาตรฐาน DVB-T2 ซึ่งการทำงานประกอบด้วย 2 โหมด คือโหมด A ทำงานรูปแบบเดียว PLP (Single Physical Layer Pipe) และโหมด B ทำงานรูปแบบหลาย PLP (Multiple PLP) โครงสร้างภายในของส่วนประมวลผลอินพุทแสดงดังรูปที่ 2.9



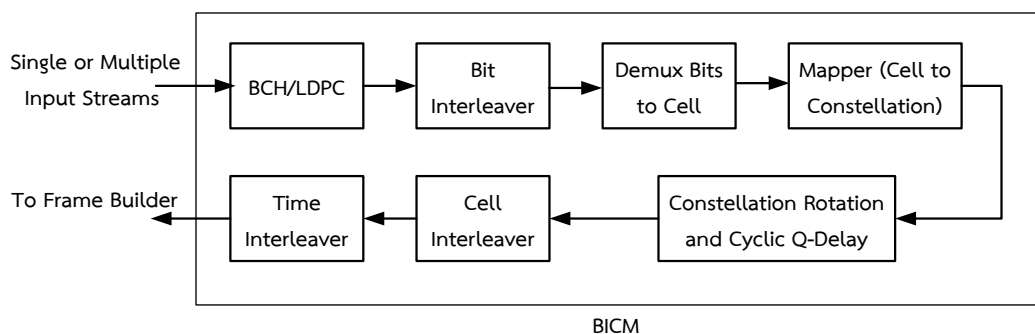
รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมส่วนประมวลผลอินพุท [17]



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมการทำงานโหมด B แบบหลาย PLP [17]

โดยการทำงานของ Single PLP โปรแกรมที่ออกอากาศในช่องสัญญาณเช่น HD, SD หรือวิทยุ จะถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ออกอากาศในส่วน BICM (Bit Interleaved Coding & Modulation) มีค่าเดียวกัน แต่ในรูปแบบการทำงานของ Multiple PLP จะสามารถกำหนดพารามิเตอร์ให้กับแต่ละรูปแบบโปรแกรมที่ออกอากาศ ซึ่งค่ากำหนดเลือกได้คือ มอดูเลชัน FEC การสลับและอัตราการส่งบิต (Bit Rate) ทั้งนี้การทำงานโหมด B ทำให้ DVB-T2 มีความยืดหยุ่นการให้บริการสูง มีบล็อกไดอะแกรมการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.10

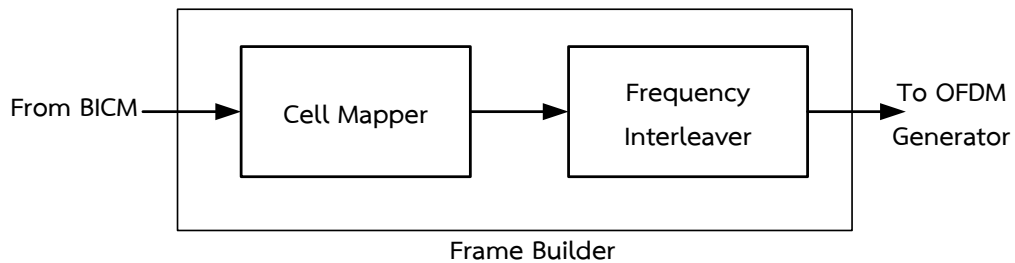
2.4.1.2 ส่วน BICM (Bit Interleaved Coding & Modulation) ประกอบด้วยกระบวนการสลับ (Interleaving) การเข้ารหัส (Coding) และมอดูเลชัน (Modulation) โดยเฟรม BB (Baseband Frames) จาก PLP จะถูกป้อนเพื่อเข้ารหัสส่วนนอก (Outer Code) แบบ BCH และเข้ารหัสส่วนใน (Inner Code) แบบ LDPC และสามารถเลือกสัดส่วนการเข้ารหัส FEC ได้ 6 ระดับคือ $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$ และ $5/6$ ทั้งนี้เมื่อผ่านการเข้ารหัสช่องสัญญาณจะได้รับเฟรม FEC และผ่านเข้าสู่กระบวนการสลับระดับบิต และผ่านไปสู่ขั้นตอนการจัด (Mapper) เข้าสู่คอนสเทลเลชัน โดยจัดเฟรม FEC เป็นกลุ่มเซลล์ (Cell) เพื่อใช้อ้างอิงเข้าสู่คอนสเทลเลชัน และอ้างอิงสำหรับเทคนิคการหมุนคอนสเทลเลชัน โดยคอนสเทลเลชันสามารถเลือกรูปแบบมอดูเลชัน คือ QPSK, 16QAM, 64QAM และ 256QAM มาตรฐาน DVB-T2 ได้เพิ่มเทคนิคการสลับเซลล์ (Cell Interleaving) และการสลับทางเวลา (Time Interleaving) เข้ามาทำให้มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนรอบเปอร์ (Dropper) ได้สูง โดยบล็อกไดอะแกรมส่วน BICM แสดงดังรูปที่ 2.11



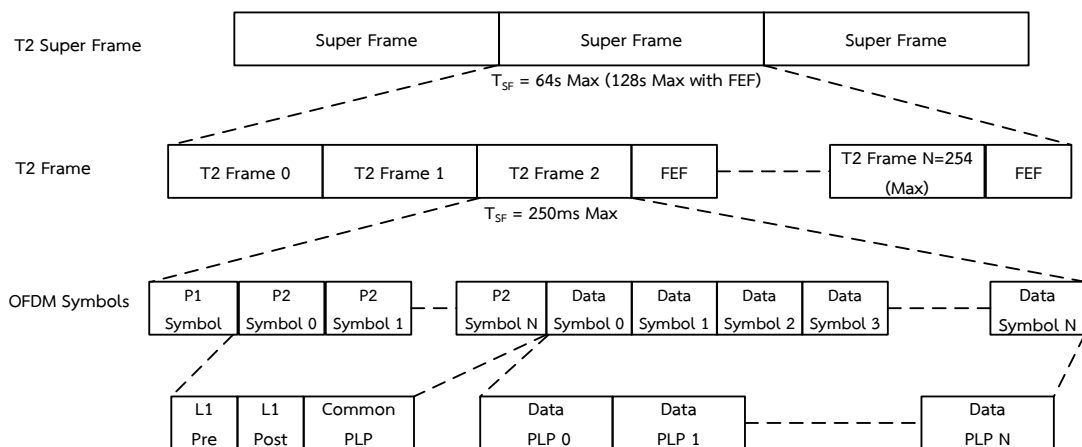
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมส่วน Bit Interleave Coding and Modulation [17]

2.4.1.3 ส่วนสร้างเฟรม (Frame Builder) ทำหน้าที่จัดกลุ่มข้อมูลจาก PLPs เข้าตำแหน่งเซลล์เพื่อสร้างสัญลักษณ์ OFDM (OFDM Symbols) บรรจุในเฟรม T2 (T2-Frame) โดยเฟรม T2 ประกอบด้วยเฟรม P1 จำนวนหนึ่งเฟรมใช้เป็นสัญญาณซิงโครไนเซชัน (Synchronization) และสัญญาณเครื่องหมาย (Signaling) เฟรม P2 เท่ากับจำนวนข้อมูลสัญลักษณ์ (Data Symbols) ใช้งานเป็นสัญญาณเครื่องหมาย โดยเฟรม T2 มีความยาวสูงสุดเท่ากับ 250 ms และจำนวนเฟรม T2

หลายๆ เฟรมรวมกับส่วนเสริมเฟรม FEF (Future Extension Frames) เรียกว่าเฟรม T2-Super (T2-Super Frame) มีความยาวสูงสุด 64s ทั้งนี้เฟรม FEF จะใช้สำหรับการส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบพกพาเรียกว่า T2-Lite โดยบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างเฟรมแสดงดังรูปที่ 2.12



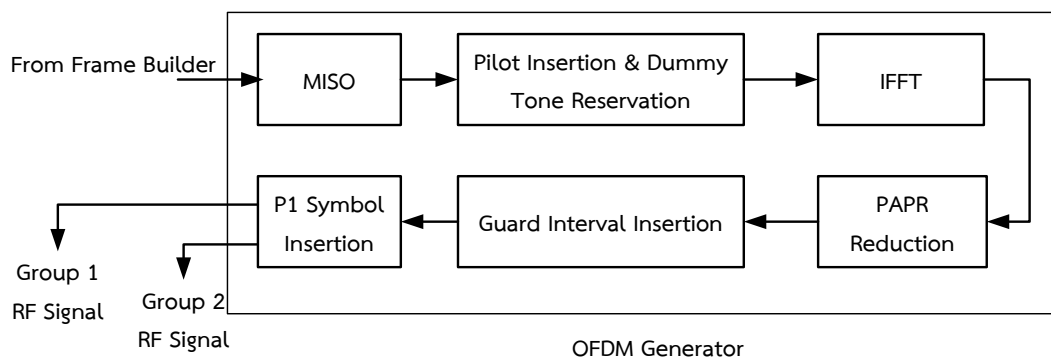
รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างเฟรม [17]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างเฟรมข้อมูลของ DVB-T2 [17]

2.4.1.4 ส่วนกำเนิด OFDM (OFDM Generator) ใช้กลุ่มข้อมูลสัญลักษณ์ OFDM ที่จัดอยู่ในเซลล์จากส่วนสร้างเฟรม ป้อนเข้าสู่การประมวลผลแบบ MISO (Multi Input Single Output) ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) และผ่านเข้าสู่กระบวนการแทรกสัญญาณนำร่อง โดยสัญญาณนำร่องมี 2 แบบคือ แบบ Scatter (Scatter Pilot) และแบบ Continual (Continual Pilot) ซึ่งจำนวนสัญญาณนำร่องที่แทรกในกลุ่มข้อมูลจะขึ้นอยู่กับการกำหนดฟังก์ชันใช้งานมีจำนวน 8 รูปแบบคือ PP1, PP2, PP3, PP4, PP5, PP6, PP7, PP8 จากนั้นกลุ่มข้อมูลที่ผ่านกระบวนการแทรกสัญญาณนำร่องจะส่งผ่านเข้าสู่ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) ซึ่งเป็นกระบวนการแปลงสัญญาณจากโดเมนความถี่ไปสู่โดเมนเวลา (Time Domain) ทั้งนี้การส่งสัญญาณแบบ OFDM จะเกิดปัญหาการกวัดแกว่งของกรอบคลื่น (Envelope) ดังนั้นเมื่อสัญญาณผ่านกระบวนการลดทอน

PAPR (Peak Average Power Ratio Reduction) โดย DVB-T2 ใช้เทคนิค ACE (Active Constellation Extension) และ TR (Tone Reservation) จะช่วยลดการกวัดแกว่งของกรอบคลื่น ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของแถบความถี่เพิ่มขึ้นและความจุของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นด้วย สัญญาณที่ผ่านการลดทอน PAPR จะถูกแทรกแถบป้องกัน (Guard Interval Insertion) และแทรกสัญลักษณ์ P1 ทั้งนี้ส่วนกำเนิด OFDM สามารถกำหนดฟังก์ชันใช้งานจำนวนคลื่นพาห์ขนาด FFT คือ 1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K โดย 1K, 32K จะรองรับการใช้งาน T2-Lite และสามารถกำหนดแถบความถี่ป้องกันได้คือ 1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128 และ 1/4 โดยบล็อกไดอะแกรมส่วนกำเนิด OFDM แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมส่วนกำเนิดของ OFDM [17]

2.4.2 ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2

2.4.2.1 อัตราบิตสูงสุด การตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบมาตรฐาน DVB-T2 จะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ซึ่งได้แก่ค่าขนาด FFT คอนสเทลเลชัน FEC แถบป้องกัน (Guard Interval : GI) และการใช้งานความกว้างของแบนด์วิธ (BW) ตัวอย่างตารางที่ 2.2 แสดงอัตราบิตสูงสุดที่มาตรฐาน DVB-T2 สามารถส่งสัญญาณแพร่กระจายคลื่นไปได้บนการใช้งานแบนด์วิธ 8 MHz [11]

ตารางที่ 2.2 อัตราบิตสูงสุดที่ BW 8 MHz FFT Size 32K GI 1/128 PP7 [11]

Modulation	Code Rate	Bitrate (Mbps)
QPSK	1/2	7.49255
	3/5	9.03747
	2/3	10.01867

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Modulation	Code Rate	Bitrate (Mbps)
	3/4	11.27054
	4/5	12.02614
	5/6	12.53733
16-QAM	1/2	15.03743
	3/5	18.07038
	2/3	20.10732
	3/4	22.61980
	4/5	24.13628
	5/6	25.16224
64-QAM	1/2	22.51994
	3/5	27.06206
	2/3	30.11257
	3/4	33.87524
	4/5	36.16430
	5/6	37.68277
256-QAM	1/2	30.08728
	3/5	36.15568
	2/3	40.23124
	3/4	45.25828
	4/5	48.29248
	5/6	50.34524

2.4.2.2 โหมดการรับสัญญาณของเครื่องรับ DVB-T2

การรับสัญญาณจะพิจารณาค่าต่ำสุดของระดับสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้ โดยใช้ค่าคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (C/N) เป็นค่าอ้างอิงสำหรับโหมดรับสัญญาณ ซึ่งค่าคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนจะสัมพันธ์กับค่าความแรงสนามไฟฟ้า ทั้งนี้ค่าคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต่ำสุดที่เครื่องรับสามารถรับได้จะขึ้นกับการตั้งค่าพารามิเตอร์ส่ง โดยค่าอ้างอิงแสดงได้ตามตารางที่ 2.3 ค่าคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต่ำสุดของโหมดรับสัญญาณบนแบนด์วิท 8 MHz [11] ในย่านความถี่

UHF แบนด์ III (200 MHz) IV V (650 MHz) ตารางที่ 2.3 สามารถใช้อ้างอิงในการวางแผนออกแบบโครงข่าย

ตารางที่ 2.3 โหมดรับสัญญาณกับการเปลี่ยนแปลงคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต่ำสุด [12]

โหมดรับสัญญาณ	พารามิเตอร์ส่ง	C/N (dB)	Data Rate (Mbps)
Fixed Reception	256-QAM, FEC 2/3, FFT 32K, PP7	18.9	40.2
Portable Outdoor Reception (Urban Class A)	64-QAM, FEC 2/3, FFT 32K, PP3	17.1	27.7
Portable Indoor Reception (Urban Class B)	64-QAM, FEC 2/3, FFT 16K, PP3	17.1	26.2
Mobile Reception (Rural)	16-QAM, FEC 1/2, FFT 8K, PP2	9.4	11.2
Handheld Portable Outdoor Reception (Class H-A)	16-QAM, FEC 2/3, FFT 16K, PP3	12.3	13.1
Handheld Mobile Reception (Class H-D)	16-QAM, FEC 1/2, FFT 8K, PP3	9.0	12.1

2.5 การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศไทย

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือเรียกว่า สำนักงาน กสทช ได้ดำเนินการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของประเทศไทยจากระบบแอนะล็อกไปสู่ระบบดิจิทัล โดยเลือกมาตรฐานยุคที่สอง DVB-T2 เป็นมาตรฐานการแพร่กระจายคลื่นโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศไทย กำหนดใช้งานความถี่วิทยุย่าน UHF ช่วงความถี่ 510-790 MHz มีแบนด์วิท 8 MHz ทั้งนี้สำนักงาน กสทช. ได้กำหนดแผนการเปลี่ยนผ่าน แผนความถี่วิทยุ เงื่อนไขการใช้งาน ฯลฯ และประเด็นที่สำคัญเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นสรุปได้ดังนี้ [2]

- กำหนดใช้งานความถี่วิทยุย่าน UHF ช่วงความถี่ 510-790 MHz มีแบนด์วิท 8 MHz สามารถจัดช่องความถี่ใช้งานได้จำนวน 35 ช่องสัญญาณตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ช่องความถี่สำหรับการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลของประเทศไทย [2]

หมายเลขช่อง ความถี่วิทยุ	ความถี่วิทยุ (MHz)		ความถี่กึ่งกลาง Center Frequency
	ขอบล่าง	ขอบบน	
26	510	518	514
27	518	526	522
28	526	534	530
29	534	542	538
30	542	550	546
31	550	558	554
32	558	566	562
33	566	574	570
34	574	582	578
35	582	590	586
36	590	598	594
37	598	606	602
38	606	614	610
39	614	622	618
40	622	630	626
41	630	638	634
42	638	646	642
43	646	654	650
44	654	662	658
45	662	670	666
46	670	678	674
47	678	686	682
48	686	694	690
49	694	702	698
50	702	710	706
51	710	718	714
52	718	726	722
53	726	734	730
54	734	742	738
55	742	750	746
56	750	758	754

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

หมายเลขช่อง ความถี่วิทยุ	ความถี่วิทยุ (MHz)		ความถี่กึ่งกลาง Center Frequency
	ขอบล่าง	ขอบบน	
57	758	766	762
58	766	774	770
59	774	782	778
60	782	790	786

- ให้ใบอนุญาตแก่ผู้ให้บริการโครงข่าย (Network Operator) รวม 4 รายจำนวน 5 โครงข่ายได้แก่ บริษัท อสมท จำกัด (มหาชน) จำนวน 1 โครงข่าย, สถานีโทรทัศน์กองทัพบกช่อง 5 จำนวน 2 โครงข่าย กรมประชาสัมพันธ์ จำนวน 1 โครงข่าย และสถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จำนวน 1 โครงข่าย

- ให้ใบอนุญาตแก่ผู้ให้บริการช่องรายการธุรกิจ (Service Provider) จำนวน 24 ช่องรายการ

- กำหนดให้หนึ่งโครงข่ายออกอากาศโปรแกรม 6SD (Standard Definition) และ 2HD (High Definition) โดยจำนวนช่องรายการในแต่ละโครงข่ายแสดงดังรูปที่ 2.15

- กำหนดพารามิเตอร์หลักของระบบสำหรับการรับสัญญาณแบบอยู่กับที่ (Fixed Reception) และแบบเคลื่อนที่ในอาคาร (Portable Indoor Reception) และอัตราบิต (Bitrate) สำหรับการส่งออกอากาศให้กับผู้ให้บริการโครงข่าย (Network Operator) ในการใช้งานส่งสัญญาณตามตารางที่ 2.5

- กำหนดเขตบริการในประเทศไทย ประกอบด้วย การติดตั้งสถานีหลัก 39 สถานี และ 132 สถานีเสริมและอาจมีการเพิ่มเติมสถานีเสริมภายหลังเพื่อแก้ปัญหการรับสัญญาณ หรือเพื่อปรับปรุงการรับสัญญาณแบบพกพาภายในอาคาร

Mux #1	Mux #2	Mux #3	Mux #4	Mux #5
SD	True (24)	SD	SD	MONO29 (29)
SD	Workpoint TV (23)	SD	3 SD (28)	NOW (26)
SD	TNN24 (26)	SD	CH8 (27)	GMM (25)
SD	CH7 HD (35)	Voice TV (21)	THV (17)	Nation TV (22)
SD	One HD (31)	Spring News (19)	LOCA (15)	Bright TV (20)
HD		MCOT Kids (14)	3 Family (13)	New TV (18)
NBT (2)	TV5 (1)	Thairath TV (32)	3 HD (33)	PPTV HD (36)
		MCOT HD (30)	TPBS (3)	Amarin TV (34)
Total = 6SD+2HD	Total = 3SD+3HD	Total = 6SD+2HD	Total = 6SD+2HD	Total = 6SD+2HD

