

การสร้างแบบจำลองการแพร่คลื่นความถี่วิทยุสำหรับย่านความถี่ต่ำภายในถ้ำ



นายอรรถวิท จันทอุปสี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

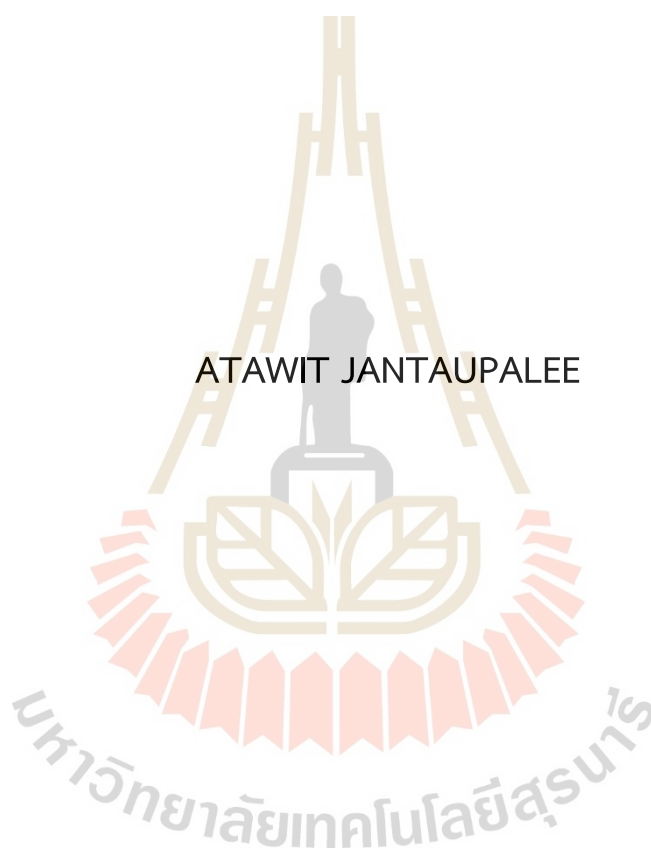
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2566

THE MODELING OF RF WAVE PROPAGATION FOR LOW
FREQUENCY IN CAVES

ATAWIT JANTAUPALEE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy in Telecommunication and Computer Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การสร้างแบบจำลองการแพร่คลื่นความถี่วิทยุสำหรับย่านความถี่ต่ำภายในถ้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นหน่วยงานรับผิดชอบดำเนินการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



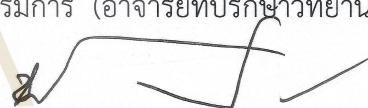
(ศ. ดร. ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. รังสรรค์ วงศ์สรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ. ดร. ชuwong พงศ์เจริญพาณิชย์)

กรรมการ



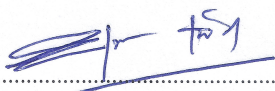
(รศ. ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

กรรมการ



(รศ. ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ



(รศ. ดร. ยุพาพร รักสกุลวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อรรถวิท จันทอุปสี : การสร้างแบบจำลองการแพร่คลื่นความถี่วิทยุสำหรับย่านความถี่ต่ำ
ภายในถ้ำ (THE MODELING OF RF WAVE PROPAGATION FOR LOW FREQUENCY IN
CAVES)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 163 หน้า.

คำสำคัญ: การสื่อสารในถ้ำ/การแพร่กระจายคลื่น/การสร้างแบบจำลอง/การจำลอง/ถ้ำ

ปัจจุบันการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในถ้ำธรรมชาติยังคงเป็นเรื่องที่ท้าทาย การจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีท่อนำคลื่นเนื่องจากผนังถ้ำเป็นสื่อนำไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองนี้มักใช้สำหรับความถี่สูงยิ่ง (Ultra-high frequency: UHF) ขึ้นไปเท่านั้น แบบจำลองท่อนำคลื่นดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเนื่องจากความถี่ตัด (Cutoff frequency) จากขนาดของอุโมงค์ ที่ทำให้คลื่นความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดเกิดการลดทอนสูงจนไม่สามารถแพร่กระจายได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคลื่นเหล่านั้นสามารถแพร่กระจายภายในอุโมงค์ได้ นอกจากนี้สภาพแวดล้อมภายในถ้ำนั้นแตกต่างจากอุโมงค์อย่างสิ้นเชิง ซึ่งสภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่ภายในถ้ำยังส่งผลต่อการลดทอนคลื่นโดยตรงอีกด้วย วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองการแพร่คลื่นความถี่วิทยุสำหรับย่านความถี่ต่ำภายในถ้ำตามธรรมชาติ โดยใช้วิธีการวัดทดสอบส่งคลื่นวิทยุภายในโพรงถ้ำ ณ ถ้ำเชียงดาว (หินปูน) และถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบปัจจัย กลไกการแพร่กระจาย และพฤติกรรมของคลื่นที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz ซึ่งอยู่ในแถบความถี่ต่ำ (Low frequency: LF) และแถบความถี่กลาง (Medium frequency: MF) หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการลดทอนของคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ ด้วยสมมุติฐานที่ได้จากการวัดทดสอบคือคลื่นความถี่ต่ำสามารถแพร่กระจายเข้าไปในผนังถ้ำรอบ ๆ ได้ด้วยสมบัติของความลึกผิวซึ่งทำให้น้ำหนักทางไฟฟ้าของโพรงถ้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังนำแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำในส่วนที่ใช้ทดสอบทั้งสองแห่งมาจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า CST Studio Suite เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวัดทดสอบ แบบจำลองท่อนำคลื่นแบบจำลองที่นำเสนอและผลการจำลอง จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอมีค่าการลดทอนที่ใกล้เคียงกับผลการวัดทดสอบและผลการจำลอง สุดท้ายนี้แนวคิดของแบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการทำนาย วิเคราะห์ และวางแผนการสื่อสารภายในโพรงถ้ำได้ อีกทั้งยังพัฒนาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่ต่ำในถ้ำ อุโมงค์ หรือเหมืองใต้ดิน และองค์ความรู้ด้านแม่เหล็กไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ ในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ATAWIT JANTAUPALEE: THE MODELING OF RF WAVE PROPAGATION FOR LOW
FREQUENCY IN CAVES. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. RANGSAN WONGSAN,
D.Eng., 163 PP.

Keyword: Cave communication/Wave propagation/Modeling/Simulation/Cave

The development of wireless communication technology within caves is still a challenge due to the physical characteristics of natural caves with non-uniform and complicated passages. The study of wave propagation inside a cave or tunnel in the past will be compared to waveguide theory because cave walls are electrically conductive. However, the waveguide model is limited as the cutoff frequency, determined by cave dimensions, attenuates frequencies below it. Despite theoretical limitations, lower frequencies can propagate in practice. Therefore, this thesis presents the modeling of RF wave propagation for low frequency in caves based on experimental study. The experimental study of the wave was measured at Chiang Dao Cave (limestone) and Patihan Cave (sandstone) to analyze factors, propagation mechanisms, and wave behavior at frequencies 300, 1000, 1650, 2325, and 3000 kHz, which are low-frequency (LF) and medium frequency (MF). The experimental results were used to develop a model for low-frequency wave attenuation within caves. The model assumes low-frequency waves can penetrate cave walls due to surface depth, increasing the electrical dimension. In addition, high-resolution 3D cave models were used to calculate the physical characteristics of the proposed model and further simulations using CST software. After that, comparisons between experimental results, the waveguide model, the proposed model, and CST simulations showed that the proposed model provides the most accurate attenuation values. The proposed model can be used to develop software for calculating the attenuation of low-frequency wave propagation inside the cave from other cave models. In conclusion, this research has significant implications for improving communication strategies in caves, tunnels, and underground mines, paving the way for future low-frequency wave applications.

School of Telecommunication Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature
Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา คอยให้คำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร.อ.ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวิหัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตพงศ์ เวชไธสงค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูญาญา และอาจารย์ ดร.พีระสิทธิ์ คำสาลิ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ ทุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ในโครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ารหัสโครงการวิจัย BT62-1-(2)/004

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้บิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

นายอรรณวิธ จันทอุปสี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2.1 การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ	4
2.2.2 กลไกการแพร่กระจายคลื่น	10
2.2.3 สมบัติทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของหิน	16
2.2.4 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ	19
2.2.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติ ในการจำลองการแพร่กระจายคลื่น	22
2.3 สรุป	25
3. การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ	26

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.1 บทนำ	26
3.2 ความถี่สำหรับศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่น	26
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ	27
3.4 ขั้นตอนการทดสอบ	30
3.5 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ	33
3.5.1 การทดสอบภายในถ้ำเชียงดาว (หินปูน)	33
3.5.2 การทดสอบภายในถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย)	37
3.6 อภิปรายผลการทดสอบ	41
3.6.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)	41
3.6.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)	43
3.7 สรุป	46
4. การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ	47
4.1 บทนำ	47
4.2 การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ	47
4.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำกับแบบจำลองที่นำเสนอ	51
4.4 การจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง CST STUDIO SUITE	70
4.5 การอภิปรายผล	81
4.5.1 ผลการศึกษาของถ้ำเชียงดาว (หินปูน)	82
4.5.2 ผลการศึกษาของถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย)	83
4.6 สรุป	84
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปผลการวิจัย	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	93
ประวัติผู้เขียน	163

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การกำหนดย่านความถี่วิทยุโดย ITU..... 11
3.1	ความถี่ที่กำหนดสำหรับใช้ทดสอบแต่ละแถบความถี่ 27
4.1	ค่าความถี่สำหรับแต่ละความถี่ระหว่างถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์..... 49
4.2	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 300 KHz 60
4.3	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 1000 KHz 61
4.4	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 1650 KHz 62
4.5	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 2325 KHz 63
4.6	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 3000 KHz 64
4.7	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 300 KHz 65
4.8	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1000 KHz 66
4.9	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1650 KHz 67
4.10	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 2325 KHz 68
4.11	ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 3000 KHz 69
4.12	ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาว 72

สารบัญตาราง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์	74
4.14 การแสดงผลการเปรียบเทียบการลดทอนต่อระยะทางของถ้ำเขียงดาว (หินปูน).....	82
4.15 การแสดงผลการเปรียบเทียบการลดทอนต่อระยะทางของถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย)	83



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	การเปรียบเทียบรูปร่างของอุโมงค์กับรูปเรขาคณิตของท่อนำคลื่น	5
2.2	การทดสอบของ KJELDEN AND HOPKINS (2006)	6
2.3	ผลการทดสอบแบบ LOS ของ KJELDEN AND HOPKINS (2006)	7
2.4	ผลการทดสอบแบบ NLOS ของ KJELDEN AND HOPKINS (2006)	7
2.5	การทดสอบการแพร่กระจายของ RAK AND PECHAC (2007)	8
2.6	ผลการทดสอบแบบ LOS ความถี่ 1.3 GHz ของ BEDFORD AND KENNEDY (2014)	9
2.7	ผลการทดสอบแบบ NLOS ความถี่ 900 MHz ของ SOO ET AL. (2018)	9
2.8	ผลการทดสอบในขณะที่มีอุปสรรคกีดขวาง ความถี่ 2.4 GHz ของ BEDFORD ET AL. (2016)	10
2.9	ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุ	12
2.10	การแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุแบบคลื่นผิว	14
2.11	การแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุแบบคลื่นอากาศ	15
2.12	การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นไดอิเล็กตริกหลายชั้น	17
2.13	ความหยาบและความเอียงของผนังอุโมงค์	22
2.14	อุปกรณ์กวาดตรวจ LIDAR 3D SCANNER รุ่น LEICA BLK 360	23
2.15	แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำ จาก MICHAEL D. BEDFORD ET AL. (2020)	24
2.16	ผลการทดสอบที่ความถี่ 1.3 GHz ของ MICHAEL D. BEDFORD ET AL. (2020)	24
3.1	สายอากาศบ่วง PASSIVE SHIELDED (20 HZ–1 MHZ AH SYSTEMS SAS-565L)	28
3.2	สายอากาศ ISOTRON 200B	28
3.3	สายอากาศบ่วง PASSIVE SHIELDED (1 KHZ–30 MHZ AH SYSTEMS SAS-564)	28
3.4	สายอากาศแบบกรวยสองฝั่ง BICONICAL (20 MHZ–1 GHZ AARONIA BICOLOG 20100)	29
3.5	สายอากาศโมโนโพลความยาว 1/4 ของความยาวคลื่น	29
3.6	แผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดสอบ	29
3.7	แผนภาพแสดงลักษณะการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ	30
3.8	การทำแผนที่พิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุพิกัดตำแหน่งในถ้ำ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์	31
3.9	การทำแผนที่พิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุพิกัดตำแหน่งในถ้ำ ณ ถ้ำเชียงดาว	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

3.10 แผนภาพแสดงตำแหน่งที่ใช้ทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุ ณ ถ้ำเชียงดาว	33
3.11 แผนภาพแสดงตำแหน่งที่ใช้ทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์	33
3.12 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ LF และ MF	33
3.13 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ HF	34
3.14 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ VHF	34
3.15 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ UHF	35
3.16 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ LF และ MF	35
3.17 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ HF	36
3.18 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ VHF	36
3.19 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ UHF	37
3.20 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ LF และ MF	37
3.21 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ HF	38
3.22 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ VHF	38
3.23 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ UHF	39
3.24 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ LF และ MF	39
3.25 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ HF	40
3.26 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ VHF	40
3.27 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำปาฏิหาริย์) ย่านความถี่ UHF	41
3.28 การสูญเสียการส่งผ่านคลื่นจากการทดสอบ LOS ทุกย่านความถี่	41
3.29 การสูญเสียการส่งผ่านคลื่นจากการทดสอบ NLOS ทุกย่านความถี่	43
4.1 ตัวอย่างหินจากถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์	48
4.2 การทดสอบสภาพนำทางไฟฟ้าของหินจากตัวอย่างถ้ำทั้งสองแห่ง	49
4.3 สมบัติความลึกผิวที่ส่งผลกระทบต่อขนาดทางไฟฟ้าของโพรงถ้ำ	50
4.4 ตัวอย่างการสำรวจถ้ำด้วยเทคโนโลยี LIDAR 3D SCANNER ณ ถ้ำเชียงดาว	52
4.5 แบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้จาก LIDAR SCANNER ในรูปแบบพอยต์คลาวด์ของถ้ำเชียงดาวส่วนที่ใช้ทดสอบ	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้จาก LIDAR SCANNER ในรูปแบบพอยต์คลาวด์ของถ้ำปาฏิหาริย์ส่วนที่ใช้ทดสอบ	53
4.7 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณขนาดของโพรงถ้ำและแบบจำลองความถี่ต่ำภายในถ้ำ ...	54
4.8 ผลการคำนวณแบบจำลองความถี่ต่ำภายในถ้ำจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	54
4.9 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเซียงดาวที่ความถี่ 300 KHZ	55
4.10 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเซียงดาวที่ความถี่ 1000 KHZ	55
4.11 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเซียงดาวที่ความถี่ 1650 KHZ	56
4.12 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเซียงดาวที่ความถี่ 2325 KHZ	56
4.13 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเซียงดาวที่ความถี่ 3000 KHZ	57
4.14 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 300 KHZ.....	57
4.15 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1000 KHZ	58
4.16 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1650 KHZ	58
4.17 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 2325 KHZ	59
4.18 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 3000 KHZ	59
4.19 แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเซียงดาวส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LIDAR SCANNER (มุมมองด้านหน้า)	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.20	แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LIDAR SCANNER (มุมมองด้านข้าง).....	71
4.21	แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LIDAR SCANNER (มุมมองด้านหน้า)	71
4.22	แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LIDAR SCANNER (มุมมองด้านข้าง).....	72
4.23	กราฟผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาว.....	73
4.24	กราฟผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์.....	74
4.25	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 300 KHz	76
4.26	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1000 KHz	76
4.27	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1650 KHz	77
4.28	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 2325 KHz	77
4.29	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 3000 KHz	78
4.30	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 300 KHz	78
4.31	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1000 KHz	79
4.32	การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1650 KHz	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.33 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 2325 KHZ	80
4.34 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 3000 KHZ	80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายภายในถ้ำยังคงเป็นเรื่องที่ท้าทาย สาเหตุหลักมาจากลักษณะทางกายภาพของถ้ำตามธรรมชาติที่มีทางเดินไม่สม่ำเสมอและซับซ้อนเมื่อเทียบกับอุโมงค์หรือเหมือง ซึ่งการใช้เพียงทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง (Free space) เพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอสำหรับการอธิบายพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำได้ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในถ้ำและอุโมงค์เป็นจำนวนมาก โดยแนวคิดในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์ได้เริ่มต้นจาก Emslie et al. (1975) ซึ่งได้เสนอแนวคิดในการเปรียบเทียบการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์เข้ากับทฤษฎีท่อนำคลื่น ที่แถบความถี่ UHF จากแนวคิดนี้ทำให้สามารถอธิบายการลดทอนที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ในอุโมงค์ได้ และทำให้นักคิดของ Emslie กลายเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับแบบจำลองการแพร่กระจายของคลื่นในเหมืองและถ้ำจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่การศึกษาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่แถบความถี่ UHF ขึ้นไปเป็นหลักเนื่องจากมีการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายทั่วไป แต่เมื่อนำระบบสื่อสารเหล่านั้นมาใช้งานภายในถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่ไม่สม่ำเสมอและมีความซับซ้อนจะเกิดการลดทอนที่สูงจนไม่สามารถสื่อสารได้ ทำให้ระบบสื่อสารไร้สายภายในเหมืองและถ้ำยังจำเป็นต้องใช้งานในแถบความถี่ที่ต่ำกว่าแถบความถี่กลาง (Medium frequency : MF) ลงไป เช่น ระบบสื่อสารทุติยภูมิ (Secondary communications systems) ที่ใช้งานในการกู้ภัยและช่วยเหลือภายในเหมือง หรือระบบวิทยุ HeyPhone ที่ใช้สำหรับการสื่อสารภายในถ้ำ เป็นต้น

ด้วยความสำคัญของระบบสื่อสารความถี่ต่ำภายในถ้ำและข้อจำกัดจากการใช้แบบจำลองท่อนำคลื่นสำหรับความถี่ต่ำที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุสำหรับย่านความถี่ต่ำภายในถ้ำ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายกลไกการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำพร้อมกับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายการลดทอนที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การลดทอนจากขนาดของโพรงถ้ำ หรือการลดทอนจากความหยาบและความเอียงของผนังถ้ำได้ โดยเริ่มต้นจากการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่เดินทางในโพรงถ้ำด้วยการทดสอบส่งคลื่นวิทยุที่ความถี่ 300, 1000, 1650, 2325 และ 3000 kHz ซึ่งอยู่ในช่วงแถบความถี่ต่ำ (Low frequency: LF) และแถบความถี่กลาง (MF) ณ ถ้ำเชียงดาว อำเภอ-

เชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นถ้ำหินปูนที่พบได้มากที่สุดในประเทศไทย และถ้ำปาฏิหาริย์ อำเภอลำปาง จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นถ้ำหินทราย พบได้ในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาศึกษาถึงพฤติกรรมและกลไกการแพร่กระจายคลื่น รวมไปถึงสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นของถ้ำทั้งสองแห่ง โดยผลการศึกษาจะถูกนำมาพัฒนาแบบจำลองการลดทอนของคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำจากแบบจำลองท่อนำคลื่นเดิม ด้วยสมมุติฐานคือคลื่นความถี่ต่ำสามารถแพร่กระจายเข้าไปในผนังถ้ำรอบ ๆ ได้ด้วยสมบัติของความถี่ต่ำ ซึ่งจะทำให้นิวตันทางไฟฟ้าของโพรงถ้ำมีขนาดเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับขนาดทางกายภาพ จากสมมุติฐานนี้จะทำให้สามารถอธิบายถึงสาเหตุที่คลื่นความถี่ต่ำสามารถแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำได้แม้ว่าจะมีความยาวคลื่นมากกว่าขนาดของโพรงถ้ำตามทฤษฎีท่อนำคลื่นก็ตาม นอกจากนี้ได้นำแบบจำลอง 3 มิติความละเอียดสูงในอัตราส่วน 1:1 ของโพรงถ้ำส่วนที่ใช้ทดสอบภายในถ้ำทั้งสองแห่ง มาใช้ในการคำนวณลักษณะทางกายภาพของถ้ำเพื่อใช้กับแบบจำลองที่นำเสนอ และนำมาจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า CST Studio Suite เพิ่มเติม หลังจากนั้นจึงเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวัดทดสอบผลลัพธ์จากแบบจำลองท่อนำคลื่น ผลลัพธ์จากแบบจำลองที่นำเสนอและผลลัพธ์จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST สุดท้ายจึงนำแบบจำลองที่ได้มาพัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวณการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำจากแบบจำลองของโพรงถ้ำอื่น ๆ ได้ ซึ่งจากแบบจำลองความถี่ต่ำและโปรแกรมที่นำเสนอจะสามารถนำไปใช้ในการทำนาย วิเคราะห์ และวางแผนการสื่อสารภายในถ้ำได้ อีกทั้งยังพัฒนาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่ต่ำในถ้ำ อุโมงค์ หรือเหมืองใต้ดิน และองค์ความรู้ด้านแม่เหล็กไฟฟ้าในด้านต่างๆ ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกลไกการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ
- 1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำธรรมชาติ
- 1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำสำหรับการจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวณการลดทอนคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ ให้สามารถใช้งานกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำอื่น ๆ ได้

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 คลื่นความถี่ต่ำที่แพร่กระจายภายในถ้ำจะมีกลไกการแพร่กระจายทั้งรูปแบบคลื่นในอากาศว่างและคลื่นผิว

- 1.3.2 สมบัติความลึกผิวของคลื่นความถี่ต่ำนั้นจะส่งผลให้ขนาดทางไฟฟ้าของถ้ามีขนาดเพิ่มมากขึ้นจากขนาดทางกายภาพของถ้า
- 1.3.3 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำที่พัฒนาขึ้น จะสามารถอธิบายการลดทอนของคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้าได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

การศึกษาและวัดทดสอบการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุภายในถ้าเชิงดาวและถ้าปาฏิหาริย์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อยู่ในช่วงฤดูฝนเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องความปลอดภัยของผู้ศึกษาซึ่งทำให้ผลที่ได้อาจจะไม่ครอบคลุมถึงสภาพแวดล้อมภายในถ้าขณะเกิดฝนตกช่วงฤดูฝนหรือขณะมีน้ำท่วมขังภายในถ้า

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับธรรมชาติของการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุในแถบความถี่ต่ำและแถบความถี่กลาง โดยยกเว้นความถี่ที่ต่ำกว่า 300 kHz เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตภายในถ้าโดยเฉพาะค้างคาวที่อาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก
- 1.5.2 ศึกษาและทดสอบภายในถ้าชนิดหินปูน ณ ถ้าเชิงดาว ช่วงวันที่ 12-13 มีนาคม 2564 และ 11 กันยายน 2564
- 1.5.3 ศึกษาและทดสอบภายในถ้าชนิดหินทราย ณ ถ้าปาฏิหาริย์ ช่วงวันที่ 25 มีนาคม 2564 และ 28 มิถุนายน 2564

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับกลไกการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้า
- 1.6.2 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้าธรรมชาติที่เสนอจะสามารถอธิบายการลดทอนของคลื่นความถี่ต่ำที่เกิดภายในถ้าได้
- 1.6.3 เป็นองค์ความรู้ในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติ สำหรับการจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้าหรือลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น เหมืองหรืออุโมงค์ เป็นต้น
- 1.6.4 โปรแกรมสำหรับคำนวณการลดทอนคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนาย วิเคราะห์ และวางแผนการสื่อสารภายในถ้าได้
- 1.6.5 สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับศาสตร์อื่นที่ใช้ประโยชน์จากการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำได้

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในโพรงถ้ำตามธรรมชาติ โดยเริ่มต้นศึกษาค้นคว้าตั้งแต่กลไกการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งคลื่นผิว (Surface wave) คลื่นอวกาศ (Space wave) และคลื่นฟ้า (Sky wave) เป็นต้น ถัดมาจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติต่าง ๆ ของตัวกลางซึ่งในที่นี้คือหินปูนและหินทรายที่ส่งผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงค้นคว้าเกี่ยวกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์และเหมืองที่มีลักษณะใกล้เคียงกับถ้ำในธรรมชาติเพื่อใช้สำหรับอ้างอิงในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ และสุดท้ายจะเป็นการค้นคว้าเกี่ยวกับการจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำหรืออุโมงค์ด้วยแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการสร้างแบบจำลองที่นำเสนอ

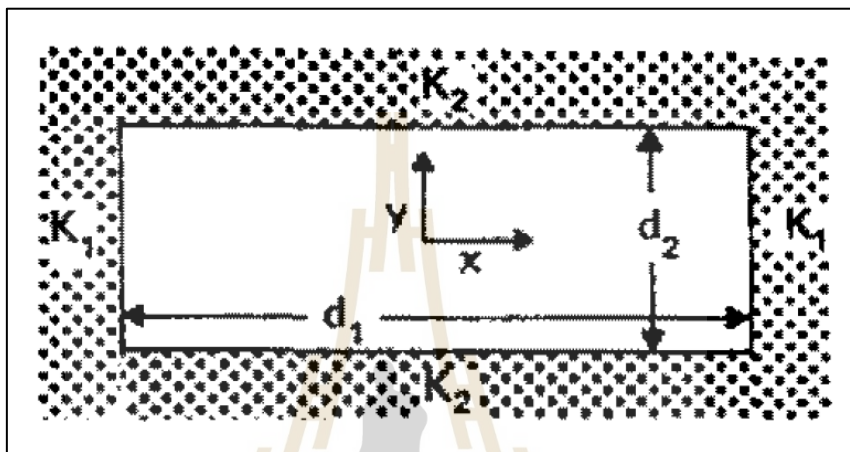
2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

ระเบียบวิธีในการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นโดยทั่วไปจะใช้วิธีการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental study) ในการศึกษาหลักการและพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การแพร่กระจายคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย (Wireless communication) ภายในพื้นที่เมืองและชนบท หรือการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์ เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ค้นคว้าแนวทางสำหรับการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำจากงานวิจัยต่าง ๆ ดังนี้

การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำและอุโมงค์ได้เริ่มต้นโดย Emslie et al. (1973) และ Emslie et al. (1975) ได้ทำการศึกษาทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์ของเหมืองถ่านหินด้วยวิธีการวัดทดสอบส่งคลื่นวิทยุในแถบความถี่ UHF ความถี่ตั้งแต่ 200 – 4000 MHz จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดทดสอบมาวิเคราะห์เทียบกับทฤษฎีท่อนำคลื่น ทำให้ได้ผลลัพธ์แบบจำลองการลดทอนของคลื่นที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การลดทอนจากการหักเหของคลื่นบนผนัง เพดานและพื้นถ้ำ การลดทอนจากความหยาบของผนัง การลดทอนจากความเอียงของผนัง การลดทอนจากการแพร่กระจายในขณะเกิดการหักเห ผลกระทบจากทิศทางของสายอากาศ

และการลดทอนจากการแทรกสลายอากาศ (Insertion) เป็นต้น จากงานวิจัยนี้ได้เป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์และถ้าในเวลาต่อมา โดยจากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบอุโมงค์เหมือนถ่านหินเข้ากับท่อนำคลื่น โดยกำหนดให้มีขนาดความกว้างอุโมงค์เท่ากับ d_1 และความสูงอุโมงค์เท่ากับ d_2 ซึ่งประกอบไปด้วยผนังที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ K_1 และเพดานมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ K_2



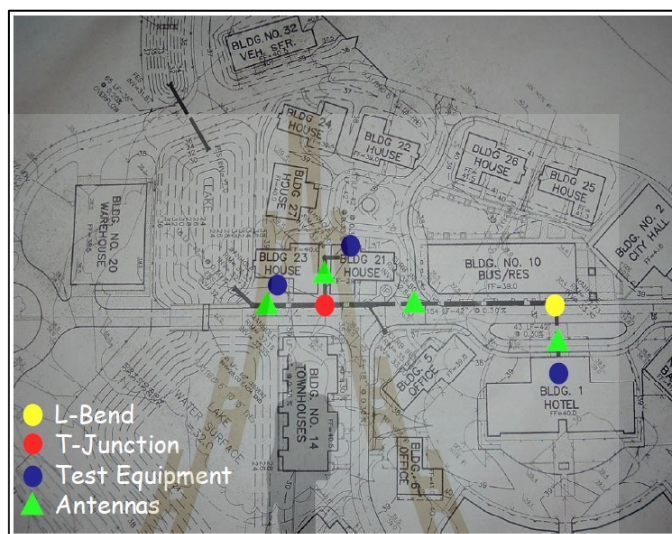
รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบรูปร่างของอุโมงค์กับรูปเรขาคณิตของท่อนำคลื่น
ที่มา: Emslie et al. (1975)

Deryck (1978) ได้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอุโมงค์ต่าง ๆ ที่ความถี่ระหว่าง 1 - 1000 MHz จากงานวิจัยนี้พบว่าสามารถแบ่งช่วงความถี่ที่แพร่กระจายภายในอุโมงค์แตกต่างกันได้สามช่วง ซึ่งมีกลไกการแพร่กระจายที่แตกต่างกันสามแบบ 1) ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัด คลื่นจะแพร่กระจายผ่านผนังหินเหมือนกับไม่มีผนังกันไว้ ซึ่งการลดทอนจะเพิ่มขึ้นตามรากที่สองของความถี่และเป็นฟังก์ชันกับค่าสภาพนำทางไฟฟ้าของตัวกลาง 2) ช่วงความถี่บริเวณใกล้ความถี่ตัด การลดทอนจะถูกกำหนดโดยความถี่ รูปร่าง และขนาดตามขวางของอุโมงค์เท่านั้น และ 3) ที่ความถี่เหนือความถี่ตัด การลดทอนจะขึ้นอยู่กับทั้งสภาพนำไฟฟ้าและขนาดตามขวางของอุโมงค์ โดยความถี่ตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมตามทฤษฎีท่อนำคลื่นแสดงในสมการที่ 2.1

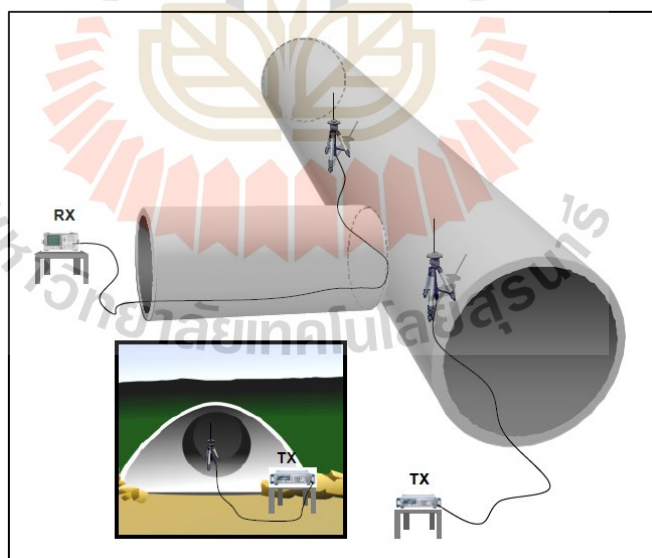
$$\lambda_{mn} = \frac{2\sqrt{ab}}{\sqrt{m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}}} \quad (2.1)$$

โดย	a	คือ	ความกว้างของท่อนำคลื่น
	b	คือ	ความสูงของท่อนำคลื่น
	m, n	คือ	โหมดของท่อนำคลื่น

ถัดมา Kjeldsen and Hopkins (2006) ได้เสนอการทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในอุโมงค์โดยทดสอบในอุโมงค์ที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับค่ายฝึกปฏิบัติการทางทหารบนพื้นที่เมือง (Military Operations on Urban Terrain: MOUT) ของประเทศสหรัฐอเมริกา งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองทั้งอุโมงค์ในแนวระดับสายตา (Line-of-sight: LOS) และไม่ใช่แนวระดับสายตา (non-line-of-sight: NLOS) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ที่ความถี่ 374 MHz, 915 MHz, และ 2400 MHz



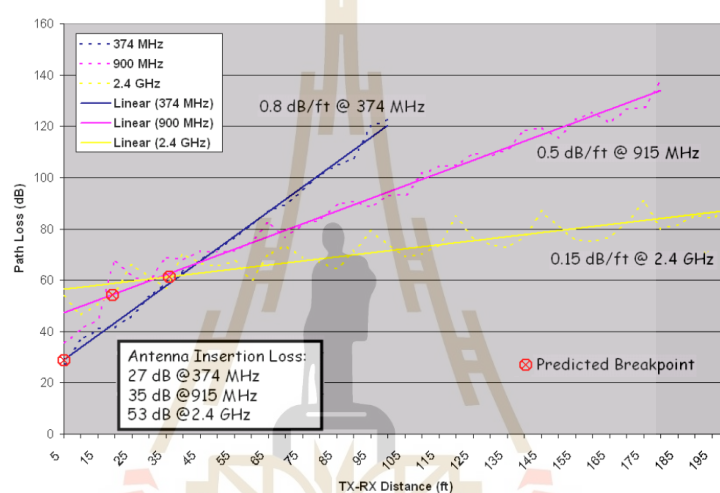
(ก)



(ข)

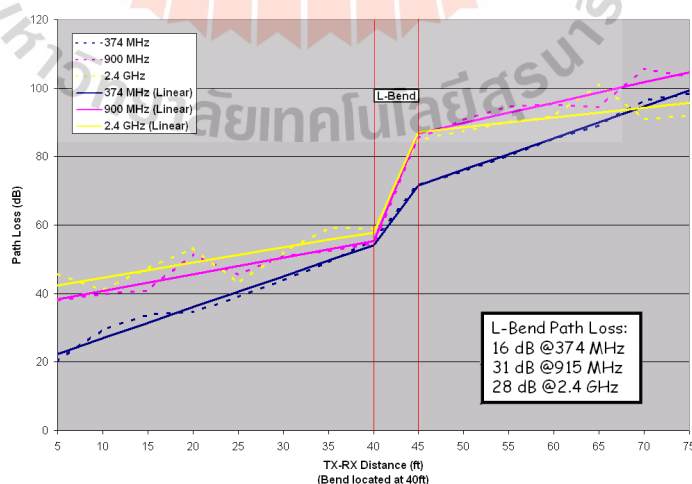
รูปที่ 2.2 การทดสอบของ Kjeldsen and Hopkins (2006)
(ก) แผนผังการทดสอบ (ข) รูปจำลองการทดสอบ
ที่มา: Kjeldsen and Hopkins (2006)

งานวิจัยของ Kjeldsen and Hopkins (2006) ใช้วิธีการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ด้วยฟังก์ชันความชันกราฟเชิงเส้นของกำลังที่รับได้ต่อระยะทางเพื่อแปลงเป็นการสูญเสียต่อระยะทางซึ่งเป็นระเบียบวิธีเดียวกับการคำนวณหาเลขชี้กำลังการสูญเสียเส้นทาง (Path loss exponent) สำหรับการศึกษแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น (Rappaport, 2002) จากรูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบการสูญเสียเส้นทางในแนว LOS และในรูปที่ 2.4 แสดงกราฟการสูญเสียเส้นทางในแนว NLOS ที่ประกอบไปด้วยส่วน LOS และ NLOS ซึ่งส่วนที่บดบังแนวสายตาก็คือส่วนโค้งรูปตัวแอลหรือ L-Bend โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีนี้ในการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.3 ผลการทดสอบแบบ LOS ของ Kjeldsen and Hopkins (2006)

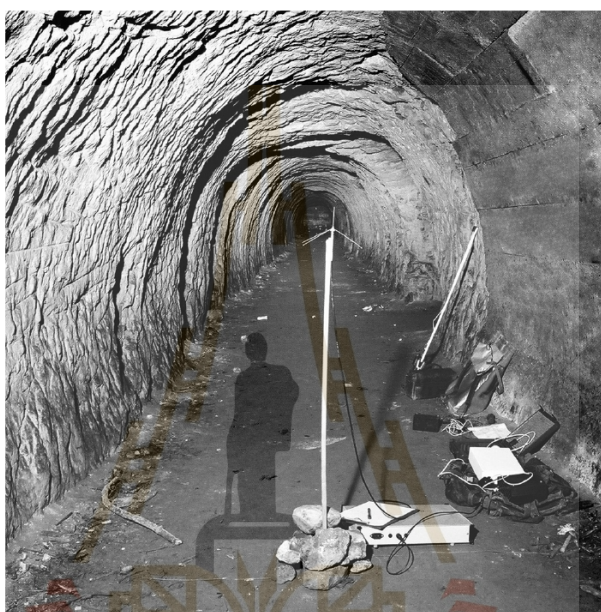
ที่มา: Kjeldsen and Hopkins (2006)



รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบแบบ NLOS ของ Kjeldsen and Hopkins (2006)

ที่มา: Kjeldsen and Hopkins (2006)

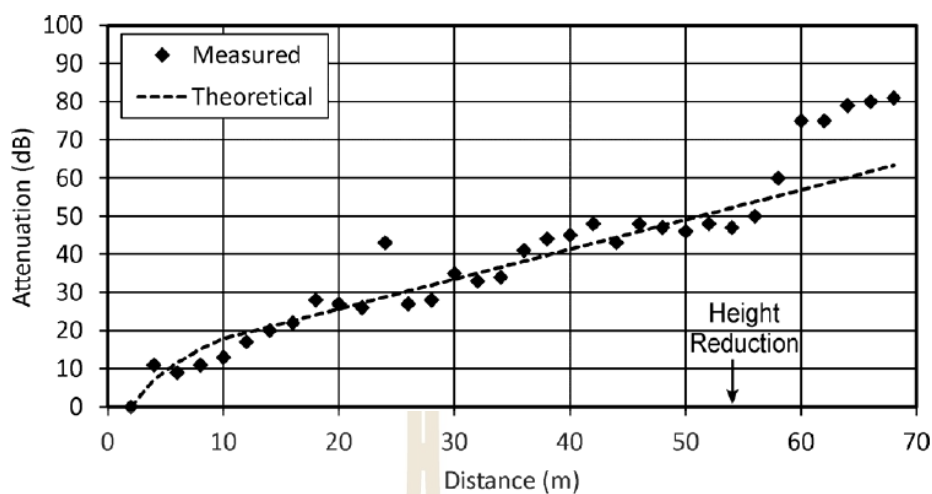
งานวิจัยของ Rak and Pechac (2007) แสดงการศึกษาเชิงทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแถบความถี่ UHF ที่ความถี่ 446 MHz และ 860 MHz ในอุโมงค์ใต้ดินที่อยู่ในแนว LOS ทั้งหมด 5 แห่ง ซึ่งแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันทั้งความยาว ขนาดของความสูง ความกว้าง ความหยาบของผนัง และความชื้น พร้อมเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับผลทางทฤษฎีแบบจำลองของ Emslie et al. (1975) ที่จะนำลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์แต่ละแห่งมาคำนวณการลดทอนจากแต่ละปัจจัย



รูปที่ 2.5 การทดสอบการแพร่กระจายของ Rak and Pechac (2007)

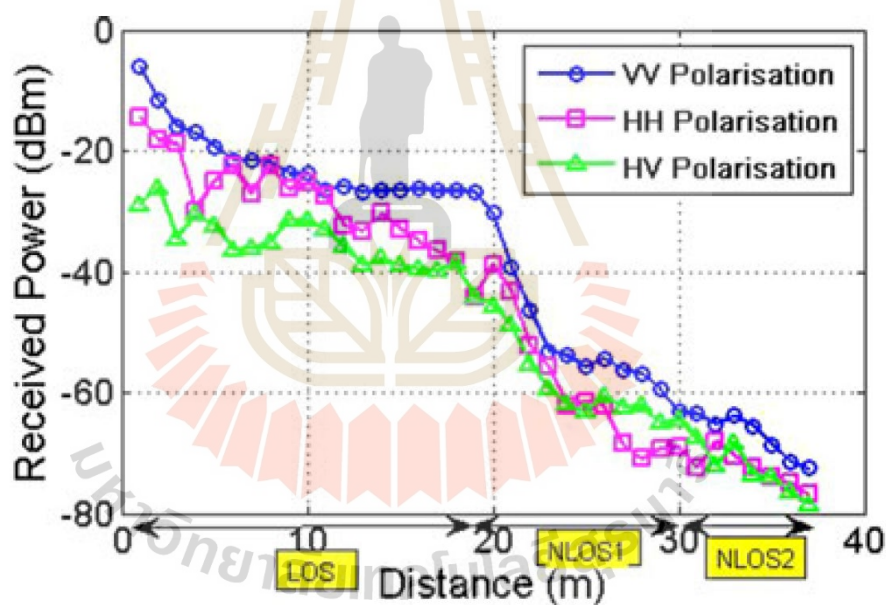
ที่มา: Rak and Pechac (2007)

อย่างไรก็ตามนอกจากการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์แล้วยังมีงานวิจัยของ Bedford and Kennedy (2014) และ Soo et al. (2018) ที่ศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำธรรมชาติประเภทถ้ำหินปูน โดยมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันและมีเส้นทางคดเคี้ยวที่เกิดตามธรรมชาติอีกด้วย Bedford and Kennedy (2014) ทำการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 1.3 GHz, 2.4 GHz, และ 5.8 GHz ซึ่งเป็นความถี่ในแถบไมโครเวฟ (Microwave) ในขณะที่ Soo et al. (2018) ทดสอบที่ความถี่ 900 MHz, 2.4 GHz, และ 5.8 GHz งานวิจัยทั้งสองนี้มีวิธีการศึกษาคัลายกันกับ Kjeldsen and Hopkins (2006) และ Rak and Pechac (2007) ซึ่งทำการศึกษาทั้งในโพรงถ้ำแบบ LOS และ NLOS ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Emslie et al. (1975) เช่นเดียวกันกับ Rak and Pechac (2007)



รูปที่ 2.6 ผลการทดสอบแบบ LOS ความถี่ 1.3 GHz ของ Bedford and Kennedy (2014)

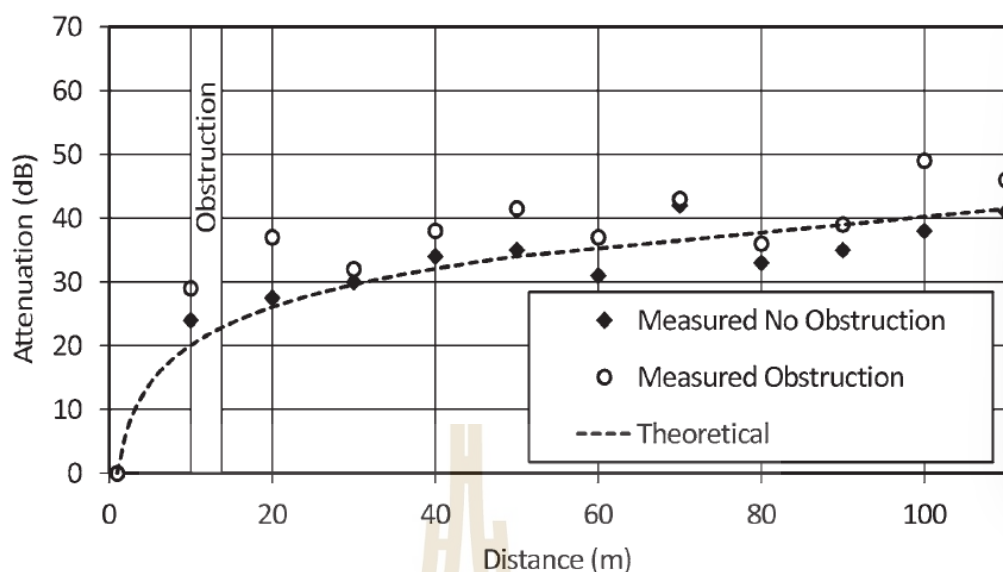
ที่มา: Bedford and Kennedy (2014)



รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบแบบ NLOS ความถี่ 900 MHz ของ Soo et al. (2018)

ที่มา: Soo et al. (2018)

ถัดมา Bedford et al. (2016) ยังได้ทำการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์ ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz ที่อุโมงค์สองแห่งคือ อุโมงค์ของเหมืองหิน และอุโมงค์รถไฟ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี ซึ่งงานวิจัยนี้ยังได้เพิ่มเติมการทดสอบในกรณีที่มียุปสรรคกีดขวางเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบในขณะที่มีอุปสรรคกีดขวาง ความถี่ 2.4 GHz ของ Bedford et al. (2016)
ที่มา: Bedford et al. (2016)

2.2.2 กลไกการแพร่กระจายคลื่น

การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นทั้งภายในถ้ำหรือในอากาศว่างจำเป็นต้องศึกษาถึงรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นและกลไกการแพร่กระจายของคลื่นโดยเฉพาะคลื่นความถี่วิทยุแต่ละความถี่ ความสัมพันธ์ระหว่างการแพร่กระจายคลื่นกับตัวกลาง ซึ่งรวมไปถึงการใช้ประโยชน์จากกลไกการแพร่กระจายคลื่นกับระบบสื่อสารต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้การศึกษาค้นคว้าในหัวข้อนี้

2.2.2.1 แแถบความถี่คลื่นวิทยุ

สเปกตรัมคลื่นวิทยุ (Radio spectrum) เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ตั้งแต่ 3 Hz ไปจนถึง 3,000 GHz (3 THz) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่นี้เรียกว่าคลื่นวิทยุ (Radio frequency; RF) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีสมัยใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านโทรคมนาคม เพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างผู้ใช้ที่แตกต่างกัน การสร้างและการส่งคลื่นวิทยุได้รับการควบคุมอย่างเข้มงวดโดยกฎหมายภายในประเทศและกฎหมายระหว่างประเทศ ซึ่งได้รับการประสานงานโดยองค์กรระหว่างประเทศสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union : ITU) จากการกำหนดมาตรฐานแถบความถี่วิทยุของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั่วโลกซึ่งสามารถแสดงการแบ่งช่วงของความถี่และชื่อเรียกแถบความถี่ในตารางที่ 2.1 (International Telecommunication Union, 2015)

ตารางที่ 2.1 การกำหนดย่านความถี่วิทยุโดย ITU

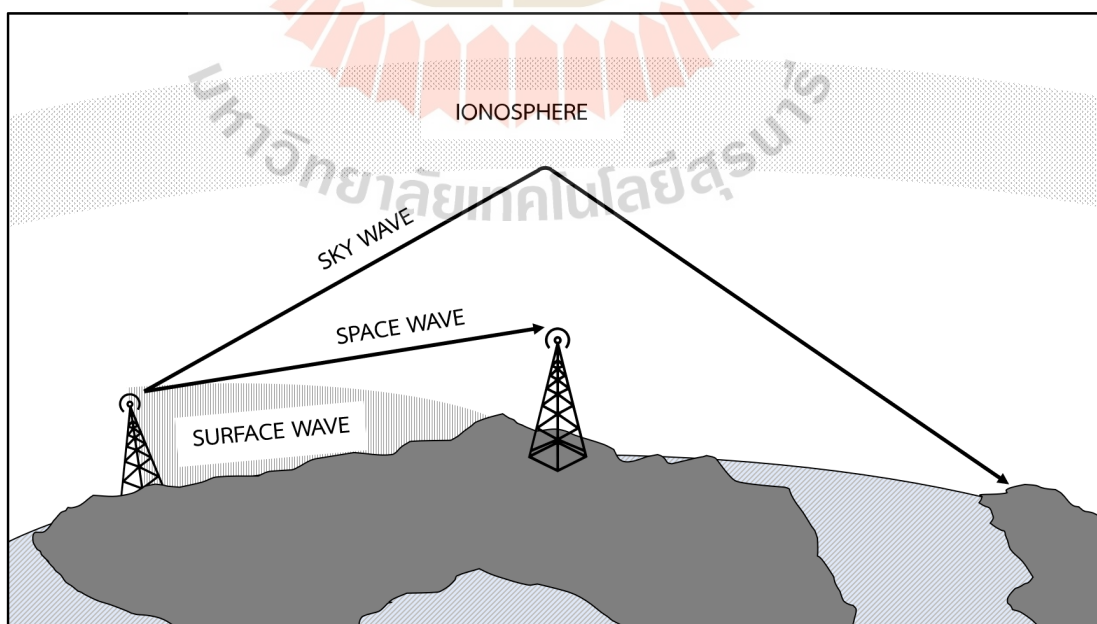
ช่วงความถี่	แถบความถี่	อักษรย่อ
30 – 300 Hz	Extremely-Low Frequency	ELF
300 – 3000 Hz	Ultra-Low Frequency	ULF
3 – 30 kHz	Very Low Frequency	VLF
30 – 300 kHz	Low Frequency	LF
300 – 3000 kHz	Medium Frequency	MF
3 – 30 MHz	High Frequency	HF
30 – 300 MHz	Very High Frequency	VHF
300 – 3000 MHz	Ultra-High Frequency	UHF
3 – 30 GHz	Super-High Frequency	SHF
30 – 300 GHz	Extremely-High Frequency	EHF
300 – 3000 GHz	TeraHertz / Tremendously-High Frequency	THF

2.2.2.2 การแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุ

จากตารางที่ 2.1 การแบ่งแถบความถี่เหล่านี้จะช่วยให้สามารถจำแนกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของความถี่แต่ละแถบและการนำไปประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน โดยปกติของระบบสื่อสารแบบไร้สายจะเป็นการแพร่กระจายของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายอากาศรับและส่งภายใต้สภาวะอวกาศว่าง (Free space) ซึ่งในความเป็นจริงการแพร่กระจายในอวกาศว่างนั้นจะเกิดขึ้นในสภาวะอุดมคติ อย่างไรก็ตามสำหรับการสื่อสารส่วนใหญ่ การแพร่กระจายคลื่นจะมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งสัณฐานของโลก ชั้นบรรยากาศ (Atmosphere) ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) และอุตุนิยมวิทยาในชั้นบรรยากาศ เช่น เม็ดฝน หิมะตก และลูกเห็บ เป็นต้น โดยอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ในธรรมชาติมีต่อการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุนั้นก็ยังขึ้นอยู่กับแต่ละความถี่ ลักษณะทิศทางของสายอากาศ และระยะห่างของสายอากาศกับพื้นดิน รวมไปถึงสภาพแวดล้อมของเส้นทางที่คลื่นแพร่กระจายไป เช่น การแพร่กระจายคลื่นบนผิวน้ำจะแตกต่างจากการแพร่กระจายคลื่นบนผิวดิน หรือแพร่กระจายคลื่นผ่านพื้นที่ป่า แม้กระทั่งการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงและการเลี้ยวเบนสูง โดยปกติสามารถคาดการณ์ถึงประสิทธิภาพใน

การติดต่อสื่อสารโดยพิจารณาจากลักษณะของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น เพื่อให้สะดวกต่อการอภิปรายเกี่ยวกับผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่น จาก Collin (1985) ได้แบ่งหมวดหมู่ที่แสดงถึงปรากฏการณ์ที่มีอิทธิพลต่อการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุในช่วง 4 ช่วงความถี่ ช่วงแรกคือการแพร่กระจายคลื่นในแถบความถี่ต่ำสุด (Extremely-low frequency: ELF) ถึงแถบความถี่ต่ำมาก (Very low frequency: VLF) ในช่วงความถี่นี้ความยาวคลื่น (Wavelength) λ_0 มีค่ามากกว่า 10^5 เมตร หรือ 10 กิโลเมตร ซึ่งสายอากาศที่ใช้งานจะมีขนาดใหญ่มากและจำเป็นต้องติดตั้งใกล้กับพื้นดินหรือฝังอยู่ในดิน โดยคลื่นวิทยุในช่วงนี้จะสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้มีรูปแบบการแพร่กระจายคล้ายท่อนำคลื่นระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์และผิวโลก ซึ่งสำหรับความถี่ที่ต่ำกว่า 1 kHz การแพร่กระจายคลื่นในลักษณะนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งในด้านการสื่อสารกับเรือดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำ เพราะหากใช้งานที่ความถี่สูงขึ้นไปจะถูกดูดกลืนจากค่าสภาพนำทางไฟฟ้าของน้ำทะเลที่มีความสูง

ช่วงความถี่ที่สองคือความถี่ตั้งแต่ 1 kHz ไปจนถึงความถี่หลายพัน กิโลเฮิร์ตซ์ ในช่วงความถี่นี้การแพร่กระจายคลื่นจะได้รับอิทธิพลจากพื้นดินที่เป็นอย่างมากแม้ว่าพื้นดินจะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำมากก็ตาม ซึ่งลักษณะการแพร่กระจายในลักษณะของคลื่นดินนี้เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของความถี่ในช่วงนี้และสภาพนำไฟฟ้าของพื้นดินที่สอดคล้องกัน ทำให้คลื่นสามารถเดินทางบนผิวดินด้วยสมบัติความลึกผิว (Skin depth) และยังสามารถเลี้ยวเบนบนสภาพภูมิประเทศต่าง ๆ ได้ การสื่อสารในช่วงนี้จะมีระยะทางหลายร้อยกิโลเมตรด้วยการแพร่คลื่นในลักษณะคลื่นผิว เช่น การออกอากาศระบบวิทยุแบบ AM ก็เกิดขึ้นในช่วงความถี่นี้ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุ

ช่วงความถี่ที่สามตั้งแต่ความถี่หลักพันกิโลเฮิร์ตซ์จนถึงประมาณ 30 MHz หรือปลายแถบความถี่สูง (High frequency: HF) การใช้งานแถบความถี่นี้ซึ่งรวมถึงการกระจายเสียงคลื่นสั้นระหว่างประเทศ (Shortwave radio) จะใช้วิธีการส่งคลื่นวิทยุขึ้นไปบนฟ้าเพื่อให้สะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ลงมายังพื้นโลกอีกครั้งหรือเรียกว่า คลื่นฟ้า ทำให้การสื่อสารมีระยะทางไกลที่ซึ่งอาจมีความยาวหลายพันกิโลเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นฟ้านี้จะอยู่ในสถานะของอากาศว่าง แต่ก็มีปัจจัยเรื่องความแปรผันของความหนาแน่นอิเล็กตรอนแต่ละช่วงเวลาของวัน การแปรผันประจำปี ฯลฯ ทำให้เกิดข้อจำกัดทั้งช่วงเวลาที่ใช้งานหรือใช้งานได้เฉพาะบางความถี่เท่านั้น ปัจจุบันยังมีการใช้งานคลื่นฟ้าอย่างแพร่หลายในกลุ่มวิทยุสมัครเล่น

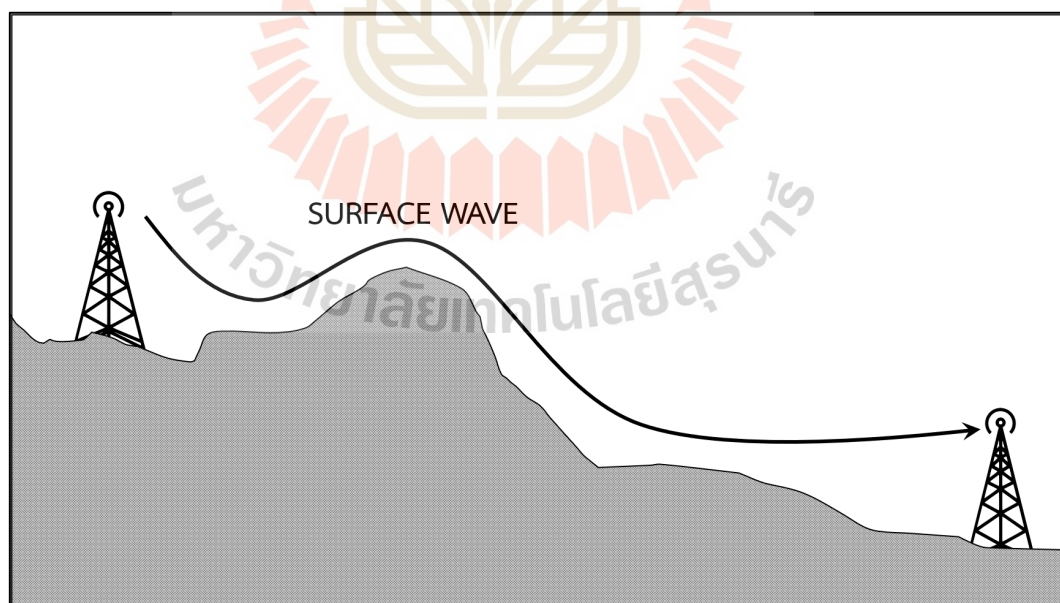
และสุดท้ายช่วงความถี่ตั้งแต่ความถี่ 50 MHz ขึ้นไป ในกรณีนี้สายอากาศมีขนาดค่อนข้างเล็กและสามารถวางที่ระดับความสูงเหนือพื้นดินหลายความยาวคลื่น ($n\lambda$) ผลกระทบหลักในการแพร่กระจายคลื่นช่วงนี้คือการรบกวนระหว่างสัญญาณที่แพร่กระจายไปตามเส้นทาง LOS โดยตรงและสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นดิน ที่ความถี่สูงหลายกิกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไปต้องพิจารณาการลดทอนและกระเจิงจากเมฆฝนและก๊าซในชั้นบรรยากาศซึ่งส่วนใหญ่เป็นไอน้ำด้วย รวมไปถึงการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุตามเนินเขา อาคาร ต้นไม้ ฯลฯ ด้วยเช่นกัน ปรากฏการณ์การแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่สูงกว่า 50 MHz ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับผลกระทบจากการสะท้อนของคลื่นกับพื้นดิน ผลกระทบเหล่านี้ทั้งผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูง การแพร่กระจายคลื่นผิวของคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ต่ำ การแพร่กระจายคลื่นสั้นที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนของไอโอโนสเฟียร์ การลดทอนและการกระเจิงของคลื่นไมโครเวฟจากฝนและองค์ประกอบในชั้นบรรยากาศ การแพร่กระจายคลื่นในชั้นบรรยากาศ รวมไปถึงแบบจำลองทำนายคลื่นของโลกและชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับย่านความถี่ต่ำมาก

2.2.2.3 กลไกการแพร่กระจายคลื่น

จากการแบ่งช่วงความถี่ตามการใช้งานแล้วยังสามารถจำแนกการแพร่กระจายคลื่นด้วยลักษณะการแพร่คลื่นทั้งคลื่นพื้นดิน (Ground wave) ที่ประกอบไปด้วยคลื่นผิวและคลื่นอวกาศ หรือจะเป็นคลื่นฟ้าด้วย ซึ่งกลไกการแพร่กระจายคลื่นนี้เพื่อระบุว่าคลื่นวิทยุแพร่กระจายมาถึงยังจุดสังเกต (ภาครับ) ได้อย่างไรและยังสามารถจำแนกประเภทของคลื่นวิทยุตามพื้นที่ที่เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นได้ดังนี้ (Howard and Vaughan, 1998)

1. **คลื่นพื้นดิน หรือ Ground wave** คลื่นพื้นดินประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบ คือ คลื่นผิวและคลื่นอวกาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยปัจจัยที่กำหนดว่าองค์ประกอบของคลื่นพื้นดินจัดเป็นคลื่นอวกาศหรือคลื่นผิวนั้นคือ คลื่นผิวจะแพร่ไปตามพื้นผิวโลก ส่วนคลื่นอวกาศจะแพร่คลื่นเหนือผิวโลก

คลื่นผิว หรือ Surface wave การเดินทางของคลื่นผิวจะไม่ใช้คลื่นที่เดินทางในโหมด TEM หรือ Transverse electromagnetic ตามโหมดของคลื่นที่แพร่ในอากาศว่าง คลื่นผิวจะเดินทางโดยแพร่คลื่นไปตามผิวดินดังรูปที่ 2.10 คลื่นผิวนั้นสามารถเคลื่อนที่ตามส่วนโค้งของโลกได้เนื่องจากกระบวนการเลี้ยวเบน เมื่อคลื่นผิวเคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่ขนาดของวัตถุไม่เกินความยาวคลื่น คลื่นผิวจะสามารถโค้งผ่านวัตถุได้ ยิ่งวัตถุมีขนาดเล็กเท่าใดการเลี้ยวเบนก็จะยิ่งเห็นชัดมากขึ้นเท่านั้นเมื่อคลื่นผิวเคลื่อนผ่านพื้นดินจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในพื้นโลก แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้นำพลังงานออกจากคลื่นผิวซึ่งจะทำให้คลื่นอ่อนตัวลงหรือลดทอนลงในขณะที่เคลื่อนตัวออกจากสายอากาศส่ง เพื่อลดปริมาณการลดทอนลงนั้นต้องลดปริมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งทำได้โดยใช้การส่งคลื่นในโพลาไรเซชันแนวตั้ง (Vertical polarization) เพื่อลดขอบเขตที่สนามไฟฟ้าของคลื่นสัมผัสกับผิวโลกเมื่อคลื่นผิวมีโพลาไรเซชันในแนวนอนสนามไฟฟ้าของคลื่นจะขนานกับพื้นผิวโลก ดังนั้นจึงมีการสัมผัสกับผิวโลกตลอดเวลา ทำให้คลื่นถูกลดทอนภายในระยะทางสั้น ๆ จากสถานีส่ง ในทางกลับกันเมื่อคลื่นผิวมีโพลาไรเซชันแนวตั้ง สนามไฟฟ้าจะพุ่งเข้าหาโลกในแนวตั้งและมีบางส่วนถูกเหนี่ยวนำไปในผิวโลก ทำให้โพลาไรเซชันแนวตั้งจึงเหมาะสมกว่าโพลาไรเซชันแนวนอนอย่างมากในการแพร่กระจายคลื่นผิว การลดทอนที่เกิดขึ้นในการแพร่แบบคลื่นผิวนั้นเกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสภาพภูมิประเทศที่คลื่นเคลื่อนที่ไปด้วย

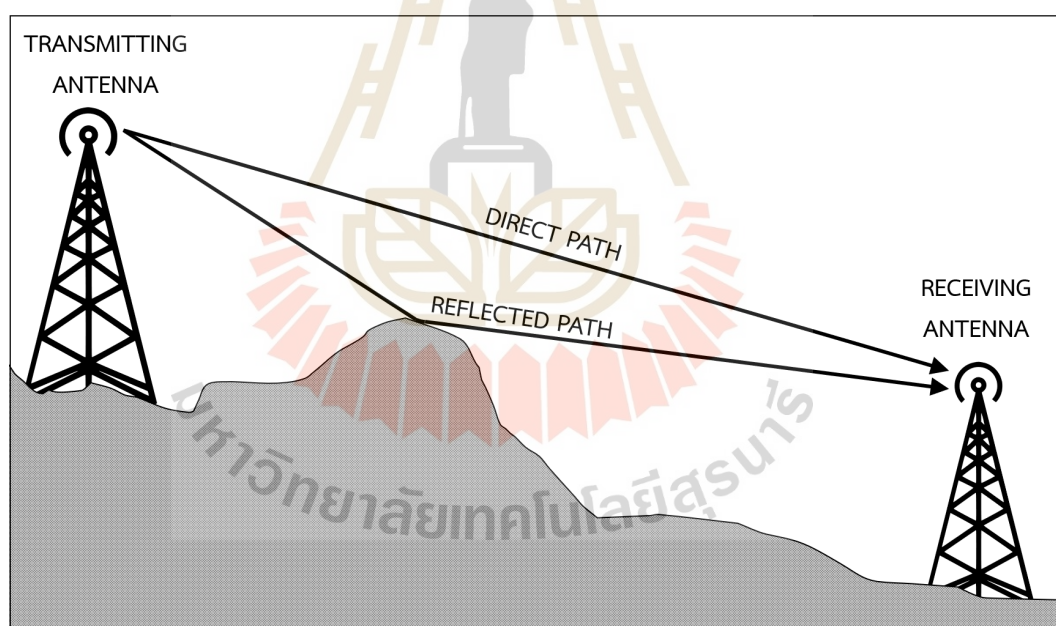


รูปที่ 2.10 การแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุแบบคลื่นผิว

ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งในการลดทอนของคลื่นผิวก็คือความถี่ จากที่กล่าวไปข้างต้นเกี่ยวกับความยาวคลื่นที่ความถี่สูงซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าจะไม่เกิดการเลี้ยวเบนแต่

จะถูกพื้นโลกดูดซับไว้ ดังนั้นเมื่อความถี่ของคลื่นพื้นผิวเพิ่มขึ้นคลื่นผิวจะถูกดูดซับหรือลดทอนลงอย่างรวดเร็วโดยพื้นโลก คลื่นพื้นผิวที่มีความถี่สูงกว่า 2 MHz จึงไม่เหมาะสำหรับการส่งสัญญาณทางไกล ในทางกลับกันเมื่อความถี่ของคลื่นพื้นผิวลดลงจนมีความยาวคลื่นที่ยาวเมื่อเทียบกับพื้นโลก ก็จะทำให้คลื่นผิวสามารถเลี้ยวเบนและแพร่กระจายไปไกลเกินกว่าความโค้งของผิวโลก

