

การพัฒนาเครื่องรับส่งวิทยุระบบแอนะล็อก 350 kHz สำหรับ ประยุกต์ใช้เพื่อการสื่อสารในถ้ำ

Development of 350 kHz Analog Transceiver for Applying in Cave Communication

พีรพันธุ์ คำสาลิ* อรรถวิทย์ จันทอุปสี และ รังสรรค์ วงศ์สรรค์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
* ผู้รับผิดชอบบทความ
peerasan@sut.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 ส่วนของวงจรภาคส่งได้พัฒนาวงจรภาคขยายกำลังส่งวิทยุให้สามารถเลือกกำลังส่งได้ 5 และ 15 W ขณะที่วงจรบาลันได้ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของถ้ำ ส่วนของวงจรภาครับได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นวงจรแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ ขณะที่วงจรส่วนหน้าของภาครับได้เพิ่มเติมวงจรขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำเพื่อเพิ่มความไวการรับสัญญาณต่ำให้ดีขึ้นสามารถรับสัญญาณต่ำสุดได้ที่ระดับ -80 dBm และ -100 dBm นอกจากนี้ยังได้เพิ่มวงจรสควเอลซ์สำหรับกำจัดสัญญาณเสียงรบกวนในกรณีที่ไม่มีสัญญาณจริงถูกส่งเข้ามาที่ยังวงจรภาครับอีกด้วย จากผลการทดสอบการใช้งานที่ถ้ำป่าภูหาวรี จังหวัดอุบลราชธานี (ระยะทางรวมตลอดทางเดินในถ้ำ 457 เมตร) พบว่าเมื่อมีการส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มอดูเลตแล้วจากเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนา โดยส่งผ่านสายอากาศแบบผ่านพื้นโลกจากพื้นที่บนภูเขาผ่านชั้นหินเข้าไปภายในโพรงถ้ำพบว่าระบบสื่อสารในถ้ำสามารถรับส่งสัญญาณระหว่างบนภูเขาและตลอดทางเดินภายในถ้ำได้อย่างมีคุณภาพ

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 หมูป่า ที่เกิดขึ้นที่ถ้ำขุนน้ำนางนอน ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย พบว่าหน่วยกู้ภัยที่เดินทางเข้าไปภายในถ้ำครั้งแรกมีความจำเป็นต้องการใช้วิทยุสื่อสารหลักที่นำติดตัวไปให้สามารถติดต่อสื่อสารได้ตลอดเส้นทางภายในถ้ำได้ อย่างไรก็ตามปัญหาอุปสรรคที่เกิดขึ้นคือระบบวิทยุสื่อสารหรือระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในย่าน VHF และ UHF ไม่สามารถใช้ในการติดต่อสื่อสารระยะไกลภายในถ้ำได้ เนื่องจากเกิดการสูญเสียของระดับสัญญาณที่เกิดจากการดูดซับและหักล้างกันเองของคลื่นที่เกิดการสะท้อนหรือบางส่วนเกิดการเลี้ยวเบนตามสภาพแวดล้อมของผนังถ้ำ พื้นถ้ำ และเพดานถ้ำที่มีลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกันในทุก ๆ บริเวณ ทำให้เกิดการสูญเสียระดับของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป (Transmission path loss) รวมทั้งเทคนิคการผสมสัญญาณ (Modulation) ที่ใช้ในเครื่องวิทยุสื่อสารที่มีอยู่นั้นก็ส่งผลกระทบต่อแปรคลื่นภายในถ้ำด้วย

สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายสำหรับใช้งานภายในถ้ำได้เริ่มขึ้นในปี 1982 [1] ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยมีชื่อว่า Spelephon 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 ย่านความถี่และวิธีการผสมสัญญาณเสียงเข้ากับสัญญาณคลื่นความถี่ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์เข้าด้วยกัน โดยส่วนของระบบสายอากาศจะมีความแตกต่างที่ชัดเจนที่สุด คือใช้ระบบสายอากาศที่เรียกว่า สายอากาศฝังลงพื้นโลก (Grounded-Earth antenna) ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารได้ลึกกว่าและระยะไกลกว่า Molefone ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสื่อสารในถ้ำทั้งสองระบบจะเน้นสำหรับการติดต่อสื่อสารจากผิวดินภายนอกที่อยู่เหนือพื้นดินในถ้ำที่เป็นเป้าหมายคล้ายกับระบบเรดาร์แบบเจาะพื้นผิว (Penetrating radar) และระบบสื่อสารทั้งสองรุ่นถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้งานสำหรับนักกู้ภัยถ้ำ (Cave rescue) เฉพาะกลุ่มเท่านั้น จึงไม่เกิดความแพร่หลายและไม่ปรากฏอยู่ในฐานข้อมูลงานวิจัยสากลที่มีอยู่ในปัจจุบันเท่าใดนัก

ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องรับส่งวิทยุระบบแอนะล็อกที่ความถี่ 350 kHz ที่ย่านความถี่กลางเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนต่อค้างคาวที่อาศัยในถ้ำ โดยใช้ต้นแบบจาก HeyPhone ให้มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารได้ตลอดโพรงถ้ำโดยการเพิ่มกำลังส่งและเพิ่มวงจรขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำที่ภาครับให้มีความไวในการรับสัญญาณต่ำได้ดีมาก

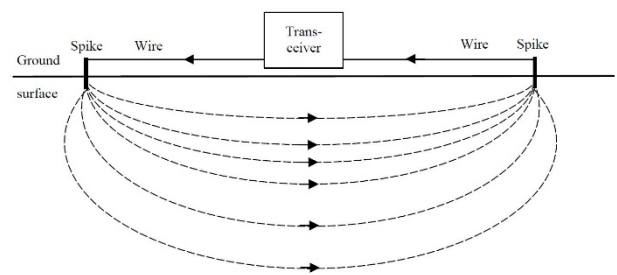
ยิ่งขึ้น นอกจากนี้เพิ่มวงจรแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ทดแทนวงจรเดิมและเพิ่มวงจรบาลันปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของถ้ำซึ่งส่งผลให้สายอากาศทำงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแพร่คลื่นผ่านพื้นโลก

จากปรากฏการณ์ของคลื่นความถี่วิทยุที่ตกกระทบกับหินหรือดิน โดยที่กึ่งกลางของคลื่นที่ตกกระทบไม่ได้หยุดหรือหมดหายไปในพื้นที่นั้นใดที่พื้นผิว แต่ซึมซาบลงไปยังอย่างรวดเร็วด้วยการผ่านทะลุ (Penetration) ลงไปในเนื้อหินหรือเนื้อดินโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุส่งผ่านทะลุเข้าไป ดังนั้นหากมีการใช้ความยาวคลื่นที่ยาวพอ ก็เกิดระยะทางของการผ่านทะลุที่ไกลขึ้น เช่น กรณีของระบบวิทยุสื่อสาร HeyPhone [3-4] ได้ใช้ความถี่ 87 kHz มีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 3.5 กิโลเมตร แต่เนื่องจากความเร็วคลื่นจะลดลงขณะที่เดินทางในหิน ทำให้ความยาวคลื่นใต้ดินเหลือเพียงหลักร้อยเมตร ซึ่งหากความยาวคลื่นใต้ดินนี้มีขนาดมากกว่านี้ก็จะทำให้สามารถเกิดการเหนี่ยวนำผ่านทะลุได้ไกลมากขึ้นหลายร้อยเมตร สำหรับหลักการส่งคลื่นดินผ่านพื้นโลก โดยใช้วิธีเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าผ่านชั้นหิน โดยเทคนิคในการแพร่คลื่นผ่านพื้นโลกนั้นแตกต่างจากการแพร่คลื่นในอากาศว่างปกติของการสื่อสารบนพื้นผิวโลก (Terrestrial communication) ที่จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศในโหมด TEM คือใช้วิธีการเหนี่ยวนำประจุที่เกิดการสะสมที่ปลายของเส้นลวดตัวนำปล่อยลงสู่พื้นโลกในรูปของสนามไฟฟ้า (Induction current) ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของกระแสสลับตามความถี่ที่ออกแบบ สนามไฟฟ้างดงามเมื่อถูกปล่อยจากปลายเส้นลวดด้านหนึ่งลงสู่พื้นโลกจะเกิดการเหนี่ยวนำในชั้นดินหรือหินไปสู่ปลายสายทองแดงอีกด้านหนึ่งกลับไปสู่เครื่องรับส่งวิทยุ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในพื้นโลกจะใช้เส้นทางแรกที่สั้นที่สุดระหว่างจุดที่เชื่อมต่อพื้นโลกทั้งสองจุด และมีอีกส่วนหนึ่งที่เกิดการเหนี่ยวนำแผ่ออกไปในส่วนที่ลึกลงไปใต้พื้นโลกจนถึงโพรงถ้ำ โดยมีเวกเตอร์ของเส้นแรงไฟฟ้าแผ่ออกไปเป็นเส้นโค้งเช่นเดียวกับสายอากาศแบบไดโพลที่ใช้ในการแผ่คลื่นในอากาศว่าง จำเป็นต้องใช้สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก) เพื่อให้

การเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าระหว่างปลายของเส้นลวดทั้งสองด้านเกิดขึ้นในพื้นโลกได้สะดวกขึ้น จึงใช้แท่งโลหะทำหน้าที่เป็นแท่งอิเล็กโทรดต่อที่ปลายทั้งสองของเส้นลวดสำหรับฝัง (Spike) ลงพื้นดินในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งสายอากาศ [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำลงไปยังในพื้นโลกสู่โพรงถ้ำผ่านชั้นหินที่เป็นตัวกลางที่ไม่สามารถกำหนดให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ (Inhomogeneous medium) เนื่องจากไม่สามารถทราบถึงชั้นหินในพื้นโลกที่กระแสไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำลงไปยังโพรงถ้ำได้

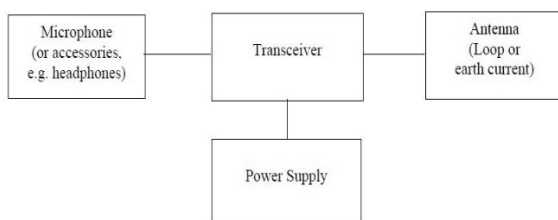


รูปที่ 1 หลักการทำงานของสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

2.2 วิทยุสื่อสารสำหรับใช้สื่อสารภายในถ้ำ

การออกแบบและพัฒนางจรเครื่องวิทยุสื่อสารแบบส่งผ่านพื้นโลก หรือที่เรียกว่าระบบสื่อสารแบบ TTE (Through-The-Earth communication) นิยมใช้การผสมสัญญาณแบบ SSB ที่แถบความถี่ข้างด้านสูง (USB: Upper Side Band) เนื่องจากประหยัดพลังงาน ซึ่งส่งสัญญาณออกไปก็ต่อเมื่อมีการพูดเข้าไปในไมโครโฟนเท่านั้น และในขณะที่หยุดพูดแม้ว่าจะมีการกดสวิตช์ PTT เพื่อพูด (Push-to-Talk switch) ที่ไมโครโฟนก็ตามก็จะมีพลังงานปริมาณน้อยมาก ๆ ถูกส่งออกไป และใช้แถบความถี่ (Frequency bandwidth) ขนาด 2.6 kHz ซึ่งแคบมาก ๆ โดยเครื่องวิทยุสื่อสารที่ความถี่ 87 kHz “HeyPhone” เป็นเครื่องวิทยุที่ได้มีการทดสอบใช้งานจริงเพื่องานกู้ภัยในถ้ำแล้วในประเทศสหราชอาณาจักร (British Cave Research Association: BCRA) ซึ่งออกแบบโดยทีมของ Dr. David Gibson แห่งสมาคมดังกล่าว จากรูปที่ 2 เป็นไดอะแกรมของระบบวิทยุสื่อสารสำหรับระบบส่งผ่านพื้นโลกของ HeyPhone โดยส่วนที่เป็นเครื่องรับส่ง (Transceiver) ได้ออกแบบให้รับส่งสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียว (Single channel) แบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (Half duplex) และใช้วิธีการผสมสัญญาณแบบ SSB โดยใช้แถบความถี่ข้างด้าน

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



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของระบบวิทยุสำหรับส่งผ่านพื้นโลก มีวงจรควบคุมสquelch เพิ่มเติมในส่วนภาครับ

3. การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องวิทยุสื่อสาร

สำหรับการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ SSB-TTE ได้พัฒนาและปรับปรุงโดยอ้างอิงจากการเครื่องวิทยุสื่อสารที่ความถี่ 87 kHz “HeyPhone” มีทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ส่วนที่เป็นเครื่องส่ง (Transmitter) เครื่องรับ (Receiver) และส่วนควบคุม (Control) โดยได้พัฒนาให้สามารถทำงานที่ความถี่ 350 kHz เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความถี่ที่ต่ำกว่า 290 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ค้างคาที่อาศัยอยู่ในถ้าในประเทศไทยใช้ในการนำทาง [6] ซึ่งจากผลการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF, VHF และ UHF ภายในถ้าหิปปูนและถ้าหิปปูนพบว่าการใช้คลื่นความถี่ 350 kHz (MF ต้นแถบ) มีการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินหรือแพร่ผ่านพื้นโลกจากบนภูเขาลงไปในโพรงถ้าหิปปูนได้ดีที่สุด โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านชั้นหิปปูนต่ำกว่าความถี่ 87 kHz แต่จะสูงกว่าเมื่อใช้งานในโพรงถ้าหิปปูนทราย [7] ทั้งนี้จากแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. กำหนดให้ช่วงความถี่ 350 kHz สำหรับใช้ในงานกิจการวิทยุนำทางทางการบิน จึงได้ขออนุญาตทางสำนักงาน กสทช. เพื่อใช้คลื่นความถี่ 350 kHz ในการวัดทดสอบ และข้อเสียของระบบ SSB ก็คือ ทางเครื่องรับจะไม่ทราบว่ใน