รูปที่ 2.15 จำนวนช่องรายการของการให้บริการโครงข่าย [18]

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบ DVB-T2 และอัตราบิต [2]

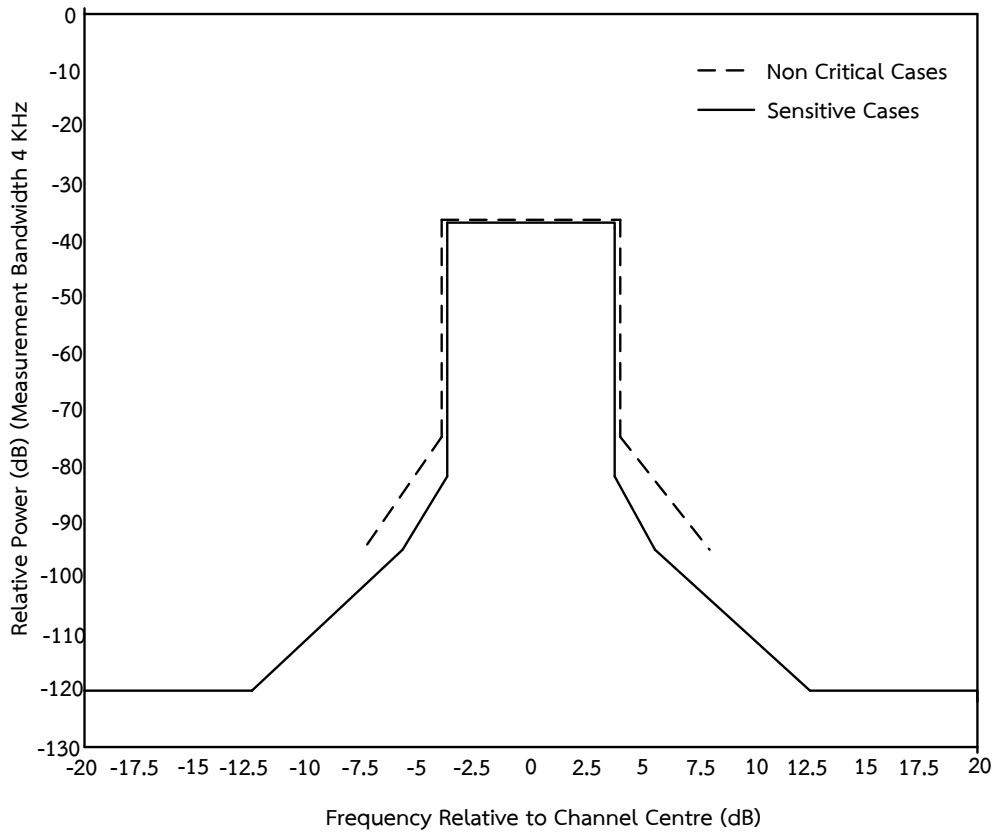
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
FFT Size	16k Extended
Guard Interval Fraction	19/128
Modulation	64-QAM
Code Rate	3/5
Pilot Pattern	PP2 or PP3
L1 Post Scrambling	Non
Future Extension Frame : FEF	Non
ผลที่ได้จากการกำหนดพารามิเตอร์	
Maximum Bitrate	21.93 Mbit/s
Distance of SFN	79.8 Km

- กำหนดที่ตั้งสถานี ความสูงของสายอากาศส่งและกำลังส่งออกอากาศสูงสุดของเครื่องส่งตามตารางที่ 6 และ 7 ใน [2]

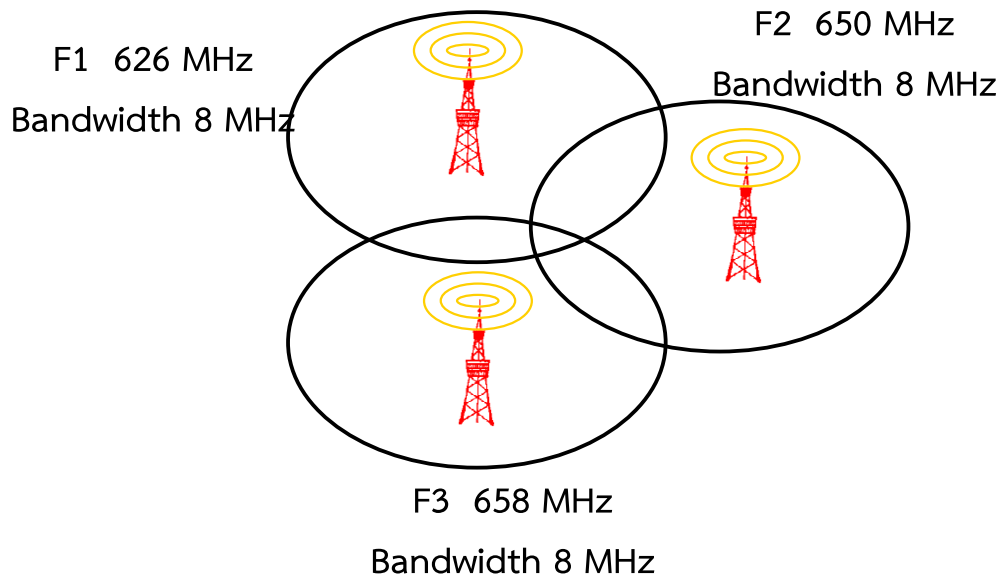
- กำหนดอัตราส่วนคลื่นพหุต่อสัญญาณรบกวน (Required Carrier to Noise Ratio : C/N), ค่าความแรงสนามไฟฟ้าสมมูลต่ำสุดที่ต้องการ (Minimum Median Equivalent Field Strength) และอัตราส่วนป้องกันการรบกวน (Protection Ratio : PR) ตามข้อเสนอแนะของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ ITU ที่ Recommendation ITU-R BT.2033: Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands [19]

- กำหนดหน้ากากระเบิดของการแพร่กระจายคลื่น (Spectrum Mask) อ้างอิงตามตามข้อเสนอแนะของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ ITU ที่ ITU-R BT.1206 Spectrum limit masks for digital terrestrial television broadcasting [19] ดังรูปที่ 2.16 และตารางที่ 2.6 แสดงตำแหน่งบนกรอบการแพร่กระจายคลื่น

- กำหนดการวางโครงข่ายของสถานีหลักใช้รูปแบบหลายความถี่ (Multi Frequency Network : MFN) และสถานีเสริมภายในเขตบริการของสถานีหลักใช้รูปแบบความถี่เดียว (SFN) แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.17 (a) และ (b)

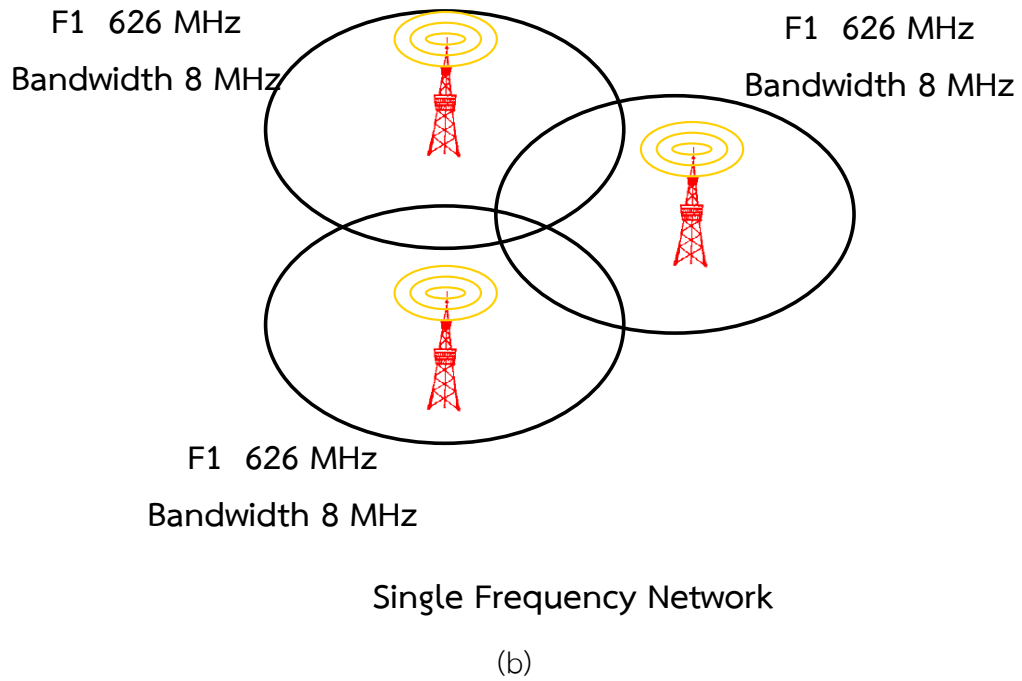


รูปที่ 2.16 หน้ากากสเปคตรัม (Spectrum Mask) สำหรับ DVB-T2 [2]



Multi Frequency Network

(a)



รูปที่ 2.17 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลที่ใช้ในปัจจุบัน (a) รูปแบบการวางโครงข่ายแบบหลายความถี่ (b) รูปแบบการวางโครงข่ายแบบความถี่เดียว [18]

ตารางที่ 2.6 ระดับความสัมพันธ์ต่าง ๆ สำหรับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ [2]

ความห่างจากความถี่ กึ่งกลาง (MHz)	กรณี Non Critical Relative Level (dB)	กรณี Sensitive Relative Level (dB)
-20	-110	-120
-12	-110	-120
-6	-85	-95
-4.2	-73	-83
-3.9	-32.8	-32.8
+3.9	-32.8	-32.8
+4.2	-73	-83
+6	-85	-95
+12	-110	-120
+20	-110	-120

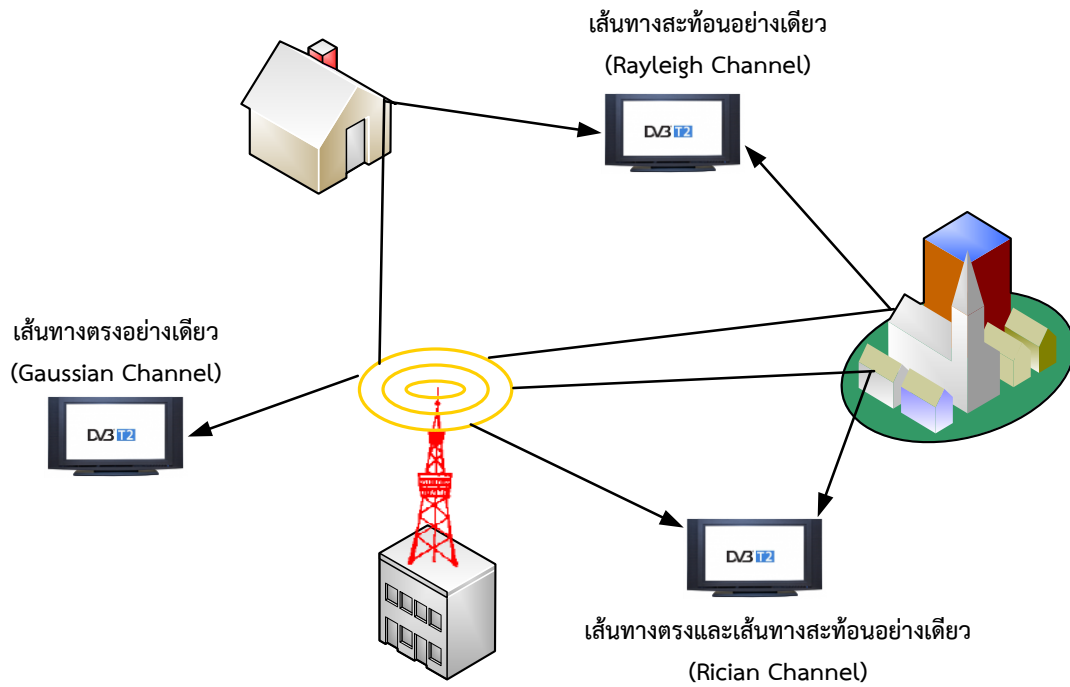
2.6 การวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

การแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลจะแตกต่างกับระบบแอนะล็อกคือโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสามารถรับชมสัญญาณโทรทัศน์ภาพและเสียงได้ชัดเจน หรือมีคมชัดเหมือนกันในทุกพื้นที่ของเขตบริการ เนื่องจากความคมชัดของสัญญาณภาพและเสียงไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิคของการส่งระบบดิจิทัลที่ใช้การเข้ารหัสของสัญญาณ การมอดูเลชันแบบ OFDM การใช้งานแถบป้องกัน เป็นต้น ทำให้สัญญาณมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสูง หรือกล่าวได้ว่า การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของการส่งเป็นสำคัญ โดยพิจารณารูปแบบการรับสัญญาณได้แก่ การรับสัญญาณภายนอกอาคารแบบอยู่กับที่ (Fixed Rooftop Reception) การรับสัญญาณภายในอาคาร (Indoor Reception) และการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ (Portable Reception) ซึ่งพารามิเตอร์การส่งที่สำคัญประกอบด้วยขนาด FFT ค่าแถบป้องกัน แบบคอนสเทเลชัน FEC และแบบแผนสัญญาณนำร่อง (Pilot Pattern)

ทั้งนี้การประเมินคุณภาพของสัญญาณในการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล พิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่าความแรงสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) ค่าอัตราคลื่นพาทต่อสัญญาณรบกวน อัตราผิดพลาดมอดูเลชัน (Modulate Error Rate : MER) และอัตราผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER) ที่ประกอบด้วย bBER (Before Bit Error Rate) และ LBER (LDPC Bit Error Rate) อีกทั้งการรับสัญญาณจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการรับสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่เดินทางมายังสายอากาศรับอาจจะมีมาจากทิศทางตรง (Gaussian Channel) ทิศทางตรงและการสะท้อน (Rician Channel) หรือทิศทางสะท้อนอย่างเดียว (Rayleigh Channel) ดังรูปที่ 2.18

2.6.1 พารามิเตอร์สำหรับการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

การประเมินคุณภาพการออกอากาศสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการออกอากาศ ซึ่งได้มีการนำเสนอในงานวิจัย เช่น การวิจัยเกี่ยวกับเรื่องการหาค่าต่ำสุดของอัตราคลื่นพาทต่อสัญญาณรบกวนที่เหมาะสมสำหรับการรับสัญญาณ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อทดสอบหาค่าต่ำสุดของอัตราคลื่นพาทต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับยังสามารถรับสัญญาณได้ดี [12] งานวิจัยที่เกี่ยวกับเรื่องประสิทธิภาพในการรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ (Portable reception) [20] รวมถึงการตรวจวัดสัญญาณในภูมิภาคที่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นในเขตเมืองหรือเขตชนบท เพื่อหาระดับสัญญาณต่ำสุดที่เครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลสามารถรับสัญญาณได้ โดยการวัดสัญญาณสำหรับงานวิจัยนี้ พิจารณาค่าที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 2.18 เทคโนโลยีการแพร่กระจายสัญญาณคลื่นวิทยุประเภทต่าง ๆ [3]

2.6.1.1 ความแรงสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength)

การคำนวณค่าความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุดที่ต้องการสำหรับจุดรับสัญญาณที่มีรูปแบบการรับในลักษณะต่าง ๆ ได้ถูกอ้างอิงตามข้อเสนอของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ ITU ที่ Recommendation ITU-R BT.2033: Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands การหาค่าความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum Field Strength) และค่ากลางเสมือนความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum Medium Equivalent Field Strength) สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [21]

ค่ากลางเสมือนความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุด สำหรับการรับสัญญาณภายนอกอาคารแบบอยู่กับที่ (Fixed Rooftop Reception) ดังสมการที่ 2.1

$$E_{\text{med}} = E_{\text{min}} + P_{\text{mmn}} + C_1 \quad (2.1)$$

ค่ากลางเสมือนความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุด สำหรับการรับแบบเคลื่อนที่ภายนอกอาคารและการรับแบบเคลื่อนที่ (Portable Outdoor and Mobile Reception) สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.2

$$E_{\text{med}} = E_{\text{min}} + P_{\text{mmn}} + C_1 + L_h \quad (2.2)$$

ค่ากลางเสมือนความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุด สำหรับการรับแบบพกพาภายในอาคารและการรับแบบเคลื่อนที่ (Portable Outdoor and Mobile Hand Held Reception) สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.3

$$E_{\text{med}} = E_{\text{min}} + P_{\text{mmn}} + C_1 + L_h + L_b \quad (2.3)$$

โดยค่ากลางเสมือนความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุดในสมการ 2.1 2.2 2.3 หาค่าได้จากสมการที่ 2.4 2.5 2.6 2.8 2.9 และ 2.10 ดังนี้

$$E_{\text{min}} = \varphi_{\text{min}} + 120 + 10 \log(120\pi) = \varphi_{\text{min}} + 145.8 \quad (2.4)$$

$$\varphi_{\text{min}} = P_{\text{smin}} - A_a + L_f \quad (2.5)$$

$$A_a = G + 10 \log(1.64\lambda^2 / 4\pi) \quad (2.6)$$

$$P_s = C / N + P_n \quad (2.7)$$

$$P_n = F + 10 \log(kT_0B) \quad (2.8)$$

$$C_1 = \mu \cdot \sigma_t \quad (2.9)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_m^2} \quad (2.10)$$

โดยค่าตัวแปรคือ

- E_{med} คือ ค่ากลางเสมือนความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุด ค่าที่ใช้งานวางแผน มีหน่วยเป็น $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
- E_{min} คือ ค่าความแรงสนามไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งเครื่องรับ มีหน่วยเป็น $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
- P_{mmn} คือ ค่า Man-made Noise ที่ยอมรับได้ มีหน่วยเป็น dB
- C_1 คือ แฟคเตอร์การแก้ความผิดพลาดของตำแหน่ง (Location Correction Factor) มีหน่วยเป็น dB
- L_h คือ การสูญเสียจากความสูงการรับ (จุดการรับที่ความสูง 1.5 เมตรเหนือระดับพื้นดิน) มีหน่วยเป็น dB
- L_b คือ การสูญเสียจากภายในตึกหรือยานพาหนะ มีหน่วยเป็น dB
- φ_{min} คือ ค่า PDF ต่ำสุดที่ตำแหน่งของการรับ มีหน่วยเป็น dBW^2/m
- P_{smin} คือ กำลังต่ำสุดที่อินพุทของเครื่องรับ มีหน่วยเป็น dBW
- A_a คือ ด้านรับประสิทธิภาพของสายอากาศรับ มีหน่วยเป็น dBm^2
- L_f คือ การสูญเสียของสายส่ง มีหน่วยเป็น dB
- G คือ อัตราขยายของสายอากาศรับสัมพันธ์กับสายอากาศแบบ Half Dipole มีหน่วยเป็น dBd