คลื่นอวกาศ หรือ Space wave คลื่นอวกาศจะแพร่จากสายอากาศภาคส่งไปยังสายอากาศภาครับด้วยเส้นทาง 2 แบบ เส้นทางแรกจะแพร่ผ่านอากาศเป็นเส้นตรงไปยังสายอากาศภาครับ ส่วนอีกเส้นทางหนึ่งจะสะท้อนกับพื้นดินไปยังสายอากาศภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 คลื่นอวกาศจะได้รับผลกระทบจากการลดทอนบนพื้นดินเพียงเล็กน้อยจากคลื่นอวกาศที่แพร่กระจายไปตามสองเส้นทางที่มีระยะทางต่างกัน (เส้นทางตรงและเส้นทางสะท้อนพื้น) ไปยังภาครับ ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสริมหรือหักล้างเฟสของคลื่นได้ หากได้รับคลื่นสององค์ประกอบนี้ในกรณีเฟสเสริมกันผลลัพธ์จะทำให้สัญญาณแรงขึ้น ในทำนองเดียวกันหากเกิดการหักล้างเฟส จะส่งผลให้คลื่นเกิดสัญญาณลดลง



รูปที่ 2.11 การแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุแบบคลื่นอวกาศ

2. คลื่นฟ้า หรือ Sky wave หรือเรียกอีกชื่อว่าคลื่นไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric wave) คือการแพร่คลื่นขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศด้านบนและสะท้อนกลับมายังพื้นโลก โดยการหักเหของแสงในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ การแพร่กระจายในรูปแบบนี้จะได้รับผลกระทบจากพื้นผิวโลกเพียงเล็กน้อยและสามารถแพร่สัญญาณในระยะทางไกลได้ โดยปกติจะใช้แถบความถี่สูง (HF) สำหรับการแพร่กระจายคลื่นฟ้า

2.2.3 สมบัติทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของหิน

2.2.3.1 ผลกระทบของความพรุนและความเป็นเนื้อเดียวกันของหิน

หลังจากค้นคว้าในส่วนการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นรวมไปถึงลักษณะและกลไกการแพร่กระจายคลื่นแล้ว การศึกษาถึงสมบัติของตัวกลางก็มีความสำคัญเช่นกัน การศึกษาทางธรณีวิทยาในเรื่องของการลดทอนพลังงานของคลื่นในขณะที่เดินทางผ่านชั้นหิน ซึ่งมีความสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่ถูกส่งผ่านเข้าไปในโพรงถ้ำ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยสำคัญส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นความถี่วิทยุภายในโพรงถ้ำนั้นเป็นผลมาจากค่าความพรุน (Porosity) ที่มีอยู่ในเนื้อหินซึ่งส่งผลกระทบต่อการส่งผ่านพลังงานของคลื่นความถี่วิทยุผ่านเข้าไปในตัวกลางซึ่งในที่นี้ก็คือเม็ดตะกอนในกรณีของหินตะกอนหรือผลึกแร่ ในกรณีของหินที่เกิดจากการตกผลึกของแร่ เช่น หินปูนหรือหินอัคนีต่างๆ ที่อยู่ห่างกันนั้น การส่งพลังงานคลื่นความถี่วิทยุจะเกิดขึ้นได้ยากและยังส่งผลให้ค่าความเร็วของคลื่นนั้นลดลงอีกด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วที่คลื่นใช้ในการเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นหินซึ่งมีความพรุนนั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Wyllie et al. (1962) ดังสมการที่ 2.2

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{(1-\phi)}{V_m} \quad (2.2)$$

เมื่อ ϕ คือ ค่าความพรุนของหิน (ร้อยละ)

V คือ ค่าความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นหิน (เมตรต่อวินาที)

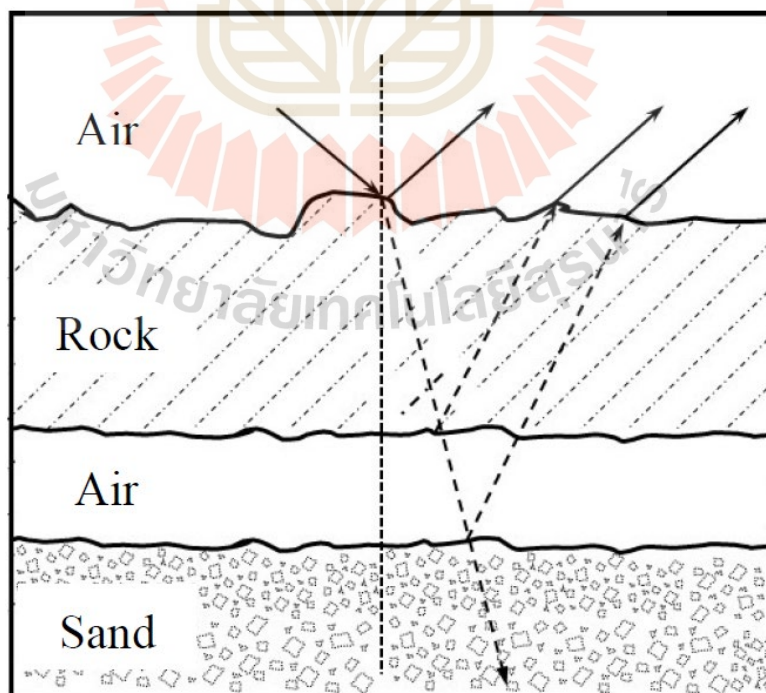
V_f คือ ค่าความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านของไหลที่แทรกอยู่ในเนื้อหิน (เมตรต่อวินาที)

V_m คือ ค่าความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านเนื้อหิน (เมตรต่อวินาที)

ทั้งนี้ประเทศไทยสามารถพบถ้ำได้สองชนิดคือถ้ำหินปูนซึ่งถือเป็นชนิดที่พบได้มากที่สุดในประเทศไทยและถ้ำหินทรายที่จะพบมากในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย โดยจากการทดสอบวัดค่าความพรุนของหินทรายของหมวดหินพระวิหาร (Phra Wihan Formation) ซึ่งเป็นหินทรายหมวดหินเดียวกันกับที่เกิดเป็นโพรงถ้ำที่ถ้ำวัดป่าภูหารีย์ อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี ของ Gaewmood and Trisan (2018) พบว่าค่าความพรุนเฉลี่ยของหินทรายหมวดหินพระวิหารมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 12.6 ในขณะที่ อัมพรศักดิ์ วรรณโกมล (2561) ได้ทำการวัดค่าความพรุนของหินปูนยุคเพอร์เมียน (Permian limestone) ซึ่งเป็นหินปูนชนิดเดียวกันและมีอายุในช่วงเดียวกับหินปูนที่ถ้ำหลวงเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าหินปูนดังกล่าวมีค่าความพรุนเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 1.06 เท่านั้น ดังนั้นจากค่าความพรุนของหินทรายหมวดหินพระวิหารและหินปูนยุค

เพอร์เมียนที่มีค่าแตกต่างกันจะส่งผลให้การเดินทางของคลื่นความถี่วิทยุผ่านหินทั้งสองชนิดนั้นมีความแตกต่างกันด้วย โดยคลื่นจะสามารถเดินทางผ่านหินปูนยุคเพอร์เมียนของถ้ำหลวงเชียงดาวได้รวดเร็วกว่าและมีการถูกดูดซับพลังงานของคลื่นไว้ในเนื้อหินได้น้อยกว่าหินทรายของหมวดหินพระวิหารจึงเป็นผลให้เกิดการสะท้อน หักเหและเลี้ยวเบนของคลื่นได้ดีกว่าที่เกิดขึ้นในหินทรายหมวดหินพระวิหารของถ้ำปาฏิหาริย์

อีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการลדתอนที่แตกต่างกันในหินทั้งสองชนิด คือ ความเป็นเนื้อเดียวกันของหิน (Homogeneity) โดยในกรณีการเกิดของหินตะกอน เช่น หินทรายหมวดหินพระวิหารของถ้ำปาฏิหาริย์ จะเกิดช่องว่างขึ้นในชั้นหินที่มาจากการทับถม การจัดเรียงตัว และการสะสมตัวของตะกอนของหินชนิดนั้น ๆ ทำให้เกิดขึ้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้คลื่นที่เดินทางผ่านแต่ละชั้นเกิดการสะท้อนกลับ ต่างจากในกลุ่มหินปูนยุคเพอร์เมียนของถ้ำหลวงเชียงดาวที่มีความความเป็นเนื้อเดียวกันสูงกว่า เพราะการเกิดของถ้ำหินปูนโดยทั่วไปนั้นจะเกิดจากการกัดเซาะของน้ำตามรอยแตกของหิน ซึ่งทำให้เนื้อของถ้ำหินปูนจะเป็นชั้นไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกันตลอดตัวกลาง นอกจากนี้ยังรวมไปถึงความแตกต่างของชั้นไดอิเล็กตริกระหว่างผนังภายนอกซึ่งโดนกัดกร่อนสูงและเนื้อหินด้านในที่มีการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากกว่า ทำให้เกิดขึ้นไดอิเล็กตริกแตกต่างกันและเกิดการลדתอนสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (Palmer and Palmer, 1995; Daniels, 2004)



รูปที่ 2.12 การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นไดอิเล็กตริกหลายชั้น

ที่มา : Jantaupalee (2024)

2.2.3.2 สภาพต้านทานและสภาพนำทางไฟฟ้า

หลังจากการศึกษาสมบัติความพรุนของหินแล้ว ถัดมาจึงศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของหิน ซึ่งหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันจะส่งผลให้มีสภาพนำทางไฟฟ้า (Electrical conductivity) ไม่เท่ากัน จาก Glover (2015) และ Park et al. (2016) พบว่าหนึ่งในคุณสมบัติที่มีผลกับค่าสภาพนำทางไฟฟ้าคือ ค่าความพรุน โดยตัวกลางชนิดเดียวกันเมื่อความพรุนเพิ่มขึ้นและถูกแทนที่ด้วยแร่ต่าง ๆ จะทำให้ค่าสภาพนำทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของสภาพต้านทานทางไฟฟ้า (Electrical resistivity) มีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.3

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (ซีเมนต่อเมตร (S/m))

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (โอห์มเมตร (Ω -m))

อย่างไรก็ตามการวัดทดสอบสภาพนำทางไฟฟ้าและสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของหินนั้นมีความยากลำบากเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น ขนาดของพื้นที่ทดสอบที่ต้องใช้พื้นที่บริเวณกว้างหลายร้อยเมตร หรือต้องทดสอบกับตัวอย่างหินจำนวนมาก ซึ่งหินที่อยู่ในบริเวณต่างกัน ในโพรงถ้ำเดียวกันอาจจะให้ผลที่แตกต่างกัน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีการรวบรวมข้อมูลสภาพนำทางไฟฟ้าและสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของหินปูนและหินทรายจากงานวิจัยต่าง ๆ มาใช้ในการอ้างอิง โดยงานวิจัยของ Murray (2000) พบว่าตัวกลางที่เป็นหินทราย มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity : ϵ_r) อยู่ที่ 2 – 10 ค่าสภาพนำทางไฟฟ้าที่ความถี่ 100 MHz ซึ่งเป็นความถี่สูง มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-5} ซีเมนต่อเมตร และค่าสภาพนำทางไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) ซึ่งใกล้เคียงกับกลุ่มของความถี่ต่ำ มีค่าอยู่ที่ 1.25×10^{-4} ถึง 5×10^{-3} ซีเมนต่อเมตร

จาก Daniels (2004) พบว่าตัวกลางที่เป็นหินปูนมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าที่ความถี่ 100 MHz อยู่ที่ 10^{-8} ถึง 10^{-1} ซีเมนต่อเมตร มีความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability : μ_r) อยู่ที่ 7 - 8 และมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์อยู่ที่ 7 - 8 ในส่วนของหินทรายมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าที่ความถี่ 100 MHz อยู่ที่ 10^{-6} ถึง 10^{-2} ซีเมนต่อเมตร มีความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์อยู่ที่ 2 – 10 และมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์อยู่ที่ 2 – 10 นอกจากนี้งานวิจัยของ Mount and Comas (2014) ได้ทำการศึกษาเรื่องการทำนายความพรุนและค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของหินปูน โดยใช้เทคโนโลยี Ground Penetrating Radar (GPR) ซึ่งแสดงผลลัพธ์ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของหินปูนอยู่ที่ 7 – 13

2.2.3.3 ความลึกผิว

จากการศึกษาทั้งลักษณะการแพร่กระจายคลื่นและสภาพนำทางไฟฟ้าพบว่า สภาพนำทางไฟฟ้าของตัวกลางส่งผลต่อลักษณะการแพร่กระจายคลื่น เมื่อคลื่นมีความถี่ต่ำเพียงพอและสอดคล้องกับสภาพนำไฟฟ้าของตัวกลางจะสามารถแพร่กระจายไปบนตัวกลางได้ โดยความถี่ตั้งแต่ไม่กี่กิโลเฮิร์ตซ์ไปจนถึงหลายเมกะเฮิร์ตซ์ส่วนใหญ่มีโหมดการแพร่กระจายเป็นคลื่นพื้นผิว จากงานวิจัยของ Bedford (2001) และ Gibson (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบสื่อสารภายในถ้ำโดยใช้คลื่นแถบความถี่ต่ำส่งผ่านชั้นหิน เนื่องจากสมบัติของความลึกผิวซึ่งสอดคล้องกับสภาพนำทางไฟฟ้าของดินที่มีค่าน้อย ทำให้สามารถแพร่กระจายไปบนพื้นผิวโลกได้ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า พลังงานจะสั่นคลอนประจุไฟฟ้าอิสระในตัวนำ การสั่นนี้ทำให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าแปลงเป็นความร้อน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าสูง เป็นผลให้พลังงานของคลื่นลดลงเกือบทั้งหมดที่บริเวณพื้นผิวของตัวกลางในขณะเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่มีสภาพนำทางไฟฟ้าสูง โดยระยะทางที่คลื่นเดินทางทะลุผ่านตัวกลางและมีพลังงานลดลงเหลือ (36.8%) นี้เรียกว่าความลึกผิวหรือ Skin depth (δ) ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่และสภาพนำไฟฟ้าของตัวกลางดังสมการที่ 2.4 (Balanis, 2012)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (2.4)$$

เมื่อ	δ	คือ	ความลึกผิว (เมตร)
	σ	คือ	สภาพนำทางไฟฟ้า (ซีเมนต่อเมตร)
	ω	คือ	ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
	μ	คือ	ความซึมซาบแม่เหล็ก (เฮนรีต่อเมตร)

2.2.4 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

ตั้งแต่อดีตการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นจะใช้วิธีการศึกษาเชิงทดลองโดยการทดสอบส่งคลื่นในสถานการณ์ต่าง ๆ ซึ่งรวมไปถึงการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์หรือถ้ำที่กล่าวไปข้างต้นเช่นกัน หลังจากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการแพร่คลื่นกระจายคลื่นภายในอุโมงค์หรือสถานที่ที่มีลักษณะคล้ายกันเช่นโพรงถ้ำจะเปรียบเทียบการแพร่กระจายคลื่นกับทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นภายในท่อนำคลื่น เนื่องจากถ้ำหรืออุโมงค์มีลักษณะเป็นโพรงและมีผนังรอบ ๆ เป็นตัวนำทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายการแพร่กระจายคลื่นนั้นเหมาะสำหรับอุโมงค์หรือถ้ำที่ใกล้เคียงหรือเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกันตลอดความยาวและมีขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของความถี่นั้น ๆ ได้

จากงานวิจัยของ Emslie et al. (1975) และ Deryck (1978) พบว่า โดยทั่วไปแล้ว การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอุโมงค์ใต้ดิน ถ้าเป็นลักษณะของอุโมงค์ที่มีรูปร่างของโพรงทางเดินที่มีลักษณะสม่ำเสมอหรือตลอดระยะทางมีลักษณะของโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันมักจะมีการพิจารณาแบบจำลองให้เหมือนกับท่อนำคลื่นกลวงขนาดใหญ่ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปท่อนำคลื่นจะมีโครงสร้างกลวงที่มีผนังตัวนำรองรับไฟฟ้าตามขวางและแม่เหล็กตามขวาง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางเหล่านี้จะสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่น ซึ่งขนาดของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวกำหนดว่าคลื่นความถี่ใดบ้างที่สามารถส่งผ่านจากต้นทางไปสู่ปลายทางได้ โดยความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านเข้าไปได้โดยมีการลดทอนน้อยที่สุดคือความถี่ตัด ซึ่งสามารถหาได้จากความยาวคลื่นตัดดังสมการที่ 2.1

อย่างไรก็ตามอุโมงค์หรือโพรงถ้าไม่ว่าจะเป็นชนิดผนังหินแบบใดก็ตามจะไม่อยู่ในสภาพดังกล่าว เนื่องจากผนังภายในของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวนำที่ใกล้เคียงสมบูรณ์ที่สุด (Near-perfect conductors) แต่ผนังของถ้ำจะทำหน้าที่เหมือนไดอิเล็กทริกมากกว่าตัวนำสมบูรณ์ และจากหลายงานวิจัย เช่น Emslie et al. (1975), Deryck (1978), Rak and Pechac (2007), Bedford and Kennedy (2014), Hrovat et al. (2014), Bedford et al. (2016) และ Javaid et al. (2021) ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์และถ้ำต่าง ๆ ซึ่งพิจารณาเทียบกับลักษณะทางกายภาพของถ้ำ เพื่ออธิบายถึงการลดทอนที่เกิดจากหลายปัจจัยทั้ง การลดทอนจากการหักเหบนผนัง การลดทอนจากความหยาบของผนัง หรือการลดทอนจากความเอียงของผนัง เป็นต้น โดยเริ่มต้นจากสมการสนามไฟฟ้า (E-field: E) และสนามแม่เหล็ก (H-field: H) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของท่อนำคลื่นโดยเปรียบเทียบกับอุโมงค์หรือถ้ำเข้ากับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากงานวิจัยของ Emslie et al. (1975) ได้พิจารณาโพลาไรเซชันหลักในแนวนอนจะได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$E_x = E_0 \cos(k_1 x) \cos(k_2 y) e^{-jk_3 z} \quad (2.5)$$

$$H_y = \frac{k_3}{\omega \mu_0} E_0 \cos(k_1 x) \cos(k_2 y) e^{-jk_3 z} \quad (2.6)$$

สำหรับผนังไดอิเล็กทริกที่ล้อมรอบอุโมงค์ การแพร่กระจายคลื่นจะมีทั้งรูปแบบของคลื่นแบบยาวและตามขวาง สำหรับโหมด (1,1) หรือโหมดพื้นฐานที่เกิดการลดทอนต่ำที่สุด และมีความใกล้เคียงกับโหมด TEM (Transverse electromagnetic) ค่าคงที่การแพร่กระจาย (Propagation constant) k_3 คือค่าเฉพาะที่กำหนดโดยเงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องขององค์ประกอบ E และ H ที่ผนังของอุโมงค์ จะได้รูปแบบอย่างง่ายของคลื่นที่ดังสมการที่ สมการที่ 2.5 และ 2.6 นอกจากนี้เนื่องจากผนังอุโมงค์ไม่ใช่ตัวนำที่สมบูรณ์แบบเหมือนท่อนำคลื่น การกำหนดโหมด

TE (Transverse electric) หรือ TM (Transverse magnetic) ซึ่งปกติจะแยกจากกันจึงไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็น TE หรือ TM อย่างใดอย่างหนึ่ง แต่จะใช้โหมดไฮบริด E_v หรือ E_h ซึ่งอาจถือเป็นโหมดไฮบริดของ TE และ TM แทน โหมดไฮบริดมีทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางของการแพร่กระจาย โหมด E_v มีส่วนประกอบไฟฟ้าในทิศทางแนวตั้ง และโหมด E_h มีส่วนประกอบไฟฟ้าในทิศทางแนวนอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันของสายอากาศที่อยู่ในแนวตั้งแนวนอน (Michael D. Bedford et al., 2016)

คลื่นที่แพร่กระจายภายในอุโมงค์ที่มีผนังไดอิเล็กตริกตามแบบจำลองที่นำคลื่นจะเกิดการลดทอนเนื่องด้วยการหักเหบริเวณผนัง การลดทอนเนื่องจากการหักเหที่ผนังนี้จะสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของผนังหรือเพดาน ขนาดของอุโมงค์ และโหมดหลักของสนามไฟฟ้าของคลื่น การลดทอนจากการหักเหของโหมดคลื่นในแนวตั้งในหน่วยเดซิเบลต่อเมตรแสดงดังสมการที่ 2.7 และการลดทอนจากการหักเหของโหมดคลื่นในแนวนอนในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ดังสมการที่ 2.8

$$\alpha^{(v)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a^3 \sqrt{\epsilon_r^{(v)}} - 1} + \frac{\epsilon_r^{(h)}}{b^3 \sqrt{\epsilon_r^{(h)}} - 1} \right) \quad (2.7)$$

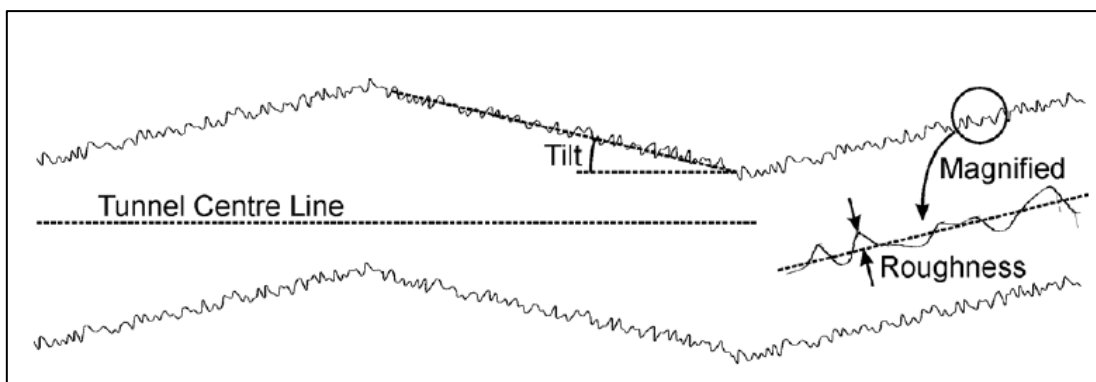
$$\alpha^{(h)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{\epsilon_r^{(v)}}{a^3 \sqrt{\epsilon_r^{(v)}} - 1} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_r^{(h)}} - 1} \right) \quad (2.8)$$

โดย $\epsilon_r^{(v)}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของผนังในแนวตั้ง
 $\epsilon_r^{(h)}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของผนังในแนวนอน (พื้นและเพดาน)
 a คือ ความกว้างของอุโมงค์ (เมตร)
 b คือ ความสูงของอุโมงค์ (เมตร)

ส่วนของความหยาบและความเอียงของผนังอุโมงค์ คลื่นจะเกิดการกระจัดกระจาย (Scattering) จากสองกลไก ได้แก่ ความหยาบของผนัง (Roughness) และความเอียงของผนัง (Tilt) ซึ่งเห็นได้ชัดจากผนังของถ้ำตามธรรมชาติที่มีความขรุขระ ความเอียงของหลังคาและพื้นของอุโมงค์สูง ความหยาบของผิวในที่นี้แปรผันกับพื้นผิวที่ขรุขระและระดับเฉลี่ยของพื้นผิว สำหรับความหยาบของผนังจะใช้การแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) ซึ่งกำหนดโดยรากของกำลังสองเฉลี่ยของความหยาบแสดงในรูปที่ 2.13 การลดทอนจากความหยาบของผนังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\alpha_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \quad (2.9)$$

โดย Δh คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความสูงบนผิวขรุขระของผนัง (เมตร)



รูปที่ 2.13 ความหยาบและความเอียงของผนังอุโมงค์

ที่มา : Bedford and Kennedy (2014)

ความเอียงของผนังหรือความต่างเชิงมุมระหว่างผนังอุโมงค์กับเส้นกึ่งกลางของอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งกำหนดจากความกว้างและความยาวของอุโมงค์ ความเอียงของผนังนี้ส่งผลในการแพร่กระจายของคลื่น โดยทำให้คลื่นเบี่ยงเบนไปจากทิศทางที่กำหนดด้วยการเปลี่ยนแปลงของเฟสเมื่อแพร่กระจายผ่านผนังที่ไม่อยู่ในแนวเดียวกันและทำให้เกิดการเปลี่ยนเส้นทางได้เนื่องจากการเอียงนี้ การลดทอนที่เกิดจากความเอียงของผนังถ้าในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.10

$$\alpha_{\text{tilt}} = \frac{4.343\pi^2\theta^2}{\lambda} \quad (2.10)$$

โดย θ คือ มุมเอียงของผนังหรือเพดานถ้ำ (เรเดียน)

ผลรวมของการลดทอนตามแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่เปรียบเทียบกับทฤษฎี ท่อนำคลื่นซึ่งประกอบไปด้วย การลดทอนเนื่องจากการหักเห การลดทอนจากความหยาบของผนัง และการลดทอนที่เกิดจากความเอียงของผนัง จะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

$$\alpha_{\text{Total}} = \alpha^{(v),(h)} + \alpha_{\text{roughness}} + \alpha_{\text{tilt}} \quad (2.11)$$

2.2.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติ ในการจำลองการแพร่กระจายคลื่น

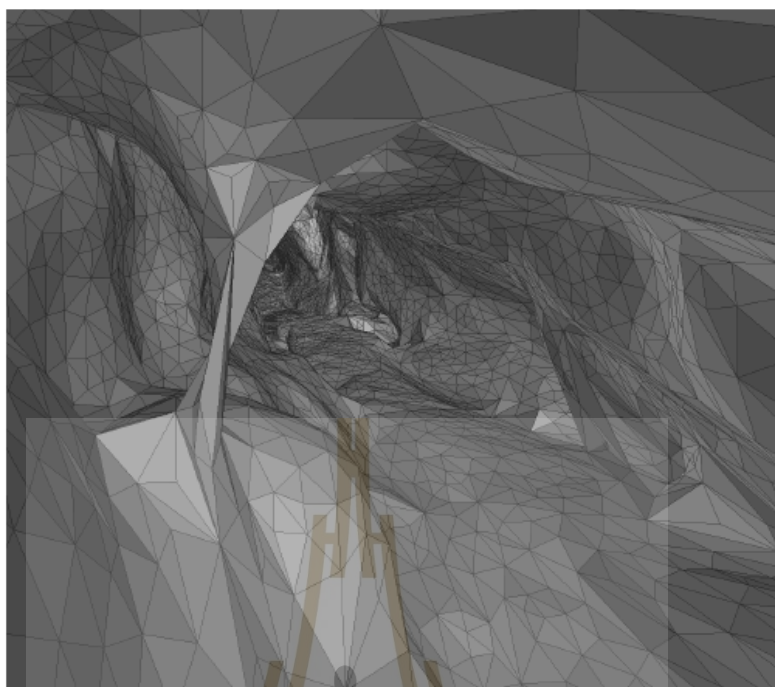
ปัจจุบันเทคโนโลยีการสำรวจและสร้างแผนที่ที่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของพื้นที่ทางภูมิศาสตร์หรือสิ่งก่อสร้างด้วยเทคโนโลยี LiDAR (Light detection and ranging) ก็เป็นสิ่งที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย อุปกรณ์กวาดตรวจ LiDAR (LiDAR 3D scanner) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เป็นเครื่องมือหรือเทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งออกพลังงานแสง (ส่วนใหญ่เป็นเลเซอร์) ไปยังสภาพแวดล้อมและตรวจจับการสะท้อนหรือการกระจายของแสงกลับมา เพื่อสร้างภาพหรือข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของวัตถุหรือพื้นที่ที่ถูกสแกน โดยอุปกรณ์กวาดตรวจ LiDAR

ทำงานโดยส่งสัญญาณเลเซอร์ออกไปในรูปแบบของพลังงานแสง และจับข้อมูลเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการส่งออกและการรับสัญญาณที่สะท้อนหรือกระจายกลับมา เพื่อวัดระยะทาง ความสูง หรือลักษณะอื่น ๆ ของวัตถุหรือพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งให้ความแม่นยำสูงในระดับมิลลิเมตร



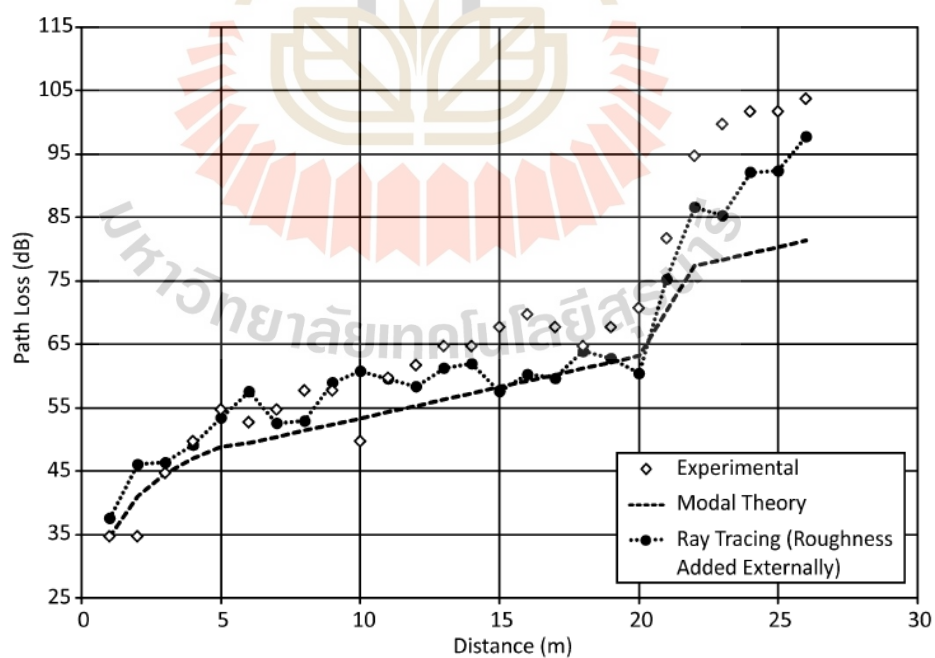
รูปที่ 2.14 อุปกรณ์กวาดตรวจ LiDAR 3D scanner รุ่น Leica BLK 360

นอกจากการศึกษากการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำหรืออุโมงค์ในเชิงทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยของ Michael D. Bedford et al. (2020) ยังได้นำเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองเรขาคณิต 3 มิติของอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เพื่อสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายของอุโมงค์ โดยใช้เทคนิคการไล่แสง (Ray tracing) ด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ด้วยเทคนิคนี้ทำให้สามารถระบุความหยาบแล้วความคดเคี้ยวของถ้ำที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำและส่งผลให้คำนวณการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นได้ใกล้เคียงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมากกว่าวิธีการสำรวจทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.16 ด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LiDAR จากงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางนำไปสู่การใช้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติ ในสร้างซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณลักษณะทางกายภาพของถ้ำ ทั้งขนาด ความหยาบของผนัง และความเอียงของผนัง ที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำที่ใช้ในการทดสอบจริง เพื่อใช้ในการศึกษาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่น่าสนใจต่อไป



รูปที่ 2.15 แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำ จาก Michael D. Bedford et al. (2020)

ที่มา: Michael D. Bedford et al. (2020)



รูปที่ 2.16 ผลการทดสอบที่ความถี่ 1.3 GHz ของ Michael D. Bedford et al. (2020)

ที่มา: Michael D. Bedford et al. (2020)

2.3 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ตั้งแต่แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในโพรงถ้ำตามธรรมชาติหรืออุโมงค์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน กลไกการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งคลื่นผิว คลื่นอวกาศ และคลื่นฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติต่าง ๆ ของหินที่ส่งผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นจึงค้นคว้าเกี่ยวกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์ เหมืองและถ้ำ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับถ้ำในธรรมชาติเพื่อใช้สำหรับอ้างอิงในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ และสุดท้ายจะเป็นการค้นคว้าเกี่ยวกับการจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำหรืออุโมงค์ด้วยแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการสร้างแบบจำลองที่นำเสนอการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมดังกล่าวนี้นี้ เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ต่ำภายในถ้ำต่อไป



บทที่ 3

การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุภายในโพรงถ้ำตั้งแต่แถบความถี่ Low frequency (LF) ไปจนถึงแถบความถี่ Ultra-high frequency (UHF) โดยเริ่มจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) สายอากาศภาคส่ง (Transmitting antenna) สายอากาศภาครับ (Receiving antenna) และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) หลังจากนั้นจะกล่าวถึงขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการทดสอบ และสุดท้ายจะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดสอบพร้อมทั้งอภิปรายถึงพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละแถบความถี่ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

3.2 ความถี่สำหรับศึกษาพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่น

การทดสอบพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นภายในถ้ำเชียงดาว (หินปูน) และถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย) เป็นส่วนหนึ่งของของโครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุภายในถ้ำ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้กล่าวไปข้างต้นได้ศึกษาการแพร่กระจายคลื่นความถี่ในแถบความถี่ UHF ไปจนถึงแถบความถี่สูงยิ่งยวด (Super high frequency: SHF) ซึ่งถือว่าเป็นแถบความถี่สูง โดยทำการทดสอบทั้งภายในถ้ำตามธรรมชาติและอุโมงค์ที่มนุษย์สร้างขึ้น

อย่างไรก็ตามในโครงการวิจัยฯ ได้ทำการศึกษาความถี่ตั้งแต่แถบ LF ไปจนถึงแถบความถี่ UHF โดยกำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่เริ่มต้นแถบความถี่ กลางแถบและปลายแถบความถี่ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อกำหนดการเข้าทำวิจัยในพื้นที่ของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืชในเรื่องการส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตภายในถ้ำ จึงได้ยกเว้นการทดสอบแถบความถี่ LF ที่ความถี่ต่ำกว่า 300 kHz ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของค้างคาวที่อาศัยเป็นจำนวนมากภายในถ้ำที่ทดสอบตามงานวิจัยของ Jones and Holderied (2007) และ Moss (2018) ซึ่งพบว่าค้างคาวหลายพันธุ์ที่มีอยู่ทั่วโลกจะใช้สัญญาณคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic) ในการสะท้อนกับสิ่งกีด-

ขวางที่ด้านหน้าเพื่อวัดระยะทางหรือเรียกว่าการหาตำแหน่งด้วยระบบเสียงสะท้อน (Echolocation) ที่ความถี่ตั้งแต่ 20 kHz – 200 kHz

ตารางที่ 3.1 ความถี่ที่กำหนดสำหรับใช้ทดสอบแต่ละแถบความถี่

แถบความถี่	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
LF	-	-	-	-	300 kHz
MF	350 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
HF	3.5 MHz	10 MHz	16.5 MHz	23.5 MHz	30 MHz
VHF	35 MHz	100 MHz	165 MHz	232.5 MHz	300 MHz
UHF	350 MHz	1000 MHz	1650 MHz	2325 MHz	3000 MHz

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบการแพร่กระจายคลื่นเพื่อวิเคราะห์ถึงการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น (Propagation path loss) ประกอบไปด้วยสายอากาศแต่ละแถบความถี่ดังนี้ ช่วงความถี่ 300 kHz – 350 kHz ใช้สายอากาศบ่วง Passive shielded (20 Hz–1 MHz AH Systems SAS-565L) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ช่วงความถี่ 1000 kHz – 3000 kHz ใช้สายอากาศ Isotron 200B ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ช่วงความถี่ 3.5 MHz–30 MHz ใช้สายอากาศบ่วง Passive shielded (1 kHz–30 MHz AH Systems SAS-564) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ช่วงความถี่ 35 MHz - 232.5 MHz ใช้สายอากาศแบบกรวยสองฝั่ง Biconical (20 MHz–1 GHz Aaronia BicoLOG 20100) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และในช่วงความถี่ 300 MHz – 3 GHz ใช้สายอากาศโมโนโพลความยาว 1/4 ของความยาวคลื่น (Omnidirectional quarter-wave monopole) สำหรับแต่ละความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.5 หลังจากนั้นป้อนสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ Rohde & Schwarz SMB100B signal generator ซึ่งใช้สัญญาณคลื่นต่อเนื่องแถบแคบ (Narrow-band continuous wave : CW) ไปยังสายอากาศผ่านสายนำสัญญาณแบบสูญเสียต่ำ (Low loss) 50 โอห์ม รุ่น LMR-240 ความยาว 2 เมตร ฝั่งภาครับประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Rohde & Schwarz FPH spectrum analyzer กับสายอากาศ Rohde & Schwarz HE400HF Antenna Module (8.3 kHz – 30 MHz) ในแถบความถี่ 300 kHz – 30 MHz ใช้สายอากาศ Rohde & Schwarz HE400UWB Antenna Module (30 MHz–6 GHz) ในแถบความถี่ 35 MHz – 300 MHz และใช้สายอากาศ Aaronia HyperLOG 3080 X Antenna (380 MHz – 8 GHz) ในแถบความถี่ 350 MHz – 3 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยทั้งหมดเป็นสายอากาศแบบรอบตัว (Omnidirectional antenna)



รูปที่ 3.1 สายอากาศบ่วง Passive shielded (20 Hz–1 MHz AH Systems SAS-565L)



รูปที่ 3.2 สายอากาศ Isotron 200B



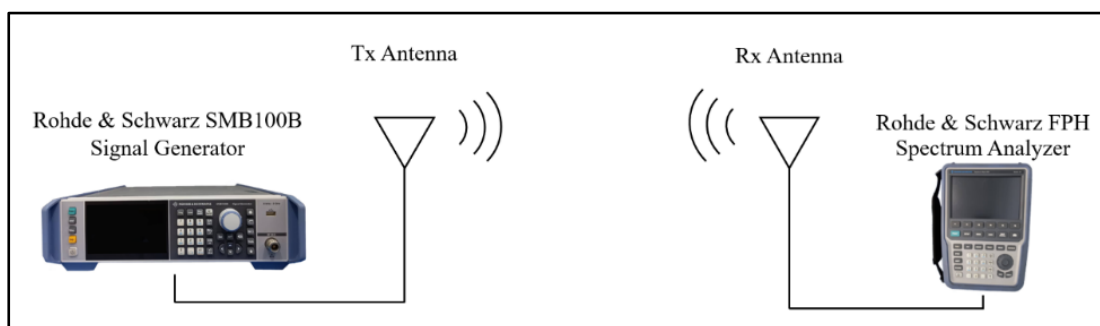
รูปที่ 3.3 สายอากาศบ่วง Passive shielded (1 kHz–30 MHz AH Systems SAS-564)



รูปที่ 3.4 สายอากาศแบบกรวยสองฝั่ง Biconical (20 MHz–1 GHz Aaronia BicoLOG 20100)



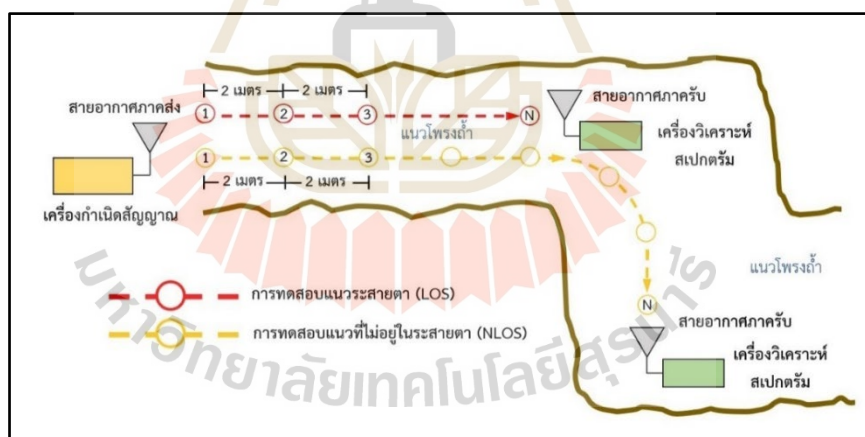
รูปที่ 3.5 สายอากาศโมโนโพลความยาว 1/4 ของความยาวคลื่น



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

3.4 ขั้นตอนการทดสอบ

การออกแบบการทดสอบเพื่อศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำอ้างอิงระเบียบวิธีการวัดทดสอบจากงานวิจัยของ Kjeldsen and Hopkins (2006) Bedford and Kennedy (2014) Soo et al. (2018) และ Lee and Bertoni (2003) ซึ่งวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นทั้งในแนว LOS และแนว NLOS ด้วยโพลาไรเซชันเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาคส่งและภาครับ (Vertical - Vertical linear polarization : V-V) โดยวิเคราะห์การสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นจากการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในแต่ละคลื่นความถี่ที่ทำการทดสอบสำหรับถ้ำทั้งสองแห่ง การวัดทดสอบทั้ง LOS และ NLOS จะมีการทดสอบแบบเดียวกันแต่จะแตกต่างกันเฉพาะสภาพภูมิประเทศภายในถ้ำเท่านั้น ในส่วนของอุปกรณ์ภาคส่งทั้งหมดจะถูกนำไปติดตั้งบริเวณจุดเริ่มต้นของแนวโพรงถ้ำที่ทดสอบ ส่วนสายอากาศภาครับเป็นแบบแถบความถี่กว้างพร้อมเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมสำหรับวัดค่าระดับกำลังของสัญญาณ จะปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับตามแนวโพรงถ้ำโดยกำหนดให้สายอากาศทั้งหมดทำการรับ-ส่ง ในแนวของเส้นกึ่งกลางโพรงถ้ำ (Center line) ให้มีระยะห่างออกมาจากสายอากาศภาคส่งครั้งละ 2 เมตร จนถึงระยะสุดท้ายที่ 20 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงลักษณะการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

อย่างไรก็ตามค่าระดับกำลังของสัญญาณที่สายอากาศภาครับรับได้และส่งไปยังอินพุต (Input) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไม่ใช่ค่าระดับกำลังของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง ณ ตำแหน่งนั้น เนื่องจากสายอากาศภาครับที่ใช้งานมีอัตราขยาย (Gain) เฉพาะของแต่ละความถี่ และยังเกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณที่ถูกต่อจากสายอากาศภาครับไปยังอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไม่เท่ากัน เนื่องจากวัตถุประสงค์คือการวัดค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นเท่านั้น ดังนั้นจึงพิจารณาค่าระดับกำลังของสัญญาณที่เริ่มแผ่ออกมาจากสายอากาศและแพร่กระจายไปตลอดแนวโพรงถ้ำทุก ๆ ระยะ 2

เมตร ของการวัดทดสอบมาหาค่าการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นได้โดยตรง ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมของคลื่นแต่ละความถี่ที่เดินทางในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติได้ โดยใช้ฟังก์ชันความชันของกำลังที่รับได้ต่อระยะทางจากกราฟของระดับกำลังสัญญาณที่รับได้เปรียบเทียบกับระยะทางเพื่อพิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านในแต่ละความถี่ หากความชันของสมการเชิงเส้นมีความชันมากจะแสดงให้เห็นถึงค่าการสูญเสียที่มาก ในขณะที่ความชันของสมการเชิงเส้นมีความชันต่ำกว่าจะแสดงให้เห็นว่าเกิดการสูญเสียที่ต่ำกว่าเช่นกัน นอกจากนี้ค่าระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ในสภาพแวดล้อมภายในโพรงถ้ำแต่ละระยะทางนั้นอาจเกิดการแพร่หลายวิถี (Multipath fading) จากการสะท้อนและการกระเจิงของคลื่นที่กระทบกับสิ่งกีดขวางภายในถ้ำจนทำให้เกิดการเสริมหรือหักล้างกันของคลื่นเกิดขึ้น

ทั้งนี้ ด้วยระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำที่ได้พัฒนาขึ้นมาในโครงการวิจัยฯ ได้ทำการระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำป่าภูหริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี แสดงในรูปที่ 3.8 สามารถรวมระยะทางตามเส้นทางโถงถ้ำตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายรวมทั้งสิ้น 457 เมตร และถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยถ้ำเชียงดาวนั้นมีเส้นทางของถ้ำที่ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นทางแรกเป็นเส้นทางตรงยาวไปถึงตำแหน่งของถ้ำพระนอนและต่อจากถ้ำพระนอนจะเป็นเส้นทางไปสู่ถ้ำน้ำ รวมระยะทางตามทางเดินจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดการทดสอบที่ของถ้ำน้ำได้ระยะทาง 647 เมตร ถัดมาในเส้นทางที่สองจะเป็นทางเดินไปยังส่วนที่เรียกว่าถ้ำม้า ซึ่งเป็นเส้นทางที่อยู่สูงกว่าระดับของถ้ำพระนอนและถ้ำน้ำ รวมระยะทางตามทางเดินตั้งแต่จุดเริ่มต้นถ้ำม้าไปยังจุดสิ้นสุดของถ้ำม้าเป็นระยะทาง 477 เมตร และเส้นทางที่สามจะเป็นทางเดินไปยังพื้นที่ของถ้ำแก้ว ซึ่งเป็นพื้นที่อันตรายห้ามนักท่องเที่ยวเข้าไปโดยเด็ดขาด รวมระยะทางจากทางแยกบันไดถ้ำม้าไปยังจุดสิ้นสุดถ้ำแก้วมีระยะทาง 202 เมตร ส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนทางออกจากปากทางถ้ำแก้วกลับมายังถ้ำพระนอนเป็นระยะทาง 60 เมตร โดยสรุปการทำแผนที่ระบุตำแหน่งภายในถ้ำเชียงดาวรวมระยะทางทั้งหมด 1,386 เมตร

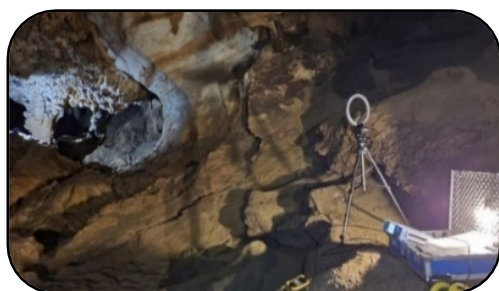


รูปที่ 3.8 การทำแผนที่พิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุพิกัดตำแหน่งในถ้ำ ณ ถ้ำป่าภูหริย์



รูปที่ 3.9 การทำแผนที่พิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุพิกัดตำแหน่งในถ้ำ ณ ถ้ำเชียงดาว

อย่างไรก็ตามในการทดสอบการส่งผ่านคลื่นแบบ LOS จึงจำเป็นต้องเลือกบริเวณที่มีโพรงถ้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงแนวเส้นตรงมากที่สุดเพราะต้องการพิจารณาเฉพาะการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นโดยโพรงถ้ำใกล้ที่เคียงแนวเส้นตรงที่นำมาเป็นสถานที่ทดสอบภายในถ้ำเชียงดาวจะอยู่ในส่วนของเส้นทางหลักของถ้ำและไม่อยู่ในส่วนสำหรับนักท่องเที่ยวทั่วไปเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบอื่นๆ ซึ่งมีระยะทางของโพรงถ้ำทางตรงอยู่ที่ประมาณ 30-40 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10(ก) ส่วนของถ้ำปาฏิหาริย์แสดงในรูปที่ 3.11(ก) การวัดทดสอบพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นแบบ NLOS ต้องการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นที่อาจเกิดการสะท้อนหรือเลี้ยวเบนของคลื่น จึงได้กำหนดให้เลือกใช้บางตำแหน่งของโพรงถ้ำที่ผนังมีลักษณะเป็นแนวโค้งสามารถบดบังสัญญาณแนว LOS ได้ เพื่อนำมาตั้งสมมุติฐานว่าคลื่นความถี่ใดสามารถเลี้ยวเบนหรือสะท้อนบนผนังถ้ำที่มีความคดเคี้ยวได้มากน้อยอย่างไร จะสามารถสรุปได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่บอกว่าคุณสมบัติคลื่นความถี่นั้นสามารถใช้งานได้ดีที่สุดในถ้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติได้ บริเวณที่ส่วนโค้งของผนังถ้ำเกิดการบดบังคลื่นความถี่วิทยุอย่างชัดเจนและมีระยะทางตามแนวโค้งของผนังถ้ำอย่างน้อย 20 เมตร ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10(ข) และในส่วนของการทดสอบในถ้ำปาฏิหาริย์ ทางผู้วิจัยได้เลือกบริเวณถัดจากประตูด้านหลังพระพุทธรูปซึ่งปิดห้ามนักท่องเที่ยวเข้าชม โดยในบริเวณนี้จะสามารถทดสอบได้ทั้ง LOS และ NLOS ดังแสดงในรูปที่ 3.11(ข)

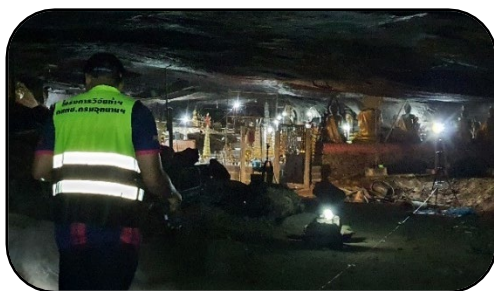


(ก) LOS



(ข) NLOS

รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงตำแหน่งที่ใช้ทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุ ณ ถ้ำเชียงดาว



(ก) LOS



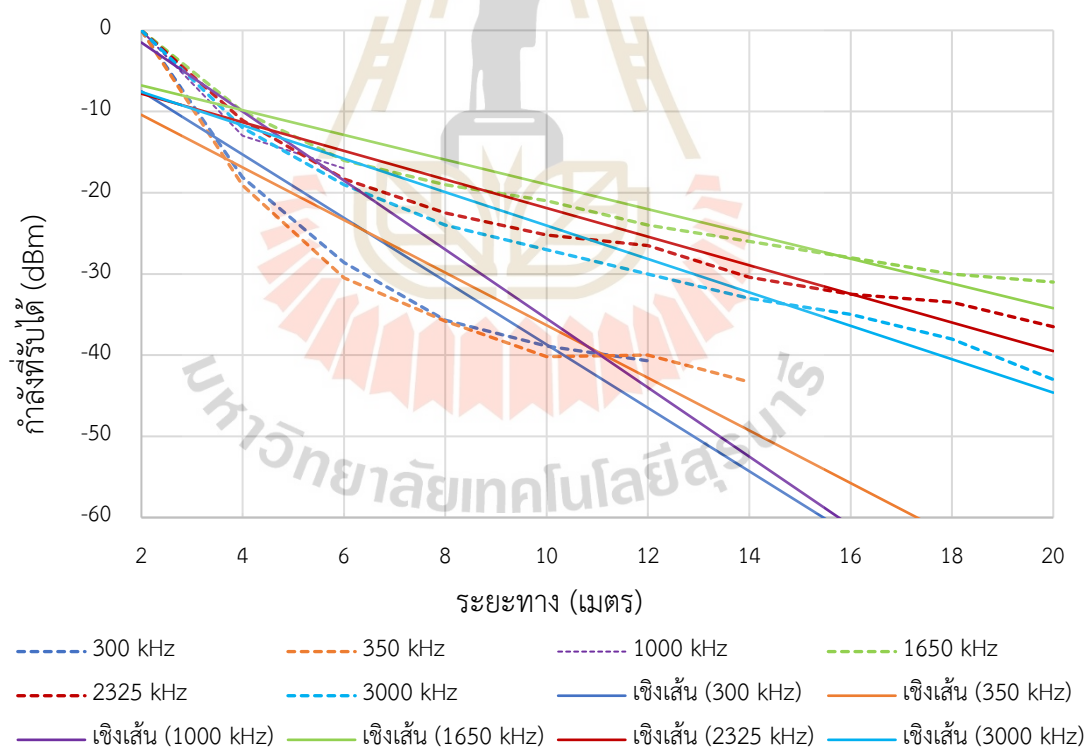
(ข) NLOS

รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงตำแหน่งที่ใช้ทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

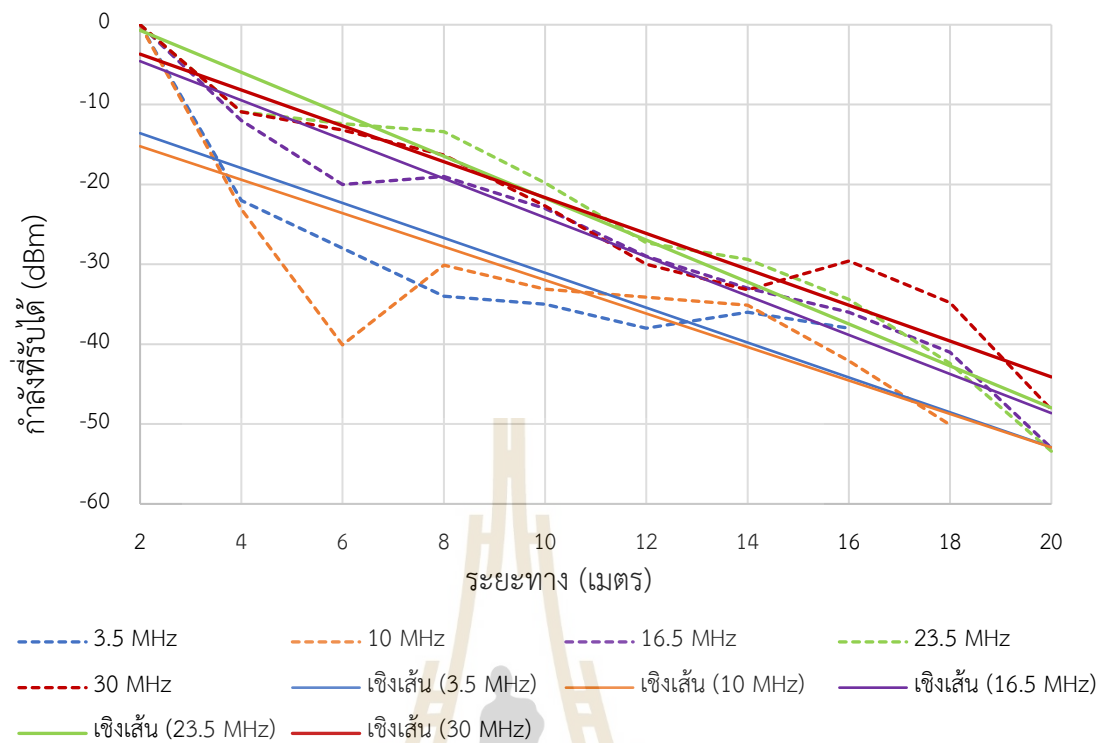
3.5 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

3.5.1 การทดสอบภายในถ้ำเชียงดาว (หินปูน)

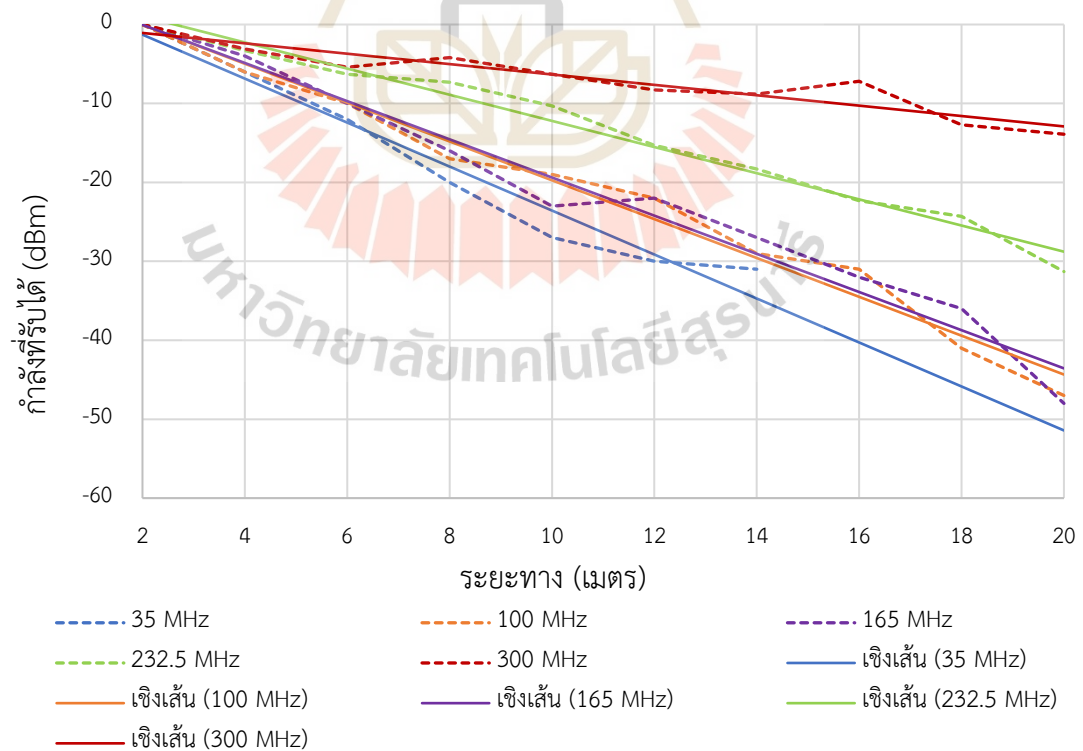
3.5.1.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)



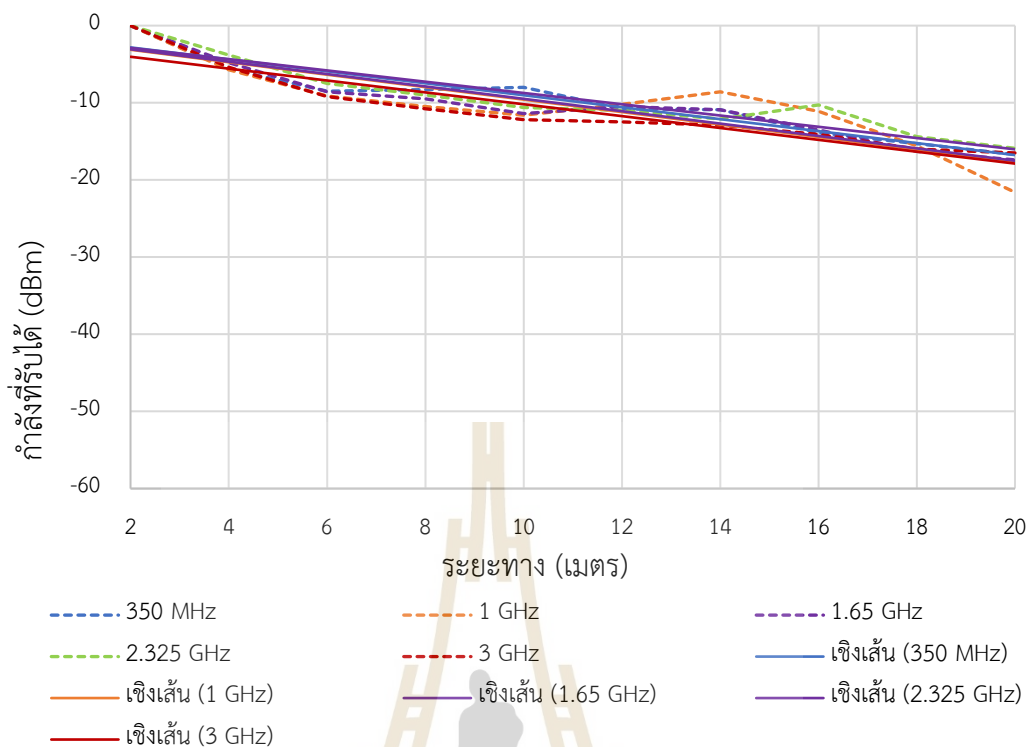
รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ LF และ MF



รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้าเชิงดาว) ย่านความถี่ HF

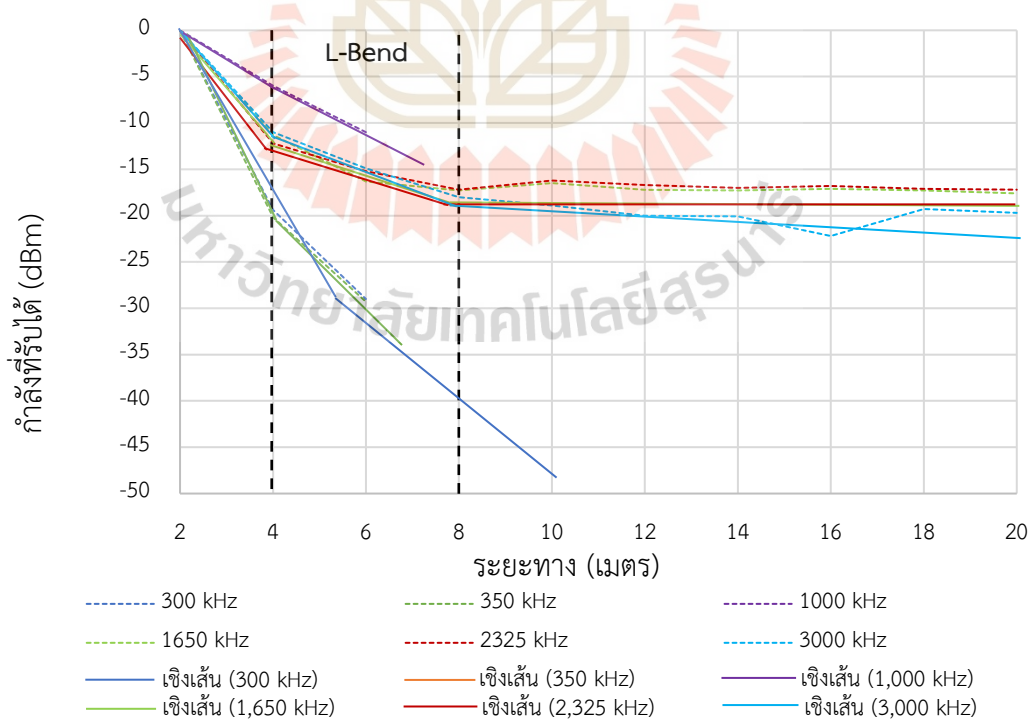


รูปที่ 3.14 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้าเชิงดาว) ย่านความถี่ VHF

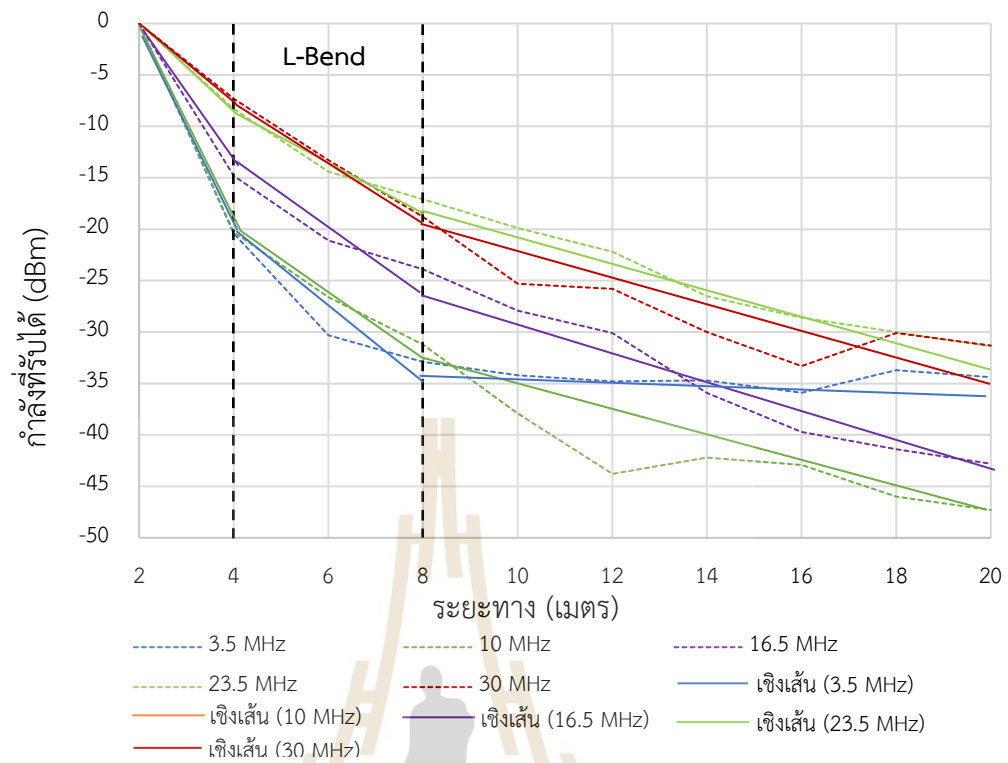


รูปที่ 3.15 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้าเชิงดาว) ย่านความถี่ UHF