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

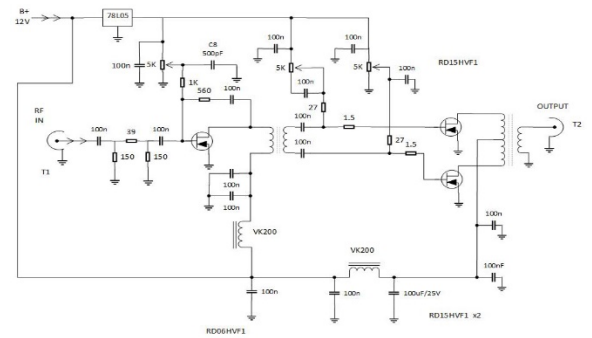
3.1 ภาคเครื่องส่ง (Transmitter)

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 ต่อเข้ากับตัว Power Amplifier ขนาด 5 W, 10 W และ 15 W ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกเพื่อส่งสัญญาณจากบนภูเขาลงไปยังภายในโพรงถ้าหิปปูนทราย ซึ่งภายในโพรงถ้าหิปปูนสายอากาศภาครับแบบฝังลงพื้นโลกต่อเข้ากับเครื่อง Spectrum Analyzer เพื่ออ่านค่าระดับสัญญาณ โดยภาครับเมื่อย้ายตำแหน่งเข้าไปภายในโพรงถ้าหิปปูนจำเป็นต้องย้ายสายอากาศภาคส่งให้ติดตั้งตามแนวโพรงถ้าหิปปูนเพื่อการติดต่อที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในบางจุดจะไม่สามารถติดตั้งสายอากาศที่อยู่บนภูเขาลงได้เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย จึงต้องทดสอบเพื่อหาลำโพงของ Power Amplifier ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเมื่อภาครับเคลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ภายในโพรงถ้าหิปปูน จากการทดสอบพบว่าที่กำลังขนาด 5 W

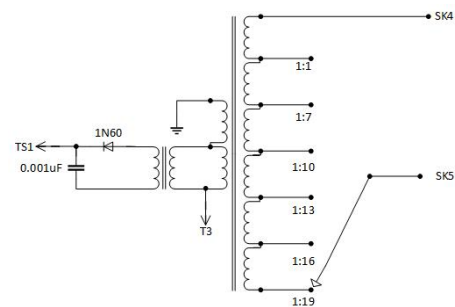
เมื่อสายอากาศภาครับเคลื่อนที่เข้าไปภายในถ้ำจนมีระดับสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ต่ำกว่า -75.9 dBm ส่งผลให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จึงเพิ่มกำลังส่งเป็น 10 W และ 15 W พบว่าที่กำลังขนาด 15 W สามารถทำให้การติดต่อสื่อสารภายในโพรงถ้ำที่ปลายโพรงถ้ำรับสัญญาณได้ชัดเจนขึ้น 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

เนื่องจากในสภาพของชั้นดินและชั้นหินบริเวณที่ติดตั้งแท่งอิเล็กทรอนิกส์ของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกมีลักษณะแตกต่างกัน ส่งผลให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไปจึงต้องเพิ่มวงจรภาค Matching Balun เพื่อช่วยให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัันให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เอาต์พุตของวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ 350 kHz ภาคสุดท้าย วงจรนี้ได้ใช้หม้อแปลง

แมตซ์ซิง (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

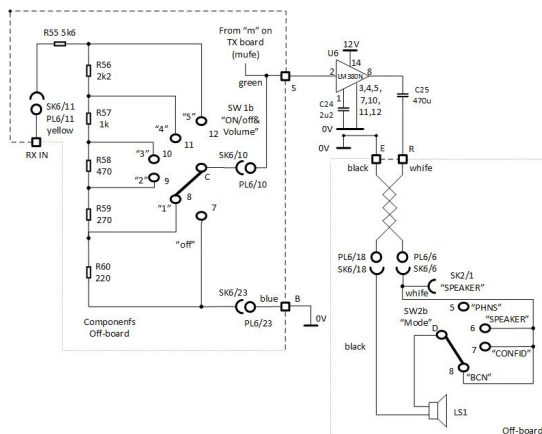


รูปที่ 4 วงจรภาค Matching Balun

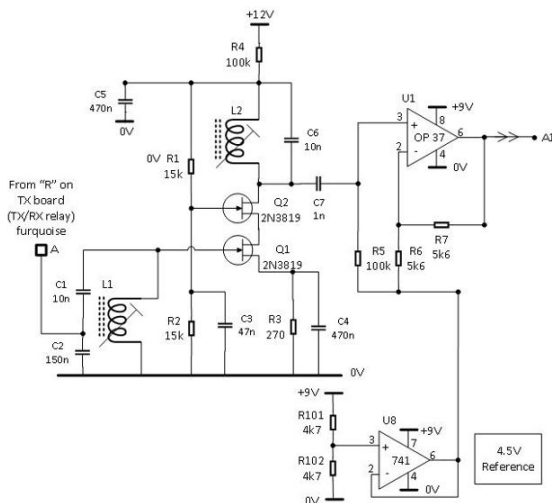
3.2 ภาคเครื่องรับ (Receiver)