λ	คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็น เมตร
C/N	คือ อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน มีหน่วยเป็น dB
P_n	คือ กำลังของสัญญาณรบกวนที่อินพุทของเครื่องรับ มีหน่วยเป็น dBW
F	คือ Noise Figure ที่เครื่องรับ มีหน่วยเป็น dB
k	คือ ค่าคงที่ Boltzman เท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K
T_0	คือ ค่าสัมบูรณ์อุณหภูมิ เท่ากับ 290 K
B	คือ แบนด์วิทของสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ เท่ากับ 7.61×10^6 Hz
μ	คือ แฟคเตอร์การกระจายคือ ค่า 0.52 ที่ 70% 1.28 ที่ 90% 1.64 ที่ 95% 2.33 ที่ 99%
σ_t	คือ ผลรวมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีหน่วยเป็น dB
σ_m	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Macro-scale เท่ากับ 5.5 dB
σ_b	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการสูญเสียภายในตึก มีหน่วยเป็น dB

2.6.1.2 ค่าอัตราคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน

อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio : C/N) อ้างอิงตามข้อเสนอของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ ITU ที่ Recommendation ITU-R BT.2033: Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands [21] สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.11

$$C/N = P_{smin} - F - 10 \log(kT_0B) \quad (2.11)$$

2.6.2 การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล

อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน มีผลต่อระดับสัญญาณอินพุทต่ำสุดของเครื่องรับ โดยเครื่องรับ DVB-T2 อ้างอิงค่า Noise Figure ที่ 6 dB ในย่านความถี่แบนด์ III IV และ V [21] ซึ่งหากเป็นการวางแผนโครงข่ายของ EBU จะอ้างอิงที่ค่า 7 dB ในระบบ DVB-T ทั้งนี้ระดับสัญญาณอินพุทต่ำสุดของเครื่องรับสามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นกำลังสนามไฟฟ้าและสัมพันธ์กับค่าความแรงสนามไฟฟ้าสมมูลย์ต่ำสุด ตามสมการที่ 2.12 2.13 และ 2.14 และตารางที่ 2.7 แสดงระดับสัญญาณอินพุทต่ำสุดที่เครื่องรับ DVB-T2 ต้องการ

$$P_n = F + 10 \log(kT_0B) \quad (2.12)$$

$$P_{smin} = P_n + C/N \quad (2.13)$$

$$U_{smin} = P_{smin} + 120 + 10 \log(Z_i) \quad (2.14)$$

เมื่อกำหนด

F คือ Noise Figure ที่เครื่องรับ มีหน่วยเป็น dB

U_{smin} คือ โวลเตจอินพุทสมมูลย์ต่ำสุดของเครื่องรับที่ป้อนสู่ Z_i มีหน่วยเป็น dBuV

Z_i คือ อิมพีแดนซ์อินพุทของเครื่องรับ เท่ากับ 75Ω

ตารางที่ 2.7 ระดับสัญญาณอินพุทต่ำสุดที่เครื่องรับโทรทัศน์ระบบดิจิตอล [12]

Frequency Band III, IV, V = 8 MHz channels					
Normal carrier mode ; 1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k modes					
B (Hz)	7.61×10^6	7.61×10^6	7.61×10^6	7.61×10^6	7.61×10^6
F (dB)	6	6	6	6	6
P_n (dBW)	-129.2	-129.2	-129.2	-129.2	-129.2
C/N (dB)	8.0	12.0	16.0	20.0	24.0
P_{smin} (dBW)	-121.2	-117.2	-113.2	-109.2	-105.2
U_{smin} (dBuV) $Z_i=75\Omega$	17.5	21.5	25.5	29.5	33.5

2.7 สรุป

ศึกษาความเป็นมาเทคโนโลยี DVB-T2 และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสําหรับโครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิตอล และนำวิธีการไปประยุกต์ใช้งานในวิจัย ทั้งนี้การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสําหรับใช้งานในการออกแบบโครงข่ายแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิตอล มีความจำเป็นต้องเข้าใจ พื้นฐานการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิตอล และรู้จักมาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิตอล โดยเฉพาะมาตรฐาน DVB-T2 ซึ่งเป็นมาตรฐานการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิตอลของประเทศ ไทย ซึ่งต้องมีความรู้ความเข้าใจคุณสมบัติของระบบ ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณของระบบ และมีความเข้าใจหลักเกณฑ์ข้อกำหนดต่าง ๆ ด้านเทคนิคของการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิตอลของประเทศไทย ที่กำหนดโดยสำนักงาน กสทช. ซึ่งเป็นหน่วยงานควบคุม การวัดสัญญาณเพื่อตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณที่แพร่กระจายสัญญาณมีความจำเป็นต้องเข้าใจพารามิเตอร์การแพร่กระจายคลื่นมีสำคัญต่อการพัฒนาคุณภาพสัญญาณการส่งผ่านโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิตอล

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการจำลองการสูญเสียเชิงวิถี

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึง แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งาน เพื่อเป็นการสมมติฐานสำหรับงานวิจัยนี้ ด้วยกระบวนการวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ในการจำลองการสูญเสียเชิงวิถีเพื่อหาความเหมาะสมที่สุด และค่าสถิติที่นำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อการพัฒนาแบบจำลอง และใช้ชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี

3.2 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี

การสื่อสารแบบไร้สายอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นำพาข้อมูลข่าวสารจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยส่งผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ ดังนั้นจึงมีสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ตามสภาพพื้นที่ เช่นในพื้นที่ชนบท สิ่งกีดขวางเป็นต้นไม้ ภูเขา หรือสิ่งกีดขวางตามธรรมชาติ และในพื้นที่เมืองสิ่งกีดขวางส่วนใหญ่เป็นอาคารสำนักงาน ตึกสูง หรือสิ่งกีดขวางที่มนุษย์สร้างขึ้น ทำให้การช่องสัญญาณส่งผ่านโครงข่ายโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัล เกิดปรากฏการณ์ เช่น เกิดการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระจัดกระจาย (Scattering) ของคลื่น ซึ่งคลื่นจะเดินทางไปถึงปลายทางด้วยระยะเวลาไม่เท่ากัน ดังนั้นความแรงของสัญญาณจะลดลงตามระยะทางและเกิดการจางหายของสัญญาณ

การจำลองการสูญเสียเชิงวิถีมีความสำคัญในการออกแบบโครงข่ายโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัล และการทำนายการลดทอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น หรือทำนายความสูญเสียสัญญาณการสูญเสีย เพื่อการปรับปรุงที่เครื่องรับในระยะทางที่กำหนด ทั้งนี้เพื่อให้การออกแบบโครงข่ายได้พื้นที่ครอบคลุมที่ถูกต้อง ใช้กำลังส่งที่เหมาะสม เป็นการประหยัดต้นทุนของอุปกรณ์โครงข่าย ฯลฯ จึงมีความจำเป็นต้องใช้งานแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีที่มีความแม่นยำ โดยแบบจำลองที่ทำนายค่าความแรงสัญญาณซึ่งถูกนำมาใช้ในการประมาณพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการของเครื่องส่ง ที่มีระยะห่างระหว่างเครื่องส่งถึงเครื่องรับห่างกันมากประมาณหลายร้อยเมตรหรือหลายกิโลเมตร เรียกแบบจำลองนี้ว่าการแพร่กระจายแบบขนาดกว้าง (Large Scale) ส่วนแบบจำลองที่นำมาใช้กับสัญญาณที่มีการแกว่งอย่างรวดเร็วในระยะสั้น ๆ เรียกว่าแบบจำลองการแพร่กระจายขนาดเล็ก (Small Scale) หรือ แบบจำลองจางหาย (Fading Model) [3]

3.2.1 การจำลองในอวกาศว่าง (Free Space)

แบบจำลองอวกาศว่าง [3] เป็นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในอุดมคติ โดยกำลังงานที่รับได้ที่ระยะทาง R จะได้รับตามสมการที่ 3.1

$$P_r = \frac{A_e P_t G_r}{4\pi R^2} \quad (3.1)$$

เมื่อ P_r คือ กำลังงานที่เครื่องรับสามารถรับได้

P_t คือ กำลังงานของเครื่องส่งในการส่งสัญญาณ

G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ มีหน่วยเป็นกิโลเมตร

A_e คือ พื้นที่รับสัญญาณประสิทธิภาพ (effective Aperture) ของสายอากาศรับ

ความสัมพันธ์ของ A_e กับอัตราขยายของสายอากาศรับ G_r เขียนได้ตามสมการที่ 3.2 คือ

$$G_r = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร โดยการแทนค่า A_e ในสมการ 3.2 เข้าสู่สมการที่ 3.1 กำลังงานที่เครื่องรับจะได้รับตามสมการฟรีส (Friis Formula) [3] ในสมการที่ 3.3 คือ

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3.3)$$

จากสมการกำลังงานที่เครื่องรับสามารถรับได้จะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งยกกำลังสอง และแปรผกผันกับความถี่ยกกำลังสองด้วย ถ้าระยะทางหรือความถี่เพิ่มขึ้น 2 เท่าจะทำให้กำลังงานที่รับได้น้อยลง 4 เท่าจากค่าเดิม เมื่อกำหนดให้ L_f คือ การสูญเสียเชิงวิถีอวกาศว่าง จะได้ตามสมการที่ 3.4

$$L_f = \frac{1}{G_t G_r} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (3.4)$$

ดังนั้น L_f สามารถเขียนสมการในหน่วยเดซิเบล (dB) สมการที่ 3.4 เขียนใหม่ได้ในสมการที่ 3.5 คือ

$$\begin{aligned}
L_r &= 10 \log \frac{P_t}{P_r} = P_t (\text{dB}) - P_r (\text{dB}) \\
&= 10 \log \left(\frac{1}{G_t G_r} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \right) \\
&= K + 20 \log d + 20 \log f - 10 \log G_t - 10 \log G_r
\end{aligned} \tag{3.5}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ใช้งานในการรับและส่งสัญญาณ

K คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับหน่วยของ R และ f เช่น R มีหน่วยเป็นกิโลเมตร f มีหน่วยเป็น MHz จะได้ K เท่ากับ 32.44

และเมื่อสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) จะได้รับ $G_t = G_r = 1$ สมการแบบจำลองในอวกาศว่าง สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.6 คือ

$$L_r = 32.44 + 20 \log d + 20 \log f \tag{3.6}$$

3.2.2 แบบจำลองโอคุมูระ

สำหรับการจำลองการสูญเสียเชิงวิถีโอคุมูระ (Okumura Model) [22] เป็นแบบจำลองแพร่กระจายคลื่นสำหรับพื้นที่เมือง เพราะสร้างโดยใช้ข้อมูลในเมืองโตเกียวประเทศญี่ปุ่น สามารถใช้งานในย่านความถี่ (f_c) 150 – 1920 MHz ที่ความสูงเสาส่ง (h_t) 30 – 1000 เมตร ความสูงของเสารับ (h_m) 1 – 10 เมตร และระยะห่าง (R) ระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ 1 – 100 กิโลเมตร โดยสมการแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีโอคุมูระตามสมการที่ 3.7 คือ

$$L(\text{dB}) = L_f + A_{\text{MU}}(f, d) - G(h_{\text{tc}}) - G(h_{\text{me}}) - G_{\text{Area}} \tag{3.7}$$

เมื่อ L_f คือ การสูญเสียเชิงวิถีอวกาศว่าง มีหน่วยเป็น dB

A_{MU} คือ ค่ากลางการลดทอนผ่านอวกาศว่าง มีหน่วยเป็น dB

$G(h_{\text{tc}})$ คือ อัตราขยายกำลังเนื่องจากความสูงของสายอากาศส่ง มีหน่วยเป็น dB

$G(h_{\text{me}})$ คือ อัตราขยายกำลังเนื่องจากความสูงของสายอากาศรับ มีหน่วยเป็น dB

G_{Area} คือ อัตราขยายกำลังที่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม

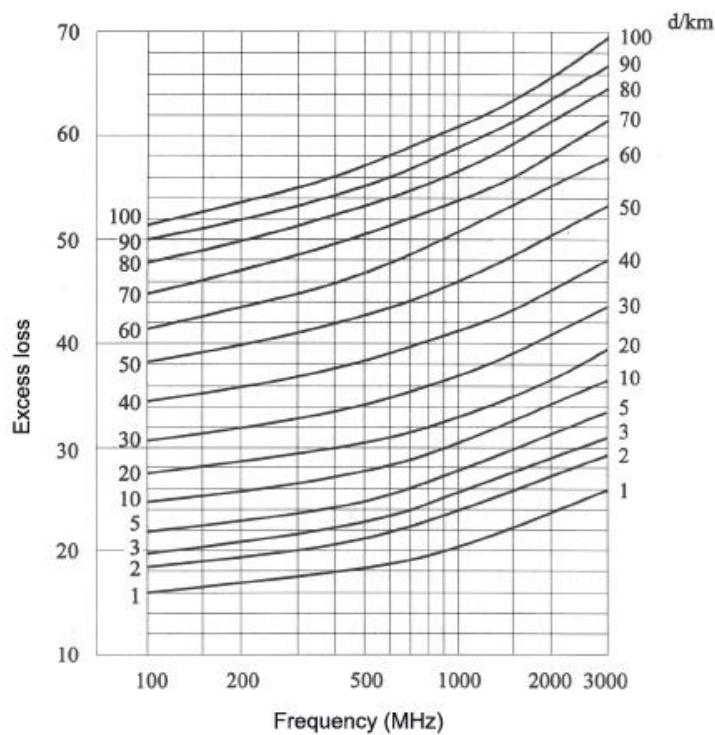
รูปที่ 3.1 แสดงค่า $A_{\text{MU}}(f, d)$ ซึ่งเป็นค่ากลางการลดทอนของพื้นที่ในตัวเมืองที่มีพื้นที่ราบเรียบและมีความแตกต่างของระดับพื้นดินไม่เกิน 20 เมตร และค่า $G(h_{\text{tc}})$ ในรูปที่ 3.2 จะได้สมการที่ 3.8 คือ

$$G(h_{\text{tc}}) = 20 \log \frac{h_t}{200}, h_{\text{tc}} > 10 \text{ เมตร} \tag{3.8}$$

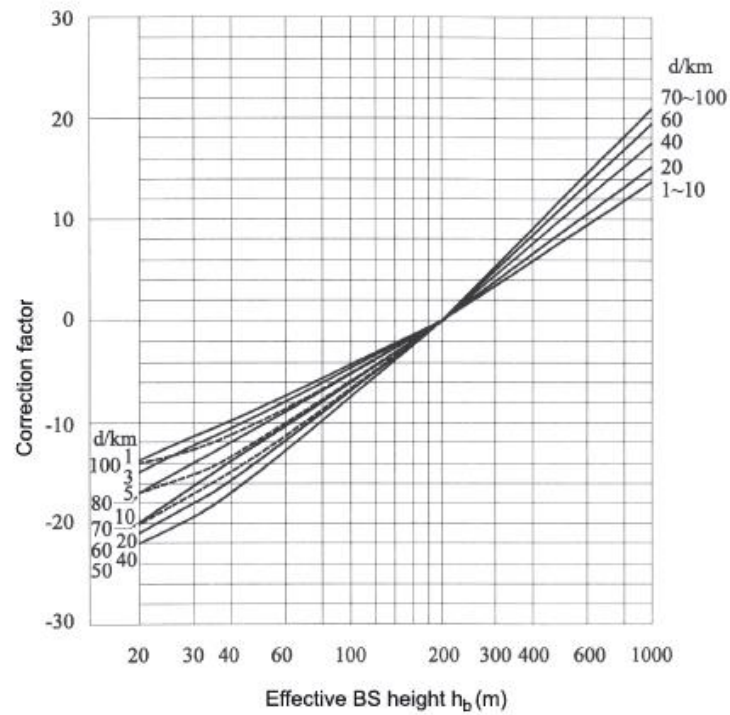
ซึ่ง $G(h_{mc})$ อัตราขยายกำลังเนื่องจากความสูงของสายอากาศรับตามรูปที่ 3.3 สามารถเขียนสมการได้ตามสมการที่ 3.9 3.10 และค่า G_{Area} เป็นค่าแฟคเตอร์ที่ใช้ในการแก้ไขการลดทอนในพื้นที่ต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ $A_{MU}(f, d)$ โดยค่าของ G_{Area} แสดงดังรูปที่ 3.4

$$G(h_{mc}) = 10 \log \frac{h_m}{3} \quad h_m < 3 \text{ เมตร} \quad (3.9)$$

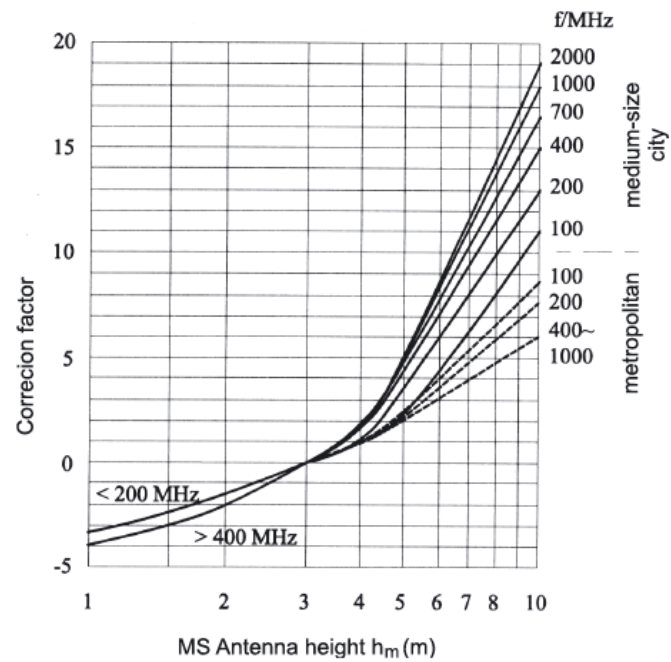
$$G(h_{mc}) = 20 \log \frac{h_m}{3} \quad 3 \leq h_m \leq 10 \text{ เมตร} \quad (3.10)$$



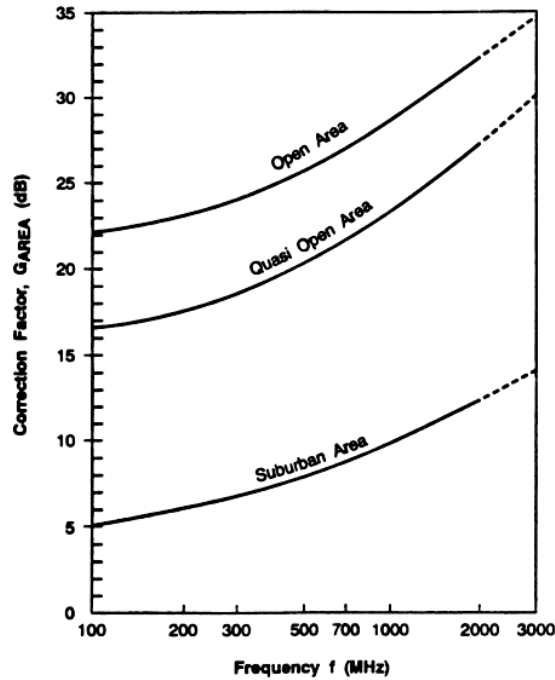
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การลดทอนสัญญาณ $A_{MU}(f, d)$ [22]



