

Part III
การออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารต้นแบบสำหรับใช้งาน
ภายในถ้ำ
ระบบวิทยุสื่อสารแม่ข่ายและลูกข่ายต้นแบบระบบแอนะล็อก

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. รัชสรรค์ วงศ์สรรค์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ Part III

เนื้อหา	หน้า
1. บทนำ.....	4
2. ทฤษฎีเครื่องรับส่งวิทยุที่เกี่ยวข้อง.....	6
3. ข้อมูลระบบเครื่องรับส่งวิทยุแบบแอนะล็อกที่เคยมีการใช้งานในถ้ำและที่มีการเผยแพร่ในรูปของผลงานตีพิมพ์หรือเผยแพร่ในวงการของผู้ปฏิบัติงานในถ้ำทั้งในและต่างประเทศ.....	12
4. การออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ AM/SSB.....	16
5. การออกแบบวงจรและสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ SSB รุ่นที่ 1.....	20
5.1 องค์ประกอบทั่วไปของระบบวิทยุสื่อสาร.....	20
5.2 ทฤษฎีสันับสนุนการออกแบบระบบวิทยุสื่อสาร.....	21
5.3 ระบบเครื่องรับส่งวิทยุ (Transceiver).....	22
5.4 วงจรเครื่องส่งวิทยุ (Transmitter Circuit).....	26
5.5 วงจรเครื่องรับวิทยุ (Receiver Circuit).....	31
5.6 วงจรควบคุม (Control Circuit).....	34
5.7 กระบวนการสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB-350 kHz.....	37
5.8 สายอากาศสำหรับระบบสื่อสารแบบผ่านพื้นโลก.....	47
5.9 สรุปผลการวิจัยพัฒนาเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB 350 kHz รุ่นที่ 1.....	50
6. การออกแบบวงจรและสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ SSB รุ่นที่ 2.....	50
6.1 การพัฒนาและปรับปรุงภาคเครื่องส่งวิทยุ.....	52
6.2 การพัฒนาและปรับปรุงภาคเครื่องรับวิทยุ.....	54
6.3 การวัดทดสอบการทำงานของเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ในห้องปฏิบัติการ.....	65
7. ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2.....	71
7.1 ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสารที่ถ้ำเชียงดาว.....	71
7.2 ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสารที่ถ้ำปาฏิหาริย์.....	74
7.3 สรุปผลการวิจัยพัฒนาเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB 350 kHz รุ่นที่ 2.....	77
8. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม.....	78

การออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารต้นแบบสำหรับใช้งานภายในถ้ำ

แนวคิดในการออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารต้นแบบสำหรับใช้งานในถ้ำส่วนแรก ในขั้นต้นของการดำเนินการวิจัย ทางผู้วิจัยได้วางกรอบความคิดสำหรับการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติซึ่งมาจากประสบการณ์ของเจ้าพนักงานและเจ้าหน้าที่กู้ภัยในเหตุการณ์ถ้ำขุนน้ำนางนอน ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย พบว่าการเดินทางเข้าไปภายในถ้ำครั้งแรกมีความต้องการและมีความจำเป็นต้องใช้วิทยุสื่อสารหลักที่สามารถนำติดตัวไปและสามารถใช้ติดต่อสื่อสารในระยะไกลตลอดเส้นทางเดินภายในถ้ำได้ โดยเฉพาะสถานการณ์การกู้ภัยในการช่วยเหลือมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตที่ติดค้างอยู่ภายในถ้ำ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาเข้าสู่จุดหมายที่รวดเร็วและต้องไม่เสียเวลามากในการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารในช่วงแรกของปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม ปัญหาอุปสรรคที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์ครั้งนั้นพบข้อเท็จจริงว่าระบบวิทยุสื่อสารหรือระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานย่านความถี่ VHF และ UHF ที่หน่วยราชการหรือภาคเอกชนใช้งานอยู่ในปัจจุบันนั้นไม่สามารถใช้ในการสื่อสารระยะไกลภายในถ้ำได้ เนื่องจากเกิดการสูญเสียระดับของสัญญาณอันเนื่องมาจากการดูดซับและหักล้างกันเองของคลื่นที่เกิดการสะท้อนหรือบางส่วนเกิดการเลี้ยวเบนตามสภาพแวดล้อมของผนังถ้ำ พื้นถ้ำ และเพดานของถ้ำซึ่งมีลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกันในทุกๆ บริเวณ ทำให้เกิดการสูญเสียระดับของสัญญาณที่ถูกส่งผ่านออกไป (Transmission path losses) รวมทั้งเทคนิคการผสมสัญญาณ (Modulation) ที่ใช้ในเครื่องวิทยุสื่อสารที่มีใช้งานอยู่นั้นก็ส่งผลต่อการแพร่คลื่นภายในถ้ำด้วย

สำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารต้นแบบสำหรับใช้งานภายในถ้ำส่วนที่สองนั้น ทางคณะผู้วิจัยได้กำหนดกรอบความคิดไว้ว่าเมื่อผู้ปฏิบัติงานในถ้ำชุดแรกได้เข้าไปภายในถ้ำแล้ว สามารถที่จะวางระบบโครงข่ายสื่อสารอีกชุดหนึ่งสำหรับผู้ปฏิบัติงานส่วนที่เหลือหรือสำหรับผู้ปฏิบัติงานชุดถัดไปที่จะติดตามเข้าไปปฏิบัติงาน โดยระบบสื่อสารชุดที่สองจะมีลักษณะการทำงานเป็นโครงข่ายสื่อสารแบบดิจิทัลใช้ความถี่ย่านความถี่สูงที่เหมาะสม มีกำลังส่งต่ำ ขนาดเล็ก ประหยัดพลังงาน สามารถใช้งานในระยะไม่ไกลมากนักภายในหนึ่งโครงข่ายหลักประกอบด้วยโหนดหลัก หรือ Backbone node จำนวนหนึ่งโหนด และโหนดผู้ใช้งานหรือ User nodes จำนวน 5 โหนด โดยแต่ละโหนดผู้ใช้งานสามารถติดต่อกับโหนดหลักที่อยู่ภายในถ้ำในระยะรัศมีทำการไม่ต่ำกว่า 50 เมตร และสามารถเชื่อมต่อกับโหนดผู้ใช้งานอื่นๆ ที่อยู่รัศมีทำการของโครงข่ายโหนดหลักอื่นโดยผ่านทางโหนดหลักที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่จะทำให้การติดต่อสื่อสารภายในถ้ำสามารถขยายระยะทางได้ไกลเพิ่มขึ้น

สำหรับรายงานฉบับสมบูรณ์ในส่วนนี้จะได้อธิบายรายละเอียดและผลลัพธ์จากโครงการวิจัยแยกเฉพาะระบบวิทยุสื่อสารแม่ข่ายและลูกข่ายต้นแบบระบบแอนะล็อก

ระบบวิทยุสื่อสารแม่ข่ายและลูกข่ายต้นแบบระบบแอนะล็อก

1. บทนำ

จากการศึกษารวบรวมงานวิจัยที่มีการศึกษาการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำขั้นต้นและจากประสบการณ์ที่ผู้วิจัยเคยเดินทางไปทดสอบวัดสัญญาณระบบสื่อสารภายในถ้ำทรายทอง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุทยานถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน อ.แม่สาย จ.เชียงราย ก่อนที่จะรับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงาน กสทช. นั้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 คณะผู้วิจัยเคยทำการสำรวจพฤติกรรมการเดินทางของคลื่นความถี่วิทยุย่านกลางที่ถ้ำทรายทอง อุทยานแห่งชาติขุนน้ำนางนอน อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2562

การวัดทดสอบการใช้คลื่นความถี่วิทยุย่าน MF ภายในถ้ำทรายทอง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุทยานแห่งชาติขุนน้ำนางนอนและอยู่ติดกันกับถ้ำขุนน้ำนางนอนที่เกิดเหตุการณ์หมูป่า 13 ชีวิต ร่วมกับเจ้าหน้าที่ของสำนักงาน กสทช. ส่วนกลางและเขต 34 จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2562 ในครั้งนั้น ได้ใช้เครื่องมือวัดทดสอบคลื่นความถี่วิทยุ (Radio test) และสายอากาศชนิดแถบกว้าง (Broadband antenna) เข้าไปวัดทดสอบสัญญาณคลื่นความถี่ย่านกลาง (805 kHz, 1260 kHz และ 1394 MHz) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวถูกส่งมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบ AM ที่อยู่ในเขตจังหวัดเชียงรายและใกล้เคียง โดยเริ่มทดสอบรับสัญญาณที่บริเวณใกล้สระน้ำด้านหน้าของปากถ้ำทรายทองอยู่ที่ 53, 51 และ 58 dBuV ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดจากปากปล่องถ้ำลงไปตามเส้นทางเดินเข้าไปภายในถ้ำ แล้วทำการวัดระดับความแรงของสัญญาณที่ระยะทางต่างๆ (ตามพื้นที่ที่มีความสะดวกในการวัดสัญญาณ) โดยไม่ได้กำหนดระยะทางการวัดในแต่ละตำแหน่งแบบคงที่และไม่สนใจโพลาไรซ์ของคลื่นที่รับสัญญาณได้ในแต่ละขั้นตอน เนื่องจากในครั้งนั้นทางทีมผู้สำรวจมีจุดมุ่งหมายเพียงเพื่อพิสูจน์อย่างคร่าวๆ ว่าคลื่นความถี่วิทยุย่านกลางที่มีการผสมสัญญาณแบบ AM สามารถแพร่เข้าไปในโพรงถ้ำโดยใช้คุณสมบัติของการเป็นคลื่นดิน (Ground wave) หรือคลื่นพื้นผิว (Surface wave) ได้หรือไม่ ซึ่งจากผลการวัดทดสอบโดยสังเขปในครั้งนั้นพบว่า คลื่นความถี่ย่านดังกล่าวสามารถแพร่เข้าไปตามแนวเส้นทางเดินของถ้ำได้ในระยะทางประมาณ 140 เมตร โดยที่ระดับความแรงของสัญญาณยังสูงพอและ

สามารถรับฟังเสียงที่ส่งมาจากสถานีวิทยุทั้งสามแห่งได้ และมีการลดระดับของสัญญาณที่เกิดจากความถี่ 805, 1260 และ 1394 kHz ตลอดระยะทาง 140 เมตรภายในถ้าจะมีค่าประมาณ 10, 11 และ 18 dBuV ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าความถี่ยิ่งสูงขึ้นยิ่งมีอัตราการลดทอนหรือการสูญเสียในอากาศสูงมากขึ้นด้วยดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจากประสบการณ์การวัดระดับความแรงของสัญญาณภายในถ้ำทรายทองในครั้งนั้นได้มีส่วนช่วยอย่างมากในการเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำที่ได้นำเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์ฉบับนี้

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลระดับความแรงของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุย่าน MF ที่วัดทดสอบได้ในถ้ำทรายทอง

ตำแหน่ง*	ระดับสัญญาณ (dBuV)			สภาพถ้ำ
	$f_1 = 805 \text{ kHz}$	$f_2 = 1260 \text{ kHz}$	$f_3 = 1394 \text{ kHz}$	
0	53	51	58	สระน้ำหน้าถ้ำ
2	51	50	51	ปากปล่องถ้ำ
6	50	47	51	ทางเดินในถ้ำ
16	48	47	48	ทางเดินในถ้ำ
22	48	49	59	โถงเล็ก
30	45	45	46	โถงกว้าง
40	45	43	46	โถงใหญ่
60	44	41	45	ทางเดินในถ้ำ
75	44	41	44	ผ่านช่องหิน/ไม่มี Audio
90	45	44	46	โถงเล็ก/มี Audio
105	46	42	43	มี Noise 80%
120	44	40	45	โถงสูง/Noise > 80%
135	42	38	40	โถงสูง/Audio < 50%
140	43	40	40	ชอกหิน/Audio < 20%

จากข้อมูลการสำรวจดังกล่าว พบว่าคลื่นความถี่วิทยุที่เหมาะสมสำหรับใช้กับระบบสื่อสารภายในถ้ำต้องเป็นคลื่นความถี่ย่านตั้งแต่ MF ลงไป เนื่องจากธรรมชาติของคลื่นความถี่ย่านนี้ลงไปจะมีคุณสมบัติในการแพร่คลื่น (Radio wave propagation) เป็นแบบคลื่นดินและแบบพื้นผิว ซึ่งสามารถแพร่คลื่นผ่านผิวดินหรือชั้นหินในลักษณะของการเหนี่ยวนำกระแสในพื้นโลก (Earth induction current) และสามารถแพร่ไปตามพื้นถ้ำและผนังถ้ำได้ดีกว่าคลื่นความถี่วิทยุในย่านที่สูงกว่า รวมทั้งเทคนิคการผสมสัญญาณเชิงแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM) ในรูปแบบของแถบด้านข้างเดี่ยว (Single Side Band: SSB) สำหรับเครื่องวิทยุสื่อสารที่นำไปใช้งานภายในถ้ำจะเหมาะสมกว่าเทคนิคการผสมสัญญาณเชิงความถี่ (Frequency Modulation: FM) ซึ่งปัจจุบันบรรดานักกู้ภัยหรือนักถ้ำวิทยาก็ยังคงใช้เครื่องวิทยุรับส่งในย่านความถี่และระบบดังกล่าวอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามการเลือกใช้คลื่นความถี่ที่ต่ำมากเกินไปแม้ว่าจะสามารถแพร่คลื่นทั้งแบบคลื่นดินและแบบเลี้ยวเบนไปตามผนังถ้ำได้ดีกว่าก็จริง แต่จะมีปัญหาอุปสรรคในเรื่องขนาดของสายอากาศที่จะพัฒนาให้มีขนาดเล็กย่อมนำมาซึ่งความยากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาข้อมูลจากผลการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำที่ได้นำเสนอไว้ในส่วนแรกของรายงานฉบับสมบูรณ์ฉบับนี้ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นข้อเท็จจริงมากที่สุดตามลำดับขั้นของการวิจัยต่อไป และเพื่อ

เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ที่นำเสนอถึงวิวัฒนาการของการวิจัยในโครงการนี้ ผู้วิจัยจะไม่นำเสนอเฉพาะส่วนที่ประสบความสำเร็จขั้นสุดท้ายเพียงอย่างเดียว แต่จะนำเสนอวิวัฒนาการตั้งแต่ที่ดำเนิการไปแล้วในระยแรกจนกระทั่งถึงผลงานสุดท้ายที่ประสบความสำเร็จในการออกแบบระบบวิทยุสื่อสารแม่ข่ายและลูกข่ายต้นแบบระบบแอนะล็อก ซึ่งจะเกิดประโยชน์ต่อวงการวิชาการของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารที่เหมาะสมต่อการใช้งานภายในถ้าเป็นอย่างยิ่ง



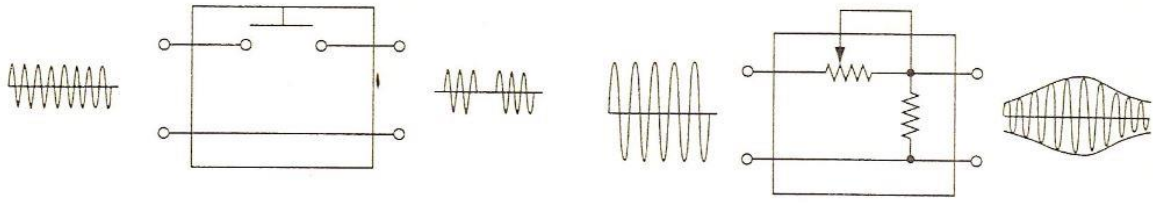
รูปที่ 2 ตัวอย่างเครื่องรับส่งวิทยุ HeyPhone สำหรับใช้ติดต่อสื่อสารในถ้ำย่านความถี่ LF (Low Frequency:) ภาพจาก <http://www.shropshirecmc.org.uk/radio.html>

2. ทฤษฎีเครื่องรับส่งวิทยุที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของเครื่องรับส่งวิทยุระบบ AM

หลักการทำงานของเครื่องส่งวิทยุระบบ AM คือ จุดเริ่มต้นที่ผ่านไปสู่หลักการทำงานของเครื่องส่งวิทยุแบบ SSB ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเริ่มต้นศึกษาในส่วนของเครื่องส่งวิทยุระบบ AM ก่อน โดยระบบนี้จะใช้วิธีผสมคลื่น (Modulation) ระหว่างความถี่คลื่นพาห์ (Carrier frequency) กับความถี่ของคลื่นเสียง/ข้อมูล (Information frequency) ทำให้มีผลต่อแอมพลิจูดของคลื่นพาห์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของคลื่นเสียง/ข้อมูล โดยการเพิ่มอัตราขยาย (Gain) ของภาคขยายความถี่วิทยุ (RF amplifier) จะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณเสียง/ข้อมูลที่ถูกผสมเข้าไป การผสมสัญญาณแบบ AM ยังคงถูกใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยเฉพาะการส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงในย่านความถี่กลาง (Medium Frequency: MF) หรือคลื่นกลาง (Medium Wave: MW) ตั้งแต่ความถี่ 300 kHz – 3,000 kHz และระบบวิทยุสื่อสารย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) หรือคลื่นสั้น (Short Wave: SW) ตั้งแต่ความถี่ 3 MHz – 30 MHz

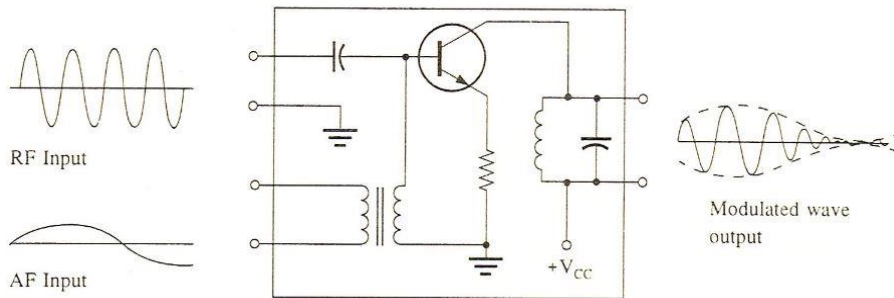
กระบวนการในการผสมสัญญาณในระบบ AM สามารถกระทำได้ 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ กระทำได้ด้วยมือ (Manual) และด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic circuit) [1] ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



ก) โดยใช้สวิตช์ On - Off

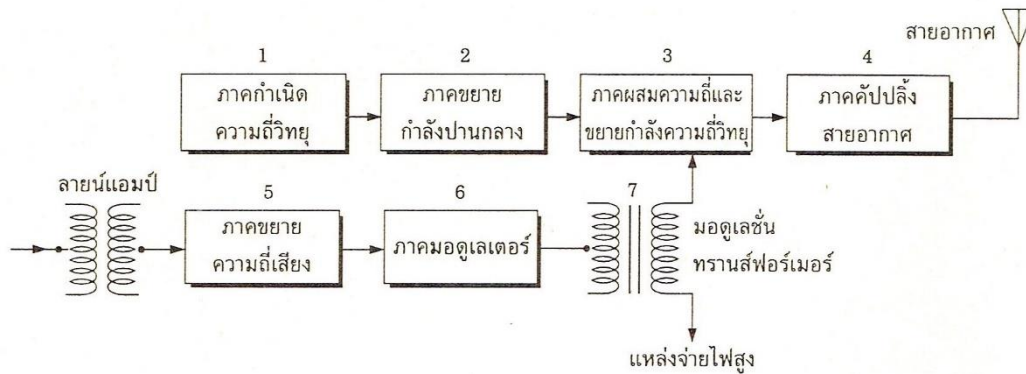
ข) โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับด้วยมือ

รูปที่ 3 การผสมสัญญาณระบบ AM ด้วยวิธีกระทำด้วยมือ



รูปที่ 4 การผสมสัญญาณระบบ AM โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์

การผสมสัญญาณระบบ AM ที่ใช้ในวิทยุสื่อสารจะใช้การผสมสัญญาณระดับสูง (High level modulation) ซึ่งใช้เทคนิคผสมสัญญาณความถี่เสียงเข้าที่คอลเล็กเตอร์ของภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้าย [1] แล้วเกิดเป็นสัญญาณที่ผสมสัญญาณเรียบร้อยแล้วก่อนส่งให้กับสายอากาศ



รูปที่ 5 แสดงไดอะแกรมเครื่องส่งวิทยุระบบ AM ที่ใช้การผสมสัญญาณระดับสูง [1]

จากรูปที่ 5 เป็นไดอะแกรมเครื่องส่งวิทยุระบบ AM ที่ใช้การผสมสัญญาณระดับสูง ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่ได้แยกแสดงไว้แต่ละส่วนที่มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1. ภาคกำเนิดความถี่วิทยุ เป็นวงจรกำเนิดความถี่วิทยุหรือออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) สำหรับใช้เป็นคลื่นพาห้

2. ภาคขยายกำลังปานกลาง (Intermediate Power Amplifier: IPA) บางครั้งอาจเรียกว่าภาคขยายบัฟเฟอร์ (Buffer amplifier) ทำหน้าที่ขยายกำลังเอาต์พุตระดับต่ำที่ส่งมาจากออสซิลเลเตอร์ให้มีกำลังที่เหมาะสมเพื่อส่งต่อไปยังภาคขยายกำลังความถี่วิทยุ

3. ภาคขยายกำลังความถี่วิทยุ มีหน้าที่ขยายกำลังให้สูงขึ้นก่อนที่จะส่งไปผสมกับความถี่เสียง ตามรูปที่ 4 มีการใช้ภาคนี้ทำหน้าที่ผสมความถี่นี้ด้วย (Modulated PA) แล้วขยายกำลังให้สูงขึ้นก่อนส่งต่อไปภาคต่อไป

4. ภาคเชื่อมร่วมสายอากาศ (Antenna coupling) ทำหน้าที่แมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างภาคขยายกำลังความถี่วิทยุและสายส่งให้เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

5. ภาคขยายความถี่เสียง ทำหน้าที่ขยายสัญญาณของความถี่เสียงที่ได้มาจากไมโครโฟนหรือจากห้องสตูดิโอให้มีระดับที่สูงเพียงพอที่จะส่งต่อไปให้ภาคต่อไป

6. ภาคผสมสัญญาณ (Modulator) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่เสียงให้มีระดับเหมาะสมกับระดับเปอร์เซ็นต์การผสมสัญญาณ (Modulation percentage) ที่ต้องการ

7. หม้อแปลงผสมสัญญาณ (Modulation transformer) ใช้วิธีต่อขดลวดทุติยภูมิเข้ากับแหล่งจ่ายไฟของภาคผสมความถี่ ทำให้แรงดันที่เอาต์พุตของภาคผสมความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของความถี่เสียงที่ส่งมาจากภาคขยายความถี่เสียง

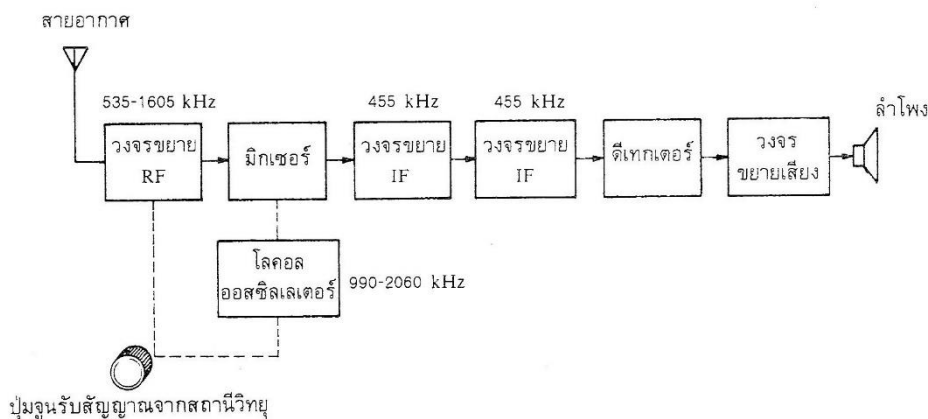
หลักการสำคัญสำหรับการผสมสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุในระบบ AM ก็คือ ส่วนของภาคผสมสัญญาณซึ่งเป็นตัวกำหนดเรื่องของเปอร์เซ็นต์การผสมสัญญาณ ซึ่งปกติจะต้องการให้ค่าเปอร์เซ็นต์นี้มีค่าสูงสุดเพื่อที่จะทำให้สัญญาณเสียงที่รับได้ที่เครื่องรับมีกำลังแรงหรือมีเสียงดังมากที่สุด เนื่องจากกระบวนการที่เครื่องรับวิทยุระบบ AM เปลี่ยนคลื่นที่รับเข้ามาได้ให้เป็นสัญญาณเสียงนั้น จะแยกเอาแต่เฉพาะสัญญาณเสียงที่ถูกผสมเข้าไปกับคลื่นพาห์ออกมาใช้งานเท่านั้น อย่างไรก็ตามยังมีเครื่องส่งวิทยุระบบ AM ที่ใช้การผสมสัญญาณระดับต่ำ (Low level modulation) ที่ใช้หลักการผสมสัญญาณก่อนภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายลงมาแต่อยู่หลังจากภาคออสซิลเลเตอร์หลัก (Master oscillator) ซึ่งอาจใช้การผสมสัญญาณเข้าที่ขาไดโอดหนึ่งของทรานซิสเตอร์ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งการทำงานของแต่ละบล็อกมีหน้าที่เหมือนกับที่อธิบายผ่านมาในรูปที่ 5



รูปที่ 6 แสดงไดอะแกรมเครื่องส่งวิทยุระบบ AM ที่ใช้การผสมสัญญาณระดับต่ำ [1]

ในส่วนหลักการทำงานของเครื่องรับวิทยุในระบบ AM นั้น ส่วนสำคัญจะอยู่ที่วงจรแยกสัญญาณเสียงออกมาจากสัญญาณที่ถูกผสมมาแล้วระหว่างคลื่นพาห์กับสัญญาณเสียงหรือที่เรียกว่าวงจร Demodulator และในกรณีที่มีเครื่องส่งอื่นๆ ส่งคลื่นวิทยุที่มีความถี่ต่างกันออกมาทางฝั่งเครื่องรับจำเป็นต้องมีวงจรเพื่อเลือกรับสัญญาณเฉพาะที่ต้องการนั้นๆ ด้วย นอกจากนี้บางครั้งเครื่องส่งอยู่ห่างไกลจากเครื่องรับมากทำให้สัญญาณที่ได้รับเข้ามามีระดับที่ต่ำมาก เครื่องรับจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณนี้ให้สูงขึ้นเสียก่อน

(RF amplifier) แล้วจึงทำการแยกสัญญาณเสียงออกมาเพื่อป้อนให้กับวงจรขยายเสียงเพื่อส่งออกทางลำโพงต่อไปในขั้นสุดท้าย ดังแสดงเป็นตัวอย่างหนึ่งในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นไดอะแกรมของเครื่องรับวิทยุ AM แบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Superheterodyne) ซึ่งยังคงเป็นที่นิยมใช้อยู่จนถึงปัจจุบัน

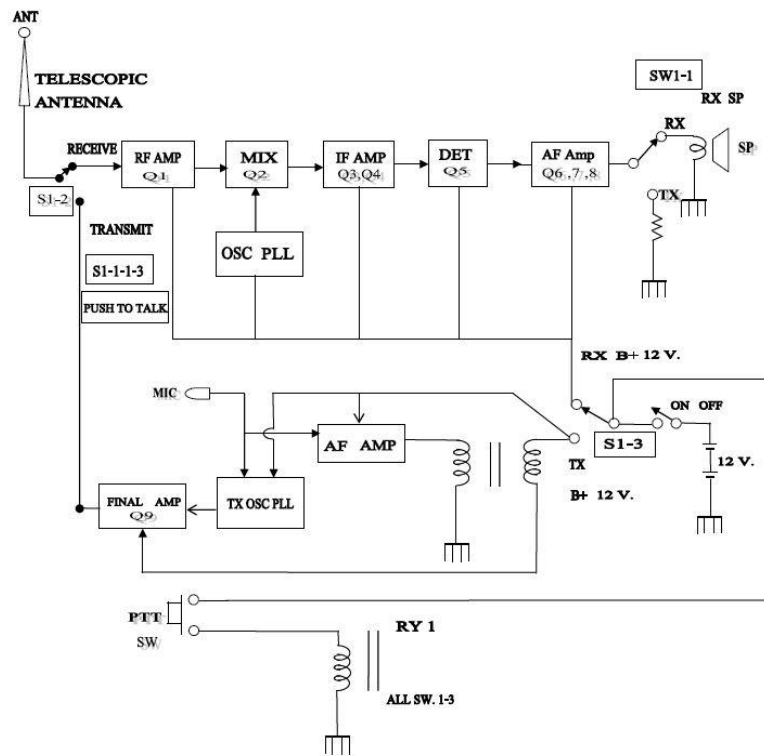


รูปที่ 7 แสดงไดอะแกรมเครื่องรับวิทยุระบบ AM แบบ Superheterodyne [2]

เครื่องรับวิทยุระบบ AM แบบ Super Heterodyne [2] นี้ จะใช้วิธีการการแปลงคลื่นความถี่ของสัญญาณ RF ให้กลายเป็นความถี่ที่ค่าหนึ่งซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการออกแบบวงจร จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ามีการใช้วงจรขยาย RF ที่มีอัตราขยายพอสมควรและมีขนาดความกว้างแถบความถี่ (Frequency bandwidth) กว้างเพียงพอต่อย่านความถี่ที่ต้องการรับเข้ามา ส่วนใหญ่จะเน้นออกแบบให้มีค่าอัตราขยายสูงและมีค่าการเลือกความถี่ (Selectivity) ที่ดี ส่วนถัดไปที่สำคัญก็คือ ภาคออสซิลเลเตอร์ประจำที่ (Local Oscillator: LO) และวงจรผสมสัญญาณ (Mixer) ทั้งสองจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณความถี่ RF ให้มีค่าต่ำลง กลายเป็นความถี่กลาง (Intermediate Frequency: IF) ที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งส่วนใหญ่ความถี่ IF นี้จะมีค่าอยู่ระหว่างความถี่ RF กับความถี่เสียง (Audio Frequency: AF) โดยเครื่องรับวิทยุ AM ทั่วไปนิยมใช้ค่าความถี่ IF อยู่ที่ 455 kHz จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าย่านความถี่ของ RF กับย่านความถี่ LO เมื่อถูกส่งเข้าไปในภาคผสมสัญญาณจะเกิดผลต่างของความถี่ที่เอาต์พุตเท่ากับ 455 kHz เสมอ จากนั้นจะถูกส่งให้กับภาควงจรขยาย IF ซึ่งถูกออกแบบให้เกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะที่ความถี่ 455 kHz เท่านั้น และอาจมีวงจรขยายแบบนี้หลายชุดต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มอัตราขยายให้สูงมากขึ้น เมื่อระดับของสัญญาณ IF ถูกขยายให้สูงขึ้นแล้วจะถูกส่งต่อไปในภาควงจรดีเทกเตอร์ (Detector) เพื่อแยกเฉพาะสัญญาณเสียงออกมาใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไดโอด (Diode) เพียงตัวเดียวในการแยกสัญญาณเสียงออกมาจากสัญญาณ IF เพื่อส่งต่อไปยังภาควงจรขยายเสียงและป้อนให้กับลำโพงต่อไป

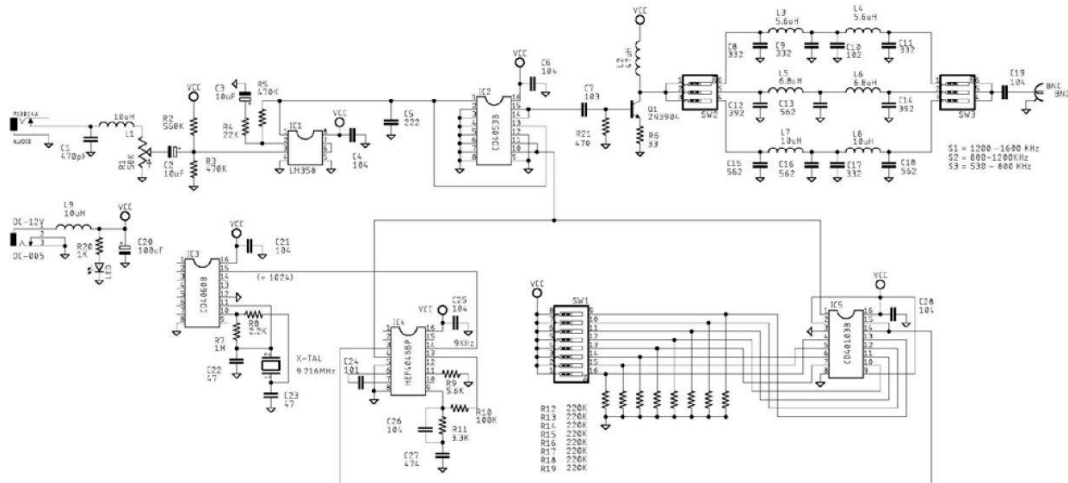
2.2 จากทฤษฎีสู่การทดลองออกแบบวงจรเครื่องส่งวิทยุระบบ AM

เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องรับส่งวิทยุต้นแบบสำหรับใช้เป็นระบบสื่อสารในถ้าทางที่ผู้วิจัยซึ่งได้สะสมประสบการณ์ด้านเครื่องรับส่งวิทยุมาในระดับหนึ่ง จึงได้ทดลองออกแบบวงจรเบื้องต้นของเครื่องรับส่งวิทยุระบบ AM แบบ Superheterodyne ดังแสดงในรูปที่ 8

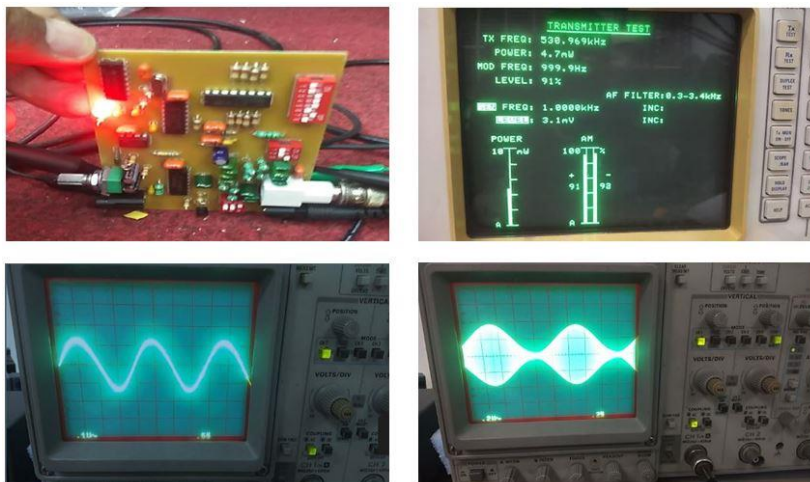


รูปที่ 8 แสดงไดอะแกรมของเครื่องรับส่งวิทยุระบบ AM แบบ Superheterodyne ต้นแบบ โดยทดลองที่คลื่นพาห้ความถี่ 350 kHz