วงจรหลักของภาครับวิทยุแบบ SSB-TTE- 350 kHz ผู้วิจัยได้ยกเลิกการใช้วงจรเดิมจากเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz ของสมาคม BCRA ที่ใช้วงจร IQ ออสซิลเลเตอร์ โดยได้ออกแบบวงจรภาครับสัญญาณ SSB 350 kHz ให้เป็นแบบ Superheterodyne พัฒนาวงจรขยายสัญญาณภาครับให้มีอัตราขยายสูงขึ้น และพัฒนาวงจรขยายเสียง (AF amplifier) ก่อนส่งออกลำโพงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถปรับระดับความดังได้ 6 ระดับรวมทั้งออกแบบวงจรสควีลซ์ เพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานของวงจขยายสัญญาณภาครับวงจขยายสัญญาณเสียงเพื่อส่งออกลำโพงตามรูปที่ 5 ยังคงเลือกใช้วงจรขยายด้วยไอซีเบอร์ LM380N ซึ่งให้คุณภาพเสียงที่คมชัดดีอยู่แล้ว โดยยังคงรูปแบบการใช้งานให้สามารถปรับลด

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



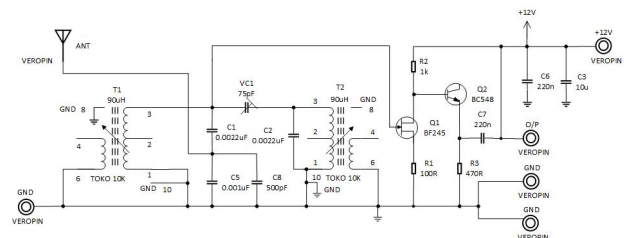
รูปที่ 5 วงจรขยายสัญญาณเสียงก่อนส่งออกลำโพงปรับระดับความดังของเสียงได้ 6 ระดับ



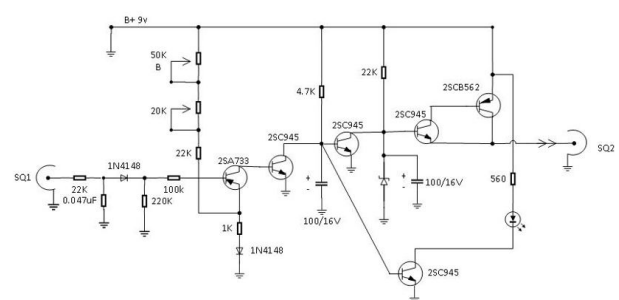
รูปที่ 6 วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz แบบสัญญาณรบกวนต่ำ อัตราขยาย 30 dB

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

สองตัว (Q1 และ Q2) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่ 350 kHz ที่มีระดับกำลังสูงกว่า -80 dBm เข้ามาขยายให้มีกำลังสูงขึ้น โดยมีวงจรกรองขาเข้าแบบแถบแคบ (Narrow-band input filter) L1, C1, C2 ที่ออกแบบไว้ที่ความถี่กลางเท่ากับ 350 kHz รับสัญญาณจากสายอากาศเข้ามาเพื่อส่งต่อไปให้กับ 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