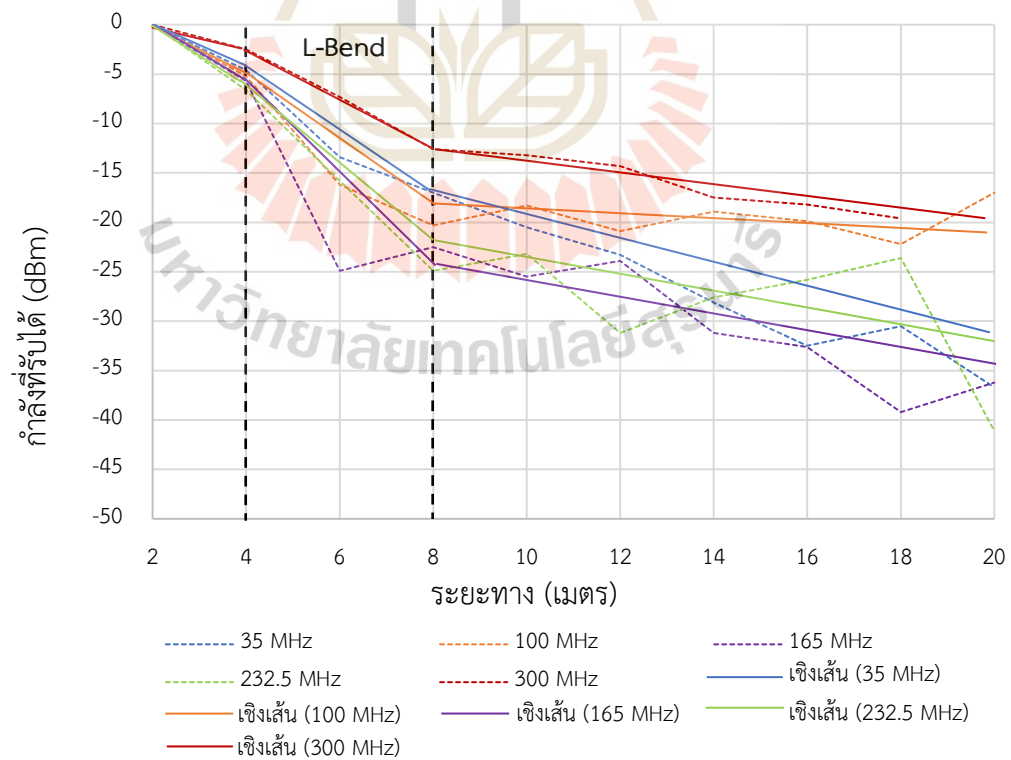
3.5.1.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)



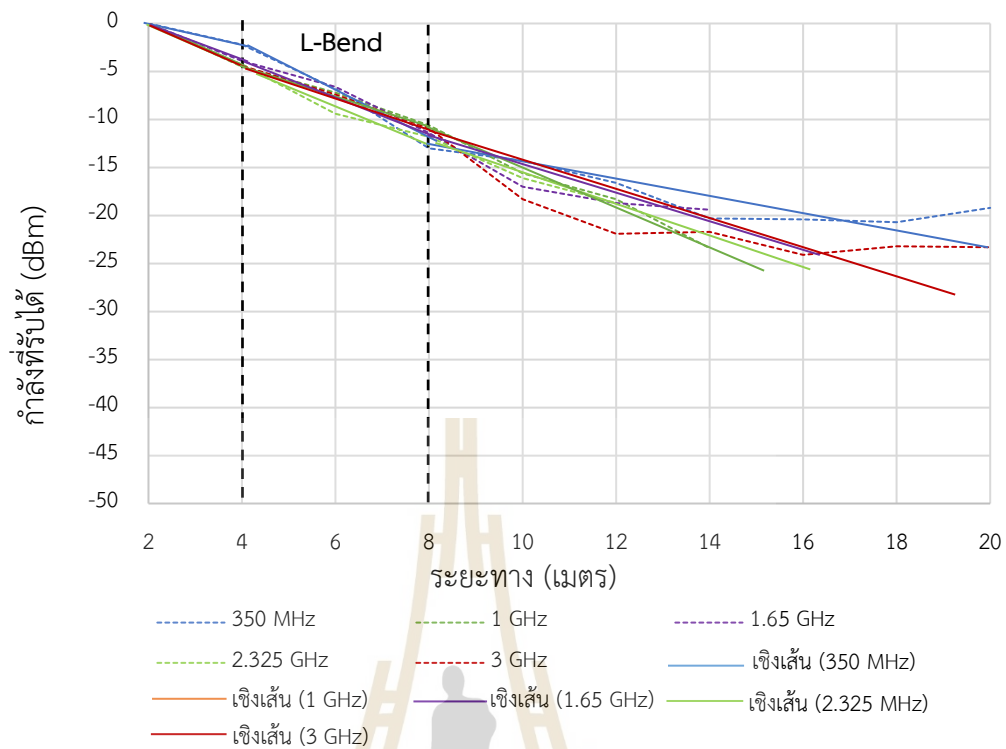
รูปที่ 3.16 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้าเชิงดาว) ย่านความถี่ LF และ MF



รูปที่ 3.17 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้าเชิงดาว) ย่านความถี่ HF



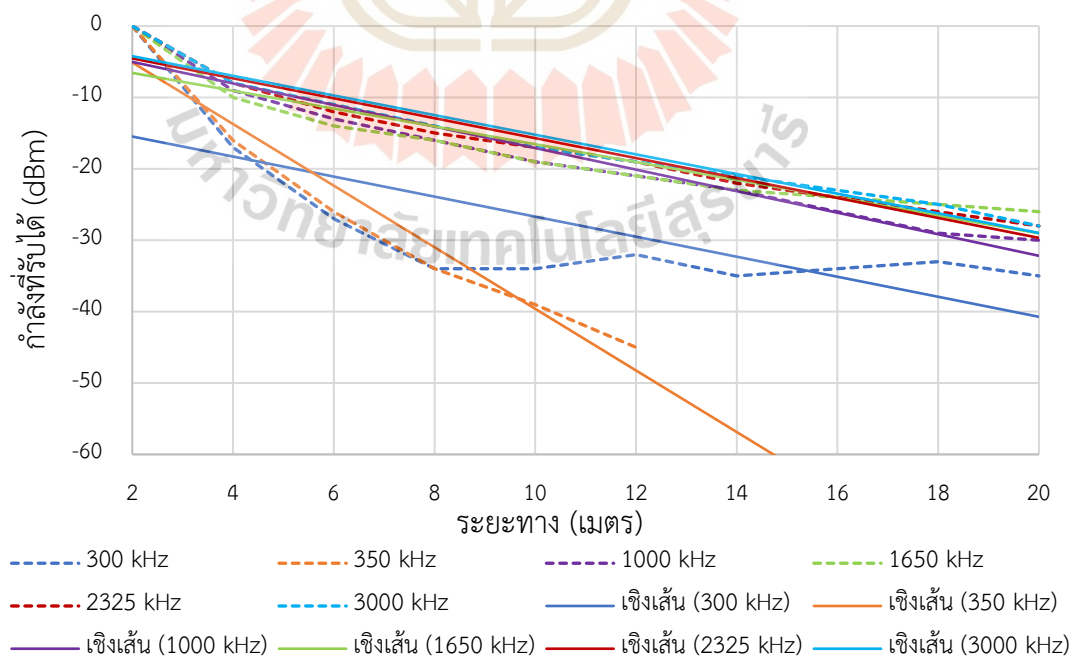
รูปที่ 3.18 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้าเชิงดาว) ย่านความถี่ VHF



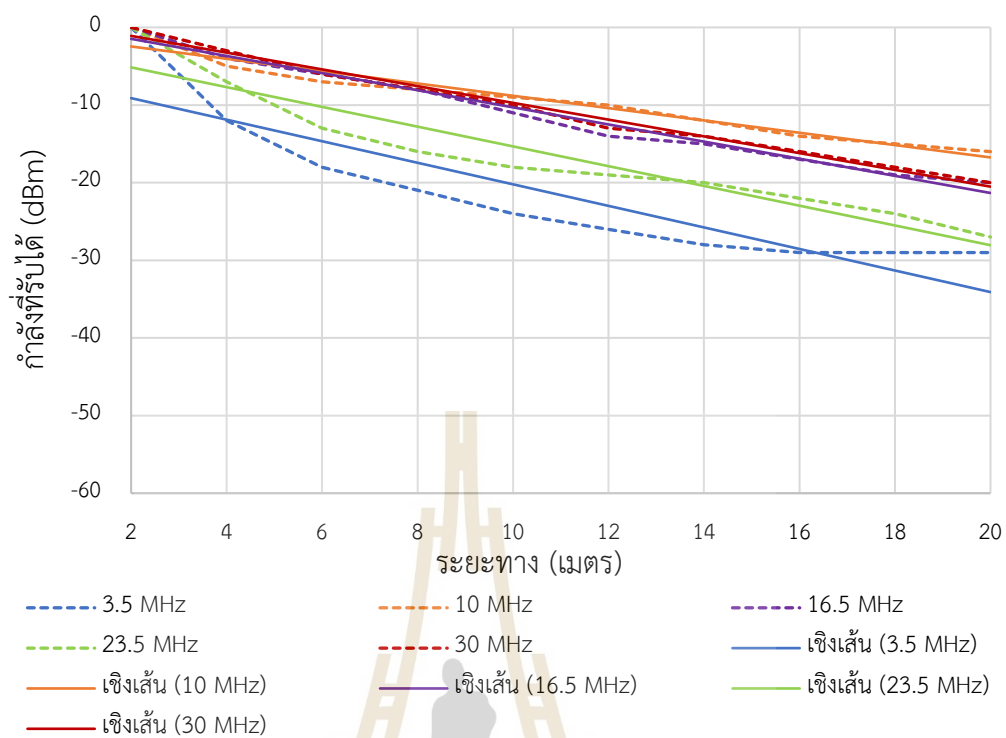
รูปที่ 3.19 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้ำเชียงดาว) ย่านความถี่ UHF

3.5.2 การทดสอบภายในถ้ำปาทหารีย์ (หินทราย)

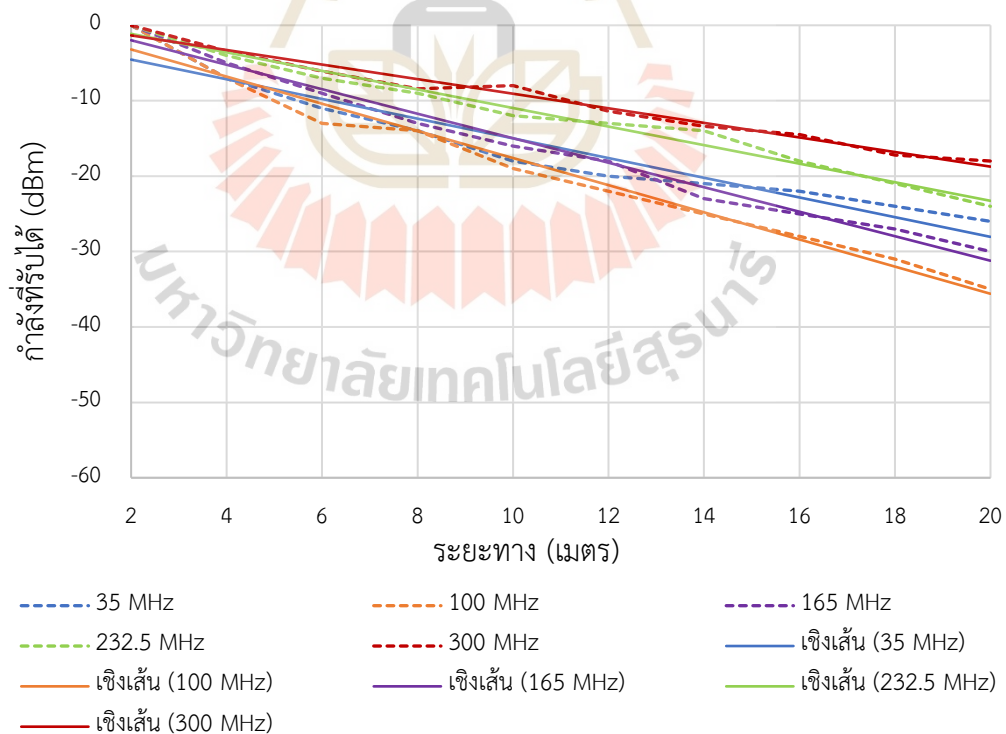
3.5.2.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)



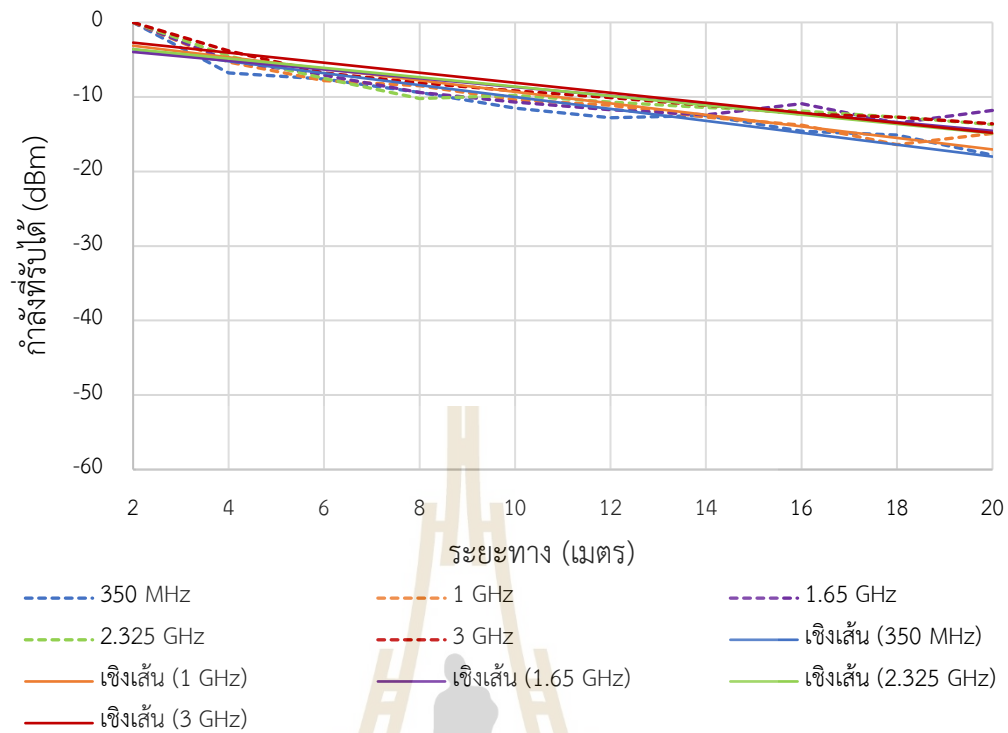
รูปที่ 3.20 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้ำปาทหารีย์) ย่านความถี่ LF และ MF



รูปที่ 3.21 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้าปฏิกิริยา) ย่านความถี่ HF

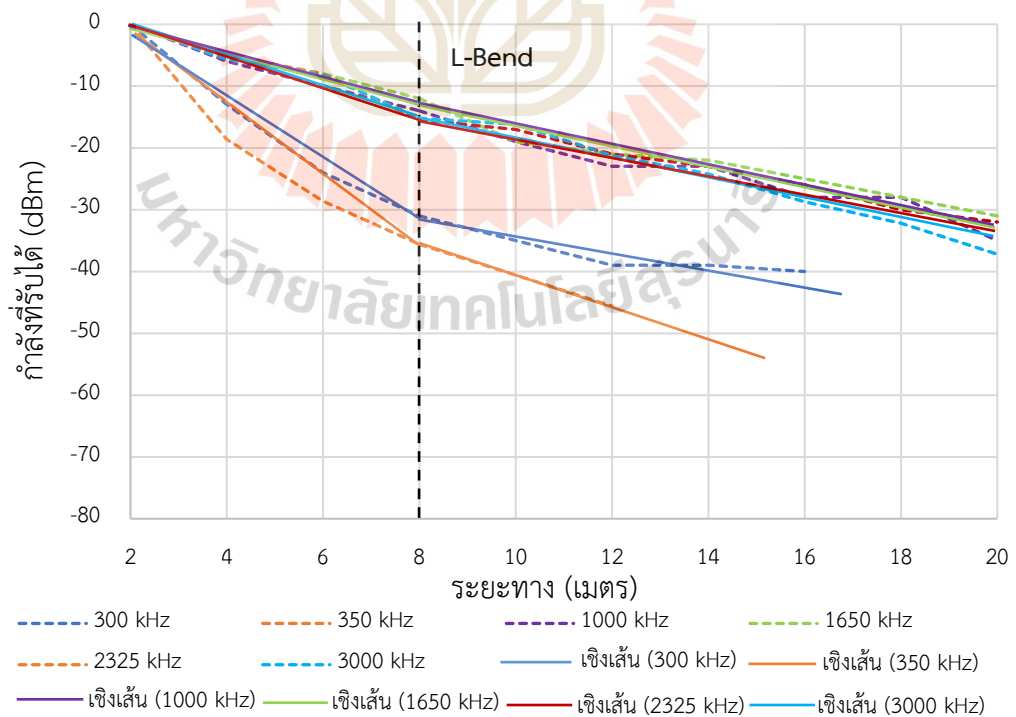


รูปที่ 3.22 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้าปฏิกิริยา) ย่านความถี่ VHF

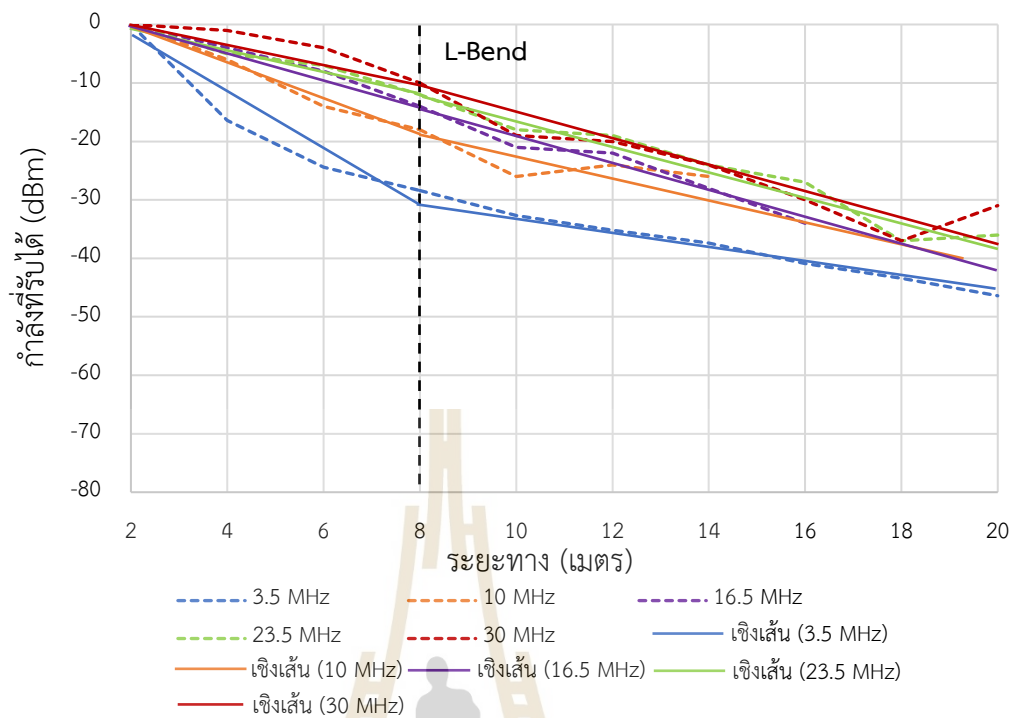


รูปที่ 3.23 ผลการทดสอบแบบ LOS (ถ้าปฏิกิริยา) ย่านความถี่ UHF

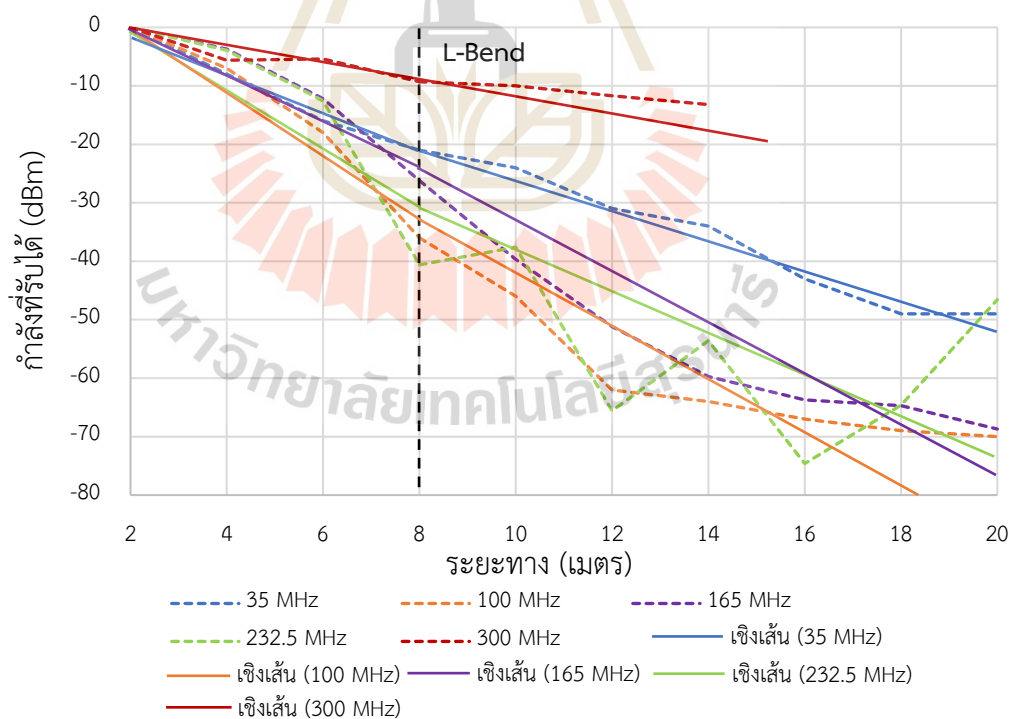
3.5.2.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)



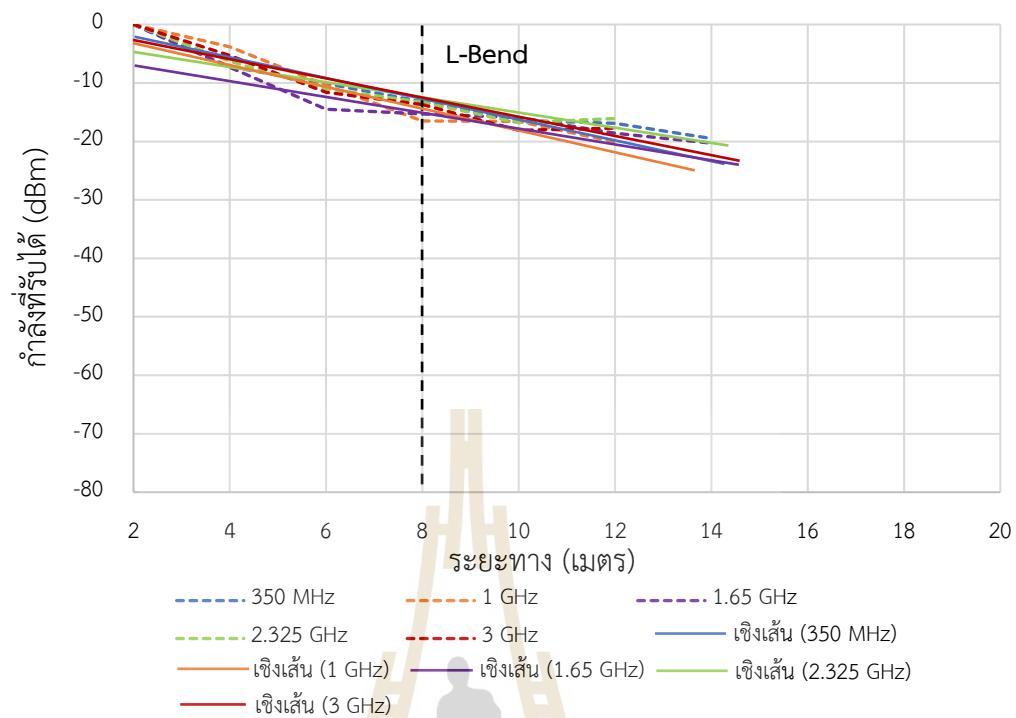
รูปที่ 3.24 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้าปฏิกิริยา) ย่านความถี่ LF และ MF



รูปที่ 3.25 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้าปฏิกิริยา) ย่านความถี่ HF



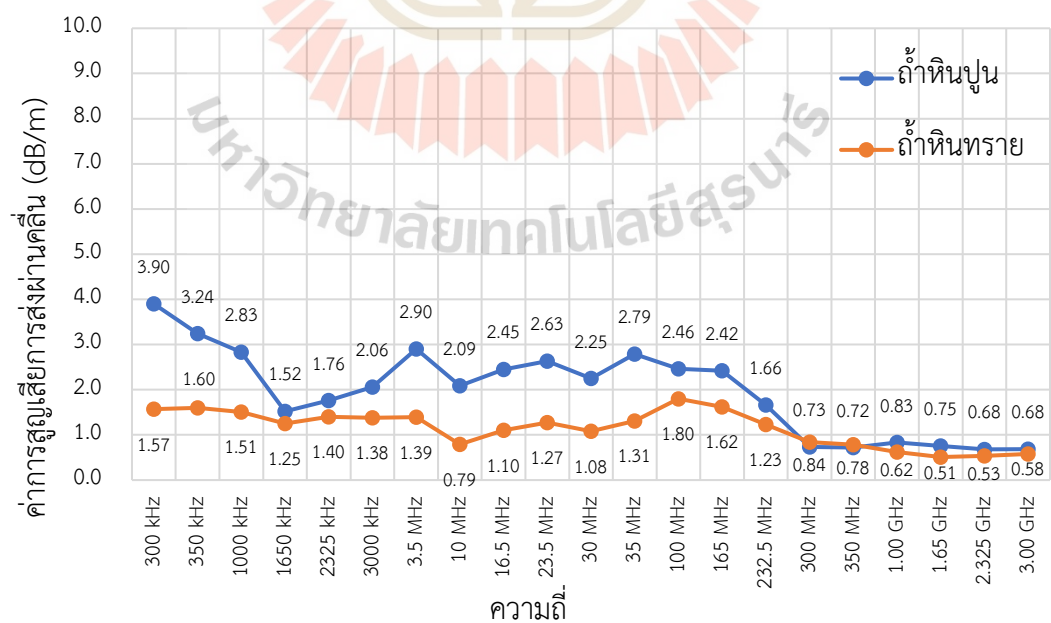
รูปที่ 3.26 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้าปฏิกิริยา) ย่านความถี่ VHF



รูปที่ 3.27 ผลการทดสอบแบบ NLOS (ถ้าปฏิกิริยา) ย่านความถี่ UHF

3.6 อภิปรายผลการทดสอบ

3.6.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)



รูปที่ 3.28 การสูญเสียการส่งผ่านคลื่นจากการทดสอบ LOS ทุกย่านความถี่

จากรูปที่ 3.28 ได้แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร ซึ่งเป็นการพิจารณาเฉพาะการวัดทดสอบแบบ LOS ที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาครับและภาคส่งซึ่งเป็นมาตรฐานของระบบวิทยุสื่อสารโทรคมนาคมทั่วไป จากกราฟเปรียบเทียบทั้งสองกรณีของทั้งถ้ำหินปูนและหินทรายพบว่า

1) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรแบบ LOS ภายในโพรงถ้ำหินปูนจะมีค่าสูงกว่าถ้ำหินทรายทุกย่านความถี่ ยกเว้นที่ความถี่ 350 kHz และ 300 MHz ซึ่งเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนที่สุด

2) แถบความถี่ LF ปลายแถบ (300 kHz) และแถบความถี่ MF ต้นแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรค่อนข้างสูง เนื่องจากมีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบคลื่นผิว (ความถี่ต่ำกว่า 2000 kHz) หากส่งผ่านตัวกลางที่เป็นดินหรือหินที่มีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กสอดคล้องกับความถี่และความยาวคลื่น จะเกิดการแพร่กระจายคลื่นไปในเนื้อตัวกลางนั้นมากกว่าที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปในแนวระดับสายตา ทำให้เกิดการสูญเสียและลดทอนสูงในกรณีของการวัดทดสอบแบบ LOS อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตที่มีนัยสำคัญคือที่ความถี่ 350 kHz ภายในโพรงถ้ำหินทรายจะเกิดค่าการสูญเสียและลดทอนสูงกว่าภายในโพรงถ้ำหินปูนเพียงความถี่เดียว

3) แถบความถี่ MF ยังคงมีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นผิว แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงสมบัติการแพร่กระจายคลื่นบนพื้นผิวของผนังและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะแพร่กระจายลงในตัวกลางที่เป็นหินปูนหรือหินทราย ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับผนังและพื้นถ้ำได้ดี แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่แถบความถี่ MF ปลายแถบและแถบความถี่ HF ต้นแถบ ซึ่งมีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่กระจายไปตามพื้นผิวทำให้มีค่าการสูญเสียและการลดทอนมากกว่าอีกสองความถี่ทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย

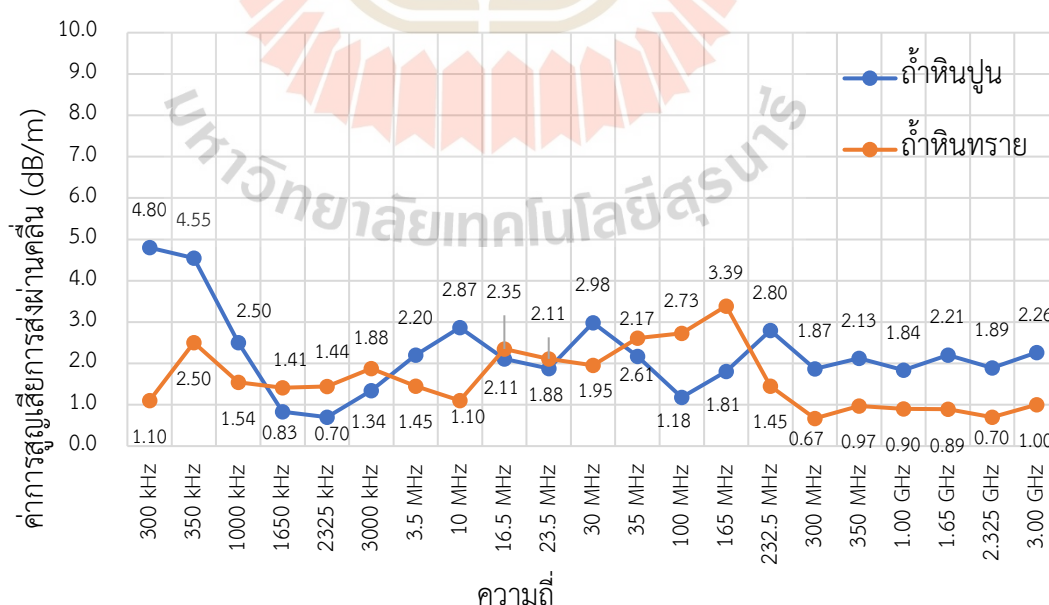
4) แถบความถี่ HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) มีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นฟ้าที่สามารถสะท้อนหรือเลี้ยวเบนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือส่วนโค้งของโลกได้ดี จึงทำให้มีการใช้คลื่นความถี่นี้ในระบบวิทยุสื่อสารระยะไกลที่อยู่บนพื้นผิวโลก อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างจากธรรมชาติที่ควรเป็นของคลื่นความถี่นี้ เนื่องจากการสะท้อนและเลี้ยวเบนบนผนังถ้ำที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอไม่เท่าใดนัก

5) แถบความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) มีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นอวกาศ ซึ่งสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีในภูมิภาคที่โล่ง โดยคลื่นต้องอยู่ในแนวระดับสายตาและมีการสูญเสียในอากาศว่างเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำพบว่าเกือบทุกความถี่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านในถ้ำหินปูนอยู่ระหว่าง 0.84 dB/m ถึง 2.79 dB/m ในขณะที่วัดทดสอบในถ้ำหินทรายจะเกิดค่าการสูญเสียต่ำกว่า (0.732

dB/m ถึง 1.8 dB/m) โดยที่ความถี่ 300 MHz มีค่าการสูญเสียต่ำสุดทั้งในโพรงถ้ำแบบหินปูนและหินทราย แต่สิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนก็คือ ยิ่งความถี่ในย่าน VHF นี้มีค่าสูงขึ้นกลับมีค่าการสูญเสียและการลดทอนลดลงที่ระยะทางเท่ากันลดลง ซึ่งตั้งสมมุติฐานว่าเนื่องจากความยาวของคลื่นมีขนาดสั้นลงทำให้สามารถผ่านโพรงถ้ำที่มีขนาดกว้างกว่าได้ดีขึ้น

6) แถบความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นตรงเช่นเดียวกับแถบความถี่ VHF ซึ่งสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีในภูมิประเทศที่โล่งและอยู่ในแนวระดับสายตา สำหรับความถี่ในแถบความถี่ UHF นี้เมื่อทำการทดสอบในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทพบว่าการสูญเสียและการลดทอนในระยะทาง 20 เมตรค่อนข้างต่ำและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งการวัดทดสอบในถ้ำหินปูนและหินทราย โดยมีสาเหตุมาจากสมมุติฐานขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของความถี่ในย่าน UHF นี้ได้ นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงบ้าง เนื่องจากเมื่อคลื่นดังกล่าวแพร่กระจายไปกระทบกับสิ่งกีดขวางในถ้ำและเกิดการสะท้อนไปยังจุดที่ติดตั้งสายอากาศภาครับ อาจทำให้เกิดการเสริมและหักล้างเฟสของคลื่นได้ หากต้องการส่งรับคลื่นภายในถ้ำระยะไกลก็จะพบกับอุปสรรคจากความคดเคี้ยวและหินที่เป็นสิ่งกีดขวางการแพร่กระจายคลื่นแบบ LOS ซึ่งแถบความถี่ UHF ไม่สามารถแพร่กระจายผ่านไปได้ นอกจากจะนำมาใช้โพรงถ้ำที่เป็นแนวตรงใกล้เคียงเงื่อนไขแบบ LOS หรือภายในโพรงถ้ำขนาดใหญ่ที่มีหินงอกหินย้อยน้อยที่สุด

3.6.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)



รูปที่ 3.29 การสูญเสียการส่งผ่านคลื่นจากการทดสอบ NLOS ทุกย่านความถี่

ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่แพร่ในโพรงถ้ำนั้น จะพิจารณาจากผลการแพร่ของคลื่นที่มีสิ่งกีดขวางตามธรรมชาติภายในโพรงถ้ำเป็นอุปสรรคขวางเส้นทางการแพร่คลื่นอยู่ เช่น ความคดเคี้ยวของโพรงถ้ำ ก้อนหินขนาดใหญ่ หรือหินงอกหินย้อยที่กีดขวางเส้นทางการแพร่ของคลื่นในแต่ละย่านความถี่ ดังนั้นในการพิจารณาจึงพิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรและค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ระยะจากจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งโค้งไปตามส่วนโค้งของผนังถ้ำที่เป็นสิ่งกีดขวางจนถึงระยะที่เป็นทางตรง โดยเรียกระยะนี้ว่า L-Bend ซึ่งพื้นที่ที่ใช้ในการวัดทดสอบภายในถ้ำเชียงดาว จะมีระยะอยู่ที่ 10 เมตร และพื้นที่ที่ใช้ในการวัดทดสอบภายในถ้ำปาฏิหาริย์ จะมีระยะอยู่ที่ 8 เมตร โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านของทุกย่านความถี่ที่กำหนดแสดงในรูปที่ 3.29

จากรูปที่ 3.29 ได้แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรซึ่งสุดขอบเขตของพื้นที่ที่มีอุปสรรคกีดขวางซึ่งถือว่าเป็นการส่งรับคลื่นแบบ NLOS โดยให้สายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับมีการโพลาไรเซชันเป็นแบบแนวตั้งเหมือนกัน เพื่อพิจารณาการเหนี่ยวนำหรือการซึมซาบของคลื่นในเนื้อของหินปูนและหินทราย การเลี้ยวเบน และการสะท้อนของคลื่นในแต่ละความถี่ จากกราฟเปรียบเทียบทั้งสองกรณีของทั้งถ้ำหินปูนและหินทรายพบว่า

1) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรเมื่อสิ้นสุดระยะ L-Bend ของการวัดทดสอบจะมีค่าสูงต่ำสลับกันไประหว่างภายในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ขณะที่ค่าการลดทอนการส่งผ่านด้วยระยะทางดังกล่าวในกรณีของถ้ำหินปูนจะมีค่าสูงกว่าของถ้ำหินทรายตั้งแต่ความถี่ 300 kHz ถึง 30 MHz จากนั้นจะสลับมามีค่าต่ำกว่าตั้งแต่ความถี่ 35 MHz ถึง 232.5 MHz และขยับขึ้นสูงกว่าอีกครั้งจนถึงความถี่ 3 GHz

2) แถบความถี่ LF ปลายแถบ (300 kHz) และแถบความถี่ MF ต้นแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และ ค่าการลดทอนภายในเนื้อหินปูนที่เกิดขวางสูงกว่าในเนื้อหินทราย โดยเฉพาะที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz มีค่าการสูญเสียต่อระยะหนึ่งเมตรสูงมากถึง 4.8 dB/m และ 4.55 dB/m เนื่องจากมีสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นผิว (ความถี่ต่ำกว่า 2000 kHz) เมื่อส่งผ่านเข้าไปในโพรงถ้ำที่มีผนังตัวกลางที่เป็นดินหรือหินจะเกิดการแพร่กระจายคลื่นไปในเนื้อตัวกลางนั้นมากกว่าที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปในแนว LOS ทำให้เกิดการสูญเสียและลดทอนสูงในกรณีของการวัดทดสอบแบบ NLOS และค่าการสูญเสียและการลดทอนการส่งผ่านในกรณีของถ้ำหินปูนมีค่าสูงกว่ากรณีของถ้ำหินทรายทั้งสามความถี่ อย่างไรก็ตามเมื่อความถี่สูงขึ้นถึง 1000 kHz ค่าการสูญเสียและการลดทอนการส่งผ่านในระยะ L-Bend จะมีค่าลดลงทั้งภายในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทรายทั้งนี้อาจมีปัจจัยมาจากที่ความถี่ 1000 MHz การแพร่กระจายคลื่นจะเริ่มเปลี่ยนจากการแพร่กระจายลงเนื้อหินของผนังถ้ำเป็นการแพร่กระจายคลื่นบนพื้นผิวผนังถ้ำมากกว่า ทำให้สายอากาศภาครับซึ่งวางขนานและใกล้กับแนวผนังถ้ำสามารถรับค่ากำลังที่แพร่ออกมาจาก

พื้นผิวของผนังถ้ำได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะผนังถ้ำหินปูนจะให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตร ต่ำกว่าผนังถ้ำหินทราย

3) แถบความถี่ MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นผิว และเช่นเดียวกันเมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนผนังและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะแพร่กระจายลงไปในตัวกลางที่กีดขวาง ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับผนังและพื้นถ้ำได้ดีขึ้น แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่ย่านความถี่ MF ปลายแถบและ HF ต้นแถบ สมบัติการแพร่กระจายคลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่กระจายไปตามพื้นผิวทำให้ค่าการสูญเสียและการลดทอนเริ่มยกระดับขึ้นทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย

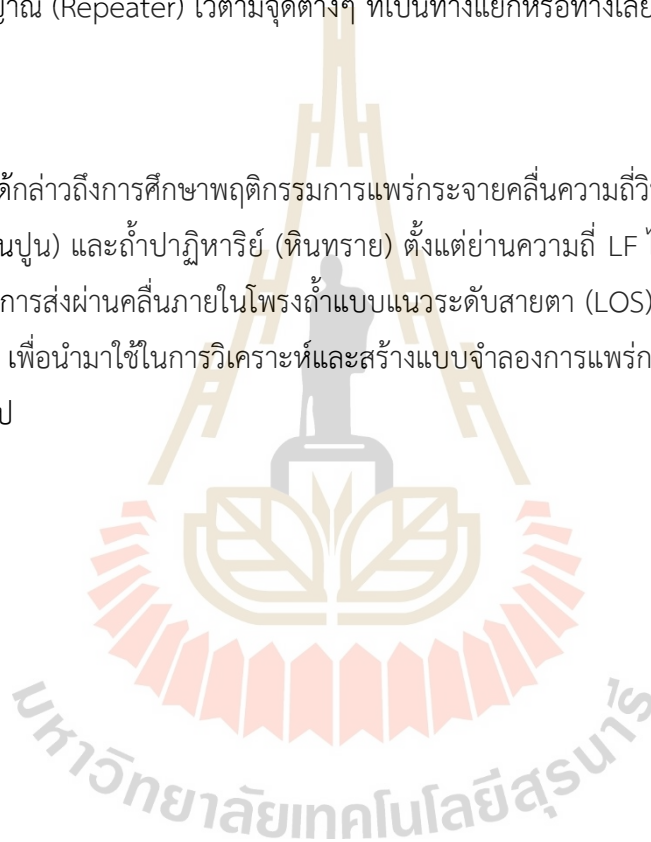
4) แถบความถี่ HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) แม้จะมีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นฟ้าที่สามารถสะท้อนหรือเลี้ยวเบนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือส่วนโค้งของผิวโลกได้ดี แต่เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมเป็นแบบ NLOS จะเกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบนบนผนังถ้ำที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอในลักษณะของการกระจายแบบไร้ทิศทางมากกว่า ทำให้การสูญเสียและค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ความถี่มีค่าสูงขึ้นในกรณีของถ้ำหินปูนแต่มีค่าลดลงในกรณีของถ้ำหินทรายที่ความถี่ 10 MHz และมีค่าใกล้เคียงกันที่ความถี่ 16.5 MHz และ 23.5 MHz จากนั้นจึงเปลี่ยนแปลงอีกครั้งหนึ่งที่ความถี่ 30 MHz (เช่นเดียวกับที่ความถี่ 10 MHz) จะเห็นว่าที่ความถี่ 23.5 MHz เกิดการสูญเสียการส่งผ่านบริเวณ L-Bend มีค่าต่ำใกล้เคียงกันทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทรายและมีค่าการลดทอนการส่งผ่านต่างกัน 7.9 dB ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจากภายในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทมีสภาพแวดล้อมของสิ่งกีดขวางที่แตกต่างกันตลอดความยาวของโพรงถ้ำ การพิจารณาบริเวณ L-Bend ตำแหน่งเดียวอาจจะใช้ไม่ได้กับบริเวณอื่นๆ จึงเป็นเรื่องยากที่จะใช้การส่งรับคลื่นในระยะไกลภายในโพรงถ้ำอย่างหวังผล

5) แถบความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) ซึ่งมีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นอวกาศ เมื่อนำมาวัดทดสอบแบบ NLOS ซึ่งมีสิ่งกีดขวางเป็นผนังถ้ำและก้อนหินขนาดใหญ่ พบว่าเกือบทุกความถี่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านบริเวณ L-Bend ในถ้ำหินปูนอยู่ระหว่าง 1.18 dB/m ถึง 2.8 dB/m ในขณะที่ในถ้ำหินทรายจะเกิดค่าการสูญเสีย สูงกว่าที่ความถี่ 35 MHz, 100 MHz และ 165 MHz (2.61 dB/m ถึง 3.51 dB/m) ซึ่งค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นที่ปลายขอบเขตของ L-Bend ก็มีลักษณะที่สอดคล้องกัน แต่เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นที่ 232.5 MHz และ 300 MHz ค่าการสูญเสียการส่งผ่านในถ้ำหินปูนจะมีค่าสูงกว่าในถ้ำหินปูน ในขณะที่ค่าการลดทอนที่ปลายขอบเขต L-Bend ที่เกิดขึ้นในถ้ำหินทรายยังคงมีค่าสูงกว่าในถ้ำหินทรายจนลดลงมาใกล้เคียงกับถ้ำหินปูนอีกครั้งที่ความถี่ 300 MHz

6) แถบความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นตรงเช่นเดียวกับแถบความถี่ VHF ซึ่งสามารถแพร่กระจายคลื่นแบบ LOS ได้ดีกว่าแบบ LNOS เมื่อทำการทดสอบในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทพบว่าการสูญเสียการส่งผ่านในระยะของ L-Bend สูงกว่ากรณีของ LOS โดยมีค่าใกล้เคียงทุกความถี่ ดังนั้นหากต้องการส่งรับคลื่นภายในถ้ำระยะไกลก็必将พบกับอุปสรรคจากความคดเคี้ยวและหินที่เป็นสิ่งกีดขวางการแพร่คลื่นทันทีทำให้ค่าระดับกำลังที่รับได้โดยสายอากาศรับที่จุดสุดท้ายของ L-Bend มีค่าต่ำเกินไป จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในระบบสื่อสารระยะไกลภายในโพรงถ้ำประเภทใดๆ เลย ยกเว้นจะออกแบบระบบเครื่องทวนสัญญาณ (Repeater) ไว้ตามจุดต่างๆ ที่เป็นทางแยกหรือทางเลี้ยวภายในโพรงถ้ำ

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุภายในโพรงถ้ำระหว่างถ้ำเชียงดาว (หินปูน) และถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย) ตั้งแต่น่านความถี่ LF ไปจนถึงย่านความถี่ UHF โดยการทดสอบการส่งผ่านคลื่นภายในโพรงถ้ำแบบแนวระดับสายตา (LOS) และแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (NLOS) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำที่จะกล่าวในบทถัดไป



บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ

4.1 บทนำ

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุภายในโพรงถ้ำ ตั้งแต่แถบความถี่ LF ไปจนถึงแถบความถี่ UHF พร้อมทั้งอภิปรายถึงพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละแถบความถี่ ในบทนี้จะนำผลการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่นมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ ด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาพิจารณาค่าการลดทอนที่เกิดจากทั้งขนาดของโพรงถ้ำ ความหยาบของพื้นผิว ความเอียงของผนัง และชนิดของถ้ำ เป็นต้น หลังจากนั้นจะนำแบบจำลอง 3 มิติของโพรงถ้ำที่ใช้ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ กวาดตรวจ LiDAR 3D Scanner มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณลักษณะทางกายภาพของถ้ำจริง ตลอดจนคำนวณการลดทอนด้วยแบบจำลองที่นำเสนอ นอกจากนี้ยังเพิ่มเติมการนำแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำมาจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง CST สุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดสอบผลลัพธ์จากแบบจำลองที่นำเสนอเดิม ผลลัพธ์จากแบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอ และเพิ่มเติมผลลัพธ์จากโปรแกรม CST อีกด้วย

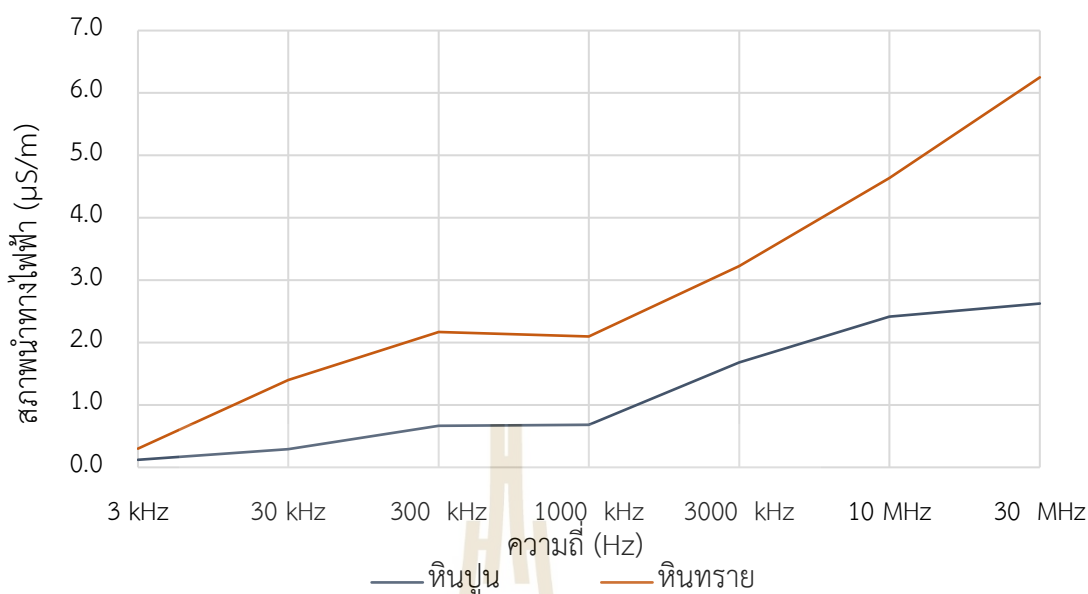
4.2 การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ทำการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุภายในโพรงถ้ำ โดยการนำทฤษฎีของท่อนำคลื่นมาใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อสร้างแบบจำลองการลดทอนที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การลดทอนเนื่องจากการหักเหคลื่นบนผนัง การลดทอนจากความหยาบของผนัง และการลดทอนจากความเอียงของผนัง และเพดาน เป็นต้น อย่างไรก็ตามที่ผ่านมาได้ศึกษาเพียงในแถบความถี่สูงตั้งแต่แถบความถี่ UHF ถึงแถบความถี่ SHF ซึ่งยังสามารถใช้แบบจำลองของท่อนำคลื่นได้ เนื่องจากโดยทั่วไปความยาวคลื่นของแถบความถี่นี้จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงถ้ำ ซึ่งหากนำความถี่ต่ำที่มีความยาวคลื่นมากกว่าขนาดของโพรงถ้ำมาใช้กับแบบจำลองท่อนำคลื่นจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงมาก เช่น การคำนวณด้วยแบบจำลองท่อนำคลื่นที่ความถี่ 300 kHz ของถ้ำเชียงดาวมีค่าการลดทอนต่อเมตรเท่ากับ 56,272.67 dB/m และถ้ำปาลิหารีย์มีค่าการลดทอนต่อเมตรเท่ากับ 495,880.55 dB/m หรือกล่าวได้ว่าคลื่นความถี่ต่ำมาก ๆ จะไม่สามารถเดินทางผ่านโพรงถ้ำที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นได้

ในทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามจุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำความถี่ 300, 1000, 1650, 2325 และ 3000 kHz ซึ่งอยู่ในช่วงปลายแถบความถี่ LF จนถึงปลายแถบความถี่ MF โดยการศึกษาพบว่าด้วยธรรมชาติของแถบความถี่นี้ที่มีกลไกการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะของคลื่นผิว ซึ่งเกิดจากสภาพนำทางไฟฟ้าของตัวกลางซึ่งในที่นี้คือดินและหินที่ส่งผลต่อลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ทำให้เมื่อคลื่นที่มีความถี่ต่ำเพียงพอและสอดคล้องกับสภาพนำไฟฟ้าของตัวกลางจะสามารถแพร่กระจายไปบนตัวกลางได้ด้วยสมบัติความถี่ผิว ดังนั้นจึงได้นำตัวอย่างหินปูนจากถ้ำเชียงดาวและหินทรายจากถ้ำปาฏิหาริย์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มาทำการทดสอบสภาพนำทางไฟฟ้าและสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์วัด BK Precision 894 LCR meter ซึ่งสามารถทดสอบได้ในช่วงความถี่ 50 Hz - 500 kHz และ Keysight Impedance Analyzer ซึ่งสามารถทดสอบได้ในช่วงความถี่ 1 MHz - 3 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างหินจากถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์

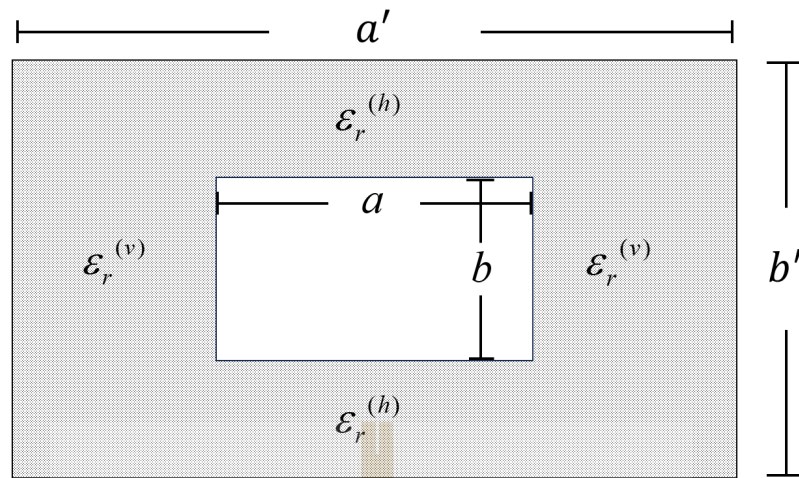


รูปที่ 4.2 การทดสอบสภาพนำทางไฟฟ้าของดินจากตัวอย่างถ้ำทั้งสองแห่ง

ผลลัพธ์การทดสอบสภาพนำไฟฟ้าจากตัวอย่างถ้ำทั้งสองแห่งที่แสดงในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างหินทรายมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.12 - 2.63 $\mu\text{S/m}$ ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่เป็นหิнопูนจากถ้ำเชียงดาวที่อยู่ในช่วง 0.30 - 6.25 $\mu\text{S/m}$ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้กล่าวไปข้างต้น จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของดินและการวัดสภาพนำทางไฟฟ้าจากตัวอย่างดิน ถัดมาจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความลึกผิวที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้ใช้ค่าเฉลี่ยจากช่วงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าความชื้นสามแม่เหล็กสัมพัทธ์จากการค้นคว้านงานวิจัยที่ผ่านมา ในส่วนค่าสภาพนำทางไฟฟ้าได้กำหนดให้ใช้ค่าสภาพนำทางไฟฟ้าที่วัดได้จริงดังรูปที่ 4.2 จากนั้นนำมาแทนในสมการที่ 2.4 จะสามารถแสดงค่าความลึกผิวในแต่ละความถี่ของดินทั้งสองชนิดได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความลึกผิวแต่ละความถี่ระหว่างถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์

ความถี่	ความลึกผิว (เมตร)	
	ถ้ำเชียงดาว (ถ้ำหิнопูน)	ถ้ำปาฏิหาริย์ (ถ้ำหินทราย)
300 kHz	290.6	82.2
1000 kHz	159.2	45.0
1650 kHz	123.9	35.0
2325 kHz	104.4	29.5
3000 kHz	91.9	26.0



รูปที่ 4.3 สมบัติความลึกผิวที่ส่งผลต่อขนาดทางไฟฟ้าของโพรงถ้า

ด้วยสมมุติฐานหลักที่ว่าสมบัติความลึกผิวของคลื่นความถี่ต่ำนั้นจะส่งผลให้ขนาดทางไฟฟ้าของถ้ามีขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดทางกายภาพ ทำให้เมื่อคำนวณค่าความลึกผิวของแต่ละความถี่ระหว่างถ้าหิ้นปูนและหิ้นทรายแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์ร่วมกับขนาดทางกายภาพของโพรงถ้าตามสมมุติฐานเริ่มต้น โดยพิจารณาให้โพรงถ้ามีขนาดทางไฟฟ้าที่กว้างและยาวมากขึ้นตามค่าความลึกผิวของแต่ละความถี่ แม้ว่าขนาดของโพรงถ้าทางกายภาพจะมีขนาดเท่าเดิมก็ตาม โดยจากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าความกว้างและความสูงทางกายภาพเดิมของโพรงถ้าคือ a และ b ตามลำดับ มีผนังและเพดานที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ $\epsilon_r^{(v)}$ และ $\epsilon_r^{(h)}$ เมื่อพิจารณาขนาดทางไฟฟ้าที่คลื่นมองเห็นจะเปรียบเสมือนโพรงถ้ามีขนาดกว้างและสูงขึ้นจากค่าความลึกผิวจนได้เป็น a' และ b' ดังสมการที่

$$(4.1) \text{ และ } b' = b + \delta \quad (4.2)$$

$$a' = a + \delta \quad (4.1)$$

$$b' = b + \delta \quad (4.2)$$

หลังจากนำสมมุติฐานเรื่องความลึกผิวของคลื่นความถี่ต่ำมาพิจารณาร่วมกับขนาดของโพรงถ้าแล้ว ทำให้การคำนวณการลดทอนของคลื่นความถี่ต่ำตามแบบจำลองท่อนำคลื่นเดิมต้องพิจารณาขนาดที่เพิ่มขึ้นจากความลึกผิวด้วย โดยการลดทอนตามแบบจำลองเดิมที่จะต้องนำความลึกผิวมาคำนวณ ได้แก่ การลดทอนที่เกิดจากการหักเหบนผนังถ้าเนื่องจากคลื่นความถี่ต่ำสามารถแพร่กระจายลึกเข้าไปภายในผนังถ้าก่อนเกิดการหักเหระหว่างชั้นไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน อีกส่วนคือการลดทอนที่เกิดจากความหยาบของผิวผนังถ้าเนื่องจากคลื่นความถี่ต่ำมีความยาวคลื่นที่มากและสามารถแพร่กระจายเข้าไปในผนังถ้าได้ ซึ่งความสูงของความขรุขระบนผิวผนังถ้ามีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นทำให้คลื่นความถี่ต่ำจึงสามารถแพร่กระจายทะลุผ่านพื้นผิวขรุขระลึกเข้าไปในผนังถ้าได้

ดังนั้นแบบจำลองการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.3 ถึงสมการที่ 4.5

การลดทอนจากการหักเหบนผนังถ้ำในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร (dB/m) ของคลื่นในโพลาไรเซชันแนวตั้งและแนวนอน ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$\alpha^{(v)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a'^3 \sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} + \frac{\epsilon_r^{(h)}}{b'^3 \sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} \right) \quad (4.3)$$

$$\alpha^{(h)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{\epsilon_r^{(v)}}{a'^3 \sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} + \frac{1}{b'^3 \sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} \right) \quad (4.4)$$

การลดทอนจากความหยาบของผนังถ้ำในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร (dB/m) ดังสมการที่ 4.5

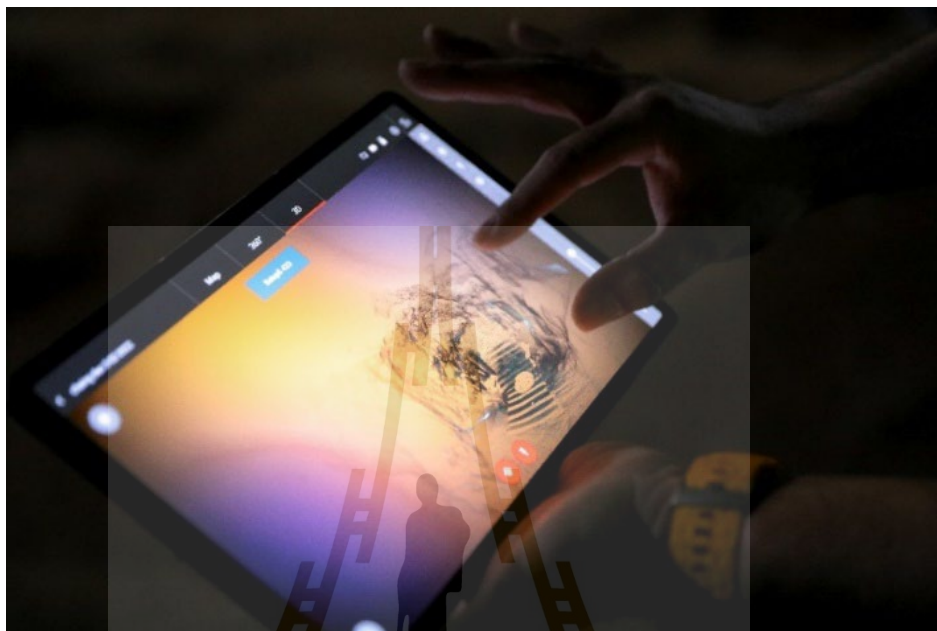
$$\alpha_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda \left(\frac{1}{a'^4} + \frac{1}{b'^4} \right) \quad (4.5)$$

อย่างไรก็ตาม การลดทอนของคลื่นความถี่ต่ำในส่วนของการลดทอนจากด้วยความเอียงของผนังถ้ำตามสมการที่ 2.10 ขึ้นอยู่กับความเอียงของผนังและความยาวคลื่น ซึ่งการลดทอนจากความเอียงนี้ส่งผลกระทบอย่างมากต่อความถี่สูง แต่เมื่อนำมาคำนวณที่ความถี่ที่ศึกษาพบว่าการลดทอนที่เกิดจากความเอียงของผนังมีค่าน้อยมากดังแสดงในตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.15

4.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำกับแบบจำลองที่นำเสนอ

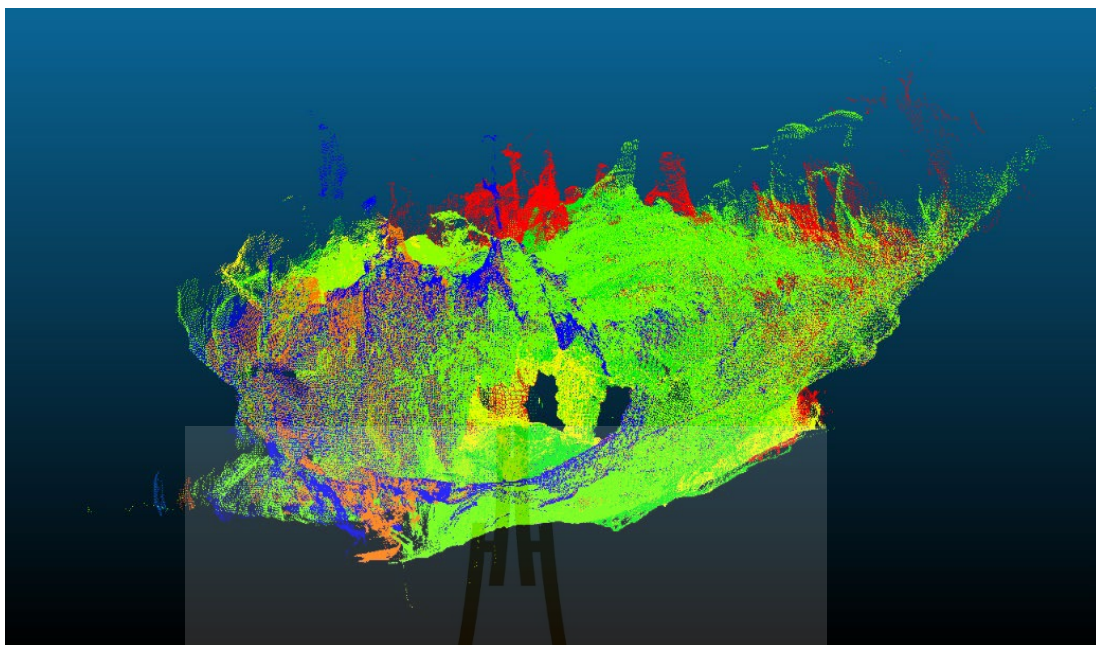
โดยทั่วไปการสำรวจลักษณะทางกายภาพภายในโพรงถ้ำของงานวิจัยที่ผ่านมาใช้วิธีการสำรวจด้วยการลงพื้นที่และใช้เครื่องมือวัดซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งโพรงถ้ำธรรมชาติมีความคดเคี้ยว ซับซ้อน และมีขนาดไม่คงที่ ทำให้ในแต่ละระยะทางของโพรงถ้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงของความกว้างและความสูง หรือขนาด a และ b จากในรูปที่ 4.3 รวมไปถึงผนังขรุขระ หินงอกและหินย้อย ทำให้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เห็นความสำคัญของการนำเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลอง 3 มิติมาใช้ประโยชน์ โดยในโครงการวิจัยเรื่องการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ นอกจากทำการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่ต่าง ๆ สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำแล้ว ยังรวมไปถึงการสำรวจและสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยี LiDAR อีกด้วย โดยได้ทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยอุปกรณ์ LiDAR 3D Scanner ทั้งถ้ำเชียงดาวและถ้ำปายูหารียต์ตลอดทั้งโพรงถ้ำซึ่งสามารถเก็บส่วนประกอบภายในโพรงถ้ำทั้งขนาด ความหยาบของผนัง หินงอก หินย้อย และก้อนหินกลม ได้อย่างครบถ้วนดังแสดงตัวอย่างขณะใช้งานอุปกรณ์

LiDAR 3D Scanner สำหรับสร้างแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวในรูปที่ 4.4 ด้วยแบบจำลอง 3 มิติที่ได้จะทำให้กำหนดขนาดความกว้างและความสูงของโพรงถ้ำ ความหนาของผนังและความเอียงของผนังที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะของโพรงถ้ำเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณกับแบบจำลองที่นำเสนอต่อไป



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการสำรวจถ้ำด้วยเทคโนโลยี LiDAR 3D Scanner ณ ถ้ำเชียงดาว