จากไดอะแกรมในรูปที่ 8 เป็นวงจรเครื่องรับส่งวิทยุระบบ AM Superheterodyne ต้นแบบวงจรแรกที่ทีมผู้วิจัยชุดได้ทดลองออกแบบขึ้นมาเพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ที่จะสร้างเครื่องรับส่งวิทยุต้นแบบระบบนี้ที่ความถี่ย่าน MF ช่วงต้นแถบที่ 350 kHz โดยที่มาของความถี่นี้ได้จากผลการทดสอบภาคสนามภายในถ้ำทรายทอง อ.แม่สาย จ.เชียงราย ในช่วงเวลาก่อนที่จะเริ่มดำเนินการวิจัยในโครงการนี้ โดยตั้งสมมุติฐานในครั้งแรกว่าคลื่นความถี่วิทยุในย่าน MF ซึ่งถูกส่งด้วยระบบ AM น่าจะสามารถนำมาใช้งานติดต่อสื่อสารภายในถ้ำได้ โดยหลีกเลี่ยงที่จะใช้ความถี่ตั้งแต่ 540 kHz – 1600 kHz เนื่องจากเป็นคลื่นความถี่วิทยุที่อยู่ในแผนความถี่วิทยุที่ใช้กับสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบ AM ของประเทศไทย และเลือกทดลองใช้ความถี่ 350 kHz เนื่องจากต่ำกว่าความถี่ IF 455 kHz เพื่อให้เกิดความง่ายในการทดลองสร้างเครื่องรับส่งวิทยุในระบบ AM Superheterodyne ที่ใช้ความถี่ IF 455 kHz เป็นมาตรฐาน ในการทดลองสร้างวงจรต้นแบบในครั้งแรกนี้ผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎีการออกแบบวงจรและข้อมูลของอุปกรณ์โดยเลือกใช้จากเอกสาร [1]-[4] วงจรชุดแรกที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมา คือ วงจรออสซิลเลเตอร์ประจำที่ (LO) โดยใช้ไอซีเบอร์ CD401038 มาออกแบบสร้างเป็นวงจร Phase Lock Loop (PLL) ให้สามารถผลิตคลื่นความถี่ 350 kHz ให้ออกมาได้อย่างเสถียร [4] ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10



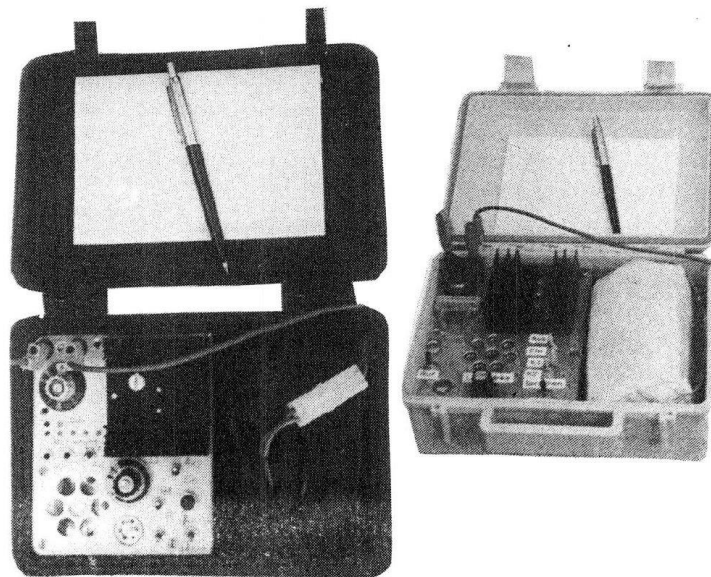
รูปที่ 9 แผงวงจรจรวจรอสซิงเลเตอร์ประจำที่ (LO) ความถี่ 350 kHz โดยใช้ไอซีเบอร์ CD40103B สร้างเป็นวงจรร Phase Lock Loop (PLL) พร้อมวงจรมผสมสัญญาณ (Mixer)



รูปที่ 10 แสดงการทดสอบวงจรร LO & Mixer ของเครื่องส่งวิทยุระบบ AM ที่ความถี่คลื่นพาห์ 350 kHz ผสมด้วยความถี่เสียง 1 kHz จนเกิดเป็นสัญญาณในระบบ AM

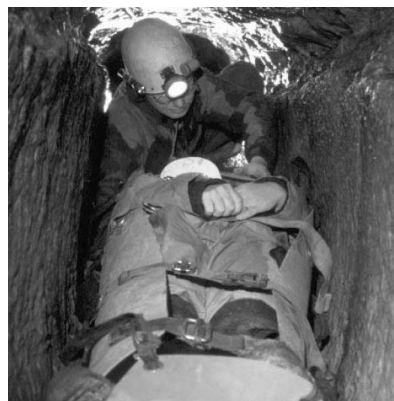
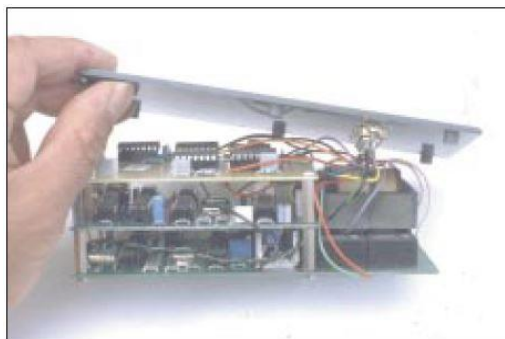
3. ข้อมูลระบบเครื่องรับส่งวิทยุแบบแอนะล็อกที่เคยมีการใช้งานในถ้ำและที่มีการเผยแพร่ในรูปของผลงานตีพิมพ์หรือเผยแพร่ในวงการของผู้ปฏิบัติงานในถ้ำทั้งในและต่างประเทศ

เพื่อการออกแบบและพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุแบบแอนะล็อกสำหรับนำไปใช้งานในถ้ำได้อย่างถูกต้องและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยจึงได้ทำการสืบค้นข้อมูลผลการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายสำหรับใช้งานในถ้ำเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาระบบดังกล่าวให้ประสบความสำเร็จให้มากที่สุด ซึ่งจากผลของการสืบค้นรายงานการวิจัยได้พบว่าระบบสื่อสารไร้สายสำหรับใช้งานในถ้ำนั้นได้เริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ.1982 [5] ในประเทศสวิสเซอร์แลนด์ โดยใช้ชื่อว่า Speleophon ระบบนี้ได้ถูกออกแบบให้ใช้งานในย่านความถี่ MF โดยมีถ้ำเป้าหมายที่ใช้ทำการทดสอบชื่อว่า Holloch แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จในเรื่องของระยะความลึกที่จำกัดไม่เกิน 600 เมตร และอุปกรณ์มีน้ำหนักถึง 5 กิโลกรัม ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการใช้ในการกู้ภัยในถ้ำ ต่อมาในปี ค.ศ. 1987 กลุ่มนักวิทยุสมัครเล่นของประเทศสวิสเซอร์แลนด์ได้ทำการพัฒนาต่อไปอีกโดยใช้ความถี่วิทยุสมัครเล่นย่าน HF ที่มีความยาวคลื่น 160 เมตร ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลกว่า 600 เมตร แต่ก็ติดอุปสรรคการใช้งานในเรื่องของสายอากาศไดโพลที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักของเครื่องรับส่งวิทยุขนาด 100 วัตต์ ที่รวมน้ำหนักแล้วค่อนข้างหนักมากทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ แต่ก็ได้ข้อสรุปในขณะนั้นว่าความถี่ที่เหมาะสมต่อการแพร่คลื่นภายในถ้ำทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติก็คือความถี่ย่าน VLF และ LF หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1990 จึงได้มีการสร้างอุปกรณ์เพื่อทดสอบใช้งานในย่านความถี่ 10 – 150 kHz และเปลี่ยนจากสายอากาศไดโพลมาเป็นแท่งอิเล็กโทรด (Electrodes) สองแท่งปักลงบนพื้นผิวโลกโดยวางห่างกันที่ระยะตั้งแต่ 20 – 160 เมตร โดยความถี่สำหรับเครื่องส่งวิทยุที่ใช้ทดสอบในครั้งนั้นก็คือ 50 kHz และ 80 kHz ทำการส่งคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous Wave: CW) โดยใช้อุปกรณ์แปลงกลับสัญญาณ VLF/SW ต่อเข้ากับเครื่องรับย่านความถี่วิทยุสมัครเล่น และต่อมาในปี ค.ศ. 1995 Felix Ziegler นักวิทยุสมัครเล่นชาวสวิสเซอร์แลนด์ ได้ออกแบบสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารถ้ำแบบ CW และ SSB (Single Side Band) ที่มีขนาดเล็กลง โดยใช้ความถี่ 46 kHz และ 137 kHz ขนาดกำลังส่ง 10 วัตต์ ซึ่งต่อมาวิทยุสื่อสารนี้รู้จักกันในชื่อว่า AGHfunk ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 วิทยุสื่อสารในถ้ำ Swiss Cave Radio AGHfunk ต้นแบบ (ขวา) และรุ่นแรกที่สร้างออกมาใช้งาน (ซ้าย)

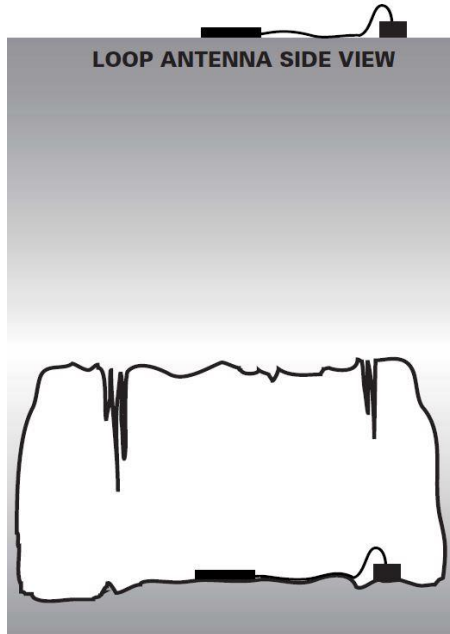
จากบทความของ Mike Bedford ที่ได้ตีพิมพ์ในวารสาร Cave Radio [6] ในปี ค.ศ. 2000 ได้กล่าวไว้ว่าระบบวิทยุสื่อสารสำหรับใช้ในถ้ำได้เริ่มมีใช้งานมาก่อนหน้านั้น 15 ปีแล้ว ในชื่อของ Molefone ซึ่งใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารจากในถ้ำออกมายังพื้นผิวโลกที่อยู่ด้านบนถ้ำ (Cave-to-surface communication) ด้วยความถี่ 87 kHz โดยใช้วิธีผสมสัญญาณแบบแถบความถี่ด้านข้างที่อยู่ด้านบนเพียงแถบเดียว (Upper Single Side Band: USB) ระบบสื่อสารดังกล่าวถูกพัฒนาโดย Bob Mackin แห่ง Lancaster University ประเทศอังกฤษ และมาถึงจุดสิ้นสุดของการใช้งานเมื่อประสบปัญหาในเรื่องของการซ่อมแซมและเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสียหายซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก จากนั้น British Cave Rescue Council (BCRC) จึงได้เริ่มต้นในการหาวิธีการพัฒนาและออกแบบระบบสื่อสารสำหรับใช้งานในถ้ำชุดใหม่ขึ้นมาทดแทนซึ่งเริ่มดำเนินการออกแบบโดย John Hey ร่วมมือกับทาง BCRC และ Cave Radio & Electronics Group (CREG) ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 1999 ซึ่งต่อมาได้พัฒนาจนแล้วเสร็จออกมาในชื่อว่า HeyPhone ในปี ค.ศ. 2001 [7] และทดลองใช้งานกับนักกู้ภัยในถ้ำครั้งแรก (HeyPhone in Action) ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ ปีเดียวกัน [8] ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ



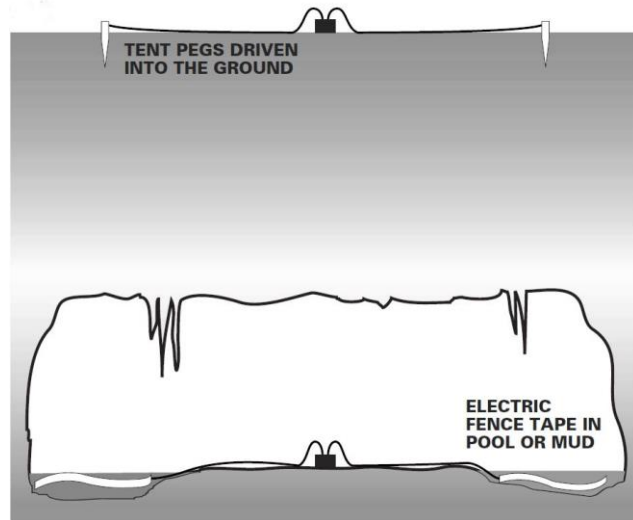
รูปที่ 12 ระบบวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อก HeyPhone สำหรับใช้งานในถ้ำ และการทดสอบใช้งานครั้งแรก

อย่างไรก็ตามวิทยุสื่อสารถ้ำในชื่อ HeyPhone มีส่วนหนึ่งของระบบที่เลียนแบบมาจาก Molefone นั่นคือ ย่านความถี่และวิธีการผสมสัญญาณเสียงเข้ากับสัญญาณคลื่นความถี่ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์เข้าด้วยกัน แต่ HeyPhone ได้รับการออกแบบโดยใช้ส่วนประกอบที่ทันสมัยมากขึ้น ในส่วนของความแตกต่างที่ชัดเจนที่สุดอยู่ที่ระบบสายอากาศ โดยของ Molefone จะใช้สายอากาศแบบลูบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง 1 เมตร ซึ่งสามารถติดตั้งใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว ดังแสดงวิธีการติดตั้งไว้ในรูปที่ 13 (ก) แต่จะถูกจำกัดด้วยระยะทางที่ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลนัก ส่วนระบบสายอากาศของ HeyPhone จะใช้ที่แตกต่างออกไปที่เรียกว่า สายอากาศดิน (Earth antenna) โดยใช้เส้นลวดสองเส้นวางตามความยาวของลวด

วิ่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกับวิทยุ ส่วนในกรณีของสถานีที่อยู่บนพื้นผิวโลกจะใช้หมุดสำหรับกางเต็นท์ปักลงดินติดแล้วเชื่อมต่อกับปลายสายลวดทองแดงโดยใช้คลิปปากจระเข้เป็นตัวหนีบยึด ส่วนกรณีที่ใช้งานในถ้ำใต้ดินจะใช้แถบตัวนำสำหรับทำแนวรั้วไฟฟ้าถ่วงน้ำหนักด้วยหินมาแทนหมุดเต็นท์แล้วนำไปแช่หรือฝังไว้ในน้ำหรือโคลนที่อยู่ภายในถ้ำ แม้ว่าจะติดตั้งใช้งานได้ยากกว่าสายอากาศแบบลูปลี่เหลี่ยมของ Molefone แต่จะให้ระดับของสัญญาณแรงกว่ามากจึงสามารถติดต่อสื่อสารได้ลึกกว่าและระยะไกลกว่า ดังแสดงวิธีการใช้งานไว้ในรูปที่ 13 (ข)



(ก) Loop antenna สำหรับ Molefone



(ข) Earth Antenna สำหรับ HeyPhone

รูปที่ 13 การทดสอบใช้งานระบบวิทยุสื่อสาร HeyPhone ครั้งแรกสำหรับใช้งานในถ้ำ

จะเห็นว่าระบบสื่อสารสำหรับใช้ในถ้ำทั้ง Molefone และ HeyPhone นั้นจะเน้นสำหรับการติดต่อสื่อสารจากผิวดินภายนอกที่อยู่เหนือพื้นที่ในถ้ำที่เป็นเป้าหมายคล้ายกับระบบเรดาร์แบบเจาะพื้นผิว (Penetrating radar) ที่มีใช้งานกันในอดีตจนถึงปัจจุบัน ไม่ใช่ระบบสื่อสารที่ออกแบบมาเพื่อใช้ตามทางเดินที่เป็นโพรงของถ้ำ และระบบสื่อสารทั้งสองรุ่นนี้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้งานสำหรับนักกู้ภัยถ้ำ (Cave rescue) เฉพาะกลุ่มเท่านั้นไม่ใช่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จึงทำให้ไม่เกิดความแพร่หลายและไม่ปรากฏในฐานข้อมูลงานวิจัยสากลที่มีอยู่ในปัจจุบัน

จากผลการสืบค้นข้อมูลระบบเครื่องรับส่งวิทยุระบบแอนะล็อกและดิจิทัลที่เคยมีการใช้งานในถ้ำนั้นพบว่า ส่วนใหญ่แล้วการติดต่อสื่อสารภายในถ้ำหรือภายในเหมืองต่างๆ มักจะใช้การเชื่อมต่อผ่านสายเคเบิลในหลายเทคนิค ซึ่งการใช้วิธีแบบนี้มักจะเป็นการวางระบบสื่อสารไว้ในช่วงเหตุการณ์ปกติ เช่น ติดตั้งในช่วงแรกของการเปิดเหมืองหรือในช่วงสภาวะปกติของถ้ำที่มีการเข้าออกถ้ำได้โดยสะดวกซึ่งแตกต่างจากสภาวะที่เกิดอุบัติเหตุฉุกเฉินและต้องใช้เวลาอย่างเร่งด่วนในการแก้ไขปัญหาของนักกู้ภัยในถ้ำ อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 2018 วิศวกรของ Sodu Null Company ประเทศเยอรมัน ได้ทำการประยุกต์ระบบสื่อสารภายในถ้ำโดยผ่านทางสายเคเบิล (Field cable P-274) ซึ่งแต่เดิมใช้กับระบบโทรศัพท์ในถ้ำ (Cave phone) ดังแสดงในรูปที่ 14 (ก) มาใช้ในการส่งข้อความสั้น (SMS) ผ่านทางสมาร์ตโฟนสองเครื่องที่อยู่ปลายสายเคเบิลทั้งด้านที่อยู่ภายนอกถ้ำและภายในถ้ำ [9] เพื่อส่งข้อความสั้นผ่านโครงข่ายสัญญาณโทรศัพท์ไปยังเครื่องรับสมาร์ตโฟนที่

ปลายทางซึ่งอยู่ไหนก็ได้ภายในโครงข่ายเดียวกัน โดยตั้งชื่อผลงานนี้ว่า Cave phone for speleologists ดังแสดงในรูปที่ 14 (ข) ซึ่งวิธีการดังกล่าวก็ยังไม่ตอบโจทย์ให้กับโครงการวิจัยที่ได้นำเสนอเพราะยังคงต้องใช้สายเคเบิลในการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานที่อยู่ภายในและภายนอกถ้ำ



(ก) Cave Phone



(ข) SMS Transceiver from cave

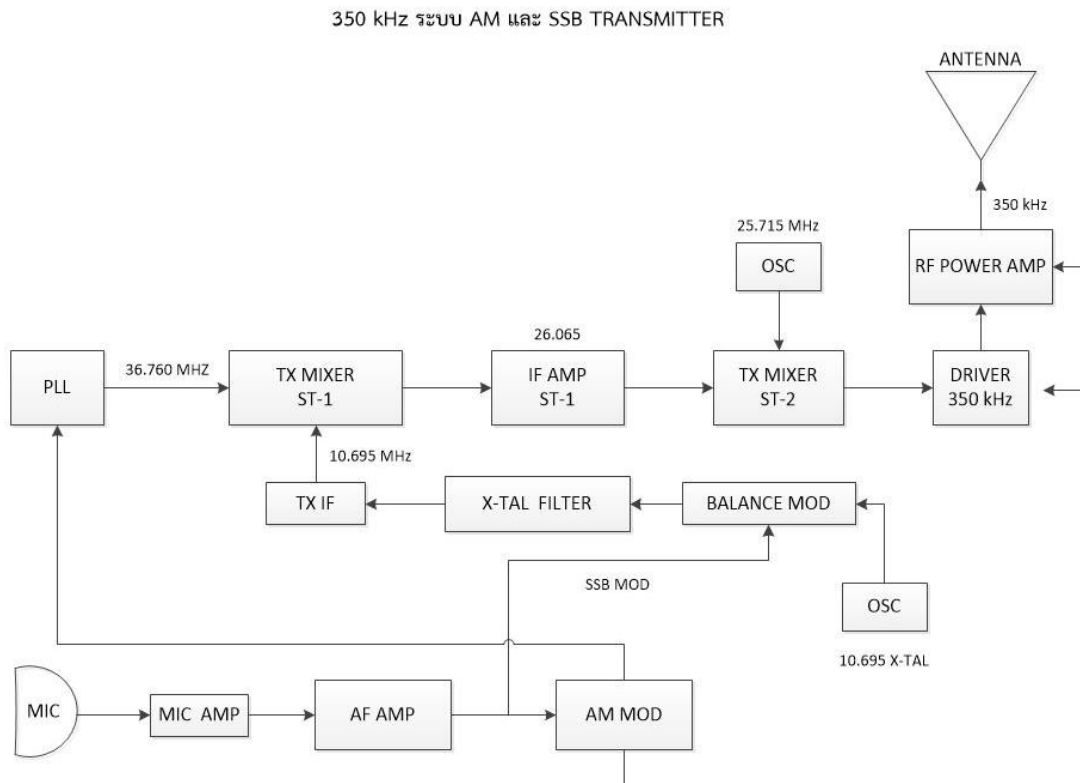
รูปที่ 14 ระบบสื่อสารผ่านทางสายเคเบิล P-274

ในบทความงานวิจัยอื่นๆ ที่พอจะเกี่ยวข้องกับเรื่องการใช้เครื่องรับส่งวิทยุที่เกี่ยวข้องกับถ้ำอยู่บ้าง เช่น บทความเรื่อง Geophysical cave detection with a portable Very Low Frequency (VLF) radio transmitter โดย F.P. Bosch และคณะวิจัยจาก RWTH Aachen University ประเทศเยอรมัน [10] ได้ใช้เครื่องส่งวิทยุย่านความถี่ VLF-12 kHz และเครื่องรับ Radiomagnetotelluric prototype system ย่านความถี่ 12 -270 kHz ซึ่งเป็นเครื่องรับวิทยุความถี่ต่ำมากที่ใช้งานทางธรณีฟิสิกส์แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการอนุมาณการนำไฟฟ้าใต้ผิวโลกจากการวัดการแปรผันของสนามแม่เหล็กและธรณีฟิสิกส์ตามธรรมชาติที่พื้นผิวโลกมาประยุกต์ใช้หาความลึกของถ้ำโดยไม่ได้เกี่ยวข้องกับการวิจัยทดลองเพื่อการติดต่อสื่อสาร แต่ในบทความนี้ได้แสดงให้เห็นว่าย่านความถี่ VLF สามารถผ่านพื้นผิวนอกถ้ำเข้าไปสู่ภายในถ้ำได้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ติดตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการนำ Software-Defined Radio (SDR) เพื่อมาประยุกต์ใช้งานในถ้ำ [11] ซึ่งเป็นแนวความคิดที่เกิดขึ้นหลังจากเหตุการณ์ถ้ำขุนน้ำนางนอนในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561 โดยในหลักการจะใช้เครื่องรับส่งวิทยุที่สามารถกวาดความถี่ (Frequency span) ได้ตั้งแต่ 10 s ของหน่วย MHz ไปจนถึง 6 GHz มาใช้งาน และออกแบบให้เครื่องรับส่งวิทยุสามารถเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมของถ้ำที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้ซอฟต์แวร์เป็นตัวตัดสินใจ ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อของ Cognitive radio system อย่างไรก็ตามแนวคิดในรูปแบบนี้เป็นเพียงแนวคิดที่เกิดขึ้นในวันที่เกิดเหตุการณ์ แต่จนถึงบัดนี้ยังไม่พบว่าบริษัทเจ้าของความคิดดังกล่าวจะสร้างผลงานที่เป็นรูปธรรมออกมาสู่ตลาดได้ ซึ่งหากวิเคราะห์ทางทฤษฎีแล้วพบว่าที่ผ่านมาระบบ Cognitive radio system นั้นประสบความสำเร็จมาระยะเวลาหนึ่งแล้ว แต่ในกรณีที่ต้องกวาดความถี่ใช้งานที่มีช่วงแถบความถี่กว้างมากๆ นั้น ปัญหาใหญ่ที่พบก็คือ ระบบสายอากาศที่เรียกว่า Cognitive antenna ไม่สามารถสร้างขึ้นมาใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำตั้งแต่ VHF ลงไป เนื่องจากขนาดของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่กวาดจะมีขนาดที่แตกต่างกันอย่างมาก

4. การออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ AM/SSB

ในระยะแรกของการดำเนินโครงการวิจัย ทางคณะผู้วิจัยได้เริ่มทำการออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ AM/SSB โดยมีองค์ประกอบตามบล็อกไดอะแกรมที่แสดงไว้ในรูปที่ 15 – 18 การทำงานของวงจรถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1) วงจรภาคส่ง 2) วงจรภาครับ 3) วงจรออสซิลเลเตอร์ และ 4) วงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ โดยทั้งหมดได้ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 350 kHz สามารถทำงานได้ทั้งแบบ AM และ SSB

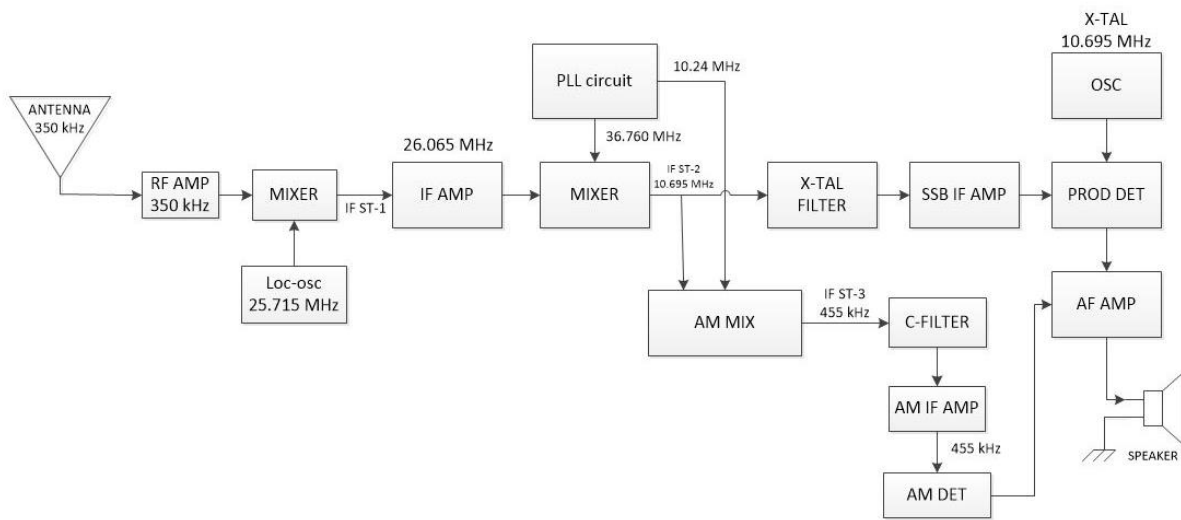


รูปที่ 15 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรเครื่องส่งวิทยุความถี่ 350 kHz ระบบ AM/SSB รุ่นที่ 1

หลักการการทำงานของวงจรเครื่องส่งวิทยุความถี่ 350 kHz ระบบ AM/SSB ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 15 จะเริ่มต้นจากสัญญาณเสียงจากการพูดจะถูกส่งผ่านไมโครโฟน (Microphone) และวงจรขยายไมโครโฟน (Mic preamplifier) เป็นอันดับแรก จากนั้นถูกส่งต่อไปยังวงจรขยายกำลังสัญญาณเสียง (AF amplifier) แล้วทำการผสม (Modulation) คลื่นเสียงที่ถูกขยายแล้วเข้ากับคลื่นพาห์ที่ความถี่ 350 kHz แบบใช้แถบข้างเดียว (SSB: Single Side Band) โดยใช้วิธีผสมสัญญาณแบบสมดุล (Balance modulation) จากนั้นส่งต่อไปยังภาคผสมก่อนส่งออก (Tx Mixer) ซึ่งรับสัญญาณมาจากวงจรเฟสล็อกคูล (PLL: Phase Lock Loop) ความถี่ 36.760 MHz ที่มีการผสมสัญญาณความถี่กลาง (IF: Intermediate Frequency) ที่สร้างจากผลึกแร่คริสตัล (X-Tal) ความถี่ 10.695 MHz ซึ่งใช้ในวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลในการสร้างการผสมสัญญาณแบบ SSB แล้วผ่านวงจรกรอง (X-Tal Filter) ส่งต่อไปยังวงจรส่งสัญญาณความถี่กลาง (TX IF) เพื่อส่งไปผสมสัญญาณกับความถี่ 36.760 MHz ที่ถูกสร้างขึ้นมาจากวงจร PLL ส่งผลให้เกิดเป็นความถี่กลางตัวใหม่ที่ความถี่ 26.065 MHz และถูกขยายให้มีกำลังสูงขึ้นในวงจรขยายความถี่กลางขั้นที่ 1 (IF Amplifier ST-1) ก่อนส่งเข้าไปให้ภาคผสมสัญญาณการส่งขั้นที่ 2 (TX Mixer ST-2) กับความถี่ 25.715 MHz อีกครั้ง

หนึ่งเพื่อให้ได้ความถี่คลื่นวิทยุซึ่งทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห้ที่ความถี่ 350 kHz ตามที่ต้องการ จากนั้นทำการยกระดับของสัญญาณ AM/SSB ให้สูงขึ้นด้วยวงจรขับ (RF Driver) เพื่อให้มีระดับกำลังเพียงพอที่ส่งให้ภาคขยายกำลังความถี่วิทยุ (RF Power amplifier) ภาคสุดท้าย ก่อนส่งให้กับสายอากาศทำหน้าที่ในการแผ่คลื่นออกอากาศต่อไป สำหรับภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายนี้ ทางคณะผู้วิจัยจะได้ทำการพิจารณาอีกครั้งหนึ่งว่าจะใช้กำลังส่งเท่าใดในกรณีของเครื่องส่งวิทยุแบบประจำที่และแบบเคลื่อนที่

350KHz AM และ SSB RECEIVER

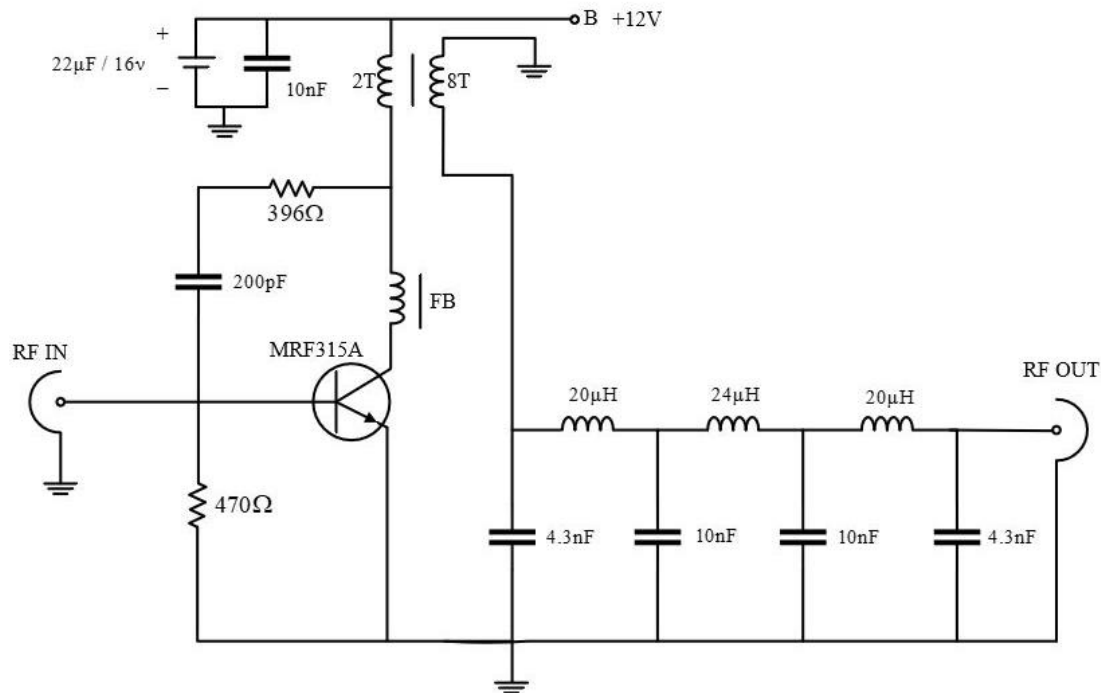


รูปที่ 16 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรเครื่องรับวิทยุความถี่ 350 kHz ระบบ AM/SSB รุ่นที่ 1

สำหรับหลักการทำงานวงจรเครื่องรับวิทยุ 350 kHz ระบบ AM/SSB ซึ่งแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 16 จะเริ่มต้นจากสัญญาณ AM/SSB ที่มาจากสถานีส่งต้นทางจะถูกส่งด้วยสายอากาศภาครับทางด้านซ้ายมือของภาพแล้วถูกส่งต่อไปยังวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ (RF Amplifier) เพื่อยกระดับสัญญาณให้สูงขึ้นก่อนถูกส่งต่อไปยังวงจรดีมอดูเลเตอร์ (Demodulator) ซึ่งถูกออกแบบโดยใช้ความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (Local oscillator) ที่ความถี่ 25.715 MHz เข้าไปผสมกับสัญญาณความถี่ 350 kHz AM/SSB ที่ผ่านทางสายอากาศภาครับในวงจรผสมสัญญาณ (Mixer) จะทำให้ได้ความถี่กลางที่ความถี่ 26.065 MHz กลับคืนมา จากนั้นทำการยกระดับของสัญญาณความถี่กลางดังกล่าวอีกครั้งหนึ่งให้สูงขึ้นด้วยวงจรขยาย (IF Amplifier) อีกครั้งหนึ่งแล้วจึงส่งเข้าไปในวงจรผสมสัญญาณอีกชุดหนึ่งกับความถี่ 36.760 MHz ที่มาจากวงจร PLL ที่อยู่ในภาครับ จะทำให้ได้ความถี่กลางชั้นสอง (IF ST-2) ที่ความถี่ 10.695 MHz อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการรับสัญญาณในแบบ AM สัญญาณที่ความถี่ 10.695 MHz จะถูกส่งต่อมาที่วงจรดีมอดูเลเตอร์ระบบ AM โดยใช้วงจรผสมสัญญาณ (AM Mixer) โดยผสมสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ 10.24 MHz จากวงจร PLL ชุดเดิม ก็จะทำให้ได้ความถี่กลางชั้นสามของระบบ AM มาตรฐานที่ความถี่ 455 kHz จากนั้นทำการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองแบบเซรามิก (Ceramic Filter: CF) และยกระดับของสัญญาณความถี่กลางนี้อีกครั้งหนึ่งด้วยวงจรขยาย (AM IF Amplifier) จึงส่งต่อไปยังวงจรดีเท็คเตอร์ (AM Detector) เพื่อตัดสัญญาณคลื่นพาห้ออกไปให้เหลือเฉพาะความถี่เสียงที่ต้องการแล้วส่งต่อไปยังวงจรขยายสัญญาณเสียง และส่งออกไปสู่ลำโพงต่อไป ส่วนกรณีที่ต้องการเลือกรับสัญญาณในแบบ SSB นั้น ความถี่กลาง 10.695 MHz