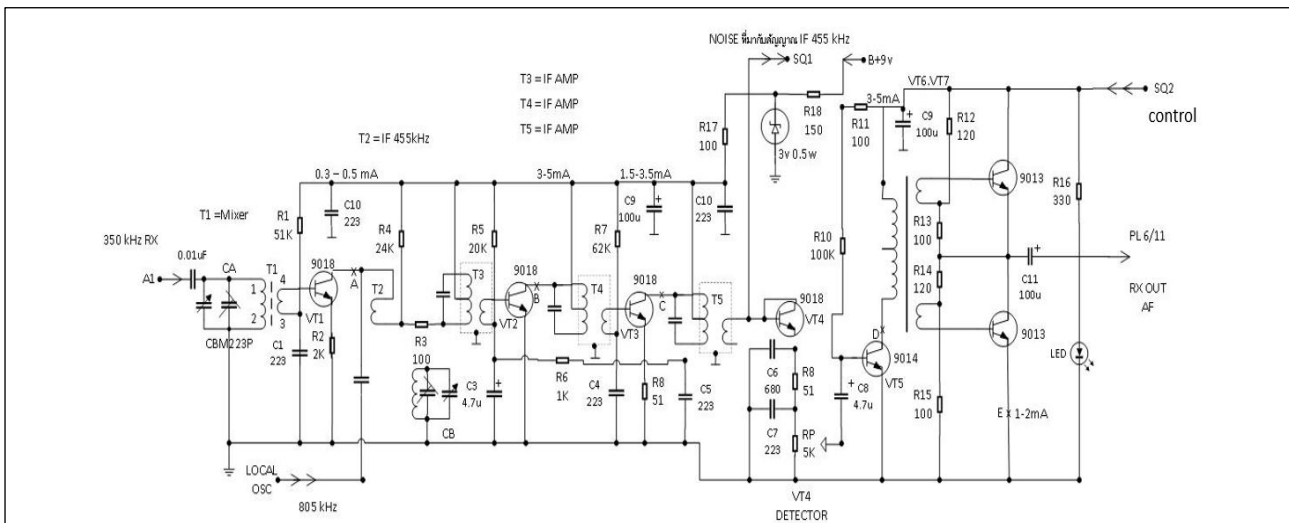


รูปที่ 7 วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz แบบสัญญาณรบกวนต่ำ อัตราขยาย 20 dB



รูปที่ 8 วงจรสควีลซ์ สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรขยายเสียงในวงจรภาครับ

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

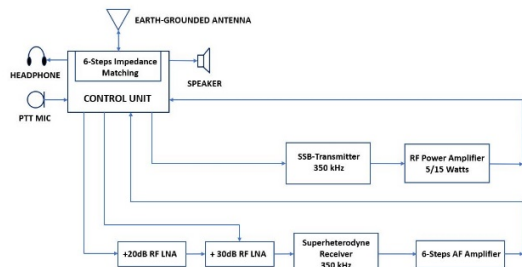


รูปที่ 9 วงจรภาครับระบบ Superheterodyne แบบ SSB ความถี่ 350 kHz ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับเครื่องวิทยุสื่อสาร

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 หลักการทำงานของวงจรสควีซตามรูปที่ 8 เริ่มต้นจากสัญญาณที่จ่ายให้กับอินพุต SQ1 ของวงจรนี้มาจากสัญญาณเสียงที่ถูกมอดูเลตมาด้วยสัญญาณความถี่ IF 455 kHz ที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรแท่ง T5 สัญญาณที่มีระดับต่ำและมีสัญญาณรบกวนปะปนมาด้วยจะถูกขยายให้มีระดับสูงขึ้นด้วยวงจรทรานซิสเตอร์ 2SA733 และ 2SC945 สองตัว การออกแบบวงจรขยายหลายลำดับในลักษณะของวงจรขยายบัฟเฟอร์ (Buffer amplifier) นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้เกิดการดึงกำลังของสัญญาณ IF จากวงจรแท่ง T5 มากเกินไป เนื่องจากสัญญาณ IF ต้องมีระดับของสัญญาณที่ส่งต่อไปให้กับวงจรดีเทคเตอร์สูงอย่างเพียงพอ ในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีค่าสูงถึงระดับที่ถูกกำหนดไว้ด้วย VR20K จะทำให้สัญญาณดังกล่าวไปกระตุ้นทรานซิสเตอร์ 2SC945 ที่ต่อร่วมกับ 2SB562 ทำหน้าที่เป็นสวิทช์เพื่อหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน +9 โวลต์ไปที่เอาต์พุต SQ2 ซึ่งจ่ายให้กับวงจรขยายเสียงแบบ Complementary push-pull ที่อยู่เป็น

ภาคสุดท้ายของวงจรภาครับแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ในรูปแบบที่ 9 โดยมี VR50K ทำหน้าที่ควบคุมวงจรสควีซโดยผู้ใช้งานซึ่งติดตั้งบนหน้าปัดของเครื่องวิทยุสื่อสาร 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 โดยผ่านวงจรแท่ง T1 และทรานซิสเตอร์เบอร์ 9018 เพื่อให้ได้ความถี่ IF เท่ากับ 455 kHz แล้วส่งไปขยายกำลังโดยวงจรแท่ง T3, T4, T5 ซึ่งทำงานร่วมกับทรานซิสเตอร์ 9018 อีกสามลำดับ หลังจากนั้นจะถูกแยกสัญญาณเสียงออกจากความถี่ IF 455 kHz โดย

วงจรดีเทคเตอร์ (Detector) VT4 ซึ่งดัดแปลงทรานซิสเตอร์ 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 และสามารถสรุปไดอะแกรมวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาขึ้นมีส่วนต้นทุนเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 10 ไดอะแกรมวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาเพิ่มเติม

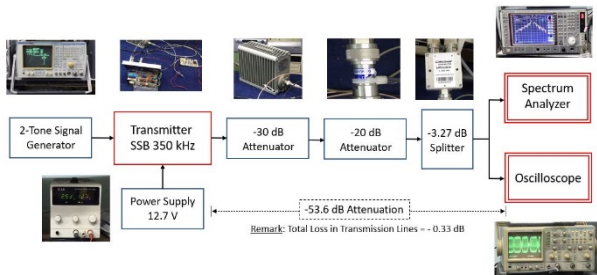
4. การวัดทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสาร

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 เข้ากับความถี่คลื่นพาห์ 350 kHz การวัดทดสอบวงจรภาคส่งตามที่กำหนดมีกระบวนการดังนี้ 1) ป้อนสัญญาณเสียงแบบสองความถี่ (Two-tone audio signal) ที่ความถี่ 500 Hz สำหรับเสียงโทนต่ำและที่ความถี่ 2.4 kHz สำหรับเสียงโทนสูง ด้วยระดับแรงดัน 5 mV จากเครื่องมือ Radio Communications Test Set ให้กับวงจรปริแอมพลิฟายสัญญาณเสียงของวงจรภาคส่งวิทยุซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าขนาด 12.7 V จาก Power Supply จ่ายให้กับวงจรดังกล่าว จากนั้นใช้ Attenuator จำนวน 2 ตัวเพื่อลดระดับกำลังของสัญญาณที่ออกจากวงจรภาคส่งให้ลดต่ำลงอีก 50 dB เพื่อไม่เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer และ Oscilloscope ซึ่งถูกต้องแยกออกมาจาก 2-way Splitter ที่มีการลดทอนอีก 3.27 dB และเมื่อรวมกับค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณและขั้วต่อทั้งหมดแล้วจะมีการลดทอนทั้งสิ้นประมาณ 53.6 dB จากนั้นเริ่มทำการวัดทดสอบค่ากำลังของวงจรภาคส่งวิทยุในโหมดกำลังส่งสูงสุดที่ 15 W ในขณะปราศจากการมอดูเลชันสัญญาณเสียงแบบสองความถี่เข้าไป 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 เมื่อนำมาคำนวณชดเชยกับค่าการลดทอนรวมของตัวลดทอน สายนำสัญญาณและขั้วต่อประมาณ 53.6 dB จะได้ค่ากำลังส่งในขณะที่ยังไม่มีการมอดูเลชันของ USB อยู่ที่ประมาณ $-20.14 + 53.6 = 33.6$ dBm (2.09 วัตต์) และ $-40.12 + 53.6 = 13.48$ dBm (0.02 วัตต์) ในขณะที่รูปคลื่นในขณะที่ยังไม่มีการมอดูเลชัน 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

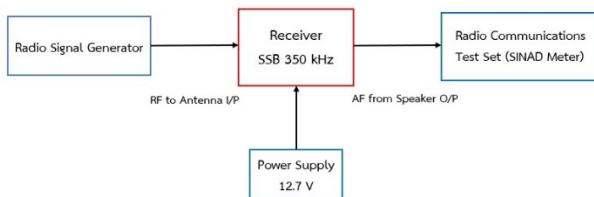
นำมาคำนวณชดเชยกับค่าการลดทอนรวมของตัวลดทอน สายนำสัญญาณและหัวต่อประมาณ 53.6 dB จะได้ค่ากำลังส่งในขณะที่ยังไม่มีมอดูเลชันของ USB อยู่ที่ประมาณ $-15.29 + 53.6 = 38.3$ dBm (6.76 W) และ $-11.7 + 53.6 = 41.9$ dBm (15.49 W) ตามลำดับ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 11 วิธีการวัดทดสอบการทำงานของวงจรภาคส่งของวิทยุ

ตารางที่ 1 ค่ากำลังส่งที่ได้จากการวัดทดสอบ

มอดูเลชันด้วยสัญญาณเสียง	ค่าการลดทอนรวม (dBm)	ระดับของสัญญาณที่เครื่อง Spectrum analyzer (dBm)	ค่ากำลังส่งของเครื่องวิทยุ (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-

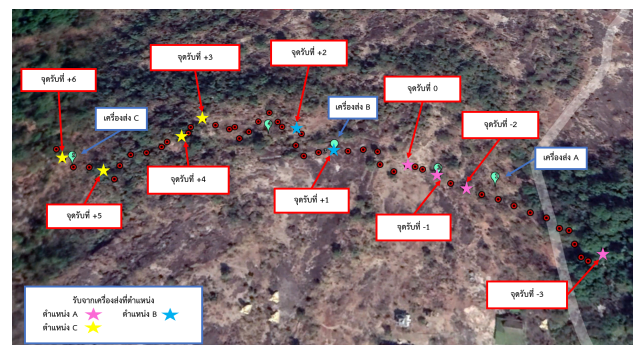
8121A ยี่ห้อ Panasonic ที่ปรับระดับแอมพลิจูดของสัญญาณไว้ที่ -80 dBm และ -100 dBm เพื่อป้อนให้กับอินพุตของวงจรภาครับที่หัวต่อของสายอากาศโดยตรง จะเห็นว่าวงจรภาครับของวิทยุสื่อสารอยู่ที่ 12.4 dB และ 13.6 dB ด้วยค่าระดับความไวสัญญาณที่อินพุตต่ำสุดเท่ากับ -80 dBm และ -100 dBm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน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