ในขั้นแรกผลการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้จากจากถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ จะถูกคัดเลือกเฉพาะส่วนที่ได้ทดสอบการแพร่กระจายคลื่น โดยผลจากการสแกน 3 มิติ นี้จะอยู่ในรูปของพอยต์คลาวด์ (Point cloud) ซึ่งพอยต์คลาวด์เป็นกลุ่มของจุดสามมิติ ที่จะเก็บค่าของตำแหน่งของวัตถุในระบบพิกัด X-Y และ Z ดังแสดงผลพอยต์คลาวด์ของถ้ำในส่วนที่ทดสอบของถ้ำเชียงดาวในรูปที่ 4.5 และส่วนที่ทดสอบของถ้ำปาฏิหาริย์ในรูปที่ 4.6 ถัดไปจึงนำแบบจำลอง 3 มิติของโพรงถ้ำทั้งสองมาสร้างโปรแกรมสำหรับคำนวณขนาดของโพรงถ้ำ ความหนาของผนัง ความเอียงของผนัง ด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน (Python) ด้วยไลบรารี (Library) ที่มีชื่อว่า Trimesh ซึ่งเป็นไลบรารีสำหรับใช้งานกับวัตถุ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจะสามารถคำนวณหาขนาดต่าง ๆ ทั้งขนาดของโพรงถ้ำ ความขรุขระของผนังและหินงอกหรือหินย้อยจากวิธีการตัดหน้าตัดของโพรงถ้ำทุก 1 เมตร และนำเส้นรอบวงเหล่านั้นของโพรงถ้ำมาคำนวณ วิธีการคำนวณที่ละหน้าตัดนี้จะช่วยให้สามารถคำนวณลักษณะกายภาพที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ หน้าตัดได้อย่างแม่นยำ หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณด้วยแบบจำลองความถี่ต่ำภายในถ้ำ สุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลการลดทอนแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นบนโพรงถ้ำที่ระยะต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะกายภาพที่ไม่คงที่ ดังแสดงตัวอย่างโปรแกรมในรูปที่ 4.7 และตัวอย่างผลการคำนวณการลดทอนดังแสดงรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.5 แบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้จาก LiDAR Scanner ในรูปแบบพอยต์คลาวด์ของถ้ำเชียงดาวส่วนที่ใช้ทดสอบ



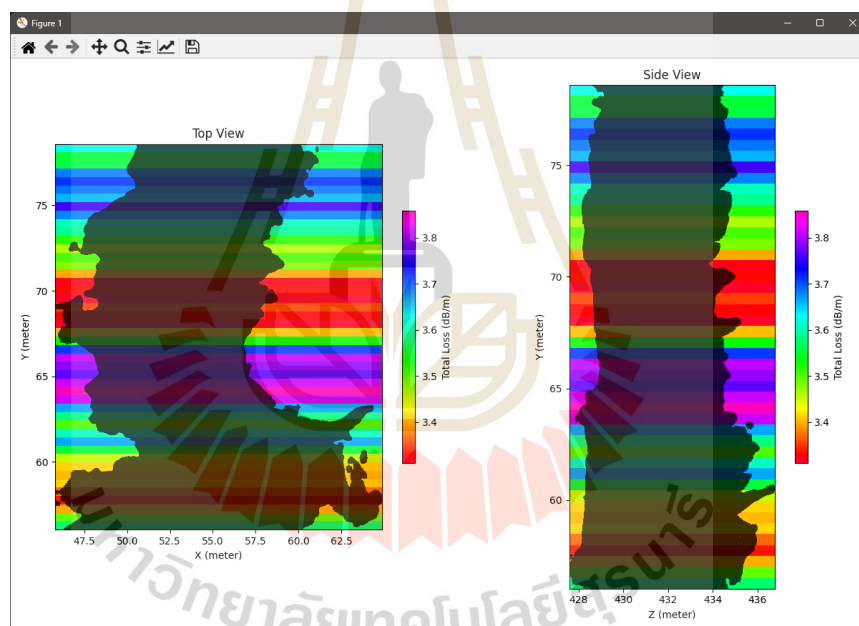
รูปที่ 4.6 แบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้จาก LiDAR Scanner ในรูปแบบพอยต์คลาวด์ของถ้ำปาฏิหาริย์ส่วนที่ใช้ทดสอบ

```

C:\Users\idara_Vaput\Local\Programs\Python\Python311\Scripts> cd C:\Users\idara_Vaput\Local\Programs\Python\Python311\Scripts & 'C:\Users\idara_Vaput\Local\Programs\Python\Python311\python.exe' -u C:\Users\idara_Vaput\Local\Programs\Python\Python311\Scripts\if_modeling_2.py
y = 56.9, width = 181.5, height = 171.3, lr = 2.08, lossphase = 0.47, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.57
y = 56.5, width = 181.8, height = 171.8, lr = 2.08, lossphase = 0.45, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.49
y = 57.9, width = 181.8, height = 171.3, lr = 2.07, lossphase = 0.52, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.49
y = 57.5, width = 185.2, height = 174.3, lr = 2.05, lossphase = 0.49, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.34
y = 58.9, width = 181.8, height = 174.8, lr = 2.06, lossphase = 0.53, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.47
y = 58.5, width = 184.6, height = 173.9, lr = 2.07, lossphase = 0.54, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.41
y = 58.9, width = 181.5, height = 171.3, lr = 2.07, lossphase = 0.55, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.49
y = 58.5, width = 181.2, height = 171.4, lr = 2.06, lossphase = 0.52, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.41
y = 60.9, width = 181.8, height = 174.3, lr = 2.06, lossphase = 0.59, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.41
y = 60.5, width = 179.5, height = 174.5, lr = 2.08, lossphase = 0.69, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.55
y = 61.9, width = 178.2, height = 171.5, lr = 2.02, lossphase = 0.76, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.67
y = 61.5, width = 180.5, height = 171.4, lr = 2.01, lossphase = 0.76, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.69
y = 62.9, width = 181.5, height = 171.8, lr = 2.09, lossphase = 0.61, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.59
y = 62.5, width = 182.2, height = 171.8, lr = 2.08, lossphase = 0.76, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.58
y = 63.9, width = 182.5, height = 171.5, lr = 2.07, lossphase = 0.77, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.66
y = 63.5, width = 178.2, height = 174.8, lr = 2.09, lossphase = 0.62, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.81
y = 64.9, width = 181.8, height = 171.5, lr = 2.09, lossphase = 0.69, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.81
y = 64.5, width = 176.4, height = 172.3, lr = 2.08, lossphase = 0.81, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.81
y = 65.9, width = 175.1, height = 172.8, lr = 2.09, lossphase = 0.79, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.79
y = 65.5, width = 178.8, height = 171.8, lr = 2.08, lossphase = 0.86, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.81
y = 66.9, width = 178.5, height = 171.9, lr = 2.08, lossphase = 0.71, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.71
y = 66.5, width = 184.6, height = 171.8, lr = 2.08, lossphase = 0.72, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.81
y = 67.9, width = 177.3, height = 172.4, lr = 2.07, lossphase = 0.41, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.41
y = 67.5, width = 181.5, height = 171.8, lr = 2.06, lossphase = 0.32, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.31
y = 68.9, width = 177.8, height = 171.5, lr = 2.01, lossphase = 0.31, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.33
y = 68.5, width = 182.2, height = 171.8, lr = 2.09, lossphase = 0.36, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.30
y = 69.9, width = 178.3, height = 172.3, lr = 2.07, lossphase = 0.34, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.31
y = 69.5, width = 177.1, height = 171.8, lr = 2.08, lossphase = 0.34, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.32
y = 70.9, width = 176.8, height = 172.4, lr = 2.07, lossphase = 0.34, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.32
y = 70.5, width = 180.6, height = 172.2, lr = 2.06, lossphase = 0.39, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.48
y = 71.9, width = 177.8, height = 172.3, lr = 2.08, lossphase = 0.56, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.48
y = 71.5, width = 177.8, height = 172.3, lr = 2.09, lossphase = 0.56, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.46
y = 72.9, width = 177.7, height = 172.4, lr = 2.07, lossphase = 0.63, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.52
y = 72.5, width = 177.8, height = 172.3, lr = 2.06, lossphase = 0.56, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.52
y = 73.9, width = 177.8, height = 172.3, lr = 2.07, lossphase = 0.63, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.52
y = 73.5, width = 177.5, height = 172.3, lr = 2.07, lossphase = 0.43, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.45
y = 74.9, width = 177.2, height = 172.8, lr = 2.06, lossphase = 0.72, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.68
y = 74.5, width = 176.8, height = 172.4, lr = 2.07, lossphase = 0.79, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.79
y = 75.9, width = 177.8, height = 172.4, lr = 2.07, lossphase = 0.69, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.68
y = 75.5, width = 176.7, height = 172.3, lr = 2.07, lossphase = 0.71, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.69
y = 76.9, width = 176.4, height = 172.3, lr = 2.08, lossphase = 0.73, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.71
y = 76.5, width = 176.8, height = 172.8, lr = 2.09, lossphase = 0.69, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.68
y = 77.9, width = 177.1, height = 172.1, lr = 2.08, lossphase = 0.57, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.58
y = 77.5, width = 176.8, height = 171.9, lr = 2.09, lossphase = 0.56, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.55
y = 78.9, width = 176.8, height = 171.9, lr = 2.09, lossphase = 0.56, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.55
y = 78.5, width = 176.8, height = 171.9, lr = 2.09, lossphase = 0.56, l1111 = 0.00, Total Loss = 3.55

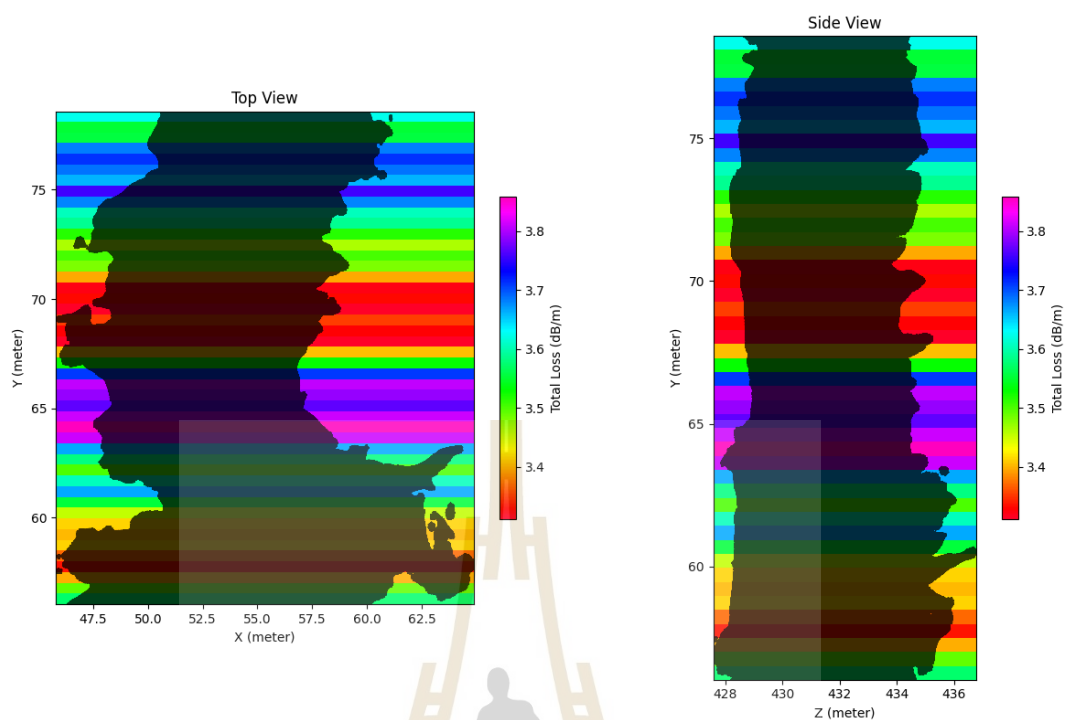
```

รูปที่ 4.7 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณขนาดของโพรงถ้ำและแบบจำลองความถี่ต่ำภายในถ้ำ

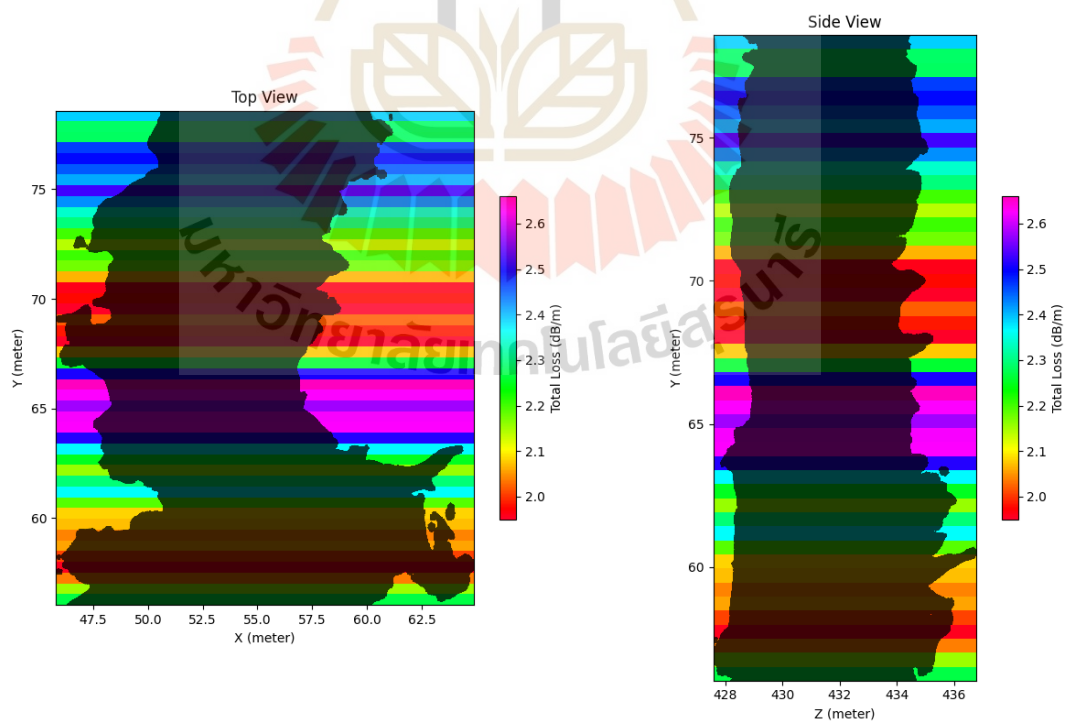


รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณแบบจำลองความถี่ต่ำภายในถ้ำจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

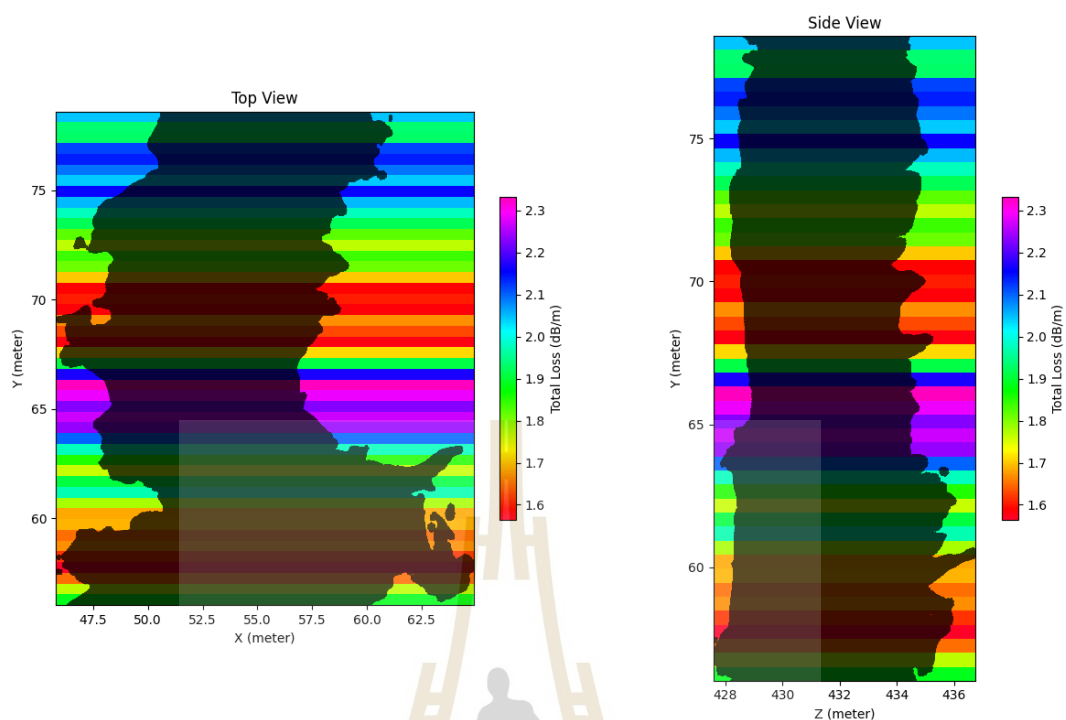
จากรูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณการลดทอนรวมจากแบบจำลองความถี่ต่ำที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาว ที่ความถี่ 300 kHz จากรูปประกอบไปด้วยผลการคำนวณในมุมมองด้านบน (ด้านซ้าย) และมุมมองด้านข้าง (ด้านขวา) โดยผลการคำนวณนี้ถูกแสดงในรูปของกราฟแผนผังสี (Colormap) บนรูปร่างโมเดลถ้ำทุก ๆ ระยะ 0.5 เมตร ซึ่งแสดงตามกราฟมาตราส่วนด้านข้าง สุดท้ายผลลัพธ์การคำนวณแบบจำลองความถี่ต่ำภายในถ้ำจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz ของถ้ำเชียงดาวแสดงในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.13 และถ้ำปาฏิหาริย์แสดงในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.18



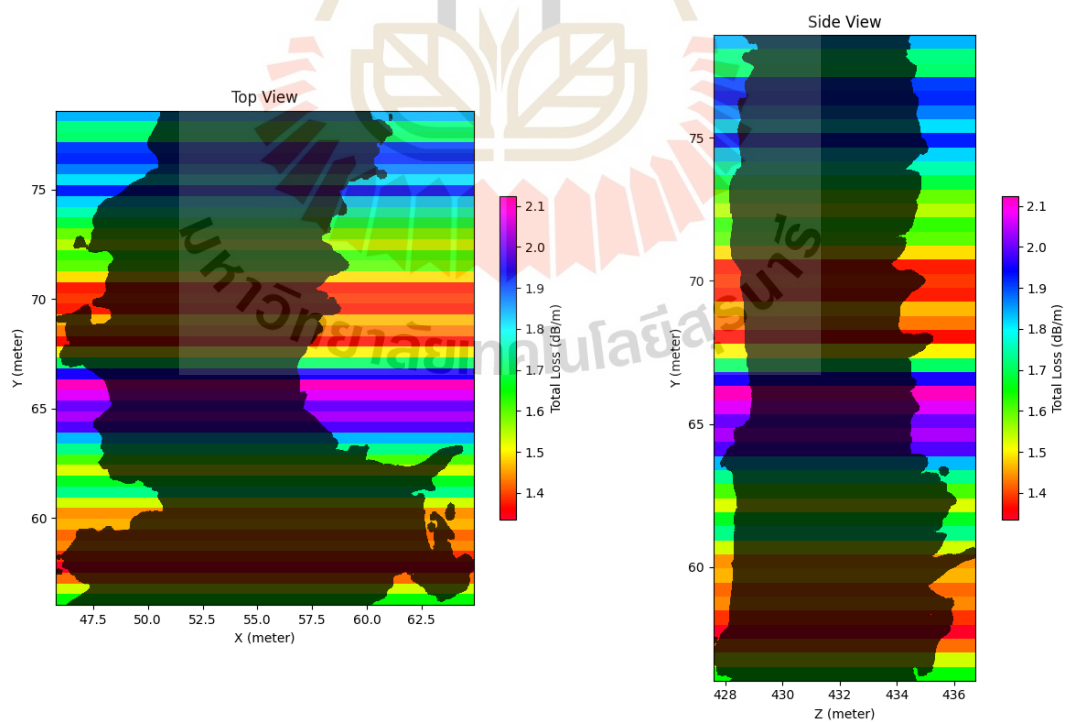
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
 เชิงดาวที่ความถี่ 300 kHz



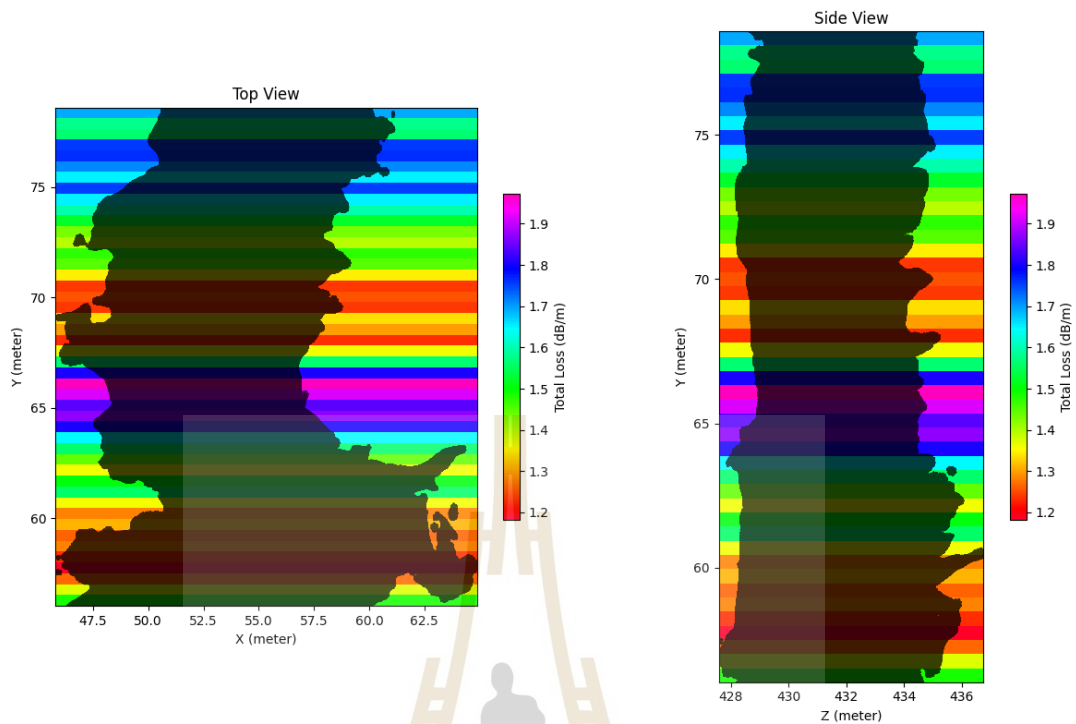
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
 เชิงดาวที่ความถี่ 1000 kHz



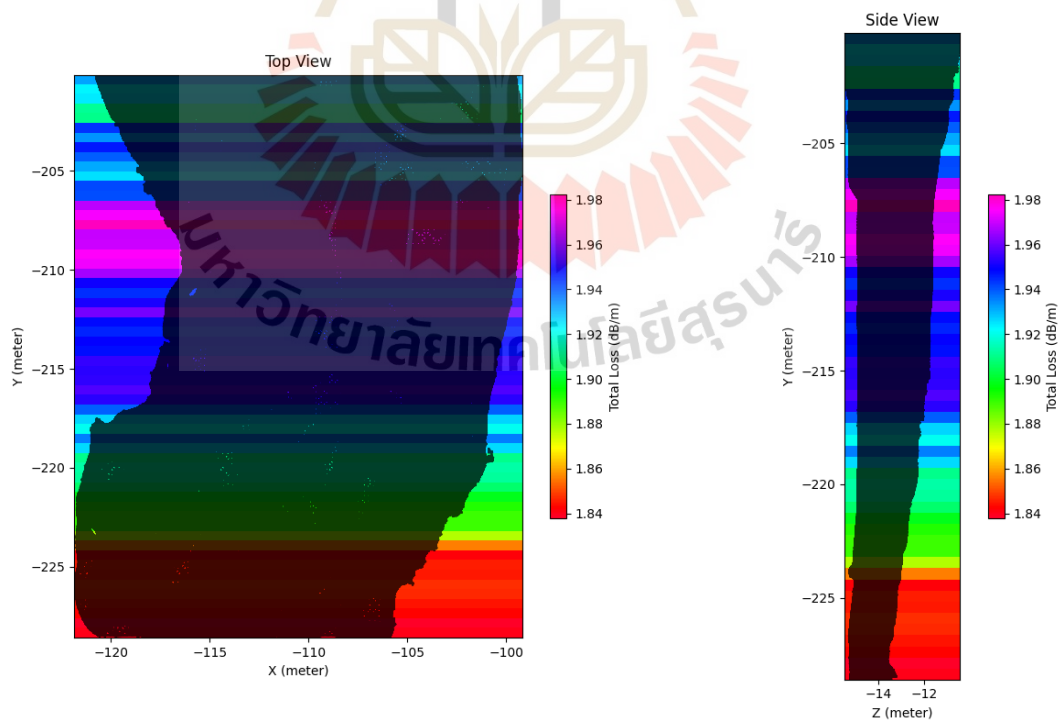
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำ
เขียงดาวที่ความถี่ 1650 kHz



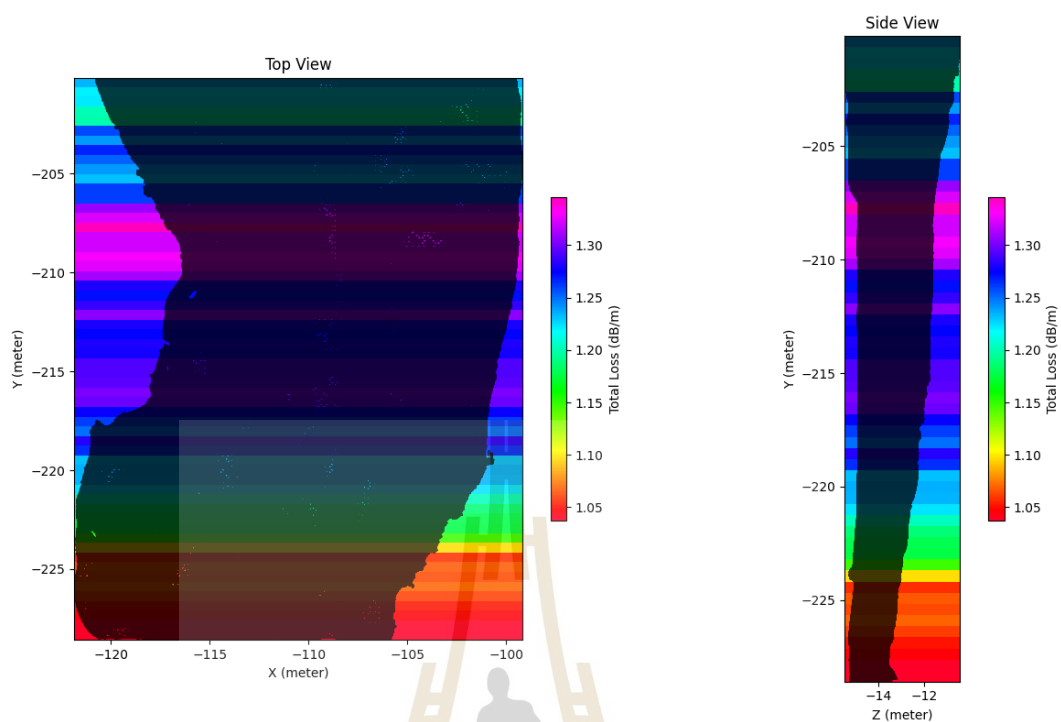
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำ
เขียงดาวที่ความถี่ 2325 kHz



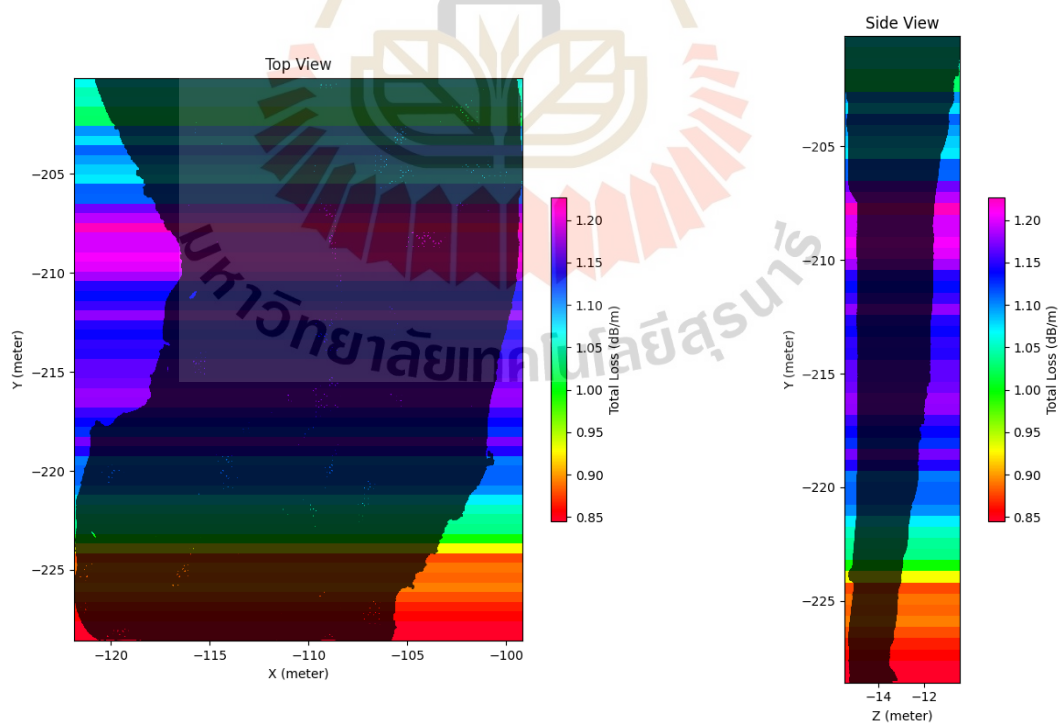
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของลำ
เชิงดาวที่ความถี่ 3000 kHz



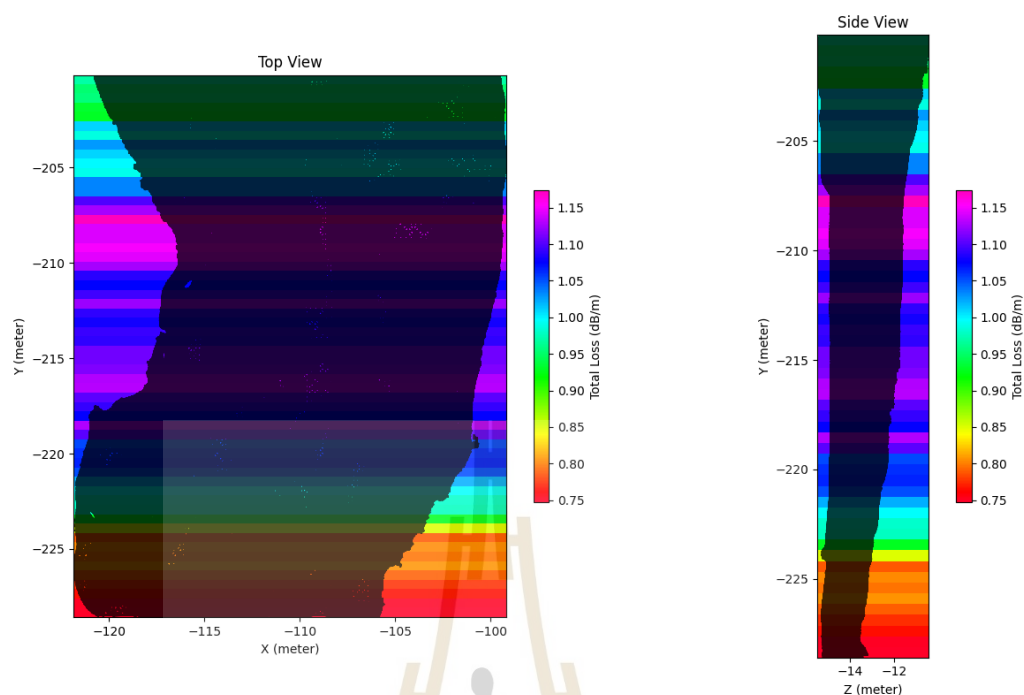
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของ
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 300 kHz



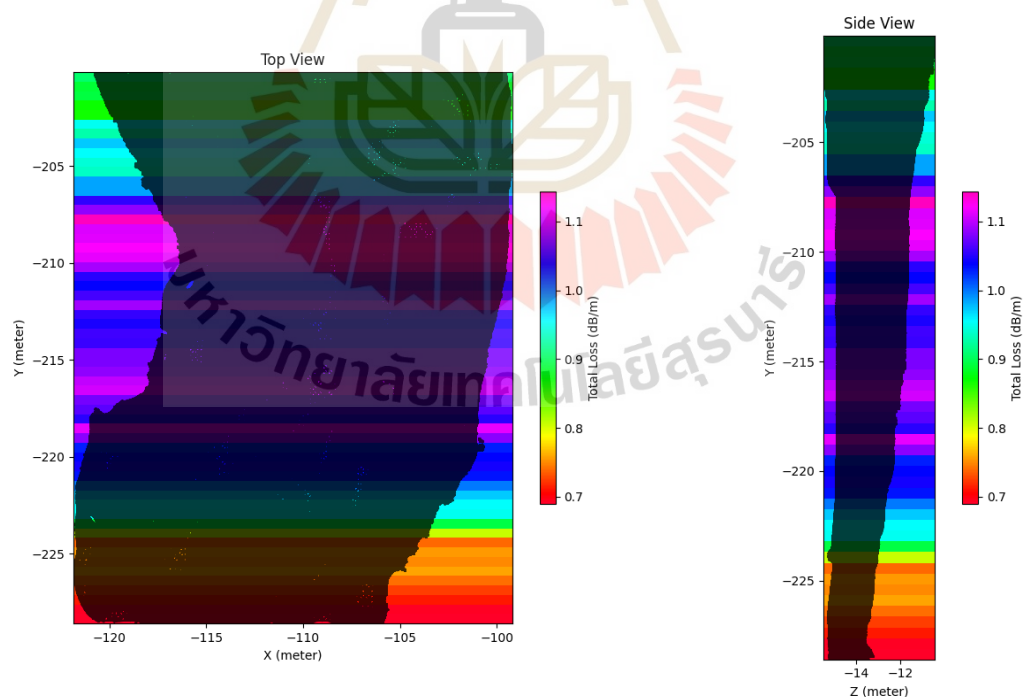
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของ
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1000 kHz



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของ
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1650 kHz



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของ
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 2325 kHz



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของ
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 3000 kHz

นอกจากนี้ด้วยโปรแกรมคำนวณที่พัฒนาขึ้นซึ่งรวมแบบจำลองความถี่ต่ำที่น่าเสนอ ยังสามารถแสดงผลการคำนวณการลดทอนกำลังต่อเมตรในรูปของไฟล์ CSV ซึ่งแยกเป็นการลดทอนจากการหักเหบนผนัง การลดทอนจากความหยาบของผนัง การลดทอนจากความเอียงของผนังและการลดทอนรวม ที่ระยะทางทุก ๆ 1 เมตร ตลอดความยาวของแบบจำลอง 3 มิติของโพรงถ้ำ โดยผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวดังแสดงในตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.6 และผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 300 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	2.88	0.61	0.00	3.49
2	2.85	0.49	0.00	3.34
3	2.87	0.54	0.00	3.41
4	2.90	0.52	0.00	3.41
5	2.86	0.69	0.00	3.55
6	2.91	0.70	0.00	3.60
7	2.88	0.70	0.00	3.58
8	2.89	0.92	0.00	3.81
9	2.98	0.83	0.00	3.81
10	3.00	0.79	0.00	3.79
11	3.00	0.71	0.00	3.71
12	2.97	0.43	0.01	3.41
13	3.01	0.31	0.00	3.33
14	2.97	0.34	0.00	3.31
15	2.97	0.34	0.00	3.32
16	2.98	0.50	0.00	3.48
17	2.96	0.50	0.00	3.46
18	2.95	0.63	0.00	3.59

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 300 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
19	2.96	0.72	0.00	3.68
20	2.99	0.56	0.00	3.55

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 1000 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	1.40	0.75	0.01	2.16
2	1.38	0.57	0.01	1.96
3	1.40	0.66	0.01	2.06
4	1.42	0.64	0.01	2.07
5	1.39	0.80	0.01	2.19
6	1.43	0.86	0.01	2.29
7	1.41	0.84	0.00	2.25
8	1.41	1.10	0.00	2.51
9	1.49	1.13	0.00	2.62
10	1.51	1.11	0.01	2.62
11	1.51	0.99	0.01	2.51
12	1.48	0.58	0.02	2.08
13	1.52	0.45	0.01	1.98
14	1.48	0.46	0.01	1.95
15	1.48	0.46	0.01	1.96
16	1.49	0.68	0.01	2.18

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 1000 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
17	1.47	0.66	0.01	2.14
18	1.47	0.83	0.00	2.30
19	1.47	0.95	0.00	2.42
20	1.48	0.93	0.00	2.41

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 1650 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	1.02	0.74	0.01	1.77
2	0.99	0.56	0.01	1.56
3	1.01	0.65	0.01	1.67
4	1.03	0.64	0.01	1.69
5	1.00	0.76	0.01	1.78
6	1.04	0.86	0.01	1.91
7	1.02	0.83	0.00	1.85
8	1.02	1.07	0.00	2.10
9	1.10	1.17	0.00	2.27
10	1.11	1.16	0.01	2.28
11	1.11	1.04	0.01	2.17
12	1.09	0.60	0.03	1.71
13	1.12	0.48	0.02	1.63
14	1.09	0.47	0.02	1.59
15	1.09	0.48	0.02	1.59

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 1650 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
16	1.09	0.70	0.02	1.81
17	1.08	0.68	0.01	1.77
18	1.07	0.84	0.00	1.92
19	1.08	0.97	0.00	2.05
20	1.09	0.95	0.00	2.04

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 2325 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	0.81	0.71	0.02	1.53
2	0.79	0.53	0.02	1.34
3	0.80	0.62	0.02	1.44
4	0.82	0.62	0.02	1.46
5	0.79	0.72	0.02	1.53
6	0.83	0.82	0.02	1.67
7	0.81	0.79	0.01	1.61
8	0.81	1.02	0.00	1.83
9	0.88	1.16	0.00	2.04
10	0.90	1.16	0.01	2.07
11	0.90	1.04	0.02	1.96
12	0.87	0.59	0.04	1.50
13	0.91	0.49	0.03	1.43
14	0.88	0.47	0.03	1.38

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 2325 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
15	0.88	0.47	0.03	1.38
16	0.88	0.69	0.02	1.60
17	0.86	0.66	0.02	1.54
18	0.86	0.82	0.00	1.69
19	0.86	0.95	0.00	1.82
20	0.87	0.94	0.00	1.81

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 3000 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	0.68	0.67	0.02	1.37
2	0.66	0.50	0.02	1.18
3	0.67	0.59	0.02	1.28
4	0.69	0.60	0.03	1.31
5	0.66	0.67	0.02	1.36
6	0.69	0.79	0.02	1.51
7	0.68	0.75	0.01	1.44
8	0.68	0.96	0.00	1.65
9	0.74	1.13	0.00	1.87
10	0.76	1.14	0.02	1.91
11	0.76	1.02	0.02	1.80
12	0.74	0.57	0.05	1.36
13	0.77	0.49	0.04	1.30

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวที่ความถี่ 3000 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
14	0.74	0.46	0.04	1.24
15	0.74	0.46	0.04	1.24
16	0.74	0.68	0.03	1.45
17	0.73	0.64	0.02	1.39
18	0.73	0.80	0.00	1.52
19	0.73	0.92	0.01	1.65
20	0.74	0.91	0.00	1.65

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 300 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	1.7	0.22	0.00	1.92
2	1.71	0.21	0.00	1.91
3	1.71	0.23	0.00	1.94
4	1.72	0.23	0.00	1.95
5	1.73	0.2	0.00	1.93
6	1.74	0.21	0.00	1.94
7	1.74	0.23	0.00	1.97
8	1.75	0.23	0.00	1.98
9	1.76	0.21	0.00	1.97
10	1.76	0.22	0.00	1.97
11	1.76	0.19	0.00	1.95
12	1.76	0.19	0.00	1.95

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 300 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
13	1.76	0.19	0.00	1.95
14	1.76	0.19	0.00	1.95
15	1.76	0.19	0.00	1.95
16	1.76	0.19	0.00	1.95
17	1.77	0.19	0.00	1.95
18	1.76	0.17	0.00	1.93
19	1.76	0.17	0.00	1.94
20	1.76	0.15	0.00	1.91

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1000 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	0.86	0.36	0.00	1.22
2	0.86	0.34	0.00	1.20
3	0.87	0.39	0.00	1.26
4	0.87	0.39	0.00	1.27
5	0.88	0.36	0.00	1.24
6	0.88	0.38	0.00	1.26
7	0.89	0.42	0.00	1.31
8	0.9	0.44	0.00	1.35
9	0.91	0.41	0.00	1.32
10	0.91	0.42	0.00	1.32
11	0.91	0.38	0.00	1.28

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1000 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
12	0.9	0.38	0.00	1.29
13	0.91	0.37	0.00	1.28
14	0.91	0.37	0.00	1.28
15	0.91	0.38	0.00	1.29
16	0.91	0.39	0.00	1.29
17	0.91	0.39	0.00	1.30
18	0.91	0.35	0.00	1.26
19	0.91	0.37	0.00	1.28
20	0.91	0.32	0.00	1.23

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1650 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	0.63	0.41	0.00	1.05
2	0.64	0.39	0.00	1.03
3	0.64	0.45	0.00	1.10
4	0.65	0.46	0.00	1.11
5	0.65	0.43	0.00	1.08
6	0.66	0.45	0.00	1.11
7	0.66	0.5	0.00	1.17
8	0.68	0.55	0.00	1.23
9	0.68	0.52	0.00	1.20
10	0.68	0.52	0.00	1.20

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 1650 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
11	0.68	0.47	0.00	1.15
12	0.68	0.47	0.00	1.15
13	0.68	0.47	0.00	1.15
14	0.68	0.47	0.00	1.15
15	0.68	0.48	0.00	1.17
16	0.68	0.49	0.00	1.17
17	0.69	0.49	0.00	1.18
18	0.68	0.45	0.00	1.14
19	0.69	0.48	0.00	1.17
20	0.69	0.42	0.00	1.10

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้า
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 2325 kHz

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	0.51	0.44	0.00	0.95
2	0.51	0.41	0.01	0.93
3	0.52	0.49	0.00	1.01
4	0.53	0.50	0.00	1.03
5	0.53	0.46	0.00	1.00
6	0.54	0.50	0.00	1.03
7	0.54	0.56	0.00	1.10
8	0.55	0.62	0.00	1.17
9	0.56	0.59	0.00	1.14

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำ
ป้าภูหิรย์ที่ความถี่ 2325 kHz (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
10	0.56	0.59	0.00	1.14
11	0.56	0.53	0.00	1.09
12	0.56	0.54	0.00	1.09
13	0.56	0.53	0.00	1.09
14	0.56	0.53	0.00	1.09
15	0.56	0.55	0.00	1.11
16	0.56	0.55	0.00	1.11
17	0.56	0.57	0.00	1.13
18	0.56	0.53	0.00	1.09
19	0.56	0.57	0.00	1.13
20	0.56	0.49	0.00	1.05

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำ
ป้าภูหิรย์ที่ความถี่ 3000 kHz

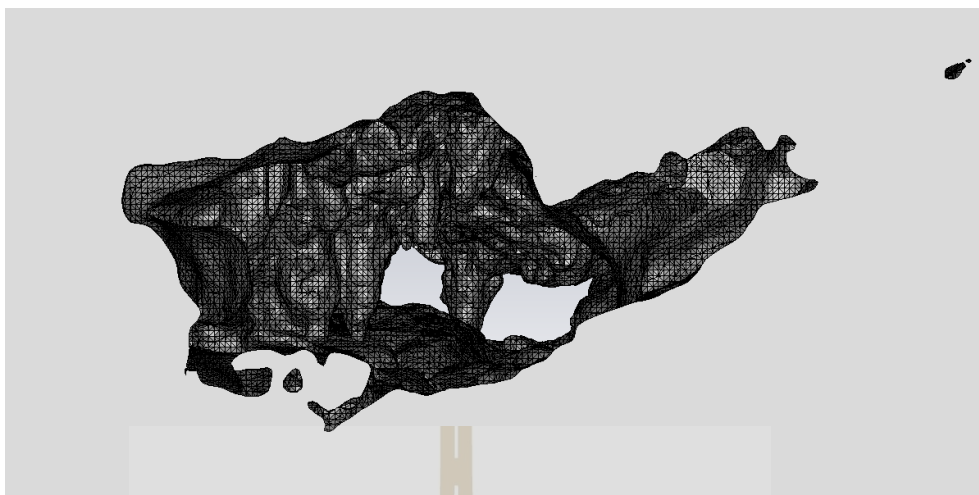
ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
1	0.44	0.45	0.01	0.89
2	0.44	0.42	0.01	0.87
3	0.44	0.50	0.01	0.95
4	0.45	0.52	0.01	0.97
5	0.45	0.49	0.00	0.94
6	0.46	0.52	0.00	0.99
7	0.46	0.59	0.00	1.05
8	0.47	0.67	0.00	1.14

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณการลดทอนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำ
ปาฏิหาริย์ที่ความถี่ 3000 kHz (ต่อ)

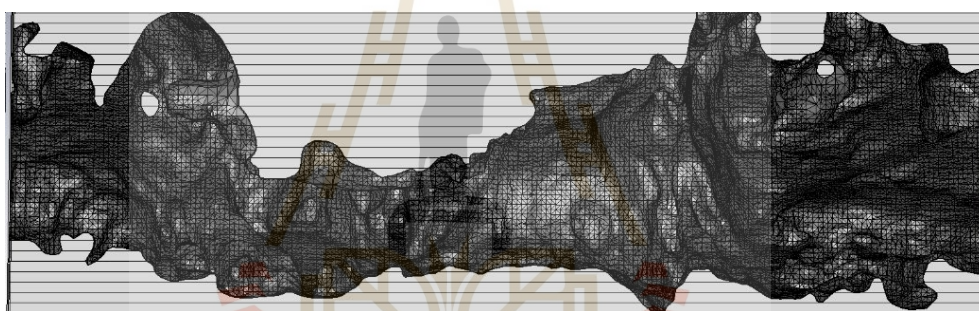
ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนกำลังต่อเมตร (dB/m)			
	การลดทอนจาก การหักเหบนผนัง	การลดทอนจากความ หยาบของผนัง	การลดทอนจากความ เอียงของผนัง	การลดทอน รวม
9	0.48	0.63	0.00	1.11
10	0.48	0.64	0.00	1.11
11	0.48	0.57	0.00	1.05
12	0.48	0.58	0.00	1.06
13	0.48	0.58	0.00	1.05
14	0.48	0.58	0.00	1.06
15	0.48	0.60	0.00	1.08
16	0.48	0.60	0.00	1.08
17	0.48	0.62	0.00	1.11
18	0.48	0.58	0.00	1.07
19	0.49	0.63	0.00	1.11
20	0.48	0.54	0.00	1.03

4.4 การจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง CST Studio Suite

จากการค้นคว้างานวิจัยพบว่าการนำเทคโนโลยี LiDAR มาใช้ในการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกันในการนำแบบจำลอง 3 มิติของโพรงถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์มาจำลองการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรมจำลอง CST Studio Suite ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป้าหมายของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรมจำลอง CST นี้เพื่อศึกษาลักษณะการแพร่กระจายคลื่นภายในโพรงถ้ำและการแพร่กระจายคลื่นเข้าไปในตัวกลาง โดยในขั้นแรกจะเป็นการเตรียมแบบจำลองของถ้ำสำหรับใช้กับโปรแกรมจำลอง CST ด้วยการนำผลการสแกนแบบจำลอง 3 มิติ ของโพรงถ้ำที่อยู่ในรูปแบบของพอยต์คลาวด์แปลงให้อยู่ในรูปแบบผิว จากนั้นสร้างเนื้อของตัวกลางให้อยู่ในลักษณะทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยมและกำหนดสมบัติของวัสดุตามชนิดของถ้ำ เช่น หินปูนสำหรับถ้ำเชียงดาว และหินทรายสำหรับถ้ำปาฏิหาริย์ โดยรูปทรงแบบจำลอง 3 มิติ ของโพรงถ้ำเชียงดาวในโปรแกรม CST ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ส่วนรูปทรงแบบจำลอง 3 มิติ ของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ในโปรแกรม CST ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LiDAR Scanner (มุมมองด้านหน้า)



รูปที่ 4.20 แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LiDAR Scanner (มุมมองด้านข้าง)



รูปที่ 4.21 แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LiDAR Scanner (มุมมองด้านหน้า)



รูปที่ 4.22 แบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ส่วนที่ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LiDAR Scanner (มุมมองด้านข้าง)

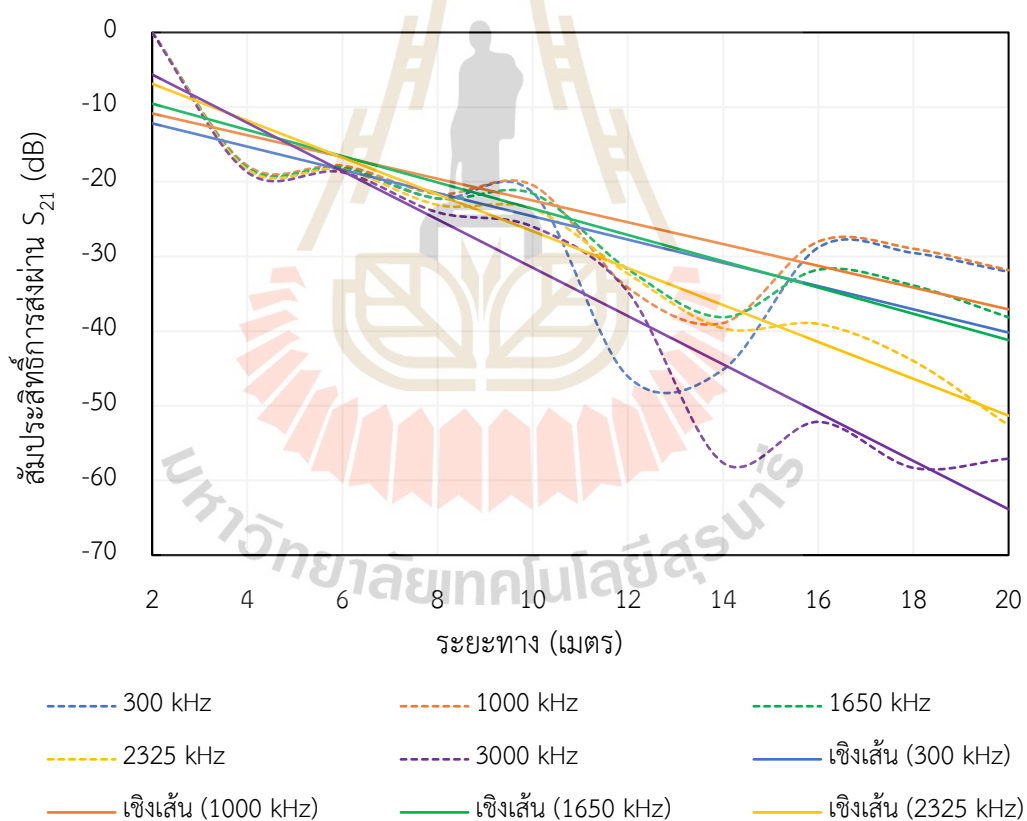
จากนั้นกำหนดพอร์ตสำหรับส่งและรับคลื่นโดยยึดตำแหน่งตามตำแหน่งจากการทดสอบจริง ในที่นี้ใช้พอร์ตประเภทพอร์ตท่อนำคลื่น (Waveguide port) สำหรับพอร์ต 1 (ภาคส่ง) กำหนดให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นหรือที่ระยะ 0 เมตร จากนั้นกำหนดพอร์ต 2 (ภาครับ) ให้มีระยะห่างเริ่มต้นจากพอร์ต 1 เป็นระยะทาง 2 เมตร แล้วจึงทำการจำลองการแพร่กระจายคลื่น วัตถุประสงคในการจำลองด้วยโปรแกรม CST นี้เพื่อพิจารณาการลดทอนในขณะแพร่กระจายคลื่นภายในโพรงถ้ำ ดังนั้นจึงพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient: S_{21}) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการส่งคลื่นจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 หลังจากนั้นจึงเพิ่มระยะห่างจากพอร์ต 1 ทุก ๆ 2 เมตร แล้วจึงจำลองอีกครั้ง โดยทำซ้ำไปจนกระทั่งถึงระยะ 20 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.23 สำหรับถ้ำเชียงดาว และแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.24 สำหรับถ้ำปาฏิหาริย์ ซึ่งผลที่ได้จะถูกทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalization)

ตารางที่ 4.12 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาว

ระยะทาง (เมตร)	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} (dB)				
	300 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
2	0	0	0	0	0
4	-18.25	-17.83	-18.08	-18.34	-18.72
6	-18.25	-17.83	-18.08	-18.34	-18.72
8	-22.25	-21.63	-22.23	-23.1	-24.09
10	-21.46	-20.46	-21.58	-23.61	-26.01

ตารางที่ 4.12 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติ ของถ้ำเชียงดาว (ต่อ)

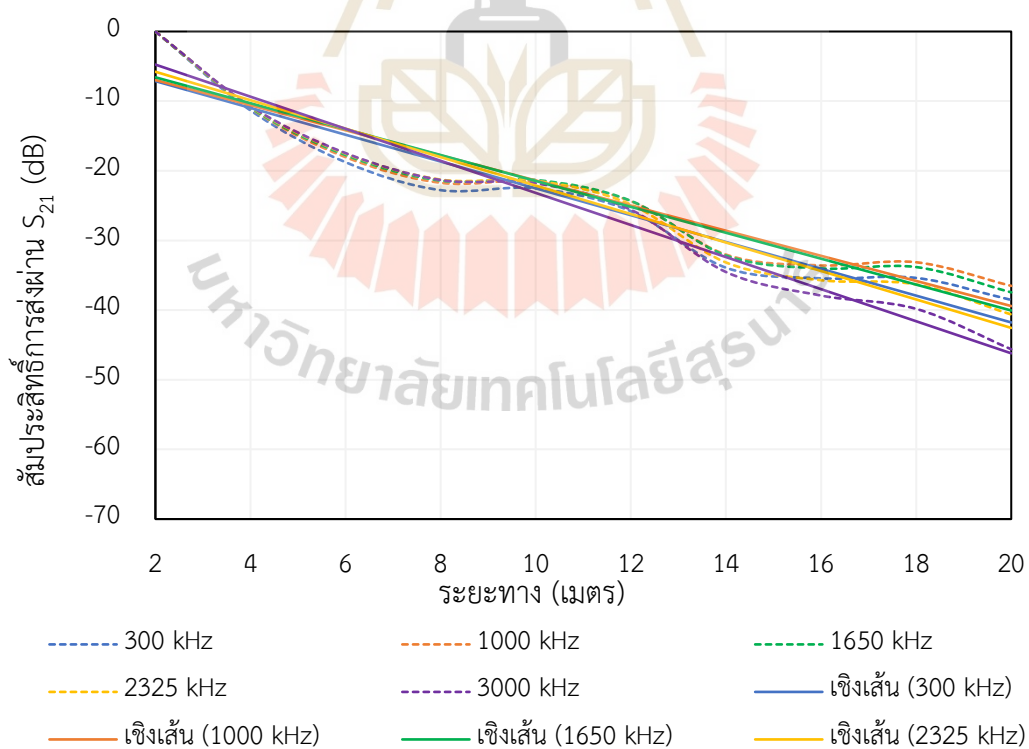
ระยะทาง (เมตร)	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} (dB)				
	300 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
12	-46.09	-34.2	-31.72	-32.31	-34.76
14	-45.16	-38.91	-38.14	-39.63	-57.64
16	-28.81	-28.01	-31.78	-39.03	-52.15
18	-29.53	-28.96	-33.89	-44	-58.31
20	-32.07	-31.84	-38.16	-52.62	-57.08



รูปที่ 4.23 กราฟผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติ ของถ้ำเชียงดาว

ตารางที่ 4.13 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์

ระยะทาง (เมตร)	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} (dB)				
	300 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
2	0	0	0	0	0
4	-11.33	-11.03	-10.95	-10.8	-10.73
6	-18.77	-18.04	-17.74	-17.53	-17.46
8	-22.78	-21.72	-21.41	-21.26	-21.32
10	-22.52	-21.51	-21.31	-21.43	-21.79
12	-25.8	-24.37	-24.31	-24.84	-25.6
14	-33.91	-32.03	-32.16	-33.16	-34.53
16	-35.44	-33.58	-34.02	-35.71	-37.91
18	-35.38	-33.13	-33.82	-36.31	-39.82
20	-38.54	-36.52	-37.45	-40.63	-45.62



รูปที่ 4.24 กราฟผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ด้วยโปรแกรม CST กับแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับถ้ำเชียงดาว และในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงผลการจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับถ้ำปาฏิหาริย์ ที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz โดยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนี้แสดงให้เห็นการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นระหว่างจุดส่ง port 1 ไปยังจุดรับที่ port 2 ตั้งแต่ระยะทาง 2 เมตร จนกระทั่งครบระยะทาง 20 เมตร เช่นเดียวกับการทดสอบจริง การจำลองนี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นภายในโพรงถ้ำแต่ละแห่ง ซึ่งได้รับอิทธิพลจากทั้งลักษณะทางกายภาพของโพรงถ้ำ เช่น ความขรุขระของผนังถ้ำ หินงอก หินย้อย หรือขนาดที่ไม่คงที่ของโพรงถ้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมไปถึงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุตัวกลางอย่างหินปูนและหินทรายอีกด้วย

โดยผลลัพธ์การจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับถ้ำเชียงดาวในรูปที่ 4.23 พบว่าเกิดการลดทอนที่สูงกว่าผลลัพธ์การจำลองสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับถ้ำปาฏิหาริย์ในรูปที่ 4.24 สังเกตได้จากเส้นกราฟเชิงเส้นที่มีความชันมากกว่าซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มการลดทอนต่อระยะทางที่สูงกว่า โดยเฉพาะในรูปที่ 4.23 บริเวณระยะทางที่ 10 ถึง 16 เมตร ซึ่งเกิดการลดทอนสูงเนื่องจากบริเวณระยะทางที่ 10 ถึง 16 เมตร ภายในโพรงถ้ำเชียงดาวพบหินงอกและหินย้อยเป็นจำนวนมากที่สุด แตกต่างจากโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ซึ่งมีลักษณะโพรงถ้ำคงที่และมีผนังเรียบกว่าถ้ำเชียงดาว โดยผลลัพธ์การลดทอนต่อระยะทางสุดท้ายที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST จะถูกวิเคราะห์และอภิปรายในภายหลัง

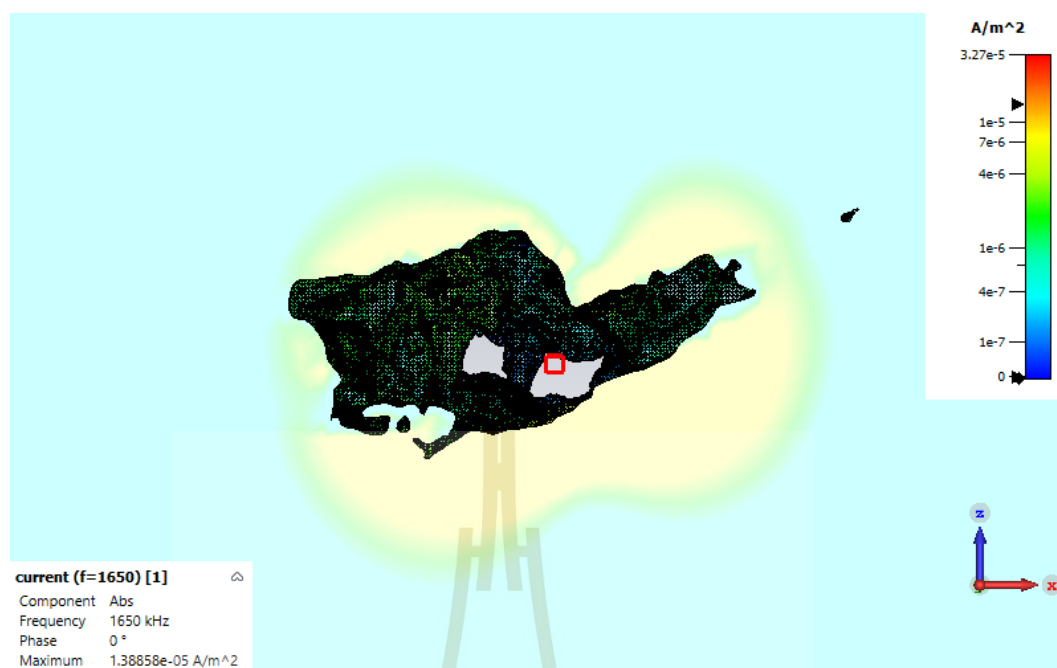
นอกจากนี้การจำลองด้วยโปรแกรม CST นั้นยังให้ผลลัพธ์การจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density: J) ซึ่งแสดงความหนาแน่นของกระแสของไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนวัสดุของแบบจำลองถ้ำ 3 มิติ ในรูปแบบการแสดงผลแบบกราฟฟิก ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.34 ของทั้งถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ ที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz โดยในรูปภาพจะแสดงเฉพาะผลการจำลองความหนาแน่นของกระแสที่เฟส (Phase) เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0 เท่านั้น โดยการจำลองความหนาแน่นของกระแสนี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นภายในโพรงถ้ำและการแพร่กระจายลึกลงเข้าไปภายในตัวกลางของผนังถ้ำอีกด้วยเพื่อยืนยันสมมุติฐานเริ่มต้นที่ว่าคลื่นความถี่ต่ำที่แพร่กระจายภายในโพรงถ้ำจะสามารถแพร่กระจายลึกลงไปภายในตัวกลางผนังถ้ำเนื่องจากสมบัติของความถี่ต่ำที่ทำให้คลื่นความถี่ต่ำสามารถแพร่กระจายในลักษณะของคลื่นผิวได้



รูปที่ 4.25 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 300 kHz



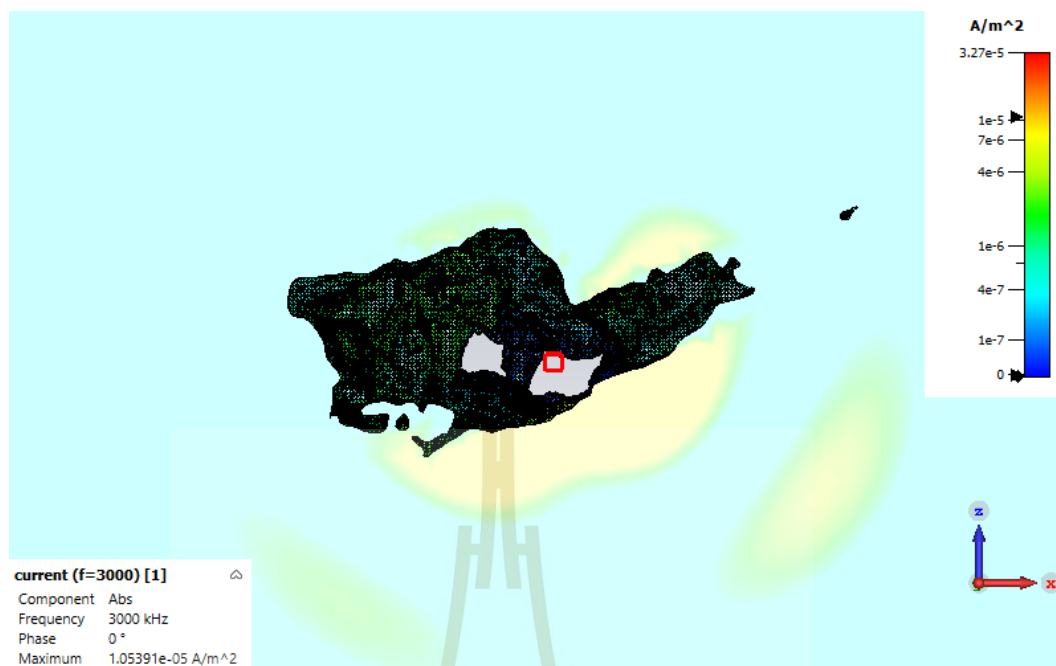
รูปที่ 4.26 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1000 kHz



รูปที่ 4.27 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1650 kHz



รูปที่ 4.28 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 2325 kHz



รูปที่ 4.29 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 3000 kHz



รูปที่ 4.30 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 300 kHz



รูปที่ 4.31 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1000 kHz



รูปที่ 4.32 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 1650 kHz



รูปที่ 4.33 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 2325 kHz



รูปที่ 4.34 การจำลองความหนาแน่นกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำปาฏิหาริย์ด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 3000 kHz

จากรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.34 แสดงผลการจำลองความหนาแน่นของกระแสของแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ โดยผลการจำลองความหนาแน่นของกระแสส่วนของถ้ำเชียงดาวแสดงในรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.29 มีค่าเท่ากับ $3.26 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$, $1.77 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$, $1.39 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$, $1.18 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ และ $1.05 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ ที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz ตามลำดับ ส่วนผลการจำลองความหนาแน่นของกระแสของถ้ำปาฏิหาริย์แสดงในรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.34 มีค่าเท่ากับ $7.26 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$, $4.01 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$, $3.14 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$, $2.65 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ และ $2.33 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ ที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าคลื่นที่แพร่กระจายภายในแบบจำลอง 3 มิติของโพรงถ้ำทั้งสองแห่งเกิดการแพร่กระจายเข้าไปภายในผนังถ้ำโดยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าบนผนังถ้ำ ส่งผลให้เกิดการดูดซับของคลื่นที่มากขึ้นซึ่งมีความถี่สูงใกล้เคียงกับโพรงถ้ำหรือระดับสีจากกราฟเป็นสีเหลือง และเมื่อความถี่สูงขึ้นความหนาแน่นของกระแสภายในผนังถ้ำจะมีค่าลดลง ซึ่งการจำลองด้วยโพรงถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์มีผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับสมมติฐานเรื่องความถี่คลื่นที่เกิดขึ้นจากคลื่นความถี่ต่ำขณะแพร่กระจายไปในโพรงถ้ำ

4.5 การอภิปรายผล

หัวข้อนี้จะเป็นการอภิปรายผลการศึกษารูปแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ โดยเปรียบเทียบผลการลดทอนต่อเมตรที่ได้จากการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นที่ถ้ำทั้งสองแห่ง ผลจากแบบจำลองท่อนำคลื่น ผลจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำที่นำเสนอที่ได้นำแบบจำลอง 3 มิติ ของโพรงถ้ำทั้งสองแห่งมาใช้ในการคำนวณ และสุดท้ายผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz

ผลที่ได้จากการทดสอบส่งคลื่นภายในโพรงถ้ำทั้งสองแห่งและผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST เป็นผลกำลังที่รับได้ของคลื่นในขณะที่คลื่นแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำที่ระยะทุกๆ 2 เมตร รวมระยะทาง 20 เมตร ผลที่ได้ที่ได้อธิบายจากการทดสอบและผลจากโปรแกรม CST จึงใช้วิธีการหาความชันของกราฟเส้นแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยการหาความชันของกราฟแนวโน้มเชิงเส้นซึ่งทำให้ได้เป็นผลลัพธ์การลดทอนต่อระยะทางที่เกิดขึ้น ในส่วนผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองท่อนำคลื่นและแบบจำลองที่นำเสนอให้ผลลัพธ์การลดทอนต่อระยะทางในหน่วย dB/m อยู่แล้ว จึงใช้วิธีการหาการลดทอนจากการคำนวณด้วยลักษณะทางกายภาพของหน้าตัดของโพรงถ้ำทุกๆ 2 เมตร จนกระทั่งครบ 20 เมตร โดยยึดตำแหน่งการคำนวณเช่นเดียวกับการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรม CST จากนั้นจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยรวมของการลดทอนต่อระยะทาง จึงทำให้ผลลัพธ์สุดท้ายจากการทดสอบ ผลจากแบบจำลองท่อนำคลื่น ผลจากแบบจำลองที่นำเสนอและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST อยู่ในรูปแบบเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15

4.5.1 ผลการศึกษาของถ้ำเชียงดาว (หินปูน)

ตารางที่ 4.14 การแสดงผลการเปรียบเทียบการลดทอนต่อระยะทางของถ้ำเชียงดาว (หินปูน)

ความถี่	การลดทอนต่อเมตร (dB/m)			
	ผลการทดสอบ	แบบจำลองท่อนำคลื่น	แบบจำลองความถี่ต่ำ*	การจำลองด้วย CST
300 kHz	3.90	56,272.67	3.85	1.56
1,000 kHz	2.83	5,089.13	2.65	1.46
1,650 kHz	1.52	1,877.68	2.29	1.76
2,325 kHz	1.76	950.06	2.06	2.47
3,000 kHz	2.06	573.27	1.89	3.23

*แบบจำลองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการลดทอนต่อเมตรที่ได้จากการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว รวมทั้งผลลัพธ์จากแบบจำลองท่อนำคลื่น แบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอ และผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST จากแบบจำลองถ้ำเชียงดาว ที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz โดยผลการลดทอนต่อเมตรจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 3.90 dB/m, 2.83 dB/m, 1.52 dB/m, 1.76 dB/m และ 2.06 dB/m ตามลำดับความถี่ ผลการลดทอนต่อเมตรจากแบบจำลองท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 56,272.67 dB/m, 5,089.13 dB/m, 1,877.68 dB/m, 950.06 dB/m และ 573.27 dB/m ตามลำดับความถี่ ผลการลดทอนต่อเมตรจากแบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 3.85 dB/m, 2.65 dB/m, 2.29 dB/m, 2.06 dB/m และ 1.89 dB/m ตามลำดับความถี่ สุดท้ายผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST จากแบบจำลองถ้ำเชียงดาวมีค่าเท่ากับ 1.56 dB/m, 1.46 dB/m, 1.76 dB/m, 2.47 dB/m และ 3.23 dB/m ตามลำดับความถี่

จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองท่อนำคลื่นมีค่าการลดทอนต่อระยะทางที่สูงมาก โดยเฉพาะที่ความถี่ 300 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56,272.67 dB/m และเมื่อความถี่สูงขึ้นแบบจำลองท่อนำคลื่นจึงให้ผลการลดทอนลดลง ในขณะที่ผลลัพธ์จากแบบจำลองที่นำเสนอให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกว่าแบบจำลองท่อนำคลื่นเดิม นอกจากนี้ผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST ซึ่งให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงเดียวกับผลลัพธ์จากแบบจำลองที่นำเสนอและผลการทดสอบจริงแต่เกิดการลดทอนสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ ด้วยลักษณะทางกายภาพของถ้ำเชียงดาวที่มีลักษณะของโพรงถ้ำที่ซับซ้อนและมีหินงอกหรือหินย้อยเป็นจำนวนมาก ทำให้การลดทอนของคลื่นคณะแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำมีค่าที่ค่อนข้างสูง

4.5.2 ผลการศึกษาของถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย)

ตารางที่ 4.15 การแสดงผลการเปรียบเทียบการลดทอนต่อระยะทางของถ้ำปาฏิหาริย์ (หินทราย)

ความถี่	การลดทอนต่อเมตร (dB/m)			
	ผลการทดสอบ	แบบจำลองท่อนำคลื่น	แบบจำลองความถี่ต่ำ	การจำลองด้วย CST
300 kHz	1.57	495,880.55	2.03	1.93
1,000 kHz	1.51	44,806.58	1.46	1.80
1,650 kHz	1.25	16,518.36	1.39	1.86
2,325 kHz	1.40	8,350.97	1.37	2.04
3,000 kHz	1.38	5,034.80	1.37	2.30

*แบบจำลองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการลดทอนต่อเมตรที่ได้จากการทดสอบที่ถ้ำปาฏิหาริย์ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองท่อนำคลื่น แบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอ และผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST จากแบบจำลองถ้ำปาฏิหาริย์ ที่ความถี่ 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz โดยผลการลดทอนต่อเมตรจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.57 dB/m, 1.51 dB/m, 1.25 dB/m, 1.40 dB/m และ 1.38 dB/m ตามลำดับความถี่ ผลการลดทอนต่อเมตรจากแบบจำลองท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 495,880.55 dB/m, 44,806.58 dB/m, 16,518.36 dB/m, 8,350.97 dB/m และ 5,034.80 dB/m ตามลำดับความถี่ ผลการลดทอนต่อเมตรจากแบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 2.03 dB/m, 1.46 dB/m, 1.39 dB/m, 1.37 dB/m และ 1.37 dB/m ตามลำดับความถี่ สุดท้ายผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST จากแบบจำลองถ้ำปาฏิหาริย์มีค่าเท่ากับ 1.93 dB/m, 1.80 dB/m, 1.86 dB/m, 2.04 dB/m และ 2.30 dB/m ตามลำดับความถี่

โดยตารางที่ 4.15 แสดงผลลัพธ์ในรูปแบบเดียวกับตารางที่ 4.14 จากผลที่ได้พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบของถ้ำปาฏิหาริย์ให้ค่าการลดทอนต่อเมตรอยู่ที่ 1.25 - 1.57 dB/m ในขณะที่ผลการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาวอยู่ที่ 1.52 - 3.90 dB/m ซึ่งเกิดจากสมบัติทางไฟฟ้าของหินและความสม่ำเสมอของโพรงถ้ำที่ส่งผลต่อค่าการลดทอน โดยถ้ำเชียงดาวมีโพรงถ้ำขรุขระและไม่สม่ำเสมอมากกว่าที่ถ้ำปาฏิหาริย์ และในส่วนผลจากการทดสอบที่ถ้ำปาฏิหาริย์ให้ผลใกล้เคียงกับผลจากแบบจำลองความถี่ต่ำ นอกจากนี้ผลลัพธ์จากแบบจำลองท่อนำคลื่นให้ค่าการลดทอนสูงกว่าผลลัพธ์จากถ้ำเชียงดาว โดยเฉพาะที่ 300 kHz ซึ่งมีค่าการลดทอนสูงถึง 495,880.55 dB/m เนื่องจากขนาดของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ที่มีขนาดเล็กกว่าส่งผลโดยตรงต่อแบบจำลองท่อนำคลื่น

จากผลลัพธ์ทั้งหมดพบว่า แม้ว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดจะเกิดการลดทอนสูงจนไม่สามารถแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำได้ในทางทฤษฎี แต่จากผลการทดสอบพบว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดยังคงแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำได้ด้วยสมบัติของคลื่นผิว ซึ่งสามารถหาความถี่ตัดได้จากสมการที่ 2.1 ตามแบบจำลองท่อนำคลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.5 MHz จากขนาดของโพรงถ้ำเชิงดาว และ 62 MHz จากขนาดของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ และการจำลองด้วยโปรแกรม CST ยังแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกระแสที่เกิดภายในผนังถ้ำนั้นสัมพันธ์กับความลึกผิวและความถี่ โดยที่ความถี่ต่ำความหนาแน่นกระแสในผนังถ้ำจะมีค่าสูงกว่าเช่นเดียวกับความลึกผิวที่มีค่ามากกว่าที่ความถี่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.34 ด้วยเหตุนี้ทำให้แนวคิดในการนำค่าความลึกผิวที่เกิดจากคลื่นความถี่ต่ำขณะแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำผลการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่นที่กล่าวในบทที่ผ่านมา มาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำ ด้วยการนำแนวคิดเรื่องสมบัติของคลื่นดินและความลึกผิวมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาค่าการลดทอนที่เกิดจากทั้งขนาดของโพรงถ้ำ ความหยาบของพื้นผิว ความเอียงของผนัง และชนิดของถ้ำ เป็นต้น หลังจากนั้นจะนำแบบจำลอง 3 มิติของโพรงถ้ำที่ใช้ทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ LiDAR 3D Scanner มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณลักษณะทางกายภาพของถ้ำจริง ตลอดจนคำนวณการลดทอนด้วยแบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอ นอกจากนี้ยังเพิ่มเติมการนำแบบจำลอง 3 มิติของถ้ำมาจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง CST และสุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากทั้งการทดสอบ ผลลัพธ์จากแบบจำลองท่อนำคลื่นเดิม ผลลัพธ์จากแบบจำลองความถี่ต่ำที่นำเสนอ และเพิ่มเติมผลลัพธ์จากโปรแกรม CST อีกด้วย โดยผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากที่สุด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการแพร่คลื่นความถี่วิทยุสำหรับย่านความถี่ต่ำภายในถ้ำ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายกลไกการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำพร้อมกับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายการลดทอนที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การลดทอนจากขนาดของโพรงถ้ำ หรือการลดทอนจากความหยาบและความเอียงของผนังถ้ำได้ โดยเริ่มต้นจากการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่เดินทางในโพรงถ้ำด้วยการทดสอบส่งคลื่นวิทยุที่มีความถี่ 300, 1000, 1650, 2325 และ 3000 kHz ซึ่งอยู่ในช่วงแถบความถี่ LF และแถบความถี่ MF ณ ถ้ำเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นถ้ำหินปูนที่พบได้มากที่สุดในประเทศไทย และถ้ำปาฏิหาริย์ อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นถ้ำหินทราย จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาศึกษาถึงพฤติกรรม กลไกการแพร่กระจายคลื่น และสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นของถ้ำทั้งสองแห่ง โดยผลการศึกษาจะถูกนำมาพัฒนาแบบจำลองการลดทอนของคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำจากแบบจำลองท่อนำคลื่นเดิม ด้วยการนำค่าความลึกผิวที่เกิดจากสมบัติคลื่นผิวของคลื่นความถี่ต่ำที่สามารถแพร่กระจายลึกเข้าไปในผนังถ้ำรอบ ๆ ได้ ซึ่งทำให้ขนาดทางไฟฟ้าของโพรงถ้ำมีขนาดเพิ่มขึ้นจากขนาดทางกายภาพ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถอธิบายถึงสาเหตุที่คลื่นความถี่ต่ำสามารถแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำได้แม้ว่าจะมีความยาวคลื่นมากกว่าขนาดของโพรงถ้ำตามทฤษฎีท่อนำคลื่นก็ตาม นอกจากนี้ได้นำแบบจำลอง 3 มิติความละเอียดสูงของโพรงถ้ำส่วนที่ใช้ทดสอบภายในถ้ำทั้งสองแห่ง มาใช้ในการคำนวณลักษณะทางกายภาพของถ้ำ เช่น ขนาดความกว้างและความสูงของโพรงถ้ำ ความขรุขระและความเอียงของผนังถ้ำ รวมไปถึงหินงอกและหินย้อยซึ่งทำให้โพรงถ้ำมีลักษณะที่เปลี่ยนไปจากรูปทรงสี่เหลี่ยมของท่อนำคลื่น โดยทำการคำนวณด้วยหน้าตัดของโพรงถ้ำทุกๆ ระยะทางของโพรงถ้ำเพื่อให้เกิดความแม่นยำสูงซึ่งจะนำตัวแปรเหล่านี้ไปใช้กับแบบจำลองที่นำเสนอ และยังนำมาจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า CST เพิ่มเติมอีกด้วย หลังจากนั้นจึงเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวัดทดสอบ ผลลัพธ์จากแบบจำลองท่อนำคลื่น ผลลัพธ์จากแบบจำลองที่นำเสนอและผลลัพธ์จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST โดยจากผลลัพธ์ทั้งหมดพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอให้ค่าใกล้เคียงกับผลการวัดทดสอบของถ้ำทั้งสองแห่งมากที่สุด ทำให้การนำแนวคิดในการนำค่าความลึกผิวที่เกิดจากคลื่นความถี่ต่ำขณะแพร่กระจายภายในโพรงถ้ำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นสำหรับแถบความถี่ต่ำได้ นอกจากนี้ยังนำ-

แบบจำลองที่นำเสนอมาพัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวณการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำจากแบบจำลองของโพรงถ้ำอื่น ๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการทำนาย วิเคราะห์ และวางแผนการสื่อสารภายในโพรงถ้ำ ซึ่งรวมไปถึงการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่ต่ำในถ้ำ อุโมงค์ หรือเหมืองใต้ดินได้ในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถานที่ที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น อุโมงค์ เหมือง หรืออุโมงค์รถไฟ ได้ด้วยการนำแบบจำลอง 3 มิติมาใช้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่นำเสนอเป็นแบบจำลองที่กำหนดให้ตัวกลางผนังถ้ำมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดเพื่อให้สะดวกต่อการศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้สภาพแวดล้อมภายในถ้ำแต่ละช่วงเวลาอาจมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของแบบจำลอง สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยหวังว่าด้วยแบบจำลองที่นำเสนอ วิธีการศึกษา การวิเคราะห์ และผลที่ได้จะเป็นองค์ความรู้และเป็นแนวทางในการพัฒนาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่ต่ำภายในถ้ำในอนาคต





รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- Abrudan, T. E., Kypris, O., Trigoni, N., & Markham, A. (2016). Impact of rocks and minerals on underground magneto-inductive communication and localization. *IEEE Access*, 4, 3999–4010. <https://doi.org/10.1109/access.2016.2597641>
- Balanis, C. A. (2012). *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons.
- Bedford, M. D. (2001). Introducing the HeyPhone. *Caves and Caving*, 91, 15–17.
- Bedford, Michael D., Hrovat, A., Kennedy, G., Javornik, T., and Foster, P. (2020). Modeling microwave propagation in natural caves using lidar and ray tracing. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(5), 3878–3888. <https://doi.org/10.1109/tap.2019.2957969>
- Bedford, Michael D., and Kennedy, G. A. (2014). Modeling microwave propagation in natural caves passages. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(12), 6463–6471. <https://doi.org/10.1109/tap.2014.2364295>
- Bedford, Michael D., Kennedy, G. A., and Foster, P. J. (2016). Radio transmission characteristics in tunnel environments. *Mining Technology*, 126(2), 77–87. <https://doi.org/10.1080/14749009.2016.1259196>
- Chiba, J., Inaba, T., Kuwamoto, Y., Banno, O., and Sato, R. (1978). Radio communication in tunnels. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 26(6), 439–443. <https://doi.org/10.1109/tmtt.1978.1129409>
- Collin, R. E. (1985). *Antennas and radiowave propagation*. McGraw-Hill Companies.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar*. IET.
- Deryck, L. (1978). Natural propagation of electromagnetic waves in tunnels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 27(3), 145–150. <https://doi.org/10.1109/t-vt.1978.23737>
- Emslie, A. G., Lagace, R. L., and Strong, P. F. (1973). Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *Proceedings of Through-the-Earth Electromagnetics Workshop*, 38–48.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Emslie, A., Lagace, R., and Strong, P. (1975). Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(2), 192–205. <https://doi.org/10.1109/tap.1975.1141041>
- Gaewmood, P., and Trisarn, K. (2018). Study on Increasing Production and Potential of Khorat Sand Gas Using Fracturing and Computer Simulation. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 25(4), 411–418.
- Gibson, A. D. (2014). How Earth-Current Antennas Really Work. *BCRA Cave Radio & Electronics Group*, 88.
- Glover, P. W. J. (2015). Geophysical properties of the Near Surface Earth: Electrical properties. In *Treatise on Geophysics* (pp. 89–137). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-444-53802-4.00189-5>
- Howard, R. S., and Vaughan, H. D. (1998). *The Navy electricity and electronics training series: Module 10 introduction to wave propagation, transmission lines, and antennas*. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center.
- Hrovat, A., Kandus, G., and Javornik, T. (2014). A survey of radio propagation modeling for tunnels. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(2), 658–669. <https://doi.org/10.1109/surv.2013.091213.00175>
- International Telecommunication Union. (2015). *Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications*. (pp. 431–438). Recommendation ITU/RV.
- Jantaupalee, A., Wongsan, R., Khamsalee, P., Wannakomol, A., and K, Tansuwan (2024). A STUDY OF RADIO WAVE PROPAGATION IN THE CAVE FOR DEVELOPING THE THROUGH-THE-EARTH APPLICATION. *GEOMATE Journal*, 26(118), 74–86.
- Javaid, F., Wang, A., Sana, M. U., Husain, A., and Ashraf, I. (2021). An optimized approach to channel modeling and impact of deteriorating factors on wireless communication in underground mines. *Sensors*, 21(17), 5905. <https://doi.org/10.3390/s21175905>

รายการอ้างอิง (ต่อ)

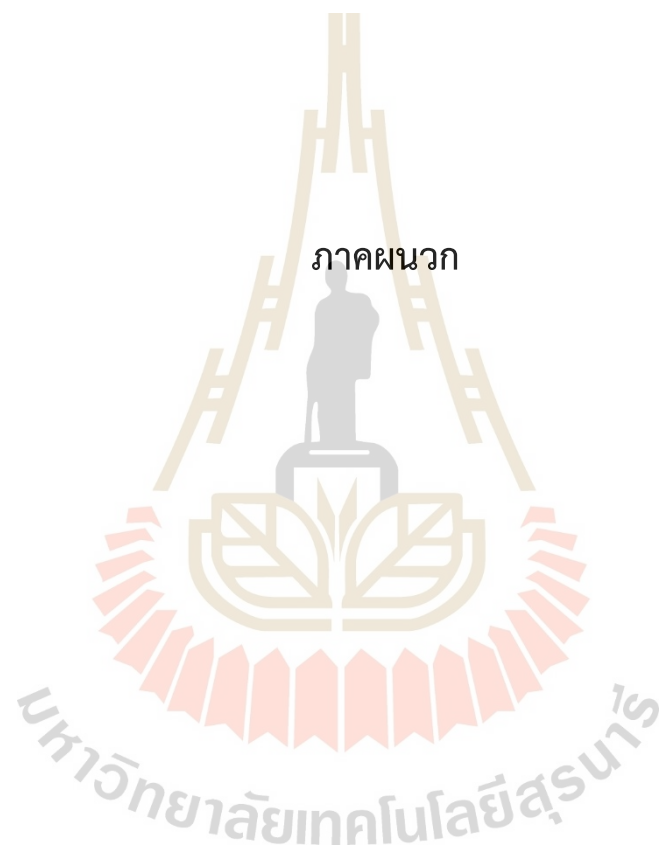
- Jones, G., and Holderied, M. W. (2007). Bat echolocation calls: Adaptation and convergent evolution. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1612), 905–912. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.0200>
- Kjeldsen, E., and Hopkins, M. (2006, October). An experimental look at rf propagation in narrow tunnels. *MILCOM 2006*.
<http://dx.doi.org/10.1109/milcom.2006.302290>
- Moss, C. F. (2018). Auditory mechanisms of echolocation in bats. In *Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience*. Oxford University Press.
<http://dx.doi.org/10.1093/acrefore/9780190264086.013.102>
- Mount, G. J., and Comas, X. (2014). Estimating porosity and solid dielectric permittivity in the Miami Limestone using high-frequency ground penetrating radar (GPR) measurements at the laboratory scale. *Water Resources Research*, 50(10), 7590–7605. <https://doi.org/10.1002/2013wr014947>
- Murray, W. (2000). Borehole measurement of the E.M. properties of sandstone. *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*.
<http://dx.doi.org/10.1109/igarss.2000.858415>
- Palmer, A. N., and Palmer, M. V. (1995). Geochemistry of capillary seepage in Mammoth Cave. In *Proceedings of the 4th Mammoth Cave Science Conference*, 199–133.
- Park, S. G., Shin, S. W., Lee, D. K., Kim, C. R., and Son, J. S. (2016, September 4). Relationship between electrical resistivity and physical properties of rocks. *Proceedings*. <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201602101>
- Rak, M., and Pechac, P. (2007). UHF propagation in caves and subterranean galleries. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(4), 1134–1138.
<https://doi.org/10.1109/tap.2007.893385>
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: Principles and practice*. Prentice Hall.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Soo, Q. P., Yong Lim, S., Gin Lim, D. W., Meng Yap, K., and Lun Lau, S. (2018). Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(5), 743–746.
<https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2813310>
- Wyllie, M. R. J., Gardner, G. H. F., and Gregory, A. R. (1962). STUDIES OF ELASTIC WAVE ATTENUATION IN POROUS MEDIA. *GEOPHYSICS*, 27(5), 569–589.
<https://doi.org/10.1190/1.1439063>
- วรรณโกมล, อ. (2561). การวิเคราะห์ศักยภาพในการเป็นแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมของหินคาร์บอเนต ยุคเพอร์เมียนด้านตะวันตกของแอ่งโคราช. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Jantaupalee, A., Wongsan, R., Khamsalee, P., Wannakomol, A., and K, Tansuwan (2024).

A STUDY OF RADIO WAVE PROPAGATION IN THE CAVE FOR DEVELOPING THE THROUGH-THE-EARTH APPLICATION. GEOMATE Journal, 26(118), 74–86.

Jantaupalee, A., Wongsan, R., Wannakomol, A., Khamsalee, P., and K, Tansuwan (2024).

A MODELING OF RF PROPAGATION FOR LOW FREQUENCY IN NATURAL CAVES WITH 3D MODEL SIMULATION. Suranaree Journal of Science & Technology, 1-13.

วารสารวิชาการระดับชาติ

Wongsan, R., Khamsalee, P., Wannakomol, A., Kumsawat, P., Srikaew, A., and

Jantaupalee, A. (2022). A Study on Radio Wave Propagation in Chiang Dao Cave. NBTC Journal, 6(6), 123–147.

Khamsalee, P., Wongsan, R., and Jantaupalee, A. (2022). Development of 350 kHz

Analog Transceiver for Applying in Cave Communication. ECTI Transaction on Application Research and Development, 2(3), 1-11.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Jantaupalee, A., Khamsalee, P., and Wongsan, R. (2023, May). Low-Frequency Wave

Propagation in the Cave. In 2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (pp. 1-4). IEEE.

Julthochai, S., Jantaupalee, A., Khamsalee, P., and Wongsan, R. (2023, October). An

Experimental Study of Wave Propagation in Sandstone Cave. In 2023 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP) (pp. 1-2). IEEE.

Pruekchatsiri, C., Jantaupalee, A., Khamsalee, P., and Wongsan, R. (2023, October). An

Experimental Study of Electrodes for Through-The-Earth 350 kHz MF Communication. In 2023 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP) (pp. 1-2). IEEE.

A STUDY OF RADIO WAVE PROPAGATION IN THE CAVE FOR DEVELOPING THE THROUGH-THE-EARTH APPLICATION

*Atawit Jantaupalee¹, Rangsan Wongsan¹, Peerasan Khamalee¹, Akkhapun Wannakomol² and Kiatsuradech Tansuwan²

¹School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand;
²School of Geotechnology, Suranaree University of Technology, Thailand

*Corresponding Author, Received: 20 Jan. 2024, Revised: 24 April 2024 Accepted: 26 April 2024

ABSTRACT: Radio waves are significant for operating in an underground tunnel or a cave, such as two-way radio systems or emergency communication during rescue operations. Most applications used in the tunnels require wired connections because of the high attenuation of the wireless propagation. In particular, the attenuation in caves is higher than in tunnels because of the non-uniform nature of the walls. Therefore, this paper presents a study of the radio wave propagation within a cave. The experiment covers the low-frequency (LF) to ultra-high frequency (UHF) bands that aim to analyze the attenuation and behavior of waves in caves. Study results show that the low frequency and medium frequency (MF) bands can penetrate cave walls due to the deeper skin depth. At the same time, higher frequencies perform well in line-of-sight (LOS) propagation over short distances, albeit encountering significant attenuation in non-uniform cave environments. The skin depth condition obtained in the propagation result led to the Through-the-Earth (TTE) experiment by making two hand-made transceivers in the beginning band of MF at 350 kHz for transmitting and receiving waves between the mountain surface and the cave passage directly through the rock layer. The results of the TTE experiment show that the transceivers can transmit to 571 meters with a received power of -85.0 dBm before encountering an obstacle that makes it impossible to continue. Finally, the results are significant for developing the application of radio frequency within caves or tunnels and improving the application of the TTE technique with more versatility and efficiency.

Keywords: Geophysics, Sub-surface, Cave technology, Wave propagation, Through-The-Earth (TTE)

1. INTRODUCTION

Radio waves have diverse applications in geology and sub-surface operations. Sub-surface sensing technologies encompass a range of methods for detecting, imaging, and characterizing sub-surface objects and phenomena, including Ground Penetrating Radar (GPR), electromagnetic induction (EMI), seismic methods, electrical resistivity tomography (ERT), and remote sensing [1,2]. Radio waves are essential in communication through two-way radio systems within underground mining. Yarkan, Guzelgoz, Arslan, and Murphy [3] have surveyed communication in an underground mine by discussing communication types, methods, and the significance of communication in the underground mine.

After that, Gibson [4,5] researched a new underground communication technique: the so-called Through-the-Earth communication (TTE), which transmits radio waves through the earth's surface into the underground. Such a method is still a wireless communication system, which is necessary for implementation in the cave due to the comfortable installing, relocating, and maintaining the equipment. Furthermore, much research has studied wave propagation in tunnels and caves to investigate the behavior of waves while propagating

in caves or tunnels [6-9]. These applications highlight the wide-ranging utility of radio waves, offering significant improvements in safety, efficiency, and the exploration of the sub-surface environment in geology and underground mining operations.

Additionally, in 2018, twelve members of a junior football team with their assistant coach were trapped inside the Tham-Luang Nang-Non cave in northern Thailand due to heavy rainfall that flooded the cave and blocked their way out [10]. National and international rescue teams made extensive efforts to free them, resulting in their successful rescue after approximately seventeen days. This high-profile operation garnered significant worldwide attention and received cooperation from numerous organizations. The event highlighted the importance of studying radio waves and developing specific applications for cave and mine environments.

Therefore, this paper reported the experimental study of wave propagation in the cave to investigate their behaviors while traveling in the cave from LF to UHF bands both in line-of-sight (LOS), and non-line-of-sight (NLOS) as natural caves differ in cave geology, wall roughness, dimensions, bends, and the electromagnetic properties of rock. This study proceeded at Chiang Dao Cave, Chiang Mai,

Thailand, a natural cave with the abovementioned properties.

Furthermore, the results of the experimental study will be used to design a transceiver supporting the TTE application by using the hypothesis that the low frequency is a ground wave and has deeper skin depth that can be transmitted through the rock layer into the cave, effectively. In conclusion, we verified the experimental results by selecting the appropriate frequency for designing and constructing the devices for testing in Chiang Dao Cave. Finally, our experimental and testing results accorded together and effectively used in the long-distance cave passage with a TTE system.

2. RESEARCH SIGNIFICANCE

This research contributes considerably to understanding the propagation of radio waves within caves or similar structures such as mines and tunnels. This study covers frequencies from LF to UHF, both line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) scenarios. The study reveals the behavior and limitations of each frequency range while propagating in the cave. In particular, LF and MF bands exhibit ground wave properties suitable for TTE application, Underground radiolocation, or GPR application. These findings offer valuable insights for future geology and sub-surface applications such as the cave, mine, and tunnel, guiding the selection of appropriate frequency applications.

3. MATERIALS

3.1 Wave Propagation in Cave

The research reports of [11] and [12] mentioned that electromagnetic propagation in caves or underground tunnels with uniform structures is considered similar to a large spherical waveguide, which is typically a hollow structure with Transverse Electric (TE) and Transverse Magnetic (TM) conductive walls. These transverse waves create electric and magnetic fields perpendicular to the wave's direction. In addition, the waveguide cross-section determines the lowest frequencies that can pass through with minimal loss, and the cutoff-frequency values depend on the given mode that the waveguide's size and shape can define. In general, the cave passage is often considered a rectangular waveguide. However, neither a natural tunnel nor a natural cave can directly compare to a waveguide since the waveguide wall serves as a nearly perfect conductor. In contrast, when it responds to different frequencies, the cave wall provides a property more like a dielectric than the ideal conductor, such as an

electrical insulator or a conductor. Furthermore, the boundary conditions of the electromagnetic field that occurred inside the cave passage also have an occurrence of the wave that is partly reflected back and forth within the cave passage and partially lost in the surrounding cave wall that is controlled by the refraction index between the different mediums (air and cave wall), which have different permittivities and magnetic permeabilities [1], as shown in Fig.1.

Although the cave dimension determines the cut-off frequency in the waveguide model, in practice, the lower frequency than the cut-off frequency can propagate through the cave moderately. Since the few waves are shifted from free-space propagation to surface waves traveling in the cave wall texture, that will be discussed in the topic of TTE communication afterward.

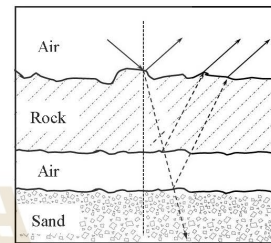


Fig.1 The wave travels between the multi-layered medium

3.2 Physical Properties

The geological study about the wave attenuations when traveling through the rock layer shows that it behaves differently between the radio wave transmitted through the cave and the transmission to free space. One of the significant factors is the rock's porosity, in which the sediment grains and mineral crystals affect the wave transmission into the medium. The energy transmitted will be absorbed and decrease the speed. The relationship between the velocity of a wave when traveling through a porous rock medium can be explained in Eq. (1) [13].

$$\frac{1}{V_M} = \frac{\phi}{V_F} + \frac{(1-\phi)}{V_R} \quad (1)$$

Where, ϕ is volumetric porosity fraction, V_M is measured velocity, V_F is the velocity in saturating liquid, V_R is the velocity in rock solid

Wannakomol and Chonglakmani [14] researched the porosity of the Permian limestone, which is the

same-aged as the limestone at Chiang Dao cave with an average porosity of 1.06% less than the sandstone of the Phra Wihan rock category (Phra Wihan formation), which also exists in Thailand. Remark: Gaewmood [15] reported that the average porosity of the Phra Wihan sandstone is around 12.6%. It was found in the relationship in Eq. (1) that the porosity of Permian limestone is low, which causes the wave to travel faster, and less energy absorbed. According to [1], another factor contributing to the different attenuation in both rock types is the homogeneity of the medium. In the case of sedimentary rock formation, there will be gaps in the rock layers from deposition arrangement, the accumulation of sediments of that rock type, until it becomes cave formation. As a result, the differences in the dielectric layers have occurred (i.e., air, sand, and soil), and the waves will attenuate when traveling through each dielectric layer, as shown in Fig.1. On the other hand, the Permian limestone group of the Chiang Dao caves with higher homogeneity since the medium is only one layer throughout.

3.3 Electromagnetic Properties

The rocks with several chemical compositions result in different abilities for electrical conductivity. According to [16], porosity is a property that affects conductivity. In the same medium, as the porosity increases, which different minerals replaced, will increase the electrical conductivity too. The relationship between electrical conductivity and resistance can be explained in Eq. (2).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

When σ is the electrical conductivity ($S \cdot m^{-1}$), ρ is the electrical resistivity ($\Omega \cdot m$).

The rock samples in each study by [1,16-18] show that limestone had less electrical conductivity than sandstone, which is related to porosity. Highly porous rocks are replaced by metallic minerals, resulting in higher electrical conductivity. In addition, when electromagnetic waves travel through a medium of high conductivity, the energy will

oscillate the free electric charges in the conductor. This oscillation causes electromagnetic energy to convert into heat, which increases when the electric charge grows (high conductivity). As a result, the wave energy almost wholly attenuates at the medium's surface when traveling into the high-conductivity medium. The distance that the wave energy reduced to $1/e$ ($\approx 36.8\%$) is called skin depth (δ), which occurs when electromagnetic waves propagate through a conductive medium. In addition, Gibson [5] and Bedford [19] study the communication systems in caves with low-frequency waves, which can penetrate through rock layers caused by the high skin depth property of such frequency bands verified by Eq. (3).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (3)$$

Where δ is skin depth (m), ω is angular frequency ($rad \cdot m^{-1}$), μ is magnetic permeability ($H \cdot m^{-1}$).

4. METHODS

4.1 Frequency Bands

A previous study by [6-9] studied the propagation property in caves/tunnels at the specific high-frequency bands of UHF and super high frequency (SHF) bands. In comparison, this research studied the same issues. However, it covered the LF to UHF bands by choosing the experimental frequencies at each band's beginning, middle, and end, as illustrated in Table 1. However, to avoid the impact on the bat populations in caves, as followed the agreement between the research team (by the Suranaree University of Technology) and the Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, therefore, the LF band at frequencies below 300 kHz cannot practice. Because the frequency range from 20 kHz to 290 kHz can interfere with ultrasonic use to resonate with obstacles in front of bats, as reported by [20,21].

Table 1 The frequency band for the experiment

Band	Freq 1	Freq 2	Freq 3	Freq 4	Freq 5
LF	No Tested	No Tested	No Tested	No Tested	300 kHz
MF	350 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
HF	3.5 MHz	10 MHz	16.5 MHz	23.5 MHz	30 MHz
VHF	35 MHz	100 MHz	165 MHz	232.5 MHz	300 MHz
UHF	350 MHz	1 GHz	1.65 GHz	2.325 GHz	3 GHz

4.2 Equipment Setup

The primary key of wave propagation study in the cave is to investigate the propagation path loss of the given frequencies, which can predict the attenuation behaviors of waves in each frequency while traveling in the cave. In our experiment, the propagation path loss was measured using a wideband RF signal generator, RF spectrum analyzer, and various types of antennas for each given frequency band.

A narrow-band continuous wave (CW) signal is supplied from the Rohde & Schwarz SMB100B signal generator to the transmitting antenna via a 50-Ohm low-loss cable LMR-240. At the same time, the receiving side consists of a Rohde & Schwarz FPH spectrum analyzer with a HE400HF antenna module (8.3 kHz – 30 MHz) and a HE400UWB antenna module (30 MHz – 6 GHz), as shown in Fig.2 and Fig.3.

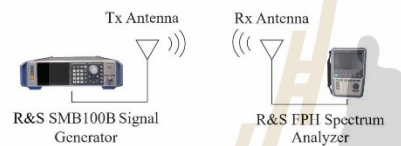


Fig.2 The equipment setup

The experiment location for the LOS testing in Chiang Dao cave is in a section called Tham Nam,

which is the most linear cave passage and has several direct distances of approximately 30 - 50 meters, as shown in Fig.4a. However, the vital purpose of this experiment is to measure the propagation path loss. Therefore, the radiated power from the antenna propagating along the cave passage every two meters can be considered such loss directly. The slope of received power, as shown in the graph at each distance, can predict the behavior of waves traveling in the natural cave environment. If the sloping trend is steep, it indicates a high loss-per-distance value, whereas a smaller slope indicates a lower loss. Nonetheless, the received power in the cave environment at each distance may be caused by multipath fading resulting from the reflection of obstacles in the cave and causing the in-phase or out-of-phase wave. For the NLOS experiment, the location of the cave passage where the wall has a curved line can obscure the LOS signal to study the diffraction and reflection behavior of waves. At the same time, for the NLOS experiment location, we chose a section of Chiang Dao cave called Tham Phra Non, with the curve of the cave wall, and the distance along the curve is at least 20 meters, as shown in Fig.4b. It is hypothesized that the different frequencies could be deflected or reflected on the cave wall with winding routes. If these results can be verified, we can choose and optimize a proper frequency in a natural cave for effective communication with the obtained results.

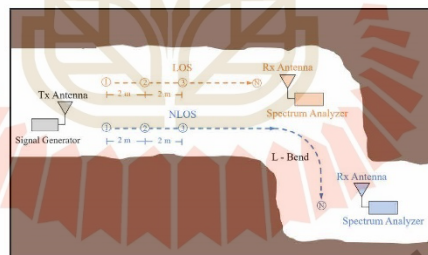


Fig.3 The experiment setup diagram



Fig.4 The measurement locations (a) Tham Nam (b) Tham Phra Non

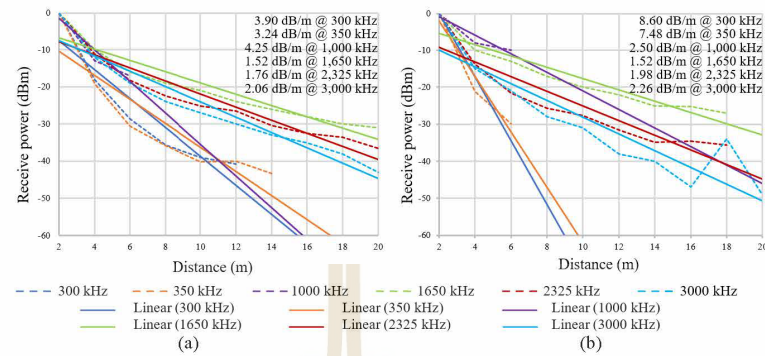


Fig.5 The experimental results of the LOS in the LF and MF band (a) V-V (b) V-H

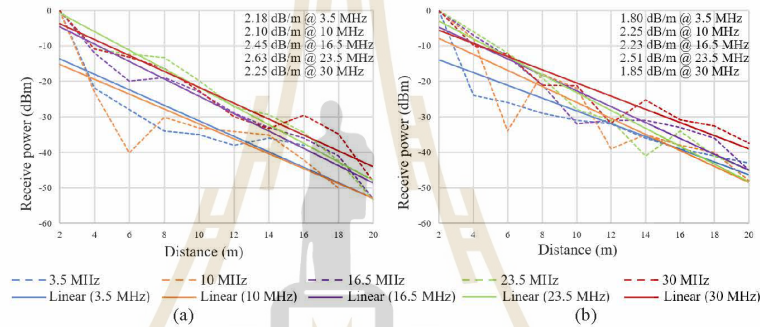


Fig.6 The experimental results of the LOS in the HF band (a) V-V (b) V-H

5. RESULTS AND DISCUSSION

This section presents a graph comparing the propagation loss per meter of the LOS experiment, as shown in Fig.5 to Fig.8, and the results of the NLOS experiment, shown in Fig.9 to Fig.12, with the vertical-vertical linear polarization (V-V) and the vertical-horizontal linear polarization (V-H).

5.1 LOS Experiment

From the results, we adjusted the range to reduce data duplication or normalized the received power in all frequency bands to focus on the propagation path loss per meter. In Fig.5, we found that the LF (300 kHz) and the MF bands (350 kHz and 1000 kHz) frequencies in both V-V and V-H polarization have relatively high path loss. Furthermore, the general propagation theory indicates that this frequency band yields the propagating property as a ground wave or a surface wave that can well penetrate the

earth (below 2000 kHz). When the wave propagates to a medium such as soil or rock, which has electrical conductivity, some will induce into that medium rather than propagate along the line of sight in free space. The property of the MF band (1650 kHz - 3000 kHz) is still the surface wave. At frequencies higher than 1000 kHz, it can propagate on the surface of the cave wall and floor more than induces to the limestone medium. As a result, the wave power can be measured preferably while the receiving antenna is close to the cave wall. However, when the frequency is up to 3000 kHz, the late MF and early high frequency (HF) bands property will be the direct wave rather than the surface wave. For the V-H polarization case, the propagation path loss is higher than the measured value in the V-V polarization. In particular, at 1000 kHz to 2325 kHz, the propagation path losses are reduced due to a change in wave polarization, causing the horizontal receiving antenna to receive more power.

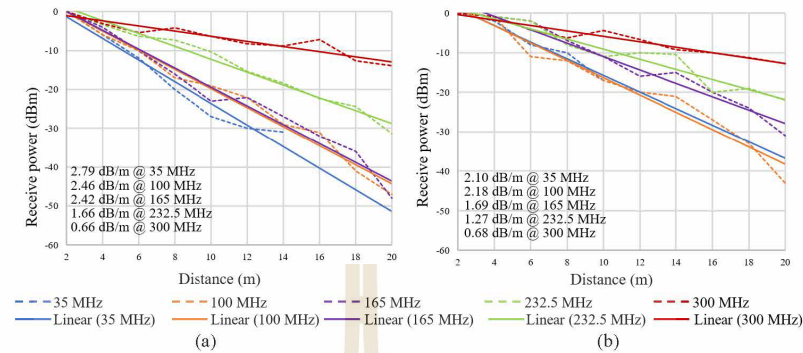


Fig.7 The experimental results of the LOS in the VHF band (a) V-V (b) V-H

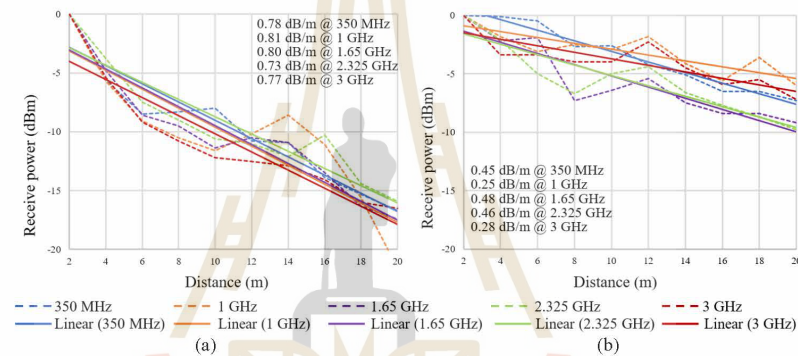


Fig.8 The experimental results of the LOS in the UHF band (a) V-V (b) V-H

In Fig.6, the propagation property of the HF band is the sky wave that can reflect or diffract in the atmosphere or the Earth's surface arc. However, when tested in a cave with a cross-section dimension smaller than the optimum wavelength in the waveguide theory and a different environment from free space, it caused relatively high attenuation. Overall, the propagation path loss in the HF band is not as high as in the LF and MF bands in both the V-H and V-V polarization.

From the results in Fig.7, the property of the very high frequency or VHF band (35 MHz - 300 MHz) is also a direct wave or free-space wave, and the wave propagation must be the line of sight only. Testing the LOS propagation, we found that the V-V polarization case at a frequency of 300 MHz provides the lowest path loss. Moreover, it is noted that the higher the VHF band, the lower the propagation path loss due to the shorter wavelength

causing the wave to pass through the large cave well. In addition, when testing in V-H mode, it is found that a tendency of propagation path loss is similar to or slightly lower compared to the V-V polarization, but that does not mean it can transmit and receive the signals further than V-V polarization.

The measurement results in Fig.8 of the UHF band (350 MHz - 3 GHz), which this band retains the direct wave property same as the VHF bands, in which the path loss was similar and relatively low when measured in both V-V and V-H polarization. However, this band provided a path loss lower than in the VHF band, which contradicts the free-space loss theory. Since the waves in the UHF band perform a skin depth lower than frequencies in the VHF band, they can reflect well like wave propagation in a waveguide when these waves incident to the conductive cave walls. In addition, the cave dimension can sufficiently support the wavelength of the UHF band.

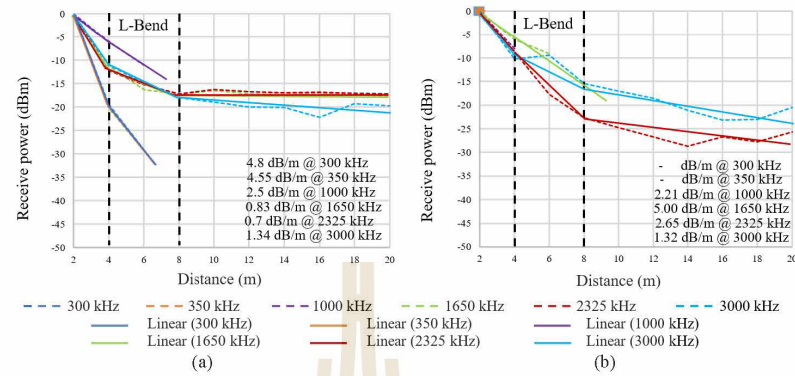


Fig.9 The experimental results of the NLOS in the LF and MF band (a) V-V (b) V-H

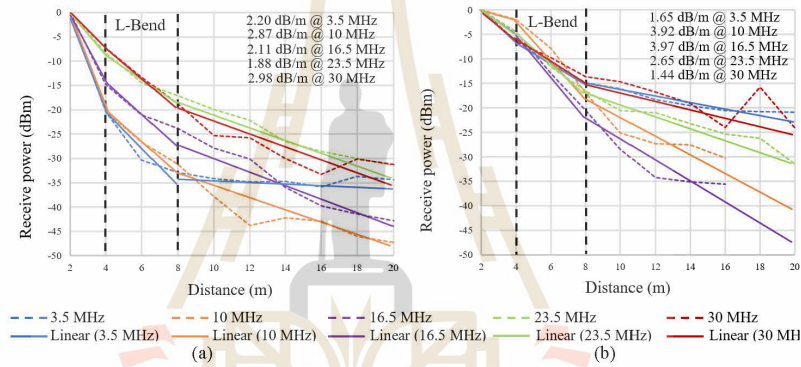


Fig.10 The experimental results of the NLOS in the HF band (a) V-V (b) V-H

5.2 NLOS Experiment

The NLOS measurement results can describe wave behaviors when encountering obstacles in the cave. The propagation loss is initially measured at a position two meters from the transmitting antenna and then progressively measured at 2 meters per step along the curve of the obstructed cave wall onto the straightway (L-Bend) in both the V-V and V-H polarization. Therefore, the NLOS test consists of a LOS part and an NLOS part, which is an L-shaped curve that obscures the traveling waves in line of sight. The L-Bend test location for observing the ability to reflect or diffract waves at each frequency is at a point of 4 still 8 meters.

In Fig.9, we found that in the LF band (300 kHz) and the MF band (350 kHz and 1000 kHz) with the

V-V polarization, the path loss was specifically high at the frequencies of 300 kHz and 350 kHz, while the frequency rises to 1000 kHz its path loss will decrease. Since the propagation property of wave at 1000 MHz begins to change from penetration through the wall to propagation on the wall surface. Consequently, the receiving antenna that is parallel and close to the cave wall surface better receives the power. The V-H test at the LF band (300 kHz) shows that the path loss is slightly different from the V-V polarization. However, the total attenuation of the V-H test over the L-Bend is higher than the V-V case, which indicates that the wave at 300 kHz induced into the limestone will not change polarization. In comparison, the MF band (350 kHz)

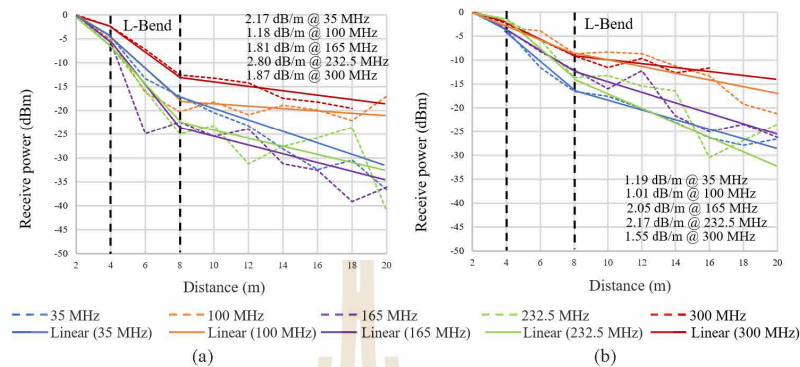


Fig.11 The experimental results of the NLOS in the VHF band (a) V-V (b) V-H

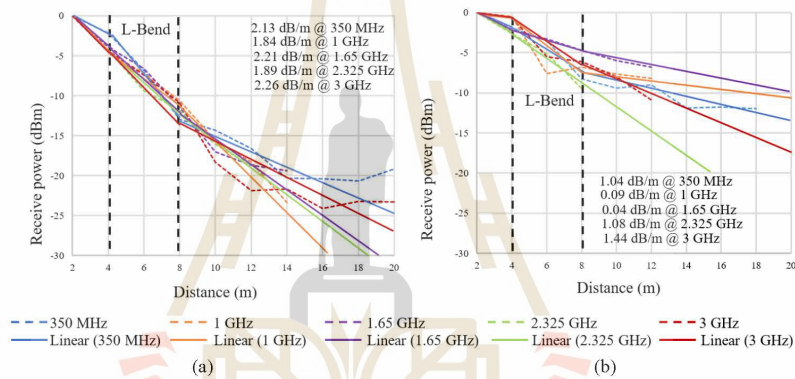


Fig.12 The experimental results of the NLOS in the UHF band (a) V-V (b) V-H

with V-H polarization yielded the highest propagation path loss caused by the ground wave property of this frequency and polarization changing following the cave wall shape.

At the same time, Fig.9 also shows the measurement results for the MF band (1650 kHz - 3000 kHz), which retained the ground wave property in both the V-V and V-H polarization testing. However, we found that frequencies above 1000 kHz can propagate on the surface of the cave walls and floors rather than induce into the rock layer. Furthermore, the frequency that rises to 3000 kHz, which is both the end and beginning of the MF and HF band, respectively, will change a property to be sky wave rather than ground wave propagation, causing the path loss of this case to increase.

Fig.10 shows the graphs of propagation path loss

in a cave for the HF band (3.5 MHz - 30 MHz), whose properties are sky waves. When these frequencies are transmitted in a cave with a given NLOS environment, a non-directional reflection and scatter will significantly appear after they incident to the cave wall and provide other path loss values when different environments of caves. Therefore, the obtained propagation path loss from measurement at only one NLOS location could not apply to the other positions in the same cave since intricate to implement the long-distance transmission covering all the cave passages.

Fig.11 shows the propagation path loss in a cave of the VHF band (35 MHz - 300 MHz), which has direct wave properties. The NLOS results in the case of the polarized V-H test provide the path loss lower than the polarized V-V test at almost all frequencies

in this band unless 165 MHz, which is 0.24 dB higher than the path loss value of the V-V test, slightly. It shows that the wave polarization in the VHF band can be changed when reflecting from the cave walls because the receiving antenna can receive higher power from horizontal waves than the vertical one.

The propagation path loss of the UHF band (350 MHz - 3 GHz) is illustrated in Fig.12. This frequency band provides direct wave properties like the VHF bands, and its propagation in a LOS environment is better than NLOS. The experiment shows that the propagation path losses in the L-Bend distance were higher than in the LOS experiment for all frequencies. Since such frequencies in both the VHF and UHF bands have shorter wavelengths than the other frequencies in the lower bands, causing less diffraction through the L-bend. In summary, the NLOS experiment at the UHF band provides a relatively high attenuation, which is one of the limitations of the frequencies in VHF and UHF bands when traveling through the bend paths in the cave.

6. TTE COMMUNICATION EXPERIMENT

As aforementioned, regarding the wave propagation behavior inside the cave, we found that some frequencies in LF and MF bands yield relatively high skin depth when propagating through the rock or earth, a medium with moderate electrical conductivity. From the results of NLOS experiments, it is also explicit that the cave wall's rock (limestone) medium exhibits different propagation behavior for each frequency band at the L-Bend section. When the low-frequency waves propagate through the cave cavity, the cave walls exhibit behaviors as a dielectric since the skin depth at low frequencies is very high, causing it to seem like a wave that travels through the cave walls. Whereas the high-frequency waves propagate through the cave cavity, it exhibits behavior like a waveguide because the skin depth at high frequencies is few. As a result, the waves will reflect back and forth in the cave cavity as they travel in the waveguide.

The skin depth condition obtained in the above result leads to the experiment of transmitting waves through the earth by selecting low-frequency waves from the LF or MF bands, which have the property of ground waves, are suitable for TTE communications, and are better than transmitting with the antenna through cave cavity directly that caused the high attenuation while traveling in.

The technique of TTE communications has been

researched and developed by many researchers for a long time. In the past, it used the radio signal below the VLF band transmitted by a large antenna on the earth's surface through the earth layer to the underground mine. This technique will discharge an electric current into the earth's surface via two electrodes connected to soil or rock at both the transmitter and receiver, as shown in Fig.13. However, the electrical field generated from current intensity will exponentially attenuate from the earth's surface, and the attenuation also increases proportionally to the frequency. Therefore, low frequencies suit TTE applications [4,5,22-24].

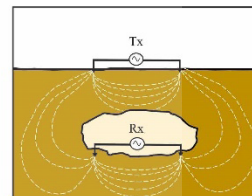


Fig.13 TTE communication concept

However, the limitations of low frequency are the large size of the antenna structure and the narrow bandwidth. Furthermore, the experiment in the cave at frequencies near 20 - 290 kHz will interfere with the bat's subsistence, which fatally affects the cave environment [20,21]. Thus, it was avoided by opting for the possible lowest frequency at 350 kHz, which is the beginning of the MF band and still has ground wave property that can transmit the waves through the earth. Therefore, this paper adds an experimental study of a 350 kHz TTE technique in Chiang Dao Cave as an alternative to developing the transceiver for TTE applications with shorter wavelengths, which makes it possible to build a smaller antenna and higher bandwidth that can also apply to more technologies.

6.1 TTE Measurement Procedure

In the measurement setup, the transmitter installed above the cave passage consists of a signal generator and a prototype of a radio transceiver with a transmitting carrier operated at 350 kHz. The prototype of the radio transceivers is specially developed and fabricated with an SSB modulation technique for communication between stations inside and outside the cave. For the testing procedure: 1) on the mountain, one radio transceiver and signal generator are connected to the earth-ground antenna by using a coaxial switch for

selecting between a signal generator and transceiver. 2) on the cave passage, the receiver inside the cave consists of an earth-ground antenna placed on the cave floor, connected to the signal generator and another radio transceiver via a coaxial switch. The block diagram of the TTE experiment is shown in Fig.14. The transmitted power from the signal generator is amplified again by an RF power amplifier and then transmitted to the earth-ground antenna equals 38 dBm, where the end of the antenna is embedded in the ground by electrode rods on both sides. In the experiment, the transmitter on the mountain was located at 19.395822°N, 98.926826°E, and 516 meters above mean sea level.

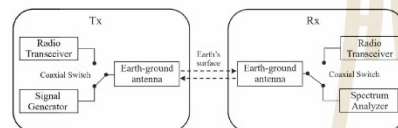


Fig.14 Block diagram of the TTE experiment

The limitation of the installing location comes from the conditions inside the cave, in which the cave floor is rugged rock terrain, causing some points cannot be installed and causing the distance of each receiver to be non-linear. The location coordinates for the transmitter and receiver in this cave are studied by [25], as illustrated in Fig.15, which shows the top view of Chiang Dao Cave consists of several passages. First, the entrance to the cave (blue) is a path from the cave entrance to the junction between the Tham Nam (orange) and the Tham Ma (green). Next, the Tham Nam route (orange color) is a long straight path, which from [25] can measure the distance from the entrance to the endpoint as 576 meters. The endpoint is the last

point that can be surveyed before encountering a sump, which makes it impossible to continue. Then, the Tham Ma route (green), which is a route that is placed higher than the Tham Nam route, with a total distance from the entrance of the cave 406 meters. Finally, Tham Kao (purple) is a path lower than Tham Nam and Tham Ma. In addition, Fig.16 shows a side view of the TTE experiment diagram, which explains how to transmit waves from above the cave passage down to the receiver inside the cave.

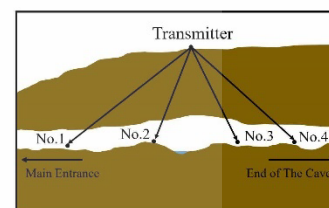


Fig.16 Side view of the TTE experiment diagram

6.2 TTE Measurement Result

Table 2 shows the received power between the transmitter above the mountain and the receiver inside the Chiang Dao Cave, which can be compared with Fig.15. From the experiment, the last points are No.4 and No.8, which can be tested before encountering an obstacle that makes it impossible to continue. No. 4 has a distance of 571 meters and can receive a power of -85.0 dBm. Then, No.8 has a distance of 396 meters and can receive a power of -92.0 dBm, which has a displacement distance from the transmitter farther than No.4, cause to receive the lower power. Therefore, the transmitter's location will be selected suitably to communicate, covering all the cave passages.

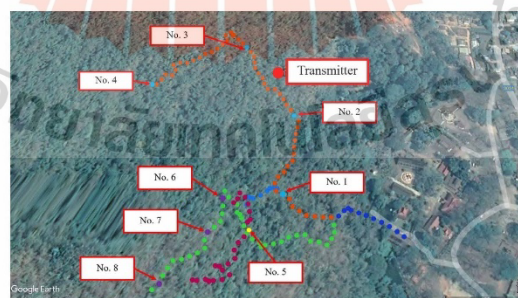


Fig.15 Top view of the TTE experiment

Table 2 Experimental results of received power for 350 kHz TTE

No.	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Passage distance (m)	Rx Power (dBm)
1	19.394252	98.926909	101	-55.3
2	19.395267	98.927058	231	-50.2
3	19.396222	98.926473	361	-48.5
4	19.395715	98.925231	571	-85.0
5	19.393838	98.926511	202	-73.0
6	19.394191	98.926193	256	-58.9
7	19.393807	98.926044	306	-56.8
8	19.393262	98.925547	396	-92.0

Although theoretically, the lower frequency can penetrate with higher depth than the higher frequency but has a limitation on the size of the antenna. When the wavelength of a signal increases (frequency decreases), longer antennas are required to receive and transmit these longer wavelengths. However, with the limitation of the space and weight of the antenna, if using a small antenna of the same size, the high frequency will give better gain. In addition, some applications require wide bandwidth, making low-frequency antennas with narrow bands that are inefficient for various purposes. For example, GPR applications require high resolution, such as locating underground utilities (pipes, cables, and conduits) [1].

Compared to past research, it studied communication through rock layers, including the applications, technical issues of the TTE communication system, and a model of the TTE communication system [24]. Furthermore, Barkand, Damiano, and Shumaker [26] studied and discussed the testing of a prototype TTE communication in an underground mine. One of the TTE communication systems developed and used by the British Cave Research Association (BCRA) is HeyPhone. It is a radio transceiver connected to a loop or earth-ground antenna operating at 87 kHz. It has a communication range of almost 500 meters with a transmit power of 10 W or 40 dBm [19,27].

In summary, Table 2 exhibits a TTE system at 350 kHz that can transmit voice signals up to 571 meters away with a received power of -85.0 dBm. The results show a communication distance significantly and ways to enhance the performance of antennas due to the shorter wavelength. The SSB TTE 350 kHz cave radio transceiver in Fig.17 was developed from the study results mentioned above, including the design concept from a HeyPhone. Besides, the radio waves at 350 kHz can communicate throughout the Chiang Dao Cave, and the beginning of the MF band can travel in rock

layers suitably more than propagating through free space in the cave cavity. Finally, the frequency at 350 kHz can improve and increase the communication range and also develop to transmit data and images between inside and outside the cave, which makes an alternative to the development of the application for underground mine communication and geological technology in the future.



Fig.17 Prototype of TTE 350 kHz cave transceiver

7. CONCLUSIONS

This paper outlines the study conducted on RF propagation within the natural limestone cave at Chiang Dao Cave, a cave similar to the Tham-Luang that was rescue operations in 2018. The primary focus of this study was to investigate wave behavior during propagation through the cave using an RF wave transmission experiment. The experiment encompassed a spectrum ranging from LF to UHF bands, considering both line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) scenarios, including the V-V and V-H polarization. The LOS experiment investigated the wave propagation behavior when propagating through the dielectric cave wall in the straight cave passage. At the same time, the NLOS

studies the reflection, diffraction, and ability of waves while traveling through the winding cave passage. The experimental results show that the behavior of each frequency has advantages and disadvantages, including suitability for utilizing different characteristics.

The frequencies in the LF and MF bands provide ground wave properties due to the skin depth property from lower frequency and slight electrical conductivity of the medium. These frequency bands are suitable for applying to Through-the-Earth (TTE) or Ground Penetrating Radar (GPR) applications since these applications require high skin depth properties.

The HF band is the sky wave property that can reflect or diffract in the atmosphere or the Earth's surface more than penetrate the medium, but tested in a cave with dimensions smaller than the optimum wavelength in the waveguide theory, causing still relatively high attenuation.

The VHF and UHF bands exhibit direct wave properties, making them appropriate for free-space transmission. The theoretical free-space attenuation is directly proportional to the frequency, but these frequencies propagate to the winding path in the cave, causing very high attenuation from the obstacles. These frequencies are inappropriate for long-distance use in caverns or tunnels.

In addition, the results obtained from the wave transmission experiments have led to the study of TTE application from the properties of ground waves found in the LF and MF frequency bands. The TTE experiment in this paper uses the measurement of the RF transmission at 350 kHz, which is the end of LF and the beginning of MF. This TTE experiment made two hand-made transceivers at 350 kHz for transmitting and receiving waves between the mountain surface and the cave passage directly through the rock layer. The TTE experimental result, which has a transmitted power of +38 dBm, can transmit up to 571 meters away with a received power of -85.0 dBm.

In summary, the research findings demonstrate that radio frequency waves exhibit different propagation behaviors within different cave environments across various frequency bands. Lower frequency waves display ground wave properties that contribute to developing Through-the-Earth (TTE) applications. Conversely, higher frequency waves propagate more within the cave than penetrating the medium. By considering the appropriate frequency, such as at 350 kHz, it is possible to extend signal transmission ranges, enhance data and image transmission both within and outside the cave, and provide increased bandwidth for diverse applications. This

understanding will pave the way for future studies on the principles of wave propagation through soil or rock. Ultimately, these studies offer avenues for furthering geology and subsurface applications such as resource survey and mining, including valuable insights for considering appropriate frequencies to improve cave and underground mine communications.

8. ACKNOWLEDGMENTS

This research was conducted through a grant from the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC) in a research project on studying spectrum utilization for cave communication systems, including modeling and locating in caves. The workspace and some essential equipment and tools supported by the Suranaree University of Technology are also greatly appreciated.