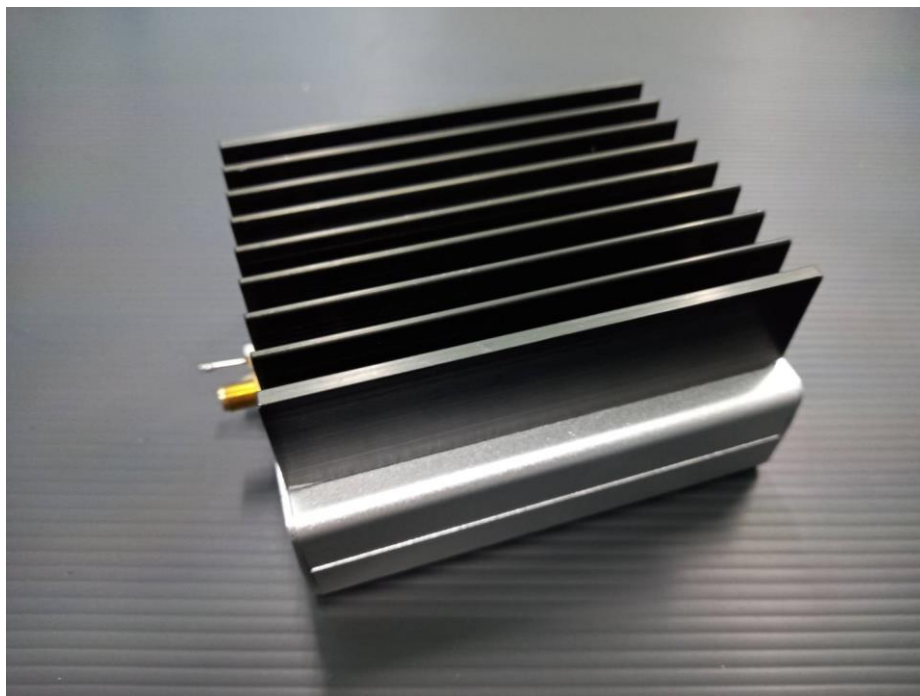
จะผ่านวงจรกรองแบบคริสตัล (X-TAL Filter) ให้เหลือเฉพาะความถี่กลางของ SSB จริงๆ และถูกยกระดับของสัญญาณด้วยวงจรขยาย (SSB IF Amplifier) อีกครั้งหนึ่งก่อนเข้าสู่วงจรถีเท็คเตอร์แบบผลคูณ (Product detector) ด้วยความถี่ 10.695 MHz จาก X-TAL ซึ่งสามารถปรับแต่งค่า RIT (Receiver Incremental Tuning) เพื่อให้ได้สัญญาณเสียงในระบบ SSB ออกมาได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากนั้นส่งต่อไปให้กับภาคขยายเสียงเพื่อออกลำโพงของเครื่องรับวิทยุนี้ต่อไป

7 WATTS 350 kHz RF POWER AMPLIFIER



รูปที่ 17 วงจรภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายของเครื่องส่งวิทยุความถี่ 350 kHz

จากรูปที่ 17 เป็นวงจรภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายของเครื่องส่งวิทยุความถี่ 350 kHz โดยใช้ทรานซิสเตอร์ MRF 315 ต่อร่วมกับวงจรไบอัสเพื่อจ่ายแรงดันและควบคุมกระแสไฟฟ้าให้กับตัวทรานซิสเตอร์ โดยมีวงจรกรองความถี่ 300- 400 kHz และปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้ได้ 50 โอห์มทั้งที่อินพุตและเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์เพื่อให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์กันระหว่างเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุ AM/SSB ที่ได้เตรียมทดลองสร้างเครื่องต้นแบบไว้ อย่างไรก็ตามเครื่องต้นแบบจากวงจรในรูปที่ 17 ได้ถูกสร้างขึ้นมาก่อนเป็นอันดับแรกดังแสดงในรูปที่ 18 เนื่องจากมีความจำเป็นต้องใช้ขยายกำลังความถี่วิทยุในย่านปลายของความถี่ LF และย่านต้นของความถี่ MF ให้กับเครื่องผลิตคลื่นความถี่วิทยุ (RF Signal generator) ที่จำเป็นต้องใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่ในย่านดังกล่าวที่เกิดขึ้นในถ้าให้ลู่วางตามวัตถุประสงค์เนื่องจากเครื่องผลิตคลื่นความถี่วิทยุที่สั่งซื้อจากต่างประเทศมีกำลังส่งออกไม่เพียงพอต่อการดำเนินการตามขั้นตอนการวิจัยที่กำหนดไว้



รูปที่ 18 ต้นแบบวงจรภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายของเครื่องส่งวิทยุความถี่ 350 kHz

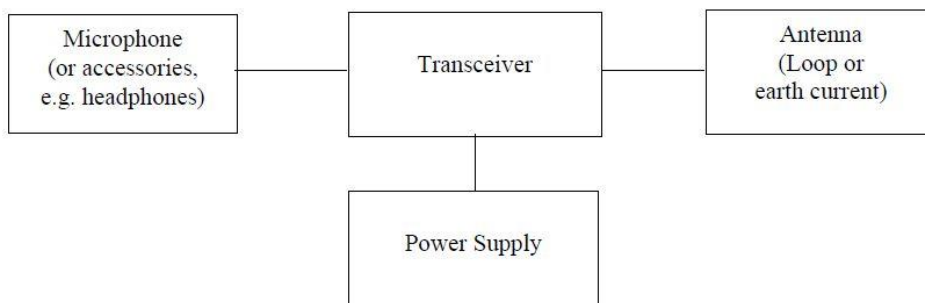
การออกแบบเครื่องรับส่งวิทยุสื่อสารแบบอเนกประสงค์ระบบ AM/SSB รุ่นที่ 1 ที่ความถี่ 350 kHz ถูกออกแบบสร้างขึ้นมาเป็นอันดับแรกก่อนที่ผลสรุปในเรื่องของการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุภายใน ถ้าจะเสร็จสิ้นในทุกความถี่ที่กำหนด เนื่องจากคณะผู้วิจัยต้องการดำเนินการวิจัยที่มีตัวชี้วัดหลายส่วนให้สามารถเดินหน้าไปได้แบบขนานกันไป จึงไม่สามารถที่จะรอผลการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุให้ครบถ้วนก่อนได้ การออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารระบบ AM/SSB รุ่นที่ 1 จึงได้ใช้ประสบการณ์จากที่เคยสำรวจการแพร่กระจายคลื่นวิทยุระบบ AM ภายในถ้ำดงที่กล่าวไว้ข้างต้น มาออกแบบวงจรเครื่องรับส่งวิทยุก่อนที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งเป็นช่วงต้นของย่านความถี่ MF ไปก่อน ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนวงจรให้ทำงานที่ความถี่อื่นได้โดยไม่ยากนัก โดยทำการออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารแยกออกเป็นส่วนของภาคส่งและภาครับก่อน รวมทั้งออกแบบและทำการทดสอบวงจรส่วนสำคัญที่เป็นตัวกำหนดความถี่คลื่นพาห้ของเครื่องวิทยุสื่อสารนั่นคือ วงจรออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (Local oscillator) เป็นแบบ PLL ซึ่งนิยมใช้ในวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากให้ความเสถียรในการสร้างความถี่ได้ดีกว่าและไม่ซับซ้อนมากอีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนให้สร้างความถี่อื่นที่ใกล้เคียงกันออกมาได้ไม่ยากนัก นอกจากนี้ยังได้ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายสำหรับใช้คู่กับวงจรภาคส่งของเครื่องวิทยุสื่อสารและนำมาใช้ประโยชน์ในการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นในย่านความถี่ที่มีปัญหาเรื่องของอุปกรณ์ที่มีกำลังไม่สูงพออีกชุดหนึ่งด้วย

5. การออกแบบวงจรและสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ SSB รุ่นที่ 1

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF, VHF และ UHF ภายในถ้ำหินปูน และถ้ำหินทรายจนกระทั่งครบถ้วนทุกความถี่ที่กำหนดแล้ว ทางคณะผู้วิจัยพบว่าการใช้คลื่นความถี่ 350 kHz (MF ตันแถบ) มีการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินหรือแพร่ผ่านพื้นโลกจากบนภูเขาลงไปในโพรงถ้ำหินปูน ได้ดีที่สุดในแง่ของระยะทางที่ไกลกว่าความถี่ที่สูงขึ้นไปในทุกๆ ย่าน แม้ว่าจากงานวิจัยและการทดสอบภาคสนามของนักวิจัยต่างประเทศได้เน้นในการใช้งานความถี่ในย่าน VLF และ LF ก็ตาม แต่เมื่อนำผลการวัดทดสอบมาเปรียบเทียบกันแล้วกลับพบว่าในกรณีของถ้ำหินปูนนั้นที่ความถี่ 350 kHz มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านชั้นหินต่ำกว่าความถี่ 87 kHz ซึ่งเป็นความถี่ในย่าน LF และได้มีการทดสอบใช้งานจริงเพื่องานกู้ภัยในถ้ำแล้วในประเทศไทย (British Cave Research Association: BCRA) ในขณะที่การวัดทดสอบในถ้ำหินทรายที่ความถี่ 350 kHz มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านชั้นหินทรายสูงกว่าที่ความถี่ 87 kHz เพียงเล็กน้อย ดังนั้นการออกแบบเพื่อสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารสำหรับใช้งานในถ้ำสำหรับโครงการนี้จึงมุ่งไปที่ความถี่ 350 kHz เป็นหลัก เนื่องจากถ้ำส่วนใหญ่ในประเทศไทยจะเป็นถ้ำหินปูนและเป็นแหล่งท่องเที่ยวและนิยมในการเดินทางเข้าไปสำรวจ รวมทั้งเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความถี่ที่ต่ำกว่า 290 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ค้างคาอยู่ที่อาศัยอยู่ในถ้ำในประเทศไทยใช้ในการนำทาง และไม่เป็นการละเมิดข้อตกลงตามที่ได้รับอนุญาตจากกรมอุทยาน สัตว์ป่า และพันธุ์พืช กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ด้วย

การออกแบบและพัฒนางจรเครื่องวิทยุสื่อสารแบบส่งผ่านพื้นโลก หรือที่เรียกว่าระบบสื่อสารแบบ TTE (Through-The-Earth communication) นิยมใช้การผสมสัญญาณแบบ SSB ที่แถบข้างส่วนบน (USB: Upper Side Band) เนื่องจากประหยัดพลังงานไฟฟ้าและใช้แถบความถี่ (Frequency bandwidth) ขนาด 2.6 kHz ซึ่งแคบมากๆ โดยการออกแบบเครื่องวิทยุสื่อสารแอนะล็อกระบบ SSB-TTE รุ่นที่ 2 นี้ คณะผู้วิจัยได้อ้างอิงจากการเครื่องวิทยุสื่อสารที่ความถี่ 87 kHz “HeyPhone” ซึ่งออกแบบโดยทีมของ Dr. David Gibson แห่งสมาคม BCRA ประเทศอังกฤษ (รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์ หัวหน้าโครงการวิจัยนี้ เป็นสมาชิกสามัญของ BCRA ด้วย) เป็นหลัก โดยได้พัฒนาให้สามารถทำงานที่ความถี่ 350 kHz และมีกำลังส่งที่ปรับได้สูงกว่า และมีความไว (Sensitivity) ในการรับสัญญาณในส่วนของภาครับให้มีค่าสูงกว่าระบบที่สมาชิกของ BCRA ได้ออกแบบไว้ โดยหลักการการทำงานของเครื่องวิทยุสื่อสารดังกล่าวจะได้อธิบายเพื่อเป็นองค์ความรู้ในรูปของไดอะแกรมในลำดับถัดไป

5.1 องค์ประกอบทั่วไปของระบบวิทยุสื่อสาร



รูปที่ 19 แสดงไดอะแกรมของระบบวิทยุสื่อสารสำหรับส่งผ่านพื้นโลก

จากรูปที่ 19 เป็นไดอะแกรมของระบบวิทยุสื่อสารที่ออกแบบทั่วไป สำหรับส่วนที่เป็นเครื่องรับส่ง (Transceiver) ได้ออกแบบให้รับส่งสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียว (Single channel) แบบฮาร์ตฟิวเพิล็กซ์

(Half duplex) และใช้วิธีการผสมสัญญาณ (Modulation) แบบ SSB โดยใช้แถบข้างส่วนบนหรือ USB ที่ความถี่คลื่นพาห์ 350 kHz โดยใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ระบบสื่อสารแบบ TTE นี้จะเน้นการใช้สายอากาศแบบลงดิน (Grounded/Earth antennas) และหากระดับของสัญญาณสูงเพียงพอจะสามารถใช้สายอากาศแบบบ่วง (Loop antennas) ได้ด้วย ในส่วนระบบเสียงได้ออกแบบให้ใช้ไมโครโฟนภายนอก ส่วนลำโพงจะมีทั้งแบบติดตั้งในเครื่องและแบบหูฟัง (Head phone)

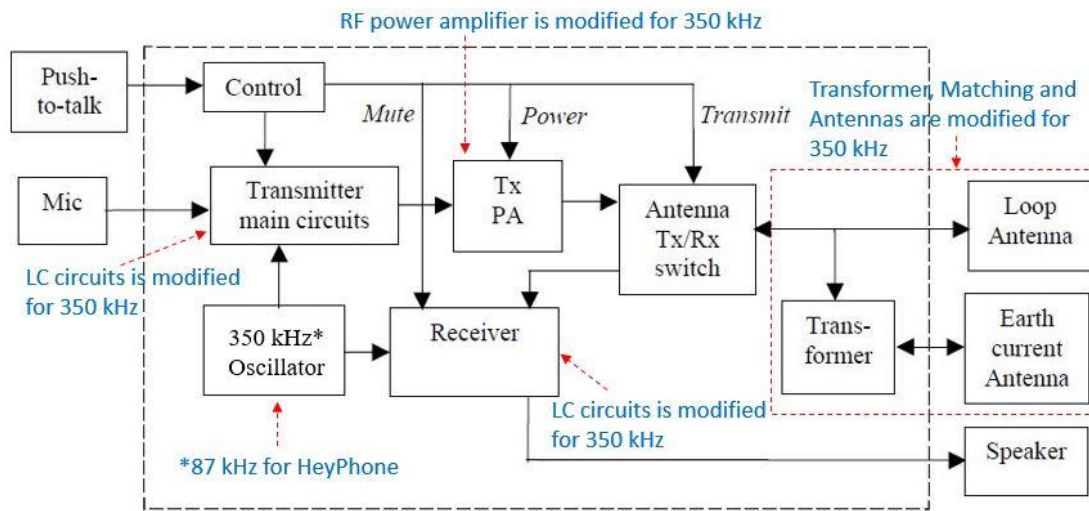
5.2 ทฤษฎีสันับสนุนการออกแบบระบบวิทยุสื่อสาร

จากการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นภายในโพรงถ้ำที่ความถี่ LF, MF, HF, VHF และ UHF ที่ผ่านมา หากไม่มีการศึกษาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงอาจมีความเข้าใจว่าทุกคลื่นความถี่ไม่สามารถส่งผ่านเนื้อหินเข้าไปได้ เนื่องจากมีความคิดว่าผนังหินจะหยุดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเหมือนกับแสงที่เราส่งไปกระทบมัน ซึ่งข้อเท็จจริงทางปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นก็คือ เมื่อคลื่นความถี่วิทยุที่ตกกระทบกับหินหรือดินนั้น กำลังของคลื่นที่ตกกระทบไม่ได้หยุดหรือหมดหายไปในพื้นที่พื้นใดที่พื้นผิว แต่ในความเป็นจริงจะเกิดการซึมซาบลงไปอย่างรวดเร็วโดยการผ่านทะลุ (Penetration) เข้าไปในเนื้อหินหรือเนื้อดินโดยใช้ความยาวคลื่นของความถี่นั้นผ่านทะลุเข้าไปนั่นเอง ดังนั้นหากมีการใช้ความยาวคลื่นที่ยาวพอก็จะเกิดระยะทางของการผ่านทะลุเข้าไปได้ไกลขึ้น เช่น กรณีของระบบวิทยุสื่อสาร HeyPhone ได้ใช้ความถี่ 87 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 3.5 กิโลเมตร (คำนวณจากความเร็วแสงในอากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที) แต่เนื่องจากความเร็วแสงจะลดลงขณะที่เดินทางในเนื้อหินหรือดิน ทำให้ความยาวคลื่นเดียวกันนี้มีความยาวคลื่นใต้ดินเหลือเพียงหลักร้อยเมตร ซึ่งหากความยาวคลื่นใต้ดินนี้มีขนาดมากกว่านี้ก็จะทำให้สามารถเจาะทะลุได้ไกลมากขึ้นหลายร้อยเมตรทีเดียว [12]

ระบบสื่อสารแบบ TTE นิยมใช้การผสมสัญญาณแบบ SSB ซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษที่ช่วยประหยัดกำลังไฟฟ้า เนื่องจากจะมีการส่งสัญญาณออกไปก็ต่อเมื่อมีการพูดเข้าไปในไมโครโฟนเท่านั้น และในขณะที่หยุดพูดแม้ว่าจะยังคงมีการกดสวิตช์ PTT เพื่อพูด (Push-to-Talk switch) ที่ไมโครโฟนก็ตามก็จะมีพลังงานใดๆ ถูกส่งออกไป ซึ่งแตกต่างจากการผสมสัญญาณแบบ FM เนื่องจากในระบบ FM สัญญาณวิทยุจะถูกส่งออกไปตลอดเวลาในขณะที่มีการกดสวิตช์เพื่อพูดแม้จะไม่มีเสียงพูดใส่เข้าไปในไมโครโฟนก็ตาม อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบ SSB ก็คือ ทางเครื่องรับจะไม่ทราบว่าเป็นขณะนั้นกำลังรับสัญญาณจากเครื่องส่งหรือไม่ เว้นแต่จะได้ยินเสียงของผู้ส่งออกมาเท่านั้น ทำให้มีผลต่อการทำงานของเครื่องรับอย่างชัดเจนก็คือ ไม่สามารถควบคุมสquelch (Squelch) ในการปิดเสียง (Mute) ได้ ทำให้เครื่องรับจะส่งเสียงซู่ซ่าน่ารำคาญในขณะที่ไม่มีสัญญาณวิทยุส่งเข้ามา อย่างไรก็ตามในการออกแบบวงจรสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารในรุ่นที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรควบคุมสquelch ของเครื่องวิทยุสื่อสารระบบ SSB ไว้ด้วยแล้ว

เครื่องวิทยุสื่อสารระบบ SSB รุ่นที่ 1 ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมาเมื่อสัญญาณเสียงกับคลื่นพาห์มีการมอดูเลตเข้าด้วยกันแล้วจะมีความกว้างแถบประมาณ 2.6 kHz โดยใช้แถบข้างส่วนบน หรือ USB ดังนั้นความถี่ที่ถูกมอดูเลตแล้วความกว้างแถบจะขยายไปทางความถี่ที่สูงขึ้นนั่นคือตั้งแต่ 350 kHz ถึง 352.6 kHz เท่านั้น

5.3 ระบบเครื่องรับส่งวิทยุ (Transceiver)

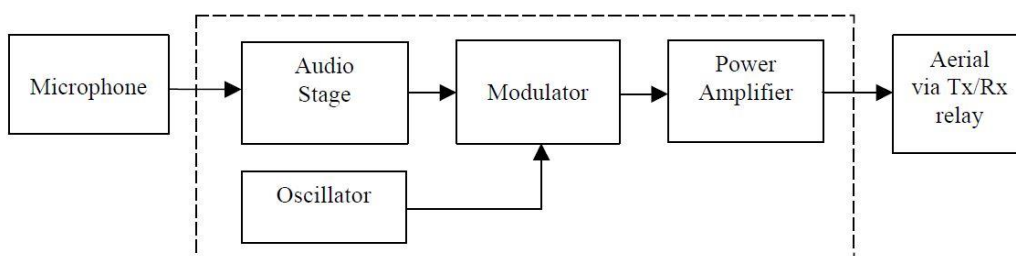


รูปที่ 20 แสดงไดอะแกรมของเครื่องรับส่งวิทยุระบบ SSB ต้นแบบของ HeyPhone 87 kHz ที่นำพัฒนาและปรับปรุงสำหรับใช้งานที่ความถี่ 350 kHz ของโครงการวิจัย

จากรูปที่ 20 ในกรอบเส้นประ คือ ไดอะแกรมวงจรรวมทั้งส่วนที่เป็นเครื่องส่ง (Transmitter) เครื่องรับ (Receiver) และส่วนควบคุม (Control) เพื่อใช้แสดงกระบวนการทำงานของเครื่องรับส่งวิทยุระบบ SSB-TTE ที่จะถูกสร้างเป็นเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบรุ่นแรกสำหรับโครงการวิจัยนี้ ซึ่งจะได้อธิบายหลักการทำงานอย่างละเอียดแยกในแต่ละส่วนและนักศึกษาสามารถนำมาเชื่อมโยงการทำงานของระบบรวมโดยใช้ทิศทางของหัวลูกศรในการลำดับกระบวนการทำงานตามไดอะแกรมตามรูปได้อย่างเข้าใจ

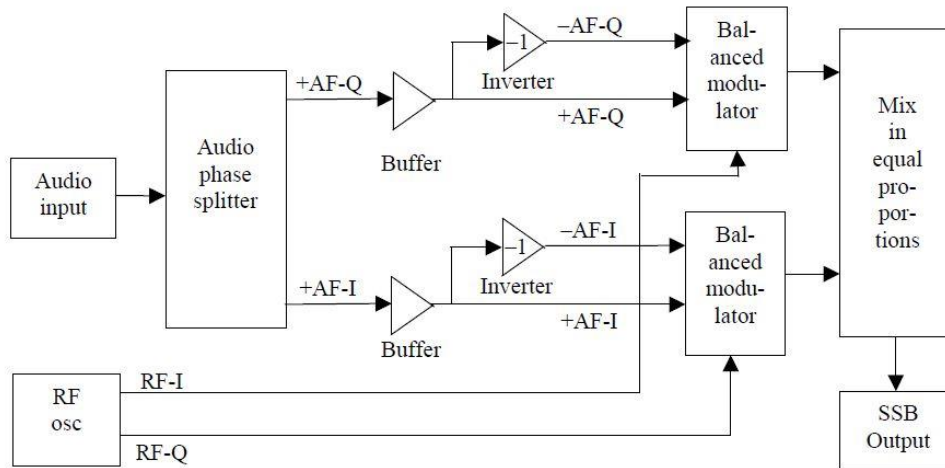
หมายเหตุ 1) จากไดอะแกรมจะเห็นว่าเส้นทางของ Mute ที่เชื่อมโยงไปที่ Receiver และเส้นทางของ Power เชื่อมตรงไปที่ Tx PA แต่ในทางปฏิบัติจริงบนวงจรต้นแบบจะเชื่อมโยงมาจากชุด Tx/Rx Relay Switch ไม่ได้ต่อตรงมาจากบอร์ดควบคุมตามภาพ 2) เส้นที่เชื่อมโยงจาก Receiver ไปยัง Speaker จะถูกเชื่อมต่อไปยังลำโพงที่อยู่ในไมโครโฟนด้วยเช่นกัน และ 3) ส่วนของวงจร 350 kHz Oscillator, Antenna Tx/Rx switch และ Transformer จะถูกออกแบบให้รวมอยู่บนบอร์ดของวงจรหลักของเครื่องส่ง (Transmitter main circuit) เพียงบอร์ดเดียว

1) ภาคเครื่องส่ง (Transmitter)



รูปที่ 21 แสดงไดอะแกรมภาคเครื่องส่งของเครื่องส่งวิทยุระบบ SSB ต้นแบบ

ไดอะแกรมของภาคเครื่องส่งในรูปที่ 21 คือส่วนของวงจรหลักของเครื่องส่ง ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นวงจรภาคเสียง (Audio stage) ที่รับสัญญาณเสียงมาจากไมโครโฟน (Microphone) เพื่อยกระดับสัญญาณทางไฟฟ้าให้สูงขึ้นก่อนส่งเข้าไปผสมสัญญาณในวงจร Modulator ร่วมกับความถี่คลื่นพาห์ 350 kHz ที่ส่งมาจากวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) ซึ่งความถี่คลื่นพาห์นี้ได้ถูกแบ่งใช้ในส่วนของวงจรภาครับด้วยอีกทางหนึ่ง จากนั้นส่งเข้าวงจรขยายกำลัง (Power amplifier) เพื่อขยายกำลังคลื่นความถี่ที่ถูกผสมสัญญาณแล้วให้สูงขึ้นก่อนส่งต่อไปกับสายอากาศโดยผ่านวงจรรีเลย์เพื่อใช้เลือกโหมด Tx/Rx ในขณะที่มีการกด/ปล่อย สวิตช์ PTT

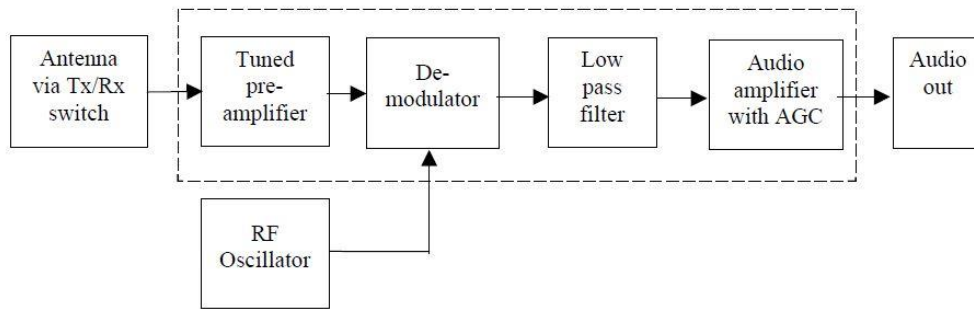


รูปที่ 22 แสดงไดอะแกรมภาคมอดูเลเตอร์ของเครื่องส่งวิทยุระบบ SSB

สำหรับส่วนที่สำคัญของวงจรภาคเครื่องส่งก็คือส่วนของวงจรผสมสัญญาณหรือ Modulator ที่มอดูเลตสัญญาณแบบ SSB ซึ่งแสดงไดอะแกรมไว้ในรูปที่ 22 ในที่นี้มีการใช้เทคนิคการปรับเฟส (Phasing technique) ของสัญญาณเสียงแยกออกเป็นสองชุดซึ่งแต่ละชุดสัญญาณจะมีความต่างเฟสกัน 90 องศา โดยวงจรแยกเฟสเสียงหรือ Audio phase splitter (อักษร I หมายถึง in-phase ขณะที่ Q หมายถึง Quadrature หรือต่างเฟส 90 องศา) โดยความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงยังคงเหมือนเดิม และเพื่อให้การผสมสัญญาณโดยใช้วิธีแยกสัญญาณเสียงด้วยกันจัดเฟสดังกล่าว จึงจำเป็นต้องออกแบบให้วงจรออสซิลเลเตอร์ต้องผลิตสัญญาณความถี่ 350 kHz สองชุดที่มีการจัดเฟสเช่นเดียวกับสัญญาณเสียงด้วย เพื่อส่งให้กับวงจรผสมสัญญาณแบบสมมาตร (I-Q Balanced modulator) สองชุด เพื่อส่งสัญญาณที่ถูกผสมแล้วด้วยเฟสที่แตกต่างกันไปรวมกันอย่างเหมาะสมในวงจรผสมสัญญาณ (Mixer) สุดท้ายจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณแบบ SSB หากสัญญาณเสียง AF-I ถูกมอดูเลตด้วยคลื่นพาห์ RF-I และสัญญาณ AF-Q ถูกมอดูเลตด้วย RF-Q สัญญาณที่มอดูเลตแล้วแบบ LSB (Lower Side Band) ก็จะถูกผลิตออกมา ในขณะที่สัญญาณเสียง AF-I ถูกมอดูเลตด้วยคลื่นพาห์ RF-Q และสัญญาณ AF-Q ถูกมอดูเลตด้วย RF-I สัญญาณแบบมอดูเลตแล้วจะเปลี่ยนเป็นแบบ USB (Upper Side Band)

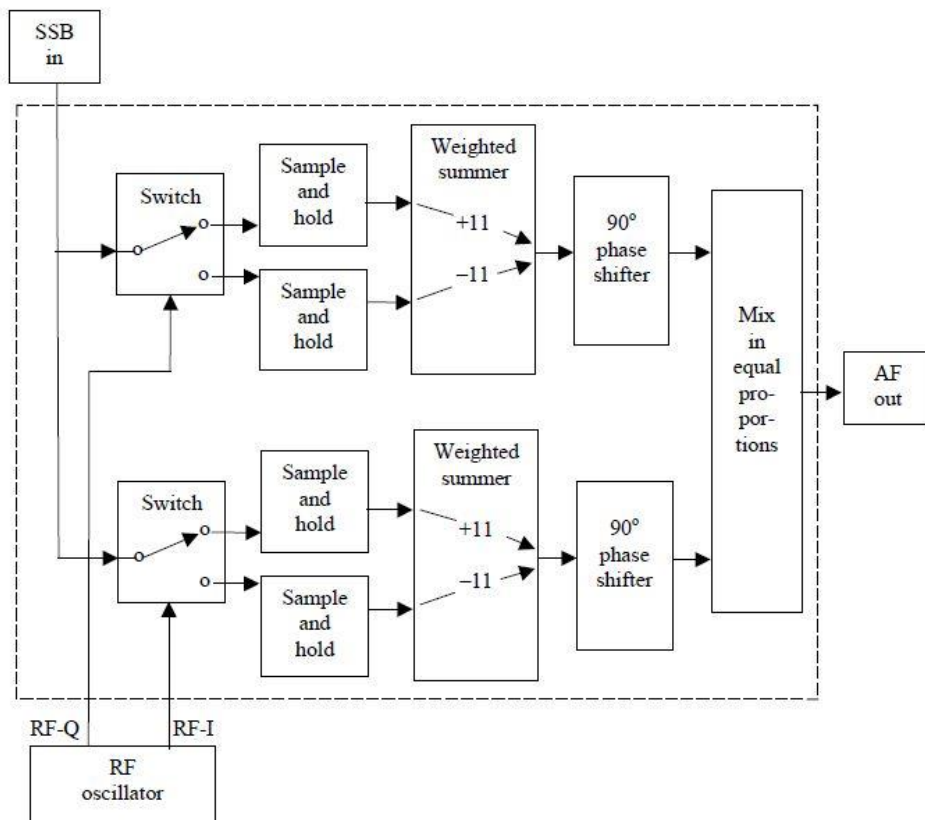
หมายเหตุ ส่วนของวงจร Oscillator 350 kHz คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาใหม่โดยใช้เทคนิคซินธิไซเซอร์ (Synthesizer technique) ซึ่งจะได้แสดงในรายละเอียดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

2) ภาคเครื่องรับ (Receiver)



รูปที่ 23 แสดงไดอะแกรมภาคเครื่องรับของเครื่องรับวิทยุระบบ SSB ต้นแบบ

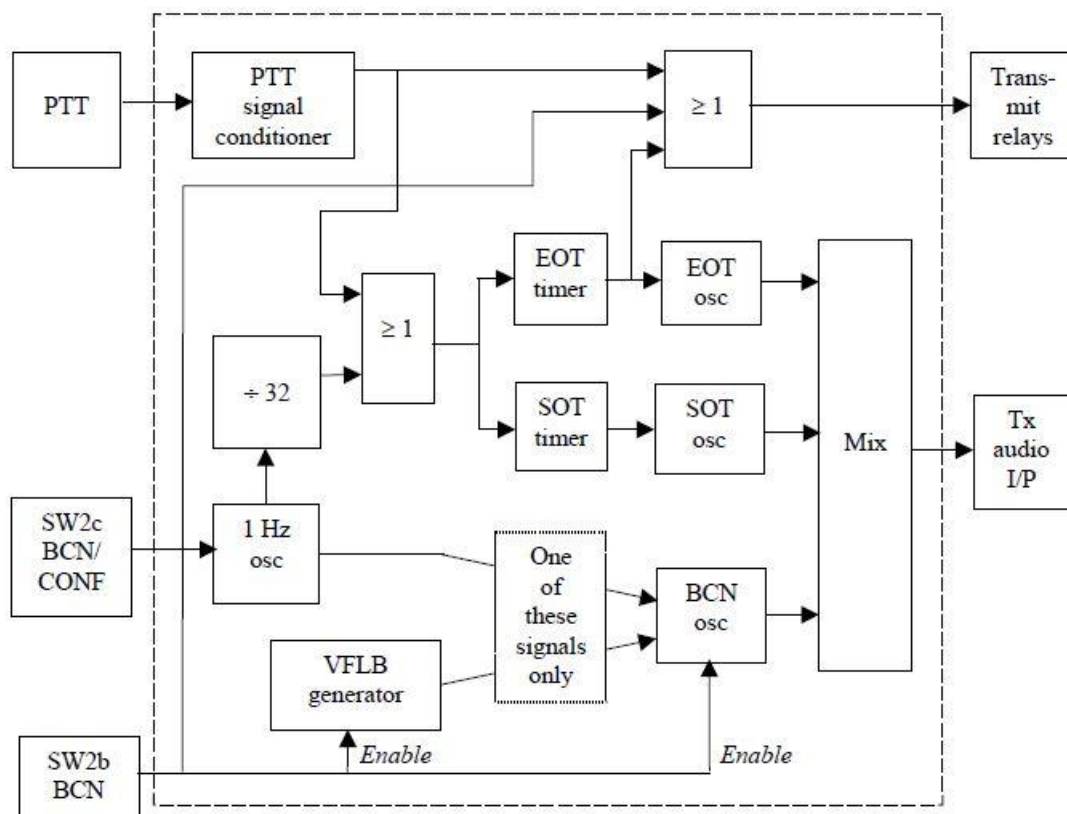
ไดอะแกรมของภาครับของเครื่องรับส่งวิทยุระบบ SSB-TTE ดังแสดงในรูปที่ 23 ประกอบด้วยภาคปริแอมป์ (Tuned pre-amplifier) ที่ภายในจะมีวงจรขยายสองชุดต่อกัน โดยวงจรขยายชุดแรกถูกออกแบบโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเฟ็ดต่อกันสองตัว (Dual-FET cascade amplifier) ซึ่งสามารถให้อัตราขยายประมาณ 40 dB และชุดที่สองใช้โอปแอมป์แบบสัญญาณรบกวนต่ำ (Low-noise op-amp) ที่ให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นอีกสองเท่าหรือ 3 dB หลังจากนั้นจึงส่งสัญญาณ SSB ที่รับเข้ามาจะถูกปรับปรุงคุณภาพและยกระดับของสัญญาณให้สูงขึ้นแล้วส่งต่อไปยังภาคถอดสัญญาณ (Demodulator) เพื่อแยกสัญญาณเสียงออกจากคลื่นพาห์ ซึ่งมีไดอะแกรมการทำงานภายในของวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 24



รูปที่ 24 แสดงไดอะแกรมภาค Demodulator ของเครื่องรับวิทยุระบบ SSB ต้นแบบ

จากไดอะแกรมของภาค Demodulator ในรูปที่ 24 จะเห็นว่ามีการใช้ส่วนของวงจรที่รับสัญญาณสัญญาณที่มีการมอดูเลตมาแล้ว (RF SSB) เหมือนกันสองชุด โดยวงจรแต่ละชุดจะถูกสลับกันที่ความถี่คลื่นพาหะระหว่างวงจร Sample and hold สองชุด ความแตกต่างระหว่างวงจรสองชุดของภาคดีมอดูเลเตอร์นี้ก็คือ สวิตช์ตัวหนึ่งจะถูกสลับสถานะโดยสัญญาณ RF-I (in-phase) ที่ส่งมาจากออสซิลเลเตอร์ ส่วนสวิตช์อีกตัวหนึ่งจะสลับสถานะโดยสัญญาณ RF-Q (quadrature) ที่ถูกส่งออกมาจากวงจรออสซิลเลเตอร์ตัวเดียวกัน โดยสวิตช์ที่ใช้ทำหน้าที่ดังกล่าวจะเป็น IC ที่ใช้ในวงจร Balanced modulator ในภาคเครื่องส่งนั่นเอง หลังจากสัญญาณ RF SSB ถูกแยกความถี่คลื่นพาหะที่ส่งออกไปแล้วก็จะเหลือเฉพาะสัญญาณเสียง (AF out) เพื่อส่งต่อไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass filter) แบบ Third-order multiple-feedback Butterworth ซึ่งให้ค่าอัตราขยายเท่ากับหนึ่งในช่วงที่ยอมให้ความถี่นั้นผ่าน จากนั้นส่งต่อไปยังวงจรขยายสัญญาณเสียงที่มีการควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (Audio amplifier with AGC) เพื่อนำไปเชื่อมต่อกับลำโพงและชุดหูฟังต่อไป

3) ภาคควบคุม (Control)