รูปที่ 13 เครื่องวิทยุสื่อสาร 350 kHz ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมา



รูปที่ 14 พื้นที่สำหรับติดตั้งเครื่องวิทยุและสายอากาศ



รูปที่ 15 ตำแหน่งจุดที่ตั้งสายอากาศภาครับที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำและสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งเหนือโพรงถ้ำ

4.2 การวัดทดสอบที่ถ้ำปาฏิหาริย์

รูปที่ 13 แสดงเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ โดยการวัดทดสอบการใช้งานกำหนดให้สายอากาศของเครื่องวิทยุสื่อสารถูกนำไปติดตั้งแบบประจำที่ไว้บนภูเขาที่อยู่เหนือโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ 3 ตำแหน่ง

(เครื่องส่ง A, B และ C) ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 ซึ่งตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งและเครื่องรับแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งผลการวัดทดสอบระดับของสัญญาณเสียงในขณะที่มีการส่งสัญญาณบีคอนและคุณภาพของเสียงขณะที่มีการสนทนาได้ถูกบันทึกผลไว้ดังตารางที่ 3 จากผลการวัดทดสอบที่ถ้าปาฏิหาริย์ได้แสดงจุดติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุสื่อสารในการทดสอบวิทยุสื่อสารทั้ง 3 จุดบนภูเขาและจุดติดตั้งสายอากาศภายในโพรงถ้ำจำนวน 10 จุดที่แสดงตำแหน่งไว้ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 จากนั้นทำการบันทึกผลการวัดทดสอบไว้ในตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ตามแนวโพรงถ้ำทั้ง 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 ซึ่งพอจับใจความได้แต่ขาดความคมชัดและเมื่อเทียบกับเครื่องรับส่งวิทยุรุ่นเดิมจะไม่สามารถติดต่อได้ในบริเวณจุดนี้ 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 ตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งวิทยุสื่อสารบริเวณเหนือโพรงถ้ำปาฏิหาริย์

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 ตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งวิทยุสื่อสารบริเวณในโพรงถ้ำปาฏิหาริย์

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทาง บนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะ กระจัด (เมตร)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)		
-3	15.600884	105.573773	74.8	77.4
-2	15.601340	105.573083	20.6	21.9
-1	15.601435	105.572927	0.0	13.5
0	15.601505	105.572755	20.2	23.4
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 โดยได้ทำการพัฒนาที่ภาคส่งคือการพัฒนาวงจรภาคขยายกำลังส่งวิทยุให้สูงขึ้นและสามารถเลือกกำลังส่งได้ 5/15 W ทำการเพิ่มวงจรบาลันปรับค่าความเหมาะสมระหว่าง

อิมพีแดนซ์ของเครื่องรับส่งวิทยุและสายอากาศ ในส่วนของภาครับได้พัฒนางจรเป็นแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ทดแทนวงจรเดิม พัฒนางจรขยายสัญญาณภาครับให้มีอัตราขยายสูงขึ้น ทำให้สามารถรับสัญญาณต่ำสุดได้ที่ -80 dBm และ -100 dBm ให้สามารถปรับความไวการรับสัญญาณได้ดีขึ้นรวมถึงสามารถปรับลดเสียงสัญญาณรบกวนด้วยการเพิ่มวงจรสควีลซ์ จากผลการวัดทดสอบพบว่าเมื่อนำไปใช้งานกับสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลก สำหรับใช้สื่อสารจากบนภูเขาผ่านชั้นหินเข้ามายังภายในโพรงถ้ำ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์ จังหวัดอุบลราชธานี เมื่อติดตั้งสายอากาศและเครื่องวิทยุสื่อสารบนภูเขาเพียง 3 ตำแหน่งก็ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารได้ตลอดแนวโพรงถ้ำที่มีระยะทางรวมทั้งสิ้น 457 เมตร โดยสามารถรับสัญญาณได้ด้วยค่ากำลังสัญญาณได้ตั้งแต่ -70.7 dBm ถึง -28.0 dBm และมีระดับความคมชัดของเสียงในระดับ 2 ถึง 5 ซึ่งสามารถจับใจความได้ตลอดแนวโพรงถ้ำ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

จุดที่	กำลังที่รับได้ (dBm)		ความชัดเจนของสัญญาณ	
	เครื่องเดิม	เครื่องที่พัฒนา	เครื่องเดิม	เครื่องที่พัฒนา
-3	-69.0	-53.6	3	4
-2	-72.7	-51.3	2	4
-1	-72.3	-53.9	2	4
0	รับไม่ได้	-70.7	0	2
1	-60.7	-48.8	4	5
2	-75.9	-45.3	2	5
3	-69.5	-48.5	4	5
4	-44.8	-28.0	5	5
5	-74.8	-55.0	2	3
6	-83.4	-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
กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม
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.