รูปที่ 3.2 อัตราขยายกำลังจากผลความสูงของสายอากาศด้านส่ง [22]



รูปที่ 3.3 อัตราขยายกำลังจากผลความสูงของสายอากาศด้านรับ [22]



รูปที่ 3.4 แฟคเตอร์ G_{Area} ที่ใช้ในการแก้ไขการลดทอนในพื้นที่ต่าง ๆ ของ $A_{MU}(f, d)$ [22]

3.2.3 แบบจำลองฮาทะ

การจำลองสูญเสียเชิงวิถีแบบฮาทะ (Hata Model) [23] พัฒนาโดย Y. Okumura และ M. Hata บนพื้นฐานการวัดสัญญาณในพื้นที่เมืองและชานเมืองในประเทศญี่ปุ่นในปี ค.ศ. 1968 โดยแบบจำลองนี้มีข้อกำหนดใช้งานในย่านความถี่ (f_c) 150 – 1500 MHz ที่ความสูงเสาส่ง (h_t) 30 – 200 เมตร ความสูงของเสารับ (h_m) 1 – 10 เมตร และระยะห่าง (R) ระหว่างสถานีส่งกับเครื่องรับ 1 – 20 กิโลเมตร สมการฮาทะแบ่งตามพื้นที่เมือง ชานเมืองและชนบท

พื้นที่เมือง สามารถหาค่าการสูญเสียเชิงวิถีได้ตามสมการที่ 3.11

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_t + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log R - E \quad (3.11)$$

พื้นที่เมืองขนาดใหญ่ สามารถหาพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีได้ตามสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$E = 3.2[\log(11.7554h_m)]^2 - 4.97 \quad , f_c \geq 400 \text{ MHz} \quad (3.12)$$

$$E = 8.29[\log(1.54h_m)]^2 - 1.1 \quad , f_c \leq 200 \text{ MHz} \quad (3.13)$$

พื้นที่เมืองขนาดกลางและขนาดเล็ก สามารถหาพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีได้ตามสมการที่ 3.14

$$E = [1.1 \log f_c - 0.7] h_m - [1.56 \log f_c - 0.8] \quad (3.14)$$

พื้นที่ชานเมือง สามารถหาพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีได้ตามสมการที่ 3.15

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_t \\ + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log R - 2 \left[\left(\log \frac{f_c}{28} \right)^2 + 5.4 \right] \quad (3.15)$$

พื้นที่ชนบท สามารถหาพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีได้ตามสมการที่ 3.16

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_t \\ + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log R \\ - 4.78 (\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c + 40.94 \quad (3.16)$$

3.2.4 แบบจำลองอีกที

การจำลองสูญเสียเชิงวิถีแบบอีกที (Egli Model) [4] นำเสนอโดย John Egli ในปี ค.ศ. 1957 เป็นแบบจำลองที่ใช้งานในย่านความถี่ (f_c) 40 – 900 MHz และระยะห่าง (R) ระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับน้อยกว่า 60 กิโลเมตร มีสมการพยากรณ์แพร่กระจายคลื่นตามสมการที่ 3.17 และ 3.18 คือ

$$h_m \leq 10 \\ L(\text{dB}) = 20 \log f_c + 40 \log R - 20 \log h_t + 76.3 - 10 \log h_m \quad (3.17)$$

$$h_m \leq 10 \\ L(\text{dB}) = 20 \log f_c + 40 \log R - 20 \log h_t + 85.9 - 10 \log h_m \quad (3.18)$$

เมื่อ f_c คือ ความถี่ใช้งานมีหน่วยเป็น MHz

h_t คือ ความสูงของเสาส่งมีหน่วยเป็นเมตร

h_m คือ ความสูงของเสารับมีหน่วยเป็นเมตร

R คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับมีหน่วยเป็นเมตร

3.3 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

วิธีการที่เหมาะสมที่สุด หรือ การหาจุดที่ดีที่สุด (Optimization) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ การจัดการ และอื่น ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฟังก์ชันเกิดค่าสูงสุดหรือต่ำสุด เช่น

- การหาเส้นทางโคจรของดาวเทียมให้ได้ระยะที่เหมาะสมที่สุด
- การออกแบบเครื่องบินให้มีน้ำหนักต่ำสุดและมีความแข็งแรงสูงสุด
- การออกแบบโครงสร้างของอาคารให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด
- การพยากรณ์พฤติกรรมของโครงสร้างโดยที่ลดพลังงานให้มากที่สุด
- หาจุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะกำเนิดไฟฟ้าได้สูงสุดโดยที่มีพลังงานสูญเสียน้อยที่สุด
- ฯลฯ

ทั้งนี้ความเหมาะสมที่สุดได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานปรับปรุงแบบจำลองสูญเสียเชิงวิธียุติให้มีความเหมาะสมเฉพาะพื้นที่ โดยการหาความเหมาะสมที่สุดมีการประยุกต์ใช้หลายวิธีการ เช่น วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method), วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Method) วิธีการเคลื่อนที่อนุภาค (Particle Swarm Method) เป็นต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการหาความเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) [24] คิดค้นโดย โยฮันน์ คาร์ล ฟรีดริช เกาส์ นักคณิตศาสตร์ชาวเยอรมันเมื่อ 200 ปีก่อน ซึ่งในยุคนั้นเกาส์ได้คิดวิธีดังกล่าวเพื่อคำนวณหาวงโคจรดาวเคราะห์ดวงหนึ่ง เริ่มต้นจากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การถดถอยของตัวแปรอิสระ 1 ตัวและตัวแปรตาม 1 ตัว โดยตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งอาจจะเป็นความสัมพันธ์ตามกันหรือผกผันกัน มีตัวแบบการถดถอยตามสมการที่ 3.19

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (3.19)$$

โดย Y_i คือ ค่าของตัวแปรตามในลำดับที่ i

β_0, β_1 คือ พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

X_i คือ ค่าคงที่ของตัวแปรอิสระในลำดับที่ i

ε_i คือ ความคลาดเคลื่อน (Random Error) ในลำดับที่ i

สำหรับพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 เรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) โดย β_1 คือความชันของสมการถดถอยที่บอกให้ทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของการแจกแจงของตัวแปร Y เมื่อตัวแปรอิสระ X มีค่าเพิ่มขึ้น 1 หน่วยในขณะที่ β_0 คือจุดตัดแกน Y ของสมการถดถอยหรือเป็นค่าเฉลี่ยของการแจกแจงตัวแปรตาม Y เมื่อตัวแปรอิสระ X มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจาก β_0, β_1 เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า จึงต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างหรือข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมมาใช้เพื่อประมาณค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองเพื่อใช้พยากรณ์ค่า

ของตัวแปรตามหรือ \hat{Y} ค่าพยากรณ์นี้เรียก Fitted Value สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.20 คือ

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i \quad (3.20)$$

โดย $\hat{\beta}_0$ และ $\hat{\beta}_1$ คือ ค่าประมาณของพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 ตามลำดับ

3.3.1 หลักการวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การประมาณค่า β_0 และ β_1 มีหลายวิธีซึ่งวิธีกำลังสองน้อยที่สุดนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยมีหลักการคือ การประมาณค่าพารามิเตอร์ให้ค่าผลรวมกำลังสองของส่วนเหลือ (Residual) ที่น้อยที่สุด ส่วนเหลือ (e_i) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงของตัวแปรตาม Y กับค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการถดถอย (\hat{Y}) ที่ระดับเดียวกันของค่าของตัวแปรอิสระ X เขียนได้ตามสมการที่ 3.21 คือ

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - (\beta_0 + \beta_1 X_i) \quad (3.21)$$

ความคลาดเคลื่อน (ε_i) เป็นค่าที่ได้จากประชากร แต่ส่วนเหลือ (e_i) เป็นความคลาดเคลื่อนที่ได้จากตัวอย่าง และเมื่อกำหนดให้ Q เป็นค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด จะได้ตามสมการที่ 3.22

$$Q = \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2 \quad (3.22)$$

โดยในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่า Q ที่น้อยที่สุดต้องหาค่าอนุพันธ์ย่อยเทียบกับค่า β_0 และ β_1 สามารถเขียนสมการทั้งสองได้ตามสมการที่ 3.23 และ 3.24 ดังนี้

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i) X_i \quad (3.24)$$

กำหนดให้สมการทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0 จะได้ค่าประมาณ β_0 และ β_1 โดยใช้ b_0 และ b_1 แทนค่าประมาณดังกล่าวตามลำดับตามสมการที่ 3.25 และ 3.26 ดังนี้

$$-2\sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i) = 0 \quad (3.25)$$

$$-2\sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i) X_i = 0 \quad (3.26)$$

โดยการหารทั้งสองสมการด้วย 2 จากนั้นกระจายผลบวกและย้ายข้างจะได้สมการที่ 3.27 และ 3.28 ดังนี้

$$nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (3.27)$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n X_i + b_1 \sum_{i=1}^n X_i^2 = \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (3.28)$$

จากการแก้สมการปกติทั้งสองจะได้สมการที่ 3.29 และ 3.30

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (3.29)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i (X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3.30)$$

โดยจะได้ S_{xx} และ S_{xy} ตามสมการที่ 3.31 และ 3.32

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n} \quad (3.31)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n Y_i (X_i - \bar{X}) = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)}{n} \quad (3.32)$$

3.3.2 คุณสมบัติของตัวประมาณค่า b_0 และ b_1

โดยทฤษฎีของเกาส์-มาร์คอฟ (Guass-Markov Theorem) จะได้ว่าตัวประมาณค่า b_0 และ b_1 ที่ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง (Unbiased) หรือ $E(b_0) = \beta_0$ และ $E(b_1) = \beta_1$ และมีความแปรปรวนน้อยที่สุดในบรรดาตัวประมาณค่าเชิงเส้นที่ไม่เอนเอียง (Unbiased Linear Estimator) หรืออาจเรียกตัวประมาณค่าทั้งสองตัวนี้ว่า Best Linear

Unbiased Estimator (BLUE) โดยที่ Best หมายถึงการที่มีความแปรปรวนที่น้อยที่สุดโดยค่าความแปรปรวน b_0 และ b_1 มีค่าตามสมการที่ 3.33 และ 3.34 ดังนี้

$$V(b_0) = \sigma^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\overline{X^2}}{S_{xx}} \right) \quad (3.33)$$

$$V(b_1) = \frac{\sigma^2}{S_{xx}} \quad (3.34)$$

โดย σ^2 คือความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (ε_i)

3.3.3 คุณสมบัติของการทำนายและส่วนเหลือ

ค่าพยากรณ์ (\hat{Y}) และส่วนเหลือ (e_i) ที่ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดนั้นมีคุณสมบัติตามสมการที่ 3.35 3.36 3.37 และ 3.38 ดังนี้

- (1) ผลรวมของส่วนเหลือเท่ากับ 0

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) = \sum_{i=1}^n e_i = 0 \quad (3.35)$$

- (2) ผลรวมของค่าจริง Y เท่ากับผลรวมของค่าพยากรณ์ \hat{Y}

$$\sum_{i=1}^n Y_i = \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i \quad (3.36)$$

- (3) ผลรวมของส่วนเหลือกำลังสอง $\sum_{i=1}^n e_i^2$ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการอื่นๆ

- (4) เส้นถดถอยจะลากผ่านจุดที่เป็นค่ากลาง \bar{X} และ \bar{Y} เสมอ

- (5) ผลรวมของส่วนเหลือที่ถ่วงน้ำหนักด้วยค่า X จะเท่ากับ 0

$$\sum_{i=1}^n X_i e_i = 0 \quad (3.37)$$

- (6) ผลรวมของส่วนเหลือที่ถ่วงน้ำหนักด้วยค่าพยากรณ์จะมีค่าเท่ากับ 0

$$\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i e_i = 0 \quad (3.38)$$

3.4 พารามิเตอร์เชิงสถิติสำหรับการจำลองสูญเสียเชิงวิถี

ในทางสถิติได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างแบบจำลองการทำนาย และตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบทำนาย ทั้งในด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น ทั้งนี้ก็วิจัยได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในการเปรียบเทียบแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีและตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่นำเสนอ

- ความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error : RMSE) ใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี เช่น ใน [10] ใช้เปรียบเทียบแบบจำลองโอกูมูระ ใน [25] ใช้เปรียบเทียบแบบจำลองฮาตะ และใน [10] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะ Cost-231 เปรียบเทียบกับแบบจำลอง ECC และแบบจำลอง SUI ใน [26] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะ เปรียบเทียบกับแบบจำลอง ITU-R แบบจำลอง Ericsson และแบบจำลอง SUI เป็นต้น

- ความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error : ME) ใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี เช่นใน [27] ใช้เปรียบเทียบแบบจำลองลี ใน [28] ใช้เปรียบเทียบแบบจำลอง ฮาตะ และใน [9] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะ Cost-231 เปรียบเทียบกับแบบจำลอง ECC และแบบจำลอง SUI ใน [10] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะ เปรียบเทียบกับแบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอากาศว่าง เป็นต้น

- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation of error : SD) ใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี เช่น ใน [29] [30] ใช้เปรียบเทียบแบบจำลองล็อกคิสตัน (Log Distance Model) ใน [31] ใช้เปรียบเทียบแบบจำลองฮาตะ และใน [10] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะ Cost-231 เปรียบเทียบกับแบบจำลอง ECC และแบบจำลอง SUI ใน [11] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะ เปรียบเทียบกับแบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอากาศว่าง เป็นต้น

- ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error : RE) ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองพยากรณ์ เช่นใน [4] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะเปรียบเทียบกับแบบจำลองอิกลี แบบจำลองฮาตะ Cost-231 และใน [32] ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองฮาตะ เปรียบเทียบกับแบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองอิกลี และแบบจำลองโอกูมูระ เป็นต้น

3.4.1 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง

รากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้รับจากข้อมูลตัวอย่างหรือข้อมูลจากการวัดกับค่าจากแบบจำลองทำนาย หรือก็คือค่าส่วนเหลือที่นำมายกกำลังสองและหาค่าเฉลี่ยด้วยจำนวนของข้อมูล โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.39 [24] ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{measure},i} - X_{\text{model},i})^2}{N}} \quad (3.39)$$

$X_{\text{measure},i}$ คือ ค่าของข้อมูลจากการวัด ตัวแปรลำดับที่ i

$X_{\text{model},i}$ คือ ค่าประมาณจากแบบจำลองทำนาย ตัวแปรลำดับที่ i

N คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการประมาณค่าหรือจำนวนข้อมูลจากการวัด

3.4.2 ค่ากลางผิดพลาดสัมบูรณ์

ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (Mean absolute error : ME) [24] คือค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้รับจากข้อมูลตัวอย่างหรือข้อมูลจากการวัดกับค่าจากแบบจำลองพยากรณ์และนำมาหาค่าเฉลี่ยด้วยจำนวนของข้อมูล โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.40

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |X_{\text{measure},i} - X_{\text{model},i}| \quad (3.40)$$

$X_{\text{measure},i}$ คือ ค่าของข้อมูลจากการวัด ตัวแปรลำดับที่ i

$X_{\text{model},i}$ คือ ค่าประมาณจากแบบจำลองพยากรณ์ ตัวแปรลำดับที่ i

N คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการประมาณค่าหรือจำนวนข้อมูลจากการวัด

3.4.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน (Standard deviation of error : SD) คือ ผลรวมกำลังสองของค่าสัมบูรณ์ของส่วนเหลือที่ลบด้วยค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน และนำมาหาค่าเฉลี่ยด้วยจำนวนของข้อมูล โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.41 [24]

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (|X_{\text{measure},i} - X_{\text{model},i}| - ME)^2} \quad (3.41)$$

$X_{\text{measure},i}$ คือ ค่าของข้อมูลจากการวัด ตัวแปรลำดับที่ i

$X_{\text{model},i}$ คือ ค่าประมาณจากแบบจำลองพยากรณ์ ตัวแปรลำดับที่ i

N คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการประมาณค่าหรือจำนวนข้อมูลจากการวัด

3.4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error : RE) สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.42 [24] คือ

$$RE = \frac{|X_{\text{measure},i} - X_{\text{model},i}|}{|X_{\text{measure},i}|} \quad (3.42)$$

$X_{\text{measure},i}$ คือ ค่าของข้อมูลจากการวัด ตัวแปรลำดับที่ i

$X_{\text{model},i}$ คือ ค่าประมาณจากแบบจำลองพยากรณ์ ตัวแปรลำดับที่ i

3.5 สรุป

ในบทที่ได้กล่าวถึงวิธีการจำลองสูญเสียเชิงวิถึ ที่นำมาใช้เป็นสมมติฐาน และแสดงกระบวนการหาความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึ และได้แสดงการหาค่าสถิติที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึและการหาค่าสถิติที่ใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น

บทที่ 4

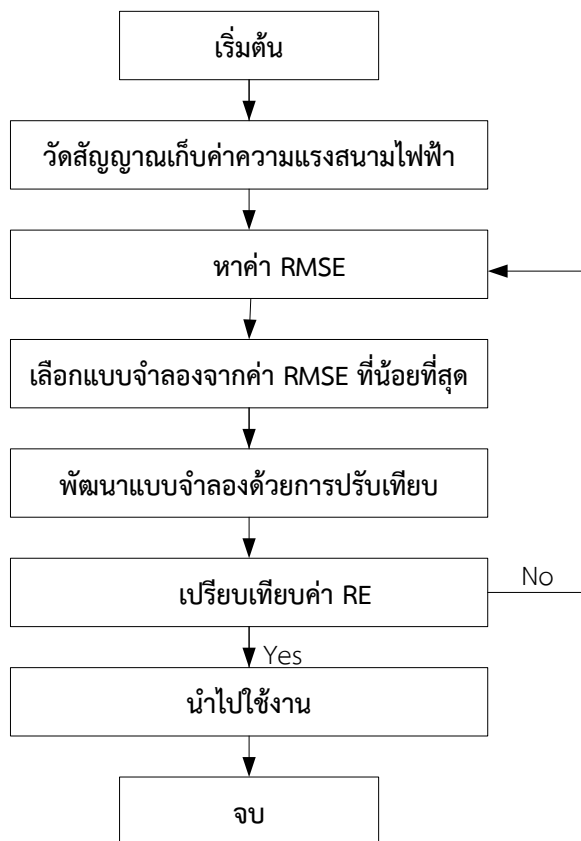
การวัดสัญญาณโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการวัดสัญญาณโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล เพื่อการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี ซึ่งประกอบด้วยสองวิธีการที่นำเสนอคือ วิธีปรับเทียบค่าสถิติ และวิธีการเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และแสดงสมการแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีที่นำเสนอที่ได้รับจากการพัฒนา และอธิบายการวัดสัญญาณโทรศัพท์ภาคพื้นดินดิจิทัลที่นำมาใช้เป็นข้อมูลในงานวิจัย

4.2 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี

4.2.1 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีโดยวิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติ



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีโดยวิธีปรับเทียบด้วยค่าสถิติ