รูปที่ 25 แสดงไดอะแกรมภาคควบคุมของเครื่องรับส่งวิทยุระบบ SSB ต้นแบบ

สำหรับส่วนที่เป็นภาคควบคุมของวิทยุสื่อสาร HeyPhone นั้น ได้ถูกออกแบบให้มีการทำงานหลายฟังก์ชันมารวมไว้บนบอร์ดเดียว ดังแสดงในรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่าเส้นทางการเชื่อมต่อที่มาจากสวิตช์กดพูด (PTT Signal conditioner) จะส่งสัญญาณไปควบคุมวงจรอีกหลายส่วน และมีการสร้างโทนเสียงสองความถี่ที่แตกต่างกันขึ้นมาโดยอัตโนมัติทุกครั้งที่มีการกดและปล่อยคีย์ PTT (Push-to-Talk) โดยส่วนประกอบของวงจรควบคุมทั้งหมดได้แสดงไว้ภายในกรอบเส้นประและส่งสัญญาณไปยังบอร์ดของวงจรเครื่องส่งซึ่งอยู่ภายนอก การทำงานของวงจรควบคุมภายในกรอบเส้นประจะมีสองตัวเลือก คือ ชุดควบคุมสัญญาณชุดล่างจะ

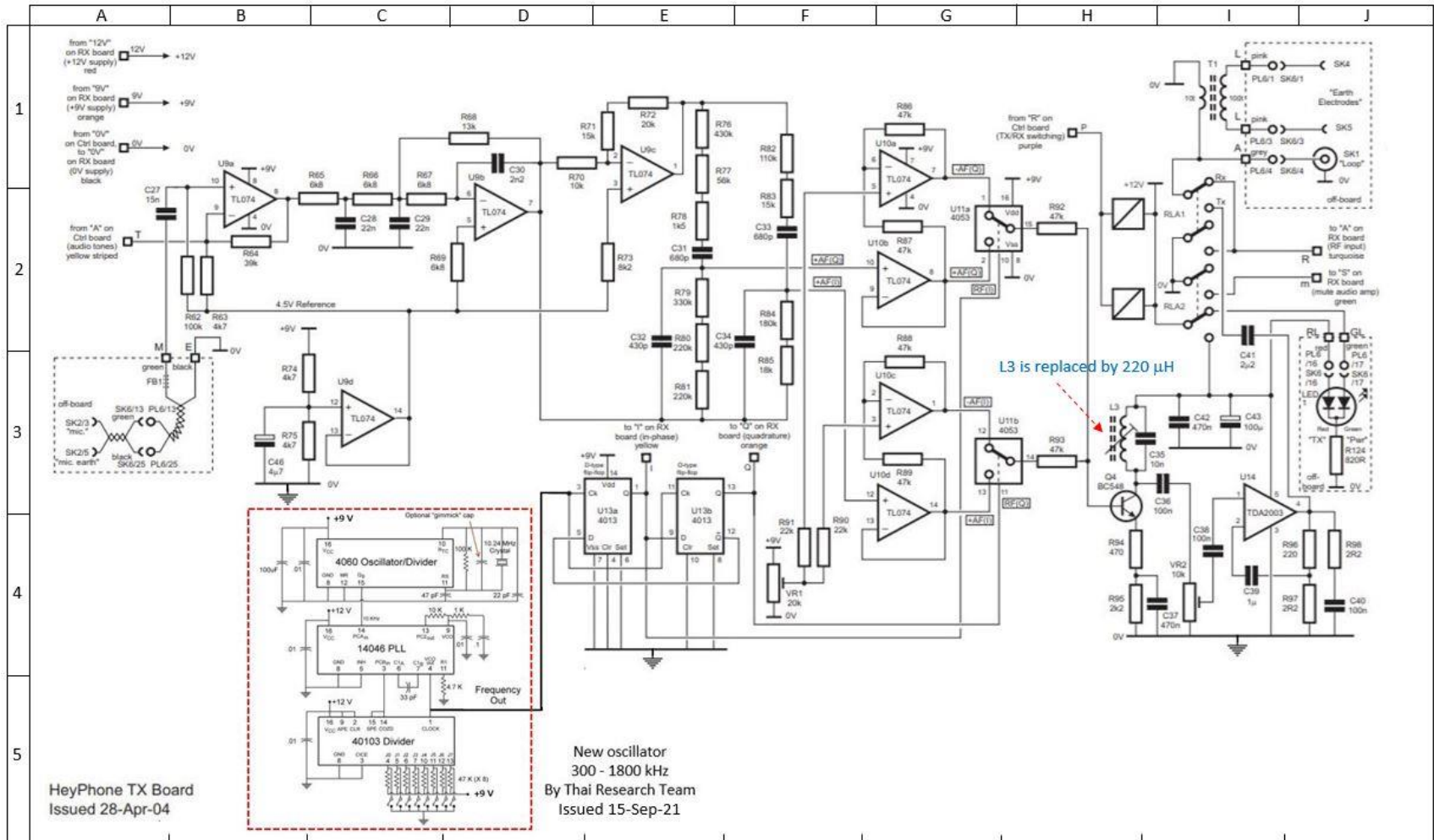
ถูกเลือกใช้สำหรับเป็นสัญญาณบีคอนที่เป็นรหัสมอร์ส (Morse beacon) สำหรับใช้ในการส่งสัญญาณเสียง บีบๆ ไปเตือนผู้ปฏิบัติงานที่ใช้เครื่องวิทยุสื่อสารอีกสถานีหนึ่งให้ทำการเฝ้าฟังต่อไป ขณะที่ชุดบนจะใช้เลือกสำหรับสัญญาณที่ไม่ใช่แบบบีคอนที่เป็นรหัสมอร์ส (non-Morse beacon) โดยมีสวิตช์ SW2c ทำหน้าที่ในการเปิดสัญญาณ (Enable signal) เพื่อใช้งานฟังก์ชันนี้ เมื่อสวิตช์ถูกปรับไปไว้ที่ตำแหน่ง BCN หรือตำแหน่ง CONF (Confidence) หมายถึง ฟังก์ชันสำหรับการทำงานในโหมดสแตนด์บายแต่มีการส่งสัญญาณบีบส่งออกไปทุกๆ 30 วินาที เพื่อใช้ในการยืนยันและมั่นใจได้ว่าเครื่องวิทยุสื่อสารที่อยู่ในโครงข่ายเดียวกันยังอยู่ในรัศมีทำการที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ แต่เมื่อต้องการสื่อสารตามปกติจะต้องปรับสวิตช์กลับมาที่ตำแหน่ง Speaker มิฉะนั้นการรับส่งข้อความอาจไม่ครบถ้วนเนื่องจากในทุกๆ 30 วินาทีจะมีการส่งสัญญาณบีบสวนทางออกไป ขณะที่สวิตช์ SW2b จะทำหน้าที่เปิดใช้งานสัญญาณบีคอนทันทีเมื่อปรับสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง BCN สำหรับวงจรในกรอบสี่เหลี่ยมเล็กที่มีสัญลักษณ์ ≥ 1 จะแทนไอซี Logic OR Gate เมื่อมีลอจิกสถานะมากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งส่งเข้ามาที่อินพุตขาใดขาหนึ่งก็จะส่งสัญญาณไปเปิดวงจร EOT Oscillator หรือวงจร SOT Oscillator โดยผ่านทางวงจร EOT timer หรือ SOT timer เพื่อกำหนดเวลาในการปล่อยสัญญาณความถี่เสียงพิเศษสำหรับบอกว่าจะเริ่มส่งสัญญาณ (Start of Transmission) และหลังจากเสร็จสิ้นการส่งสัญญาณ (End of Transmission) หรือจบข้อความที่ส่งออกไปแล้ว โดยความถี่เสียงของสัญญาณ EOT, SOT และ BCN จะมีความถี่อยู่ที่ 1950 Hz, 1620 Hz และ 808 Hz ตามลำดับ เพื่อช่วยให้ผู้รับฟังอยู่ที่เครื่องวิทยุสื่อสารปลายทางสามารถแยกแยะสถานะในการทำงานในแต่ละขั้นตอนได้ง่าย วงจรออสซิลเลเตอร์สามความถี่นี้จะมีเพียงของสัญญาณ BCN ที่มีเงื่อนไขพิเศษกว่าของ EOT และ SOT ตรงที่การอนุญาตให้ทำงานต้องมีสัญญาณจากสองวงจรมาเปิดการทำงาน นั่นคือ จากวงจรผลิตสัญญาณ VFLB (Voice-Free Location Beacon) และจากวงจรออสซิลเลเตอร์ความถี่ 1 kHz เนื่องจากมีเงื่อนไขการใช้งานผ่านทั้งสวิตช์ SW2b และ SW2c โดยความถี่จากออสซิลเลเตอร์ทั้งสามชุด (ทำงานไม่พร้อมกัน) จะถูกส่งเข้าวงจร Mixer และส่งต่อไปให้กับอินพุตของภาคเครื่องส่ง (Tx audio I/P) เพื่อทำการมอดูเลตแบบ SSB ต่อไป ในขณะที่วงจรชุดบนจะมีไอซี Logic OR Gate สามอินพุตเพื่อรับเงื่อนไขอย่างใดอย่างหนึ่งทั้งจากการกดคีย์สวิตช์ PTT เพื่อพูด หรือจากการส่งสัญญาณบีคอน หรือจากกรณีที่สัญญาณ EOT สิ้นสุดการส่ง เพื่อส่งสัญญาณไปยังชุดรีเลย์ที่กำหนดสถานะของการส่ง (Transmit relay)

หมายเหตุ: เนื่องจากไดอะแกรมของภาคควบคุมของเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone ความถี่ 87 kHz ถูกออกแบบมาจากประสบการณ์การทำงานของนักวิจัยวิจัยถ้าชาวอังกฤษมาอย่างยาวนานและต่อเนื่อง ดังนั้นการออกแบบฟังก์ชันตามความจำเป็นต่อการใช้งานที่เป็นองค์ประกอบของภาคควบคุมจึงมีความสมบูรณ์ครบถ้วนแล้ว ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงใช้หลักการและวงจรภาคควบคุมของวิทยุสื่อสาร HeyPhone ทั้งหมด มาใช้กับเครื่องวิทยุสื่อสารในถ้าที่ความถี่ 350 kHz ในโครงการวิจัยนี้

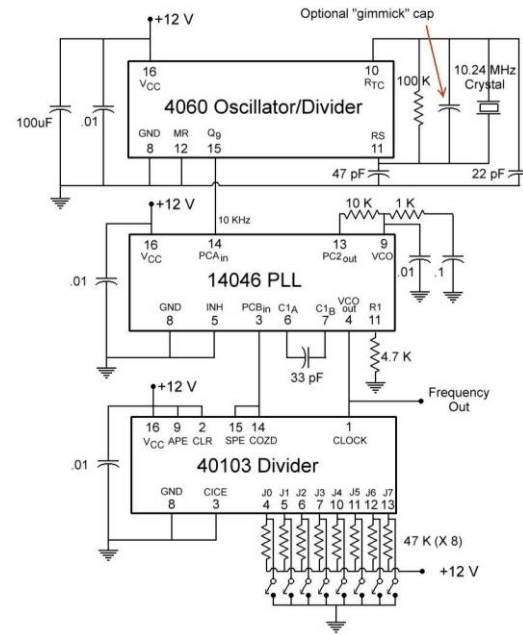
5.4 วงจรเครื่องส่งวิทยุ (Transmitter Circuit)

จากไดอะแกรมการทำงานของเครื่องรับส่งวิทยุสื่อสารแบบ TTE ในส่วนของภาคเครื่องส่ง ภาคเครื่องรับ และภาคควบคุม ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 21, 23 และ 25 ในขั้นตอนต่อไปได้ถูกนำมาออกแบบให้เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สมบูรณ์ โดยส่วนของวงจรภาคเครื่องส่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 26 ซึ่งวงจรต้นแบบจะเป็นวงจรของวิทยุสื่อสาร HeyPhone ความถี่คลื่นพาห์อยู่ที่ 87 kHz ซึ่งวงจรดังกล่าวได้ถูกเผยแพร่ให้แก่นักวิจัยถ้าที่เป็นสมาชิกของสมาคม BCRA ในปี ค.ศ. 2004 ในรูปแบบของ DIY หรือในรูปแบบของ Home project และเนื่องจากมีผู้สนใจใช้งานเพียงกลุ่มเล็กๆ จึงไม่มีการผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นหัวหน้าโครงการวิจัย

นี่จึงได้ปรึกษากับทาง Dr. David Gibson (Secretarial of BCRA) เพื่อขอนำวงจรต้นแบบมาพัฒนาใช้งานที่ความถี่ 350 kHz เพื่อนำมาใช้งานในประเทศไทย โดยได้ทำการแก้ไขปรับปรุงวงจรออสซิลเลเตอร์จากเดิมซึ่งเป็นแบบคริสตัล (Crystal oscillator) ของวงจรเครื่องส่งของ HeyPhone ซึ่งใช้คริสตัลความถี่ 5.568 MHz มาผ่านวงจร Oscillator & Divider (ไอซีเบอร์ 4060) เพื่อสร้างความถี่ 87 kHz มาใช้เป็นความถี่คลื่นพาหะของวงจรภาคส่งรวมทั้งทำหน้าที่ออสซิลเลเตอร์ประจำที่ (Local oscillator) ของวงจรภาครับ มาใช้เทคนิคแบบ Phase Lock Loop (PLL) มาสร้างเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ชุดใหม่ความถี่ 350 kHz ทดแทนในวงจรเดิม ดังแสดงในรูปที่ 26 (วงจรในกรอบเส้นประสีแดง) และได้ทำการวัดทดสอบความถี่ในเบื้องต้นก่อนนำไปใช้ในวงจรเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone แบบดั้งเดิม โดยได้แสดงวงจรของ 350 kHz oscillator ไว้ในรูปที่ 27



รูปที่ 26 แสดงวงจรภาคเครื่องส่งของวิทยุสื่อสารแบบ TTE ความถี่ 350 kHz ที่พัฒนาจากวิทยุสื่อสาร HeyPhone ความถี่ 87 kHz



รูปที่ 27 แผงวงจรออสซิลเลเตอร์ประจำที่โดยใช้วงจร Phase Lock Loop (PLL) ที่ความถี่ 350 kHz

จากวงจรภาคเครื่องส่งในรูปที่ 26 ในส่วนของวงจรภาคเสียง (Audio stage) ใช้โอปแอมป์ U9 ทำหน้าที่เป็นปริแอมป์สำหรับขยายสัญญาณจากไมโครโฟนและขยายสัญญาณเสียงที่มีความถี่ต่างๆ ของ CNF, SOT, EOT และ BCN ที่มาจากบอร์ดควบคุมเพื่อผสมสัญญาณแบบ SSB ด้วย โดยมี R65-68, C28-30 and U9b ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองต่ำผ่านแบบ Multiple-feedback Butterworth เพื่อใช้จำกัดเสียงสูงที่จะผ่านออกไปและทำให้แถบความถี่ที่ส่งออกอากาศถูกควบคุมให้อยู่ที่ 2.6 kHz ตามที่ต้องการ จากนั้นจะถูกส่งเข้าไปในส่วนที่เป็นวงจรมอดูเลเตอร์แบบ SSB โดยสัญญาณเสียงจะถูกแยกส่งไปในวงจร I และ Q และถูกสร้างให้เป็นสัญญาณที่มีลอจิกตรงข้ามกับเพิ่มขึ้นอีกสองสัญญาณ ทำให้ขั้นตอนนี้จะมีสัญญาณเสียงทั้งหมดสี่ชุด ได้แก่ +AF-I, -AF-I, +AF-Q และ -AF-Q เพื่อใช้ในการมอดูเลตสัญญาณแบบ SSB โดยวงจรมอดูเลเตอร์แบบสมดุล (Balanced modulator) ตัวแรกทำหน้าที่สลับระหว่าง +AF-I และ -AF-I ที่เกิดจากความถี่ RF 350 kHz ส่วนวงจรมอดูเลเตอร์ตัวที่สองจะทำหน้าที่สลับระหว่าง +AF-Q และ -AF-Q ที่ความเร็วเท่ากับตัวแรก ซึ่งสัญญาณ RF-I และ RF-Q ที่ใช้ในการสลับการทำงานของวงจรมอดูเลเตอร์แบบสมดุลได้ถูกส่งมาจากวงจรออสซิลเลเตอร์และจะมีเฟสต่างกัน 90 องศา และหลังจากที่สัญญาณที่เสียงถูกผสมสัญญาณในวงจรมอดูเลเตอร์ทั้งสองชุดแล้วจะถูกส่งเข้าไปในวงจรรวมสัญญาณด้วยสัดส่วนที่เท่ากัน ณ จุดนี้แถบด้านข้างที่ต้องการจะเสริมกำลังซึ่งกันและกัน ในขณะที่แถบด้านข้างที่ไม่ต้องการจะหักล้างกันเองจนหายไปทั้งหมด ผลที่ได้ก็คือ จะเกิดสัญญาณที่มีแถบด้านข้างเพียงข้างเดียวที่เรียกว่า SSB ตามที่ต้องการ ในกรณีถ้าต้องการสัญญาณแบบ LSB เงื่อนไขการผสมสัญญาณต้องเกิดขึ้นจากคู่ของ AF-I + RF-I และ AF-Q + RF-Q ถ้าหากต้องการสัญญาณแบบ USB เงื่อนไขการผสมสัญญาณต้องเกิดขึ้นจากคู่ของ AF-I + RF-Q และ AF-Q + RF-I อย่างไรก็ตามวงจรที่ออกแบบได้กำหนดให้เป็นการผสมสัญญาณแบบ USB หากต้องการเปลี่ยนเป็นแบบ LSB ให้ใช้วิธีสลับสัญญาณ RF-I และ RF-Q พร้อมสลับสัญญาณ AF-I และ AF-Q ที่ส่งให้กับวงจรมอดูเลเตอร์แบบสมดุลแต่ละตัวก็จะได้การผสมสัญญาณแบบ LSB ตามที่ต้องการ

สำหรับการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้เกิดการผสมสัญญาณแบบ USB โดยใช้วิธีเชิงเฟสนี้จะเริ่มจากไอซี U9c ซึ่งทำหน้าที่ในการกลับเฟสของสัญญาณเสียงและขยายคาบเวลาให้กว้างกว่า

สัญญาณเดิมประมาณ 3.5 เท่า สัญญาณเสียงทั้งสองที่มีเฟสตรงข้ามกันนี้จะถูกป้อนให้กับวงจรโครงข่าย RC (R76-R85 และ C31-C34) เพื่อสร้างสัญญาณ AF-I และ AF-Q อย่างไรก็ตามวงจรโครงข่าย RC จะทำงานได้ดีในกรณีที่ไม่มีโหลดต่ออยู่เท่านั้น จึงจำเป็นต้องนำสัญญาณ +AF-Q และ AF-Q ผ่านไอซีออปแอมป์ U10b และ U10d ตามลำดับ โดยไอซีทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่งและมีความต้านทานทางอินพุตที่เหมาะสมในการทำหน้าทีเป็นโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย ส่วนไอซี U10a จะทำหน้าที่กลับเฟส +AF-Q ให้เป็น -AF-Q และไอซี U10c ทำหน้าที่กลับเฟส +AF-I ให้เป็น -AF-I ขณะที่ U11 ทำหน้าที่เป็นคู่ของวงจรมอดูเลเตอร์แบบสมมูลและนำสัญญาณไปผสมกันในสัดส่วนที่เท่ากันอย่างเหมาะสมโดยผ่านทาง R92 และ R93 สุดท้ายจะถูกส่งไปขยายกำลังให้สูงขึ้นโดยวงจรขยายทรานซิสเตอร์ Q4 อย่างไรก็ตามการรวมสัญญาณที่ออกมาจากวงจรมอดูเลเตอร์ให้มีสัดส่วนที่เท่ากันโดยใช้ R92 และ R93 นั้นอาจจะมีค่าคลาดเคลื่อนบ้าง ดังนั้นในทางปฏิบัติได้เพิ่มความต้านทานแบบปรับค่าได้ VR1 20 k Ω สำหรับปรับค่าแรงดันอ้างอิงโดยละเอียดให้กับวงจรมอดูเลเตอร์ทั้งสองชุดด้วยอีกทางหนึ่ง

สำหรับส่วนของภาคขยายกำลังของเครื่องส่งโดยใช้ทรานซิสเตอร์ Q4 (BC548) จะเป็นวงจรขยายกำลังขั้นแรกของสัญญาณความถี่ 350 kHz โดยมี L3 และ C35 เป็นวงจร LC Resonator สำหรับปรับลดระดับของความถี่ฮาร์โมนิก (Harmonics) หลายลำดับที่เกิดขึ้นให้มีระดับที่ยอมรับได้ เนื่องจากวงจรรอสซิลเลเตอร์ได้สร้างคลื่นความถี่รูปสี่เหลี่ยมออกมาและฮาร์โมนิกเหล่านี้มีระดับกำลังค่อนข้างสูง (ประมาณ 1/6 เท่าของกำลังของความถี่หลัก) ขณะที่เอาต์พุตของ Q4 จะมี VR2 เพื่อใช้สำหรับปรับความเหมาะสมของค่ากำลังที่ใช้ขับอินพุตของไอซี U14 (TDA2003) ซึ่งเป็นภาคขยายกำลังขั้นสุดท้ายของวงจรเครื่องส่งนี้ อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าไอซี TDA2003 ไม่ใช่ไอซีที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณความถี่วิทยุโดยตรง แต่จะเป็นไอซีที่ใช้ขยายสัญญาณเสียงที่นิยมใช้ในเครื่องเสียงดีทรอยนต์ ซึ่งความถี่ที่ใช้กับระบบสื่อสารในถ้าจะมีค่าน้อยกว่าความถี่สูงสุดของความถี่เสียงประมาณ 5 เท่า ซึ่งไอซีขยายเสียงหลายๆ เบอร์สามารถนำมาใช้งานได้ดีเพียงแค่ปรับค่าของอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับไอซีดังกล่าวอีกเล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสมกับความถี่สูงที่ไอซีเบอร์นี้สามารถทำงานได้ และทำให้สามารถขับกำลังได้สูงสุดถึง 5 วัตต์เมื่อจ่ายให้กับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 3 โอห์ม แต่ถ้าไม่มีการปรับค่าอุปกรณ์ร่วมดังกล่าวก็จะสามารถขับกำลังได้ประมาณ 3.8 วัตต์เท่านั้น อย่างไรก็ตามวงจรเครื่องส่งที่ออกแบบนี้จะใช้วิธีจ่ายกำลังให้กับไอซี PA (Power amplifier) ก็ต่อเมื่อเครื่องส่งกำลังมีการกดสวิทช์ PTT เพื่อส่งสัญญาณออกไปเท่านั้น

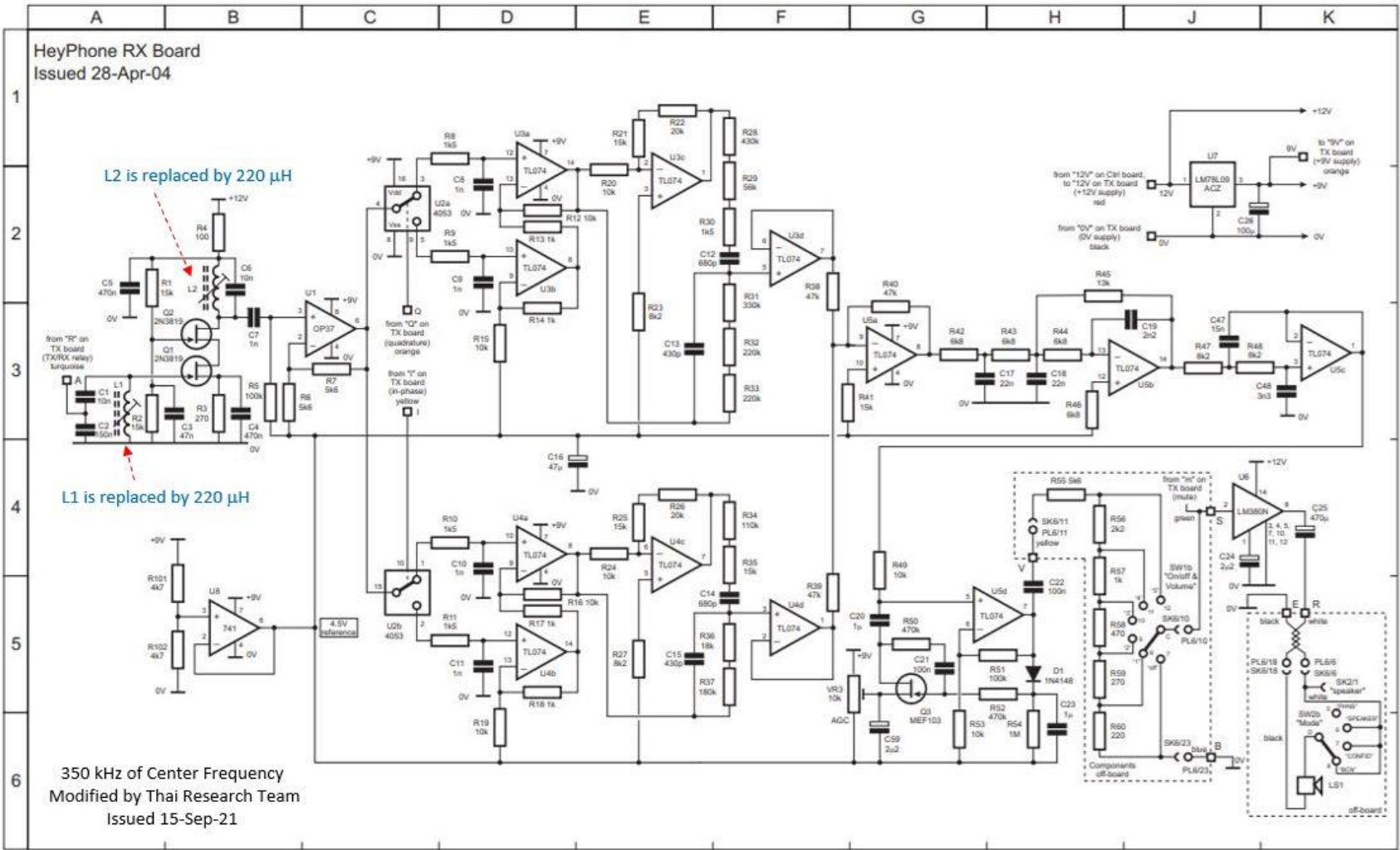
เนื่องจากวงจรรอแอมป์ที่ใช้ในวงจรภาคเครื่องส่งส่วนใหญ่ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) แบบแยกส่วนเพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตสามารถสวิงเป็นบวกและลบโดยเทียบกับสัญญาณ 0V ของสายดิน (ground หรือ Signal earth) ดังนั้นหากใช้วิธีจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคู่เช่นเดิม เช่น +12V และ -12V ก็จะไม่คุ้มค่าและสร้างความยุ่งยากในการสร้างแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นทางเลือกที่ใช้ในวงจรนี้ ก็คือ ใช้สายดินอยู่ตรงกลางระหว่างเส้นไฟบวกและเส้นศูนย์โวลต์ ดังนั้นเมื่อออปแอมป์ทำงานจาก +9V สายที่เป็นสายดินจึงอยู่ที่ +4.5V เทียบกับเส้น 0V ดังนั้นที่เส้น +4.5V จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับ 0V ของไฟ AC นั่นเอง ดังนั้นสายดินของไมโครโฟนและอุปกรณ์ภายนอกอื่นจะยังคงเชื่อมต่อกับเส้น 0V ได้ตามปกติ ในการออกแบบวงจรเพื่อสร้างแรงดันอ้างอิง (+4.5V Reference) จะใช้ไอซี U9d (TL074) ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันและเป็นบัฟเฟอร์ที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่งไปในตัว ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันที่ใกล้เคียงอุดมคติที่ให้แรงดัน +4.5V ที่มีความเสถียรและเชื่อมต่อกับกับสายดิน 0V ทาง AC ได้เป็นอย่างดี

5.5 วงจรเครื่องรับวิทยุ (Receiver Circuit)

ในรูปที่ 28 ได้แสดงในส่วนของวงจรเครื่องรับของเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE ซึ่งทางผู้วิจัยยังคงอ้างอิงจากวงจรต้นแบบของวิทยุสื่อสารในถ้า HeyPhone เช่นเดียวกับวงจรเครื่องส่ง โดยทำการแก้ไขและปรับปรุงวงจร LC resonance ทั้งหมดของวงจรให้สอดคล้องกับความถี่ 350 kHz จากวงจรในรูปที่ 28 เริ่มต้นจากวงจรขยายสัญญาณขั้นแรกได้ออกแบบโดยวงจรขยายแบบเฟ็ดคู่ทำงานร่วมกัน (Dual-FET cascade amplifier) ซึ่งให้อัตราขยาย 40 dB ส่งต่อไปให้กับวงจรขยายขั้นที่สองโดยใช้ U1 ซึ่งเป็นออปแอมป์เบอร์ OP37 (Low-noise amplifier) ทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณด้วยอัตราขยาย 3 dB และเป็นบัฟเฟอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการโหลดของวงจรโซ่เนนซ์ L2/C2 (ลดค่า Q ของวงจร LC นี้ด้วย) และป้องกันสวิทช์ U2a และ U2b ขณะที่มีการสลับชั่วคราวซึ่งทั้งคู่รับสัญญาณมาจากเอาต์พุตของ U1

วิธีการนำคลื่นพาห์ออกจากสัญญาณ SSB เพื่อให้เหลือเพียงคลื่นเสียงเพียงอย่างเดียวโดยใช้วงจรดีมอดูเลเตอร์ซึ่งยังคงใช้วงจรดีมอดูเลเตอร์แบบสมมูลที่ใช้ในวงจรดีมอดูเลเตอร์ของภาคเครื่องส่งที่ได้อธิบายไปแล้ว สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรดีมอดูเลเตอร์จะใช้ประกอบด้วยวงจรสุ่มและคงค่า (Sample-and-hold circuits) ที่เหมือนกันจำนวนสี่ชุดซึ่งประกอบด้วยสวิทช์ (U2a และ U2b) จำนวนสี่เอาต์พุตทำงานร่วมกับคาปาซิเตอร์ (C8-C11) เพื่อใช้ในการเก็บประจุ โดยมีตัวต้านทาน (R8-R11) ช่วยกำหนดค่าคงตัวเวลาในการประจุ (Charge time constant) ของคาปาซิเตอร์แต่ละตัว ในการสุ่มจะถูกควบคุมโดยสวิทช์ทั้งสองชุดนี้และมีหลักการการทำงานคือ เมื่อสวิทช์ถูกสลับไปอยู่ในตำแหน่งที่ต่อกับตัวต้านทาน วงจรนี้จะอยู่ในสถานะของการสุ่ม (sample) และเมื่อสวิทช์ไม่ได้ถูกต่อกับตัวต้านทาน วงจรจะอยู่ในสถานะคงค่า (hold) จากสถานะที่เห็นในวงจรจะมีค่าคงตัวเวลาในการประจุเท่ากับ $R8 \times C8 = 1.5 \mu s$ (มีค่าเท่ากันทั้งสองวงจร) ขณะที่สวิทช์ที่ป้อนสัญญาณให้กับวงจรสุ่ม/คงค่าแต่ละชุดที่คาบเวลาทุกครึ่งไซเคิลของความถี่ 87 kHz จะเท่ากับ $5.7 \mu s$ หากเป็นความถี่ 350 kHz จะเท่ากับ $1.42 \mu s$ ซึ่งในช่วงคาบเวลา $5.7 \mu s$ ที่ความถี่ 87 kHz นี้ คาปาซิเตอร์จะสามารถประจุแรงดันเก็บไว้ได้ถึง 98% หรือดีกว่าแรงดันของสัญญาณที่ถูกสุ่มออกมา ดังนั้นในกรณีที่เป็นความถี่ 350 kHz จะต้องลดค่า $R8 \times C8$ ลงเพื่อให้ค่าเวลาการประจุแรงดันลดลงสอดคล้องกับคาบเวลาในการสวิทช์ U2a และ U2b ด้วยความถี่ 350 kHz เมื่อกระบวนการทำงานผ่านขั้นตอนของวงจรสุ่ม/คงค่าแล้วเอาต์พุตที่ได้จะถูกป้อนให้กับออปแอมป์ U3a, U3b, U4a และ U4b (TL074) ซึ่งมีค่าความต้านทานอินพุตสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของ R8-R11 จึงไม่ได้แสดงสถานะว่าเป็นโหลด ดังนั้นในขณะวงจรสุ่ม/คงค่ากำลังอยู่ในสถานะคงค่า (hold) ก็จะทำให้คาปาซิเตอร์มีการปล่อยประจุ (discharge) เพียงเล็กน้อย

การรวมสัญญาณด้วยการถ่วงน้ำหนัก (Weighted summers) โดยการใช้คู่ของ U3a และ U3b สำหรับวงจรชุดบน และคู่ของ U4a และ U4b สำหรับวงจรชุดล่าง ซึ่งแต่ละคู่จะถ่วงน้ำหนักกันโดยใช้ความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่วงจรทั้งสองชุดได้คงค่าเอาไว้และให้อัตราขยายเท่ากับ +11 ส่งผลให้สัญญาณที่เข้าด้านบนของสวิทช์ (ผ่านทาง R8 และ R10) ที่ป้อนให้กับ U3a หรือ U4a ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันเพิ่มขึ้นอีก 11 เท่าจากอินพุต (+) ที่เป็น non-inverting ผ่านไปที่เอาต์พุตของออปแอมป์ดังกล่าว ในขณะที่สัญญาณที่เข้าด้านล่างของสวิทช์ (ผ่านทาง R9 และ R11) ที่ป้อนให้กับ U3b หรือ U4b ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ +1.1 จากนั้นถูกป้อนต่อไปให้กับ U3a หรือ U4a ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ -10 จากอินพุต (-) ที่เป็น inverting ผ่านไปที่เอาต์พุตของมันซึ่งให้อัตราขยายรวมเท่ากับ -11 ดังนั้นที่เอาต์พุตของ U3a ก็คือผลรวมของสัญญาณที่มาจากเอาต์พุตที่เป็นการสุ่มและการคงค่าที่ผ่านมาจาก R8 และ R9 ขณะที่เอาต์พุตของ U4a ก็คือผลรวมของสัญญาณที่มาจากเอาต์พุตที่เป็นการสุ่มและการคงค่าที่ผ่านมาจาก R10 และ R11



รูปที่ 28 แสดงวงจรภาคเครื่องรับของวิทยุสื่อสารแบบ TTE ความถี่ 350 kHz ที่พัฒนาจากวิทยุสื่อสาร HeyPhone ความถี่ 87 kHz

สำหรับวงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter) สองชุดที่ใช้ในวงจรภาคเครื่องรับจะออกแบบเหมือนกับในวงจรภาคเครื่องส่ง โดยมีออปแอมป์ TL074 (U3c และ U4c) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ถูกเลื่อนเฟสด้วยอัตราขยาย -3.5 เท่า เพื่อจ่ายให้กับปลายด้านบนของวงจรกรองแบบพาสซีฟซึ่งประกอบด้วย R28-R33/C12-C13 และ R34-R37/C14-C15 โดยที่ค่าความต้านทานของวงจรกรองทั้งสองชุดจะมีค่าแตกต่างกัน สัญญาณที่ถูกกรองแล้วจะถูกป้อนให้กับไอซี U3d และ U4d ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์อัตราขยายเท่ากับหนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงการโหลดของวงจรกรองแบบพาสซีฟทั้งสองชุด จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะถูกส่งไปรวมกันในสัดส่วนที่เท่ากัน ที่ออปแอมป์ U5a (TL074) ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง แล้วจึงนำไปผ่านวงจรกรองผ่านต่ำอีกสองชุดที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่งในแถบผ่านที่กำหนด ได้แก่ Third-order multiple-feedback Butterworth filter ซึ่งประกอบด้วย U5b, R42-R45 และ C17-C19 ด้วยวงจรกรองแบบ Second-order Chebychev Sallen and key filter ตามลำดับ