9. REFERENCES

- [1] Daniels, David J., Ground Penetrating Radar, IET, 2004, pp. 1-754.
- [2] Abid, Nabih Ben, Rim Ghazzi, Hassen Faiedh, and Chokri Souani., Signal Processing of Range Detection for FMCW Ground-Penetrating Radar Using Software-Defined Radio, Arabian Journal of Geosciences, Vol.15, No.8, 2022, pp. 711–721.
- [3] Yarkan, Serhan, Sabih Guzelgoz, Huseyin Arslan, and Robin Murphy., Underground Mine Communications: A Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.11, No.3, 2009, pp. 125–142.
- [4] Gibson, David., Channel Characterisation and System Design for Sub-Surface Communications, Lulu.com, 2010, pp. 1-274.
- [5] Gibson, David., How Earth-Current Antennas Really Work, CREG Journal, Vol.88, 2014, pp. 13–14.
- [6] Kjeldsen, Erik, and Marshall Hopkins., An Experimental Look at RF Propagation in Narrow Tunnels, In 2006 IEEE Military Communications Conference, 2006, pp. 1–7.
- [7] Rak, Milan, and Pavel Pechac., UHF Propagation in Caves and Subterranean Galleries, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.55, No.4, 2007, pp. 1134–1138.
- [8] Bedford, Michael D., and Gareth A. Kennedy., Modeling Microwave Propagation in Natural Caves Passages, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.62, No. 12, 2014, pp. 6463–6471.
- [9] Soo, Qi Ping, Soo Yong Lim, David Wee Gin Lim, Kian Meng Yap, and Sian Lun Lau., Propagation Measurement of a Natural Cave-Turned-Wine-Cellar, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.17, No.5, 2018,

- pp. 743–746.
- [10] Vichalai, C., Geophysics under stressed: a case study of Tham Luang Nang Non Cave. RMUTSB ACADEMIC JOURNAL, Vol.7, No.2, pp. 247-258.
- [11] Emslie, A., R. Lagace, and P. Strong., Theory of the Propagation of UHF Radio Waves in Coal Mine Tunnels, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.23, No.2, 1975, pp. 192–205.
- [12] Deryck, L., Natural Propagation of Electromagnetic Waves in Tunnels, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.27, No.3, 1978, pp. 145–150.
- [13] Wyllie, M. R. J., A. R. Gregory, and G. H. F. Gardner., An Experimental Investigation of Factors Affecting Elastic Wave Velocities in Porous Media, Geophysics, Vol.23, No.3, 1958, pp. 459–493.
- [14] Wannakomol, Akkhapun, and Chongpan Chonglakmani., The Analysis of Reservoir Potential in Permian Carbonates of Western Khorat Basin, Suranaree University of Technology Intellectual Repository, Geological Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 2018, pp. 1-94, <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8192>.
- [15] Gaewmood, Phanuphong., Study on Increasing Gas Production of Khorat Sandstone in L4/57 Block by Hydraulic Fracturing and Computer Simulation, PhD Thesis, Suranaree University of Technology, 2017, <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/7800>.
- [16] Glover, P., Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Electrical Properties, Treatise on Geophysics, Vol.11, 2015, pp. 89–137.
- [17] Murray, W., Borehole Measurement of the E.M. Properties of Sandstone, IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol.5, 2000, pp. 2380-2381.
- [18] Milsom, John, Field Geophysics, John Wiley and Sons, 2003, pp. 1-233.
- [19] Bedford, Michael D., Introducing the HeyPhone. Caves and Caving, Vol.91, 2001, pp. 15–17.
- [20] Jones, Gareth, and Marc W Holderied., Bat Echolocation Calls: Adaptation and Convergent Evolution, Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences, Vol.274, No.1612, 2007, pp.905–912.
- [21] Moss, Cynthia F., Auditory Mechanisms of Echolocation in Bats, In Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience, Oxford University Press, 2018, pp. 1-13.
- [22] Bataller, Vanessa, Antonio Muñoz, Pilar Molina Gaudó, Arturo Mediano, José Antonio Cuchí, and José Luis Villarroel., Improving Medium Access in Through-The-Earth VLF-LF Communications, Journal of Communications, Vol.4, No.4, 2009, pp. 284–294.
- [23] Yan, Lincan, Joseph A. Waynert, and Carl Sunderman., Measurements and Modeling of Through-The-Earth Communications for Coal Mines, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.49, No.5, 2013, pp. 1979–1983.
- [24] Carreño, Josua, Lucas Silva, Sávio Neves, Leonardo Aguayo, Adoniran Judson Braga, André Noll Barreto, and Luis Uzeda Garcia., Through-The-Earth (TTE) Communications for Underground Mines, Journal of Communication and Information Systems, Vol.31, No.1, 2016, pp. 164–76.
- [25] Wongsan, Rangsan, Peerasan Khamsalee, Prayoth Kumsawat, Akkhapun Wannakomol, and Arthit Srikaew., Study of Guidelines for Using Spectrum for Communication Systems, Including Modeling and Identifying Locations in Caves: Part 5, The National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), 2022, pp. 1-115, [https://btfp.nbtc.go.th/portfolio/2562/1481-\(32\).aspx](https://btfp.nbtc.go.th/portfolio/2562/1481-(32).aspx).
- [26] Barkand, Thomas, Nicholas Damiano, and Wesley Shumaker., Through-The-Earth, Two-Way, Mine Emergency, Voice Communication Systems, In Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Vol.2, 2006, pp. 955–958.
- [27] Bedford, Michael D., The HeyPhone to the rescue. Radio Communication, Vol.78, No.1, 2002, pp. 16–18.

Copyright © Int. J. of GEOMATE All rights reserved, including making copies, unless permission is obtained from the copyright proprietors.

A MODELING OF RF PROPAGATION FOR LOW FREQUENCY IN NATURAL CAVES WITH 3D MODEL SIMULATION

Atawit Jantaupalee^{*1}, Rangsan Wongsan¹, Akkhapun Wannakomol²,
Peerasan Khamsalee¹, and Kiatsuradech Tansuwan²

Received: March 02, 2024; Revised: April 11, 2024; Accepted: May 03, 2024

Abstract

The study of the RF propagation model within natural caves remains challenging. In the past, the propagation model in the tunnel was compared using waveguide theory because of the electrical conductivity of tunnel walls. However, waveguide models have limitations because a cut-off frequency from the tunnel dimension does not allow frequencies lower than the cut-off frequency to propagate. Although the frequency wave lower than the cut-off frequency cannot theoretically propagate, in practice, it can propagate through the cave. Therefore, this paper presents the modelling of RF propagation at low frequencies in natural caves using empirical methods by measuring the waves propagated within cave passages at the Chiang Dao Cave (limestone) and the Patihan Cave (sandstone). The measurement will focus on analyzing and comparing factors, propagation mechanisms, and behavior, which cover the frequencies at 300, 1000, 1650, 2325, and 3000 kHz, to develop the low-frequency attenuation model within the cave proposed in this paper. The 3D cave models obtained from a LiDAR scanner were used to calculate the physical factors of the cave walls, and then the path losses were calculated using our proposed model and compared to the experimental results. In addition, the path losses calculated using 1) CST simulation software and 2) the waveguide model were also compared with the results from the proposed model. The results obtained from the proposed model provide attenuation values similar to those of the experimental results. Finally, the concept of the low-frequency attenuation model can be used for the prediction and analysis of the propagation performance of low-frequency waves in caves, tunnels, or underground mines and lead to the development of cave communication technology and electromagnetic knowledge in the future.

Keywords: Cave; Cave Communication; Modeling; Simulation; Wave Propagation

¹ School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. E-mail: d6300647@e.sut.ac.th*, rangsan@sut.ac.th, peerasan@sut.ac.th

² School of Geotechnology, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. E-mail: akkhapun@sut.ac.th, tansuwan.k@gmail.com

* Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.55766/sujst-2024-03-e03769>

Suranaree J. Sci. Technol. 31(3):010305(1-11)

Introduction

Nowadays, cave technology is still challenging. Mainly due to the physical of the cave being non-uniform and complicated passage compared to tunnel and mine. Then, more than the concept of free-space propagation alone is needed to explain the propagation within the cave, tunnel, or mine. Over the years, many researchers have extensively studied radio propagation in tunnels. The concept of the mine propagation model was initiated by Emslie (1973) and Emslie (1975), who drew inspiration from comparing the coal mine tunnel with the waveguide theory. This approach helps to explain the attenuation caused by various factors in the tunnel. Emslie's research becomes a guideline for several subsequent studies on wave propagation models in the mine and cave. In 1976, Emslie (1976) also studied the propagation in the coal mine at the LF and MF frequency, which analyzed the effect of the conductivity in rock and coal seams. After a year, Deryck (1978) studied the propagation mechanism within the underground chambers to explore the relationship between propagation characteristics and transverse dimensions. Furthermore, numerous studies are dedicated to investigating RF propagation and developing the propagation model in the tunnel and mine (Kjeldsen and Hopkins, 2006; Rak and Pechac, 2007; Bedford and Kennedy, 2014; Hrovat *et al.*, 2014; Bedford *et al.*, 2017; Soo *et al.*, 2018; Javaid *et al.*, 2021; Jantaupalee *et al.*, 2023; Julthochai *et al.*, 2023).

Also, past research has primarily focused on studying the propagation of VHF to SHF bands that are widely used in wireless communication. However, there have been limited studies on wave propagation in caves, especially natural caves, mainly due to the complex environment within the cave passages. In recent years, Wongsan *et al.* (2022) investigated the propagation of LF to UHF bands in a natural limestone cave. This research shows that the non-uniform and implicated cave environment directly affects high-frequency attenuation, particularly non-line-of-sight (NLOS). In addition, the study found that low-frequency waves can propagate along the straight passage of the cave, which differs from the waveguide theory model, where frequencies below the cut-off frequency cannot propagate along the cave passage. However, when the low frequency propagates along the arc against the cave wall, it can penetrate through the cave wall. Based on this mechanism, Jantaupalee *et al.* (2023) proposed the concept of low-frequency propagation in the cave, using the hypothesis of the ground wave property in low

frequency to describe the relationship between cave dimensions, skin depth, and attenuation.

Therefore, this paper proposes the RF propagation modelling for low frequency in natural caves using empirical experiment methods by measuring the waves propagated within cave passages at the Chiang Dao Cave (limestone) and the Patihan Cave (sandstone) that are two rock types of caves found in Thailand, which have different physical characteristics, cave formations, and electromagnetic properties. The measurement will focus on analyzing and comparing factors, propagation mechanisms, and propagation behavior of the low-frequency wave at 300, 1000, 1650, 2325, and 3000 kHz. The experimental results will be used to develop the low-frequency model from the skin depth concept. After that, the 3D cave models obtained from the LiDAR scanner were used to calculate the physical factors of the cave walls, such as dimension, roughness, and tilt. These factors will be used to calculate the path losses with the proposed low-frequency model. In parallel, the results from 3D cave models will also be simulated with the CST simulation software. Finally, the results of the proposed model will be compared to the obtained results from the experiment, the waveguide model, and the CST software. In conclusion, the study and development of the proposed model in the natural cave will help to understand the mechanisms of low-frequency propagation in the cave and determine the appropriate way to communicate within this complex environment.

Propagation Experiment

Indeed, the study of sub-surface propagation is a subject that has been introduced previously. Researchers have been conducting research and experiments in this area for several decades. Those studies established a theoretical foundation for analyzing propagation in the tunnel by comparing it to a lossy waveguide. The propagation study required an empirical experiment by testing transmissions within the tunnel or the cave along the line-of-sight (LOS) at a unit distance from the transmitter. The results obtained from the measurement, which are the power attenuation per unit distance, will be analyzed for further model development.

Experimental Setup

To understand the wave propagation in the cave, we have to measure the propagation path loss

that will present the attenuation behavior of waves travelling within the cave. The measurement procedure in this research has the same method as (Kjeldsen and Hopkins, 2006; Rak and Pechac, 2007; Bedford and Kennedy, 2014; Soo *et al.*, 2018; Jantaupalee *et al.*, 2023; Julthochai *et al.*, 2023), which aims to find the slope of the signal level (path loss slope). The measurement will investigate the wave that propagates along the straight cave passage, which shows the effect of the electrical properties of the cave wall, cave dimension, and other physical environment.

However, this paper proposed to investigate low-frequency propagation, although we will choose the LF and MF bands from the beginning, the middle, and the end of the band. The experimental frequencies consist of 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, and 3000 kHz. Nevertheless, the frequencies below 300 kHz can't be measured to avoid impacting the bat population in the caves. Jones and Holderied (2007) and Moss

(2018) show many bat species that use ultrasonic waves to resonate with obstacles in front of them to measure distances with frequencies ranging from 20 kHz to 200 kHz.

The experiment uses a Rohde & Schwarz SMB100B signal generator by transmitting the continuous wave (CW) signal to the antenna via a low-loss cable LMR-240 with 16 dBm of the transmitting power, then amplified to 38 dBm with an RF power amplifier. The transmitting antenna consists of a passive shielded loop antenna (20 Hz-1 MHz AH Systems SAS-565L) at 300 kHz and an Isotron 200B antenna at 1,000 - 3,000 kHz. Both antennas provide an omnidirectional pattern, which transmits vertically linear polarization. For the receiver equipment, we use a Rohde & Schwarz FPH spectrum analyzer and a Rohde & Schwarz HE400HF antenna module (8.3 kHz - 30 MHz). The transmitter equipment was installed at the beginning point. The receiver will measure signal levels between the transmitting and receiving antenna at a progress distance of every 2 meters until reaching the destination of 20 meters, as shown in Figure 1. The received power will be normalized for all frequency bands.

The experiment locations consist of two caves that are the Chiang Dao Cave and the Patihan Cave. First, the Chiang Dao Cave is a limestone cave that is the cave type most found generally in Thailand. In the Chiang Dao Cave, we choose the Tham Nam section, which has a straight passage of about 20 - 30 meters, as shown in Figure 2. Another one is the Patihan Cave, as shown in Figure 3. Significantly, these two caves differ in their formation, chemical composition, and physical characteristics, all of which affect the travel of electromagnetic waves that will be analyzed in the later section.

Experimental Result

Figure 4 shows the results of the propagation measurement at the Chiang Dao Cave. The results illustrate that path loss slopes are 3.90 dB/m, 2.83 dB/m, 1.52 dB/m, 1.76 dB/m, and 2.06 dB/m at 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, and 3000 kHz respectively. Figure 5 shows the results of the propagation measurement at the Patihan Cave. The results have 1.57 dB/m, 1.51 dB/m, 1.25 dB/m, 1.40 dB/m, and 1.38 dB/m at 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, and 3000 kHz, respectively.

From the results, the frequency at 300 and 1000 kHz has a relatively high path loss. Following the wave propagation theory, the frequency in the LF and MF bands indicates the surface wave property. This property occurred by the conductivity in the medium (cave wall), which has slight conductivity. If the frequency of the waves is low enough, the cave walls act like dielectric walls.

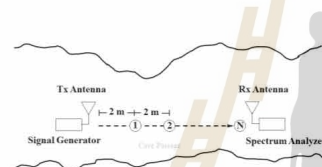


Figure 1. The diagram of the experimental setup

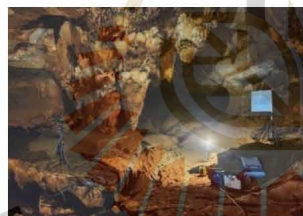


Figure 2. Chiang Dao Cave (Tham Nam)



Figure 3. Patihan Cave

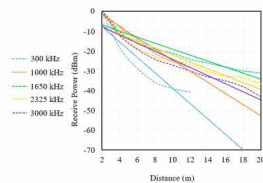


Figure 4. The experimental results compare the received power level and distance at the Chiang Dao Cave

When the low-frequency wave travels through the cave passage, some part of the waves penetrate through the cave wall due to the skin effect, while others will reflect and diffract to the receiver. The waves penetrating the cave wall will attenuate due to the dielectric layers within it. The higher frequencies at 1650 kHz, 2325 kHz, and 3000 kHz have lower path loss since they propagate along the cave cavity well rather than being affected by the cave wall. In conclusion, the experimental results led to the study of wave propagation models in the cave, especially at low frequencies, with the addition of the skin effect discussed in the next section.

Materials and Methods

Electromagnetic Properties

The mechanical and electrical properties of rocks significantly affect the propagation of waves within the cave. The Chiang Dao Cave is a limestone cave that originates from the gradual accumulation of sediment on the ocean floor over millions of years. Over time, geological shifts and erosion, driven by this slightly acidic water, contribute to cave formation. The Patihan Cave is a sandstone cave that exists in northeastern Thailand. Unlike the Chiang Dao Cave formations, Patihan Cave exhibits minimal dissolution but more than undergoes mechanical weathering processes. These formation processes cause to differ the homogeneity of the medium. In the case of the Patihan Cave formation, there will be gaps in the rock layers from the porosity and mechanical weathering process. As a result, the differences in the dielectric layers have occurred (i.e., air, sand, and soil) when the waves traveling through the dielectric layers will attenuate and reflect between the layers. In contrast, the Chiang Dao Cave has higher homogeneity because the medium is almost one layer throughout (Daniels, 2004; Gunn, 2003; Dunkley *et al.*, 2017; Sripompibul, 2021; Putthapiban, 2021).

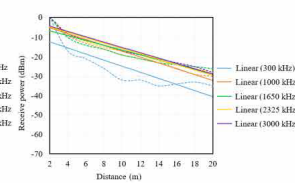


Figure 5. The experimental results compare the received power level and distance at the Patihan Cave

Additionally, the mineral composition and sedimentary grains of limestone and sandstone determine the electrical properties of rocks, which affect wave attenuation and electrical conductivity. Minerals that can conduct electricity are composite within the rock according to the porosity factor of the rock. Wannakomol and Chonglakmani (2018) researched the porosity of the Permian limestone, which is the same as the limestone at Chiang Dao cave. The Permian limestone had an average porosity of only 1.06%, compared to Gaewmood and Trisarn (2018) found the average porosity of the Phra Wihan sandstone was 12.6%. Also, Glover (2015) shows that porosity affects conductivity properties. When porosity increases within the same medium, it leads to higher electrical conductivity due to the replacement of various minerals. The conductivity of rocks will affect the skin effect of the medium discussed in the next topic. Limestone typically exhibits lower electrical conductivity than sandstone due to its lower porosity. The rock samples in each study by Milsom and Eriksen (1989), Murray (2000), Daniels (2004), and Glover (2015) found that limestone had less electrical conductivity than sandstone slightly. The relationship between electrical conductivity and resistivity is explained in Equation (1).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

Where the σ is the electrical conductivity ($S \cdot m^{-1}$), and ρ is the electrical resistivity ($\Omega \cdot m$).

Propagation Mechanism

According to Collin (1985) and Siwiak and Bahreini (2007), the frequencies ranging from a few kilohertz to several megahertz have the predominant propagation mode as a surface wave. The ELF to VLF frequency range utilized in underwater navigation, sonar, and long-range navigation has long wavelengths and large skin depths, allowing

them to propagate over the earth or sea surface. When electromagnetic waves travel through a conductive medium, the energy will oscillate the free electric charges in the conductor. This oscillation causes electromagnetic energy to convert into heat, which increases when the electric charge increases (high conductivity). As a result, the wave energy almost wholly attenuates at the medium's surface when traveling into the high-conductivity medium. The distance when the waves propagate through the conductive medium and energy is reduced to e^{-1} (36.8%), called skin depth (δ) (Balanis, 2012). In addition, Gibson (2014) and Bedford (2001) study the communication systems in caves with low-frequency waves, which can penetrate through rock layers caused by the high skin depth. The relationship between skin depth, conductivity, and frequency can be seen in Equation (2).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (2)$$

Where the δ is skin depth (m), ω is the angular frequency ($\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$), μ is permeability ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$).

Moreover, when the waves travel inside the cave cavity, some part of the waves travel along the cave cavity while others penetrate the cave wall, which has dielectric layers that cause them to reflect and attenuate, as shown in Figure 6. In the lower frequency, it has more skin depth, resulting in an electrical dimension more than the physical dimension. But even so, the low-frequency antenna has a size limit and a narrow bandwidth, which is unsuitable for communications within caves. However, the electrical conductivity of the cave walls is lower than seawater, which makes the higher frequencies have a more usable skin depth but retain the ground wave property (Collin, 1985). This concept will lead to the model development of the low-frequency propagation inside the cave, explained in the next topic.

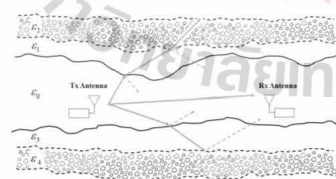


Figure 6. The experimental results compare the received power level and distance at the Chiang Dao Cave

Methodology

Waveguide Model

Wave propagation within tunnels and mines has been studied for a long time. Emslie *et al.* (1973), Emslie *et al.* (1975), and Deryck (1978) investigated electromagnetic propagation in underground tunnels with uniform shapes as a waveguide. The waveguide typically has a hollow structure with a wall capable of conducting transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) waves, generating electric and magnetic fields perpendicular to their direction. Additionally, the dimensions of the waveguide determine the lowest frequency that can be transmitted with minimal loss. The cut-off frequency value is dictated by the specific mode, also known as the dominant mode, which is determined by the size and shape of the waveguide. According to waveguide theory, the cut-off frequency is the lowest frequency that can pass through with minimal attenuation, obtained from the wavelength by comparing the dimensions of a natural cave resembling a rectangular waveguide. The cut-off wavelength equation is shown in Equation (3).

$$\lambda_{mn} = \frac{2\sqrt{ab}}{\sqrt{\left(m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}\right)}} \quad (3)$$

Where a is the width of the waveguide, b is the height of the waveguide, and mn is the mode of the waveguide.

However, it has previously only been studied in the high-frequency range, from UHF to SHF, where the waveguide model can still be used because the wavelength of the high-frequency band is typically smaller than the cave's dimension. Waveguide theory is used for attenuation modeling the wave propagation within the cave, as shown in Equations (4) to (8).

The shape and dimensions of the tunnel are non-uniform, and the dielectric mediums of the wall impact the propagation behavior. Non-uniformity in the tunnel medium that refraction by the floor and wall is termed refraction loss because when transmitted signals penetrate any medium, a portion of the signal is absorbed, resulting in considerable refraction loss. Refraction loss is calculated by considering both horizontal and vertical medium characteristics, depending on the width and height of a mine. Equations (4) and (5) provide the defined expression of refraction loss (Emslie *et al.*, 1975; Bedford and Kenedy, 2014; Bedford *et al.*, 2017; Javaid *et al.*, 2021).

$$a_h = 4.343\lambda^2 \left(\frac{\epsilon_v}{a^3 \sqrt{(\epsilon_v - 1)}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{(\epsilon_h - 1)}} \right) \quad (4)$$

$$a_v = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a^3 \sqrt{(\epsilon_v - 1)}} + \frac{\epsilon_h}{b^3 \sqrt{(\epsilon_h - 1)}} \right) \quad (5)$$

where ϵ_h is the relative permittivity of the cave ceiling and floor, and ϵ_v is the relative permittivity of the side wall.

The non-uniform of the tunnel surface generates roughness that has a significant impact on the propagated electromagnetic wave. The roughness of the side walls serves signal scattering, resulting in attenuation. The roughness loss for the roughness wall is expressed as Equation (6).

$$a_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda^2 \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \quad (6)$$

Where Δh is the RMS roughness height of the wall (m).

Attenuation from the inclination of the cave wall, which is shown in Equation (7) (Emslie *et al.*, 1975; Bedford and Kenedy, 2014; Bedford *et al.*, 2017).

$$a_{tilt} = \frac{4.343\pi^2 \theta^2}{\lambda} \quad (7)$$

where θ is the inclination angle of the cave wall (radian).

The tilt of the tunnel wall relative to the mean planes, which is determined by tunnel dimensions a and b , deflects power in the mode away from the directions given by the mode's phase condition. Equations (6) and (7) demonstrate that roughness is significant at low frequencies, whereas tilt is most significant at high frequencies.

The attenuation summary according to the propagation model in decibels per meter can be obtained from Equation (8).

$$a_{total} = a_{refraction} + a_{roughness} + a_{tilt} \quad (8)$$

Low-Frequency Model

The waveguide model indicates that waves at low frequencies cannot propagate within the waveguide with a dimension similar to the experimented caves because the attenuation approaches infinity. However, the measurements demonstrate that waves can propagate within cave

passages. The abovementioned mechanism for low-frequency propagation has led to the development of a model specific to low-frequency propagation within natural caves. In this study, we present a model utilizing the simplest form of the homogeneous medium models to simplify the mathematical of attenuation. We initiate the model by defining the walls and ceiling of the cave as a medium with uniform properties with the skin effect occurring by the low-frequency wave, represented by the relationship in Equation (3). This phenomenon causes the electrical dimension of the cave to be larger than its physical dimension, as illustrated in Figure 7.

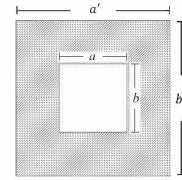


Figure 7. The skin effect on physical cave dimension

The electrical dimensions of the cave caused by skin effect changes can be described as Equations (9) and (10).

$$a' = a + \delta \quad (9)$$

$$b' = b + \delta \quad (10)$$

Substituting Equations (9) and (10) into the reduction Equations in (4) and (5) can be expressed as Equation (11) and (12). Only the predominant polarization is considered.

$$a_h = 4.343\lambda^2 \left(\frac{\epsilon_v}{a'^3 \sqrt{(\epsilon_v - 1)}} + \frac{1}{b'^3 \sqrt{(\epsilon_h - 1)}} \right) \quad (11)$$

$$a_v = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a'^3 \sqrt{(\epsilon_v - 1)}} + \frac{\epsilon_h}{b'^3 \sqrt{(\epsilon_h - 1)}} \right) \quad (12)$$

Then, substituting Equations (9) and (10) into the roughness attenuation equation, the result can be shown in Equation (13).

$$a_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda^2 \left(\frac{1}{a'^4} + \frac{1}{b'^4} \right) \quad (13)$$

Equations (11) to (13) explain why low-frequency waves can propagate through the cave with a size much smaller than the wavelength

despite the waveguide model approaching infinity. The results of the low-frequency model calculation will be presented in the later section.

CST Simulation

This section will explain the use of 3D models of the caves, both Chiang Dao Cave and Patihan Cave, to simulate wave propagation using the CST simulation software. The 3D models of the caves were obtained from the LiDAR 3D scanner (Leica BLK 360) in a 1:1 scale with high resolution, allowing for a comprehensive collection of the details of the caves. The 3D model of the experimental section of Chiang Dao Cave is shown in Figure 8, and Patihan Cave in Figure 9. These 3D cave models are used to simulate by transmitting the low-frequency wave from the same starting point with a waveguide port and using a similar waveguide port to receive at every 2 meters along the cave passage, same as the experimental conditions. The path losses consideration over distance will be assessed with the transmission coefficient (S21) at different distances. The transmission coefficient of the simulation results with the Chiang Dao model is shown in Figure 10, and the Patihan model is shown in Figure 11.

The electrical properties of the limestone and sandstone medium used in the simulation, we use the resistivity, relative permittivity, and relative

permeability from the study of Daniels (2004), Mount and Comas (2014), and Glover (2015). In general, consideration of the electrical properties of a non-homogeneous medium will be considered a range due to the non-uniformity of the medium. Therefore, the electrical properties of the simulations were obtained by the average values of previous research. Previous studies indicate that limestone has electrical conductivity in the range $10^{-1} - 10^{-8}$, relative permittivity in the range 7-13, and relative permeability in the range 7-8. Sandstone has electrical conductivity in the range $10^{-2} - 10^{-6}$, relative permittivity in the range 2-10 range, and relative permeability in the range 2-10 range.

Moreover, Figures 12 and 13 show the simulation results using the CST studio suite program, showing the current density at 300, 1000, 1650, 2325, and 3000 kHz occurring in the medium of both the Chiang Dao Cave and Patihan Cave models. The current density illustrates the phenomenon of waves traveling from within the cave passage through the cave wall based on the wave propagation mechanism of low-frequency waves. As the frequency increases, the current density penetrating the cave walls decreases with frequency. Finally, these results are compared with the measurement data and model results in the results and discussions section.



Figure 8. The 3D model of Chiang Dao Cave



Figure 9. The 3D model of Patihan Cave

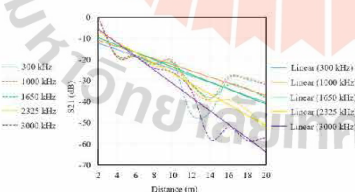


Figure 10. The simulation results of the transmission coefficient with the Chiang Dao Cave model

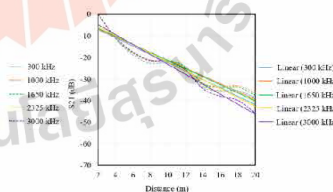


Figure 11. The simulation results of the transmission coefficient with the Patihan Cave model

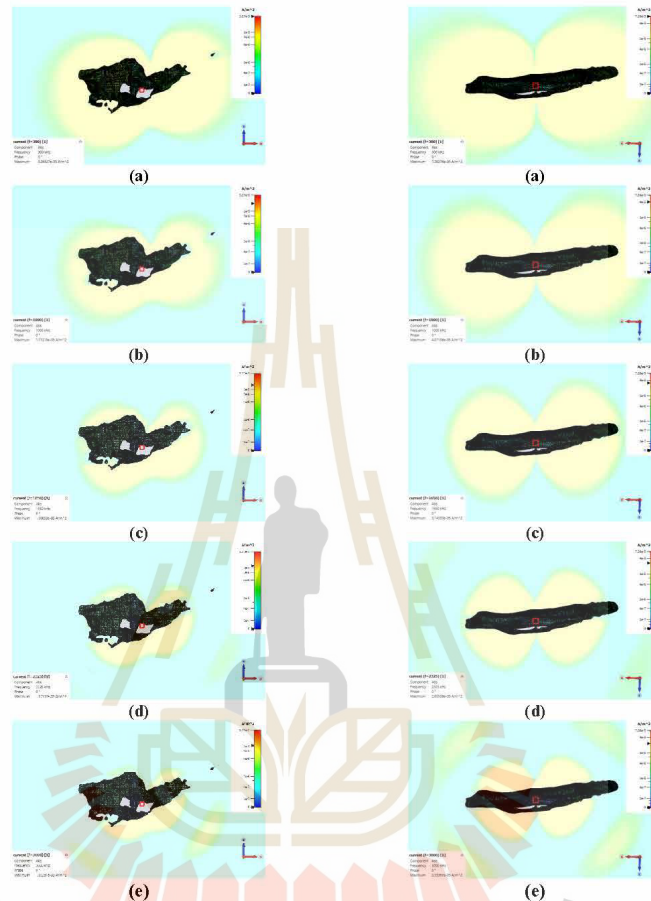


Figure 12. The CST simulation of current density with the Chiang Dao Cave model (a) 300 kHz (b) 1000 kHz (c) 1650 kHz (d) 2325 kHz (e) 3000 kHz

Figure 13. The CST simulation of current density with the Patihan Cave model (a) 300 kHz (b) 1000 kHz (c) 1650 kHz (d) 2325 kHz (e) 3000 kHz

Results and Discussions

This section compares the propagation path loss from the experimental results and the proposed model and also adds the CST and waveguide model results. Tables 1 and 2 show the comparison results for the Chiang Dao and Patihan Caves, respectively. The waveguide model uses Equations (4) to (8). Simultaneously, the proposed model uses Equations

(7) to (13). In addition, the 3D cave models shown in Figures 8 and 9 were used to calculate the physical factors of the cave walls, such as dimension, roughness, and tilt, along the cave passage. These factor calculations from the 3D cave models will provide accurate values. Then, all factors will be used to calculate the path losses using the proposed model. The calculated dimensions of the Chiang Dao Cave model are 6.3 meters high and

12 meters wide, the RMS roughness is 2 meters, and the wall inclination is 12.2 degrees. While the dimensions of the Patihan Cave model are 2.8 meters high and 17.1 meters wide, the RMS roughness is 0.8 meters, and the wall inclination is 9.2 degrees.

Table 1 shows the propagation path loss obtained from the experiment at Chiang Dao Cave and the proposed model, including the calculation results from the waveguide model and the CST simulated from the Chiang Dao Cave model at frequencies 300, 1000, 1650, 2325, and 3000 kHz. The results show that the low-frequency model gives most values similar to the experiment results, especially at low frequencies. Meanwhile, the waveguide model has an extremely high attenuation, especially at 300 kHz, and a lower attenuation at higher frequencies. In addition, the CST result has high attenuation following higher frequencies.

Table 2 shows the same pattern as Table 1 from the experiment at Patihan Cave and the calculation results. The results show that the experimental results give the propagation path loss at 1.3-1.6 dB/m, lower than Chiang Dao Cave and similar to the results from the proposed model. The results from the waveguide model gave a higher attenuation than those from Chiang Dao Cave, especially at 300 kHz, which has a high attenuation value of 495,880.55 dB/m.

All results demonstrate that the frequency waves are below the cut-off frequency defined by Equation (3), denoted as 27.5 MHz for the Chiang Dao Cave dimension and 62 MHz for the Patihan Cave dimension according to waveguide theory, but

can propagate within the cave. Furthermore, the electrical properties of the rocks, dimensions, and specifically their uniformity contributed to higher attenuation observed at Chiang Dao Cave compared to the more uniform characteristics at Patihan Cave.

The waveguide model reveals exceptionally high attenuation, particularly in the Patihan Cave. At low frequencies, the model attributes this heightened attenuation primarily to refraction loss related to the cave dimensions. Moreover, the dominant polarization considered is vertical, predominantly impacting the ceiling height and consequently affecting wave behaviour. The increased attenuation in the Patihan Cave is due to the lower ceiling height relative to the Chiang Dao Cave.

The calculation with CST using models from both caves yielded results similar to the experiment findings and those of the proposed model. The observed discrepancies are from the inherent homogeneity assumptions of the medium, such as the presence of dielectric layers with varying rock textures, decayed rock, sand, air, and other factors.

Specifically, the low-frequency model reveals that the impact of wall roughness and inclination on attenuation is the lowest because the low-frequency wave propagation mechanism can refract and deflect obstacles significantly smaller than wavelengths. Therefore, the observed attenuation due to refraction loss with skin depth is closely related to the experimental results. Finally, the proposed model gives results closest to the experimental results and has the same trend as the experimental results.

Table 1. The results of path loss at the Chiang Dao Cave

Frequency	Path loss (dB/m)			
	Experiment	CST	Waveguide Model	Low-Frequency Model*
300 kHz	3.90	1.56	56,272.67	3.85
1,000 kHz	2.83	1.46	5,089.13	2.65
1,650 kHz	1.52	1.76	1,877.68	2.29
2,325 kHz	1.76	2.47	950.06	2.06
3,000 kHz	2.06	3.23	573.27	1.89

Remark: *The proposed low-frequency model.

Table 2. The results of path loss at the Patihan Cave

Frequency	Path loss (dB/m)			
	Experiment	CST	Waveguide Model	Low-Frequency Model*
300 kHz	1.57	1.93	495,880.55	2.03
1,000 kHz	1.51	1.80	44,806.58	1.46
1,650 kHz	1.25	1.86	16,518.36	1.39
2,325 kHz	1.40	2.04	8,350.97	1.37
3,000 kHz	1.38	2.30	5,034.80	1.37

Remark: *The proposed low-frequency model.

Conclusions

This study investigated the modelling of RF propagation at low frequencies in natural caves, focusing on developing the model of low-frequency propagation by studying the wave propagation behavior in Chiang Dao Cave (limestone) and the Patihan Cave (sandstone). The investigation involved the transmission experiment at 300, 1000, 1650, 2325, and 3000 kHz in the cave passage. The study investigates the propagation mechanism of low-frequency waves to analyze the skin depth property that enables waves with frequencies lower than the cut-off frequency to propagate along the cave passage. The experimental results also show that frequency waves lower than the cut-off can propagate within the cave. This reason guided the development of the low-frequency model after the waveguide model by considering the skin depth that causes the electrical dimensions more than the physical. Afterwards, the 3D cave models obtained from the LiDAR scanner were used to calculate the physical factors of the cave walls, such as dimension, roughness, and tilt. These factors are utilized for calculating path losses using our proposed model. Also, the cave models were used for calculations using CST simulation software. The results were then compared between the experiment and the proposed model, including the calculation results from the CST and waveguide model. The comparison results show that the proposed model provides results very close to the experimental results, whereas the waveguide model gave high attenuation. In conclusion, the proposed model concept, which considers the skin effect, can be used to predict, analyze, and plan the application of low-frequency waves in natural caves, tunnels, and underground mines. Moreover, it has led to the development of communication technology, electromagnetic knowledge, and the application development of low-frequency waves in the future.

Acknowledgement

We gratefully acknowledge the Suranaree University of Technology for providing workspace and essential equipment for this research. Their support was invaluable to the completion of this study. We are sincerely thankful for their assistance and resources.

References

Balanis, C.A. (2012). *Advanced engineering electromagnetics*. 2nd ed. John Wiley & Sons, USA, 1046p.

- Bedford, M.D. (2001). Introducing the HeyPhone. *Caves and Caving*, 91:15-17.
- Bedford, M.D. and Kennedy, G.A. (2014). Modeling microwave propagation in natural caves passages. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 62(12):6463-6471. <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2364295>
- Bedford, M.D. Kennedy, G.A., and Foster, P.J. (2017). Radio transmission characteristics in tunnel environments. *Mining Technology*, 126(2):77-87. <https://doi.org/10.1080/14749009.2016.1259196>
- Collin, R.E. (1985). *Antennas and radiowave propagation*. McGraw-Hill Companies, NY, 523p.
- Daniels, D.J. (2004). *Ground penetrating radar*. 2nd ed. IET, London, 761p. <https://doi.org/10.1049/PBRA015E>
- Deryck, L. (1978). Natural propagation of electromagnetic waves in tunnels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 27(3):145-150. <https://doi.org/10.1109/T-VT.1978.23737>
- Dunkley, J., Ellis, M., and Bolger, T. (2017). Unusual caves and karst-like features in sandstone and conglomerate in Thailand. *Helvetic*, 43(101):15-31.
- Emslie, A., Lagace, R., and Strong, P. (1975). Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(2):192-205. <https://doi.org/10.1109/TAP.1975.1141041>
- Emslie, A.G. and Lagace, R.L. (1976). Propagation of low and medium frequency radio waves in a coal seam. *Radio Science*, 11(4):253-261. <https://doi.org/10.1029/RS011i004p00253>
- Emslie, A.G., Lagace, R.L., and Strong, P.F. (1973). Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *Proceedings of Through-the-Earth Electromagnetics Workshop*, August 15-17, 1973; Colorado, USA, p. 38-48.
- Gaewmood, P. and Trisam, K. (2018). Study on Increasing Production and Potential of Khorat Sand Gas Using Fracturing and Computer Simulation. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 25(4):411-418.
- Gibson, D. (2014). How Earth-Current Antennas Really Work. *CREG Journal*, 88:13-14.
- Glover, P. (2015). Geophysical properties of the near surface Earth: Electrical properties. *Treatise on Geophysics*, 11:89-137.
- Gunn, J. (2003). *Encyclopedia of Caves and Karst Science* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203483855>
- Hrovat, A., Kandus, G., and Javornik, T. (2014). A survey of radio propagation modeling for tunnels. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(2):658-669. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.091213.00175>
- Jantaupalee, A., Khamsalee, P., and Wongsan, R. (2023). Low-frequency wave propagation in the cave. 2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON); May 9-12, 2023; Thailand, p. 1-4.
- Javaid, F., Wang, A., Sana, M.U., Husain, A., and Ashraf, I. (2021). An optimized approach to channel modeling and impact of deteriorating factors on wireless communication in underground mines. *Sensors*, 21(17):5905. <https://doi.org/10.3390/s21175905>
- Jones, G. and Holderied, M.W. (2007). Bat echolocation calls: Adaptation and convergent evolution. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. The Royal Society, 274(1612):905-912.
- Julthochai, S., Jantaupalee, A., Khamsalee, P., and Wongsan, R. (2023). An experimental study of wave propagation in Sandstone Cave. 2023 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP); October 30 - November 2, 2023; KL, Malaysia, p. 1-2. <https://doi.org/10.1109/ISAP57493.2023.10388582>

- Kjeldsen, E. and Hopkins, M. (2006). An experimental look at RF propagation in narrow tunnels. In MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference; October 23-25, 2006; USA, p. 1-7. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2006.302290>
- Milsom, J. and Eriksen, A. (2013). Field geophysics. John Wiley and Sons, England, 233p.
- Moss, C.F. (2018). Auditory mechanisms of echolocation in bats. In Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience. Oxford University Press, p. 1-13. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190264086.013.102>
- Mount, G.J. and Comas, X. (2014). Estimating porosity and solid dielectric permittivity in the Miami Limestone using high-frequency ground penetrating radar (GPR) measurements at the laboratory scale. Water Resources Research., 50(10):7590-7605. <https://doi.org/10.1002/2013WR014947>
- Murray, W. (2000). Borehole measurement of the EM properties of sandstone. In IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium; July 24-28, 2000; Hawaii, USA, p. 2380-2381.
- Putthapiban, P. (2021). Cave in Limestone. In Cave and Karst system in Thailand, edited by Department of Mineral Resources, Bangkok. 4(6).
- Rak, M. and Pechac, P. (2007). UHF propagation in caves and subterranean galleries. IEEE Transactions on antennas and propagation., 55(4):1134-1138. <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.893385>
- Siwiak, K., and Bahreini, Y. (2007). Radiowave propagation and antennas for personal communications. Artech House Publishers, MA, USA, 500p.
- Soo, Q.P., Lim, S.Y., Lim, D.W.G., Yap, K.M., and Lau, S.L. (2018). Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters., 17(5):743-746. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2813310>
- Sripornpibul, C. (2021). Origin of Sandstone Caves and Ancient Stories. In Cave and Karst system in Thailand, edited by Department of Mineral Resources, Bangkok.
- Wannakomol, A. and Chonglakmani, C. (2018). The Analysis of Reservoir Potential in Permian Carbonates of Western Khorat Basin. Suranaree University of Technology Intellectual Repository, Geological Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, p. 1-94. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8192>
- Wongsan, R., Khamalee, P., Kumsawat, P., Wannakomol, A., and Srikaew, A., (2022). Study of Guidelines for Using Spectrum for Communication Systems, Including Modeling and Identifying Locations in Caves. The National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), Thailand, BT62-1-(2)/004. 115p.



การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นความถี่ ภายในถ้ำเชียงดาว

A STUDY ON RADIO WAVE PROPAGATION IN CHIANG DAO CAVE

รังสรรค์ วงศ์สรรค์¹

พีรสันต์ คำสาลิ²

อัยพรรค วรรณโณ³

ประโยชน์ คำสวัสดิ์⁴

อาทิตย์ ศรีแก้ว⁵

อรรถวิทย์ จันทอุปสี⁶

Rangsan Wongsan¹

Peerasan Khamsalee²

Akkhapun Wannakomol³

Prayoth Kumsawat⁴

Arthit Srikaew⁵

Atawit Jantaupalee⁶

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000^{1 ถึง 6}

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand^{1 to 6}

Corresponding E-mail: rangsan@sut.ac.th

Received Date January 26, 2022
 Revised Date October 3, 2022
 Accepted Date October 18, 2022

บทคัดย่อ

จากเหตุการณ์ภัยแล้งหลวงในปี พ.ศ. 2561 ได้พบปัญหาของระบบสื่อสารระหว่างการปฏิบัติการกู้ภัยไม่สามารถใช้งานภายในถ้ำได้ เนื่องจากคลื่นความถี่ที่ใช้มีการลดทอนสูงในขณะที่แพร่กระจายในโพรงถ้ำ จึงทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ตลอดแนวโพรงถ้ำ จากทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นพบว่า คลื่นความถี่ต่ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นพื้นผิวนั้นสามารถทะลุผ่านชั้นหินของภูเขาได้ ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าการสื่อสารด้วยคลื่นต่ำ มีความเป็นไปได้ในการแพร่ภายในโพรงถ้ำได้ดีกว่าคลื่นความถี่ที่สูงกว่า ในบทความนี้จึงได้เสนอการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ เพื่อตรวจสอบปัญหาและความเป็นไปได้ในการใช้งานที่ความถี่ต่าง ๆ โดยทดสอบในถ้ำเชียงดาวซึ่งเป็นถ้ำหินปูนในจังหวัดเชียงใหม่ และเสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ LF ถึง UHF โดยใช้ทั้งขนาด สภาพแวดล้อม และเส้นทางเดินของถ้ำที่ได้นำเสนอ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า คลื่นความถี่ต่ำสามารถส่งผ่านตลอดเส้นทางเดินในโพรงถ้ำขนาดใหญ่และส่งผ่านชั้นหินได้ในขณะที่คลื่นความถี่สูงเกิดการลดทอนสูงเมื่อส่งคลื่นผ่านโพรงถ้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลองที่ได้นำเสนอนั้นให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดทดสอบด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาความถี่ที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาระบบสื่อสารภายในถ้ำในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบสื่อสารในถ้ำ การแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ

Abstract

During the Tham Luang Search and Rescue operation in 2018, a problem occurred from wireless communication system fail due to the fact that the frequencies used were highly attenuated while propagating in the cave. According to the radio wave propagation theory, low frequencies had surface-wave properties and could penetrate through rock layers of mountains. Therefore, the hypothesis was that radio communication with low frequencies could provide better propagation in the cave than higher frequencies. This paper presented a study on radio wave propagation in caves to verify the problem and the possibility of using different frequencies to communicate. The study was done in Chiang Dao cave, Chiang Mai. In addition, the study proposed a propagation model of the radio frequencies in the LF to UHF bands by using the cave's dimension, environment, and passages. The study result found that low-frequency band could transmit through large-sized cave passages or rock layers. In contrast, higher frequency band highly attenuated while propagating through the cave passage. Furthermore, it was found that the modeling result corresponded with the measurement result. Therefore, the study result could be beneficial for determining appropriate low frequency bands to develop effective cave communication systems in the future.

Keywords: In-cave communication system, Wave propagation in cave, Modeling of wave propagation in cave passages

**** กองบรรณาธิการวารสารวิชาการ กสทช. มีข้อสังเกตว่า** การศึกษานี้อาจมีข้อจำกัดบางประการ อาทิ ช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง เช่น ฤดู ปริมาณน้ำ ความชื้น รวมทั้งแบบจำลองตามเอกสารอ้างอิงระบุอยู่ในย่านความถี่ UHF หรือ ย่านความถี่ 1MHz-1000MHz ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวส่งผลต่อความแม่นยำในช่วงย่านความถี่ต่ำ ประกอบกับเป็นการทดลองที่มีเพียง 1 ตัวอย่าง จึงอาจมีผลต่อความแม่นยำ

1. บทนำ

จากเหตุการณ์ภัยพิบัติที่เกิดขึ้นกับนักกีฬาฟุตบอลทีมเยาวชนและโค้ช รวม 13 คนที่ติดอยู่ในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ณ อุทยานขุนน้ำนางนอน อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ในปี พ.ศ. 2561 ที่ผ่านมา ทำให้เกิดความตระหนักถึงความสำคัญในการช่วยเหลือ ภัย และป้องกันภัยพิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยส่วนสำคัญคือ การสนับสนุนระบบการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ เพื่อให้ระบบการสื่อสารไม่เป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ ซึ่งกรณีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในถ้ำจะพบข้อจำกัดด้านการสื่อสาร ด้วยลักษณะทางกายภาพ ประกอบกับธรรมชาติของคลื่นความถี่ที่ใช้เป็นคลื่นพาหะ (Carrier wave) ในระบบสื่อสารแต่ละย่านความถี่ที่มีคุณลักษณะเฉพาะและตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าจากเหตุการณ์ที่อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอนดังกล่าวทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสื่อสารไร้สาย บนคลื่นความถี่ช่วง VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) หรือวิทยุคมนาคมระบบอื่น ๆ ไม่สามารถใช้งานได้หรือไม่สามารถใช้งานได้

จากการวิจัยที่ผ่านมาของ Bedford and Kennedy (2014) Deryck (1978) Emslie et al. (1975) Rak and Pechac (2007) และ Soo et al. (2018) ได้ศึกษาแบบจำลองของถ้ำหรืออุโมงค์ที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation) พบว่า การสร้างแบบจำลองเหมาะสำหรับถ้ำและอุโมงค์ที่ใกล้เคียงหรือเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น โดยมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกันตลอดความยาวและมีขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของคลื่นความถี่นั้น ๆ ได้ ดังนั้นตามแนวทางการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาวิจัยการแพร่กระจายคลื่นความถี่ โดยศึกษาคลื่นความถี่ตั้งแต่ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) ไปจนถึงคลื่นความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) ด้วยแนวทางเชิงประจักษ์จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของคลื่นความถี่แต่ละย่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งเปรียบเทียบผลจากการทดลองและแบบจำลองของถ้ำอีกด้วย

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 สภาพต้านทานทางไฟฟ้าและสภาพนำทางไฟฟ้า

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ส่งผลให้มีค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductivity) ไม่เท่ากัน จาก Glover (2015) พบว่า หนึ่งในคุณสมบัติที่มีผลกับค่าความนำไฟฟ้า คือ ค่าความพรุน (Porosity) ในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อความพรุนเพิ่มขึ้นและถูกแทนที่ด้วยแร่ต่าง ๆ จะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) มีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า ดังสมการที่ (1)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ความนำทางไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเมตร)

ρ คือ ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์มเมตร)

จากตัวอย่างหินในงานวิจัยของ Daniels (2004) พบว่า ตัวกลางที่เป็นหินปูนจะมีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ที่ 10^{-8} ถึง 10^{-6} ซีเมนส์ต่อเมตร อีกทั้งจากงานวิจัยของ Bedford (2001) และ Gibson (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบสื่อสารภายในถ้ำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำส่งผ่านชั้นหิน ซึ่งคลื่นความถี่ต่ำมีคุณสมบัติเป็นคลื่นดิน (Ground wave) และคลื่นผิว (Surface wave) โดยคุณสมบัติดังกล่าวเกิดจากค่าความลึกผิว (Skin depth) ที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านตัวกลางที่มีความเป็นตัวนำทางไฟฟ้า ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2 (Siwiak, 2007)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (2)$$

เมื่อ δ คือ ความลึกผิว (เมตร)

σ คือ ความนำทางไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเมตร)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก (เฮนรีต่อเมตร)

2.2 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

จากงานวิจัยของ Deryck (1978) และ Emslie et al. (1975) พบว่า โดยทั่วไปแล้ว การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในถ้ำหรืออุโมงค์ใต้ดิน ถ้าเป็นลักษณะของอุโมงค์ที่โพรงทางเดินมีรูปร่างที่สม่ำเสมอหรือตลอดระยะทางมีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกัน จะพิจารณาแบบจำลองให้เสมือนกับท่อนำคลื่น ซึ่งโดยทั่วไปท่อนำคลื่นจะมีโครงสร้างกลวง มีผนังตัวนำรองรับไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric: TE) และแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic: TM) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางเหล่านี้จะสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่น ซึ่งขนาดของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวกำหนดว่าคลื่นความถี่ใดบ้างที่สามารถส่งผ่านจากต้นทางไปสู่ปลายทางได้ โดยความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านเข้าไปได้โดยมีการสูญเสียน้อยที่สุด คือ ความถี่ตัด (Cut-off frequency) ซึ่งสามารถหาได้จากความยาวคลื่นตัด โดยเมื่อเปรียบกับถ้ำตามธรรมชาติที่มีลักษณะคล้ายท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยแล้ว จะสามารถหาความยาวคลื่นตัดได้ดังสมการที่ 3

$$\lambda_{mn} = \frac{2\sqrt{ab}}{\sqrt{m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}}} \quad (3)$$

โดย a คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น (เมตร)

b คือ ความยาวของท่อนำคลื่น (เมตร)

m, n คือ โหมดของท่อนำคลื่น

อย่างไรก็ตาม อูโมงค์หรือโพรงถ้าไม่ว่าจะเป็นชนิดผนังหุ้มแบบใดก็ตาม จะไม่อยู่ในสภาพดังกล่าวโดยสิ้นเชิง เนื่องจากผนังภายในของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวนำที่ใกล้เคียงสมบูรณ์ที่สุด (Near-perfect conductors) แต่ผนังของถ้าจะทำหน้าที่เหมือนไดอิเล็กทริก (Dielectric) มากกว่าตัวนำสมบูรณ์ และจากงานวิจัยของ Bedford and Kennedy (2014) Emslie et al. (1975) และ Rak and Pechac (2007) ได้อธิบายถึงแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอูโมงค์และถ้ำ ซึ่งพิจารณาเทียบกับลักษณะทางกายภาพของถ้ำ โดยจะเกิดการลดทอนจากทั้งโหมดของคลื่นในแนวตั้งและแนวนอน ในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$\alpha_{mn}^{(v)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a^3} \frac{(m+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} + \frac{1}{b^3} \frac{\epsilon_r^{(v)}(n+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_{mn}^{(h)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a^3} \frac{\epsilon_r^{(h)}(m+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} + \frac{1}{b^3} \frac{(n+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} \right) \quad (5)$$

โดย $\epsilon_r^{(v)}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุแนวตั้ง

$\epsilon_r^{(h)}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุแนวนอน

การลดทอนจากความขรุขระของผิว (Roughness) ที่เกิดจากความขรุขระบนผิวของผนังถ้ำ ในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร สามารถแสดงในสมการที่ 6

$$\alpha_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \quad (6)$$

โดย Δh คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความสูงบนผิวขรุขระของผนัง (เมตร)

การลดทอนที่เกิดจากความเอียง (Tilt) ของผนังถ้ำในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ซึ่งแสดงในสมการที่ 7

$$\alpha_{tilt} = \frac{4.343\pi^2 \theta^2}{\lambda} \quad (7)$$

โดย θ คือ มุมเอียงของผนังถ้ำ (เรเดียน)

ซึ่งผลรวมของการลดทอนตามแบบจำลองการแพร่คลื่น จะสามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$\alpha = \alpha_{mn} + \alpha_{roughness} + \alpha_{tilt} \quad (8)$$

2.3 การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นตามคลื่นความถี่

การทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่ที่เกิดขึ้นภายในถ้ำหินปูน เพื่อนำมาศึกษาคลื่นความถี่ที่เหมาะสมใช้ในการออกแบบระบบสื่อสารสำหรับใช้ภายในถ้ำ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Bedford and Kennedy (2014) Kjeldsen and Hopkins (2006) Rak and Pechac (2007) และ Soo et al. (2018) ได้มีการศึกษาคลื่นความถี่ในย่าน UHF และย่าน SHF (Super High Frequency) ซึ่งเป็นย่านความถี่สูงในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มการศึกษาคลื่นความถี่ในย่าน LF จนถึง UHF โดยกำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่ย่านความถี่ต้นย่านความถี่กลาง และย่านความถี่ปลาย ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้ได้งดการทดสอบย่านความถี่ LF ที่มีความถี่ต่ำกว่า 300 kHz (กิโลเฮิรตซ์: Kiloherztz) เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของค้างคาวที่อาศัยเป็นจำนวนมากในสองถ้ำที่ทำการทดสอบ โดยจากงานวิจัย Jones and Holderied (2007) และ Moss (2018) พบว่า ค้างคาวหลายพันธุ์ที่มีอยู่ทั่วโลกจะใช้สัญญาณคลื่นความถี่อัลตราโซนิกส์ (Ultrasonics) ในการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าเพื่อวัดระยะทาง (Bat echolocation) โดยมีความถี่ตั้งแต่ 20-200 kHz

ตารางที่ 1 ความถี่ที่กำหนดสำหรับใช้ทดสอบในแต่ละย่านความถี่

ย่านความถี่	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
LF	35 kHz	100 kHz	165 kHz	232.5 kHz	300 kHz
MF	350 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
HF	3.5 MHz	10 MHz	16.5 MHz	23.5 MHz	30 MHz
VHF	35 MHz	100 MHz	165 MHz	232.5 MHz	300 MHz
UHF	350 MHz	1000 MHz	1650 MHz	2325 MHz	3000 MHz

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

3.1 เพื่อศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารที่เหมาะสมกับการสื่อสารในถ้ำ

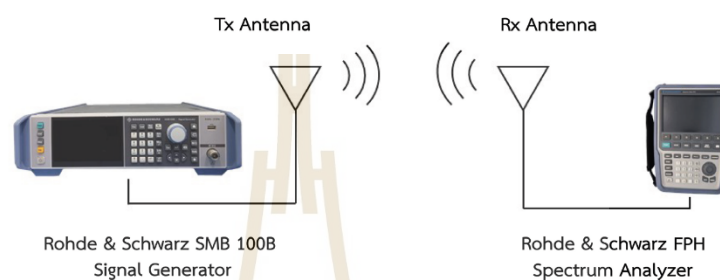
3.2 เพื่อเผยแพร่ผลการศึกษาให้หน่วยงานภาครัฐ ภาคประชาคม และประชาชน รับทราบ ผลการศึกษาด้านการเลือกใช้คลื่นความถี่ที่ได้จากการวิจัย

4. วิธีการวิจัย

4.1 การติดตั้งอุปกรณ์วัดทดสอบ

การวัดการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น (Propagation path loss) โดยใช้สายอากาศ (Antenna) แต่ละคลื่นความถี่ ประกอบด้วย ช่วงความถี่ 300-350 kHz ใช้สายอากาศรูป Passive shielded (20 Hz-1 MHz AH Systems SAS-565L) ช่วงความถี่ 1000-3000 kHz ใช้สายอากาศ Isotron 200B ช่วงความถี่ 3.5-30 MHz ใช้สายอากาศรูป Passive shielded (1 kHz-30 MHz AH Systems SAS-564) ช่วงความถี่ 35-232.5 MHz ใช้สายอากาศ Biconical (20 MHz-1 GHz Aaronia BicoLOG 20100) และในช่วงความถี่ 300 MHz-3 GHz ผู้วิจัยได้สร้างสายอากาศโมโนโพลความยาว 1/4 ของความยาวคลื่น (Omnidirectional quarter-wave monopole) สำหรับสายอากาศแต่ละความถี่ โดยหลังจากนั้นจะป้อนสัญญาณจากเครื่อง Rohde & Schwarz SMB100B signal generator ซึ่งใช้สัญญาณ Narrow-band Continuous Wave (CW) ไปยังสายอากาศผ่านสายนำสัญญาณแบบสูญเสียต่ำ (Low loss) 50 โอห์มเบอร์ LMR-240 ความยาว 2 เมตร และที่ภาครับจะรับด้วย Rohde & Schwarz FPH spectrum analyzer

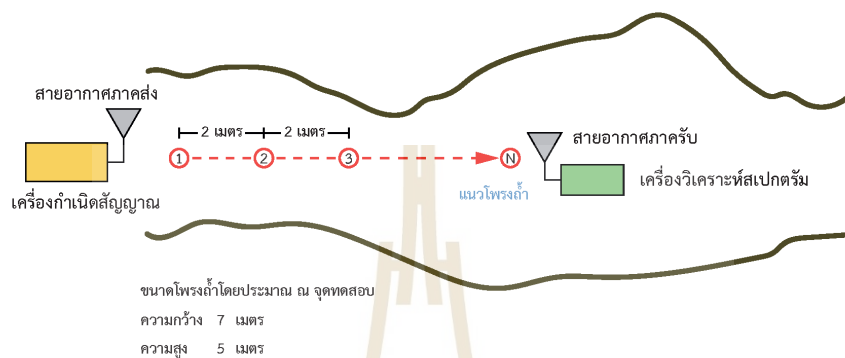
กับสายอากาศ Rohde & Schwarz HE400HF Antenna Module (8.3 kHz-30 MHz) ในย่านความถี่ 300 kHz-30 MHz สายอากาศ Rohde & Schwarz HE400UWB Antenna Module (30 MHz-6 GHz) ในย่านความถี่ 35-300 MHz และสายอากาศ Aaronia HyperLOG 3080 X Antenna (380 MHz-8 GHz) ในย่านความถี่ 350 MHz-3 GHz ดังแสดงในภาพที่ 1



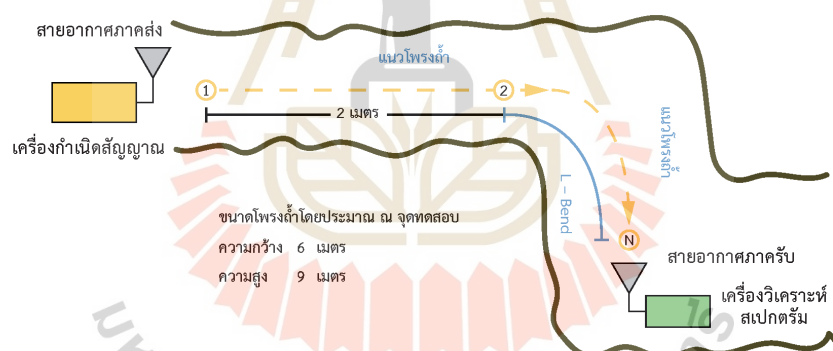
ภาพที่ 1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

วิธีการออกแบบการวัดทดสอบที่ดีและเหมาะสมที่สุดก็คือการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่ทั้งในแนวระดับสายตา (Line of Sight: LOS) และแนวที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (Non-Line of Sight: NLOS) ทั้งเงื่อนไขข้อคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาคส่งและภาครับ (Vertical-Vertical linear polarization: V-V) และข้อคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งภาคส่งและแนวนอนที่ภาครับ (Vertical-Horizontal linear polarization: V-H) โดยอ้างอิงวิธีการวัดทดสอบจาก Bedford and Kennedy (2014) Kjeldsen and Hopkins (2006) Lee and Bertoni (2003) และ Soo et al. (2018) ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยพิจารณาที่ค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น เพื่อนำค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในแต่ละคลื่นความถี่ที่ทำการวัดทดสอบดังตารางที่ 1 การวัดทดสอบทั้ง LOS และ NLOS จะมีการทดสอบแบบเดียวกันทุกประการ โดยจะแตกต่างกันเฉพาะสภาพภูมิประเทศภายในเท่านั้น ในส่วนของอุปกรณ์ภาคส่งทั้งหมดจะถูกนำไปติดตั้งบริเวณจุดเริ่มต้นของแนวผนังโพรงถ้ำที่เป็นเป้าหมาย โดยสายอากาศภาคส่งจะถูกกำหนดให้มีข้อคลื่นเป็นแบบแนวตั้งเพียงอย่างเดียว ส่วนสายอากาศภาครับเป็นแบบแถบความถี่กว้างพร้อมเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ (Spectrum analyzer) วัดค่าระดับของสัญญาณทั้งข้อคลื่นแบบแนวตั้งและแบบแนวนอน โดยปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับที่ติดตั้งตามแนวโพรงถ้ำให้มีระยะห่างออกมาจากสายอากาศภาคส่งครั้งละ 2 เมตร จนถึงระยะสุดท้ายที่ 20 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2 การทดสอบแบบแนวระดับสายตา (LOS)



ภาพที่ 3 การทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวระดับสายตา (NLOS)

โดยค่าระดับความแรงของสัญญาณที่สายอากาศภาครับรับได้และส่งไปยังตัวป้อน (Input) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ไม่ใช่ค่าความแรงของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง ณ ตำแหน่งนั้น เนื่องจากสายอากาศภาครับที่ใช้งานมีอัตราขยายค่าหนึ่งเฉพาะความถี่นั้น ๆ และยังมีสูญเสียไม่เท่ากันในสายนำสัญญาณที่ถูกต่อจากสายอากาศภาครับไปยังตัวป้อนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่อีก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัตถุประสงค์คือการศึกษาการวัดค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าระดับความแรงของสัญญาณที่เริ่มแผ่ออกมาจากสายอากาศและแพร่กระจายไปตลอดแนวโพรงทุก ๆ ระยะ 2 เมตร ของการวัดทดสอบมาพิจารณาหาการสูญเสียจากการแพร่คลื่นได้โดยตรง ทำให้ค่าระดับกำลังที่วัดได้จากสายอากาศภาครับผ่านสายนำสัญญาณจนถึงตัวป้อนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่สามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมของคลื่นแต่ละความถี่ที่เดินทางในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติได้ โดยใช้ความลาดเอียงของเส้นตรง (Linear line) สำหรับพิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านในแต่ละความถี่ทั้งเงื่อนไขการวัดทดสอบแบบ V-V และ V-H หากความลาดเอียงของเส้นตรงมีความชันมากจะแสดงให้เห็นค่าการสูญเสียมีค่าสูง ในขณะที่ความลาดเอียงของเส้นตรงมีความชันน้อยกว่าจะแสดงให้เห็นว่าเกิดการสูญเสียต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังที่รับได้ในสภาพแวดล้อมภายในโพรงถ้าแต่ละระยะทางนั้นอาจเกิดการแพร่หลายวิถี (Multipath fading) จากการสะท้อนของสิ่งกีดขวางภายในถ้ำจนทำให้เกิดการเสริมหรือหักล้างกันของคลื่นเกิดขึ้น

ทั้งนี้ การทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่แบบ LOS ได้กำหนดโพรงถ้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงแนวเส้นตรงมากที่สุด เพื่อพิจารณาเฉพาะการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่โดยโพรงถ้ำใกล้เคียงแนวเส้นตรงที่ผู้วิจัยเลือกเป็นสถานที่ทำการทดสอบอยู่ในเส้นทางเดินไปสู่ถ้ำน้ำ ซึ่งมีระยะทางหลายช่วงอยู่ที่ประมาณ 30-50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) ส่วนการวัดทดสอบพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ NLOS ผู้วิจัยต้องการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นที่อาจเกิดการสะท้อน (Reflection) หรือเลี้ยวเบน (Diffraction) จึงได้กำหนดให้เลือกใช้บางตำแหน่งของโพรงถ้ำที่มีลักษณะเป็นแนวโค้งสามารถบดบังสัญญาณแนว LOS ได้ (Collin, 1985) เพื่อนำมาตั้งสมมติฐานว่าคลื่นความถี่คลื่นใดสามารถเลี้ยวเบนหรือสะท้อนบนผนังถ้ำที่มีความคดเคี้ยวได้มากน้อยอย่างไร จะสามารถสรุปได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่บอกว่าคุณสมบัติคลื่นความถี่นั้นสามารถใช้งานได้ดีที่สุดในถ้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติได้ บริเวณที่ส่วนโค้งของผนังถ้ำเกิดการบดบังคลื่นความถี่อย่างชัดเจนและมีระยะทางตามแนวโค้งของผนังถ้ำอย่างน้อย 20 เมตร ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4 (ข)