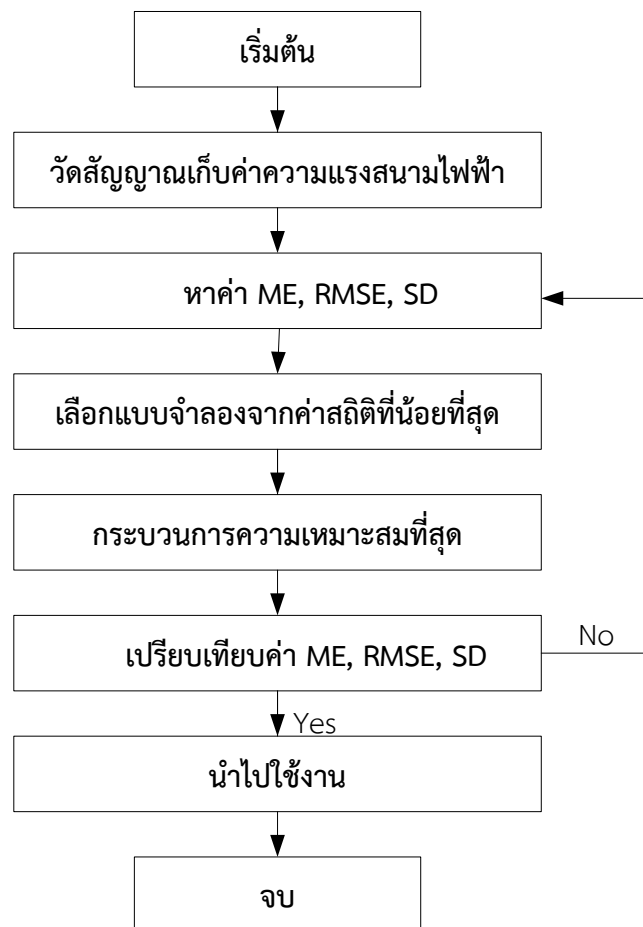
กระบวนการพัฒนาเริ่มต้นโดยการวัดสัญญาณเก็บข้อมูลค่าความแรงสนามไฟฟ้าในพื้นที่ครอบคลุมเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่ได้รับจากการวัด

สัญญาณ จะถูกนำมาหาค่าสูญเสียเชิงวิธีตามแบบจำลองสูญเสียเชิงวิธีที่ใช้งานเป็นสมมติฐาน จะได้ค่าสูญเสียเชิงวิธีของแต่ละแบบจำลอง ค่าสูญเสียเชิงวิธีของแต่ละแบบจำลองจะถูกนำมาหาค่า RMSE เพื่อเปรียบเทียบค่าที่น้อยที่สุด ซึ่งค่า RMSE ที่น้อยที่สุดของแบบจำลอง หมายความว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาปรับเทียบด้วยสมการปรับเทียบ ค่าสูญเสียเชิงวิธีของแบบจำลองปรับเทียบและแบบจำลองเดิมจะถูกนำมาหาค่า RE เพื่อเปรียบเทียบค่าที่น้อยกว่า หากค่า RE ของแบบจำลองปรับเทียบมีค่าน้อยกว่าค่า RE ของแบบจำลองเดิม แสดงว่าแบบจำลองที่พัฒนาเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด แสดงว่ามีความแม่นยำในการทำนายมากที่สุด สามารถนำไปใช้งานได้ดี แต่หากว่าค่า RE ของแบบจำลองปรับเทียบมีค่ามากกว่าแบบจำลองเดิม แสดงว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในขั้นตอน จำเป็นต้องไปวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อนำมาพัฒนาใหม่

4.2.2 การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิธีโดยวิธีความเหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิธีโดยหาความเหมาะสมที่สุด แสดงดังรูป

ที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิธีวิธีความเหมาะสมที่สุด

กระบวนการพัฒนาเริ่มต้นโดยการวัดสัญญาณเก็บข้อมูลค่าความแรงสนามไฟฟ้าในพื้นที่ครอบคลุมเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่ได้รับจากการวัดสัญญาณจะถูกนำมาหาค่าสูญเสียเชิงวิถีตามแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีที่ใช้ในสมมติฐาน ซึ่งจะได้ค่าสูญเสียเชิงวิถีของแต่ละแบบจำลอง ค่าสูญเสียเชิงวิถีของแต่ละแบบจำลองจะถูกนำมาหาค่า ME RMSE และ SD เพื่อเปรียบเทียบค่าที่น้อยที่สุด ซึ่งค่าสถิติที่น้อยที่สุดของแบบจำลอง หมายความว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมที่จะนำเข้าสู่ขั้นตอนการพัฒนาโดยการหาความเหมาะสมที่สุด ค่าสูญเสียเชิงวิถีของแบบจำลองที่ได้รับจากการพัฒนาและแบบจำลองเดิมจะถูกนำมาหาค่า ME RMSE และ SD เพื่อเปรียบเทียบค่าที่น้อยกว่า หากค่าสถิติของแบบจำลองใหม่มีค่าน้อยกว่าค่าสถิติของแบบจำลองเดิม แสดงว่าแบบจำลองที่พัฒนาเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด สามารถนำไปใช้งานได้ดี แต่หากว่าค่าสถิติของแบบจำลองใหม่มีค่ามากกว่าแบบจำลองเดิม แสดงว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในขั้นตอนจำเป็นต้องไปวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อนำมาพัฒนาใหม่

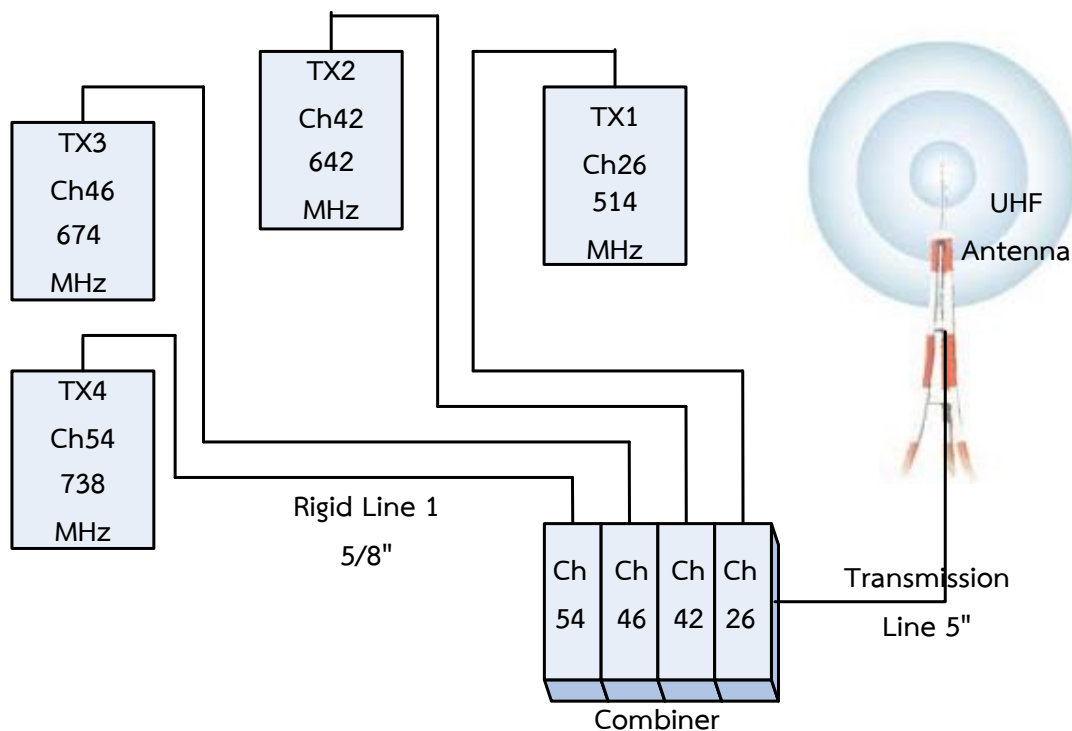
4.3 การเก็บข้อมูลและวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล

4.3.1 สถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล

การแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศไทย โดยสำนักงาน กสทช. กำหนดให้มีการใช้งานโครงสร้างพื้นฐานร่วมกันภายในสถานีส่ง ดังนั้นเครื่องส่งโทรทัศน์ดิจิทัลและอุปกรณ์ส่วนควบการออกอากาศอื่น ๆ ของผู้ให้บริการโครงข่ายแต่ละราย จะถูกติดตั้งอยู่ในที่เดียวกัน โดยเครื่องส่งโทรทัศน์เชื่อมต่อกับระบบรวมสัญญาณ (Combiner System) เพื่อใช้สายส่งกับสายอากาศร่วมกันแสดงดังรูปที่ 4.3 งานวิจัยนี้เลือกเก็บข้อมูลจากการวัดสัญญาณในพื้นที่เมืองเมืองใต้ของประเทศไทย 2 จังหวัดได้แก่ พื้นที่เมืองหาดใหญ่จังหวัดสงขลา โดยสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ดิจิทัลจังหวัดสงขลา ตั้งอยู่บนเขาคอหงส์ที่ละติจูด $7^{\circ} 0' 57.95''$ ลองติจูด $100^{\circ} 31' 12.17''$ สูงกว่าระดับน้ำทะเล 366 เมตร และความสูงของเสาส่ง 66 เมตร และพื้นที่เมืองจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ดิจิทัลจังหวัดสุราษฎร์ธานี ตั้งอยู่บนเขาท่าเพชรที่ละติจูด $9^{\circ} 5' 32.77''$ ลองติจูด $99^{\circ} 20' 55.59''$ สูงกว่าระดับน้ำทะเล 164 เมตร และความสูงของเสาส่ง 80 เมตร ระดับกำลังส่งที่ออกอากาศและโครงสร้างระบบของสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ดิจิทัล 2 สถานีมีค่าตรงกัน ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานระบบดังนี้คือ

เครื่องส่งโทรทัศน์ดิจิทัลช่องสัญญาณ Ch46 ความถี่ 674 MHz ใช้งาน NEC รุ่น DTL-10/1R0S ออกอากาศที่กำลังส่ง 1 KW ช่องสัญญาณ Ch26 ความถี่ 514 MHz และช่องสัญญาณ Ch42 ความถี่ 642 MHz ใช้งานเครื่องส่งรุ่นเดียวกัน คือ HRRIS รุ่น UAX-2000T2HE ออกอากาศที่กำลังส่ง 1.3 KW ช่องสัญญาณ Ch54 ความถี่ 738 MHz ใช้งาน NEC รุ่น DTL-30/1R4SD ออกอากาศที่กำลังส่ง 1.3 KW กำลังส่งของทุกช่องสัญญาณจะส่งผ่านท่อทองแดง (Rigid Line) ขนาด $1\frac{5}{8}$ " เข้าสู่ระบบรวมสัญญาณซึ่งใช้งาน SPINNER รุ่น CCS-6WAY มีค่าการสูญเสีย (CI_1) 0.55 dB และกำลังส่งจากระบบรวมสัญญาณจะส่งผ่านสายส่งซึ่งใช้งาน RFS รุ่น Flexwell HF 5" มี

ค่าการสูญเสียรวม (Cl_2) 1.186 dB บ่อนสู่สายอากาศ Horizontal RFS รุ่น PHP48U มีอัตราขยายรวมกันเท่ากับ (G_r) 18.35 dBi



รูปที่ 4.3 โครงสร้างการออกอากาศสถานีเครื่องส่งโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [30]

ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์กำลังสัญญาณที่รับได้ (P_r) กับค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (L) ได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 คือ

$$L(\text{dB}) = (EIRP + G_r) - P_r \quad (4.1)$$

$$EIRP = P_t + G_t - Cl_1 - Cl_2 \quad (4.2)$$

เมื่อ $EIRP$ คือ กำลังแผ่ไอโซทรอปิกประสิทธิภาพมีหน่วยเป็น dBm

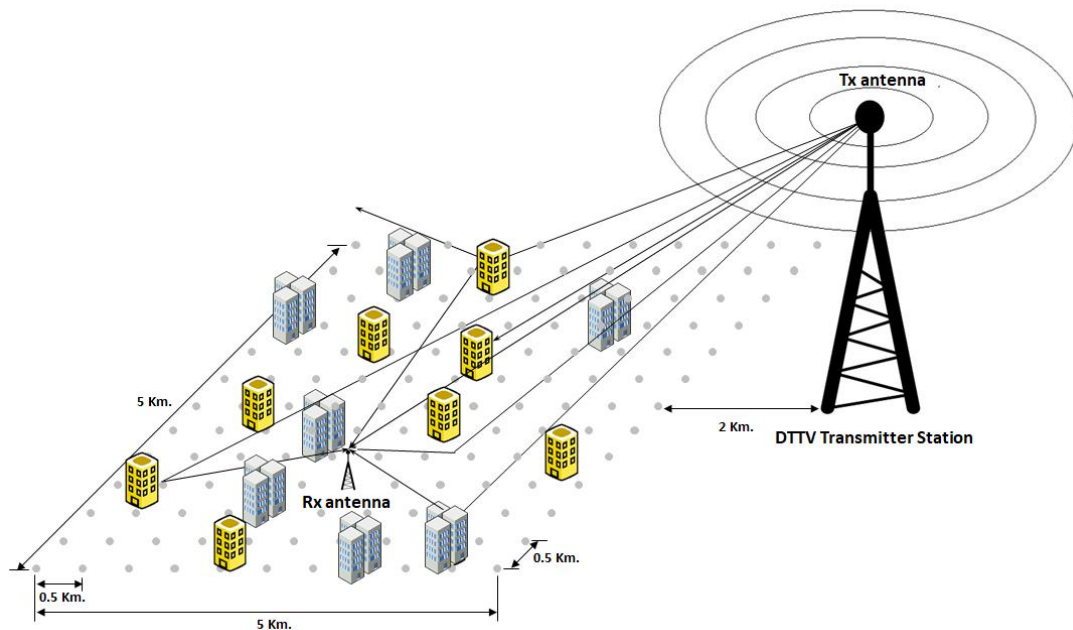
G_t และ G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีหน่วยเป็น dBi

P_t และ P_r คือ กำลังส่งของเครื่องส่งโทรทัศน์และกำลังสัญญาณที่รับได้มีหน่วยเป็น dBm

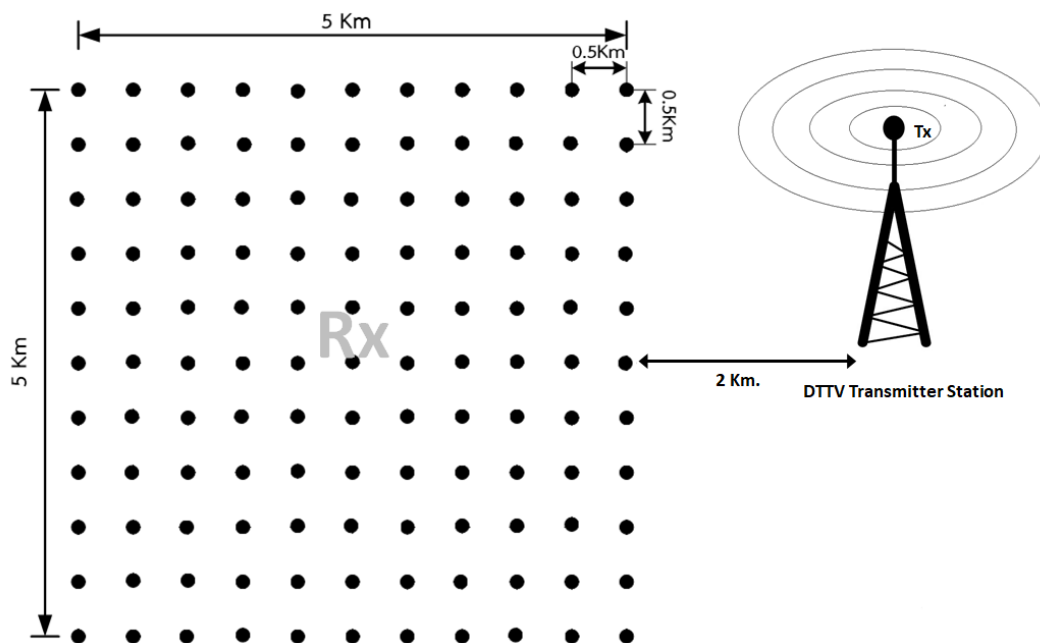
Cl_1 และ Cl_2 คือ ค่าสูญเสียกำลังส่งในระบบรวมสัญญาณและในสายส่ง มีหน่วยเป็น dB

4.3.2 ระบบการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล

การวัดความแรงของสนามไฟฟ้าใช้เครื่องวัดวิเคราะห์สัญญาณ DVB-T2 PROMAX รุ่น HD RANGER+ ซึ่งประกอบด้วย ระบบระบุตำแหน่งและยูเอสบีไดรฟ์สำหรับบันทึกผล ส่วนสายอากาศรับใช้สายอากาศเชิงพานิชของบริษัท SAMART ประเทศไทย รุ่น D7E ติดตั้งขาตั้งปรับความสูงได้โดยมีความสูง 10 เมตร การวัดใช้ฟังก์ชันทดสอบ เก็บค่ากำลังสัญญาณที่รับได้บนถนนที่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นสองข้างทางในพื้นที่เมืองหาดใหญ่จังหวัดสงขลาและพื้นที่ของเมืองจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยการจัดวางอุปกรณ์วัดสัญญาณที่ติดตั้งแสดงในรูปที่ 4.4 โดยรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงเส้นทางพื้นที่เมืองหาดใหญ่จังหวัดสงขลาและพื้นที่เมืองจังหวัดสุราษฎร์ธานีที่ได้ทำการวัดช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโดยพิจารณาเฉพาะการสูญเสียเชิงวิถี



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลโดยพิจารณาเฉพาะการสูญเสียเชิงวิถี



รูปที่ 4.5 แบบแผนการจำลองการวัดช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล



รูปที่ 4.6 การวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลในสภาวะแวดล้อมจริง

4.4 การจำลองสูญเสียเชิงวิถิจากการเปรียบเทียบ

หลักการเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถิจานวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีหาค่าสถิติ RMSE จากค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่รับได้ การเปรียบเทียบแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถิจากการทำนาย โดยค่า RMSE หาได้จากสมการที่ 3.39 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้จำนวนข้อมูล 6,000 จุดของแต่ละช่องสัญญาณ และจากข้อมูลการวัดสัญญาณในพื้นที่เมืองหาดใหญ่จังหวัดสงขลา และพื้นที่เมืองจังหวัดสุราษฎร์ธานี สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า RMSE ได้ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถียาตะมีค่า RMSE ของแต่ละช่องสัญญาณน้อยกว่าค่าของแบบจำลองอื่น ดังนั้นแบบจำลองฮาตะมีความเหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาพัฒนาซึ่งจะได้สมการเปรียบเทียบฮาตะตามสมการที่ 4.3 ดังนี้

$$\text{Calibrated Hata} = \text{Hata Model} + \text{RMSE (dB)} \quad (4.3)$$

เมื่อ *Hata Model* คือ ค่าสูญเสียเชิงวิถิจากแบบจำลองฮาตะ

RMSE คือ ค่า RMSE จากตารางที่ 4.1 มีหน่วยเป็น dB

ตารางที่ 4.1 ค่า RMSE ของการสูญเสียเชิงวิถิจากข้อมูลพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย

พื้นที่	ความถี่	RMSE (dB)		
		Hata	Okumura	Egli
Suratthani	Ch40 (626 MHz)	7.01	20.90	34.80
	Ch44 (658 MHz)	7.32	15.40	28.60
Songkla	Ch42 (642 MHz)	11.07	16.57	30.29
	Ch46 (674 MHz)	10.16	15.60	29.03
Average		8.89	17.12	30.68

4.5 แบบจำลองสูญเสียเชิงวิถิจากความเหมาะสมที่สุด

วัตถุประสงค์ของกระบวนการความเหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับแบบจำลองพยากรณ์ให้เข้าใกล้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมากที่สุด โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด และเลือกใช้แบบจำลองสูญเสียเชิงวิถิจานวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด และเลือกใช้แบบจำลองสูญเสียเชิงวิถิจานวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด และจากสมการที่ 3.11 และ 3.14 จะได้สมการที่ 4.4 คือ

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_t + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log R - ([1.1 \log f_c - 0.7] h_m - [1.56 \log f_c - 0.8]) \quad (4.4)$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปร E_0 , E_{sys} และ β_{sys} มีค่าตามสมการที่ 4.5 4.6 และ 4.7 คือ

$$E_0 = 69.55 + ([1.1 \log f_c - 0.7]h_m - [1.56 \log f_c - 0.8]) \quad (4.5)$$

$$E_{sys} = 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_t \quad (4.6)$$

$$\beta_{sys} = (44.9 - 6.55 \log h_t) \log R \quad (4.7)$$

วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเป็นการกระชับเส้นกราฟทางทฤษฎีให้เข้ากับข้อมูลจากการทดลองซึ่งเป็นฟังก์ชันผลรวมกำลังสองค่าความผิดพลาดที่ต่ำสุดตามสมการที่ 4.8

$$P(a, b, c, \dots) = \sum_{i=1}^n [y_i - E_R(x_i, a, b, c, \dots)]^2 = \min \quad (4.8)$$

เมื่อ y_i = ค่าที่ได้รับจากการวัดที่ระยะทาง x_i
 $E_R(x_i, a, b, c)$ = ผลลัพธ์จากแบบจำลองพยากรณ์ที่ระยะทาง x_i
 a, b, c = พารามิเตอร์ของแบบจำลองสำหรับความเหมาะสมที่สุด
 n = จำนวนข้อมูลจากการทดลอง

ทั้งนี้ทุกอนุพันธ์ส่วนย่อยของฟังก์ชัน P จะเท่ากับศูนย์เขียนได้ตามสมการที่ 4.9

$$\partial P / \partial a = 0, \quad \partial P / \partial b = 0, \quad \partial P / \partial c = 0 \quad (4.9)$$

จากสมการที่ 4.5 4.6 และ 4.7 สามารถกระจายใหม่ได้ตามสมการที่ 4.10 ได้เป็น

$$a = E_0 + E_{sys}, \quad b = \beta_{sys} \quad (4.10)$$

เมื่อกำหนดให้ $\log R = x$ สามารถเขียนสมการ (4.11) ใหม่ได้เป็น

$$E_R = a + b \cdot x \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.11 หาค่าคงที่ a b จากกลุ่มข้อมูลจากการวัด สามารถกระจายสมการ 4.10 ได้คือ

$$\sum_{i=1}^n \left((y_i - E_R(x_i, a, b, c)) \cdot \frac{\partial E_R}{\partial a} \right) = \sum (y_i - a - bx_i) \cdot 1 = 0 \quad (4.12)$$

$$\sum_{i=1}^n \left((y_i - E_R(x_i, a, b, c)) \cdot \frac{\partial E_R}{\partial b} \right) = \sum (y_i - a - bx_i) \cdot x_i = 0 \quad (4.13)$$

สมการที่ 4.12 และ 4.13 สามารถกระจายใหม่ได้เป็น

$$n \cdot a + b \sum x_i = \sum y_i, \quad (4.14)$$

$$a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum (x_i \cdot y_i) \quad (4.15)$$

แทนค่าตัวแปร a และ b ในสมการที่ 4.14 และ 4.15 ซึ่งจะได้ค่าการประมาณทางสถิติของพารามิเตอร์ a และ b คือ

$$\tilde{a} = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.16)$$

$$\tilde{b} = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.17)$$

จากสมการที่ 4.16 และ 4.17 สามารถหาค่า a และ b ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิหิตและจากสมการที่ 4.14 และ 4.15 สามารถหาค่าชดเชยและค่าความโค้งของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิหิตได้คือ

$$E_{0new} = \tilde{a} - E_{sys} \quad (4.18)$$

$$\beta_{sys\ new} = \frac{\tilde{b}}{44.9 - 6.55 \cdot \log h_i} \quad (4.19)$$

แทนค่าข้อมูลที่ได้จากการวัดในสมการที่ 4.18 และ 4.19 สามารถหาค่า a b E_{0new} และ β_{sysnew} ได้ตามตารางที่ 4.2 (ใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณของพื้นที่จังหวัดสงขลาและจังหวัดสุราษฎร์ธานี)

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่รับได้จากวิธีความเหมาะสมที่สุด

พื้นที่	ความถี่	Least Square		พารามิเตอร์ความเหมาะสมที่สุด	
		<i>a</i>	<i>b</i>	E_{0new}	β_{sysnew}
Suratthani	Ch40 (626 MHz)	112.725	4.408	4.200	0.151
	Ch44 (658 MHz)	112.034	4.564	2.910	0.156
Songkla	Ch42 (642 MHz)	117.622	3.222	12.253	0.117
	Ch46 (674 MHz)	114.983	3.598	9.068	0.136
Average		114.341	3.948	7.108	0.560

4.6 สรุป

สำหรับในบทรนี้ได้แสดงถึงแบบแผนขั้นตอนการจำลอง และการวัด ซึ่งเป็นการพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี ด้วยวิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติ และวิธีความเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด การปรับเทียบด้วยค่าสถิติใช้ค่า RMSE จะได้สมการปรับเทียบที่นำเสนอ ตามสมการที่ 4.5 4.6 4.7 และ 4.8 เพื่อนำไปใช้งาน ความเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดจะได้รับการชดเชยและความโค้งตามตารางที่ 4.2 เพื่อนำไปสร้างสมการแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีที่ความเหมาะสมบนหลักการฮาตะ

บทที่ 5

การประเมินผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองวิจัย

5.1 บทนำ

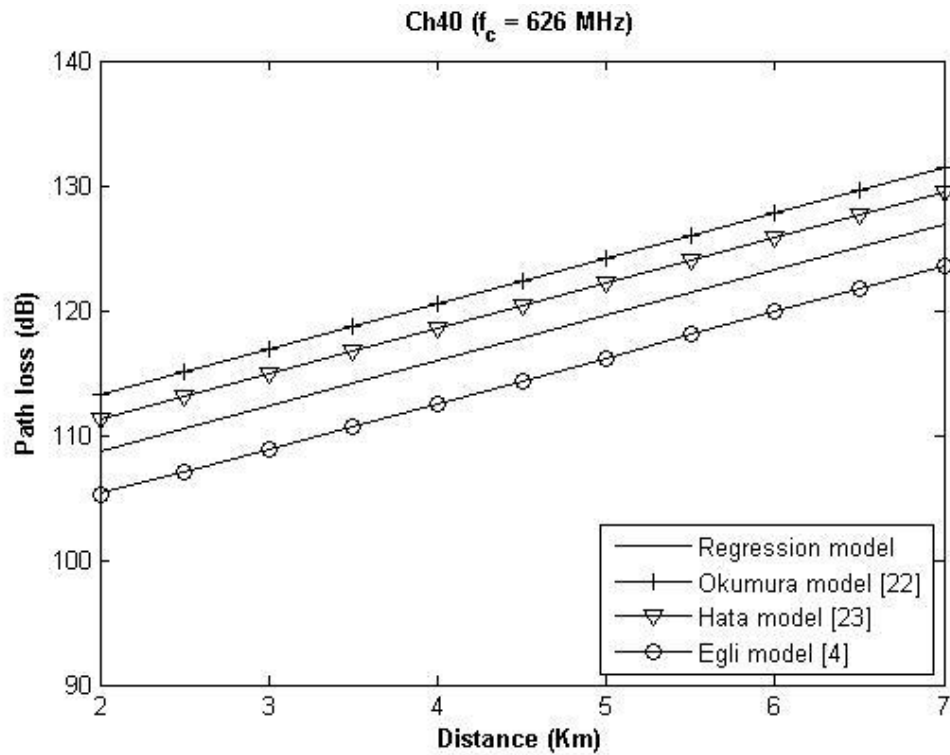
ในบทนี้แสดงการประเมินผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองวิจัยของแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีที่นำเสนอ จากวิธีเปรียบเทียบและจากวิธีความเหมาะสมที่สุด และแสดงค่าชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองที่นำเสนอด้วยค่าสถิติ และวิเคราะห์จากการนอร์มัลไลเซชันด้วยเส้นกราฟเปรียบเทียบจากข้อมูลที่ได้จากการวัดสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิทัลจริง

5.2 ผลการทดลองวิจัยแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีจากการเปรียบเทียบ

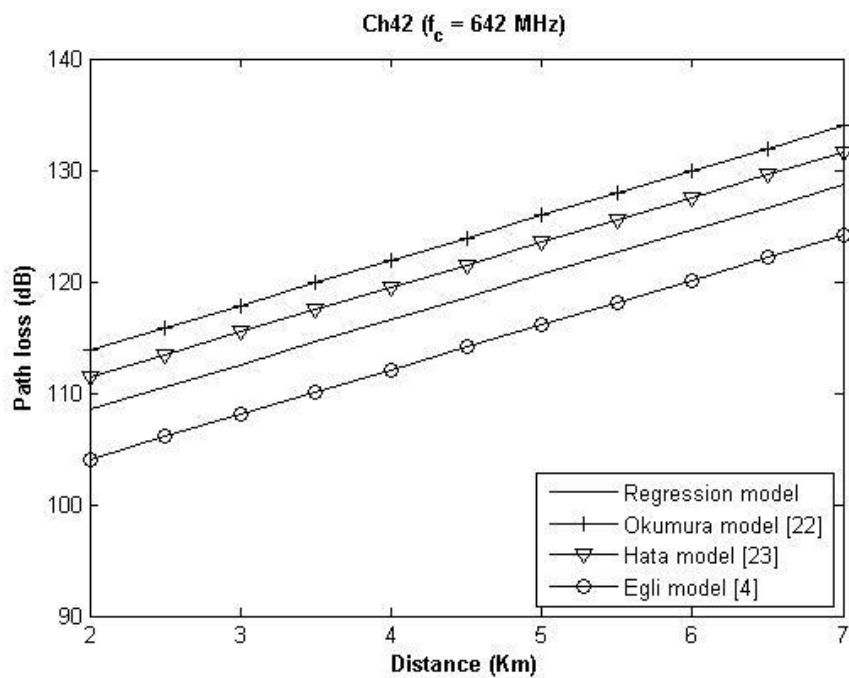
จากตารางที่ 4.1 แสดงค่า RMSE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีฮาดะ เปรียบเทียบกับแบบจำลองโอกูมูระ แบบจำลองอิกลิและแบบจำลองรีเกรสชัน จะเห็นได้ว่าค่า RMSE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีฮาดะมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีฮาดะ มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนาเพื่อให้เกิดความแม่นยำสำหรับนำไปใช้งานเฉพาะพื้นที่ และสามารถนำมาสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบเพื่อนำเสนอได้ตามสมการที่ 4.3 โดยแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาดะมีค่า RE ที่ใช้งานชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองแสดงตามตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าค่า RE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาดะมีค่าน้อยกว่าค่า RE ของแบบจำลองฮาดะเดิม ดังนั้นแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาดะที่นำเสนอสามารถเข้าใจข้อมูลจากการวัดได้มากกว่าแบบจำลองฮาดะเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น รูปที่ 5.1 5.2 5.3 และ 5.4 ด้วยการนอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีที่ได้จากการวัดสัญญาณซึ่งมีค่าแอมพลิจูดช่วง 105 – 130 dB และมีความสัมพันธ์กับระยะทางช่วง 2 – 7 กิโลเมตร และแสดงเส้นกราฟของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาดะ เปรียบเทียบกับเส้นกราฟของแบบจำลองฮาดะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ แบบจำลองอิกลิและแบบจำลองรีเกรสชัน ซึ่งเห็นได้ว่าเส้นกราฟของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาดะเข้าใจค่ากลางมากกว่าแบบจำลองอื่น ๆ

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่า RE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบที่ความถี่ต่างกัน

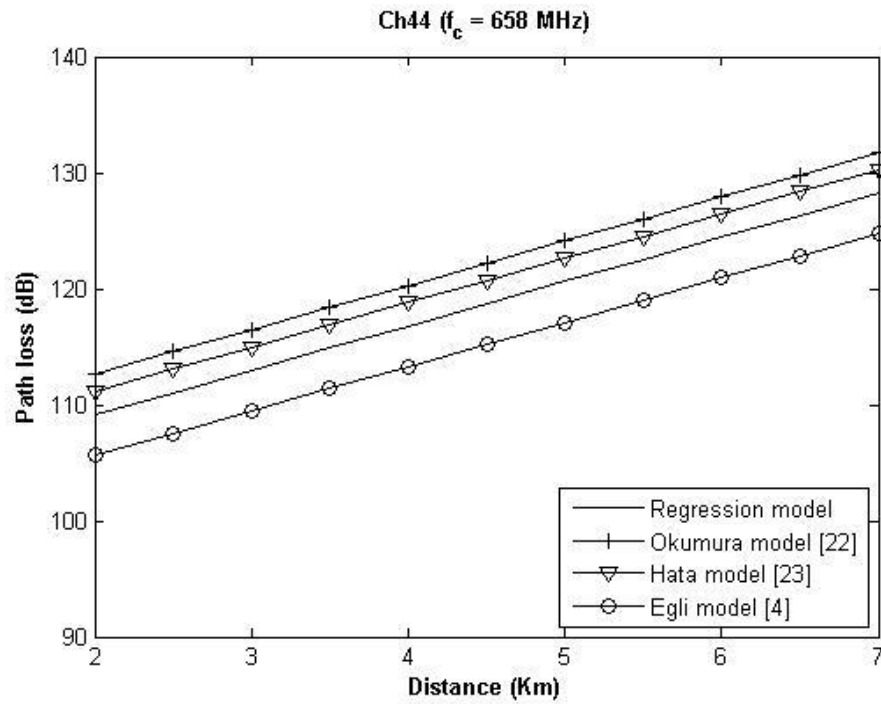
พื้นที่	ความถี่	RE	
		Calibrated Hata	Hata
Suratthani	Ch40 (626 MHz)	0.020	0.048
	Ch44 (658 MHz)	0.022	0.043
Songkla	Ch42 (642 MHz)	0.015	0.068
	Ch46 (674 MHz)	0.019	0.058



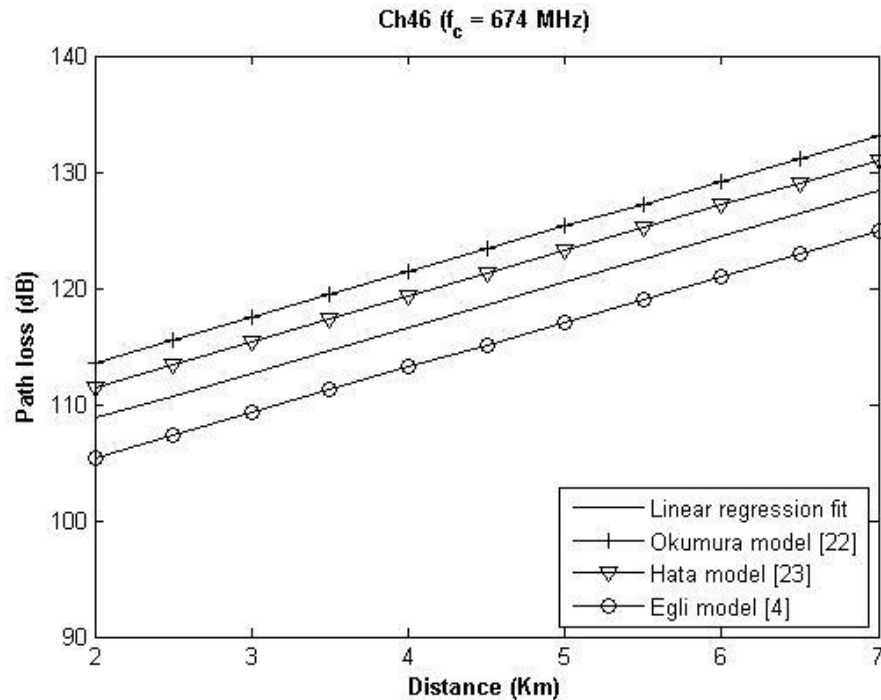
รูปที่ 5.1 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาทะ แบบจำลองโอคุมูระ และ แบบจำลองอิกลิ ของ Ch40 ความถี่ 626 MHz



รูปที่ 5.2 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาทะ แบบจำลองโอคุมูระ และ แบบจำลองอิกลิ ของ Ch42 ความถี่ 642 MHz



รูปที่ 5.3 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาทะ แบบจำลองโอกูมูระ และ แบบจำลองอีกลี ของ Ch44 ความถี่ 658 MHz



รูปที่ 5.4 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาทะ แบบจำลองโอกูมูระ และ แบบจำลองอีกลี ของ Ch46 ความถี่ 674 MHz

5.3 การสูญเสียเชิงวิถึที่มีความเหมาะสมที่สุด

จากตารางที่ 5.2 5.3 และ 5.4 แสดงค่า ME RMSE และ SD จากค่าสูญเสียเชิงวิถึตามลำดับ เปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองฮาดะ แบบจำลองโอกูมูระ แบบจำลองอิกลิและแบบจำลองอากาศว่าง โดยค่า ME RMSE และ SD ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึฮาดะ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ดังนั้นแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึฮาดะมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนาเพื่อให้เกิดความแม่นยำสำหรับนำไปใช้งานเฉพาะพื้นที่ และจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดสามารถหาค่าความเหมาะสมที่สุดได้ตามตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงค่า E_{0new} และ β_{sysnew} เพื่อนำไปใช้งานสร้างแบบจำลองความเหมาะสมที่สุดฮาดะ และจากแบบจำลองความเหมาะสมที่สุดฮาดะจะได้รับค่า ME RMSE และ SD ที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองฮาดะเดิม และตารางที่ 5.5 แสดงเปรียบเทียบค่า RE ซึ่งใช้งานชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองที่นำเสนอและค่า RE ของแบบจำลองความเหมาะสมที่สุดฮาดะมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะที่นำเสนอ สามารถเข้าถึงข้อมูลจากการวัดได้มากกว่าแบบจำลองฮาดะเดิม และแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น รูปที่ 5.5 5.6 5.7 และ 5.8 แสดงข้อมูลค่าสูญเสียเชิงวิถึที่ได้จากการวัดสัญญาณซึ่งมีค่าแวกซ์ตัวช่วง 105 – 150 dB มีความสัมพันธ์กับระยะทางช่วง 2 – 7 กิโลเมตร และแสดงเส้นกราฟของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะ เปรียบเทียบกับเส้นกราฟของแบบจำลองฮาดะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ แบบจำลองอิกลิและแบบจำลองอากาศว่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะ เข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากกว่าเส้นกราฟของแบบจำลองอื่น ๆ