ก) LOS



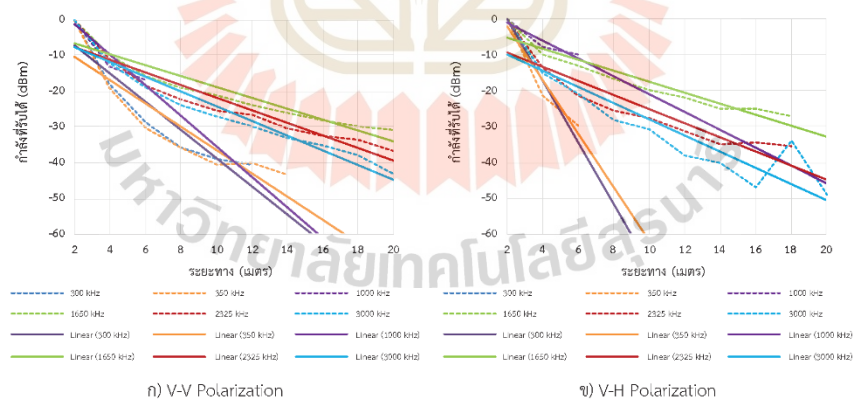
ข) NLOS

ภาพที่ 4 ตำแหน่งที่ใช้ทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่ ณ ถ้ำเชียงดาว

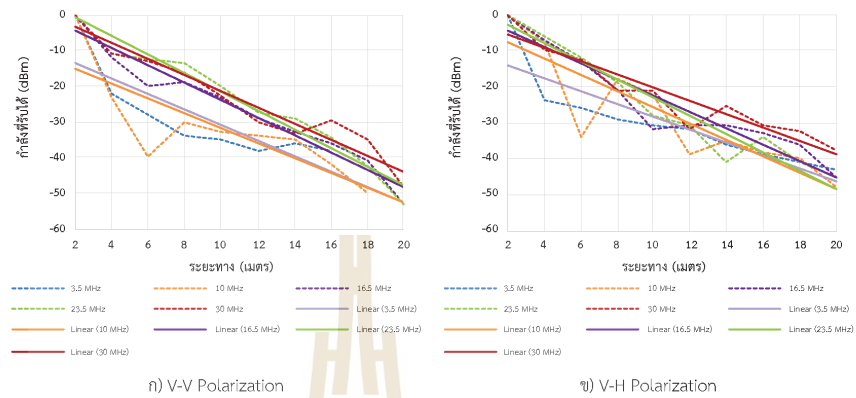
5. ผลการวิจัย

5.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)

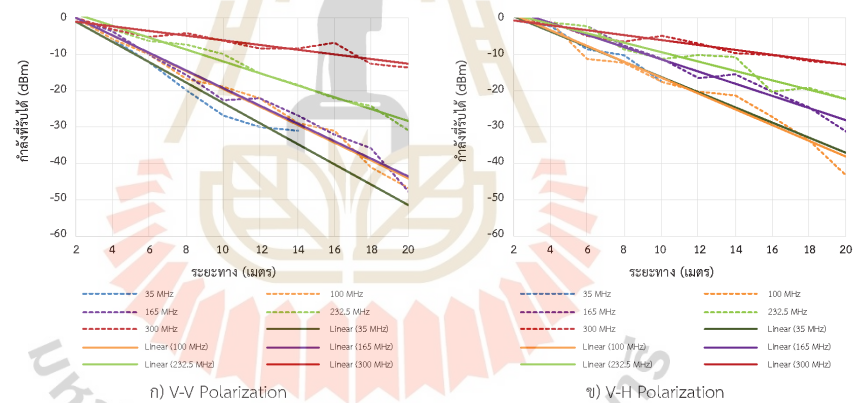
ในหัวข้อนี้จะแสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร ซึ่งเป็นการพิจารณาเฉพาะการวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ที่มีคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาคส่งและภาครับ (V-V) ซึ่งเป็นมาตรฐานของระบบวิทยุสื่อสารโทรคมนาคมทั่วไป และคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งที่ภาคส่งและแนวนอนที่ภาครับ (V-H) เพื่อพิจารณาว่าแต่ละคลื่นความถี่มีการเปลี่ยนขั้วคลื่นในขณะแพร่หรือไม่ แสดงผลดังกราฟในภาพที่ 5-9



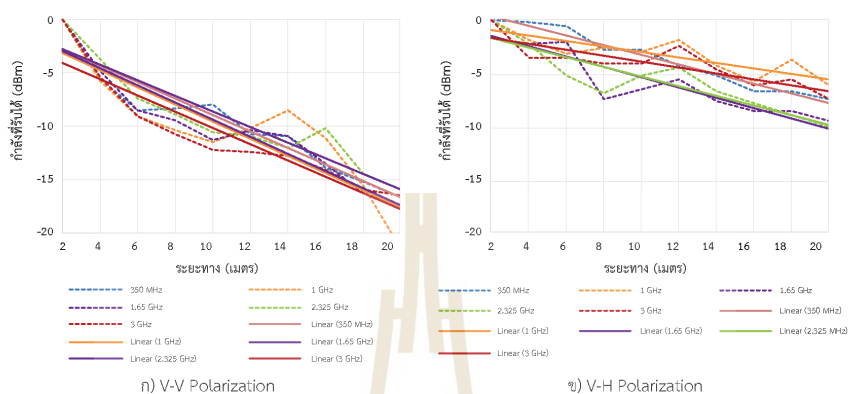
ภาพที่ 5 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ LF (Low Frequency) และ MF (Medium Frequency)



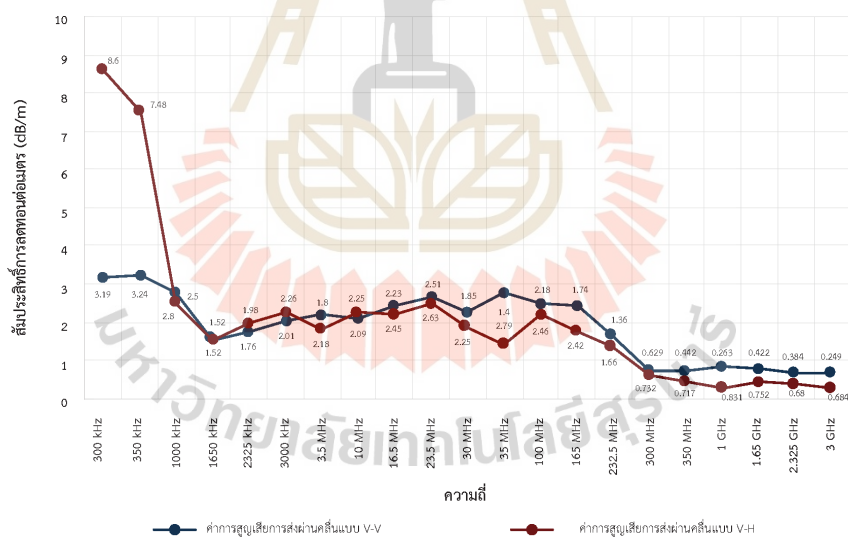
ภาพที่ 6 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ HF (High Frequency)



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)



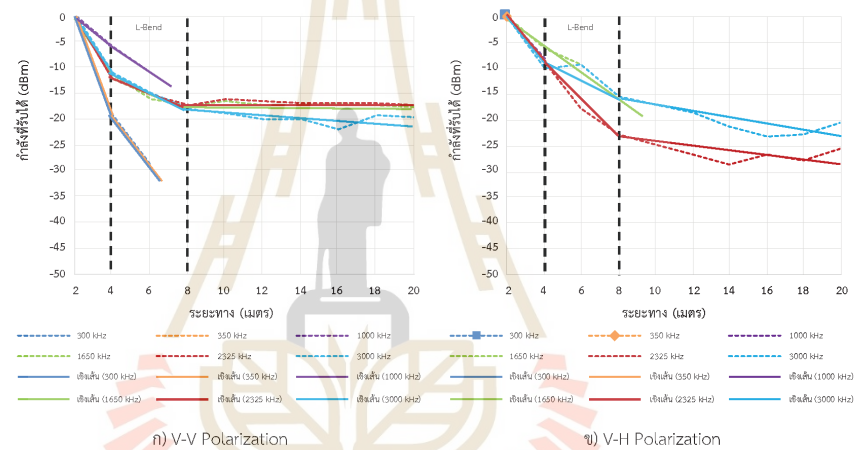
ภาพที่ 8 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)



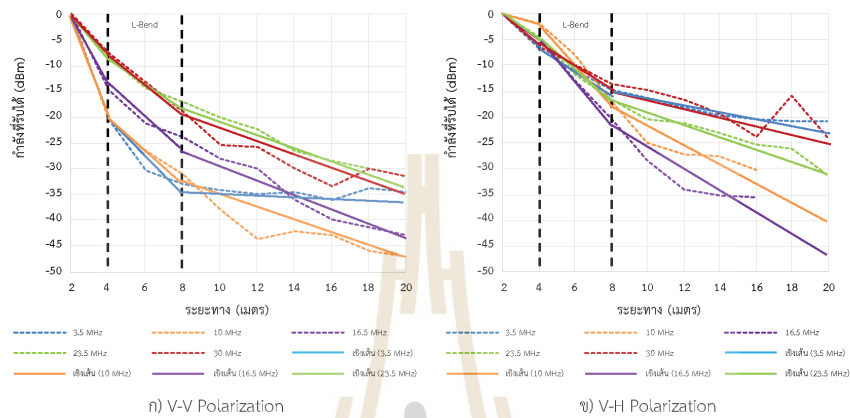
ภาพที่ 9 สัมประสิทธิ์การลดทอนจากการทดสอบในแนวสายตาทุกย่านความถี่

5.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)

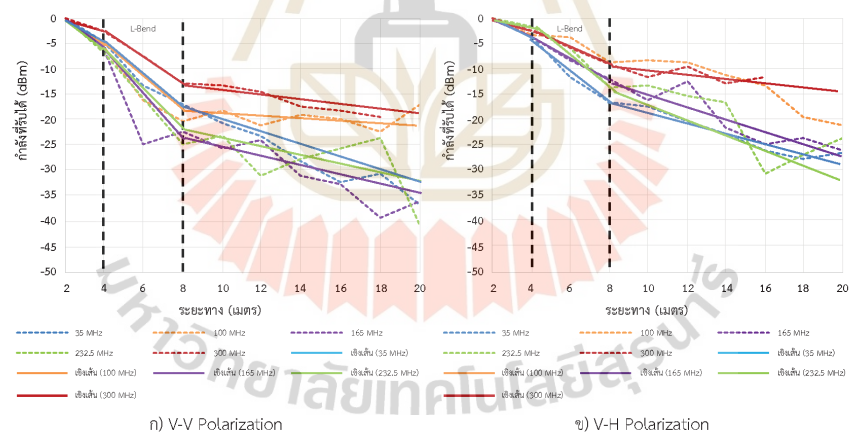
ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่แพร่ในโพรงถ้ำนั้น จะต้องพิจารณาจากผลการแพร่ของคลื่นที่มีสิ่งกีดขวางตามธรรมชาติภายในโพรงถ้ำเป็นอุปสรรคขวางเส้นทางการแพร่คลื่นอยู่ด้วย ดังนั้นจึงได้พิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรที่ระยะจากจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งไปตามส่วนโค้งของผนังถ้ำที่เป็นสิ่งกีดขวางจนถึงระยะที่เป็นทางตรง โดยเรียกระยะนี้ว่า L-Bend ในการทดสอบได้กระทำทั้งแบบชั่วคราวเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาคส่งและภาครับ (V-V) และชั่วคราวเชิงเส้นแบบแนวตั้งที่ภาคส่งและแนวนอนที่ภาครับ (V-H) ซึ่งสามารถแสดงโดยกราฟในภาพที่ 10-14



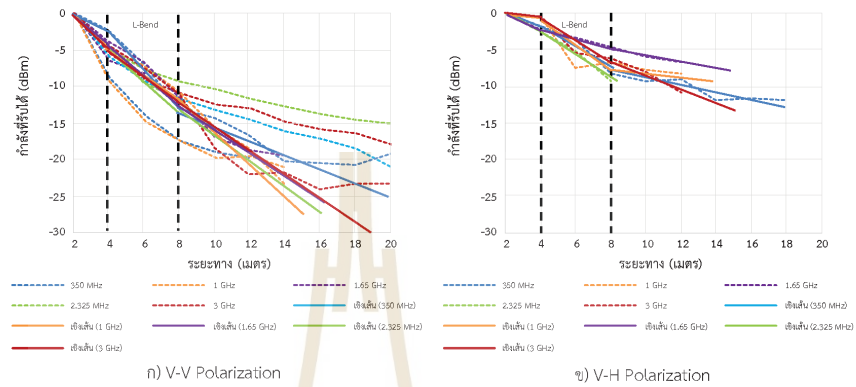
ภาพที่ 10 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ LF (Low Frequency) และ MF (Medium Frequency)



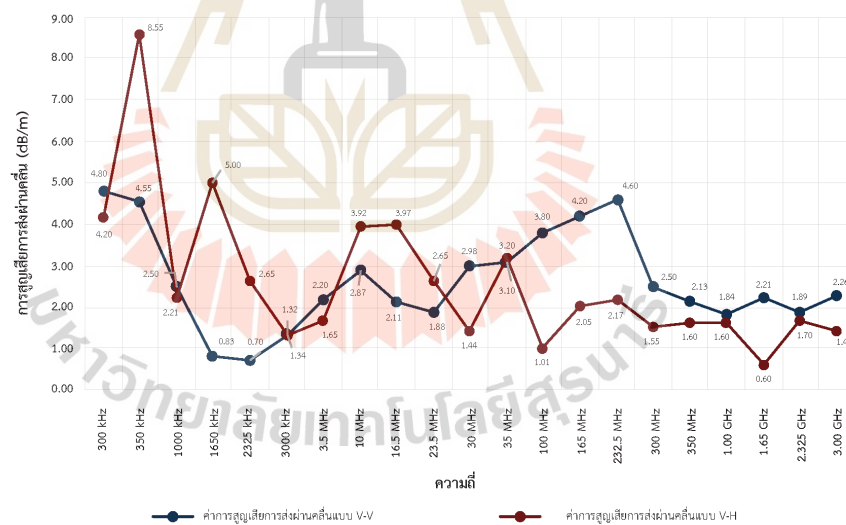
ภาพที่ 11 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ HF (High Frequency)



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)



ภาพที่ 13 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)



ภาพที่ 14 การสูญเสียการส่งผ่านคลื่นจากการทดสอบที่ไม่อยู่ในแนวสายตาทุกย่านความถี่

6. การอภิปรายผล

6.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)

จากผลการทดสอบซึ่งได้ทำการปรับช่วงเพื่อลดความซับซ้อนของข้อมูล หรือ นอร์มัลไลซ์ (Normalized) ค่ากำลังที่รับได้ในทุกย่านความถี่ เพื่อให้สังเกตได้ถึงค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร ได้อย่างชัดเจน โดยย่านความถี่ LF (300 kHz) และย่าน MF ดันแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) ที่ทำการทดสอบ ทั้งขั้วคลื่นแบบ V-V และ V-H จะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรค่อนข้างสูง เนื่องจากสมมติฐาน ตามทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นทั่วไประบุว่าคลื่นความถี่ย่านนี้นั้นมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นดินหรือ คลื่นผิวที่สามารถแพร่ลงไปในผิวดินได้ดี (ความถี่ต่ำกว่า 2000 kHz) หากส่งผ่านตัวกลางที่เป็นดินหรือหินที่มี ค่าความนำไฟฟ้าและความชื้นขาบแม่เหล็กสอดคล้องกับความถี่และความยาวคลื่น จะเกิดการเหนี่ยวนำหรือซึมซาบ เข้าไปในเนื้อตัวกลางมากกว่าที่จะแพร่คลื่นออกไปในแนวระดับสายตา จึงทำให้เกิดการสูญเสียและลดทอนสูง ส่วนที่ย่านความถี่ MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดิน แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิวของผืนและพื้นถ้ำมากกว่า ที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่เป็นหินปูน ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับ ผืนและพื้นถ้ำได้ดี แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่ย่านความถี่ MF ปลายแถบและ HF ดันแถบ ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิว โดยกรณีที่มีขั้วคลื่นแบบ V-H เมื่อมีการแพร่ในโพรงถ้ำหินปูนจะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรสูงกว่าค่าที่ได้การวัดทดสอบแบบ V-V มาก โดยเฉพาะที่ความถี่ 1000 kHz, 1650 MHz และ 2325 kHz พบว่ามีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงขั้วคลื่นเกิดขึ้นด้วย ทำให้สายอากาศภาครับในแนวนอนสามารถรับค่ากำลังของคลื่น ได้มากกว่า

ย่านความถี่ HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) ตามทฤษฎี การแพร่กระจายคลื่นพบว่า ในย่านความถี่นี้มีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นฟ้าที่สามารถสะท้อนหรือเลี้ยวเบน ในชั้นบรรยากาศหรือส่วนโค้งของโลกได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำที่มีขนาดเล็กกว่า ความยาวคลื่นที่เหมาะสมตามทฤษฎีของท่อนำคลื่นหรือมีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัด รวมทั้งมีสภาพแวดล้อม แตกต่างจากธรรมชาติที่ควรเป็นของคลื่นความถี่นี้ ทำให้เกิดการลดทอนค่อนข้างสูง แม้ว่าเกิดการสูญเสีย การส่งผ่านไม่สูงเท่ากับย่านความถี่ LF ปลายแถบหรือ MF ดันแถบ เช่นเดียวกันทั้งขั้วคลื่นแบบ V-H และ แบบ V-V ก็ตาม

ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) มีคุณสมบัติ การแพร่คลื่นแบบคลื่นตรง (Direct wave) หรือคลื่นในอากาศว่างโดยคลื่นต้องอยู่ในแนวระดับสายตา แต่เมื่อนำมา วัดทดสอบในโพรงถ้ำแบบ NLOS พบว่าการทดสอบขั้วคลื่นแบบ V-V ที่ความถี่ 300 MHz มีค่าการสูญเสีย การส่งผ่านต่ำสุด แต่สิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนก็คือ ยิ่งความถี่ในย่าน VHF นี้มีค่าสูงขึ้นกลับมีค่าการสูญเสีย

การส่งผ่านที่ระยะทางเท่ากันลดลง เนื่องจากความยาวของคลื่นมีขนาดสั้นลงทำให้สามารถผ่านโพรงถ้ำที่มีขนาดกว้างกว่าได้ดีขึ้น เมื่อเปลี่ยนข้อคลื่นของสายอากาศภาครับให้อยู่ในแนวนอนเพื่อรับคลื่น จะมีแนวโน้มของการสูญเสียการส่งผ่านเหมือนกับกรณีที่สายอากาศภาครับกับภาคส่งให้มีข้อคลื่นแนวตั้งเหมือนกัน เพียงแต่มีค่าต่ำกว่าซึ่งไม่ได้หมายความว่าสามารถส่งและรับสัญญาณได้ไกลกว่าแบบ V-V

ในย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF สำหรับความถี่ในย่าน UHF เมื่อทำการทดสอบข้อคลื่นทั้งแบบ V-V และแบบ V-H พบว่า การสูญเสียการส่งผ่านมีค่าใกล้เคียงกันและค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังมีการสูญเสียการส่งผ่านต่ำกว่าย่านความถี่ VHF ซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีการสูญเสียในที่ว่าง (Free-space loss) โดยมีสาเหตุมาจากคลื่นที่เดินในโพรงถ้ำที่ผนังมีความนำไฟฟ้าและมีค่าความลึกผิวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่ VHF และความถี่อื่นที่ต่ำกว่าซึ่งทำให้เปรียบเสมือนคลื่นที่แพร่ในท่อนำคลื่น อีกทั้งขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของความถี่ในย่าน UHF นี้ได้ นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงบ้าง เนื่องจากเมื่อคลื่นดังกล่าวแพร่ไปกระทบกับสิ่งกีดขวางในถ้ำซึ่งมีความเป็นตัวนำทางไฟฟ้า จึงเกิดการสะท้อนไปยังจุดที่ติดตั้งสายอากาศภาครับและทำให้เกิดการเสริมหรือหักล้างเฟสของคลื่น (Phase angle) ได้

6.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)

การทดสอบแบบ NLOS จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น LOS และส่วนที่เป็น NLOS (L-Bend) ซึ่งเป็นทางโค้งคล้ายรูปตัวแอล (L) ที่จะบังคับคลื่นในแนวระดับสายตา จากบริเวณที่ทดสอบจะมีระยะ L-Bend ตั้งแต่ 4 เมตร ถึง 8 เมตร ซึ่งในระยะนี้จะสามารถสังเกตถึงความสามารถในการสะท้อนหรือเลี้ยวเบนของคลื่นในแต่ละความถี่ได้ โดยย่านความถี่ LF (300 kHz) และย่าน MF ดันแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) ในการทดสอบข้อคลื่นแบบ V-V เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรสูง โดยเฉพาะที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่สูงขึ้นถึง 1000 kHz ค่าการสูญเสียการส่งผ่านในระยะ L-Bend จะมีค่าลดลงทั้งนี้สืบเนื่องจากที่ความถี่ 1000 MHz การแพร่คลื่นจะเริ่มเปลี่ยนจากการซึมซาบลงเนื้อหินของผนังถ้ำ เป็นการแพร่คลื่นบนพื้นผิวผนังถ้ำมากกว่า ทำให้สายอากาศภาครับซึ่งวางขนานและใกล้กับแนวผนังถ้ำสามารถรับค่ากำลังที่แพร่ออกมาจากพื้นผิวของผนังถ้ำได้ดียิ่งขึ้น ส่วนของการทดสอบข้อคลื่นแบบ V-H ที่ย่านความถี่ LF (300 kHz) พบว่า ค่าการสูญเสียการส่งผ่านมีค่าแตกต่างจากกรณีการวัดทดสอบแบบ V-V เพียงเล็กน้อย แต่ค่าการลดทอนตลอดระยะของ L-Bend มีค่าสูงกว่าแบบ V-V ถึง 49.4 dB (เดซิเบล: Decibel) ซึ่งแสดงว่าคลื่นความถี่ 300 kHz เมื่อเหนี่ยวนำเข้าไปในเนื้อหินปูนจะไม่มีการเปลี่ยนข้อคลื่น ขณะที่ย่าน MF ดันแถบ (350 kHz) มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงที่สุดและสูงกว่าการวัดทดสอบแบบ V-V ประมาณ 4 dB แสดงว่านอกจากมีการแพร่บนผิวแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงข้อคลื่นตามรูปร่างของผนังถ้ำด้วย ที่ย่านความถี่ MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ทั้งการทดสอบข้อคลื่นแบบ V-V และแบบ V-H ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดิน และเช่นเดียวกันเมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิว

ของผนังและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่เกิดขวาง ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับผนังและพื้นถ้ำได้ดีขึ้น แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่ย่านความถี่ MF ปลายแถบและ HF ต้นแถบ คุณสมบัติการแพร่คลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นแบบคลื่นฟ้ามมากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิวทำให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเริ่มยกระดับขึ้น

ย่านความถี่ HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) แม้จะมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นฟ้า แต่นำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมเป็นแบบ NLOS ทั้งการทดสอบข้อคลื่นแบบ V-V และแบบ V-H จะเกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบนบนผนังถ้ำที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอในลักษณะของการกระเจิง (Scattering) แบบไร้ทิศทางมากกว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภายในโพรงถ้ำมีสภาพแวดล้อมของสิ่งกีดขวางที่แตกต่างกันตลอดความยาวของโพรงถ้ำ การพิจารณาบริเวณ L-Bend ตำแหน่งเดียวอาจจะใช้ไม่ได้กับบริเวณอื่น ๆ จึงเป็นเรื่องยากที่จะใช้การส่งรับคลื่นในระยะไกลภายในโพรงถ้ำอย่างหวังผล

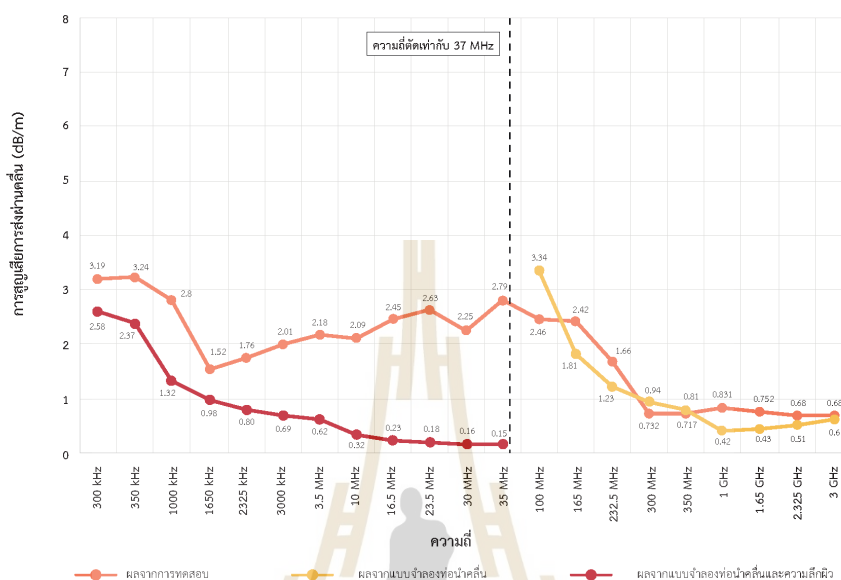
ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่าง เมื่อนำมาวัดทดสอบแบบ NLOS ซึ่งมีสิ่งกีดขวางเป็นผนังถ้ำและก้อนหินขนาดใหญ่ จากการทดสอบพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-H จะต่ำกว่ากรณีการวัดทดสอบแบบ V-V เกือบทุกความถี่ แต่ยกเว้นที่ความถี่ 165 MHz จะมีค่าสูญเสียสูงกว่าแบบ V-V ประมาณ 0.24 dB (ถือว่าใกล้เคียง) แสดงให้เห็นว่า ผนังของถ้ำหินปูนอาจจะสามารถเปลี่ยนแปลงข้อคลื่นของคลื่นย่านความถี่ VHF ได้ง่าย ทำให้สายอากาศภาครับรับค่ากำลังของคลื่นที่มีข้อคลื่นแนวนอนได้สูงกว่าแนวตั้ง

ย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่างเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF ซึ่งสามารถแพร่คลื่นแบบ LOS ได้ดีกว่าแบบ NLOS เมื่อทำการทดสอบพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านในระยะของ L-Bend สูงกว่ากรณีของ LOS โดยมีค่าใกล้เคียงทุกความถี่ เนื่องจากความถี่ทั้งในย่าน VHF และย่าน UHF ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความถี่อื่น เมื่อทำการทดสอบในแบบ NLOS จึงเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นผ่านช่วง L-bend ได้น้อย ส่งผลให้เกิดการลดทอนสูงซึ่งถือเป็นหนึ่งในข้อจำกัดของช่วงความถี่สูงเมื่อคลื่นเดินทางผ่านเส้นทางคดเคี้ยวภายในถ้ำ ดังนั้น หากต้องการรับส่งคลื่นภายในถ้ำระยะไกลก็จะพบกับอุปสรรคจากความคดเคี้ยวและหินที่เป็นสิ่งกีดขวางการแพร่คลื่นทันที ทำให้ค่าระดับกำลังที่รับได้โดยสายอากาศภาครับที่จุดสุดท้ายของ L-Bend มีค่าต่ำเกินไป จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในระบบสื่อสารระยะไกลภายในโพรงถ้ำ

6.3 การศึกษาแบบจำลองภายในถ้ำ

จากการศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ ถัดมาจึงได้ทำการศึกษาลักษณะแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำที่มีทั้งลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น ขนาด รูปร่าง และเส้นทางที่แตกต่างกัน เป็นต้น ซึ่งรวมไปถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของถ้ำ เช่น ค่าความนำทางไฟฟ้าและค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของถ้ำหิน เพื่อพิจารณาถึงแบบจำลองของการสูญเสียการส่งผ่านคลื่น ในขณะที่คลื่นแต่ละความถี่เดินทางผ่านโพรงถ้ำที่มีคุณสมบัติคล้ายท่อนำคลื่น ตามที่ในงานวิจัยของ Bedford and Kennedy (2014) Deryck (1978) Emslie et al. (1975) และ Rak and Pechac (2007) ได้นำเสนอแบบจำลองของการลดทอนในลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดภายในโพรงถ้ำที่ได้กล่าวไปข้างต้น แต่การใช้แบบจำลองที่กล่าวมานั้นมีข้อจำกัดในส่วนของคุณสมบัติที่เดินทางในโพรงถ้ำ ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับการพิจารณาความถี่ที่มีความยาวคลื่นรองรับขนาดของโพรงถ้ำ โดยในโพรงถ้ำที่ทดสอบนั้นมีขนาดความกว้างเท่ากับ 7 เมตร และความสูงเท่ากับ 5 เมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับแบบจำลองของท่อนำคลื่นตามสมการที่ 3 จะสามารถคำนวณค่าความถี่ได้เท่ากับ 37 MHz อย่างไรก็ตาม เมื่อศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า คลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัด สามารถแพร่เข้าไปในโพรงถ้ำที่ผนังถ้ำมีความนำทางไฟฟ้าได้ โดยผนังของโพรงถ้ำจะแสดงคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกมากขึ้น ทำให้คลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัด สามารถเดินทางผ่านเข้าไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงแบบจำลองการแพร่คลื่นตามข้อมูลลักษณะของโพรงถ้ำเชิงดาว โดยเฉพาะแบบจำลองการแพร่คลื่นความถี่ต่ำที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นดินหรือคลื่นผิว โดยนำค่าความถี่ผิวที่ทำให้คลื่นความถี่สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อของผนังถ้ำมาพิจารณาร่วมด้วย ซึ่งส่งผลให้เสมือนว่าโพรงถ้ำนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น





ภาพที่ 15 การสูญเสียการส่งผ่านจากแบบจำลองและการทดสอบในแนวสายตาทุกย่านความถี่

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่ได้จากแบบจำลองและการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่าคลื่นความถี่สูงกว่าความถี่ตัดที่ 37 MHz นั้นสามารถใช้แบบจำลองการลดทอน ดังในสมการที่ 4 ถึงสมการที่ 8 ได้โดยผลที่ได้จากแบบจำลองท่อนำคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ตัด ให้ผลที่ใกล้เคียง กับผลการทดสอบ แต่หากใช้แบบจำลองเดียวกันนี้กับความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัด ผลที่ได้จะยังมีค่าเข้าใกล้กัน ซึ่งตรงข้ามกับผลที่ได้จากการทดสอบที่สามารถรับส่งคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัดได้ ดังนั้น จึงได้เสนอแนวคิด ถึงการนำค่าความถี่ในแต่ละความถี่มาพิจารณาในส่วนของคุณภาพความถี่และความสูงของโครงเสาด้วย โดยคลื่นที่แพร่ซิมิลิกในผนังถ้าจะเปรียบเสมือนโครงเสานั้นมีขนาดกว้างขึ้นจนสามารถรองรับคลื่นความถี่ที่ ต่ำกว่าความถี่ตัดได้ ซึ่งแสดงให้เห็นผลลัพธ์ของแบบจำลองท่อนำคลื่นที่มีการนำค่าความถี่มาพิจารณาด้วย มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ในส่วนของแบบจำลองที่ความถี่สูงพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการลดทอน มาจากสิ่งกีดขวางภายในเสา ความลาดเอียงและความขรุขระของผนังเสา มากกว่าการลดทอนที่เกิดจาก ขนาดโครงเสา หากนำความถี่มาพิจารณาไว้ในกรณีความถี่สูงจะให้การลดทอนที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่า ความเป็นจริงมาก

7. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำที่ทดสอบ ณ ถ้ำเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ โดยเป็นถ้ำหินปูน ซึ่งสามารถพบได้มากที่สุดในประเทศไทยและเป็นถ้ำชนิดเดียวกันกับอุทยานแห่งชาติ ถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ที่เกิดเหตุการณ์ปฏิบัติการค้นหาและกู้ภัยถ้ำหลวงในปี พ.ศ. 2561 โดยได้ทดสอบ การส่งผ่านคลื่นความถี่ที่ครอบคลุมตั้งแต่ย่านความถี่ตั้งแต่ LF ไปจนถึงย่านความถี่ UHF ทั้งในแนวระดับสายตา เพื่อเน้นศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่นที่แพร่ภายในโพรงถ้ำที่เป็นผนังกึ่งตัวนำไฟฟ้าและการทดสอบแนวที่ไม่อยู่ในระดับสายตาเพื่อศึกษาถึงการสะท้อน เลี้ยวเบน และความสามารถในการเดินทางผ่านเส้นทางคดเคี้ยว ของคลื่น โดยเน้นการพิจารณาการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นเพื่อวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของคลื่น ที่เดินทางภายในถ้ำตามธรรมชาติ จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของคลื่นความถี่ในแต่ละย่านนั้นมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน รวมถึงความเหมาะสมต่อการใช้งานด้วยลักษณะที่ต่างกัน โดยย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ย่าน MF ลงไป ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นดินและคลื่นผิว จะเหมาะสำหรับการสื่อสารด้วยระบบสื่อสารลงดิน (Through-the-earth communication) มากกว่าการแพร่คลื่นความถี่ต่ำผ่านโพรงอากาศของถ้ำที่มีขนาดเล็กกว่า ความยาวคลื่นโดยตรง เนื่องจากทำให้เกิดการลดทอนสูง อีกทั้งโครงสร้างของสายอากาศย่านความถี่ต่ำที่มี ขนาดใหญ่จะเป็นปัญหาด้านการใช้งาน จึงไม่เหมาะสำหรับการแพร่คลื่นผ่านโพรงถ้ำ ในขณะที่ย่านความถี่สูงตั้งแต่ย่านความถี่ HF ขึ้นไป ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นตรงอาจเหมาะสำหรับการแพร่ผ่านอากาศภายใน โพรงถ้ำมากกว่าย่านความถี่ที่ต่ำกว่าย่าน MF อย่างไรก็ตาม ธรรมชาติของย่านความถี่สูงที่มีการลดทอนภายใน อากาศว้างที่สูงขึ้นตามความถี่ และเมื่อแพร่คลื่นไปในโพรงถ้ำที่มีเส้นทางคดเคี้ยวจะทำให้คลื่นในย่านความถี่สูง เกิดการลดทอนมากขึ้น ดังนั้น ระบบสื่อสารจึงอาศัยตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ระหว่างเส้นทางคดเคี้ยว เพื่อช่วยทวนสัญญาณคลื่นความถี่สูงที่สูญเสียระหว่างเส้นทางโค้งหรือสิ่งกีดขวางภายในถ้ำซึ่งเหมาะสำหรับ ย่านความถี่สูงโดยเฉพาะย่าน UHF โดยจากผลการศึกษาและการทดสอบที่ได้นำเสนอจะเป็นข้อมูลสำหรับการ วิเคราะห์เพื่อพิจารณาเลือกใช้ความถี่ให้เหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นในโพรงถ้ำทั้งในแนวระดับสายตา และในแนวที่ไม่อยู่ในระดับสายตา อีกทั้งจากการศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในโพรงถ้ำ ที่ผ่านมาจะเห็นถึงธรรมชาติของคลื่นในแต่ละย่านความถี่ที่มีกลไกการแพร่กระจายคลื่นตอบสนองต่อขนาดของ โพรงถ้ำแตกต่างกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ ทั้งในย่าน ความถี่ต่ำและความถี่สูง ที่จะนำไปวิเคราะห์ถึงการแพร่กระจายคลื่นของโพรงถ้ำที่มีลักษณะทางกายภาพ แตกต่างกันในแต่ละช่วงและรวมไปถึงถ้ำหรืออุโมงค์ชนิดอื่น ๆ ที่ผนังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยจะเป็นการลดเวลาในการทดสอบสำหรับถ้ำหรืออุโมงค์แห่งอื่น ๆ และยังสามารถนำองค์ความรู้เรื่องธรรมชาติ การแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำไปใช้ในการออกแบบระบบสื่อสารได้อีกด้วย

8. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่นที่เดินทางภายในโพรงถ้ำชนิดถ้ำหินปูน ซึ่งมีจำนวนมากที่สุดในประเทศไทย แต่ถ้ำหินปูนเป็นเพียงตัวอย่างถ้ำชนิดหนึ่งเท่านั้น ในอนาคตหากศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่นที่เดินทางภายในโพรงถ้ำชนิดอื่น ๆ ด้วยแล้ว จะสามารถนำองค์ความรู้นี้ไปคิดค้น ต่อยอด และพัฒนาระบบสื่อสารที่ใช้ภายในถ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากการได้รับทุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ในโครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ รหัสโครงการวิจัย BT62-1-(2)/004



รายการเอกสารอ้างอิง

- Bedford, M. (2001). *Introducing the Heyphone*. Caves & Caving 91, pp. 15-17.
- Bedford, M. D., & Kennedy, G. A. (2014). Modeling microwave propagation in natural caves passages. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 62(12), 6463-6471.
- Collin, R. E. (1985). *Antennas and radiowave propagation*. McGraw-Hill College.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. 2nd Edition, IEE Radar, Sonar and Navigation Series 15 (Ed.). The Institution of Electrical Engineers.
- Deryck, L. (1978). Natural propagation of electromagnetic waves in tunnels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 27(3), 145-150.
- Emslie, A., Lagace, R., & Strong, P. (1975). Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 23(2), 192-205.
- Gibson, A. D. W. (2014). *How Earth-Current Antennas Really Work*. (n.p.).
- Glover, P. (2015). Geophysical properties of the near surface Earth: Electrical properties. *Treatise on Geophysics*, 11, 89-137.
- Jones, G., & Holderied, M. W. (2007). Bat echolocation calls: adaptation and convergent evolution. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1612), 905-912.
- Kjeldsen, E., & Hopkins, M. (2006, October). An experimental look at RF propagation in narrow tunnels. In *MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference* (pp. 1-7). IEEE.
- Lee, J., & Bertoni, H. L. (2003). Coupling at cross, T, and L junctions in tunnels and urban street canyons. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 51(5), 926-935.
- Moss, C. F. (2018). *Auditory mechanisms of echolocation in bats*. Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience.
- Rak, M., & Pechac, P. (2007). UHF propagation in caves and subterranean galleries. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 55(4), 1134-1138.
- Siwiak, K. (2007). *Radiowave propagation and antennas for personal communications*. Artech House.
- Soo, Q. P., Lim, S. Y., Lim, D. W. G., Yap, K. M., & Lau, S. L. (2018). Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(5), 743-746.

บทความวิจัย (Research Article)



การพัฒนาเครื่องรับส่งวิทยุระบบแอนะล็อก 350 kHz สำหรับ ประยุกต์ใช้เพื่อการสื่อสารในถ้ำ

Development of 350 kHz Analog Transceiver for Applying in Cave Communication

พีรสันต์ คำสาลี* อรรถวิทย์ จันทอุบลี และ รัชสรณ์ วงศ์สรณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 * ผู้รับผิดชอบบทความ
 peerasan@out.ac.th

Received: 22 Aug 2022
 Revised: 25 Dec 2022
 Accepted: 26 Dec 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องรับส่งวิทยุแอนะล็อกย่านความถี่กลาง 350 kHz สำหรับประยุกต์ใช้เพื่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภายในและภายนอกถ้ำ ด้วยการพัฒนาจากเครื่องรับส่งวิทยุ HeyPhone 87 kHz ของสมาคม BCRA (British Cave Research Association) แบบ SSB โดยได้ทำการเพิ่มและพัฒนาทั้งส่วนของวงจรภาคส่งและภาครับของเครื่องรับส่งวิทยุ ได้แก่ ส่วนของวงจรภาคส่งได้พัฒนาวงจรขยายกำลังส่งวิทยุให้สามารถเลือกกำลังส่งได้ 5 และ 15 W ขณะที่วงจรภาครับได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นวงจรแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ ขณะที่วงจรส่วนหน้าของภาครับได้เพิ่มเติมวงจรขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำเพื่อเพิ่มความไวการรับสัญญาณต่ำให้ดีขึ้นสามารถรับสัญญาณต่ำสุดได้ที่ระดับ -80 dBm และ -100 dBm นอกจากนี้ยังได้เพิ่มวงจรสวิตช์สำหรับกำจัดสัญญาณเสียงรบกวนในการเดินที่มีสัญญาณจริงถูกส่งเข้ามายังวงจรภาครับอีกด้วย จากผลการทดสอบการใช้งานที่ถ้ำปากเหวห้วย จังหวัดอุตรดิตถ์ (ระยะทางรวมตลอดทางเดินในถ้ำ 457 เมตร) พบว่าเมื่อมีการส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มอดูเลตแล้วจากเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนา โดยส่งผ่านสายอากาศแบบผ่านพื้นโลกจากพื้นที่บนภูเขาผ่านชั้นหินเข้าไปภายในโพรงถ้ำพบว่าระบบสื่อสารในถ้ำสามารถรับสัญญาณระหว่างบนภูเขาและตลอดทางเดินภายในถ้ำได้อย่างมีคุณภาพ

คำสำคัญ: การสื่อสารในถ้ำ เครื่องรับส่งวิทยุระบบ SSB ย่านความถี่กลาง

Abstract

This paper presents the development of a medium-frequency band 350 kHz analog transceiver for communication between inside and outside the cave. The proposed transceiver was developed from the SSB transceiver of HeyPhone 87 kHz of the British Cave Research Association (BCRA) by adding and creating the circuit of the transmitting and receiving parts of the transceiver. Part of the transmitter, the RF power amplifier, is developed for selectable transmitting power of 5 and 15 watts. Whereas a balun circuit is added to adjust the antenna impedance appropriate to the cave's environment. The receiver part is replaced by a superheterodyne circuit, while its front-end circuit is equipped with the low-noise amplifier to improve the sensitivity for receiving the selectable low signal at -80 dBm and -100 dBm.

Moreover, it also includes the squelch circuit to eliminate the sound of noise when the radio is not receiving the desired transmission. From the testing result at Patihan cave Ubon Ratchathani province (total passage distance of 457 m), Ubon Ratchathani province, applying the modulated RF signal via the earth antenna from the mountain surface through the rock into the cave. Using the developed transceiver, we found that the cave communication system can provide a good signal quality between the outside and all the passages inside the cave.

Keywords: Cave Communication, SSB Transceiver, Medium-Frequency Band

1. บทนำ

จากเหตุการณ์ 13 หมู่ป่า ที่เกิดขึ้นที่ถ้ำขุนน้ำนางนอน ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย พบว่าหน่วยกู้ภัยที่เดินทางไปภายในถ้ำครั้งแรกมีความจำเป็นต้องการใช้วิทยุสื่อสารหลักที่นำติดตัวไปไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ตลอดเส้นทางภายในถ้ำได้ อย่างไรก็ตามปัญหาลุप्तสรรคที่เกิดขึ้นคือระบบวิทยุสื่อสารหรือระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในย่าน VHF และ UHF ไม่สามารถใช้ในการติดต่อสื่อสารระยะไกลภายในถ้ำได้ เนื่องจากเกิดการสูญเสียของระดับสัญญาณที่เกิดจากการดูดซับและหักล้างกันเองของคลื่นที่เกิดการสะท้อนหรือบางส่วนเกิดการเลี้ยวเบนตามสภาพแวดล้อมของผนังถ้ำ พื้นถ้ำ และเพดานถ้ำที่มีลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกันในทุก ๆ บริเวณ ทำให้เกิดการสูญเสียระดับของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป (Transmission path loss) รวมทั้งเทคนิคการผสมสัญญาณ (Modulation) ที่ใช้ในเครื่องวิทยุสื่อสารที่มีอยู่นั้นก็ส่งผลต่อการแพร่คลื่นภายในถ้ำด้วย

สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายสำหรับใช้งานภายในถ้ำได้เริ่มขึ้นในปี 1982 [1] ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยมีชื่อว่า Speleophon ได้ถูกออกแบบให้ใช้งานย่านความถี่ MF แต่ไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากถูกจำกัดความลึกไว้ไม่เกิน 600 เมตร และอุปกรณ์มีน้ำหนักถึง 5 กิโลกรัม ทำให้ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้งานกู้ภัยภายในถ้ำ ต่อมาในปี ค.ศ. 1987 กลุ่มนักวิทยุสมัครเล่นได้ทำการพัฒนาต่อโดยใช้ความถี่ย่าน HF ที่มีความยาว

คลื่น 160 เมตร จากผลการพัฒนาดังกล่าว ทำให้ระบบสามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลกว่า 600 เมตร แต่ยังมีอุปสรรคในเรื่องของสายอากาศไดโพลที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักของเครื่องรับส่งวิทยุขนาด 100 W ค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้งานจริง หลังจากนั้นในปี 1990 จึงได้เปลี่ยนจากสายอากาศไดโพลเป็นแท่งอิเล็กโทรด (Electrodes) สองแท่งปักลงพื้น ต่อมาในปี 2000 [2] ได้กล่าวไว้ว่าระบบวิทยุสื่อสารสำหรับใช้ในถ้ำได้เริ่มมีการใช้งานมาก่อนหน้านั้น 15 ปีแล้ว ในชื่อของ Molefone ซึ่งใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารจากในถ้ำออกมายังพื้นผิวโลกที่อยู่ด้านนอกถ้ำ (Cave to surface communication) ด้วยความถี่ 87 kHz โดยใช้วิธีผสมสัญญาณแบบแถบความถี่ด้านข้างด้านสูงเพียงแถบเดียว (Upper single side band: USB) แต่ประสบปัญหาในเรื่องของการซ่อมแซมและเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสียหายที่ทำได้ค่อนข้างยาก จากนั้นทาง British Cave Rescue Council (BCRC) ได้พัฒนาและออกแบบระบบสื่อสารสำหรับใช้งานในถ้ำขึ้นมาทดแทนสำเร็จในปี ค.ศ. 2001 [3] ที่มีชื่อว่า HeyPhone และได้ทดลองใช้งานกับนักกู้ภัยในถ้ำครั้งแรกในปีเดียวกัน [4] โดย Heyphone มีส่วนหนึ่งของระบบที่เลียนแบบมาจาก Molefone คือ ย่านความถี่และวิธีการผสมสัญญาณเสียงเข้ากับสัญญาณคลื่นความถี่ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห้เข้าด้วยกัน โดยส่วนของระบบสายอากาศจะมีความแตกต่างที่ชัดเจนที่สุด คือใช้ระบบสายอากาศที่เรียกว่า สายอากาศฝังลงพื้นโลก (Grounded-Earth antenna) ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารได้ลึกกว่าและระยะไกลกว่า Molefone ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสื่อสารในถ้ำทั้งสองระบบจะเน้นสำหรับการติดต่อสื่อสารจากผิวดินภายนอกที่อยู่เหนือพื้นในถ้ำที่เป็นเป้าหมายคล้ายกับระบบเรดาร์แบบเจาะพื้นผิว (Penetrating radar) และระบบสื่อสารทั้งสองรุ่นถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้งานสำหรับนักกู้ภัยถ้ำ (Cave rescue) เฉพาะกลุ่มเท่านั้น จึงไม่เกิดความแพร่หลายและไม่ปรากฏอยู่ในฐานข้อมูลงานวิจัยสากลที่มีอยู่ในปัจจุบันเท่าใดนัก

ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องรับส่งวิทยุระบบแอนะล็อกที่ความถี่ 350 kHz ที่ย่านความถี่กลางเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนต่อคางคาวที่อาศัยในถ้ำ โดยใช้ต้นแบบจาก HeyPhone ให้มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารได้ตลอดโพรงถ้ำโดยการเพิ่มกำลังส่งและเพิ่มวงจรขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำที่ภาครับให้มีความไวในการรับสัญญาณต่ำได้ดีมาก

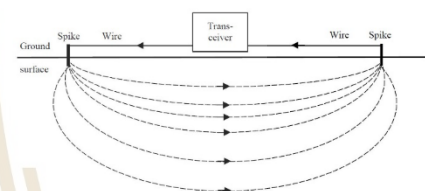
ยิ่งขึ้น นอกจากนี้เพิ่มวงจรแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ทดแทน วงจรเดิมและเพิ่มวงจรปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของถ้ำซึ่งส่งผลให้สายอากาศทำงานมี ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแพร่คลื่นผ่านพื้นโลก

จากปรากฏการณ์ของคลื่นความถี่วิทยุที่ตกกระทบกับพื้นหรือดิน โดยที่ค่าสัณฐานที่ตกกระทบไม่ได้หยุดหรือหมดหายไป ในทันทีทันใดที่พื้นผิว แต่ซึมซาบลงไปอย่างรวดเร็วด้วยการผ่าน ทะลุ (Penetration) ลงไปในเนื้อหินหรือเนื้อดินโดยใช้คลื่น ความถี่วิทยุส่งผ่านทะลุเข้าไป ดังนั้นหากมีการใช้ความยาวคลื่นที่ ยาวพอ ก็เกิดระยะทางของการผ่านทะลุที่ไกลขึ้น เช่น กรณีของ ระบบวิทยุสื่อสาร HeyPhone [3-4] ได้ใช้ความถี่ 87 kHz มีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 3.5 กิโลเมตร แต่เนื่องจาก ความเร็วคลื่นจะลดลงขณะที่เดินทางในหิน ทำให้ความยาวคลื่น ได้ดินเหลือเพียงหลักร้อยเมตร ซึ่งหากความยาวคลื่นได้ดินนี้มี ขนาดมากกว่านี้ก็จะทำให้สามารถเกิดการเหนี่ยวนำผ่านทะลุได้ ไกลมากขึ้นหลายร้อยเมตร สำหรับหลักการส่งคลื่นดินผ่านพื้น โลก โดยใช้วิธีเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าผ่านชั้นหิน โดยเทคนิคใน การแพร่คลื่นผ่านพื้นโลกนั้นแตกต่างจากการแพร่คลื่นใน อากาศว่างปกติของการสื่อสารบนพื้นผิวโลก (Terrestrial communication) ที่จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศใน โหมด TEM คือใช้วิธีการเหนี่ยวนำประจุที่เกิดการสะสมที่ปลาย ของเส้นลวดตัวนำปล่อยลงสู่พื้นโลกในรูปของสนามไฟฟ้า (Induction current) ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของ กระแสสลับตามความถี่ที่ออกแบบ สนามไฟฟ้าดังกล่าวเมื่อถูก ปล่อยจากปลายเส้นลวดตัวนำหนึ่งลงสู่พื้นโลกจะเกิดการเหนี่ยวนำ ในชั้นดินหรือหินไปสู่สายสายทองแดงอีกด้านหนึ่งกลับไปสู่ เครื่องรับส่งวิทยุ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโลกจะใช้เส้นทาง แรกที่สั้นที่สุดระหว่างจุดที่เชื่อมต่อพื้นโลกทั้งสองจุด และมีอีก ส่วนหนึ่งที่เกิดการเหนี่ยวนำแผ่ออกไปในส่วนที่ลึกกลงไปในพื้นโลก จนถึงโพรงถ้ำ โดยมีเวกเตอร์ของเส้นแรงไฟฟ้าแผ่ออกไปเป็นเส้น โค้งเช่นเดียวกับสายอากาศแบบไดโพลที่ใช้ในการแผ่คลื่นใน อากาศว่าง จำเป็นต้องใช้สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก) เพื่อให้

การเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าระหว่างปลายของเส้นลวดทั้งสอง ด้านเกิดขึ้นในพื้นโลกได้สะดวกขึ้น จึงใช้แท่งโลหะทำหน้าที่เป็น แท่งอิเล็กโทรดต่อที่ปลายทั้งสองของเส้นลวดสำหรับฝัง (Spike) ลงพื้นดินในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งสายอากาศ [5] ดังแสดงใน รูปที่ 1 โดยกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำลงไปยังในพื้นโลกสู่โพรง ถ้ำผ่านชั้นหินที่เป็นตัวกลางที่ไม่สามารถกำหนดให้เป็นเนื้อ เดียวกันได้ (Inhomogeneous medium) เนื่องจากไม่สามารถ ทราบถึงชั้นหินในพื้นโลกที่กระแสไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำลงไปยังโพรง ถ้ำได้

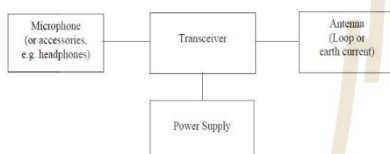


รูปที่ 1 หลักการทำงานของสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

2.2 วิทยุสื่อสารสำหรับใช้สื่อสารภายในถ้ำ

การออกแบบและพัฒนางจรเครื่องวิทยุสื่อสารแบบส่งผ่านพื้น โลก หรือที่เรียกว่าระบบสื่อสารแบบ TTE (Through-The-Earth communication) นิยมใช้การผสมสัญญาณแบบ SSB ที่แถบ ความถี่ข้างด้านสูง (USB: Upper Side Band) เนื่องจากประหยัด พลังงาน ซึ่งส่งสัญญาณออกไปก็ต่อเมื่อมีการพูดเข้าไปใน ไมโครโฟนเท่านั้น และในขณะที่หยุดพูดแม้ว่ายังคงมีการกดสวิตช์ PTT เพื่อพูด (Push-to-Talk switch) ที่ไมโครโฟนก็ตามก็จะมี พลังงานปริมาณน้อยมาก ๆ ถูกส่งออกไป และใช้แถบความถี่ (Frequency bandwidth) ขนาด 2.6 kHz ซึ่งแคบมาก ๆ โดย เครื่องวิทยุสื่อสารที่ความถี่ 87 kHz “HeyPhone” เป็นเครื่อง วิทยุที่ได้มีการทดสอบใช้งานจริงเพื่อนำมาใช้ในถ้ำแล้วใน ประเทศสหราชอาณาจักร (British Cave Research Association: BCRA) ซึ่งออกแบบโดยทีมของ Dr. David Gibson แห่งสมาคม ดังกล่าว จากรูปที่ 2 เป็นไดอะแกรมของระบบวิทยุสื่อสารสำหรับ ระบบส่งผ่านพื้นโลกของ HeyPhone โดยส่วนที่เป็นเครื่องรับส่ง (Transceiver) ได้ออกแบบให้รับส่งสัญญาณเพียงช่องสัญญาณ เดียว (Single channel) แบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (Half duplex) และใช้วิธีการผสมสัญญาณแบบ SSB โดยใช้แถบความถี่ข้างด้าน

สูงหรือ USB ที่ความถี่คลื่นพาห์ 87 kHz โดยใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและมีขนาดกำลังสูงสุด 5W ระบบสื่อสารสำหรับส่งผ่านพื้นโลกนี้จะเน้นการใช้สายอากาศแบบส่งผ่านลงดินที่เป็นพื้นโลกและหากระดับของสัญญาณสูงเพียงพอสามารถใช้สายอากาศแบบบ่วง (Loop antennas) ทดแทนได้ด้วย ในส่วนระบบเสียงได้ออกแบบให้ใช้ไมโครโฟนภายนอก ส่วนลำโพงมีทั้งแบบติดตั้งในเครื่องและแบบหูฟัง (Head phone) ตามมาตรฐานเดิมของวิทยุสื่อสารต้นแบบ



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบวิทยุสำหรับส่งผ่านพื้นโลก มีวงจรควบคุมสquelch เพิ่มเติมในส่วนภาครับ

3. การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องวิทยุสื่อสาร

สำหรับการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อก ระบบ SSB-TTE ได้พัฒนาและปรับปรุงโดยอ้างอิงจากการเครื่องวิทยุสื่อสารที่มีความถี่ 87 kHz “HeyPhone” มีทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นเครื่องส่ง (Transmitter) เครื่องรับ (Receiver) และส่วนควบคุม (Control) โดยได้พัฒนาให้สามารถทำงานที่ความถี่ 350 kHz เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความถี่ที่ต่ำกว่า 290 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ค้างคาอยู่ที่อาศัยอยู่ในถ้ำในประเทศไทยใช้ในการนำทาง [6] ซึ่งจากผลการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF, VHF และ UHF ภายในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทรายพบว่าการใช้คลื่นความถี่ 350 kHz (MF ดันแถบ) มีการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินหรือแพร่ผ่านพื้นโลกจากบนภูเขาลงไป ในโพรงถ้ำหินปูนได้ดีที่สุด โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านชั้นหินต่ำกว่าความถี่ 87 kHz แต่จะสูงกว่าเมื่อใช้งานในโพรงถ้ำหินทราย [7] ทั้งนี้จากแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. กำหนดให้ช่วงความถี่ 350 kHz สำหรับใช้ในกิจการวิทยุนำทางทางการบิน จึงได้ขออนุญาตทางสำนักงาน กสทช. เพื่อใช้คลื่นความถี่ 350 kHz ในการวัดทดสอบ และข้อเสียของระบบ SSB ก็คือ ทางเครื่องรับจะไม่ทราบว่าเป็น

ขณะนั้นกำลังรับสัญญาณจากเครื่องส่งหรือไม่ เว้นแต่จะได้ยินเสียงของผู้ส่งออกมาเท่านั้น ทำให้มีผลต่อการทำงานของเครื่องรับอย่างชัดเจนก็คือ ไม่สามารถควบคุมสquelch (Squelch) ในการปิดเสียง (Mute) ได้ ทำให้เครื่องรับจะส่งเสียงดังรบกวนในขณะที่ไม่มีความถี่วิทยุส่งเข้ามา จากข้อเสียที่กล่าวมาจึงได้เกิดการพัฒนาและปรับปรุงให้เครื่องวิทยุสื่อสารสามารถใช้งานที่ความถี่ 350 kHz มีกำลังส่งที่สูงขึ้น มีความไว (Sensitivity) ในการรับสัญญาณในส่วนของภาครับให้มีความสูง

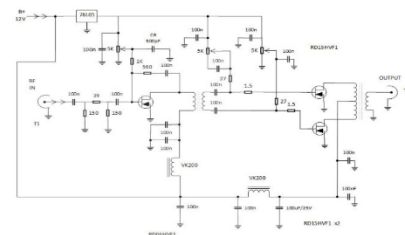
3.1 ภาคเครื่องส่ง (Transmitter)

วงจรหลักของภาคส่งวิทยุแบบ SSB-TTE- 350 kHz ยังคงใช้วงจรเดิมจากเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz โดยได้ทำการแก้ไขปรับปรุงวงจรออสซิลเลเตอร์จากเดิมซึ่งเป็นแบบคริสตัล (Crystal oscillator) ของวงจรเครื่องส่งของ HeyPhone ซึ่งใช้คริสตัลความถี่ 5.568 MHz มาผ่านวงจร Oscillator & Divider (ไอซีเบอร์ 4060) เพื่อสร้างความถี่ 87 kHz มาใช้เป็นความถี่คลื่นพาห์ของวงจรภาคส่งรวมทั้งทำหน้าที่ออสซิลเลเตอร์ประจำที่ (Local oscillator) ของวงจรภาครับ โดยได้เปลี่ยนมาใช้เทคนิคแบบ Phase Lock Loop (PLL) มาสร้างเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ชุดใหม่ความถี่ 350 kHz ทดแทนในวงจรเดิม อีกทั้งได้พัฒนาและปรับปรุงเพิ่มเติมในส่วนของวงจรภาคขยายกำลังส่งวิทยุ (RF Power amplifier) ที่จากเดิมมีกำลังส่งเพียง 5 W ให้สามารถเลือกใช้กำลังส่งที่สูงขึ้นได้ถึง 15 W โดยก่อนออกแบบเครื่องส่งได้ทำการทดสอบจากการใช้เครื่อง Signal Generator ต่อเข้ากับกับตัว Power Amplifier ขนาด 5 W, 10 W และ 15 W ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกเพื่อส่งสัญญาณจากบนภูเขาเข้าไปยังภายในโพรงถ้ำป่าภูทอก ซึ่งภายในโพรงถ้ำใช้สายอากาศภาครับแบบฝังลงพื้นโลกต่อเข้ากับเครื่อง Spectrum Analyzer เพื่ออ่านค่าระดับสัญญาณ โดยภาครับเมื่อย้ายตำแหน่งเข้าไปภายในโพรงถ้ำจำเป็นจะต้องย้ายสายอากาศภาคส่งให้ติดตั้งตามแนวโพรงถ้ำด้วยเพื่อการติดต่อที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในบางจุดจะไม่สามารถติดตั้งสายอากาศที่อยู่บนภูเขาได้เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย จึงต้องทดสอบเพื่อหากำลังของ Power Amplifier ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเมื่อภาครับเคลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ภายในโพรงถ้ำ จากการทดสอบพบว่ากำลังขนาด 5 W

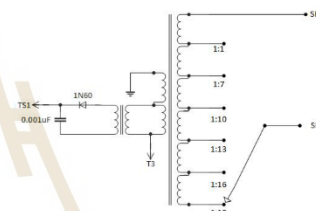
เมื่อสายอากาศภาครับเคลื่อนที่เข้าไปภายในถ้ำจนมีระดับสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ต่ำกว่า -75.9 dBm ส่งผลให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จึงเพิ่มกำลังส่งเป็น 10 W และ 15 W พบว่าที่ กำลังขนาด 15 W สามารถทำให้การติดต่อสื่อสารภายในโพรงถ้ำที่ปลายโพรงถ้ำรับสัญญาณได้ชัดเจนขึ้น อีกทั้งยังสามารถเอาชนะสัญญาณรบกวนในลักษณะของ Noise floor ที่เกิดจากหลอดไฟ LED ที่ใช้ส่องแสงสว่างให้นักท่องเที่ยวที่มีระดับสูงถึง -63 dBm ได้จากการทดสอบนี้จึงได้พัฒนาให้เครื่องส่งมีกำลังส่งเพิ่มสูงสุดที่ 15 W นอกจากนี้ได้เพิ่มวงจรบาลันปรับค่าอิมพีแดนซ์ (Matching balun) ของสายอากาศ จากวงจรภาคขยายกำลังส่งวิทยุความถี่ 350 kHz ขนาดกำลังส่งสูงสุด 15 W ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบด้วยอุปกรณ์ FET เบอร์ RD06HVF1 จำนวน 3 ตัว ทำหน้าที่หลักในการขยายกำลังส่งวิทยุ โดย FET ตัวแรกทำหน้าที่วงจรขยายกำลังขั้นแรก (1st Stage amplifier) ซึ่งรับค่ากำลังมาจากวงจรภาคส่งเดิมที่มีค่าระดับสัญญาณคงที่เท่ากับ 17 dBm การควบคุมเพื่อส่งกำลังที่ขยายแล้วส่งต่อไปให้ FET อีกสองตัวทำหน้าที่ขยายกำลังให้ได้ 5 W และ 15 W (ที่แรงดัน 12.7 V) ทำได้โดยการควบคุมแรงดันที่ออกมาจากไอซีเรกูเลเตอร์ 78L05 เพื่อจ่ายไบอัสให้กับ FET ตัวแรก หากเลือกแรงดันไบอัสอยู่ที่ 1.6 V จะทำให้ค่ากำลังงานที่ถูกขยายด้วย FET อีกสองตัวมีค่าเท่ากับ 5 W และหากเลือกแรงดันไบอัสเท่ากับ 2.5 V ค่ากำลังงานขยายสูงสุดที่ได้จะเท่ากับ 15 W สำหรับอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ในวงจรจะเป็นส่วนของวงจรปรับค่าอิมพีแดนซ์และปรับแรงดันไบอัสให้กับ FET แต่ละตัว โดยมี RF Choke VK200 สองตัวทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุอื่นที่มาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปรบกวนการทำงานของ FET ทั้งสามตัว นอกจากนี้ยังมีหม้อแปลงสำหรับส่งผ่านกำลังไปยัง FET คู่และส่งผ่านกำลังไปยังวงจรแมตชิ่งบาลันและสายอากาศต่อไป

เนื่องจากในสภาพของชั้นดินและชั้นหินบริเวณที่ติดตั้งแท่งอิเล็กโทรดของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกมีลักษณะแตกต่างกัน ส่งผลให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไปจึงต้องเพิ่มวงจรภาค Matching Balun เพื่อช่วยให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เอาต์พุตของวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ 350 kHz ภาคสุดท้าย วงจรนี้ได้ใช้หม้อแปลง

แมตชิ่ง (Matching transformer) แบบขดลวดที่ออกแบบให้มีอัตราส่วนจำนวนขดลวดที่ขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิมีอัตราส่วน 1:1, 1:7, 1:10, 1:13, 1:16 และ 1:19 ตามรูปที่ 4 โดยที่อัตราส่วน 1:1 จะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 Ω



รูปที่ 3 วงจร RF Power Amplifier ขนาดกำลังส่ง 15 W

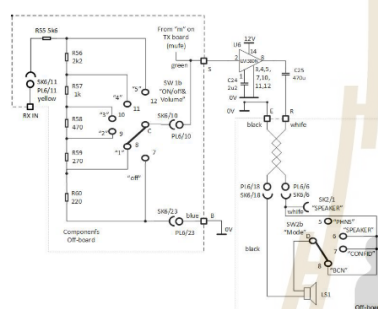


รูปที่ 4 วงจรภาค Matching Balun

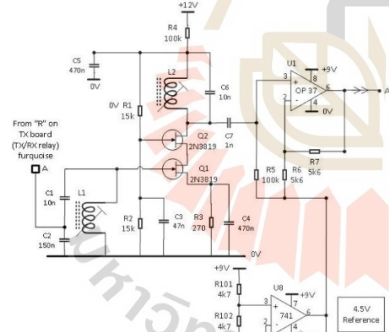
3.2 ภาคเครื่องรับ (Receiver)

วงจรหลักของภาครับวิทยุแบบ SSB-TTE- 350 kHz ผู้วิจัยได้ยกเลิกการใช้วงจรเดิมจากเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz ของสมาคม BCRA ที่ใช้วงจร IQ ออสซิลเลเตอร์ โดยได้ออกแบบวงจรภาครับสัญญาณ SSB 350 kHz ให้เป็นแบบ Superhetrodyne พัฒนางจรขยายสัญญาณภาครับให้มีอัตราขยายสูงขึ้น และพัฒนางจรขยายเสียง (AF amplifier) ก่อนส่งออกลำโพงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถปรับระดับความดังได้ 6 ระดับรวมทั้งออกแบบวงจรสเตอริโอ เพิ่มเดิมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรขยายสัญญาณภาครับวงจรขยายสัญญาณเสียงเพื่อส่งออกลำโพงตามรูปที่ 5 ยังคงเลือกใช้วงจรขยายด้วยไอซีเบอร์ LM380N ซึ่งให้คุณภาพเสียงที่คมชัดดีอยู่แล้ว โดยยังคงรูปแบบการใช้งานให้สามารถปรับลด

เพิ่มระดับเสียงด้วยสวิตช์เลือก (Selector switch) SW1b แทนการใช้วอลุ่มแบบปรับค่าได้ เพื่อให้มีความทนทานต่อการใช้งานทั้งในและนอกตู้ได้มากขึ้น ส่วนฟังก์ชันการใช้งานในโหมดต่าง ๆ โดยผ่าน SW2b ยังคงรักษาคุณลักษณะของเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone ต้นแบบของ BCRA ประเทศสหราชอาณาจักรไว้อย่างครบถ้วน



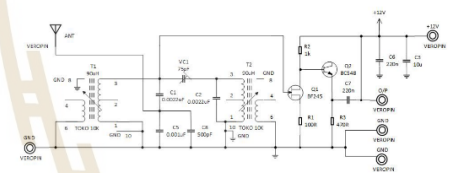
รูปที่ 5 วงจรขยายสัญญาณเสียงก่อนส่งออกลำโพงปรับระดับความดังของเสียงได้ 6 ระดับ



รูปที่ 6 วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz แบบสัญญาณรบกวนต่ำ อัตราขยาย 30 dB

วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำ (Low-noise amplifier) สำหรับความถี่ 350 kHz ตามรูปที่ 6 ยังใช้วงจรเดิม ซึ่งใช้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ชนิด UJT เบอร์ 2N3819

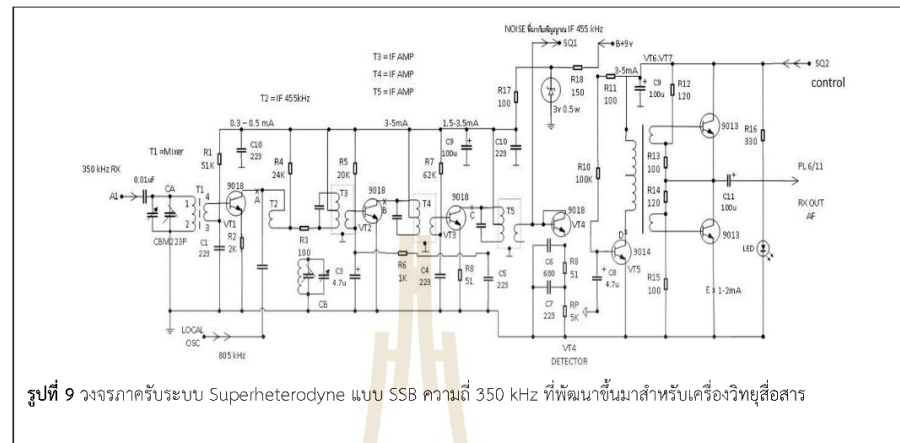
สองตัว (Q1 และ Q2) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่ 350 kHz ที่มีระดับกำลังสูงกว่า -80 dBm เข้ามาขยายให้มีความถี่สูงขึ้น โดยมีวงจรกรองเข้าแบบแถบแคบ (Narrow-band input filter) L1, C1, C2 ที่ออกแบบไว้ที่ความถี่กลางเท่ากับ 350 kHz รับสัญญาณจากสายอากาศเข้ามาเพื่อส่งต่อไปกับ Q1, Q2 โดยที่เอาต์พุตของ Q2 ถูกควบคุมความถี่ 350 kHz ด้วยวงจรกรองแถบแคบ L2, C6 ที่ความถี่กลางเดียวกัน ก่อนส่งต่อไปขยายกำลังให้มีระดับ 30 dB ด้วยไอซีออปแอมป์เบอร์ OP37 (ควบคุมอัตราขยายด้วย R7) โดยมีไอซีออปแอมป์เบอร์ 741 ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบกระแสลบ 4.5 โวลต์ให้กับไอซีเบอร์ OP37 ให้ทำงานตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 7 วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz แบบสัญญาณรบกวนต่ำ อัตราขยาย 20 dB

รูปที่ 8 วงจรสควีลช์ สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรขยายเสียงในวงจรภาครับ

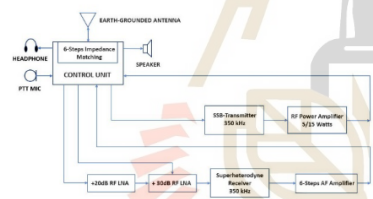
จากรูปที่ 7 เป็นวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุแบบสัญญาณรบกวนต่ำ ที่ได้ออกแบบเพิ่มขึ้นสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรภาครับแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ที่ความถี่ 350 kHz วงจรนี้ให้อัตราขยาย 20 dB จะถูกเลือกใช้งานเมื่อระดับของสัญญาณมีค่าต่ำกว่า -80 dBm โดยใช้สวิตช์ต่อวงจรนี้ให้อนุกรม



กับวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุอัตราขยาย 30 dB วงจรนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลัก ๆ คือ วงจรกรองแบบแท่งคู่ T1 และ T2 (TOKO 10K) ทำหน้าที่รับสัญญาณความถี่ 350 kHz ที่มีกำลังต่ำมาก ๆ และกรองสัญญาณรบกวนระดับสูง ๆ ออกไป ก่อนส่งให้กับทรานซิสเตอร์ Q1 ชนิด UJT เบอร์ BF245 และทรานซิสเตอร์ Q2 เบอร์ BC548 ขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz ด้วยอัตราขยาย 20 dB เพื่อส่งต่อให้วงจรภาคขยายสัญญาณความถี่วิทยุที่มีอัตราขยาย 30 dB ต่อไป หลักการทำงานของวงจรสควีลซ์ตามรูปที่ 8 เริ่มต้นจากสัญญาณที่จ่ายให้กับอินพุต SQ1 ของวงจรนี้มาจากสัญญาณเสียงที่ถูกมอดูเลตมาับสัญญาณความถี่ IF 455 kHz ที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรแทรก T5 สัญญาณที่มีระดับต่ำและมีสัญญาณรบกวนปะปนมาด้วยจะถูกขยายให้มีระดับสูงขึ้นด้วยวงจรทรานซิสเตอร์ 2SA733 และ 2SC945 สองตัว การออกแบบวงจรขยายหลายลำดับในลักษณะของวงจรขยายบัฟเฟอร์ (Buffer amplifier) นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้เกิดการดึงกำลังของสัญญาณ IF จากวงจรแทรก T5 มากเกินไป เนื่องจากสัญญาณ IF ต้องมีระดับของสัญญาณที่ส่งต่อไปกับวงจรดีเทคเตอร์สูงอย่างเพียงพอ ในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีค่าสูงถึงระดับที่ถูกกำหนดไว้ด้วย VR20K จะทำให้สัญญาณดังกล่าวไปกระตุ้นทรานซิสเตอร์ 2SC945 ที่ต่อร่วมกับ 2SB562 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน +9 โวลต์ไปที่เอาต์พุต SQ2 ซึ่งจ่ายให้กับวงจรขยายเสียงแบบ Complementary push-pull ที่อยู่เป็น

ภาคสุดท้ายของวงจรภาครับแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ในรูปแบบที่ 9 โดยมี VR50K ทำหน้าที่ควบคุมวงจรสควีลซ์โดยผู้ใช้งานซึ่งติดตั้งบนหน้าปัดของเครื่องวิทยุสื่อสาร สุดท้ายเป็นวงจรภาครับที่ออกแบบให้ทำงานในระบบ Superheterodyne แบบ SSB ความถี่ 350 kHz ดังแสดงในรูปที่ 10 วงจรนี้ได้ออกแบบให้มีค่าความไวในการรับสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ -50 dBm ดังนั้นเมื่อถูกนำไปใช้งานร่วมกับวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำในรูปที่ 7 ซึ่งมีอัตราขยาย 30 dB จะทำให้เครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้รับการพัฒนาและออกแบบใหม่ให้ทำงานร่วมกับวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุภาคแรก (อัตราขยาย 30 dB) ก่อนส่งให้วงจรภาครับแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ซึ่งทำให้มีค่าความไวในการรับสัญญาณต่ำสุดที่วงจรรวมของภาครับอยู่ที่ -80 dBm และหากนำวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำในรูปที่ 8 ซึ่งมีอัตราขยาย 20 dB มาต่อรวมอีกชุดหนึ่ง จะทำให้วงจรรวมของภาครับมีค่าความไวในการรับสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ -100 dBm สัญญาณวิทยุที่ผ่านวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำและถูกส่งมายังอินพุตของวงจรภาครับระบบ ซูเปอร์เฮเทอโรไดน์นี้โดยผ่านคาปาซิเตอร์ 0.01 ไมโครฟาราดเข้าไปผสมกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำที่ความถี่ 805 kHz โดยผ่านวงจรแทรก T1 และทรานซิสเตอร์เบอร์ 9018 เพื่อให้ได้ความถี่ IF เท่ากับ 455 kHz แล้วส่งไปขยายกำลังโดยวงจรแทรก T3, T4, T5 ซึ่งทำงานร่วมกับทรานซิสเตอร์ 9018 อีกสามลำดับ หลังจากนั้นจะถูกแยกสัญญาณเสียงออกจากความถี่ IF 455 kHz โดย

วงจรดีเทคเตอร์ (Detector) VT4 ซึ่งตัดแปลงทรานซิสเตอร์ 9018 ให้ทำหน้าที่เป็นไดโอดดีเทคเตอร์ โดยที่ขาอีมีเตอร์ของ ทรานซิสเตอร์ 9018 จะมีเฉพาะสัญญาณเสียงออกมาเท่านั้น เพื่อส่งให้กับวงจรขยายเสียงที่ออกแบบให้ทำงานแบบ Complementary push-pull ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ VT4 เบอร์ 9014 ทรานฟอเมอร์ T6 ทรานซิสเตอร์เบอร์ 9013 สองตัว และอุปกรณ์อื่น ๆ สำหรับป้อนแรงดันไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แต่ละตัว ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายจะเป็นสัญญาณเสียงที่มีระดับตามที่ต้องการส่งผ่านคาปาซิเตอร์ C11 ส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณเสียงก่อนส่งออกลำโพงปรับระดับความดังของเสียงได้ 6 ระดับ ส่วนของวงจร Control ได้ใช้วงจรต้นแบบชุดเดิมของวิทยุสื่อสาร HeyPhone ทั้งหมด เนื่องจากต้องการคงไว้ซึ่งฟังก์ชันทั้งหมดที่มีประโยชน์ต่อการใช้งานที่ได้ออกแบบเอาไว้แล้ว และสามารถสรุปโดยแผนวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาขึ้นมีสัดส่วนต้นทุนเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 10 โดยแผนวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาเพิ่มเติม

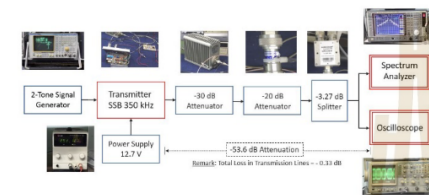
4. การวัดทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสาร

4.1 การวัดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การปรับตั้งเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบวงจรภาคส่งวิทยุแบบ SSB-TTE-350 kHz ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11 ซึ่งเครื่องมือทั้งหมดประกอบด้วย Radio Communications Test Set, Spectrum Analyzer, Oscilloscope, -20 dB Attenuator, -30 dB Attenuator, -3.27 dB 2-way Splitter และ DC Power Supply หลักการวัดทดสอบวงจรภาคส่งของวิทยุสื่อสารที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้น จะพิจารณาค่าของกำลังส่งคลื่น

ความถี่วิทยุ 350 kHz ที่ส่งออกมาจากภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายของวงจรภาคส่งในขณะที่ปราศจากการผสมสัญญาณเสียง (Non-modulation) และขณะที่มีการผสมสัญญาณเสียง (Modulation) แบบ SSB เข้ากับความถี่คลื่นพาห้ 350 kHz การวัดทดสอบวงจรภาคส่งตามที่กำหนดมีกระบวนการดังนี้ 1) ป้อนสัญญาณเสียงแบบสองความถี่ (Two-tone audio signal) ที่ความถี่ 500 Hz สำหรับเสียงโทนต่ำและความถี่ 2.4 kHz สำหรับเสียงโทนสูง ด้วยระดับแรงดัน 5 mV จากเครื่องมือ Radio Communications Test Set ให้กับวงจรปรับแอมพลิจูดสัญญาณเสียงของวงจรภาคส่งวิทยุซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าขนาด 12.7 V จาก Power Supply ให้กับวงจรดังกล่าว จากนั้นใช้ Attenuator จำนวน 2 ตัวเพื่อลดระดับกำลังของสัญญาณที่ออกจากวงจรภาคส่งให้ลดต่ำลงอีก 50 dB เพื่อไม่เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer และ Oscilloscope ซึ่งถูกต่อแยกออกมาจาก 2-way Splitter ที่มีการลดทอนอีก 3.27 dB และเมื่อรวมกับค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณและข้อต่อทั้งหมดแล้วจะมีการลดทอนทั้งสิ้นประมาณ 53.6 dB จากนั้นเริ่มทำการวัดทดสอบค่ากำลังของวงจรภาคส่งวิทยุในโหมดกำลังส่งสูงสุดที่ 15 W ในขณะที่ปราศจากการมอดูเลชันสัญญาณเสียงแบบสองความถี่เข้าไป พบว่าค่าระดับของสัญญาณที่ปรากฏบนเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer ที่ความถี่ 350.58 kHz ซึ่งเป็นความถี่เริ่มต้นแถบของ USB อยู่ที่ประมาณ -20.14 dBm และเมื่อพิจารณาจากขนาดความกว้างแถบ 2 kHz ตามมาตรฐานของการมอดูเลชันแบบ SSB ความถี่ปลายแถบของ USB จะอยู่ที่ 352.54 kHz มีระดับของค่ากำลังที่วัดได้อยู่ที่ -40.12 dBm เมื่อนำมาคำนวณหาผลรวมของค่าการลดทอนรวมของตัวลดทอน สายนำสัญญาณและข้อต่อประมาณ 53.6 dB จะได้ค่ากำลังส่งในขณะที่ยังไม่มีมอดูเลชันของ USB อยู่ที่ประมาณ $-20.14 + 53.6 = 33.6$ dBm (2.09 วัตต์) และ $-40.12 + 53.6 = 13.48$ dBm (0.02 วัตต์) ในขณะที่รูปคลื่นในขณะที่ยังไม่มีมอดูเลชัน ขั้นตอนต่อไปได้ทำการวัดทดสอบค่ากำลังของภาคเครื่องส่งวิทยุในขณะที่มีการมอดูเลชันด้วยสัญญาณเสียงสองความถี่ (500 Hz และ 2.4 kHz) เข้าไปในวงจรมอดูเลชัน และปรับโหมดกำลังส่งอยู่ที่ 5 W และ 15 W พบว่าค่าระดับของสัญญาณที่ปรากฏบนเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer ที่ความถี่ต้นแถบ 350.58 kHz ของ USB อยู่ที่ประมาณ -15.29 dBm และ -11.7 dBm ตามลำดับ เมื่อ

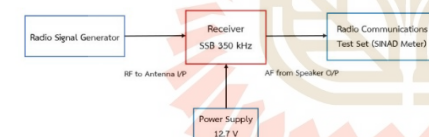
นำมาคำนวณชดเชยกับค่าการลดทอนรวมของตัวลดทอน สายนำสัญญาณและข้อต่อประมาณ 53.6 dB จะได้ค่ากำลังส่งในขณะที่ยังไม่มีการมอดูเลชันของ USB อยู่ที่ประมาณ $-15.29 + 53.6 = 38.3$ dBm (6.76 W) และ $-11.7 + 53.6 = 41.9$ dBm (15.49 W) ตามลำดับ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 11 วิธีการวัดทดสอบการทำงานของวงจรภาคส่งของวิทยุ

ตารางที่ 1 ค่ากำลังส่งที่ได้จากการวัดทดสอบ

มอดูเลชันด้วย สัญญาณเสียง	ค่าการ ลดทอน รวม (dBm)	ระดับของ สัญญาณที่เครื่อง Spectrum analyzer (dBm)	ค่ากำลังส่ง ของ เครื่องวิทยุ (dBm)
มอดูเลชัน	-53.6	-15.29	38.3
	-53.6	-11.7	41.9



รูปที่ 12 วิธีการวัดทดสอบการทำงานของวงจรภาครับของวิทยุ

รูปที่ 12 แสดงการปรับตั้งเครื่องมือวัดทดสอบสำหรับวัดค่า SINAD ของวงจรภาครับวิทยุ จากผลการวัดทดสอบค่า SINAD ของวงจรภาครับของวิทยุ โดยใช้เครื่องมือวัด Radio Communications Test Set รุ่น 2955B ยี่ห้อ Marconi Instruments ในโหมดฟังก์ชัน SINAD Meter ซึ่งวัดค่าจากสัญญาณความถี่เสียงจากเอาต์พุตของภาค AF Amplifier ของวงจรภาครับของวิทยุ โดยทำการป้อนสัญญาณแบบ AM/SSB จากเครื่องมือ AM-FM Stereo Signal Generator รุ่น VP-

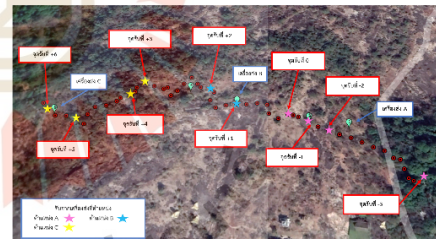
8121A ยี่ห้อ Panasonic ที่ปรับระดับแอมพลิจูดของสัญญาณไว้ที่ -80 dBm และ -100 dBm เพื่อป้องกันกับอินพุตของวงจรภาครับที่ข้อต่อของสายอากาศโดยตรง จะเห็นว่าวงจรภาครับของวิทยุสื่อสารอยู่ที่ 12.4 dB และ 13.6 dB ด้วยค่าระดับความไวสัญญาณที่อินพุตต่ำสุดเท่ากับ -80 dBm และ -100 dBm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน SINAD ที่กำหนดให้สูงกว่า 12 dB



รูปที่ 13 เครื่องวิทยุสื่อสาร 350 kHz ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมา



รูปที่ 14 พื้นที่สำหรับติดตั้งเครื่องวิทยุและสายอากาศ



รูปที่ 15 ตำแหน่งจุดที่ตั้งสายอากาศภาครับที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำและสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งเหนือโพรงถ้ำ

4.2 การวัดทดสอบที่ถ้ำปฎิหารีย์

รูปที่ 13 แสดงเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ โดยการวัดทดสอบการใช้งานกำหนดให้สายอากาศของเครื่องวิทยุสื่อสารถูกนำไปติดตั้งแบบประจำที่ไว้บนภูเขาที่อยู่เหนือโพรงถ้ำปฎิหารีย์ 3 ตำแหน่ง

(เครื่องส่ง A, B และ C) ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 ซึ่งตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งและเครื่องรับแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งผลการวัดทดสอบระดับของสัญญาณเสียงในขณะที่มีการส่งสัญญาณป้อนและคุณภาพของเสียงขณะที่มีการสนทนาได้ถูกบันทึกผลไว้ดังตารางที่ 3 จากผลการวัดทดสอบที่ถ้าปฏิบัติหริยได้แสดงจุดติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุสื่อสารในการทดสอบวิทยุสื่อสารทั้ง 3 จุดบนภูเขาและจุดติดตั้งสายอากาศภายในโพรงถ้ำจำนวน 10 จุดที่แสดงตำแหน่งไว้ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 จากนั้นทำการบันทึกผลการวัดทดสอบไว้ในในตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่ากำลังของสัญญาณที่ได้รับได้ตามแนวโพรงถ้ำทั้ง 10 จุดสามารถรับส่งสัญญาณระหว่างบนภูเขาและในโพรงถ้ำจากหน้าปากถ้ำจนถึงปลายถ้ำได้ตลอด มีระยะทางตั้งแต่จุดหน้าปากถ้ำ (จุดที่ -3) ไปจนถึงจุดสุดท้ายที่ปลายถ้ำ (จุดที่ 6) รวมทั้งสิ้น 457 เมตร โดยสามารถรับสัญญาณได้ด้วยค่ากำลังสัญญาณได้ตั้งแต่ -70.7 dBm ถึง -28.0 dBm สำหรับจุดติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุสื่อสารตำแหน่ง A บนภูเขาสามารถติดต่อสื่อสารกับจุดที่ -3 ถึง จุดที่ 0 ภายในโพรงถ้ำได้ โดยมีระดับความชัดเจนของสัญญาณ ในระดับ 4 ที่จุด -1 ถึงจุด -2 แต่ในจุด 0 ระยะทางประมาณ 95 เมตร รับค่ากำลังของสัญญาณได้ต่ำสุดและที่ระดับความคมชัดของเสียงในระดับ 2 ซึ่งพอจับใจความได้ แต่ขาดความคมชัดและเมื่อเทียบกับเครื่องรับส่งวิทยุรุ่นเดิมจะไม่สามารถติดต่อได้ในบริเวณจุดนี้ ต่อมาในส่วนช่วงกลางโพรงถ้ำ (จุด +1 และจุด +2) ระยะทางประมาณ 50 เมตร จะใช้จุดติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุสื่อสารตำแหน่ง B สำหรับใช้ในการติดต่อสื่อสาร จากการวัดทดสอบทั้งสองจุดสามารถรับกำลังงานได้สูงกว่า -50 dBm ที่ให้ระดับความคมชัดของเสียงชัดเจนดีมากอยู่ในระดับ 5 สำหรับจุดติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุสื่อสารตำแหน่ง C จะถูกติดตั้งอยู่ที่ปลายโพรงของถ้ำเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกับจุดที่ 3 ถึง จุดที่ 6 ช่วงปลายโพรงถ้ำที่มีระยะทางประมาณ 107 เมตร โดยจุดที่ 4 สามารถรับค่ากำลังของสัญญาณได้สูงสุดและที่ระดับความคมชัดของเสียงในระดับ 5 ส่วนจุดอื่น ๆ ที่เหลือมีความชัดเจนของเสียงในระดับ 3 ถึง 5 ซึ่งถือว่าได้ผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นว่าเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาสามารถรับสัญญาณและมีความชัดเจนสูงกว่าเครื่องรับส่งวิทยุรุ่นเดิม อีกทั้งยังช่วยลดจุดติดตั้งสายอากาศบนภูเขาเพื่อการติดต่อสื่อสารตลอดแนวโพรงถ้ำเหลือเพียง 3 ตำแหน่งจาก 4

ตำแหน่ง เมื่อใช้เครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาขึ้นมาแทนเครื่องวิทยุสื่อสารรุ่นเดิม ซึ่งสามารถใช้งานได้จริงเมื่อนำไปติดตั้งร่วมกับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกสำหรับการสื่อสารระหว่างบนภูเขา กับในโพรงถ้ำ

ตารางที่ 2 ตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งวิทยุสื่อสารบริเวณเหนือโพรงถ้ำปฏิบัติหริย

ตำแหน่ง เครื่องส่ง	ตำแหน่งพิกัด		ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	
A	15.601367	105.573254	256.0
B	15.601619	105.572323	260.6
C	15.601580	105.570756	250.0

ตารางที่ 3 ตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งวิทยุสื่อสารบริเวณในโพรงถ้ำปฏิบัติหริย

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทาง บนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะ การจัด (เมตร)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)		
-3	15.600884	105.571113	11.8	11.1
2	15.601340	105.573083	20.6	21.9
1	15.601435	105.572927	0.0	13.5
0	15.601505	105.572155	20.2	23.1
1	15.601619	105.572323	0.0	15.1
2	15.601781	105.572100	44.7	33.7
3	15.601871	105.571518	106.8	88.2
4	15.601744	105.571399	86.8	71.6
5	15.601522	105.570957	20.5	24.0
6	15.601608	105.570697	10.4	8.5

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องรับส่งวิทยุแอนะล็อกความถี่ 350 kHz ระบบแบบ SSB ที่ได้ต้นแบบมาจากเครื่องรับส่งวิทยุ HeyPhone 87 kHz ของสมาคม BCRA สำหรับประยุกต์ใช้ในการติดต่อสื่อสารภายในถ้ำ โดยได้ทำการพัฒนาที่ภาคส่งคือการพัฒนาวงจรภาคขยายกำลังวิทยุให้สูงขึ้นและสามารถเลือกกำลังได้ 5/15 W ทำการเพิ่มวงจรบาลันปรับค่าความเหมาะสมระหว่าง

อิมพีแดนซ์ของเครื่องรับส่งวิทยุและสายอากาศ ในส่วนของภาครับได้พัฒนาจากรูปแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ทดแทนวงจรเดิม พัฒนาวางจรขยายสัญญาณภาครับให้มีอัตราขยายสูงขึ้น ทำให้สามารถรับสัญญาณต่ำสุดได้ที่ -80 dBm และ -100 dBm ให้สามารถรับความไวการรับสัญญาณได้ดีขึ้นรวมถึงสามารถปรับลดเสียงสัญญาณรบกวนด้วยการเพิ่มวงจรสควีลซ์ จากผลการวัดทดสอบพบว่าเมื่อนำไปใช้งานกับสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลก สำหรับใช้สื่อสารจากบนภูเขาผ่านชั้นหินเข้ามาถึงภายในโพรงถ้ำ ณ ถ้ำปฎิหารีย์ จังหวัดอุบลราชธานี เมื่อติดตั้งสายอากาศและเครื่องวิทยุสื่อสารบนภูเขาเพียง 3 ตำแหน่งก็ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารได้ตลอดแนวโพรงถ้ำที่มีระยะทางรวมทั้งสิ้น 457 เมตร โดยสามารถรับสัญญาณได้ด้วยค่ากำลังสัญญาณได้ตั้งแต่ -70.7 dBm ถึง -28.0 dBm และมีระดับความคมชัดของเสียงในระดับ 2 ถึง 5 ซึ่งสามารถจับใจความได้ตลอดแนวโพรงถ้ำ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร ณ ถ้ำปฎิหารีย์

จุดที่	กำลังที่รับได้ (dBm)		ความชัดเจนของสัญญาณ	
	เครื่องเดิม	เครื่องที่พัฒนา	เครื่องเดิม	เครื่องที่พัฒนา
-3	-69.0	-53.6	3	4
-2	-72.1	-51.3	2	4
-1	-72.3	-53.9	2	4
0	รับไม่ได้	70.7	0	2
1	-60.1	-18.8	1	5
2	-75.9	-15.3	2	5
3	-69.5	-18.5	1	5
4	-74.8	-28.0	5	5
5	-74.8	-55.0	2	3
6	-83.1	-60.6	1	3

หมายเหตุ ระดับความชัดเจนของสัญญาณ

- 1 หมายถึง จับใจความไม่ได้ 2 หมายถึง ไม่ชัดเจน แต่พอฟังได้
 3 หมายถึง ชัดเจนพอใช้ 4 หมายถึง ชัดเจนดี
 5 หมายถึง ชัดเจนดีมาก

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนา กิจกรรมกระจายเสียง กิจกรรมโทรทัศน์ และกิจกรรมโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Huri and C. Ebi, "Alpine Cave Radio-Earth-current at Holloch," *Journal of BCRA Cave Radio & Electronics Group*, No.25, September 1996.
- [2] M. Bedford, "Introducing a New Cave Radio for Rescue Use," *BCRA Cave Radio & Electronics Group, Journal* 41, September 2000.
- [3] M. Bedford, "Introducing the HeyPhone," *C&C Magazine*, pp.15-17, Autumn/winter 2001.
- [4] Mike Bedford, "The HeyPhone to the Rescue," *RadCom Magazine*, pp.16-18, January 2002.
- [5] C. Trayner, "CRO HeyPhone Communications System Technical Reference Manual (Temporary)," Issue 3, pp. 1-39, 23 June 2002.
- [6] Alain Van Ryckeghem. (20 Aug 2022). *How do bats echolocate and how are they adapted to this activity?*, [Online], Available : <https://www.scientificamerican.com/article/how-do-bats-echolocate-an/>
- [7] D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar*, 2nd edition, IEE Radar Series 15, The Institute Electrical Engineers, London UK, 2004.

Low-Frequency Wave Propagation in The Cave

Atawit Jantaupalee
School of Telecommunication
Engineering, Suranaree University of
Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
d6300647@g.sut.ac.th

Peerasan Khamsalee
School of Telecommunication
Engineering, Suranaree University of
Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
peerasan@sut.ac.th

Rangsan Wongsan
School of Telecommunication
Engineering, Suranaree University of
Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
rangsan@sut.ac.th

Abstract— Wireless communication within caves or tunnels has been researched for a long time. The major problem in cave communication is the limitation of wave propagation within the conductive cave wall, which makes it like the waves traveling in the waveguide. In addition, cave environments with curved and non-uniform paths that cause high attenuation differ from propagation in free space. However, the nature of the low frequencies, with their diffraction abilities and skin effects, allows them to communicate within caves. Therefore, this paper presents a study of low-frequency wave propagation in the cave by investigating the mechanism of low-frequency propagation within the cave. The method used was an experimental study by transmitting low-frequency waves through the cave cavity, which revealed the attenuation that occurred as the wave propagated in the cave. In conclusion, the significant factor is the skin depth generated by the electrical conductivity of the cave wall, which made it possible to explain the low-frequency propagation behavior in the cave and will use to develop a low-frequency propagation model.

Keywords—Cave communication, Subterranean, Underground, Low frequency, Wave propagation model

1. INTRODUCTION

For a long time, communication within caves or tunnels has been researched. The research of underground communications was analyzed by [1], which classified communication types in underground or caves. Subterranean communication, such as Through-The-Earth communication (TTE) and radio location explained by [2], studies communication between the earth's surface and subsurface. Wireless communication in the cave and wave propagation in the cave were studied by [3]-[5] to investigate wave behavior during a cave or tunnel propagation. After a literature review of communication within caves or tunnels, we found that wireless communication is most appropriate for communicating in the cave. However, the wave attenuation depends on the operating frequency because the higher frequency causes high attenuation while propagating in the cave. According to the wave propagation theory, the low frequency has surface-wave properties and can penetrate through rock layers [6-8]. As a result, radio communication with low frequencies could provide better propagation in the cave than at higher frequencies.

Therefore, this paper presented a study of low-frequency wave propagation in the cave. An experiment was studied by transmitting low-frequency waves through the cave cavity, which revealed the attenuation that occurred as the wave propagated in the cave. In the experiment, the test location was Tham Chiang Dao, Chiang Mai, the most natural limestone cave in Thailand. To investigate the

mechanism of low-frequency propagation within the cave by testing transmission of radio frequencies 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, and 3000 kHz. Finally, the low-frequency wave propagation behavior will use to develop a low-frequency propagation model, which can take to design communication links of low-frequency in the cave or tunnel in the future.

II. EXPERIMENTATION

A. Material

To study wave propagation at low frequencies in the cave have to measure the propagation path loss, which presents the attenuation behavior of waves traveling within the cave. Research [3-5] specifically studied high-frequency bands. Accordingly, this paper proposed the investigation of low frequency by choosing the frequency from the beginning, the middle, and the end bands. The experiment frequencies consist of 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, and 3000 kHz. For below frequency of 300 kHz, [9-10] studied many bat species that use ultrasonic to resonate with obstacles in front of them to measure distances with frequencies ranging from 20 kHz - 200 kHz. Therefore, the frequencies below 300 kHz cannot measure due to avoid impacting the bat populations in this cave.

The experiment using antennas for each frequency by the frequency range 300 kHz - 350 kHz used a passive shielded loop antenna (20 Hz - 1 MHz AH Systems SAS-565L) and the frequency range 1,000 kHz - 3,000 kHz used an Isotron 200B antenna. The signal is fed from the Rohde & Schwarz SMB100B signal generator to the antenna via an LMR-400 50 Ohm low-loss cable. The receiver consists of a Rohde & Schwarz FPII spectrum analyzer with a Rohde & Schwarz HE400HF antenna module (frequency band 8.3 kHz - 30 MHz), as shown in figure 1.

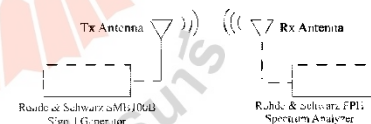


Fig. 1. The experimental equipment setup.

B. Method

The experiment method in this research is based on [3]-[5] by considering the propagation path loss of each frequency. The experimental method measures RF transmission in Line of Sight (LOS) with vertical linear polarization at both transmitter-receivers (V-V). The transmitter equipment installs at the beginning point. The receiver consists of a wideband antenna and spectrum analyzer, which measures signal levels that distance

between the receiver antennas every distance of 2 meters until the distance equals 20 m, as shown in figure 2. The received power transmitted to the spectrum analyzer's input is not the actual power because the antenna has a specific gain for that particular frequency, and the cable that connects the antenna to the spectrum analyzer has disparate losses in each frequency.

Nonetheless, the experiment aims to measure propagation path loss. The power that radiates from the antenna and propagates to the cave passage each distance can be directly considered the propagation path loss. Thus, the linear slope of receive power for every distance represents the behavior of waves traveling in the natural cave environment - if the sloping trend is steep will indicate a high loss per distance value, and a smaller slope indicates a lower loss. The LOS location should determine the linear cave passage that is the Tham Nam part in the Chiang Dao Cave, which has distances of approximately 30-50 m, a width of 7 m, and a height of 5 m, as shown in figure 3.

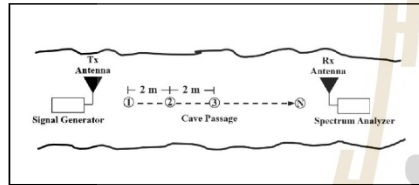


Fig. 2. The experimental diagram.



Fig. 3. Tham Nam, Chiang Dao Cave.

C. Result

The propagation path loss result is plotted in figure 4, which is the propagation path loss in LOS for every distance of 2 meters until the distance between the transmitter and receiver antennas equals 20 m. The results adjusted the received power range (normalization) by reducing data duplication at all frequencies to observe the propagation path loss per meter.

From the result, the propagation path loss slopes are 3.9 dB/m at 300 kHz, 4.25 dB/m at 1000 kHz, 1.52 dB/m at 1650 kHz, 1.76 dB/m at 2325 kHz, and 2.06 dB/m at 3000 kHz. 300 kHz, 350 kHz, and 1000 kHz have a relatively high propagation path loss due to the general propagation theory indicating that this frequency band has the propagating property as a surface wave, which can penetrate the earth more than at a higher frequency. If the wave propagates around the cave wall, which has electrical conductivity, some will penetrate and attenuate in the medium while others will reflect the receiver. The distance that the wave travels into the medium and attenuates is the skin depth. In higher frequencies, 1650 kHz, 2325 kHz, and

3000 kHz will propagate on the cave wall surface more than induces to the medium. As a result, the wave attenuation, while slightly penetrating to the medium and reflecting the receiver, has preferable power. For this reason, it has led to the study of wave propagation models, especially in the low-frequency band, with the addition of the skin effect discussed in the next section.

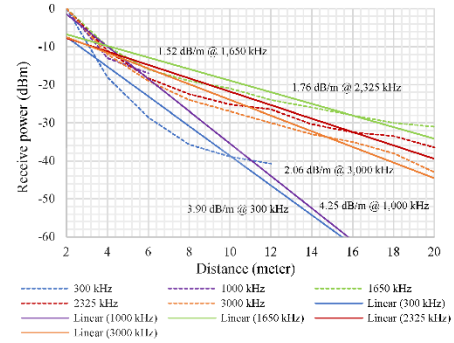


Fig. 4. The propagation path loss experiment.

III. WAVE PROPAGATION IN THE CAVE

In the previous section, we discussed the study of the behavior of low-frequency waves propagating inside the cave. In this section, the wave propagation result will analyze to develop a model of low-frequency wave propagation in the cave by developing a mathematical model to consider the attenuation caused by the medium type, the cave dimension, wall roughness, and wall tilt.

A. Propagation Mechanism

Reference [7-8] explained that the frequency range of a few kilohertz up to several megahertz would propagate with a surface wave that is the primary propagation mode. Although the frequency range of ELF to VLF band used in submarine navigation, sonar, and long-range navigation, which has long wavelengths and high skin depths, allow them to propagate over the earth or sea surface. Nevertheless, the reasons for the size of low-frequency antennas are usually very inefficient and very narrowband, which is unsuitable for communications within caves. In addition, the electrical conductivity of the limestone walls is lower than seawater, which makes the higher frequencies have a more usable skin depth but retain the surface wave properties [8]. References [8] also said that the limestone medium has a relative magnetic permeability of 7 - 8 and a relative electric permittivity of 7 - 8. The relationship between skin depth, conductivity, and frequency, can be seen in (1).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (1)$$

Where the δ is skin depth (m), ω is angular frequency (rad/m), and μ is permeability (H/m).

When the waves travel inside the cave, some waves travel within the cave cavity others will travel into the medium, which has dielectric layers that causes them to reflect and attenuate. In the lower frequency, it has more skin depth, resulting in an electrical size larger than the physical size. This concept led to the development low-frequency wave propagating attenuation model inside the cave, which explains in the next topic.

B. Propagation Modeling

Reference [4], [12-13] that has been studied in modelling radio frequency propagation within the cave by using the waveguide theory as a reference. However, in the past, it has only been studied in the high-frequency range from the UHF to SHF band, where waveguide models can still use because the wavelength of the high-frequency band is generally smaller than the cave's size. The modelling for the attenuation of wave propagation within the cave from waveguide theory is shown in (2) to (7).

According to the waveguide theory, the lowest frequency that can pass through with minimal attenuation is the cut-off frequency, which obtains from the wavelength by comparing the size of natural caves that look like rectangular waveguides. The cut-off wavelength can be shown in (2).

$$\lambda_{mn} = \frac{2\sqrt{ab}}{\sqrt{\left(m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}\right)}} \quad (2)$$

where a is the width of the waveguide (m), b is the height of the waveguide (m), and mn is the mode of the waveguide.

The refraction loss in a rectangular waveguide model assumes a dominant mode, in which the attenuation unit in decibels per meter is expressed for vertical and horizontal polarization that depends on the width and height of the cave for dominant polarization. The refraction loss expression is given in (3) and (4).

$$\alpha_v = 4.3432^2 \left(\frac{\epsilon_v}{a^3 \sqrt{\epsilon_v - 1}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_h - 1}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_h = 4.3432^2 \left(\frac{1}{a^3 \sqrt{\epsilon_v - 1}} + \frac{\epsilon_h}{b^3 \sqrt{\epsilon_h - 1}} \right) \quad (4)$$

where ϵ_h is the relative permittivity of the cave ceiling and floor, ϵ_v is the relative permittivity of the side wall.

The attenuation from the cave wall roughness can be shown in (5).

$$\alpha_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \quad (5)$$

Where Δh is the RMS roughness height of the wall (m).

Attenuation from the inclination of the cave wall, which is shown in (6).

$$\alpha_{ilt} = \frac{4.343\pi^2 \theta^2}{\lambda} \quad (6)$$

where θ is the inclination angle of the cave wall (rad).

The attenuation summary according to the propagation model in decibel per meter can be obtained from (7).

$$\alpha_{total} = \alpha_{refraction} + \alpha_{roughness} + \alpha_{ilt} \quad (7)$$

Nonetheless, when applying the waveguide model to low frequencies with wavelengths longer than the cave size, a result will approach infinity. In other words, low-frequency waves would not be able to travel through the cave cavity smaller than wavelengths. In particular, the cave dimension has an essential effect on the attenuation caused by refraction loss at a low frequency. This concept uses to develop the low-frequency propagation model by adding a range that causes from skin effect to the physical dimension, expressed in figure 5.

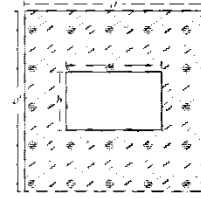


Fig. 5. The Skin effect on physical cave dimensions.

The electrical dimension of the cave can be described as (8) and (9).

$$\text{Where } a' = a + \delta \quad (8)$$

$$b' = b + \delta \quad (9)$$

Substituting (8) and (9) into the reduction equations in (3) and (4) can be expressed as (10) and (11).

$$\alpha_h = 4.3432^2 \left(\frac{\epsilon_v}{(a')^3 \sqrt{\epsilon_v - 1}} + \frac{1}{(b')^3 \sqrt{\epsilon_h - 1}} \right) \quad (10)$$

$$\alpha_v = 4.3432^2 \left(\frac{1}{(a')^3 \sqrt{\epsilon_v - 1}} + \frac{\epsilon_h}{(b')^3 \sqrt{\epsilon_h - 1}} \right) \quad (11)$$

Then, substituting (8) and (9) into the roughness attenuation equation, the result can be shown in (12).

$$\alpha_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda \left(\frac{1}{(a')^4} + \frac{1}{(b')^4} \right) \quad (12)$$

Equations (10) to (12) can explain why low-frequency waves can propagate through the cave that has a size much smaller than the wavelength while the original model

approaches infinity. The results of the skin depth model will show in the next section.

C. Modeling Result

This section will present a result comparing the propagation loss per meter from the experiment, waveguide theory, and waveguide theory that concludes the skin depth, as shown in Table I.

TABLE I. THE MODELING RESULT

Frequency	Attenuation (dB/m)		
	$a_{\text{waveguide}}$	$a_{\text{skin depth}}$	$a_{\text{experiment}}$
300 kHz	78,191.27	3.38	3.19
1,000 kHz	7,200.58	1.69	2.80
1,650 kHz	2,700.56	1.25	1.52
2,325 kHz	1,389.26	1.01	1.76
3,000 kHz	851.93	0.86	2.01

Table I shows the comparison results between the experiment in the Chiang Dao Cave, the original waveguide model, and the waveguide model with skin depth. The result of the original waveguide model using a model in (3)-(7) for computing the attenuation. At the same time, the result of the waveguide model with skin depth uses a model in (7)-(12). From (2), with the size of the cave tested (width 7 m, height 5 m), the cut-off frequency equals 37 MHz. That means the frequencies below 37 MHz, which in waveguide theory, are attenuated so high that they cannot propagate in the waveguide. However, the experimental result showed that, in practice, the waves travel in caves for reasons of the skin effect, making the model incorporating the skin depth result very close to the experimental results.

IV. CONCLUSION

This paper presents the low-frequency propagation in the cave, which focuses on developing a low-frequency propagation model by studying the wave propagation behavior in Chiang Dao cave, the most common limestone cave in Thailand. The investigation of the propagation behavior by testing for transmission of radio frequencies 300 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, and 3000 kHz in the cave passage. Then, study the mechanism of low-frequency wave propagation to analyze the surface depth that causes radio-frequency waves that are lower than the cut-off frequency of the cavern size to be able to propagate. Moreover, it compares the results of the waveguide model, the waveguide with the skin depth model, and the experiment result. In conclusion, the presented model can predict the attenuation of the low frequency in the cave.

V. FUTURE WORK

This paper has developed the propagation model at the low frequency in the cave. In the future, the other cave types will study for more comprehensive factors to maximize model accuracy. After that, more factors that additional studies can use to develop simulation or analysis software in the future. Figure 6 shows the 3D scan of Tham Nahm, Chiang Dao Cave, which uses to study the simulation of wave propagation.

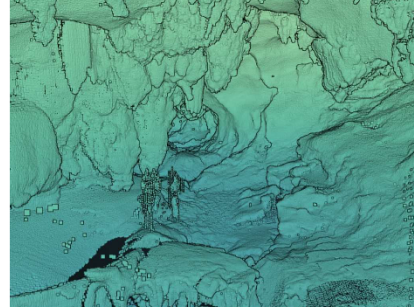


Fig. 6. 3D scan of Tham Nahm, Chiang Dao Cave.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was supported by the Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

REFERENCES

- [1] Yarkan, Serhan, et al. "Underground mine communications: A survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 11.3 (2009): 125-142.
- [2] Gibson, David. *Channel characterisation and system design for sub-surface communications*. Iulu. com, 2010.
- [3] Kjeldsen, Erik, and Marshall Hopkins. "An experimental look at RF propagation in narrow tunnels." *MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference*. IEEE, 2006.
- [4] Rak, Milan, and Pavel Pechac. "UHF propagation in caves and subterranean galleries." *IEEE Transactions on antennas and propagation* 55.4 (2007): 1134-1138.
- [5] Soo, Qi Ping, et al. "Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 17.5 (2018): 743-746.
- [6] Abrudan, Traian E., et al. "Impact of rocks and minerals on underground magneto-inductive communication and localization." *IEEE Access* 4 (2016): 3999-4010.
- [7] Siwiak, Kazimierz. *Radiowave propagation and antennas for personal communications*. Artech House, Inc., 1998.
- [8] Collin, Robert E. "Antennas and radiowave propagation." (1985).
- [9] Jones, Gareth, and Marc W. Holderied. "Bat echolocation calls: adaptation and convergent evolution." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 274.1612 (2007): 905-912.
- [10] Moss, Cynthia E. "Auditory mechanisms of echolocation in bats." *Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience*. 2018.
- [11] Daniels, David J., ed. *Ground penetrating radar*. Vol. 1. Iet, 2004.
- [12] Javadi, Fawad, et al. "An optimized approach to channel modeling and impact of deteriorating factors on wireless communication in underground mines." *Sensors* 21.17 (2021): 5905.
- [13] Bedford, Michael D., and Gareth A. Kennedy. "Modeling microwave propagation in natural caves passages." *IEEE Transactions on antennas and propagation* 62.12 (2014): 6463-6471.

An Experimental Study of Wave Propagation in Sandstone Cave

Suphawit Julthochai, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsan Wongsan
School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand

Suphawit.Jul@gmail.com, d6300647@g.sut.ac.th, peerasan@sut.ac.th, rangsan@sut.ac.th

Abstract— Effective communication in caves is crucial for rescuers during accidents or disasters. Previous studies have investigated wave propagation in tunnels and limestone caves. This paper presents an experimental study of wave propagation in a sandstone cave at Wat Tham Patihan Cave in Thailand, covering the MF to UHF bands in both line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) scenarios. The study aims to investigate the behavior of waves while traveling in the sandstone cave. The study found that in LOS, the path loss decreases with higher frequencies, contrary to the propagation theory in free space. Since waves traveling in a cave behave like they are in a dielectric-walled waveguide. In NLOS, the path loss in the L-Bend range at low frequencies was lower than that at high frequencies due to the ability to reflect, diffract, and encounter obstructions. In contrast, at 350 kHz, a high attenuation is caused by the skin effect when the wave travels through the arc, penetrating the cave wall. The study results will aid in developing communication systems and antennas for use in caves.

Keywords— Wave propagation, Cave communication, Propagation measurement

I. INTRODUCTION

For a long time, communication within mines or caves was essential to rescue in accidents or disasters within mines and caves. According to all incidents, rescuers must have the most effective communication support. Previous works have studied wave propagation in tunnels, mines, and caves. Reference [1] studied wave propagation in narrow man-made tunnels. Including the study of wave propagation in natural caves from research [2-4]. Significantly, these studies are a model for studying wave propagation in limestone caves in Thailand [5].

Therefore, this paper presented an experimental study of wave propagation in a sandstone cave at Wat Tham Patihan Cave, Thailand. Where with the experimental measure receives power at each distance to investigate the behavior of waves while traveling in the cave, covering from MF to UHF bands both in line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS). In summary, the study results will lead to the development of communication systems and antennas for use in the cave in the future.

II. METHODOLOGY

The experimental method in this paper is based on the methodology in [1-4], which led to research in [5]. The principal purpose of wave propagation study is to consider the propagation path loss in point-to-point communication. To predict each frequency's wave attenuation behavior while propagating in the cave. Therefore, this experimental method will measure the RF transmission within the cave in Line of Sight (LOS) and Non-Line of Sight (NLOS). The experiment frequency consists of 350 kHz, 1,650 kHz, 3 MHz, 16.5 MHz, 30 MHz, 165 MHz, 300 MHz, 1.65 GHz,

and 3 GHz, which cover the MF to UHF bands by choosing beginning, middle, and end of each.

The propagation path loss was measured using a wideband RF signal generator, RF spectrum analyzer, and antennas for each frequency band. On the transmitting side, a narrow-band continuous wave (CW) signal is fed from the Rohde & Schwarz SMB100B signal generator to the antenna via a 50 Ohm low-loss cable. The receiving side consists of a Rohde & Schwarz FPH spectrum analyzer with a Rohde & Schwarz HE400UWB antenna and a Rohde & Schwarz HE400HF antenna. All transmitting equipment is positioned at the starting point. The receiving equipment will measure signal levels by the initial distance between the transmitting and receiving antennas, which is 2 meters. Also, it will be progressively enlarged by 2 meters until the last distance equals 20 meters, as shown in Figure 1. Figure 2 shows that the experiment location is the Wat Tham Patihan cave. This section is located in the middle of the cave, consisting of LOS and NLOS parts. Specifically, the radiated power from the transmitter antenna can consider path loss by the slope of received power and predict the behavior of waves traveling in the cave. The LOS experiment can consider such loss directly, and the NLOS experiment will investigate the ability of diffraction or reflection on the cave wall with windings route for each frequency.

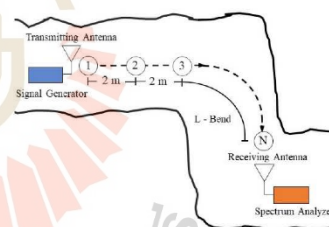


Fig. 1. The diagram of the experimental method



Fig. 2. The experiment location is called "Wat Tham Patihan Cave"

III. RESULT AND DISCUSSION

This section presents a graph comparing the propagation loss per meter of the LOS experiment, as shown in Figure 3, and the results of the NLOS experiment, shown in Figure 4.

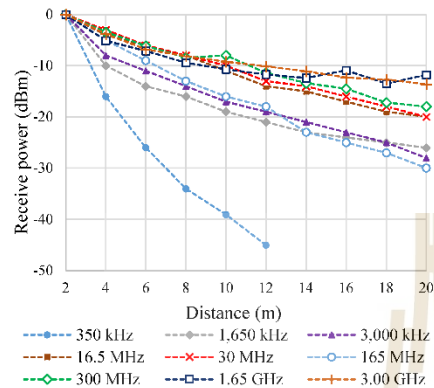


Fig. 3. The result of the LOS experiment covers the MF to UHF bands

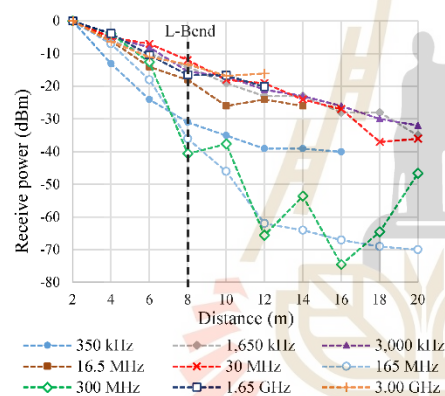


Fig. 4. The result of the NLOS experiment covers the MF to UHF bands

From the LOS results in Figure 3, the slope of the graph in dB/m can be shown as follows: 4.30@ 350 kHz, 1.24@ 1,650 kHz, 1.37@ 3,000 kHz, 1.10@ 16.5 MHz, 1.08@ 30 MHz, 1.62@ 165 MHz, 0.97@ 300 MHz, 0.59@ 1.65 GHz, and 0.67@ 3 GHz. The attenuation is lower with higher frequencies, contrary to the propagation theory in free space. Caused by waves traveling in a cave are like traveling in a dielectric-walled waveguide. However, from [5], it was found that at frequencies below the cut-off frequency of the waveguide theory still propagated due to the skin effect, allowing the wave to travel into the cave wall.

The NLOS measurement results can describe wave behavior when encountering the obstructed cave wall onto the straightway (L-Bend). Therefore, the NLOS test consists of a LOS part and an NLOS part, an L-Bend curve obscuring the traveling waves in line of sight at a distance from 8 meters up. Figure 4, the slope of the graph in dB/m at L-

bend shows as follows: 1.10@ 350 kHz, 1.54@ 1,650 kHz, 1.44@ 3,000 kHz, 1.10@ 16.5 MHz, 2.11@ 30 MHz, 2.73@ 165 MHz, 1.45@ 300 MHz, 0.90@ 1.65 GHz, and 0.70@ 3 GHz. The results showed that the path loss in the L-Bend range at low frequencies was lower than attenuation per distance at high frequencies due to the ability to reflect, diffract, and encounter obstructed. Nonetheless, at 350 kHz, a high attenuation is caused by the skin effect while the wave travels through the arc, penetrating the cave wall.

IV. CONCLUSIONS

Effective communication is crucial for rescuers in mines and caves, and previous studies have investigated wave propagation in these environments. This paper presents an experimental study on wave propagation in the sandstone cave at Wat Tham Patihan Cave, covering the MF to UHF bands and examining point-to-point communication in both line of sight (LOS) and non-line of sight (NLOS) propagation. The results show that each frequency's behavior has advantages and disadvantages. The path loss in the LOS propagation is lower with higher frequencies that contrast with free-space theory because the wave propagation in the cave is similar to traveling in a dielectric-walled waveguide, and frequencies below the waveguide cutoff still propagate due to the skin effect. The NLOS results describe the wave behavior when encountering the obstructed cave wall in the L-Bend curve, demonstrating that the path loss at low frequencies is lower than at high frequencies due to the wave's ability to reflect, diffract, and encounter obstructions. However, at 350 kHz, the wave experiences high path loss due to the skin effect while traveling through the arc and penetrating the cave wall. Overall, this study provides valuable insights into RF propagation in sandstone caves, which can inform the design and deployment of communication systems in similar environments.

V. FUTURE WORK

This research is part of the study of wave propagation within caves. The complete study will focus on studying wave propagation behavior by comparing it with mathematical models and computer simulations.

REFERENCES

- [1] E. Kjeldsen, and M. Hopkins. "An experimental look at RF propagation in narrow tunnels." In MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference, IEEE, pp. 1-7, October 2006.
- [2] M. Rak, and P. Pechac. "UHF propagation in caves and subterranean galleries." IEEE Transactions on antennas and propagation 55, no. 4, pp. 1134-1138, April 2007.
- [3] Bedford, Michael D., and Gareth A. Kennedy. "Modeling microwave propagation in natural caves passages." IEEE Transactions on antennas and propagation 62, no. 12, pp. 6463-6471, October 2014.
- [4] Soo OP, Lim SY, Lim DW, Yap KM, Lau SL. Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 17, no. 5, pp. 743-746, March 2018.
- [5] R. Wongsan, P. Khamsalee, A. Wannakomol, P. Kumsawat, A. Srikaew, and A. Jantaupalee. "A Study on Radio Wave Propagation in Chiang Dao Cave". NBTC Journal, vol. 6, no. 6, pp. 123-47, November 2022.

An Experimental Study of Electrodes for Through-The-Earth 350 kHz MF Communication

Chokpiwat Pruekchatsiri*, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsan Wongsan
School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
*E-mail: tangibson2013@gmail.com

Abstract— This paper proposes an experimental investigation of electrodes for Medium Frequency (MF) communication Through-The-Earth (TTE) at an operating frequency of 350 kHz. The electrodes are spiked into the ground at the end of each earth-grounded antenna lead. The experiment includes a transmitter system and a receiver system, and the received signal power, conductivity, and impedance are measured using a spectrum analyzer and an LCR meter when the type and number of electrodes are varied. The results show that different electrode types impact conductance and impedance, with higher conductivity and lower impedance electrodes receiving greater signal power compared to other electrodes. Moreover, increasing the number of electrodes enhances the system's ability to receive higher signal power due to improved conductivity and lower impedance, bringing it closer to the impedance of the radio transceiver. These are the importance of selecting suitable electrode types and numbers for optimal signal transmission and receiving in TTE communication at 350 kHz.

Keywords—Medium frequency, Electrode, Through-The-Earth.

I. INTRODUCTION

For many years, researchers have studied and developed the Through-The-Earth (TTE) communication technique. Initially, this technique utilized radio signals below the VLF band transmitted by a large antenna on the earth's surface through the earth layer to the underground mine. Two electrodes connected to soil or rock at both the transmitter and receiver were used to discharge an electric current into the earth's surface. However, the electrical field generated from current intensity exponentially attenuates from the earth's surface, and this attenuation increases proportionally to the frequency. Hence, lower frequencies are ideal for TTE communications [1-3]. Nevertheless, frequencies within the range of 20-290 kHz used for cave communications can interfere with the subsistence of bats in the cave and, consequently, harm the cave environment. Therefore, opting for the lowest possible frequency at 350 kHz, the beginning of the MF band, was necessary to avoid this interference.

In TTE communication, the transmitter uses a pair of ground electrodes located at the end of an earth-grounded antenna to inject an AC current into the earth. The electrodes are connected by lines of current that create equipotential surfaces around them. The penetration of the current through the earth depends on the signal frequency and the conductivity of the soil [4]. Metallic rods are commonly used as electrodes for the surface unit, while copper braid immersed in water or buried in the mud is preferred for underground stations.

In this paper, we experiment with the impact of different electrode types and numbers on Medium Frequency communication Through-The-Earth at 350 kHz. They measure signal power, conductivity, and impedance and find

that high-conductivity and low-impedance electrodes receive the highest signal power. Additionally, increasing the number of electrodes leads to higher signal power and lower impedance. The results show the significance of selecting appropriate electrode types and numbers to ensure efficient signal transmission and reception in TTE communication.

II. EXPERIMENTAL SYSTEM AND RESULTS

At first, the experimental setup for Through-The-Earth communication for measurement of the received signal power includes a transmitter system with an earth-grounded antenna featuring a V-shaped electrode and an SMB100B signal generator, as well as a receiver system with an earth-grounded antenna using a different type of electrodes such as V-shaped, Y-shaped, X-shaped and a Rider FPH spectrum analyzer, as shown in Fig. 1.



Fig. 1. TTE experimental system.



Fig. 2. The experimental area.

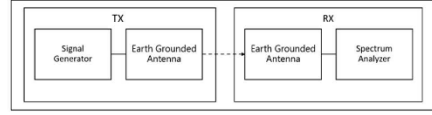


Fig. 3. The block diagram of the TTF experiment

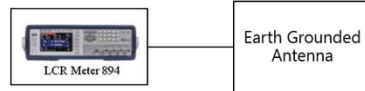


Fig. 4. The block diagram of the impedance and conductivity experiment

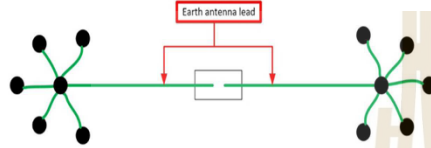


Fig. 5. The 6 electrodes in star formation.

The experimental setup at the Suranaree University of Technology as shown in Fig. 2-4, involves transmitting waves through the earth from a grounded antenna with V-shaped electrodes at both ends, which is spiked into the earth and operates at a frequency of 350 kHz with a transmit power of 15 dBm. The distance between the transmitter and receiver systems is 30 m [4]. The receiving system includes a grounded antenna with different types of electrodes, including V-shaped, Y-shaped, and X-shaped, which were adjusted to measure the power received by a spectrum analyzer and to measure conductivity and impedance using B&K Precision 894 at 350 kHz. The impedance of the ground electrodes impedance model consists of wire impedance, earth impedance, and contact electrode impedance.

Table I shows that the V-shaped, Y-shaped, and X-shaped electrodes received signal powers of -54.8 dBm, -55.1 dBm, and -54.1 dBm, respectively.

The impedance values for the different electrode shapes were $239.8+j25.8$ Ohm, $220.4+j39.4$ Ohm, and $195.47+j39.4$ Ohm, respectively. The conductivity values for the electrode shapes were 4.11 mS, 4.48 mS, and 4.91 mS, respectively. Therefore, the X-shaped electrode had the highest signal power due to its high conductivity and low impedance.

After that, we measured to investigate the effect of increasing the number of V-shaped electrodes on the received signal power, impedance, and conductivity. The experiment involved varying the number of V-shaped electrodes from 1 to 6 electrodes arranged in a star formation, as shown in Fig. 5.

Table II shows that increasing the number of electrodes led to higher conductivity and lower impedance. Specifically, with six V-shaped electrodes arranged in a star pattern, the received signal power increased by 6.1 dB to -48.7 dBm. Additionally, the impedance value of the 6 electrodes is close to that of the radio transceiver, which is 50 Ohm. Therefore, no matching circuit is required before connecting to the radio transceiver.

TABLE I. THE EXPERIMENTAL RESULTS

Type of Electrodes	Received Signal Power (dBm)	Impedance (Ohm)	Conductivity (mS)
V-shaped	-54.8	$239.8+j25.8$	4.11
Y-shaped	-55.1	$220.4+j39.4$	4.48
X-shaped	-54.1	$195.47+j39.4$	4.91

TABLE II. THE EXPERIMENTAL RESULTS OF INCREASING THE NUMBER OF V-SHAPED ELECTRODES

The number of Electrodes	Received Signal Power (dBm)	Impedance (Ohm)	Conductivity (mS)
1	-54.8	$239.8+j25.8$	4.11
2	-51.9	$121.1+j58$	6.7
3	-50.4	$92.3+j62.9$	7.39
4	-49.4	$77.4+j64.8$	7.6
5	-49.1	$68.4+j65.6$	7.61
6	-48.7	$61.6+j66.2$	7.73

III. CONCLUSIONS

This paper proposes an experimental investigation of electrode configurations for Medium Frequency communication Through-The-Earth at 350 kHz. The electrodes are connected to earth-grounded antennas and spiked into the ground. The experiment includes a transmitter and receiver system, with a spectrum analyzer and LCR meter used to measure received signal power, conductivity, and impedance for different electrode types and numbers. From the experimental results, we found that electrode type significantly affects conductance and impedance, with higher conductivity and lower impedance electrodes receiving higher signal power than others. Additionally, increasing the number of electrodes improves the system's ability to receive higher signal power by enhancing conductivity and reducing impedance. The impedance value of the 6 electrodes is close to that of the radio transceiver, which is 50 Ohm. Therefore, no matching circuit is required before connecting to the radio transceiver. This experimental study is the importance of selecting appropriate electrode configurations for optimal signal transmission and reception in TTF communication at 350 kHz.

REFERENCES

- [1] T. D. Barkand, N. W. Damiano, and W. A. Shumaker, "Through-the-Earth, Two-Way, Mine Emergency, Voice Communication Systems," Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 2006.
- [2] G. David, "Channel characterisation and system design for sub-surface communications", Lulu.com, 2010.
- [3] N. Damiano, L. Yan, B. Whisner, and C. Zhou, "Simulation and measurement of through-the-earth (TTF), extremely low-frequency signals using copper-clad, steel ground rods," 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, USA, 2016.
- [4] V. Battaler, A. Muñoz, P. Molina, A. Mediano, J.A. Cuchi, and J.L. Villarro, "Improving Medium Access in Through-The-Earth VLF-LF Communications," Journal of communications, vol. 4, no. 4, pp. 284-294, 2009.

ประวัติผู้เขียน

นายอรรณวิธ จันทอุปสี เกิดเมื่อวันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2540 ที่จังหวัดนนทบุรี เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุราชประสิทธิ์ จังหวัดนนทบุรี ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนบ้านปากช่อง (ครูสามัคคี 1) ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ด้วยเกรดเฉลี่ย 3.69 (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) ในปีการศึกษา 2561 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยเกรดเฉลี่ย 4.00 ด้วยทุนเรียนดีระดับบัณฑิตศึกษา หลังจากนั้นในปีการศึกษา 2563 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ด้วยทุนเรียนดีระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัย