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่า ME ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดฮาดะกับแบบจำลองฮาดะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ

ที่ตั้ง	ความถี่	ME (dB)			
		Optimized Hata	Hata model	Okumura	Egli
Surattani	CH40 (626 MHz)	5.610	7.823	23.993	26.006
	CH44 (658 MHz)	5.890	7.447	23.313	25.564
Songkla	CH42 (642 MHz)	5.500	9.806	15.324	29.610
	CH46 (674 MHz)	5.321	8.811	14.136	28.280
Average		5.580	8.472	19.191	27.365

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่า RMSE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดหาคะกับ
แบบจำลองหาคะเดิม แบบจำลองโอกุมุระ และแบบจำลองอีกลี

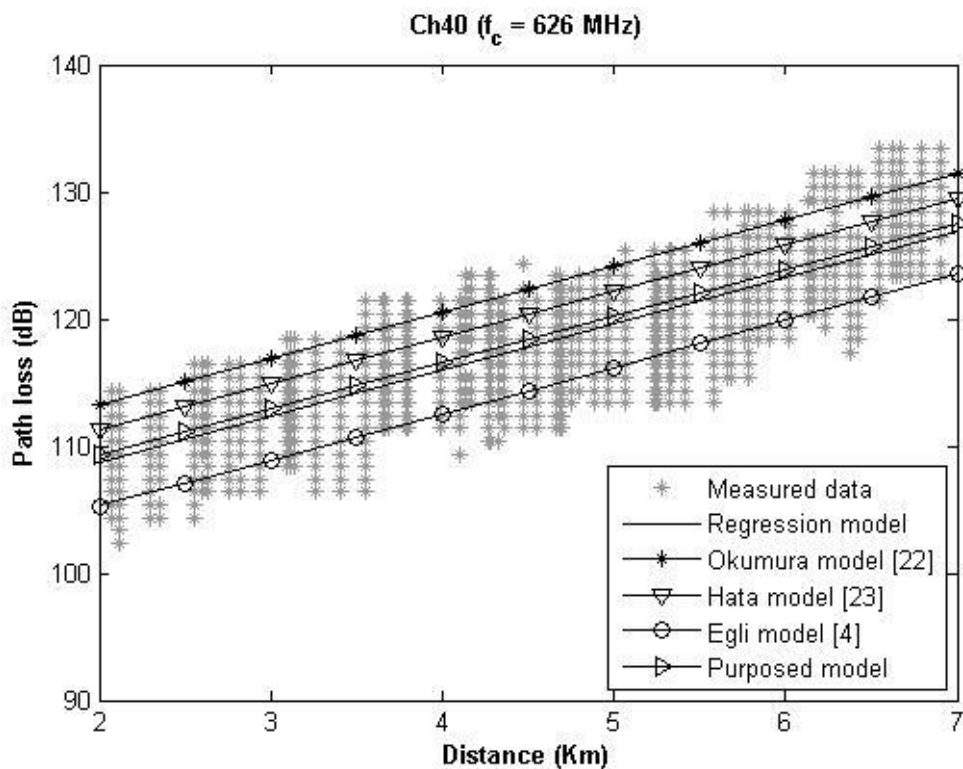
ที่ตั้ง	ความถี่	RMSE (dB)			
		Optimized Hata	Hata	Okumura	Egli
Surattani	CH40 (626 MHz)	6.872	9.245	24.870	26.754
	CH44 (658 MHz)	7.244	8.896	24.325	26.369
Songkla	CH42 (642 MHz)	6.717	11.065	16.573	30.285
	CH46 (674 MHz)	6.837	10.158	15.599	29.032
Average		6.917	9.841	20.342	28.110

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่า SD ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถึความเหมาะสมที่สุดหาคะกับ
แบบจำลองหาคะเดิม แบบจำลองโอกุมุระ และแบบจำลองอีกลี

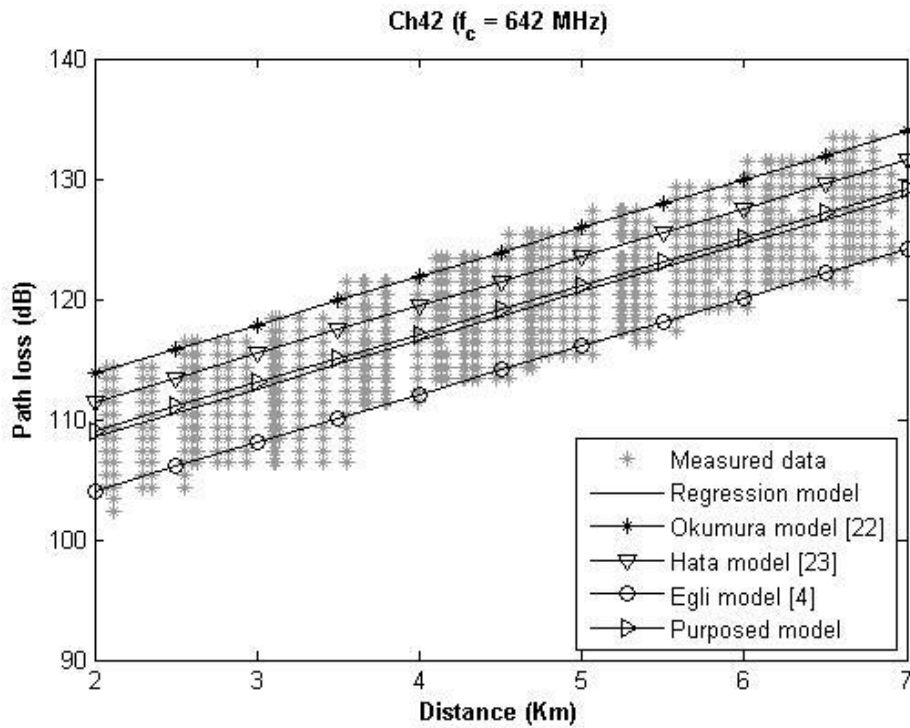
ที่ตั้ง	ความถี่	Standard deviation of error (dB)			
		Optimized Hata	Hata	Okumura	Egli
Surattani	CH40 (626 MHz)	3.971	4.929	6.299	6.667
	CH44 (658 MHz)	4.219	4.869	6.480	6.957
Songkla	CH42 (642 MHz)	4.680	5.131	6.319	6.402
	CH46 (674 MHz)	4.295	5.056	6.588	6.601
Average		4.291	4.996	6.421	6.657

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า RE ของแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีความเหมาะสมที่สุดฮาดะกับ
แบบจำลองฮาดะเดิม แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอีกลี

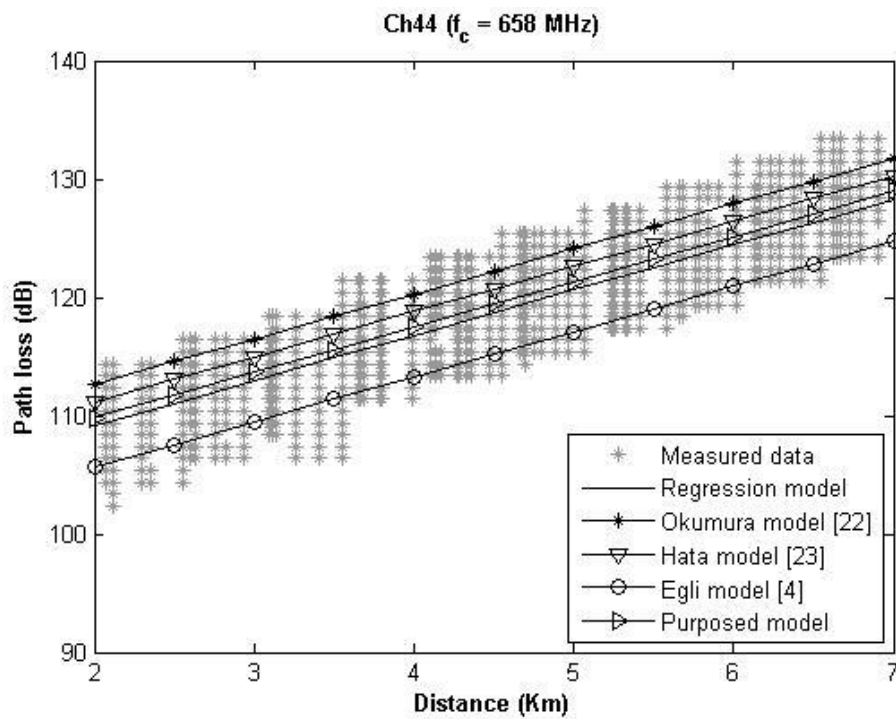
ที่ตั้ง	ความถี่	Relative error (dB)			
		Optimized Hata	Hata	Okumura	Egli
Surattani	CH40 (626 MHz)	0.017	0.048	0.083	0.123
	CH44 (658 MHz)	0.021	0.043	0.172	0.189
Songkla	CH42 (642 MHz)	0.025	0.068	0.115	0.223
	CH46 (674 MHz)	0.012	0.058	0.106	0.214
Average		0.019	0.054	0.119	0.187



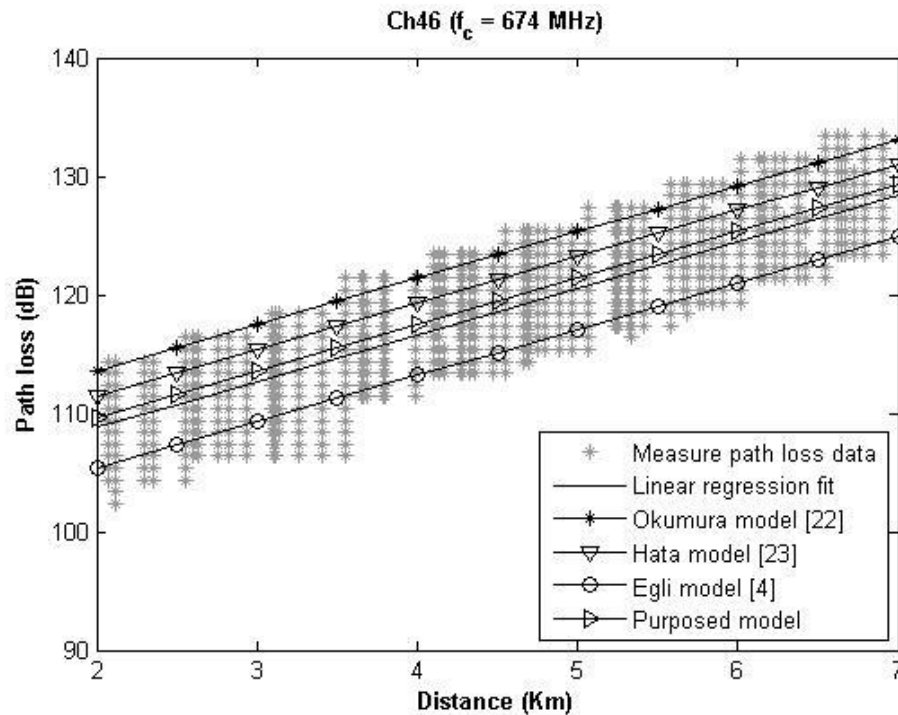
รูปที่ 5.5 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชัน
แบบจำลองฮาดะ แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอีกลี ของ Ch40 ความถี่ 626 MHz



รูปที่ 5.6 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาทะ แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ ของ Ch42 ความถี่ 642 MHz



รูปที่ 5.7 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชัน แบบจำลองฮาทะ แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอิกลิ ของ Ch44 ความถี่ 658 MHz



รูปที่ 5.8 นอร์มัลไลเซชันการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอ แบบจำลองรีเกรสชันแบบจำลองฮาทะ แบบจำลองโอกูมูระ และแบบจำลองอีกลี ของ Ch46 ความถี่ 674 MHz

5.4 สรุป

สำหรับในบทนี้ได้การวิเคราะห์และประเมินผลการทดลองวิจัยของแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีที่นำเสนอ จากวิธีเปรียบเทียบด้วยค่า RMSE ซึ่งได้รับแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาทะ และจากวิธีความเหมาะสมที่สุดบนพื้นฐานแบบจำลองฮาทะ โดยการเปรียบเทียบค่าสถิติที่ใช้ชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองที่นำเสนอ และได้แสดงผลจากการนอร์มัลไลเซชันด้วยเส้นกราฟเปรียบเทียบให้เห็นว่า แบบจำลองที่นำเสนอเข้าใกล้ข้อมูลที่ได้จากการวัดจริง และเข้าใกล้กับแบบจำลองรีเกรสชันมากกว่าแบบจำลองเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น ๆ

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีสำหรับทำนายการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล สำหรับพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย โดยแบบจำลองที่นำเสนอมีความแม่นยำสำหรับใช้งานเฉพาะพื้นที่ สามารถนำไปใช้งานออกแบบโครงข่ายในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทยได้ดี ทั้งนี้การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถีใช้วิธีการปรับเทียบด้วยค่าสถิติ เพื่อสร้างแบบจำลองปรับเทียบ และวิธีความเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดเพื่อสร้างแบบจำลองความเหมาะสมที่สุด และการชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองที่นำเสนอซึ่งชี้วัดด้วยค่าสถิติ โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีฮาดะมีความเหมาะสม สำหรับการนำมาพัฒนาเพื่อให้ความแม่นยำ เนื่องจากค่าสถิติ RMSE ME SD ของแบบจำลองฮาดะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น และเส้นกราฟค่าสูญเสียเชิงวิถีของแบบจำลองฮาดะแสดงได้ชัดเจนว่าเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด

- แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาดะ มีค่าสถิติชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองน้อยกว่าแบบจำลองฮาดะเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้รับมีความแม่นยำเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด และเส้นกราฟจากแบบจำลองปรับเทียบฮาดะแสดงได้ชัดเจนว่า เข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากกว่าเส้นกราฟของแบบจำลองฮาดะเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น

- แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีที่เหมาะสมที่สุดบนพื้นฐานฮาดะ มีค่าสถิติชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองน้อยกว่าแบบจำลองฮาดะเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้รับมีความแม่นยำเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากที่สุด และเส้นกราฟของแบบจำลองความเหมาะสมที่สุดฮาดะ แสดงได้ชัดเจนว่าเข้าใกล้ข้อมูลจากการวัดมากกว่าเส้นกราฟของแบบจำลองฮาดะเดิมและแบบจำลองเปรียบเทียบอื่น

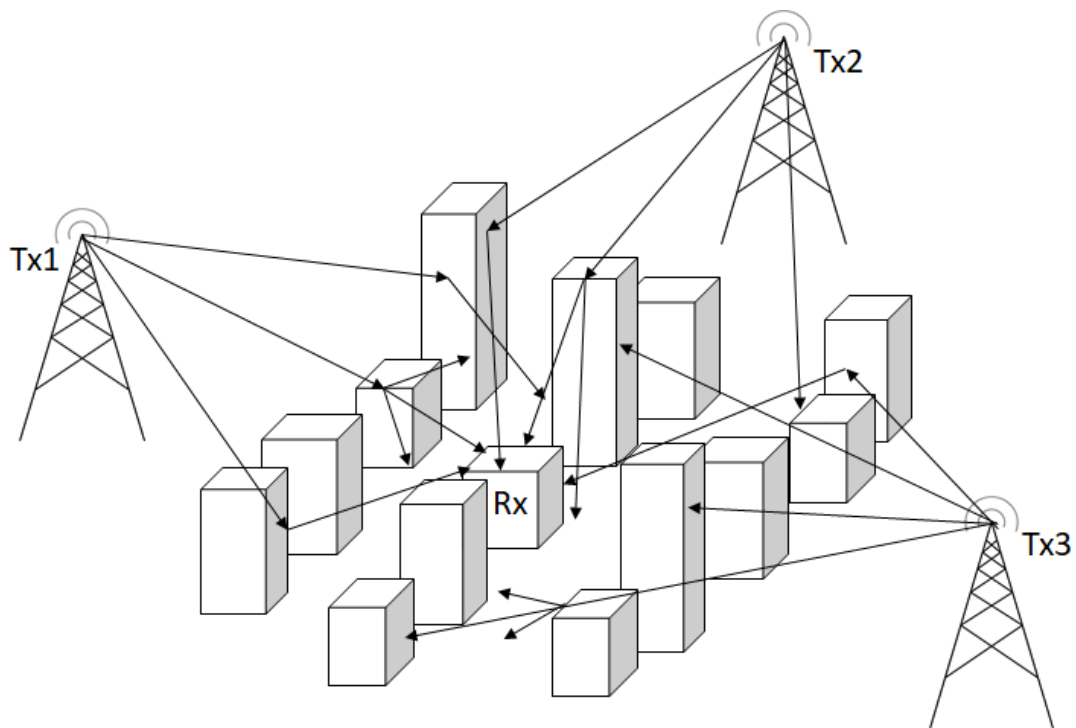
ทั้งนี้แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีที่นำเสนอ คือ แบบจำลองปรับเทียบฮาดะและแบบจำลองความเหมาะสมที่สุดฮาดะ สามารถนำไปใช้งานออกแบบโครงข่ายแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม และมีความผิดพลาดน้อยที่สุด

6.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยต่อไปดังนี้

- งานวิจัยนำเสนอแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีปรับเทียบฮาดะ และแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีความเหมาะสมที่สุดฮาดะ ที่สามารถยืนยันการนำไปใช้งานออกแบบโครงข่ายแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินดิจิทัลได้เฉพาะในพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทยเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลเฉพาะพื้นที่เมืองภาคใต้ของประเทศไทย ทั้งนี้หากต้องการสร้างและนำเสนอแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี ที่สามารถนำไปใช้งานออกแบบโครงข่ายสำหรับประเทศไทย จำเป็นต้องใช้ข้อมูลในพื้นที่เมืองในหลายจังหวัดทั่วประเทศ เพื่อยืนยันความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองที่นำเสนอ

- การพัฒนาแบบจำลองสูญเสียเชิงวิถี สามารถใช้วิธีการอื่น เช่น วิธีพัฒนาโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) [33] วิธีการเคลื่อนที่อนุภาค (Particle Swarm Optimization) [34] ซึ่งผลลัพธ์สามารถนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ เพื่อหาวิธีการที่ให้ความแม่นยำมากที่สุด ในอนาคตจะศึกษาวิจัยต่อไปทางด้านโครงข่ายความถี่เดียวสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัล



รูปที่ 6.1 โครงข่ายความถี่เดียวสำหรับการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ รายงานผลการศึกษาและจัดทำมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับโทรศัพท์ระบบบะดิจิตัล: คณะอนุกรรมการเฉพาะกิจ กทช. 2552
- [2] สำนักงาน กสทช. แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรศัพท์ภาคพื้นดินในระบบดิจิตอล : 2558
- [3] T.S. Rappaport, “Wireless Communications Principles and Practice,” Prentice Hall, 2002
- [4] R. Mardeni and K. F. Kwan, “Optimization of Hata Propagation Model in Suburban Area in Malaysia,” Progress in Electromagnetics Research, Vol. 13, pp.91-106, 2010.
- [5] R. Mardeni and L. Yih Pey, “Path Loss Model Optimization for Urban Outdoor Coverage Using Code Division Multiple Access (CDMA) System at 822MHz,” Modern Applied Science, Vol.6, No.1, pp.28-42, 2012.
- [6] A. Ekeocha, N. Onyebuchi, L. Uzoechi and G. Ononiwu, “Optimization of Cost 231 Model for 3 G Wireless Communication Signal in Suburban Area of Port Harcourt, Nigeria,” International Journal of Engineering Science & Research Technology, Vol.5(5), pp.83–88, 2016.
- [7] L. Nissirat, M. Ismail and M. A. Nisirat, “Macro-Cell Path Loss Prediction, Calibration and Optimization by Lee’s Model for South of Amman City, Jordan at 900 and 1800MHz,” Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol.41, No.2, pp.253-258, 2012.
- [8] I. Joseph and C.C. Konyeha, “Urban Area Path Loss Propagation Prediction and Optimisation Using Hata Model ath 800MHz,” Journal of Applied Physics, Vol.3(4), pp.8-18, 2013.
- [9] A. Bhuvaneshwari, R. Hemalatha and T. Satyasavithri, “Statistical Tuning of the Best Suited Prediction Model for Measurements made in Hyderabad City of Southern India,” Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, 23-25 October, 2013.
- [10] W. Bhupuok and K. Dejhan, “A New Method for Prediction 3G Path Loss Propagation in Suburban of Thailand,” ECTI-CON 2012, Phetchaburi Thailand, May 16-18, 2012.
- [11] European Broadcasting Union, “Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2,” EBU Tech3348, Geneva, October, 2014.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] 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, 2013.
- [13] G. Regueiro, U. Gil, M. Velez, I. Eizmendi and P. Angueira, “Field Trials Based Planning Parameters for DVB-T2 Indoor Reception,” IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.61(2), pp.251-261, June, 2015.
- [14] International Telecommunication Union, “Transition from Analogue to Digital Terrestrial Broadcasting,” ITU-R BT.2140-7, 2014.
- [15] The Industry Association for Digital Television in the UK, “UK Digital Terrestrial Television Requirements for Interoperability,” Digital TV Group, 2010.
- [16] Digital Terrestrial Television Action Group, “ Understanding DVB-T2: Key Technical, Business & Regulatory Implications,” DigiTAG, 2009.
- [17] European Broadcasting Union, “ Digital Video Broadcasting : Frame Structure Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2),” ETSI EN 302 755 V1.3.1, April, 2012.
- [18] พิทักษ์ แก้วบุญส่ง และ วีระศักดิ์ คงฤทธิ์ การศึกษาความเป็นไปได้การลงทุนโครงข่ายแพร่กระจายคลื่นโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัลของประเทศไทย : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี. 2557
- [19] International Telecommunication Union, “ Planning Criteria, including Protection Ratios, for Second Generation of Digital Terrestrial Television Broadcasting Systems in the VHF/UHF Bands,” Recommendation ITU-R BT.2033, February, 2015.
- [20] L. Kibona and A. Sarin, “ Performance Evaluation of DVB-T2 Broadcasting Network : A Case Study of Daressalaam, Tanzania,” Computer Engineering and Intelligent Systems, Vol.5, No.7, 2014.
- [21] International Telecommunication Union, “ Spectrum Limit Masks for Digital Terrestrial Television Broadcasting,” Recommendation ITU-R BT.1206-2, June, 2014.
- [22] Y. Okumura, “Field strength and its variability in UHF and VHF land-mobile radio service”, Rev. Elec. Commun. Lab., vol. 16, 1968.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] M. Hata, “ Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service,” IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol.VT-29, No. 3, 1980, pp.317-325.
- [24] ธวัชชัย เมธีวรัญญู วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการจำลองทางวิทยาศาสตร์ขั้นสูง : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2553.
- [25] Z. Nadir and M. B. Suwailam, “ Pathloss analysis at 900 MHz for outdoor Environment,” International Conference of Communications, Signal Processing and Computers, TBD China, August 5-8, 2014.
- [26] A. Deme, D. Dajab, B. Bajoga, M.M. Azu and D. Choji, “ Hata-Okumura model computer analysis for path loss determination at 900MHz for Maiduguri, Nigeria,” Mathematical Theory and Modelling, Vol.3, No.3, 2013.
- [27] L. A. Missirat, M. Ismail, M. Nisirat and M. Singh, “ Lee’s path loss model calibration and prediction for Jiza Town, South of Aman City, Jordan at 900MHz,” IEEE International RF and Microwave Conference, Seremban, Malaysia, Dec.r 12-14, 2011.
- [28] Z. Nadir, “ Seasonal path loss modeling at 900MHz for OMAN,” International Conference on Telecommunication Technology and Applications, Proc .of CSIT, 2011.
- [29] U. Idigo, V. E. Azubogu, A. C. Ohaneme and T. L. Alumona, “ Path loss characterization of wireless propagation for South-Region of Nigeria,” International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol.3, No.3, June, 2011.
- [30] N.C. Gerald, S.U. Ufoaroh, C.O. Ezeagwu and A.C. Ejiofor, “Path loss precidtion for GSM mobile networks for urban region of ABA, South-East Nigeria,” International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol. 3(2), February, 2014.
- [31] D. A. Shalangwa and G. Jerome, “Path loss propagation model for Gombi Town Adamawa State Nigeria,” International Journal of Computer Science and Network Security, Vol.10, No.6, June, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [32] P. Keawbunsong and S. Promwong, “ Optimization of path loss model for prediction DTTV propagation in urban area of southern Thailand,” in Proc. ISTIE conf., Bali, Indonesia, pp.26-30, 2015.
- [33] M.M. Joseph, O.M. Callistus and A.I. Gabriel, “ Application of artificial neural networks for path loss prediction in urban maccrocellular environment,” American Journal of Engineering Research, Vol.3(2), No.4, 2014.
- [34] M. Garah, H. Oudira, L. Djouane and M. Hamdiken, “Partical swarm optimization for the path loss reduction in suburban and rural area,” International Journal of Electrical and computer engineering, Vol.7, No.4, August, 2017.

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่

1. P. Keawbunsong, S. Duangsuwan, P. Supanakoon and S. Promwong, “Quantitative Measurement of Path Loss Model Adaptation Using the Least Squares Method in an Urban DVB-T2 System,” International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2018, Article ID 7219618, page 1-8, 2018.

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการ

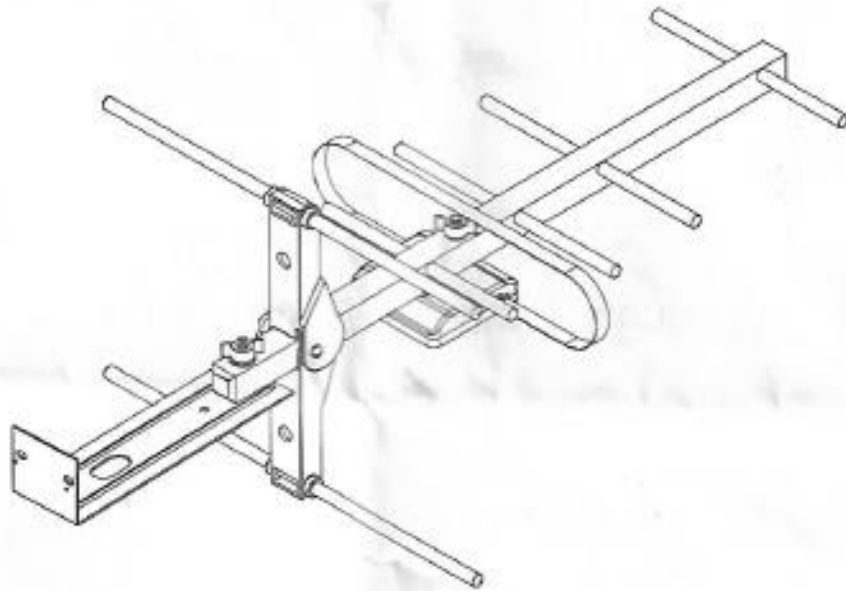
1. P. Keawbunsong and S. Promwong, “Okumura-Hata Model Optimization for DVB-T2 Propagation in Urban Area of Surattani, Southern Thailand,” 2015 Thailand – Japan Microwave (TJMW 2015), Bangkok, Thailand, 6-8 Aug., 2015.
2. P. Keawbunsong and S. Promwong, “Comparison on Optimization and Calibration Methods for DTTV Propagation in Urban Area of Surattani, Southern Thailand,” 2015 Thailand – Japan Microwave (TJMW 2015), Bangkok, Thailand, 6-8 Aug., 2015.
3. P. Keawbunsong and S. Promwong, “Comparison Study on Path Loss Model for DVB-T2 Propagation in Urban Area,” 2015 IEEE International Conference on Antenna Measurement & Applications (2015 IEEE CAMA), Chiang Mai, Thailand, pp. 21-24, 30 Nov. – 2 Dec., 2015.

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ค
สายอากาศและเครื่องมือวัด

แผงสายอากาศโทรทัศน์รับสัญญาณระบบ Digital UHF (ช่อง 21-69)

รุ่น D7E



Features (คุณสมบัติทั่วไป)

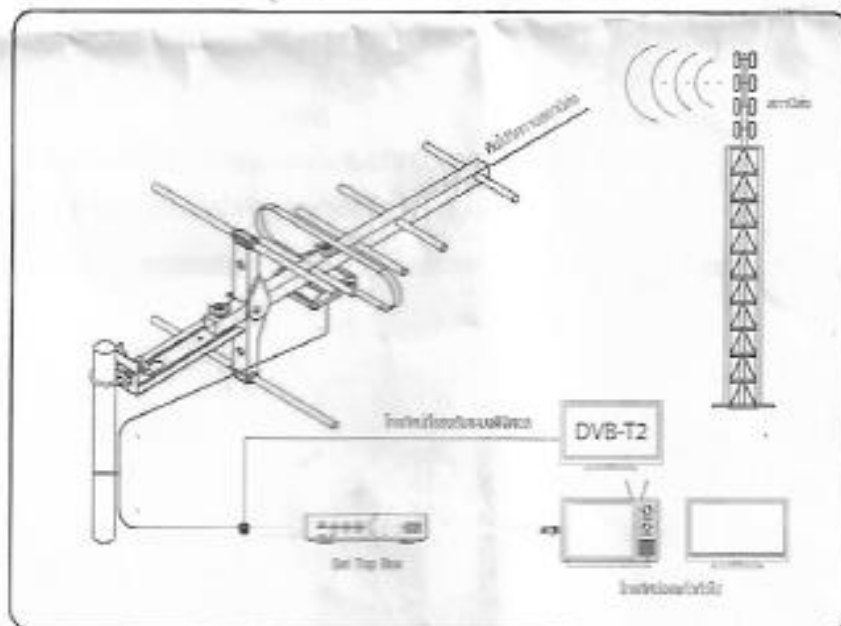
- มี Gain การรับสูง สามารถรับได้ 1-60 กม. จากสถานีส่งที่ออกอากาศระบบ UHF ทั่วประเทศ
- ทำจากวัสดุที่ได้มาตรฐาน ออกแบบให้มีความเหมาะสมกับระบบ UHF (ช่อง 21-69)
- ติดตั้งง่าย สะดวกรวดเร็ว ใช้เวลาน้อย

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย "ห้ามลอกเลียนแบบ"

SPECIFICATIONS (คุณสมบัติเฉพาะ)

Model (ชื่อรุ่น)	D7E
Element (อีลีเมนต์)	7E
Reception Range (แถบความถี่)	UHF 470-862 MHz
Channel (ช่องโทรทัศน์)	CH 21-69
Gain (อัตราขยาย)	5-8 dB
Beamwidth Horizontal (ความกว้างของคลื่นแนวราบ)	56°
Front to Back Ratio (อัตราส่วนหน้าต่อหลัง)	>10 dB
VSWR (อัตราส่วนคลื่นนิ่ง)	<1.5 : 1
Boom Length (ความยาวขี้น)	45 cm.
Boom Material (วัสดุ)	Aluminium
Cable Connection (สายนำสัญญาณ)	75 ohm

ภาพแสดงการปรับหันทิศทางและติดตั้งเสาอากาศเพื่อรับสัญญาณดิจิทัล



การที่เสาอากาศดิจิทัลจะสามารถรับสัญญาณที่มีคุณภาพการรับสัญญาณที่ดีขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การติดตั้งเสาอากาศให้ถูกต้อง การปรับทิศทางเสาอากาศให้ตรงกับตำแหน่งของเสาอากาศส่งสัญญาณ การเลือกตำแหน่งติดตั้งเสาอากาศให้เหมาะสม การเลือกจุดติดตั้งให้เหมาะสม



HD RANGER +

*Evolution? **NO. Revolution!***

“**The SIXTH
GENERATION
field meter FROM
PROMAX**”



Test and Measurement Instruments C.C.

Tel: 011 613 4365

Fax: 011 613 4361

Email: t.mi@iafrica.com

DVB-T2/C2/S2
DVB-T2 lite

DOLBY
DIGITAL PLUS

MPEG-4
HDTV

lte

RDS

Specifications

SPECIFICATIONS	HD RANGER+
GENERAL Digital frequency synthesis Tuning modes Channel plan Resolution Analogue and digital signal identification	From 5 to 1000 MHz (terrestrial) and from 950 to 2150 MHz (satellite) Channel or frequency (IF or downlink at satellite band) Configurable on demand 10 kHz Automatic, with no user intervention
VIDEO Digital modulations Resolutions Video formats SI/PSI data Colour system TV standard Aspect ratio	DVB-T2, DVB-T2 <i>lite</i> , DVB-S2, DVB-C2, DVB-T, DVB-S, DVB-C 1080, 720, 576. Progressive or interlaced MPEG-2 (MP@HL), MPEG-4 AVC H.264 Service list and main PIDs PAL, NTSC, SECAM M, N, B, G, I, D, K and L 16:9, 4:3
DIGITAL AUDIO CODECS	MPEG-1, MPEG-2, HE-AAC, Dolby Digital, Dolby Digital Plus
RF INPUT Maximum signal Maximum input voltage DC to 100 Hz 5 MHz to 2150 MHz	Universal connector with BNC or F adapter, 75 Ω 130 dBμV 50 V rms (powered by the AL-103 power charger) 30 V rms (not powered by the AL-103 power charger) 140 dBμV (protected at least for 30 seconds)
DIGITAL MEASUREMENTS DVB-T2 (COFDM) DVB-S2 (QPSK/8PSK) DVB-C2 (COFDM) DVB-T (COFDM) DVB-S (QPSK) DVB-C (QAM)	Numeric and level bar indication Channel power, CBER, MER (up to 35 dB), C/N ratio, LBER, BCH ESR, LDPC iterations, Wrong packets Channel power, CBER, LBER, MER (up to 30 dB), C/N ratio, BCH ESR, Wrong packets, Link margin Channel power, CBER, MER (up to 35 dB), C/N ratio, LBER, BCH ESR, LDPC iterations, Wrong packets Channel power, CBER, VBER, MER (up to 35 dB), C/N ratio, Link margin Channel power, CBER, VBER, MER (up to 30 dB), C/N ratio, Link margin Channel power, BER, MER (up to 35 dB), C/N ratio, Link margin
ANALOGUE MEASUREMENTS	Level, V/A ratio, C/N ratio (terrestrial bands) / Level, C/N ratio (satellite bands)
SPECTRUM ANALYSER MODE Measurement range and bandwidth Selectable SPAN Markers Reference level Measurements Analogue channels Digital channels Spectrum range	From 10 dBμV to 130 dBμV. Bandwidth 100 kHz <i>Full span</i> (full band) - 500 - 200 - 100 - 50 - 20 - 10 MHz 1, with frequency and level indication From 65 dBuV to 135 dBuV (5 dB steps) V/A ratio (terrestrial only), Level, C/N ratio Channel power, C/N ratio, MER, BER (according to modulation type) SPAN, Dynamic range and Reference level (available by means of arrow cursors)
TOOLS & ADVANCED FUNCTIONS	Constellation diagram for DVB-T2/S2/C2 and DVB-T/S/C Echoes analyser mode for DVB-T2/C2 and DVB-T Datalogger (automatic measurement acquisition and storage) ⁽¹⁾ LTE ingress for DVB-T2/C2 and DVB-T/C SAT IF test (IF distribution network response for satellite band) ⁽²⁾ Attenuation test function (signal distribution network response for terrestrial band) ⁽³⁾ DiSEqC™ 1.2 generator ⁽⁴⁾ . External units supply: 5/12/13/18/24V + 22 kHz signal (depending on band) PLS sequence detection ISI filtering for second generation DVB standards (DVB-T2, DVB-C2, DVB-S2) FM radio with RDS decoder (Radio Data System) Screenshot key USB interface: flash drive mass storage, serial port emulation, CDC "Communications Device Class"
CONNECTIONS	USB, Input and output Video/Audio multipole jacks
INCLUDED ACCESSORIES	RCA to multipole jack adaptor cable for Video and Left/Right audio USB Cable (A) Female to Mini USB (A) Male, Car lighter charger, External DC charger, Mains cord, Case, Transport belt, Transport suitcase, F adapters: F/H to BNC/H, F/H to DIN/H, F/H to F/H
MECHANICAL FEATURES Dimensions Weight	290 (W.) x 185 (H.) x 65 (D.) mm. Total size: 3,487 cm ³ 1.9 kg

DESIGN AND SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGES WITHOUT PRIOR NOTICE. 04/13.

(1) Using NetUpdate 4 software application under Windows PC platform.

(2) SAT IF Test function designed to be used with **RP-050** IF multiple pilot generator.

(3) Attenuation Test function designed to be used with **RP-080** multiple pilot generator.

(4) DiSEqC™ is a trademark of EUTELSAT.



Test and Measurement Instruments C.C.

Tel: 011 683 4365

Fax: 011 683 4461

Email: t.m.i@iafrica.com

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพิทักษ์ แก้วบุญส่ง
วัน เดือน ปีเกิด	9 พฤษภาคม 2516 ที่จังหวัดพัทลุง
ที่อยู่	61/33 หมู่ 3 ถนนพอขุนทะเล ตำบลมะขามเตี้ย อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000 โทร. 0909802658
ประวัติการศึกษา	2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2557 บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาวิชาบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2537 – 2538	ช่างเทคนิค ประจำศูนย์บริการยะลา บริษัท ที.เอ็น. นิกซ์โทรฟคอมพิวเตอรส์ (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2538 – 2545	ช่างอิเล็กทรอนิกส์ องค์การสื่อสารมวลชนแห่งประเทศไทย
พ.ศ. 2545 – ปัจจุบัน	วิศวกรอาวุโส ศูนย์วิศวกรรมภาคใต้ บมจ.อสมท (จ.สุราษฎร์ธานี) บริษัท อสมท จำกัด (มหาชน)