เนื่องจากสัญญาณเสียงหลังจากผ่านวงจรกรองผ่านต่ำทั้งสองชุดยังคงมีระดับแรงดันที่ต่ำและไม่พอเพียงสำหรับการส่งไปขับลำโพงหรือหูฟัง จึงส่งต่อไปยังวงจรขยายเสียงแบบควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (Audio amplifier with AGC) ซึ่งยังคงใช้ออปแอมป์เบอร์ TL074 (U5d) ทำหน้าที่หลักในการขยายสัญญาณเสียงด้วยอัตราขยาย 11 เท่า จากการรับสัญญาณผ่านทาง R49 ส่งไปยังทรานซิสเตอร์ชนิด FET เบอร์ MEF103 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนที่ถูกควบคุมจากแรงดัน (Voltage-controlled attenuator) ที่อินพุตของวงจรขยายเสียง ขณะที่เอาต์พุตหลังจากการขยายระดับสัญญาณจะถูกเร็คติไฟ (Rectify) โดยไดโอด D1 และควบคุมสัญญาณให้เรียบขึ้นโดยใช้ C23/R54 ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าคงตัวเวลาคายประจุ (Discharge time constant) ในเวลาหนึ่งวินาที ส่วนค่าคงตัวเวลาการเก็บประจุจะกำหนดชัดเจนไม่ได้ เนื่องจากขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่เอาต์พุตของ U5d และค่าความต้านทานพลวัต (Dynamic resistance) ของ D1 แต่จะมีค่าน้อยกว่าค่าคงตัวเวลาคายประจุมาก

การทำหน้าที่ควบคุมอัตราขยายหรือ AGC นั้น เมื่อสัญญาณจาก U5d มีระดับที่สูงจะเกิดแรงดันบวกจำนวนมากไปตกคร่อมที่ C23 และทำให้แรงดันลบที่ขา V_{GS} ของ FET มีค่าลดลง ทำให้ FET อยู่ในสถานะเปิดการทำงาน ดังนั้นเมื่อระดับของสัญญาณเสียงยกระดับขึ้น FET จึงนำกระแสผ่านทาง R49 มากขึ้นส่งผลให้สัญญาณเสียงเข้ามาที่อินพุตของไอซีขยายเสียงถูกลดค่าลดลง ซึ่งเป็นหลักการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback loop) ที่ทำให้เกิดการควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติหรือ AGC นั้นเอง สำหรับหน้าที่ของ VR3 จะใช้ในการปรับค่าแรงดันแหล่งจ่าย (Source voltage) ให้กับขาเกต (Gate) ของ FET ให้ทำงานตามระดับของสัญญาณเสียงที่ AGC ใช้ในการปรับอัตราขยายของ U9d แบบอัตโนมัติ ส่วน C59 ที่ต่อ FET ลงกราวด์ก็เพื่อให้ทำงานแบบกระแสสลับสอดคล้องกับสัญญาณเสียง ขณะที่ C20 จะทำหน้าที่ในการป้องกันเอาต์พุตของ U5c โดยควบคุมแรงดันลบให้เพียงพอสำหรับการฟอร์เวิร์ดไบอัส (Forward bias) ให้กับรอยต่อระหว่างขาเกตและเดรน (Drain) ของ FET ส่วนของ R50 จะช่วยทำให้การทำงานของวงจรขยายเสียงมีลักษณะที่เป็นเชิงเส้น (Linearity) มากยิ่งขึ้น และสุดท้าย C21 จะทำหน้าที่ช่วยป้องกันการไบอัสที่ขาเกตในขณะที่กระแสไหลผ่านขาเดรนของ FET

การออกแบบวิธีการควบคุมความดังของเสียง (Volume control) จะใช้สวิตช์เลือกชนิดโรตารี (Rotary switch) ผ่านทาง R55-R60 มากกว่าที่จะใช้เป็นแบบตัวต้านทานปรับค่าได้ (Potentiometer) เนื่องจากตัวต้านทานดังกล่าวมีความทนทานน้อยเมื่อมีการใช้งานในตำแหน่งที่มีความชื้นสูง และเพื่อป้องกันกันป้อนกลับและการเกิดออสซิลเลตของสัญญาณเสียงที่เกิดจากความดังสูงเกินไป จึงได้ใส่ R55 ไว้ทำหน้าที่จำกัดที่ค่าความดังสูงสุดเอาไว้ด้วย และอุปกรณ์สุดท้ายของภาคเครื่องรับก็คือวงจรขยายเสียง (U6) เพื่อส่งออกลำโพงภายในเครื่องวิทยุสื่อสารและชุดหูฟัง ซึ่งในที่นี้ได้ใช้ไอซีขยายเสียงเบอร์ LM380N

5.6 วงจรควบคุม (Control Circuit)

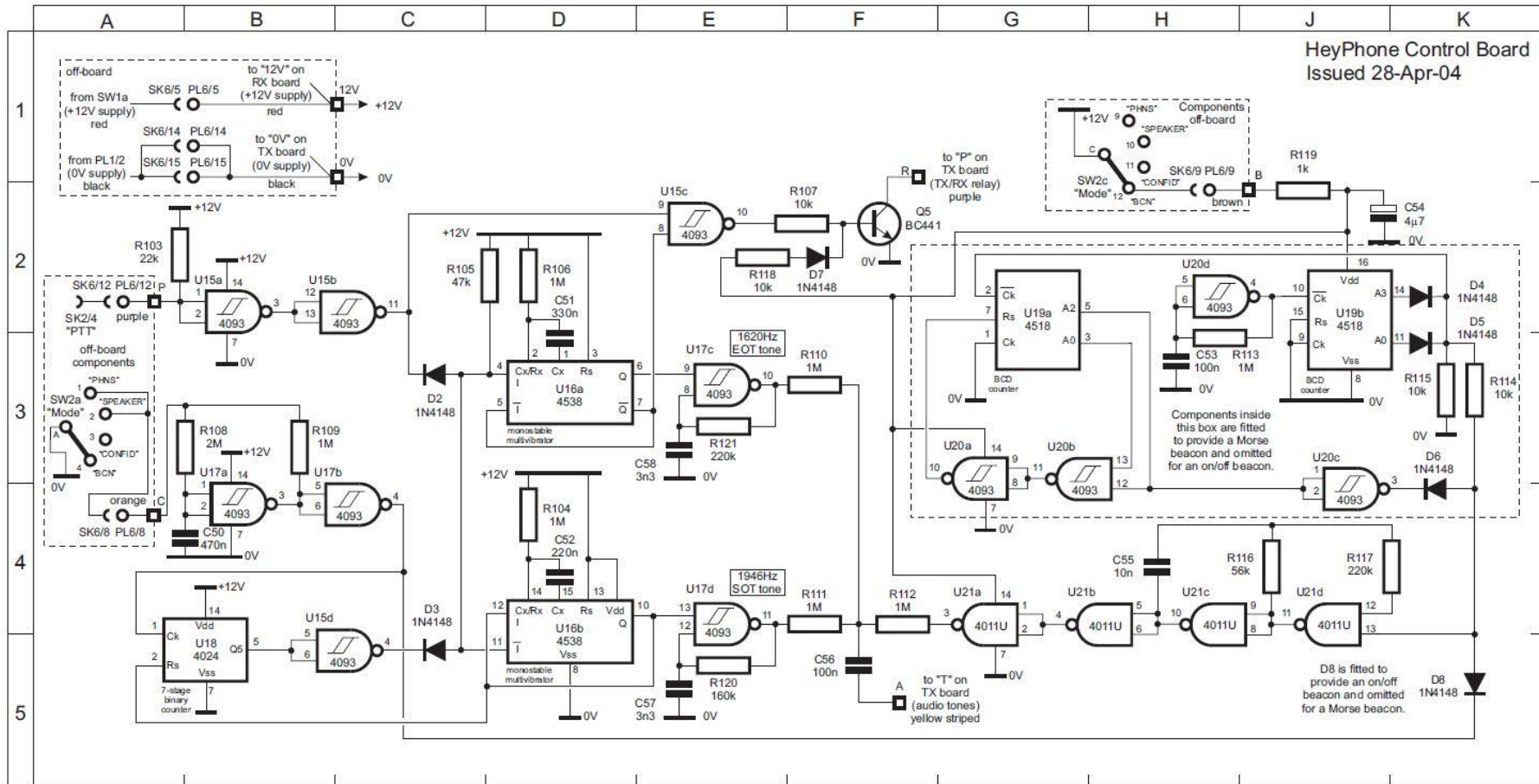
จากรูปที่ 29 จะเห็นว่าผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้น ส่วนใหญ่จะใช้ไอซีลอจิกเกตแบบพื้นฐานมาทำงานในหลายหน้าที่ ตัวอย่างเช่น การนำเกตชนิด AND มาทำหน้าที่เป็นเกต OR ที่มีอินเวอร์เตอร์ต่อที่ทั้งอินพุตและเอาต์พุตทั้งหมด หรือทำเป็นเกต OR ในด้วยสถานะลอจิกที่ตรงกันข้าม (0V=TRUE, 12V=FALSE) เหตุผลก็คือเพื่อความสะดวกในการสำรองอุปกรณ์สำหรับซ่อมแซมเมื่อเกิดการเสียหาย และทำให้ไดอะแกรมระบบในรูปที่ 25 มีความสมเหตุสมผลมากขึ้น

วงจรที่ใช้สร้างเงื่อนไขของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมหลังจากที่มีการกดและปล่อยคีย์ PTT จะประกอบด้วย R103, U15a และ U15b ซึ่งวงจรชุดนี้จะสร้างสัญญาณควบคุมขึ้นมาในรูปแบบของแรงดันที่กำหนดขึ้นระหว่างที่มีการส่งและรับสัญญาณ โดยมีวงจรออสซิลเลเตอร์ผลิตความถี่ 1 Hz เพื่อใช้เป็นเสียงบอกสำหรับโหมด CONF และ BCN (non-Morse beacon) ประกอบด้วย R108, R109, C50, U17a, และ U17b เมื่อวงจรนี้ถูกควบคุมโดย SW2c วงจรออสซิลเลเตอร์ก็จะทำงานในตำแหน่ง BCN และ CONF และปิด (disable) การใช้งานในตำแหน่งอื่นทั้งหมดด้วยการลัดจุดต่อของ R108 และ R109 ลงกราวด์ ในส่วนของวงจรรีบแบบหารด้วย 32 ประกอบด้วย U18 และ U15d ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ที่เป็นลบ (Negative-going pulse) ทุก 30 วินาที (เมื่อเปิดใช้งานออสซิลเลเตอร์ 1Hz) โดยความยาวของพัลส์นี้ถูกกำหนดโดย SOT Timer ซึ่งจะรีเซ็ตตัวนับ U18 ในเวลาเดียวกับที่รีเซ็ตตัวเองช่วงที่พัลส์ของ SOT สิ้นสุด ในส่วนของเกต OR ที่ป้อนสัญญาณให้กับวงจรถัดไปของสัญญาณ EOT และ SOT ประกอบด้วย R105, D2 และ D3 (โดยใช้วิธีออกแบบให้ลอจิกแบบกลับด้านจึงทำให้เหมือนกับทำงานแบบเกต AND แบบปกติทั่วไป) เมื่อมีการกดคีย์สวิตช์ PTT หรือขณะที่ตัวกำหนดเวลา 30 วินาทีเริ่มทำงาน จะเกิดการดึงแรงดันที่เอาต์พุตให้ต่ำและแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกป้อนไปยังทั้งตัวจับเวลา EOT และ SOT ต่อไป

วงจรรีบเวลาสำหรับ SOT ประกอบด้วย R104, C52 และ U16b ซึ่งจะถูกทริกให้ทำงานในขณะที่ช่วงของพัลส์ที่มาจากเกต OR ก่อนหน้านั้นเปลี่ยนสถานะของพัลส์เป็นขอบขาลง (เกิดขึ้นเมื่อมีการเริ่มส่งสัญญาณด้วยเวลา 0.22 วินาที ซึ่งถูกกำหนดจากค่าของ R104 และ C52) โดยพัลส์นี้จะถูกป้อนให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ SOT ซึ่งประกอบด้วย R120, C57 และ U17d เพื่อปล่อยความถี่ 1620 Hz ออกมา นอกจากนี้ยังถูกป้อนกลับไปอินพุต I ของตัวจับเวลาโดยใช้ขอบขาของพัลส์เพื่อทำการรีเซ็ตการจับเวลาอีกด้วย

หมายเหตุ เมื่อวงจรรีบแบบหารด้วย 32 สั่งการให้ตัวจับเวลาของ SOT ทำงาน จะไม่มีการส่งเสียง SOT ออกไป เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ควบคุมการส่ง (Tx) ยังไม่ทำงาน แต่จะทำงานในช่วงที่พัลส์ของ EOT เกิดการแฉกที่ฟเท่านั้น

ขณะที่วงจรรีบเวลาสำหรับ EOT ประกอบด้วย R106, C51 และ U16a ซึ่งถูกทริกโดยขอบขาขึ้นของสัญญาณพัลส์ที่ออกมาจากเกต OR ในขณะที่คีย์สวิตช์ PTT ถูกปล่อยออกหรือขณะที่วงจรรีบแบบหารด้วย 32 ถูกรีเซ็ต (คาบเวลา 0.33 วินาทีของพัลส์สำหรับ EOT ถูกกำหนดด้วยค่าของ R106 และ C1) พัลส์นี้ถูกป้อนให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ของ EOT ซึ่งประกอบด้วย R121, C5 และ U17c เพื่อให้ผลิตคลื่นความถี่ 1946 Hz ออกมาและส่งต่อไปให้เกต OR เพื่อป้อนให้กับวงจรรีบสวิตช์รีเลย์ของเครื่องส่ง



รูปที่ 29 แสดงวงจรภาคควบคุมของวิทยุสื่อสารแบบ TTE ความถี่ 350 kHz ที่พัฒนาจากวิทยุสื่อสาร HeyPhone ความถี่ 87 kHz

สำหรับวงจรสร้างสัญญาณ VFLB (Voice-Free Location Beacon) ประกอบด้วย R113-R115, C52, D1-D4 และ U19-U20 จะสังเกตว่า U19-U20 ไม่ได้รับการจ่ายกำลังมาจากแหล่งจ่าย 12 V โดยตรง แต่จะมาจากแหล่งจ่ายเมื่อสวิตช์ SW2b ถูกเปิด และส่งผลให้วงจรชุดนี้ทำงาน ผลก็คือวงจรนี้จะสร้างสัญญาณ dot (.) และ dash (-) ในรูปของรหัสสมอร์สออกมาแทนตัวอักษร VFLB (... ..) อย่างต่อเนื่อง เอาต์พุตที่มาจากจุดต่อของ R114 และ D6 จะถูกป้อนไปที่วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณปีคอน (R116, R117, C55 และ U21) ซึ่งผลิตความถี่ 808 Hz เป็นสัญญาณปีคอนออกมา วงจรนี้ U21 ก็ไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ 12 V โดยตรงเช่นกัน แต่รับมาจากการสวิตช์ของ SW2b เพื่อให้วงจรออสซิลเลเตอร์นี้ทำงานเช่นเดียวกับวงจรสร้างสัญญาณ VFLB จากวงจรออสซิลเลเตอร์ สัญญาณปีคอนจะมีการป้องกันในขณะโหมด BCN ปิดการทำงาน โดยใช้ R112 ค่าความต้าน 1 M Ω ไว้ป้องกันแรงดันใดๆ ที่มาจากวงจรออสซิลเลเตอร์อื่นๆ ที่ไหลผ่าน U21a ออกไปตามเส้นทางของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามา ส่วนอินพุตอีกขาหนึ่งที่ใช้เปิด U21d (ไม่ได้เชื่อมต่อกับ R117) สำหรับสร้างตัวแปรที่เป็นสัญญาณมอร์ส ตัวแปรนี้จะมาจากตัวสร้างสัญญาณ VFLB ที่อยู่ด้านบน ส่วนตัวแปรที่ไม่ใช่มอร์สจะมาจากออสซิลเลเตอร์ 1 Hz ผ่านทาง D8 โดยมีรูปแบบเป็นสัญญาณพัลส์ ON-OFF ด้วยคาบเวลาหนึ่งวินาที ส่วน D8 เป็นไดโอดสำหรับป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าจากออสซิลเลเตอร์ 1 Hz ผ่าน U21d ไปยังสายไฟของแหล่งจ่ายเมื่อสัญญาณปีคอนถูกปิด ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานพูลอัพ (Pull-up resister) ต่อจากขั้วแอนโอดของ D8 ไปยังแหล่งจ่ายไฟ

ส่วนของวงจรรวมสัญญาณออสซิลเลเตอร์ทั้งสามชุด ประกอบด้วย R110 (จาก EOT), R111 (SOT) และ R112 (จาก BCN) รูปแบบการรวมสัญญาณนี้จะขึ้นอยู่กับวงจรแรก (R62, R64, U9a) ของภาคเครื่องส่งที่สัญญาณรวมของออสซิลเลเตอร์ถูกป้อนเข้าไปด้วย ขั้นตอนนี้จะประกอบด้วย R110-R112 ถูกออกแบบให้เป็นตัวรวมสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก โดยมีอัตราขยายจากเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์แต่ละวงจรไปจนถึงเอาต์พุตของ U9a เท่ากับ -R64/R110, -R64/R111 และ -R64/R112 ซึ่งอัตราส่วนเหล่านี้จะมีค่าทั้งหมดประมาณ 1/26 หรือมีค่าการลดทอนประมาณ 28 dB นั่นเอง ค่านี้จะทำให้อเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์ซึ่งมีค่าประมาณ 12 V pk-pk ลดลงเหลือประมาณ 0.5 V pk-pk เทียบเท่ากับอินพุตประมาณ 50 mV pk-pk ที่อินพุตสำหรับต่อไมโครโฟน

การออกแบบเกต OR แบบสามอินพุตตามไดอะแกรมในรูปที่ 25 ได้ใช้ไอซีลอจิกเกต NAND แบบ 2 อินพุต (U15c) และเกต OR แบบ 2 อินพุต (ใช้ R107, R118 และ D7) และวงจรทรานซิสเตอร์สำหรับใช้ขับรีเลย์ ซึ่งอธิบายการทำงานได้ดังนี้

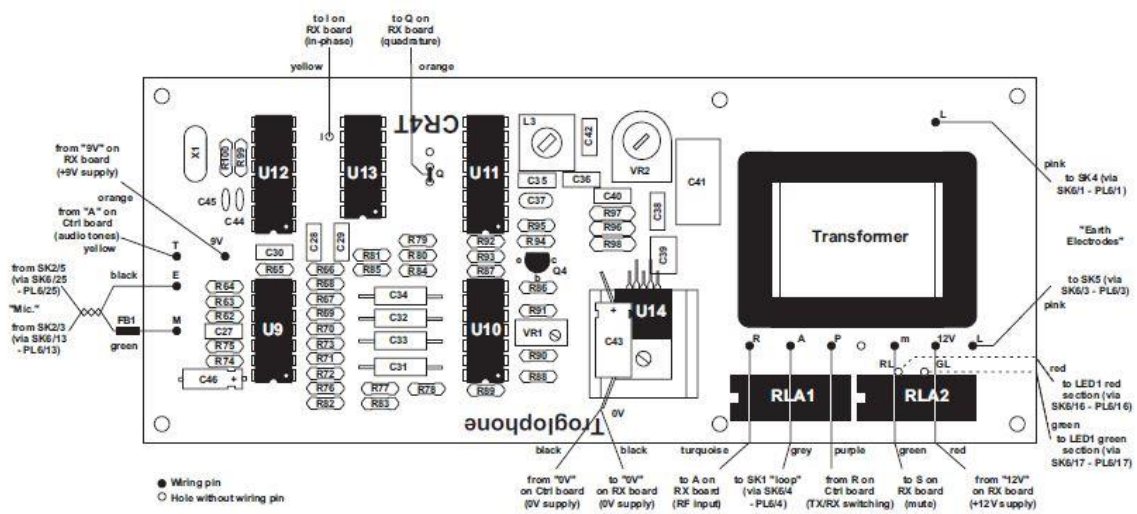
1) หากมีการกดคีย์สวิตช์ PTT ระดับแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการควบคุมการทำงานจะมีค่าลดต่ำลงและบังคับให้อเอาต์พุต U15c มีค่าสูงและผ่าน R107 ไปเปิดทรานซิสเตอร์ Q5 ให้ทำงานเพื่อจ่ายกระแสไฟเพียงพอในการขับรีเลย์

2) ในขณะที่กำลังส่งสัญญาณเสียงของ EOT ออกไป แรงดันเอาต์พุต \bar{Q} ของ U16a ในตัวจับเวลาสำหรับ EOT จะต่ำลง และถูกป้อนเข้าสู่ U15c ซึ่งทำหน้าที่เป็นเกต OR แบบสามอินพุตที่กล่าวแล้ว

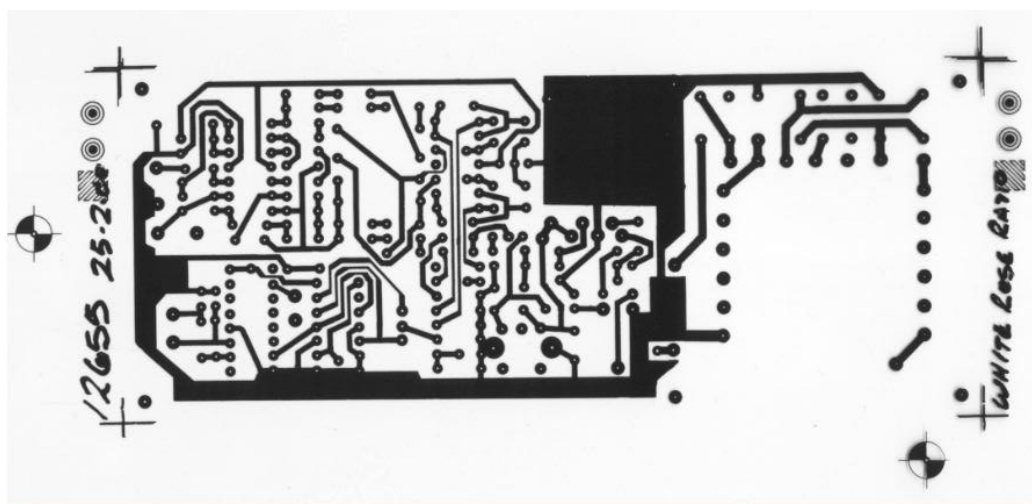
3) หากสวิตช์ปีคอนถูกเปิดอยู่ การจ่ายไฟ 12 V จาก R119/C54 จะจ่ายกระแสไฟผ่าน R118 และ D7 เพื่อเปิด Q5 จำเป็นต้องใช้ D7 เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เกิดการออสซิลเลตระหว่างการส่งและรับในบางสถานการณ์

5.7 กระบวนการสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB-350 kHz

ในการพัฒนาเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE ต้นแบบของโครงการวิจัยนี้ ได้ยึดต้นแบบวงจรและแผ่นลายวงจรทองแดง (PCB) ของ HeyPhone ซึ่งสมาชิกของสมาคม BCRA ประเทศอังกฤษได้พัฒนาใช้งานในถ้ำที่ความถี่ 87 kHz (เผยแพร่ในกลุ่มสมาชิกปี ค.ศ. 1992) และอนุญาตให้สมาชิกสามารถนำไปสร้างใช้งานด้วยตนเองหรือนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานตามสภาพแวดล้อมแต่ละแห่งได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสร้างวงจรต้นแบบจากวงจรนี้ได้พัฒนาในส่วนของวงจรออสซิลเลเตอร์ 350 kHz วงจรกรองผ่านต่ำ วงจรปริแอมพลิไฟล์ วงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ และวงจรแมทชิงบาลัน ขึ้นมาใหม่ทั้งหมดโดยดัดแปลงลายทองแดงของแผ่น PCB อีกเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 30 - 32 และในรูปที่ 33 และ 34 ได้แสดงภาพแผ่น PCB ซึ่งมีการลงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการปรับค่าอุปกรณ์สำหรับความถี่ 350 kHz เรียบร้อยแล้วในขณะทำการทดสอบวัดคุณลักษณะในห้องปฏิบัติการวิจัย

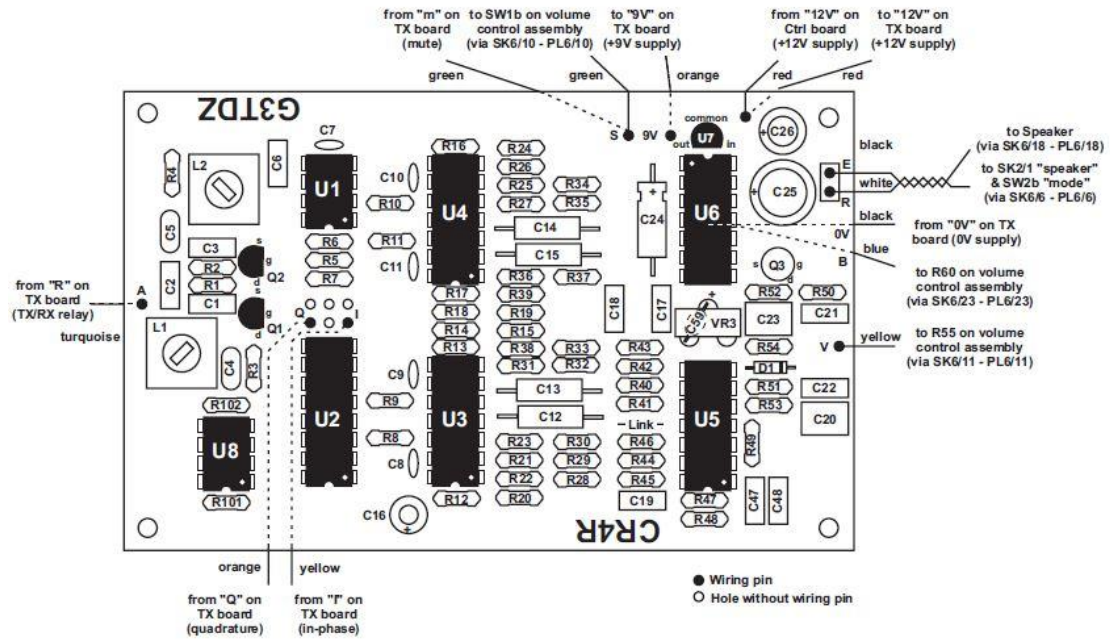


(ก) ภาพการวางอุปกรณ์บนแผ่น Tx PCB

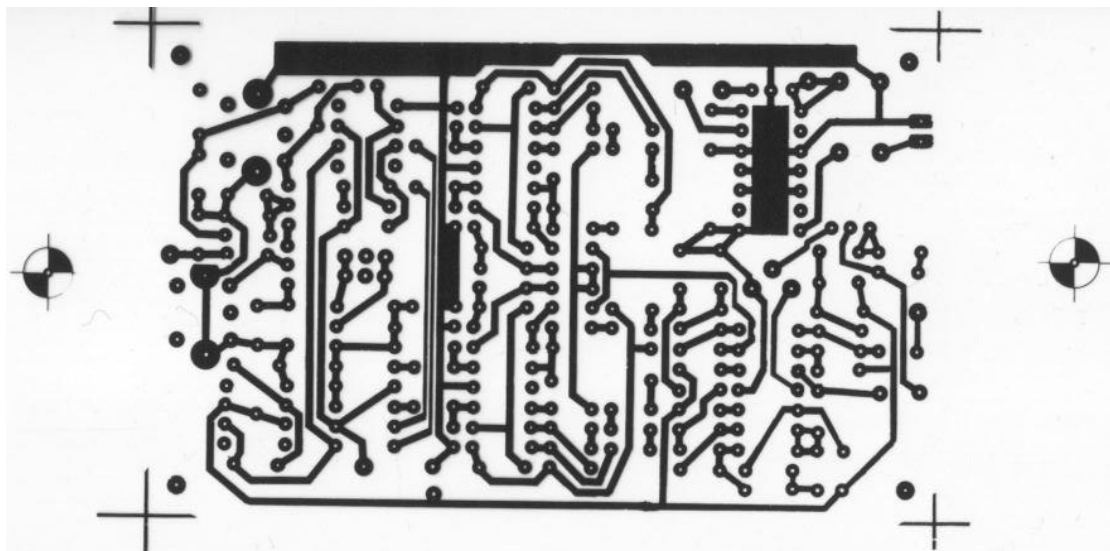


(ข) ภาพลายทองแดงบนแผ่น Tx PCB

รูปที่ 30 แผ่น PCB สำหรับวงจรภาคเครื่องส่งของ HeyPhone ที่นำมาพัฒนาเป็นต้นแบบ

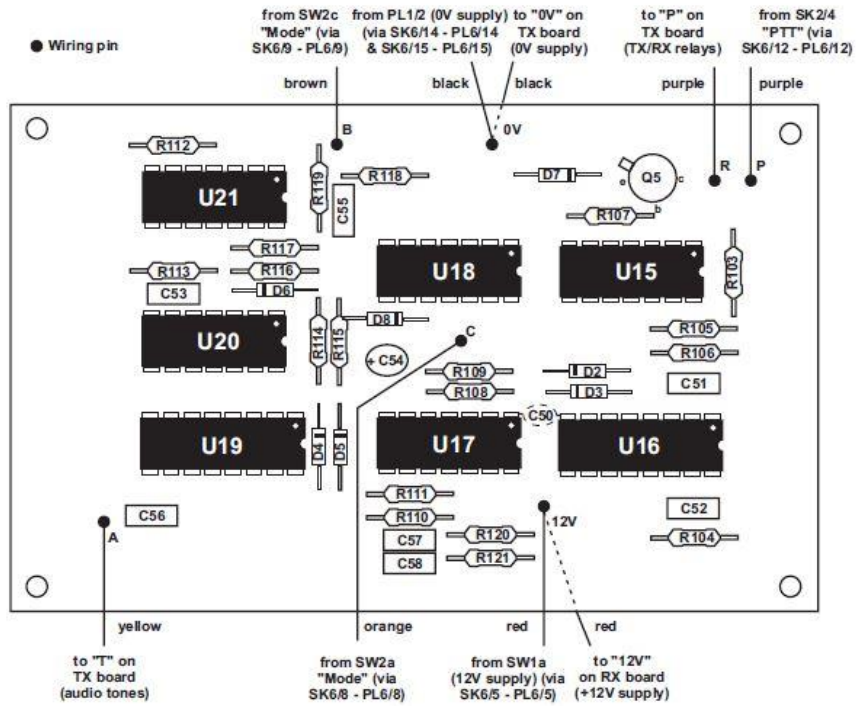


(ก) ภาพการวางอุปกรณ์บนแผ่น Rx PCB

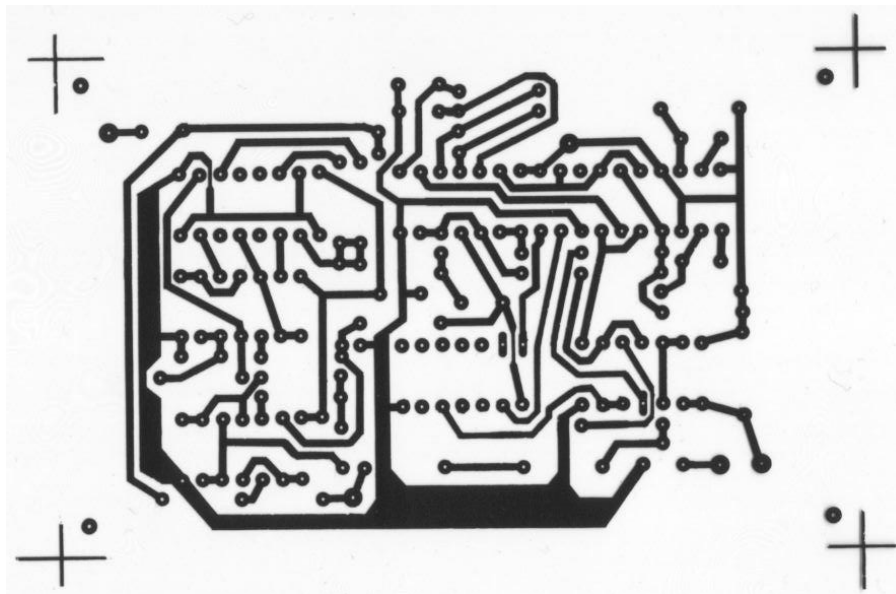


(ข) ภาพลายทองแดงบนแผ่น Rx PCB

รูปที่ 31 แผ่น PCB สำหรับวงจรภาคเครื่องรับของ HeyPhone ที่นำมาพัฒนาเป็นต้นแบบ

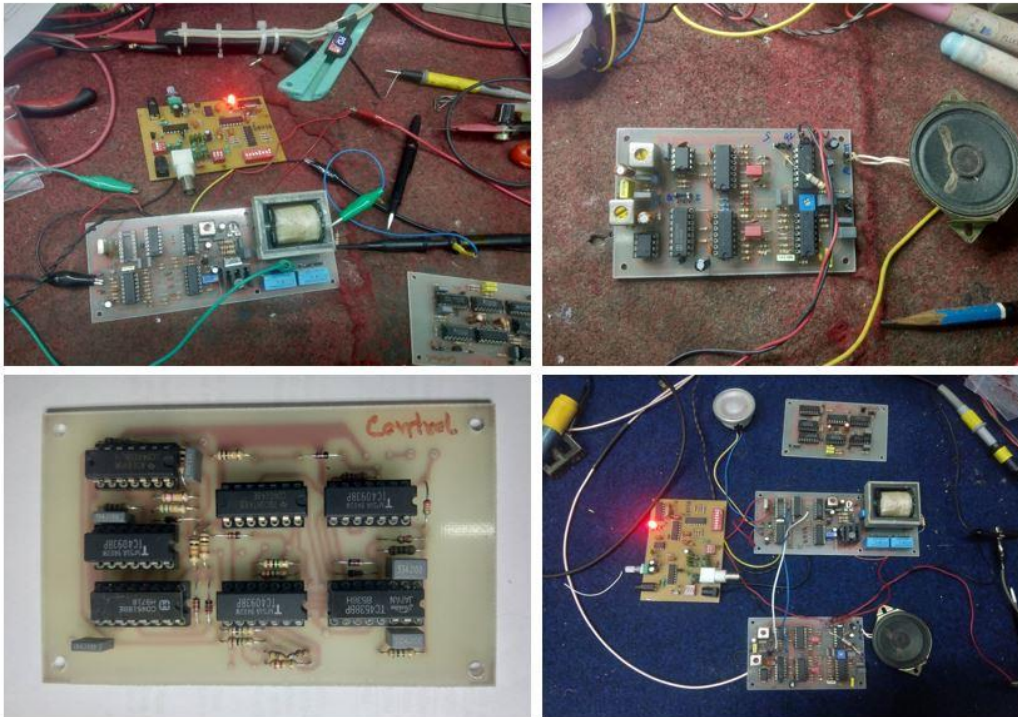


(ก) ภาพการวางอุปกรณ์บนแผ่น CTRL PCB



(ข) ภาพลายทองแดงบนแผ่น CTRL PCB

รูปที่ 32 แผ่น PCB สำหรับวงจรภาคควบคุมของ HeyPhone ที่นำมาพัฒนาเป็นต้นแบบ



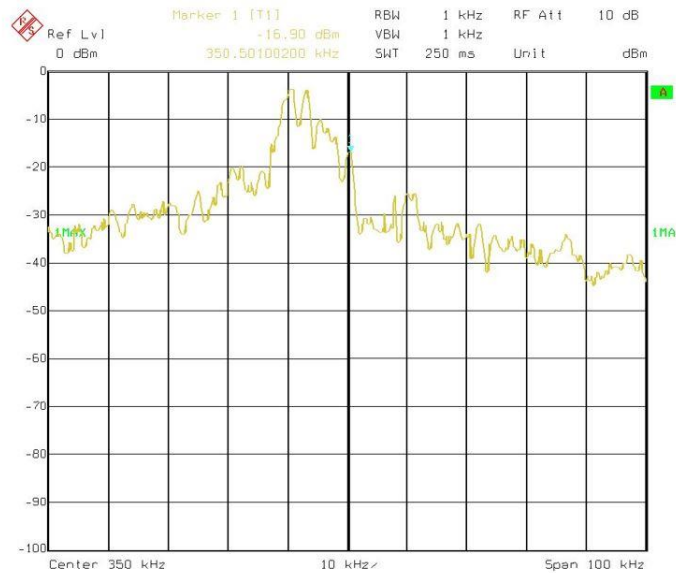
รูปที่ 33 ภาพแผ่น PCB ที่ลงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับความถี่ 350 kHz ขณะวัดทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัย



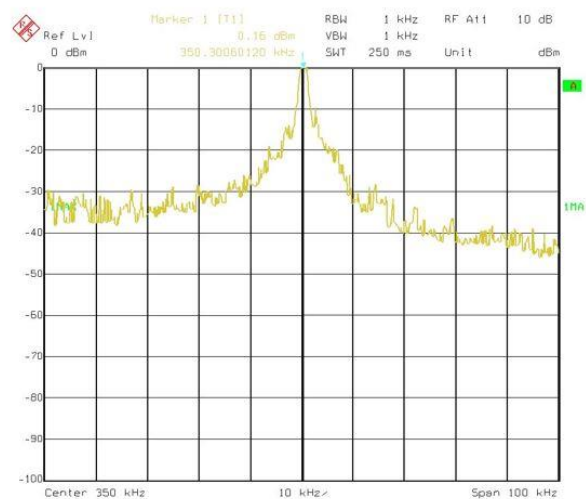
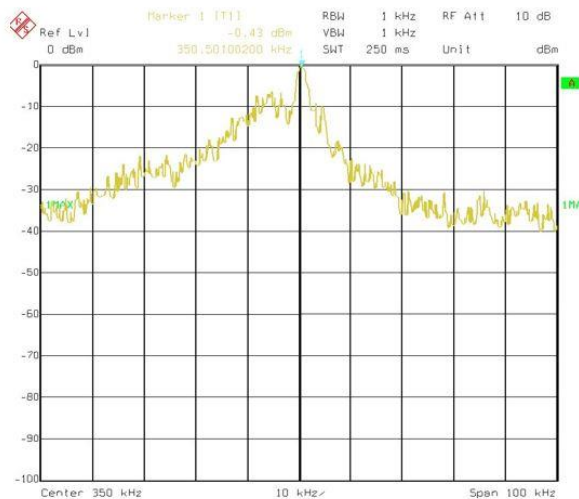
รูปที่ 34 ภาพแผ่น PCB ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสามภาคที่ความถี่ 350 kHz ขณะวัดทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัย

จากรูปที่ 33 เป็นภาพของวงจรทั้งสี่ภาค (Transmitter, Receiver, Control และ Oscillator) ของเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ ที่ทำการทดสอบคุณลักษณะทางเทคนิคในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำมาประกอบรวมกันดังแสดงในรูปที่ 34 และทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่ง พบว่าความถี่คลื่นปฏิบัติการ (Operating frequency) อยู่ที่ 350.0065 kHz ตามต้องการ (ระบบ SSB ต้องใช้วิธีป้อนความถี่ 1kHz ที่มีกำลังต่ำผสมเข้าไปเพื่อตรวจสอบความถี่คลื่นพาห์) เมื่อได้ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ 350 kHz ที่แม่นยำแล้วจึงทำการวัดทดสอบค่ากำลังคลื่นความถี่วิทยุ (RF Power) ในขณะที่ 1) ไม่มีการมอดูเลตสัญญาณใดๆ เข้าไป 2) มีการมอดูเลต

เสียงพูดที่ต่อเนื่อง และ 3) มีการมอดูเลตสัญญาณปีคอนที่อยู่ภายในเครื่องส่ง โดยทำการวัดสัญญาณที่ขั้วต่อสายอากาศหลักที่เป็นแบบส่งผ่านพื้นโลกผ่านตัวลดทอน (Attenuator) ขนาด 40 dB ก่อนต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 35 และ 36



รูปที่ 35 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อวัดทดสอบกำลังส่งของเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ (ด้านซ้าย) และภาพแสดงค่ากำลังส่งในขณะที่ไม่มีการผสมสัญญาณใดๆ เข้าไป (ด้านขวา) ที่ความถี่ 350 kHz ขณะวัดทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัย



รูปที่ 36 ภาพจากหน้าจอเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมขณะวัดทดสอบกำลังส่งโดยการผสมเสียงพูด (ภาพซ้าย) และโดยการมอดูเลตสัญญาณปีคอน (ภาพขวา) ด้วยระบบ SSB ความถี่ 350 kHz

จากผลการวัดกำลังส่งของเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB/USB ต้นแบบด้วยความถี่คลื่นพาห์ 350 kHz โดยวัดจากหัวเอาต์พุตของสายอากาศผ่านตัวลดทอนกำลังขนาด 40 dB พบว่า

1) กรณีที่ไม่มีการผสมสัญญาณใดๆ ค่ากำลังส่งที่วัดได้เท่ากับ $-16.90 \text{ dBm} + 40 \text{ dB} = 23.1 \text{ dBm}$ หรือประมาณ 204.17 มิลลิวัตต์ (mW)

2) กรณีที่มีการผสมด้วยสัญญาณเสียงอย่างต่อเนื่อง ค่ากำลังส่งที่วัดได้เท่ากับ $-0.43 \text{ dBm} + 40 \text{ dB} = 39.57 \text{ dBm}$ หรือประมาณ 9.06 วัตต์ (W)

3) กรณีที่มีการผสมด้วยสัญญาณปีคอนภายในเครื่อง ค่ากำลังส่งที่วัดได้เท่ากับ $+0.16 \text{ dBm} + 40 \text{ dB} = 40.16 \text{ dBm}$ หรือประมาณ 10.38 วัตต์ (W)

หมายเหตุ อย่างไรก็ตามค่ากำลังส่งคลื่นวิทยุความถี่ 350 kHz นี้ เป็นค่าที่วัดได้จากหัวเอาต์พุตของเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบที่ใช้สำหรับต่อเข้ากับสายอากาศโดยตรง ดังนั้นค่ากำลังส่งที่ผ่านสายอากาศออกไปในขณะที่มีการตอกสายอากาศลงดินจึงมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับที่หัวเอาต์พุตของเครื่องส่ง ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเพิ่มวงจรแมตชิ่งบาลันที่สามารถเลือกค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมเข้าไปเพิ่มเติมในวิทยุสื่อสารต้นแบบรุ่นต่อไป

จากนั้นได้มีการทดสอบซ้ำอีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะนำไปทดสอบเพื่อใช้งานในสถานที่จริง ณ สถานที่พักใกล้ถ้ำเชียงดาวในวันที่ 12 ตุลาคม 2564 ดังแสดงในรูปที่ 37 โดยเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB-350 kHz (1st Version) ต้นแบบ จำนวน 3 เครื่อง ที่พร้อมสำหรับการทดสอบใช้งานครั้งแรกในวันที่ 13 ตุลาคม 2564 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 38

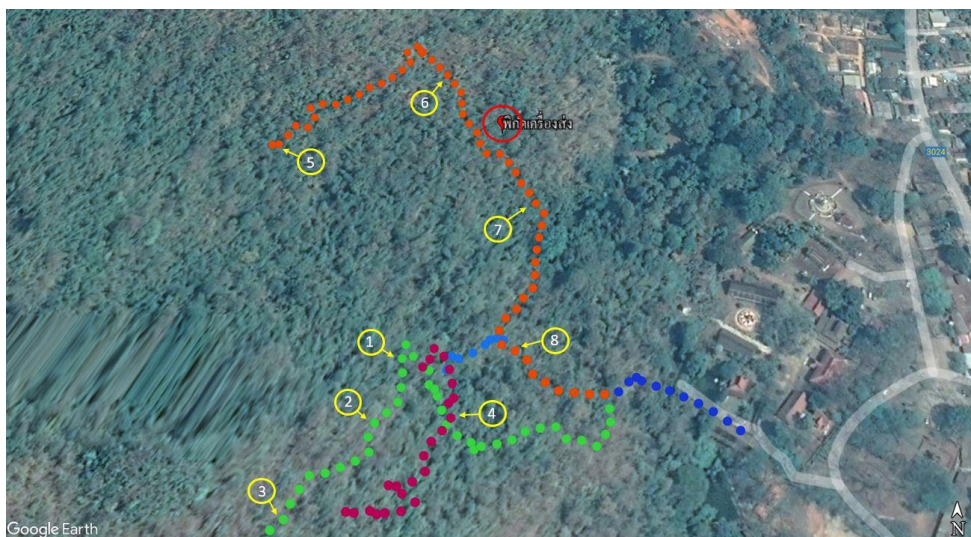


รูปที่ 37 ภาพการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz (1st Version) ต้นแบบ ก่อนที่จะนำไปทดสอบใช้งานครั้งแรกที่ถ้ำเชียงดาว จ.เชียงใหม่ (12 ตุลาคม 2564)



รูปที่ 38 ภาพเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz ต้นแบบรุ่นแรก สำหรับทดสอบใช้งานครั้งแรกที่ถ้ำเชียงดาว จ.เชียงใหม่ (13 ตุลาคม 2564)

แผนปฏิบัติการวัดทดสอบการใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ TTE-SSB-350 kHz ต้นแบบรุ่นแรก ได้กำหนดให้เครื่องวิทยุสื่อสารหนึ่งเครื่องถูกนำไปติดตั้งแบบประจำที่ไว้บนดอยหลวงเชียงดาวที่อยู่เหนือโพรงถ้ำตรงหมวดวงกลมสีแดง (พิกัดเป้าหมายตั้งเครื่องส่ง) ดังแสดงในรูปที่ 39 โดยใช้สายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกตามที่แสดงและอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 25 ขณะที่เครื่องวิทยุสื่อสารเครื่องที่สองพร้อมสายอากาศแบบเดียวกันจะถูกนำไปทดสอบรับส่งสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของโพรงถ้ำม้า (แนวพิกัดสีเขียว) และโพรงถ้ำน้ำ (แนวพิกัดสีส้ม) ซึ่งมีระยะของทางเดินในโพรงถ้ำเมื่อวัดจากปากถ้ำ (แนวพิกัดสีน้ำเงิน) ไปจนถึงตำแหน่งสุดท้ายประมาณ 477 เมตร และ 647 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่โพรงถ้ำแก้ว (แนวพิกัดสีแดง) ซึ่งมีระดับต่ำกว่าระดับน้ำทะเลมากที่สุด ทีมวิจัยไม่สามารถเข้าไปถึงสุดปลายถ้ำได้เนื่องจากมีน้ำท่วมขังเป็นจำนวนมากทางเจ้าหน้าที่ของกรมอุทยานฯ ไม่สามารถนำทางเข้าไปได้เนื่องจากอาจเกิดอันตรายกับทีมงานผู้ปฏิบัติงาน



รูปที่ 39 ภาพแสดงตำแหน่งของสายอากาศภาครับ (วงกลมสีเหลือง) ที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำ และสายอากาศภาคส่ง (วงกลมสีแดง) ที่ติดตั้งบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำเชียงดาว

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB ที่ความถี่ 350 kHz ณ ถ้ำเชียงดาว (ถ้ำหินปูน)

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทาง บนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะ กระจัด (เมตร)	กำลังที่รับ ได้ที่ ความถี่ 350 kHz (dBm)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)			
พิกัด เครื่องส่ง	19.39582253	98.92682648			
1	19.39419989	98.92619259	267.13	202.33	-58.9
2	19.39380683	98.92604382	339.32	246.20	-56.8
3	19.3932616	98.92554738	464.55	319.34	-92
4	19.39383837	98.92651106	274.9	235.34	-73
5	19.39571473	98.92523141	270.3	181.36	-85
6	19.39622197	98.92647328	70.29	94.88	-48.5
7	19.395267	98.92705796	70.06	101.72	-50.2
8	19.39425154	98.92690901	199.77	192.41	-55.3

จากตารางที่ 1 ได้แสดงตำแหน่งพิกัดของเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz ซึ่งได้ทำการทดสอบการใช้งานเมื่อวันที่ 12-14 ตุลาคม 2564 โดยเครื่องวิทยุที่อยู่บนดอยหลวงเชียงดาวถูกติดตั้งแบบคงที่ที่ตำแหน่งละติจูด 19.39582253 องศา และลองจิจูด 98.92682648 องศา ขณะที่เครื่องวิทยุสื่อสารอีกเครื่องหนึ่งจะทำงานในลักษณะเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 1-8 ตามตำแหน่งพิกัดตามตารางดังกล่าว จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังที่เครื่องวิทยุสื่อสารที่สามารถรับฟังสัญญาณได้อย่างชัดเจนที่สุดจะต้องไม่ต่ำกว่า -73 dBm ดังนั้นจากการทดสอบในครั้งนี้จะมีเพียงสองตำแหน่ง (จุด 3 และ 5) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปลายโพรงถ้ำม้าและปลายโพรงถ้ำน้ำจะมีระดับกำลังอยู่ที่ -92 dBm และ -85 dBm จะรับสัญญาณเสียงพูดได้ไม่ชัดเจนแต่สัญญาณบีกอนจะมีความชัดเจนสูงกว่า และพบว่าบริเวณทางเดินในโพรงถ้ำที่มีการเดินสายไฟฟ้าแสงสว่าง (จุด 7 และ 8) จะมีระดับของสัญญาณรบกวนในลักษณะของ Noise floor ค่อนข้างสูงประมาณ -60 dBm ทำให้สัญญาณเสียงที่รับส่งระหว่างกันขาดความชัดเจนเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ

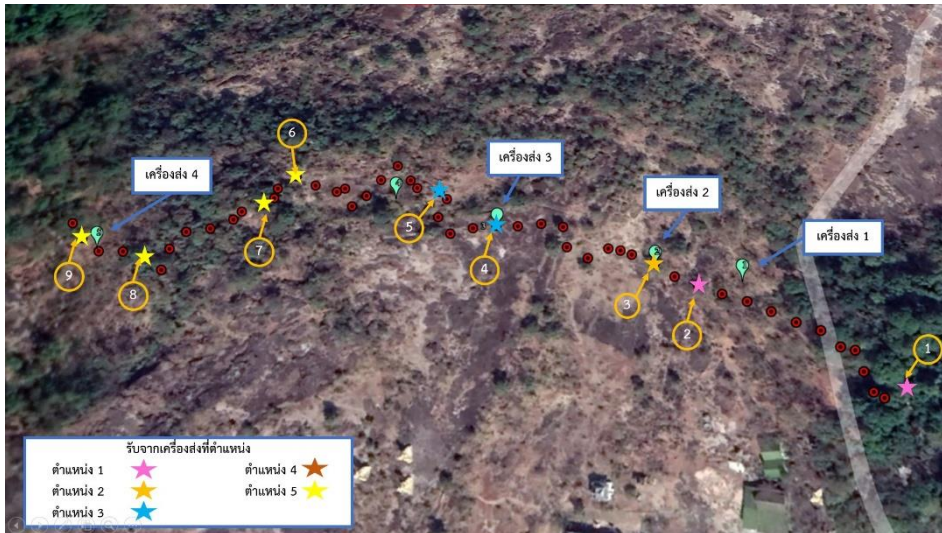
สำหรับการทดสอบใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz ต้นแบบ ที่ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ซึ่งเป็นโพรงถ้ำชนิดหินทราย ได้ดำเนินการเมื่อวันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2564 โดยครั้งแรกได้นำเครื่องวิทยุสื่อสารไปติดตั้งแบบประจำที่ไว้บนภูเขาซึ่งมีตำแหน่งพิกัดละติจูด 15.60143547 องศา และลองจิจูด 105.57292710 องศา ซึ่งอยู่ประมาณกึ่งกลางเหนือแนวโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ ตรงหมุดวงกลมสีแดง (พิกัดตั้งเครื่องส่ง) ดังแสดงในรูปที่ 40 โดยใช้สายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกชุดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว ขณะที่เครื่องวิทยุสื่อสารเครื่องที่สองพร้อมสายอากาศแบบเดียวกันได้ถูกนำไปทดสอบรับส่งสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ (แนวพิกัดสีแดง) จำนวน 9 ตำแหน่ง ซึ่งมีระยะของทางเดินในโพรงถ้ำเมื่อวัดจากปากถ้ำไปจนถึงปลายโพรงถ้ำประมาณ 457 เมตร



รูปที่ 40 แสดงตำแหน่งของสายอากาศภาครับ (วงกลมสีเหลือง) ที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำ และสายอากาศภาคส่ง (วงกลมสีแดง) ที่ติดตั้งบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำปาฏิหาริย์

จากผลการทดสอบพบว่าวิทยุสื่อสารซึ่งติดตั้งอยู่เหนือโพรงถ้ำที่ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางสูงสุดอยู่ที่ 264 เมตร และมีขนาดความหนาของเพดานถ้ำเท่ากับ 28.2 เมตร สามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องวิทยุสื่อสารที่อยู่ในแนวโพรงถ้ำตำแหน่งที่ 4 และ 5 ได้อย่างชัดเจนโดยมีระดับสัญญาณ -60.70 dBm และ -75.90 dBm ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ที่อยู่ใกล้เคียงกันสามารถรับส่งได้เฉพาะสัญญาณบีคอนที่มีระดับเสียงค่อนข้างเบา ส่วนตำแหน่งอื่นๆ ที่เหลือไม่สามารถรับส่งสัญญาณถึงกันได้ เนื่องจากระดับของสัญญาณที่ถูกผสมสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่ 350 kHz แบบ SSB ถูกลดทอนสูงมากขณะเดินทางผ่านชั้นของหินทราย ซึ่งข้อมูลเชิงทฤษฎีด้านธรณีวิทยาได้ให้คำอธิบายว่าพื้นผิวของภูเขาหินทรายเกิดจากการประกอบกันของหินควอตซ์ (Quartz) ขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งถูกประสานให้กลายเป็นเนื้อหินทรายด้วยสสารทางธรรมชาติ (Mineral matters) อื่นๆ เช่น ซิลิกา เป็นต้น และเกิดการซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ จนกลายเป็นแผ่นหินทรายขนาดใหญ่และเป็นภูเขาในที่สุด ทำให้โครงสร้างของหินทรายมีความพรุน (Porosity) ทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) สูญเสียไป โดยวัสดุสารอื่นในธรรมชาติที่แทรกตัวอยู่จะทำหน้าที่เหมือนไดอิเล็กตริกแทรกกระหว่างชั้นหินที่ซ้อนทับกันอยู่และส่งผลให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของหินทรายมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงกว้าง ทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นความถี่สูงขึ้นในขณะที่ถูกส่งผ่านเข้าไปในเนื้อหินทรายและมีค่าการลดทอนแตกต่างกันในแต่ละบริเวณ

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบที่อยู่บนภูเขาไปตามแนวโพรงถ้ำเพิ่มอีก 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 41 โดยกำหนดให้ตำแหน่งที่ทำการทดสอบครั้งแรกตามรูปที่ 40 เป็นตำแหน่งเครื่องส่งหมายเลข 3 ส่วนอีกสามตำแหน่งกำหนดให้เรียงลำดับเป็นตำแหน่งที่ 1, 2 และ 4 จากนั้นดำเนินการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบจากทั้งสี่ตำแหน่งให้ติดต่อสื่อสารกับเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบอีกชุดหนึ่งที่อยู่ตามแนวโพรงถ้ำในตำแหน่งพิกัดที่ 1-9 แล้วบันทึกผลการติดต่อสื่อสารโดยวัดค่ากำลังที่รับสัญญาณได้ ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 41 ภาพแสดงตำแหน่งของสายอากาศภาครับ (วงกลมสี่เหลี่ยม) ที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำ และเครื่องวิทยุสื่อสารและสายอากาศภาคส่งติดตั้งบนภูเขาเหนือแนวโพรงถ้ำป่าภูหารีย์ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน 4 แห่ง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB ที่ความถี่ 350 kHz ณ ถ้ำป่าภูหารีย์ (ถ้ำหินทราย)

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทางบนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะกระจัด (เมตร)	กำลังที่รับได้ที่ความถี่ 350 kHz (dBm)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)			
พิกัดเครื่องส่งที่ 1	15.60136700	105.57325400			
1	15.60088400	105.57377300	74.80	77.39	-69.00
2	15.60134022	105.57308250	20.62	21.89	-72.70
พิกัดเครื่องส่งที่ 2	15.60143547	105.57292710			
3	15.60143547	105.57292710	0.00	13.52	-72.30
พิกัดเครื่องส่งที่ 3	15.60161883	105.57232300			
4	15.60161883	105.57232300	0.00	15.10	-60.70
5	15.60178058	105.57210030	44.71	33.65	-75.90

พิกัด เครื่องส่ง ที่ 4	15.60158000	105.57075600			
6	15.60187106	105.57151840	106.84	88.18	-69.50
7	15.60174407	105.57139880	86.77	71.61	-44.80
8	15.60152176	105.57095680	20.51	24.02	-74.20
9	15.60160848	105.57069690	10.42	8.49	-83.40

จากผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz ภายในถ้ำที่ตำแหน่งพิกัดทั้ง 9 แห่ง ให้ติดต่อสื่อสารกับเครื่องวิทยุสื่อสารแบบเดียวกันที่ติดตั้งอยู่บนภูเขาเหนือแนวโพรงถ้ำที่มีพิกัดแตกต่างกัน 4 ตำแหน่ง พบว่าเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบซึ่งติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่ 1 (มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง 262 เมตร มีความหนาของเพดาน 23.6 เมตร) สามารถติดต่อสื่อสารกับวิทยุสื่อสารต้นแบบที่อยู่ในโพรงถ้ำตำแหน่งที่ 1 และ 2 ได้อย่างชัดเจน โดยวัดค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -69.00 dBm และ -72.70 dBm ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งที่ 3 ในถ้ำจะรับส่งได้เฉพาะฟังก์ชันที่เป็นสัญญาณบีคอน แต่เมื่อเปลี่ยนเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบบนภูเขาไปยังตำแหน่งที่ 2 (มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง 262 เมตร มีความหนาของเพดาน 24.5 เมตร) จะสามารถติดต่อสื่อสารด้วยเสียงพูดกับตำแหน่งที่ 3 ในถ้ำได้อย่างชัดเจน โดยมีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -72.30 dBm ขณะที่เครื่องวิทยุสื่อสารถูกย้ายไปติดตั้งในตำแหน่งที่ 3 บนภูเขา จะติดต่อสื่อสารด้วยเสียงอย่างชัดเจนกับเครื่องวิทยุสื่อสารในถ้ำที่อยู่ ณ ตำแหน่งที่ 4 และ 5 ด้วยระดับค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -60.70 dBm และ -75.90 dBm ตามลำดับตามที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น และท้ายที่สุดเมื่อย้ายเครื่องวิทยุสื่อสารบนภูเขาไปยังตำแหน่งที่ 4 (มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง 258 เมตร มีความหนาของเพดาน 31.3 เมตร) จะสามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องวิทยุสื่อสารภายในโพรงถ้ำที่ตำแหน่ง 6, 7, 8 และ 9 ที่เหลือได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่ทำกรรับส่งสัญญาณเสียงพูดด้วยเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ SSB-TTE-350 kHz ที่มีกำลังส่ง 5 วัตต์ ผ่านชั้นหินทรายที่เป็นโครงสร้างของโพรงถ้ำนั้น อาจจำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งที่ตั้งของสายอากาศแบบฝังลงดินและเครื่องวิทยุสื่อสาร จึงจะทำให้สามารถติดต่อสื่อสารกับปฏิบัติงานในถ้ำได้ตลอดระยะทางทั้งหมด ไม่เหมือนกับกรณีของถ้ำเชียงดาวที่เป็นถ้ำหินปูนเราสามารถติดตั้งสายอากาศและเครื่องวิทยุสื่อสารเพียงหนึ่งถึงสองจุดเท่านั้นก็สามารถติดต่อสื่อสารได้ตลอดทุกแนวโพรงถ้ำ

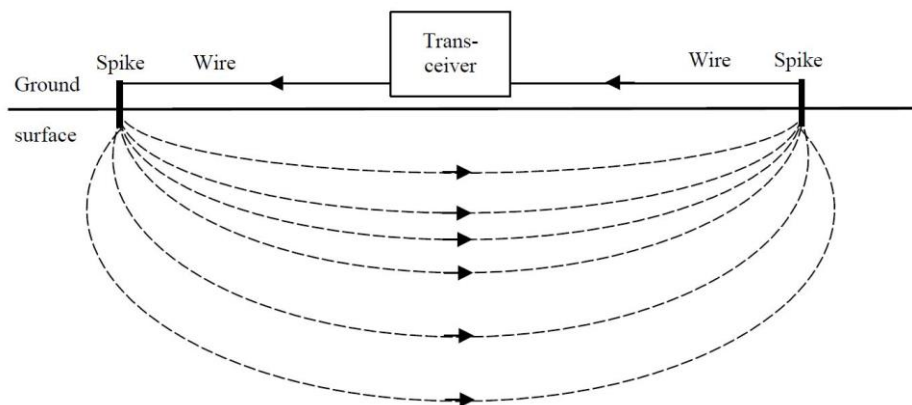
5.8 สายอากาศสำหรับระบบสื่อสารแบบผ่านพื้นโลก

จากข้อเท็จจริงเชิงปรากฏการณ์ของคลื่นความถี่วิทยุที่ตกกระทบกับหินหรือดินโดยที่ กำลังของคลื่นที่ตกกระทบไม่ได้หยุดหรือหมดหายไปทันทีที่พื้นผิว แต่จะซึมซาบลงอย่างรวดเร็วโดยการผ่านทะลุ (Penetration) ลงไปในเนื้อหินหรือเนื้อดินโดยใช้ความยาวคลื่นของความถี่วิทยุส่งผ่านทะลุเข้าไป ดังนั้นหากมีการใช้ความยาวคลื่นที่ยาวพอ ก็จะเกิดระยะทางของการผ่านทะลุที่ไกลขึ้น เช่น กรณีของระบบวิทยุสื่อสาร HeyPhone [6]-[8] ได้ใช้ความถี่ 87 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 3.5 กิโลเมตร (คำนวณจากความเร็วแสงในอากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที) แต่เนื่องจากความเร็วแสงจะลดลงขณะที่เดินทางในหิน ทำให้ความยาวคลื่นเดียวกันนี้มีความยาวคลื่นใต้ดินเหลือเพียงหลักร้อยเมตร ซึ่งหากความยาวคลื่นใต้ดินนี้มีขนาดมากกว่านี้ก็จะทำให้สามารถเกิดการเหนี่ยวนำผ่านทะลุได้ไกลมากขึ้นหลายร้อยเมตร ด้วยหลักการดังกล่าวเมื่อนำมาใช้กับคลื่นความถี่ 350 kHz ก็สามารถใช้งานได้ด้วยเช่นเดียวกันแม้ว่าความถี่จะสูง

กว่า 87 kHz ของวิทยุสื่อสาร HeyPhone ก็ตาม แต่จากผลการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นในงานวิจัยนี้พบว่า คลื่นความถี่ 350 kHz นี้ เมื่อนำมาใช้กับถ้ำหินปูนในประเทศไทยจะมีค่าการลดทอนในชั้นหินปูนต่ำกว่าความถี่ 87 kHz ในขณะที่นำมาใช้กับถ้ำหินทรายจะมีค่าการลดทอนสูงกว่าความถี่ 87 kHz เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบจำนวนของถ้ำทั้งสองประเภทซึ่งมีข้อมูลระบุว่า มีจำนวนถ้ำหินปูนเป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 2,000 ถ้ำจากทั้งหมด 3,030 ถ้ำ) ดังนั้นการเลือกใช้ความถี่ 350 kHz มาออกแบบระบบวิทยุสื่อสารแบบ TTE และสายอากาศสำหรับใช้งาน และหลีกเลี่ยงการรบกวนต่อวิถีชีวิตของค้างคาวที่อาศัยในถ้ำ จึงถือว่าเป็นการพิจารณาที่รอบคอบและครบถ้วนแล้ว

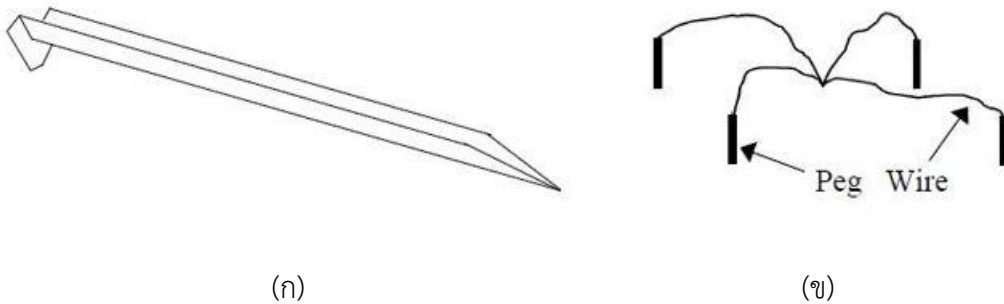
จากหลักการส่งคลื่นดินผ่านพื้นโลกโดยใช้วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านชั้นหินโดยใช้ความถี่ 350 kHz จึงมีความจำเป็นต้องใช้สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก (Grounded-Earth antenna) อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบบ่วง (Loop antenna) ก็สามารถใช้ทดแทนได้ ในกรณีที่โพรงถ้ำมีความหนาของชั้นหินที่ไม่หนามากหรือเป็นโพรงถ้ำที่มีความลึกไม่มากนัก ข้อดีคือ มีความสะดวกในการใช้งานและติดตั้งได้รวดเร็ว แต่ข้อเสียคือมีค่าอัตราขยายที่ต่ำมาก เนื่องจากต้องสร้างขึ้นมาในรูปแบบของสายอากาศขนาดเล็ก (Small antenna) ไม่สามารถใช้เส้นลวดที่มีความยาวเท่ากับความยาวคลื่น (857 เมตร) มาสร้างให้เป็นบ่วงตามขนาดที่ต้องการได้

สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกมีข้อดี คือ โครงสร้างไม่ซับซ้อนใช้เพียงแค่เส้นลวดตัวนำเพียงสองเส้นที่มีความยาวแต่ละเส้นไม่ต่ำกว่า $1/100$ เท่าของความยาวคลื่น หรือประมาณ 8.57 เมตร สำหรับความถี่ 350 kHz จึงจัดได้ว่าอยู่ในประเภทของสายอากาศขนาดเล็กที่มีอัตราขยายต่ำเช่นเดียวกับสายอากาศแบบบ่วง อย่างไรก็ตามเทคนิคในการแพร่คลื่นผ่านพื้นโลกนั้นแตกต่างจากการแพร่คลื่นในอากาศว่างปกติ แต่จะใช้วิธีเหนี่ยวนำประจุที่เกิดการสะสมที่ปลายของเส้นลวดตัวนำปล่อยลงสู่พื้นโลกในรูปของสนามไฟฟ้าขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของกระแสที่มีความถี่ 350 kHz สนามไฟฟ้างกล่าวเมื่อถูกปล่อยจากปลายเส้นลวดด้านหนึ่งลงสู่พื้นโลกจะเกิดการเหนี่ยวนำในชั้นดินหรือหินไปสู่ปลายสายทองแดงอีกด้านหนึ่งกลับไปสู่เครื่องส่งวิทยุ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในพื้นโลกจะใช้เส้นทางแรกที่สั้นที่สุดระหว่างจุดที่เชื่อมต่อพื้นโลกทั้งสองจุด และมีอีกส่วนหนึ่งที่เกิดการเหนี่ยวนำแผ่ออกไปในส่วนที่ลึกลงไปในพื้นโลก โดยมีเวกเตอร์ของเส้นแรงไฟฟ้าแผ่ออกไปเป็นเส้นโค้งเช่นเดียวกับสายอากาศแบบไดโพลที่ใช้ในการแผ่คลื่นผ่นอากาศว่าง ดังนั้นเพื่อให้การเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าระหว่างปลายของเส้นลวดทั้งสองด้านเกิดขึ้นในพื้นโลกได้สะดวกขึ้น จึงใช้แท่งโลหะทำหน้าที่เป็นแท่งอิเล็กโทรดต่อที่ปลายทั้งสองของเส้นลวดและฝังลงพื้นดินในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 42



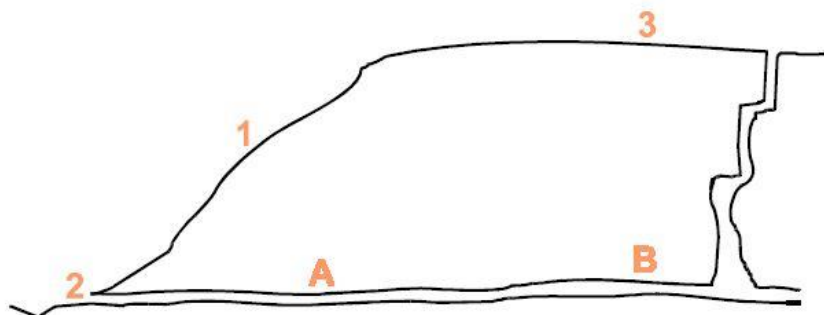
รูปที่ 42 แสดงหลักการทำงานของสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

ในทางปฏิบัติคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้สายไฟฟ้าที่ตัวนำเป็นแบบทองแดงพันเกลียวมีฉนวนหุ้มเบอร์ 8 AWG ซึ่งสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 3-5 แอมป์ เนื่องจากเครื่องรับส่งวิทยุแบบ TTE ที่พัฒนาขึ้นมาวิธีกรรมผสมสัญญาณแบบ SSB ซึ่งขณะที่ส่งด้วยกำลัง 5-10 วัตต์ จะมีกระแสไหลออกไปในเส้นลวดค่อนข้างสูง โดยเส้นลวดแต่ละเส้นจะมีความยาว 10 เมตร ซึ่งยังมีความสะดวกในการติดตั้งใช้งาน สำหรับแท่งอิเล็กโทรดโลหะที่ใช้สำหรับฝัง (Spike) ลงพื้นดิน ได้เลือกใช้แท่งสมอบกขนาดเล็กที่ใช้สำหรับยึดเต็นท์ (Tent peg) ความยาว 19 เซนติเมตรที่มีจำหน่ายทั่วไป เนื่องจากราคาถูกและหาซื้อมาทดแทนได้โดยง่ายหากเกิดการหักงอหรือสูญหายขณะปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม และสามารถเพิ่มจำนวนของแท่งโลหะในกรณีที่ต้องการให้เกิดการเหนี่ยวนำเส้นแรงไฟฟ้าในพื้นที่โลกได้มากขึ้น โดยเชื่อมต่อกันแบบดาว (Star) ดังแสดงในรูปที่ 43 ซึ่งจากการวัดทดสอบพบว่าการเชื่อมต่อแบบดาวโดยใช้อิเล็กโทรดจำนวน 6 แท่ง แต่ละแท่งถูกตอกให้ห่างกันอย่างน้อย 6 นิ้ว โดยใช้สายทองแดงยาว 50 เซนติเมตร เชื่อมต่อแต่ละแท่งมาแย่งแท่งโลหะที่อยู่ปลายเส้นลวดนำกระแสจะทำให้มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบแท่งเดียวอย่างชัดเจน เนื่องจากให้ค่าความต้านทานที่ปลายเส้นลวดตัวนำต่ำกว่าแบบใช้สมอบกเพียงแท่งเดียว



รูปที่ 43 (ก) แสดงภาพสมอบกที่ใช้เป็นแท่งอิเล็กโทรดโลหะ และ (ข) วิธีการเพิ่มจำนวนแท่งอิเล็กโทรด

เพื่อการออกแบบค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของบาลันสำหรับการแมตซ์ (Matching balun) ของเครื่องส่งวิทยุแบบ TTE ให้มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกัน จึงได้ทำการวัดทดสอบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 350 kHz เมื่อตอกลงพื้นดินในกรณีของใช้อิเล็กโทรดเพียงแท่งเดียวและหกแท่งจะมีค่าเท่ากับ $209.349+j22.571$ โอห์ม และ $55.58+j69.765$ โอห์ม ตามลำดับ



รูปที่ 44 แสดงภาพตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศแบบฝังบนพื้นโลกที่อยู่เหนือโพรงถ้ำ

จากรูปที่ 44 แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศแบบฝังบนพื้นโลกเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการสื่อสารที่ดีที่สุด โดยสถานีส่งและรับสัญญาณควรถูกแยกออกจากส่วนที่เป็นหินให้น้อยที่สุด ซึ่งปกติถ้าเป็นไปได้ตามอุดมคติควรให้สถานีส่งที่อยู่เหนือถ้ำ (3) มีตำแหน่งตรงกับสถานีรับสัญญาณที่อยู่ในโพรงถ้ำ (B) ให้มากที่สุด ส่วนกรณีที่แนวโพรงถ้ำเป็นแนวราบที่ล่งสู่เชิงเขา ตำแหน่งการติดตั้งที่ถือว่าให้ผลดีต่อการสื่อสารก็คือ สถานีส่งอยู่ที่บริเวณแนวลาดชันของเชิงเขา (1) หรือที่ทางเข้าถ้ำ (2) ในระดับเดียวกับพื้นถ้ำก็สามารถติดต่อสื่อสารกับสถานีรับที่อยู่ในถ้ำที่ตำแหน่ง A และ B ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งในทางปฏิบัติตำแหน่งของสถานีรับสัญญาณจะต้องมีการเคลื่อนย้ายไปตามเส้นทางเดินของโพรงถ้ำได้ ส่วนสถานีส่งสัญญาณซึ่งอยู่บนภูเขาจะเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ยากกว่าเนื่องจากสภาพภูมิประเทศเป็นปัจจัยหลัก ดังนั้นหากเลือกตำแหน่งติดตั้งสายอากาศของสถานีส่งสัญญาณที่เหมาะสมกับลักษณะของโพรงถ้ำได้ จะทำให้การติดต่อสื่อสารสามารถไปได้ไกลหลายร้อยเมตร

5.9 สรุปผลการวิจัยพัฒนาเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB 350 kHz รุ่นที่ 1

การออกแบบเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB 350 kHz รุ่นที่ 1 ขนาดกำลังส่งขั้นต่ำ 5 วัตต์ จำนวน 3 เครื่อง ซึ่งถือว่าเป็นเครื่องวิทยุสื่อสารแอนะล็อกต้นแบบชุดแรกตามข้อกำหนดในโครงการวิจัย ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นวิทยุซึ่งเกิดขึ้นในโพรงถ้ำหินปูนและหินทราย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าการส่งคลื่นความถี่วิทยุด้วยสนามไกล (Far-fields) ในอากาศว่าง (Free space) ทั้งแบบ LOS และ NLOS ไม่สามารถใช้ในการติดต่อสื่อสารภายในโพรงถ้ำทั้งสองชนิดในระยะตรงที่ไกลกว่า 150 เมตรขึ้นไปได้ จำเป็นต้องใช้วิธีเหนี่ยวนำทางกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากคลื่นความถี่ต่ำตั้งแต่ย่าน VLF ไปจนถึงช่วงต้นแถบของความถี่ MF เท่านั้น สุดท้ายคณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความถี่ 350 kHz ซึ่งได้ศึกษาแล้วว่าไม่มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับคลื่นความถี่ในย่านที่ต่ำกว่า เพียงแต่อาจได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้สูงกว่า ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบและพัฒนาในส่วนของวงจรภาครับของเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบในรุ่นที่ 2 ต่อไป นอกจากนี้การปรับปรุงวงจรแมตซ์บาลันในส่วนสุดท้ายของภาคส่งก็มีความสำคัญมากที่ทำให้ความเสถียรของกำลังส่งมีค่าสูงขึ้นไม่ว่าจะนำสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกไปติดตั้งในสถานที่ที่มีชั้นดินหรือชั้นหินแตกต่างกันก็ตาม

6. การออกแบบวงจรและสร้างเครื่องวิทยุสื่อสารแบบแอนะล็อกระบบ SSB รุ่นที่ 2

จากผลการทดสอบใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB 350 kHz รุ่นที่ 1 ขนาดกำลังส่งขั้นต่ำ 5 วัตต์ ซึ่งได้พัฒนาและปรับปรุงจากวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz พบว่าปัจจัยลักษณะสภาพแวดล้อมของโพรงถ้ำและสภาพภูมิประเทศของภูเขาเหนือโพรงถ้ำจะมีผลต่อการติดตั้งสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกโดยการฝังลงดินทั้งสถานีที่อยู่ในถ้ำและบนภูเขานอกถ้ำ (อธิบายไว้ในรูปที่ 42 หัวข้อที่ 5.8) ได้แก่ ในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานไม่ทราบแนวเส้นทางของโพรงถ้ำทำให้ไม่สามารถติดตั้งสายอากาศบนภูเขาให้อยู่ใกล้เคียงแนวของโพรงถ้ำได้ และอีกกรณีหนึ่งซึ่งผู้ปฏิบัติงานมีข้อมูลของทิศทางแนวโพรงถ้ำแต่สภาพภูมิประเทศบนภูเขาไม่เอื้อต่อการติดตั้งสายอากาศให้ใกล้เคียงกับแนวโพรงถ้ำนั้นได้ ซึ่งทั้งสองกรณีอาจส่งผลให้การติดตั้งสายอากาศแบบฝังลงดินทั้งภายในและภายนอกถ้ำมีการโพลาไรซ์ของคลื่นไม่อยู่ในแนวเดียวกันอย่างแท้จริง ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่ตำแหน่งของผู้ปฏิบัติงานในถ้ำมีการย้ายสายอากาศไปตามแนวโพรงถ้ำที่มีทิศทางเปลี่ยนแปลงด้วย หรือแม้แต่กรณีที่สายอากาศทั้งของสถานีภายในและภายนอกถ้ำอยู่ในแนวใกล้เคียงกันก็ตามแต่มีระยะห่างออกไปตามตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ ปัจจัยทั้งหมดนี้จะส่งผลให้ระดับของสัญญาณที่ถูกส่งไปยังเครื่องวิทยุสื่อสารปลายทางมีค่าลดต่ำลงต่ำกว่า -80 dBm ทำให้สัญญาณเสียงที่รับได้มีระดับความดังลดลงและไม่ชัดเจน

นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบของโพรงถ้ำที่เกิดจากชั้นหินปูนซึ่งมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r) ประมาณ 7 (แห้ง) และ 8 (เปียก) และชั้นหินทรายมีสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ประมาณ 2-5 (แห้ง) และ 5-10 (เปียก) [14] ขณะที่ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง (DC Conductivity: σ) ของหินปูนมีค่าตั้งแต่ 0.002 – 0.00001 S/m และของหินทรายมีค่าตั้งแต่ 0.1 – 0.001 S/m [15] ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานผิว (Surface resistance) ของแผ่นหินปูนขนาดความยาว 1 เมตร และเส้นรอบรูป (Perimeter) ของพื้นที่หน้าตัดหัวท้าย 1 เมตร ที่ความถี่ 350 kHz มีค่าสูงกว่าของหินทราย ($R_{sf} = R_s = \sqrt{\omega\mu_0/2\sigma}$; μ_0 คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก หรือ Permeability) ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความนำไฟฟ้าที่ความถี่ 350 kHz ของหินปูนมีค่าต่ำกว่าหินทรายสูงมากซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติระหว่างตัวแปรทั้งสองที่มีค่าผกผันกัน และยังส่งผลให้ค่าความลึกผิว ($\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma}$) ของคลื่นความถี่ 350 kHz สามารถส่งผ่านผนังและเพดานถ้ำที่เป็นชั้นหินปูนได้ดีกว่าชนิดที่เป็นหินทรายอย่างชัดเจน (กรณีหินปูน $\delta = 19.02$ เมตร ที่ค่า $\sigma=0.002$ และกรณีหินทราย $\delta = 2.69$ เมตร ที่ค่า $\sigma=0.1$) หรือหากอธิบายด้านการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) จะเห็นว่าผนังและเพดานถ้ำหินปูนมีค่าการลดทอนของสัญญาณต่ำกว่าของหินทรายอย่างชัดเจน

ดังนั้นหากต้องการปรับปรุงเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ SSB-TTE-350 kHz ขนาดกำลังส่ง 5 วัตต์ ให้สามารถรับส่งสัญญาณตลอดระยะทางเดินของโพรงถ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น สามารถกระทำดังนี้

1) ปรับตำแหน่งพิกัดของการติดตั้งสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกที่อยู่บนดอยหรือบนภูเขาเหนือแนวโพรงถ้ำให้มีระยะกระจัดที่ชี้ไปยังปลายโพรงถ้ำต่างๆ ให้มีความใกล้เคียงกัน (กรณีที่มีหลายโพรงถ้ำในภูเขาเดียวกัน) และจัดวางแนวของทั้งสายอากาศทั้งสองแห่งให้มีการโพลาไรซ์ที่ใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

2) ปรับตำแหน่งพิกัดของการติดตั้งสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกที่อยู่บนดอยหรือบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำให้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางโพรงถ้ำเป้าหมายและอยู่กลางระยะทางเดินจากปากถ้ำไปจนถึงปลายโพรงถ้ำให้มากที่สุด (กรณีที่มีโพรงถ้ำเดียวในภูเขานั้น) ส่วนกรณีของถ้ำหินทรายที่เกิดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของเนื้อหินที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าความนำแตกต่างกันในแต่ละบริเวณนั้น อาจมีความจำเป็นต้องเพิ่มจุดติดตั้งสายอากาศดังกล่าวตามแนวโพรงถ้ำเพิ่มขึ้น จึงจะทำให้ติดต่อสื่อสารกันได้ตลอดแนวโพรงถ้ำ

3) ปรับปรุงค่าอิมพีแดนซ์ของแมตซ์ชิงบาลันของเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบให้สามารถเลือกค่าที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปเมื่อสภาพของชั้นดินและชั้นหิน ณ บริเวณที่ติดตั้งสายอากาศแตกต่างกัน จะช่วยให้ค่ากำลังของคลื่นวิทยุที่ส่งผ่านชั้นดินและชั้นหินบริเวณนั้นมีค่าสูงขึ้น

4) ปรับปรุงวงจรขยายสัญญาณเสียงสำหรับไมโครโฟนให้มีอัตราขยายสูงขึ้นเพื่อยกค่าระดับของสัญญาณเสียงให้สูงขึ้นก่อนส่งไปที่กับวงจรมอดูเลชันแบบ SSB จะส่งผลให้ค่ากำลังของคลื่นวิทยุที่ส่งให้กับสายอากาศมีค่าสูงขึ้นและมีความเสถียรขึ้น

5) ปรับปรุงวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (Low-noise amplifier) ของภาครับให้มีค่าความไวในการรับสัญญาณ (Sensitivity) สูงขึ้นและมีความสามารถในการขยายสัญญาณรบกวนได้ต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพในการรับฟังมีความชัดเจนสูงขึ้นแม้สัญญาณที่รับเข้ามาจะมีระดับของสัญญาณต่ำ

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE 350 kHz รุ่นที่ 2 ขึ้นมา โดยได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงดังรายการต่อไปนี้

1) ภาคเครื่องส่งวิทยุ

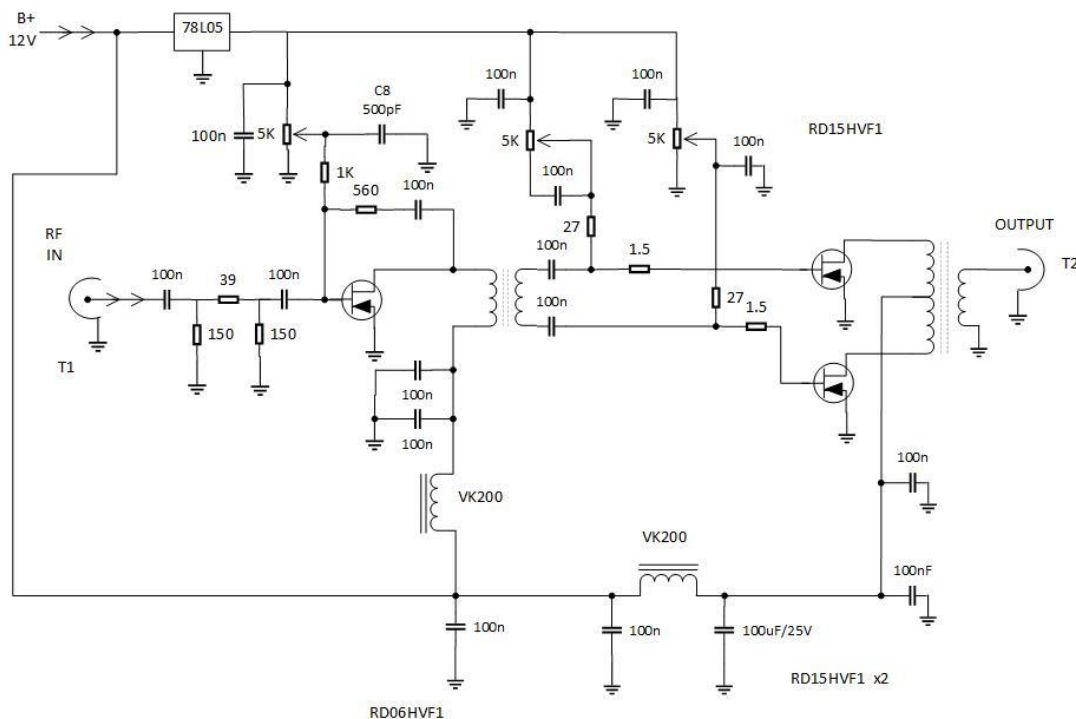
- พัฒนาวงจรภาคขยายกำลังส่งวิทยุ (RF Power amplifier) ให้สามารถเลือกกำลังส่งได้ที่ 5/15 วัตต์
- พัฒนาเพิ่มวงจรบาลันปรับค่าอิมพีแดนซ์ (Matching balun) ของสายอากาศ

2) ภาคเครื่องรับวิทยุ

- พัฒนาวงจรภาครับเป็นแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Superheterodyne) ทดแทนวงจรเดิม
- พัฒนาวงจรขยายสัญญาณภาครับ (RF low-noise amplifier) ให้มีอัตราขยายสูงชันและมีสัญญาณรบกวนต่ำ สามารถเลือกรับสัญญาณต่ำได้ที่ -80 dBm และ -100 dBm
- พัฒนาวงจรขยายเสียง (AF amplifier) ก่อนส่งออกลำโพงให้มีประสิทธิภาพสูงชันและสามารถปรับระดับความดังได้ 6 ระดับ
- พัฒนาเพิ่มวงจรสquelch เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรขยายสัญญาณภาครับ

6.1 การพัฒนาและปรับปรุงภาคเครื่องส่งวิทยุ

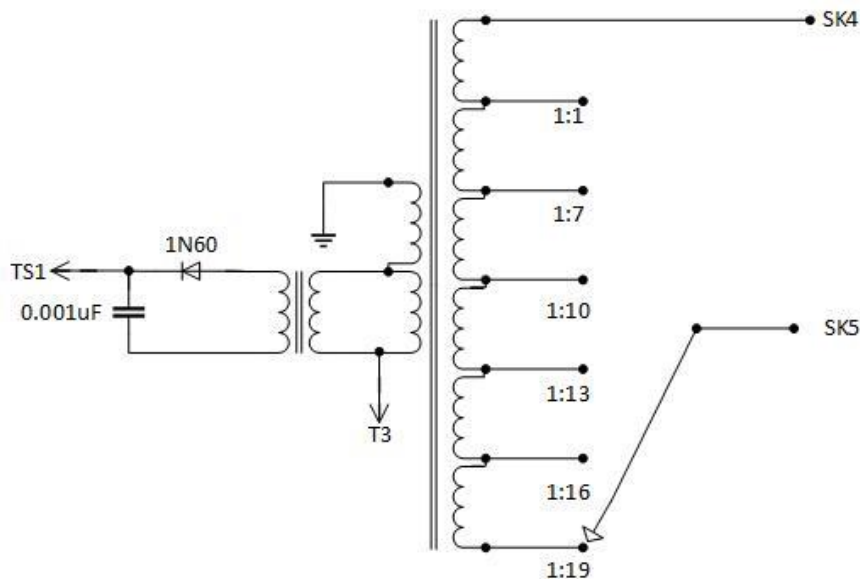
วงจรหลักของภาคส่งวิทยุแบบ SSB-TTE- 350 kHz ทางคณะผู้วิจัยยังคงใช้วงจรเดิมที่พัฒนาจากเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz ของสมาคม BCRA ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 26 แต่ได้พัฒนาและปรับปรุงเพิ่มเติมในส่วนของวงจรภาคขยายกำลังส่งวิทยุ (RF Power amplifier) ให้สามารถเลือกกำลังส่งได้ที่ 5/15 วัตต์ และเพิ่มวงจรบาลันปรับค่าอิมพีแดนซ์ (Matching balun) ของสายอากาศ ตามวงจรที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 45 และ 46 ตามลำดับ



รูปที่ 45 วงจรภาค RF Power Amplifier ขนาดกำลังส่งสูงสุด 15 วัตต์ ของเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB-350 kHz ต้นแบบรุ่นที่ 2

จากวงจรภาคขยายกำลังส่งวิทยุความถี่ 350 kHz ขนาดกำลังส่งสูงสุด 15 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 45 ประกอบด้วยอุปกรณ์ FET เบอร์ RD06HVF1 จำนวน 3 ตัว ทำหน้าที่หลักในการขยายกำลังส่งวิทยุในวงจรนี้ โดย FET ตัวแรกทำหน้าที่วงจรขยายกำลังขั้นแรก (1st stage amplifier) โดยรับค่ากำลังมาจากวงจรภาคส่งเดิมที่มีค่าระดับสัญญาณคงที่เท่ากับ 17 dBm การควบคุมเพื่อส่งกำลังที่ขยายแล้วส่งต่อไปให้ FET อีกสองตัวทำหน้าที่ขยายกำลังให้ได้ 5 วัตต์ และ 15 วัตต์ (ที่แรงดัน 12.7 โวลต์) ทำได้โดยการควบคุมแรงดันที่ออกมาจากไอซีเรกูเลเตอร์ 7805 เพื่อจ่ายไบอัสให้กับ FET ตัวแรก หากเลือกแรงดันไบอัสดังกล่าวอยู่ที่ 1.6 โวลต์ จะทำให้ค่ากำลังที่ถูกขยายด้วย FET อีกสองตัวมีค่าเท่ากับ 5 วัตต์ และหากเลือกแรงดันไบอัสนี้ให้เท่ากับ 2.5 โวลต์ ค่ากำลังขยายสูงสุดที่ได้จะเท่ากับ 15 วัตต์ สำหรับอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ในวงจรจะเป็นส่วนของวงจรปรับค่าอิมพีแดนซ์และปรับแรงดันไบอัสให้กับ FET แต่ละตัว โดยมี RF Choke VK200 สองตัวทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุอื่นที่อาจมาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปรบกวนการทำงานของ FET ทั้งสามตัว นอกจากนี้ยังมีหม้อแปลงสำหรับส่งผ่านกำลังไปยัง FET คู่และส่งผ่านกำลังไปยังวงจรแมตชิ่งบาลันและสายอากาศต่อไป

หมายเหตุ วงจรภาคส่งชุดเดิมที่พัฒนามาจากวงจรเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone ได้ถูกปรับปรุงโดยยกเลิกไอซี TDA2003 ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณเสียงที่ความถี่สูงสุด 400 kHz แต่ถูกนำมาดัดแปลงเป็นภาคขยายกำลังสัญญาณวิทยุภาคสุดท้ายออกไป แล้วแทนที่ด้วยวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ 350 kHz โดยตรง เพื่อให้ได้ค่ากำลังที่เอาต์พุตของวงจรภาคส่งชุดเดิมเท่ากับ 17 dBm และส่งต่อไปให้กับภาคขยายกำลังสุดท้ายดังกล่าว

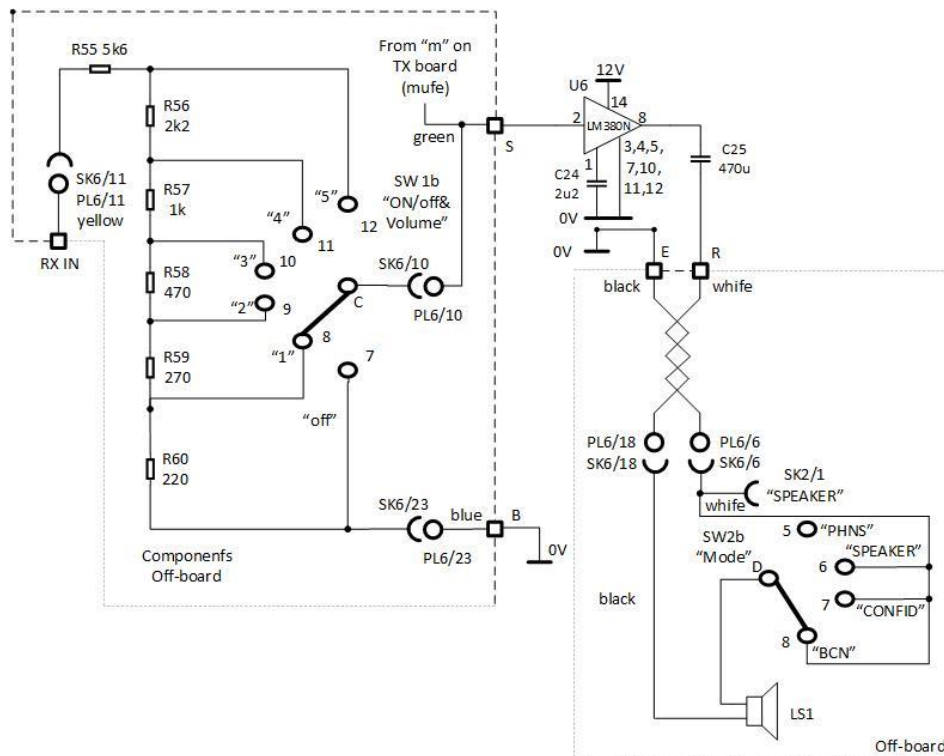


รูปที่ 46 วงจรภาค Matching Balun ของเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz ต้นแบบรุ่นที่ 2

วงจรภาค Matching Balun จะช่วยให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกเมื่อแทงอิเล็กโทรดของสายอากาศถูกฝังดินในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เอาต์พุตของวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ 350 kHz ภาคสุดท้าย วงจรนี้ได้ใช้หม้อแปลงแมตชิ่ง (Matching transformer) แบบขดลวดที่ออกแบบให้มีอัตราส่วนจำนวนขดลวดที่ขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิมีอัตราส่วน 1:1, 1:7, 1:10, 1:13, 1:16 และ 1:19 ตามรูปที่ 46 โดยที่อัตราส่วน 1:1 จะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม

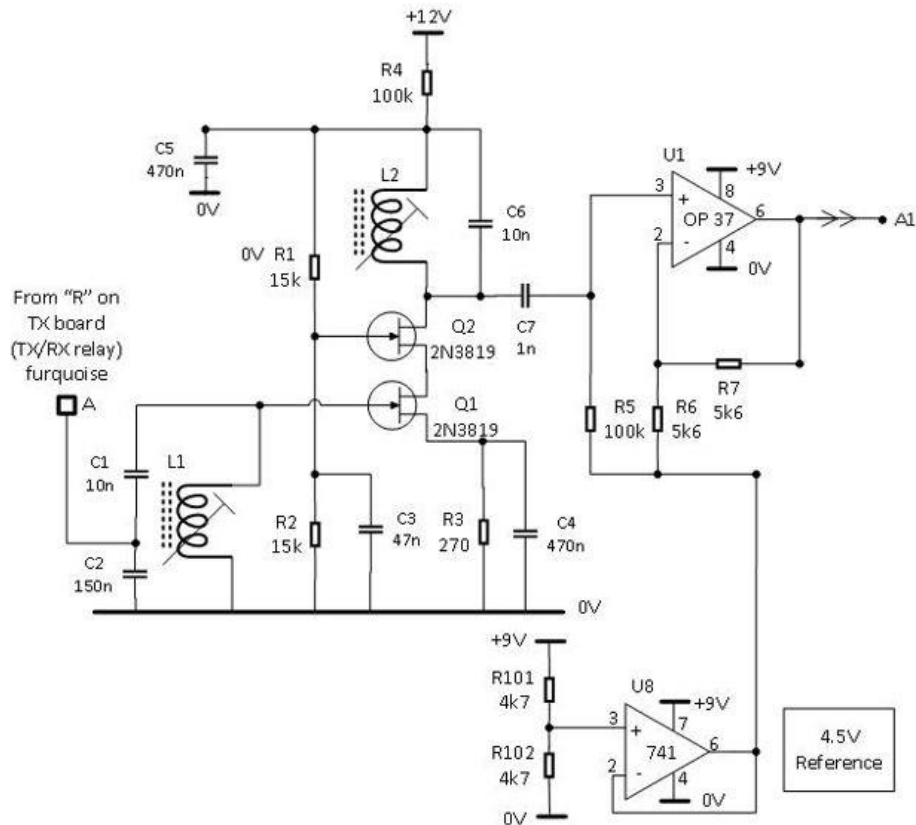
6.2 การพัฒนาและปรับปรุงภาคเครื่องรับวิทยุ

วงจรหลักของภาครับวิทยุแบบ SSB-TTE- 350 kHz ทางคณะผู้วิจัยได้ยกเลิกการใช้วงจรเดิมที่พัฒนาจากเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz ของสมาคม BCRA ที่แสดงไว้ในรูปที่ 28 โดยได้ออกแบบวงจรภาครับสัญญาณ SSB 350 kHz ให้เป็นแบบ Superheterodyne พัฒนาวงจรขยายสัญญาณภาครับให้มีอัตราขยายสูงขึ้น และพัฒนาวงจรขยายเสียง (AF amplifier) ก่อนส่งออกลำโพงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถปรับ ระดับความดังได้ 6 ระดับรวมทั้งออกแบบวงจรสquelch (Squelch) เพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรขยายสัญญาณภาครับ โดยแยกแสดงวงจรในส่วนต่างๆ ไว้ในรูปที่ 47-49



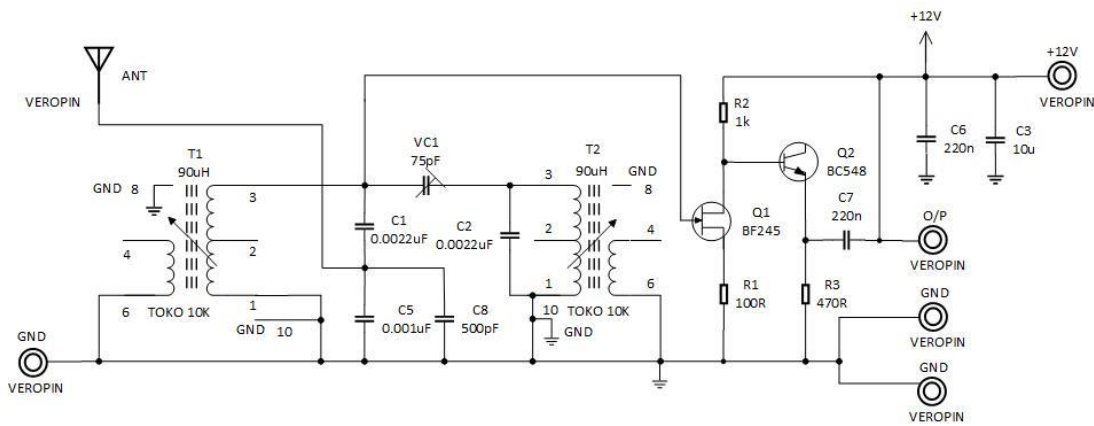
รูปที่ 47 วงจรขยายสัญญาณเสียงก่อนส่งออกลำโพงปรับระดับความดังของเสียงได้ 6 ระดับ

วงจขยายสัญญาณเสียงเพื่อส่งออกลำโพงตามรูปที่ 47 ยังคงเลือกใช้วงจขยายด้วยไอซีเบอร์ LM380N ซึ่งให้คุณภาพเสียงที่คมชัดเจนนี้อยู่แล้ว โดยยังคงรูปแบบการใช้งานให้สามารถปรับลดเพิ่มระดับเสียงด้วยสวิตช์เลือก (Selector switch) SW1b แทนการใช้วอลลุ่มแบบปรับค่าได้ เพื่อให้มีความทนทานต่อการใช้งานทั้งในและนอกถ้าได้มากขึ้น ส่วนฟังก์ชันการใช้งานในโหมดต่างๆ โดยผ่าน SW2b ยังคงรักษาคุณลักษณะของเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone ต้นแบบของ BCRA ประเทศอังกฤษไว้อย่างครบถ้วน



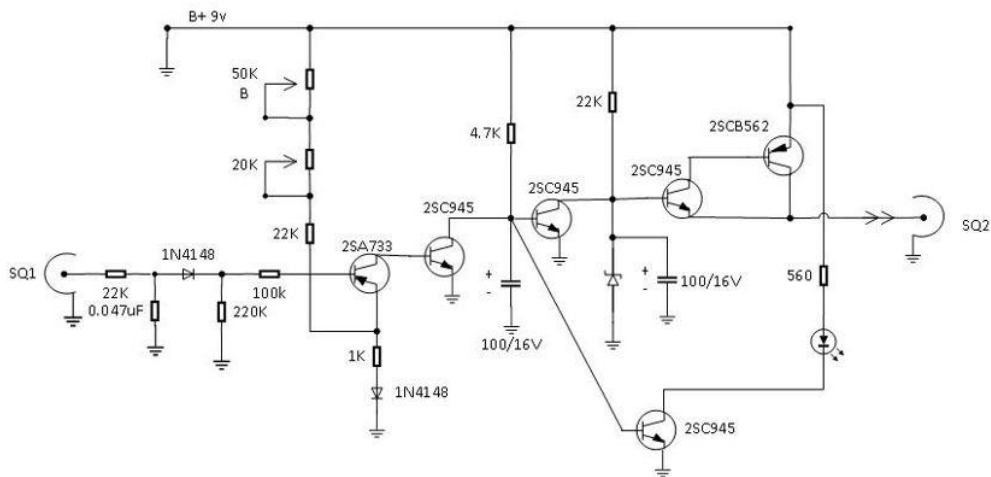
รูปที่ 49 วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz แบบสัญญาณรบกวนต่ำ อัตราขยาย 30 dB

วงจร Low-noise amplifier หรือวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำสำหรับความถี่ 350 kHz ตามรูปที่ 49 ยังใช้วงจรเดิมของวิทยุต้นแบบรุ่นที่ 1 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 รับสัญญาณจากสายอากาศเข้ามาเพื่อส่งต่อให้กับ Q1, Q2 โดยที่เอาต์พุตของ Q2 ถูกควบคุมความถี่ 350 kHz ด้วยวงจรกรองแถบแคบ L2, C6 ที่ความถี่กลางเดียวกัน ก่อนส่งต่อไปขยายกำลังให้มีระดับ 30 dB ด้วยไอซีออปแอมป์เบอร์ OP37 (ควบคุมอัตราขยายด้วย R7) โดยมีไอซีออปแอมป์เบอร์ 741 ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบกระแสกลับ 4.5 โวลต์ให้กับไอซีเบอร์ OP37 ให้ทำงานตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 50 วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz แบบสัญญาณรบกวนต่ำ อัตราขยาย 20 dB

จากรูปที่ 50 เป็นวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุแบบสัญญาณรบกวนต่ำ ที่ได้ออกแบบเพิ่มขึ้นสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรภาครับแบบ Superheterodyne ที่ความถี่ 350 kHz วงจรนี้ให้อัตราขยาย 20 dB จะถูกเลือกใช้งานเมื่อระดับของสัญญาณมีค่าต่ำกว่า -80 dBm โดยใช้สวิตช์ต่อวงจรนี้ให้อนุกรมกับวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุอัตราขยาย 30 dB ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 49 วงจรนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลักๆ คือ วงจรกรองแบบแท่งคู่ T1 และ T2 (TOKO 10K) ทำหน้าที่รับสัญญาณความถี่ 350 kHz ที่มีกำลังต่ำมากๆ และกรองสัญญาณรบกวนระดับสูงๆ ออกไป ก่อนส่งให้กับทรานซิสเตอร์ Q1 ชนิด UJT เบอร์ BF245 และทรานซิสเตอร์ Q2 เบอร์ BC548 ขยายสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 350 kHz ด้วยอัตราขยาย 20 dB เพื่อส่งต่อไปให้วงจรภาคขยายสัญญาณความถี่วิทยุที่มีอัตราขยาย 30 dB ต่อไป



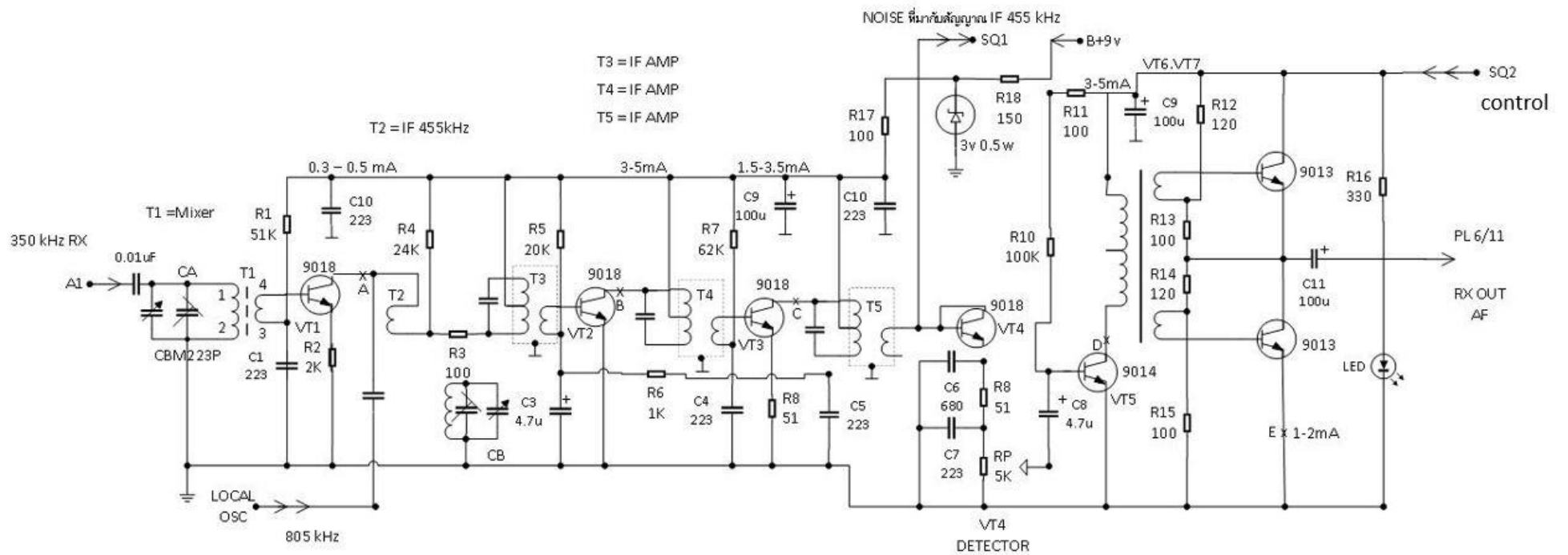
รูปที่ 51 วงจรสquelch (Squelch) สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรขยายเสียงในวงจรภาครับ

วงจรสquelch (Squelch) เป็นอีกวงจรหนึ่งที่ได้พัฒนาและออกแบบเพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อใช้แก้ไขปัญหาในกรณีที่สัญญาณแบบ SSB ความถี่ 350 kHz ที่รับเข้ามามีระดับสัญญาณต่ำมากและมีสัญญาณรบกวน (Noise) ปะปนเข้ามาจำนวนมาก จะทำให้วงจรขยายเสียงแบบ Complementary push-pull amplifier ที่อยู่ในวงจรภาครับ Superheterodyne ตามรูปที่ 52 ทำการขยายเสียงของสัญญาณรบกวนดังกล่าวโดยไม่จำเป็นและอาจรบกวนต่อการเฝ้าฟัง (Monitoring) ดังนั้นจึงได้ออกแบบวงจรสquelch สำหรับการควบคุมเสียง

ที่เกิดจากสัญญาณรบกวนดังกล่าว เพื่อควบคุมไม่ให้วงจรขยายเสียงดังกล่าวทำงานในเงื่อนไขนี้ส่งผลให้เสียงดังกล่าวถูกทำให้เงียบ (Mute) ลงได้ด้วยการหยุดการจ่ายแรงดันไฟฟ้า +9 โวลต์ให้กับวงจรขยายเสียง ซึ่งวงจรถูกกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 51

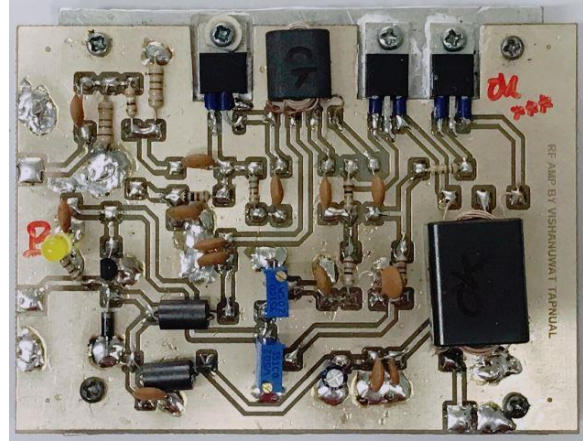
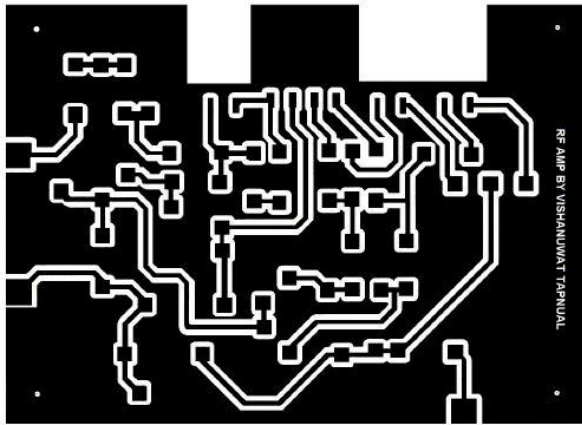
หลักการการทำงานของวงจรสแควลซ์ตามรูปที่ 51 เริ่มต้นจากสัญญาณที่จ่ายให้กับอินพุต SQ1 ของวงจรนี้จะมาจากสัญญาณเสียงที่ถูกมอดูเลตมากับสัญญาณความถี่ IF 455 kHz ที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรแทงค์ T5 สัญญาณที่มีระดับต่ำและมีสัญญาณรบกวนปะปนมาด้วยจะถูกขยายให้มีระดับสูงขึ้นด้วยวงจรทรานซิสเตอร์ 2SA733 และ 2SC945 สองตัว การออกแบบวงจรขยายหลายลำดับในลักษณะของวงจรขยายบัฟเฟอร์ (Buffer amplifier) นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้เกิดการดึงกำลังของสัญญาณ IF มาจากวงจรแทงค์ T5 มากเกินไป เนื่องจากสัญญาณ IF ต้องมีระดับของสัญญาณที่ส่งต่อให้กับวงจรดีเทคเตอร์สูงอย่างเพียงพอ ในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีค่าสูงถึงระดับที่ถูกกำหนดไว้ด้วย VR20K จะทำให้สัญญาณดังกล่าวไปกระตุ้นทรานซิสเตอร์ 2SC945 ที่ต่อร่วมกับ 2SB562 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน +9 โวลต์ไปที่เอาต์พุต SQ2 ซึ่งจ่ายให้กับวงจรขยายเสียงแบบ Complementary push-pull ที่อยู่เป็นภาคสุดท้ายของวงจรภาครับแบบ Superheterodyne ในรูปที่ 52 โดยมี VR50K ทำหน้าที่ควบคุมวงจรสแควลซ์โดยผู้ใช้งานซึ่งติดตั้งบนหน้าปัดของเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz ต้นแบบรุ่นที่ 2

สุดท้ายเป็นวงจรภาครับที่ออกแบบให้ทำงานในระบบ Superheterodyne แบบ SSB ความถี่ 350 kHz ดังแสดงในรูปที่ 52 วงจรนี้ได้ออกแบบให้มีค่าความไวในการรับสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ -50 dBm ดังนั้นเมื่อถูกนำไปใช้งานร่วมกับวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำในรูปที่ 49 ซึ่งมีอัตราขยาย 30 dB จะทำให้เครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz ที่ได้รับการพัฒนาและออกแบบใหม่เป็นรุ่นที่ 2 เมื่อทำงานร่วมกับวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุภาคแรก (อัตราขยาย 30 dB) ในรูปที่ 49 ก่อนส่งให้วงจรภาครับแบบ Superheterodyne ตามรูปที่ 52 จะทำให้วงจรรวมของภาครับมีค่าความไวในการรับสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ -80 dBm และหากนำวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำในรูปที่ 50 ซึ่งมีอัตราขยาย 20 dB มาต่อรวมอีกชุดหนึ่ง จะทำให้วงจรรวมของภาครับมีค่าความไวรวมในการรับสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ -100 dBm สัญญาณวิทยุที่ผ่านวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุสัญญาณรบกวนต่ำแล้วจะถูกส่งมายังอินพุตของวงจรภาครับระบบ Superheterodyne นี้โดยผ่านคาปาซิเตอร์ 0.01 ไมโครฟาราดเข้าไปผสมกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์คงตัว (Local oscillator) ความถี่ 805 kHz โดยผ่านวงจรแทงค์ T1 และทรานซิสเตอร์เบอร์ 9018 เพื่อให้ได้ความถี่ IF (Intermediate frequency) เท่ากับ 455 kHz แล้วส่งไปขยายกำลังโดยวงจรแทงค์ T3, T4, T5 ซึ่งทำงานร่วมกับทรานซิสเตอร์ 9018 อีกสามลำดับ หลังจากนั้นจะถูกแยกสัญญาณเสียงออกจากความถี่ IF 455 kHz โดยวงจรดีเทคเตอร์ (Detector) VT4 ซึ่งตัดแปลงทรานซิสเตอร์ 9018 ให้ทำหน้าที่เป็นไดโอดดีเทคเตอร์ มาถึงจุดนี้ที่ซีอาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ 9018 จะมีเฉพาะสัญญาณเสียงออกมาเท่านั้น เพื่อส่งให้กับวงจรขยายเสียงที่ออกแบบให้ทำงานแบบ Complementary push-pull ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ VT4 เบอร์ 9014 ทรานฟอเมอร์ T6 ทรานซิสเตอร์เบอร์ 9013 สองตัว และอุปกรณ์อื่นๆ สำหรับจัดแรงดันไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แต่ละตัว ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายจะเป็นสัญญาณเสียงที่มีระดับตามที่ต้องการส่งผ่านคาปาซิเตอร์ C11 ส่งไปยังวงจร วงจรขยายสัญญาณเสียงก่อนส่งออกลำโพงปรับระดับความดังของเสียงได้ 6 ระดับ ที่ได้อธิบายไปแล้วตามรูปที่ 47

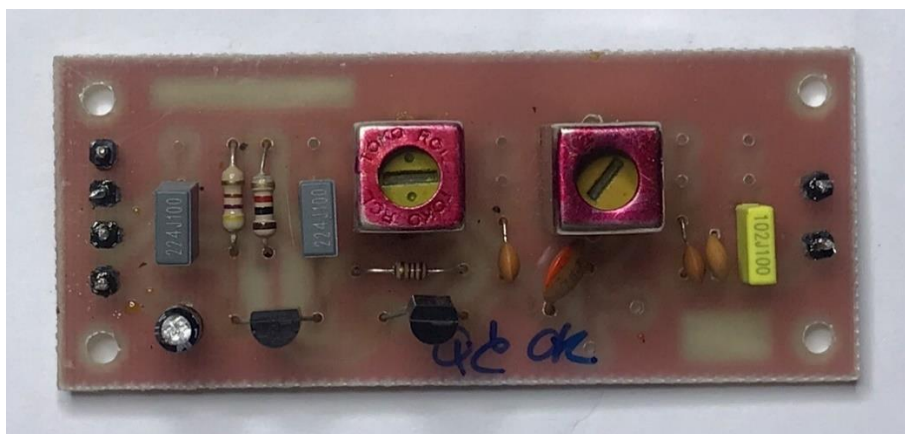
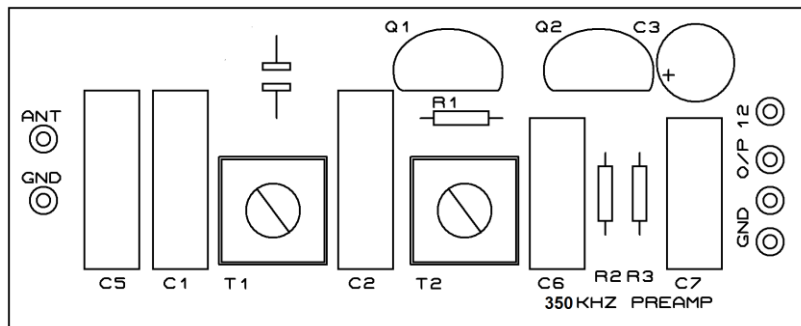


รูปที่ 52 วงจรภาครับระบบ Superheterodyne แบบ SSB ความถี่ 350 kHz ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบรุ่นที่ 2

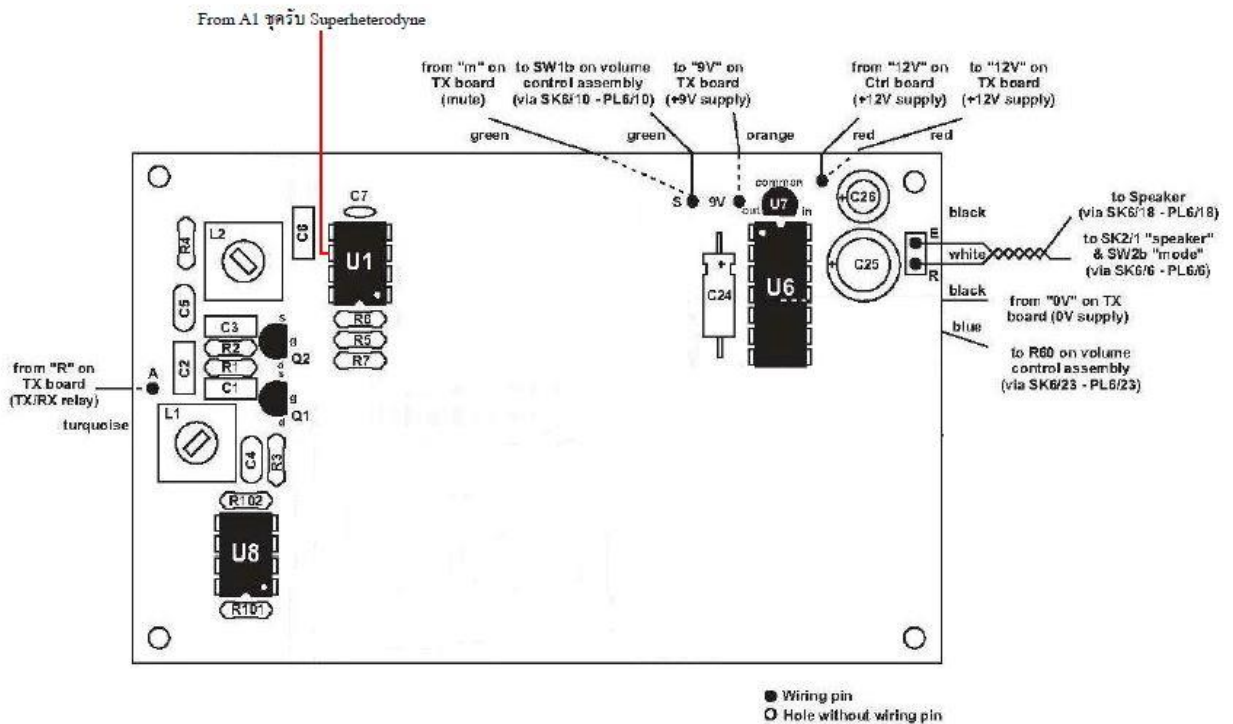
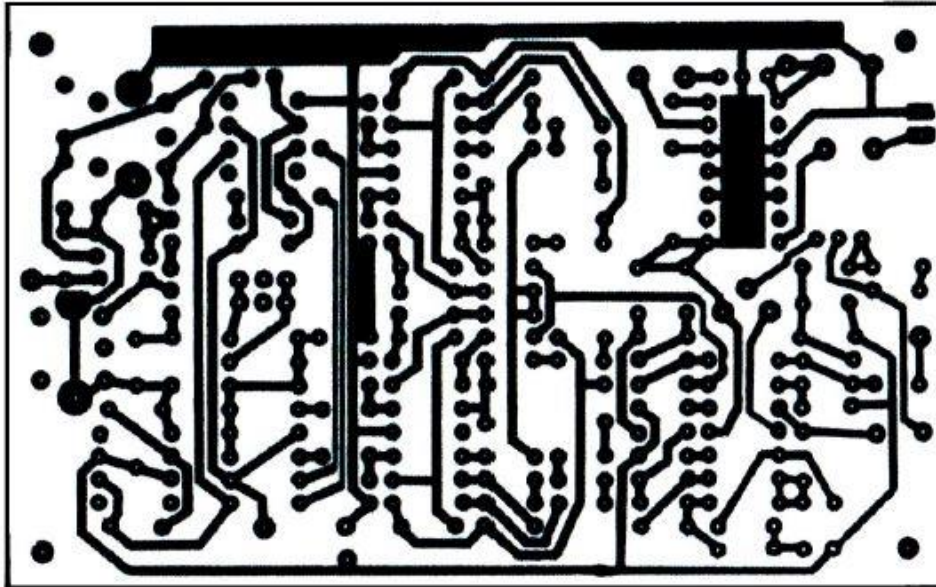
ในการสร้างวงจรภาครับและภาคส่งต้นแบบเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz ที่ได้พัฒนาขึ้นมาเป็นรุ่นที่ 2 นั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดของวงจรแต่ละส่วนได้ถูกประกอบลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ตามรูปที่ 53-57 หมายเหตุ สำหรับวงจรแมตซ์ชิงบาลันได้ห้มี้อแปลงทรานฟอร์มเมอร์ที่ได้ออกแบบและพันขดลวดขึ้นมาเอง ใช้วิธีติดตั้งลงในกล่องโดยตรงจึงไม่มีแผ่นวงจรพิมพ์



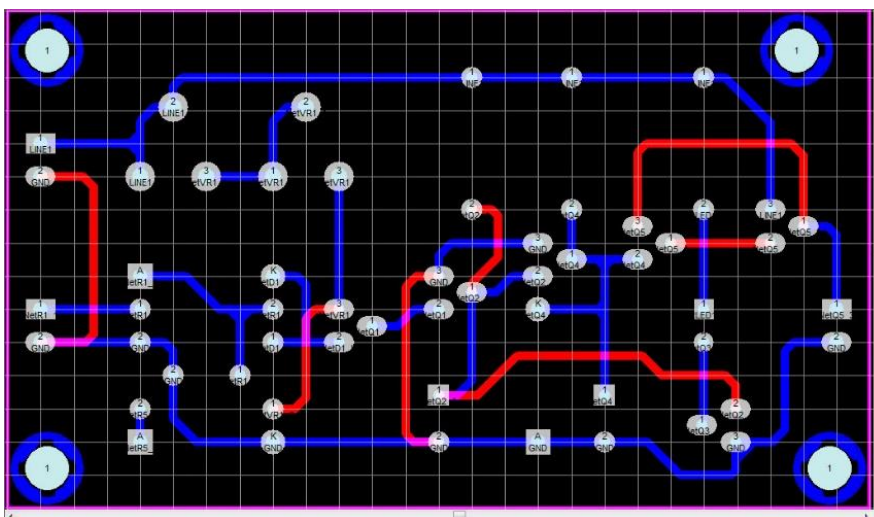
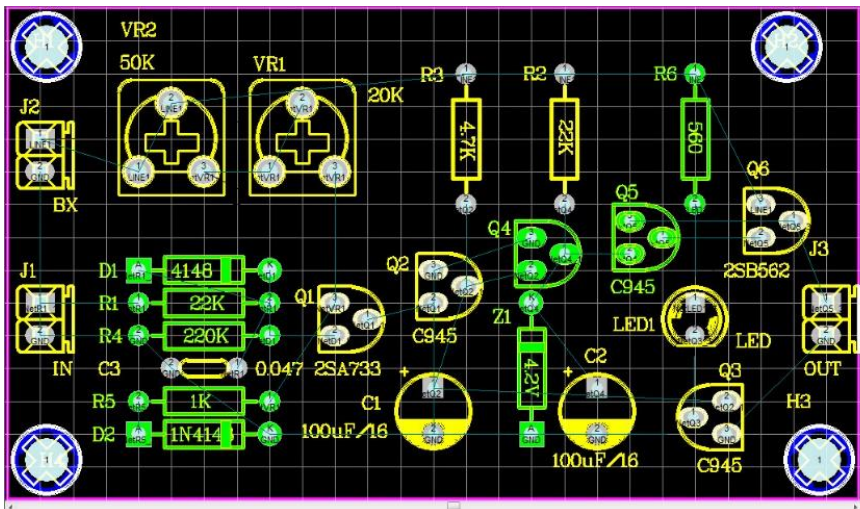
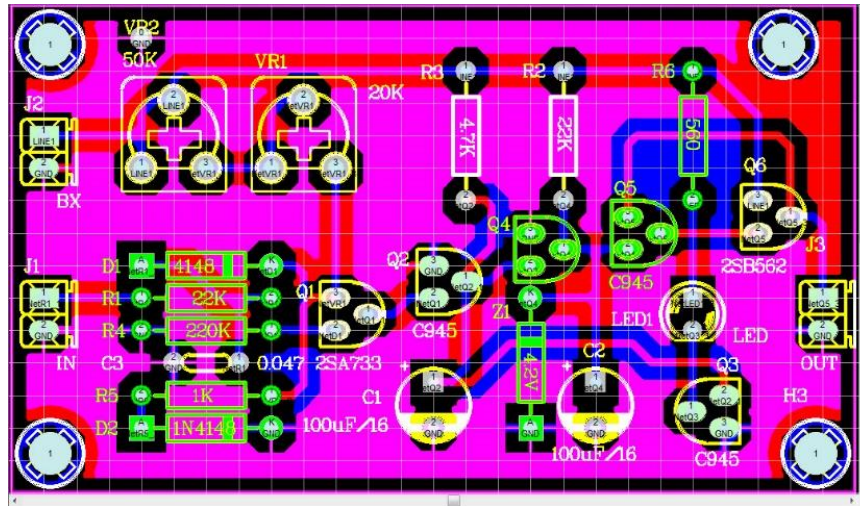
รูปที่ 53 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ 350 kHz ขนาดกำลังส่ง 5/15 วัตต์ (บน) และอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์ (ล่าง)



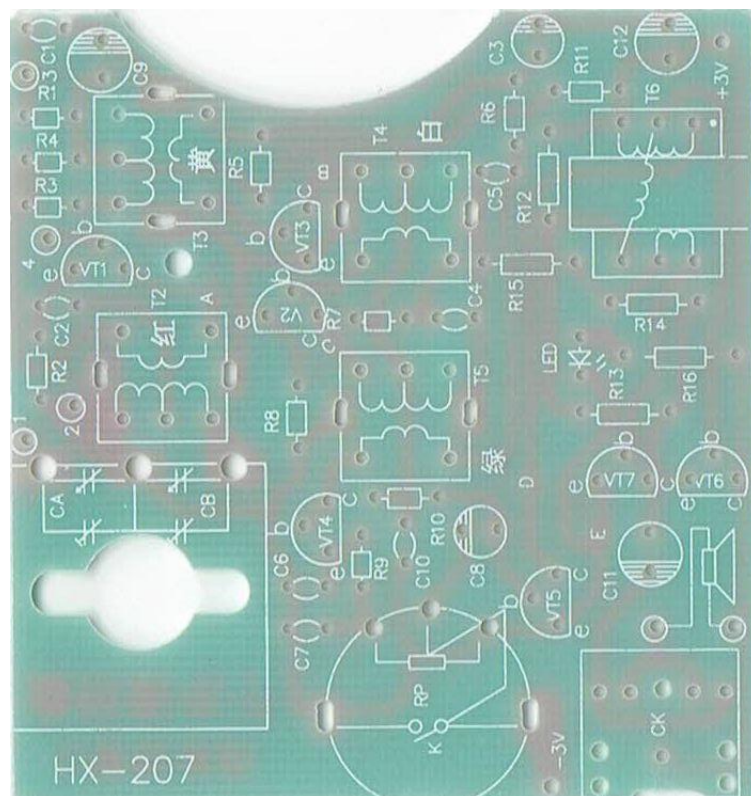
รูปที่ 54 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ 350 kHz แบบสัญญาณรบกวนต่ำ อัตราขยาย 20 dB



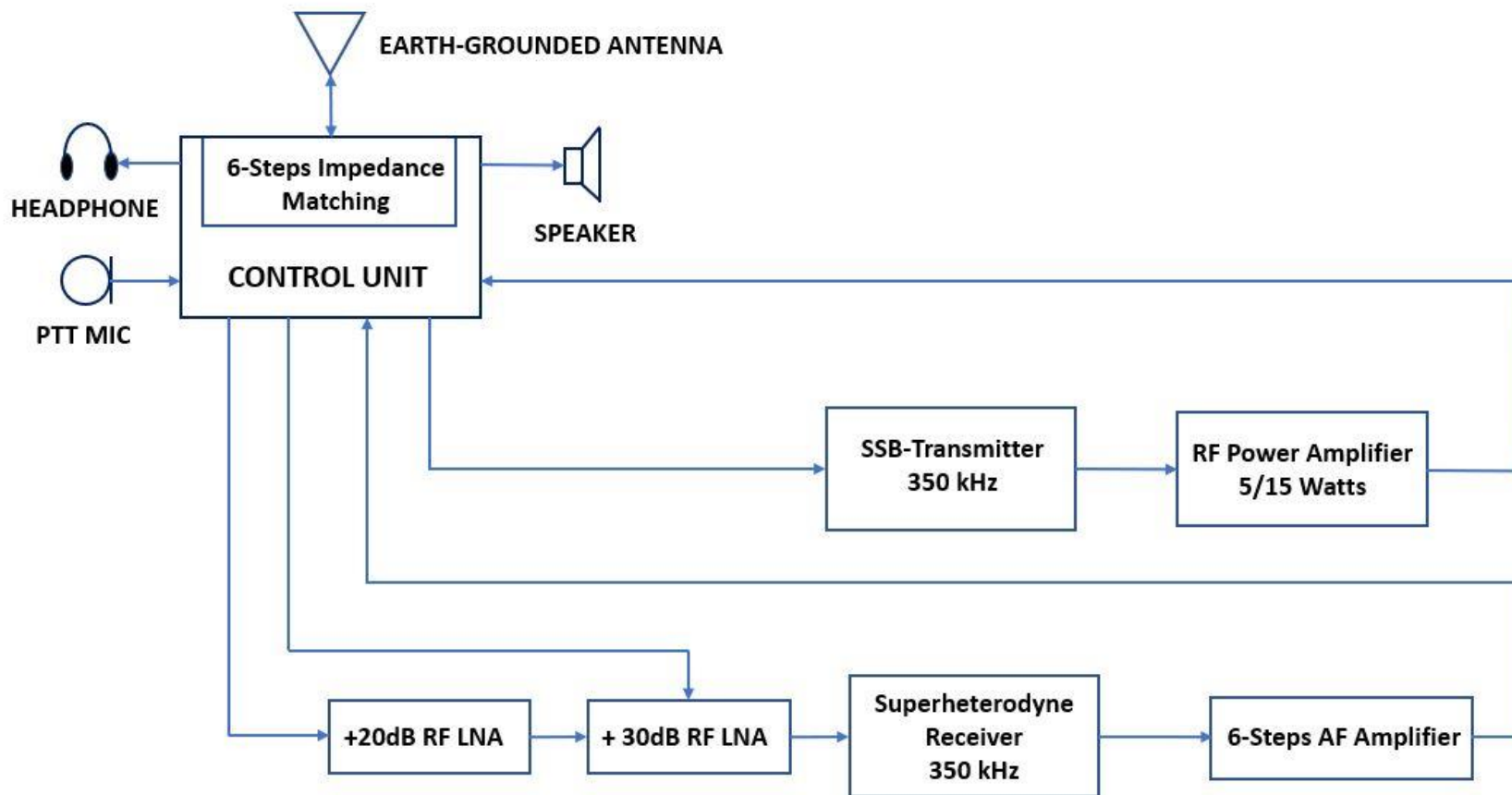
รูปที่ 55 แผ่นวงจรพิมพ์สำหรับวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ 350 kHz อัตราขยาย 30 dB และวงจรขยายสัญญาณเสียงก่อนส่งออกลำโพง (หมายเหตุ ใช้แผ่น PCB เดิมของวงจรภาครับของเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1)



รูปที่ 56 แผงวงจรพิมพ์ (สองหน้า) สำหรับวงจรสแควลซ์ของวงจรภาครับแบบ Superheterodyne



รูปที่ 57 แผงวงจรพิมพ์วงจรภาครับแบบ Superheterodyne ระบบ SSB-TTE-350 kHz



รูปที่ 58 ไดอะแกรมวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2

จากวงจรทั้งภาคเครื่องส่งและเครื่องรับที่ได้พัฒนาและปรับปรุงใหม่เมื่อนำมาต่อร่วมกับวงจรภาคส่งหลักแบบ SSB-TTE-350 kHz ซึ่งยังใช้วงจรชุดเดิมที่ได้พัฒนามาจากเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz ตามที่ได้อธิบายไปแล้ว สามารถแสดงเป็นไดอะแกรมภาพรวมทั้งหมดตามรูปที่ 58 โดยส่วนของวงจร SSB-Transmitter 350 kHz เป็นวงจรภาคเครื่องส่งหลักแบบ SSB ชุดเดิมของเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบรุ่นที่ 1 ซึ่งยังคงใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ได้เพิ่มในส่วนของวงจร RF Power Amplifier โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบ FET เบอร์ RD15HVF1 จำนวน 3 ตัว มาสร้างเป็นวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุที่ความถี่ 350 kHz โดยตรง (ทดแทนวงจรไอซี TDA2003 ซึ่งเครื่องวิทยุสื่อสาร HeyPhone 87 kHz นำมาใช้ขยายกำลังภาคสุดท้าย) และออกแบบให้สามารถเลือกใช้ค่ากำลังส่งที่เอาต์พุต 5 วัตต์และ 10 วัตต์ได้ สำหรับวงจรภาครับของเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบรุ่นที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาขึ้นมาใหม่ทั้งหมดตั้งแต่ส่วนของวงจร Superheterodyne Receiver 350 kHz ซึ่งมีความไวในการรับสัญญาณค่าต่ำสุดที่ -50 dBm และได้เพิ่มวงจร +30dBm RF LNA และ +20dBm RF LNA ก่อนเชื่อมต่อให้กับวงจร Superheterodyne Receiver ซึ่งจะช่วยให้วงจรภาครับชุดใหม่มีความไวในการรับสัญญาณค่าต่ำสุดที่ -100 dBm ได้ อย่างไรก็ตามหากระดับของสัญญาณที่ต้องการรับมีค่าสูงกว่า -80 dBm ผู้ใช้งานสามารถเลือกค่าความไวในการรับสัญญาณที่ -80 dBm ได้ ด้วยการปิดการทำงานของวงจร +20dB RF LNA ผ่านทางวงจร CONTROL UNIT

(หมายเหตุ ส่วนของวงจร +30dBm RF LNA และวงจร 6-Steps AF Amplifier ได้ใช้วงจรชุดเดิมของเครื่องวิทยุสื่อสารรุ่นที่ 1)

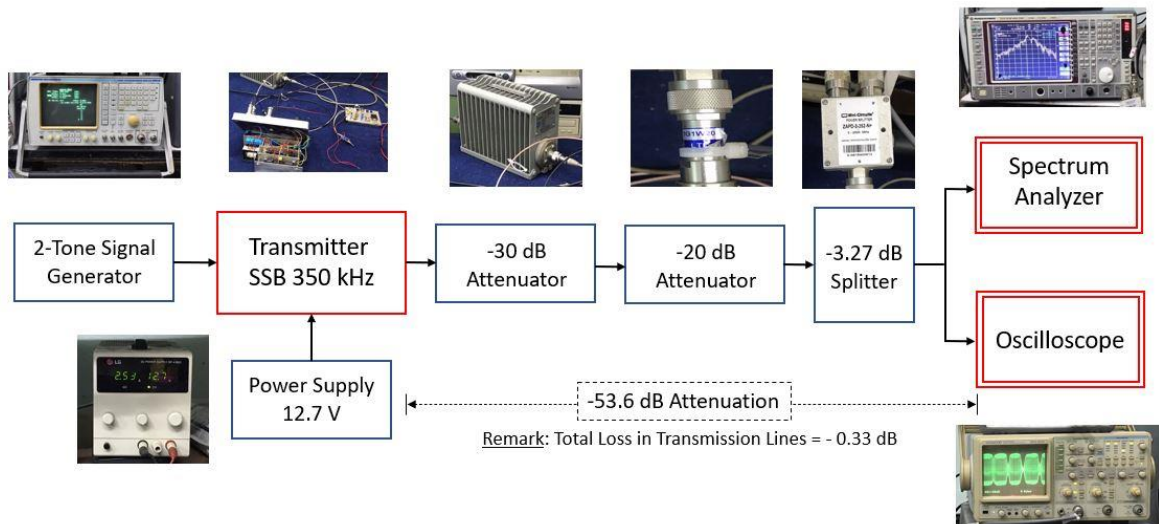
ส่วนของวงจร CONTROL UNIT คณะผู้วิจัยได้ใช้วงจรต้นแบบชุดเดิมของวิทยุสื่อสาร HeyPhone ทั้งหมด เนื่องจากต้องการคงไว้ซึ่งฟังก์ชันทั้งหมดที่มีประโยชน์ต่อการใช้งานที่ทาง HeyPhone ได้ออกแบบเอาไว้ และจากประสบการณ์ใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1 ที่ได้พัฒนาขึ้นมาพบว่าส่วนของวงจรมีประสิทธิภาพการใช้น้ำไฟที่ต่ำในระดับที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยได้พัฒนาและออกแบบเพิ่มในส่วนของวงจร 6-Steps Impedance Matching สำหรับปรับแต่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกในขณะที่ถูกฝังลงดินในสภาพแวดล้อมของชั้นดินที่ต่างชนิดกัน รวมถึงในกรณีที่ฤดูกาลแตกต่างกันด้วย เนื่องจากสภาพความแห้งและความเปียกชื้นของชั้นดิน/ชั้นดินมีผลต่อค่าความต้านทานซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างมาก ส่งผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณที่ใช้รับส่งในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นหากเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบของโครงการวิจัยนี้สามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกให้มีค่าไม่แตกต่างกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เอาต์พุตของวงจรเครื่องส่งภาคสุดท้ายมากนัก จะส่งผลให้ค่ากำลังของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 350 kHz สามารถส่งผ่านพื้นโลกได้มากที่สุดในแต่ละสถานการณ์และสภาพแวดล้อมได้

หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของแต่ละวงจรลงแผ่นวงจรพิมพ์ PCB เรียบร้อยแล้ว ได้ทำการวัดทดสอบด้วยเครื่องมือวัดระดับสูงในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะประกอบลงในกล่องสำเร็จรูป โดยแบ่งการวัดทดสอบแยกออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนของวงจรภาคเครื่องส่งและส่วนของวงจรภาคเครื่องรับดังต่อไปนี้

6.3 การวัดทดสอบการทำงานของเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ในห้องปฏิบัติการ

1) การวัดทดสอบวงจรภาคส่ง

การปรับตั้งเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบวงจรภาคส่งวิทยุแบบ SSB-TTE-350 kHz ได้แสดงไว้ในรูปที่ 59 ซึ่งเครื่องมือทั้งหมดประกอบด้วย Radio Communications Test Set, Spectrum Analyzer, Oscilloscope, -20 dB Attenuator, -30 dB Attenuator, -3.27 dB 2-way Splitter และ DC Power Supply

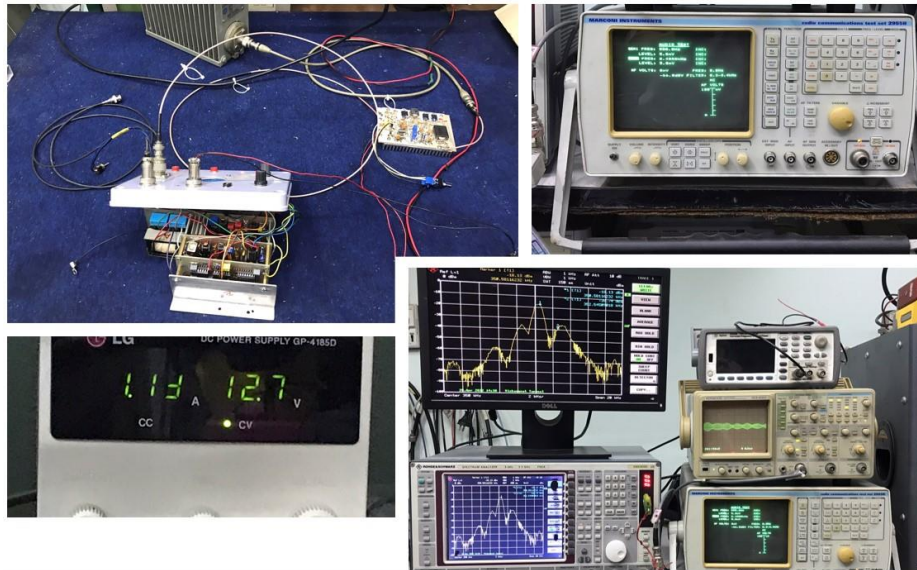


รูปที่ 59 ไดอะแกรมแสดงวิธีการวัดทดสอบการทำงานของวงจรภาคส่งของวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบ

หลักการวัดทดสอบวงจรภาคส่งของวิทยุสื่อสารที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้น จะพิจารณาค่าของกำลังส่งคลื่นความถี่วิทยุ 350 kHz ที่ส่งออกมาจากภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายของวงจรภาคส่งในขณะที่ปราศจากการผสมสัญญาณเสียง (Non-modulation) และขณะที่มีการผสมสัญญาณเสียง (Modulation) แบบ SSB เข้ากับความถี่คลื่นพาห้ 350 kHz ในขณะเดียวกันจะพิจารณาคุณลักษณะของรูปคลื่นที่เกิดจากการผสมสัญญาณเสียงในระบบ SSB ซึ่งมีพื้นฐานจากการผสมสัญญาณเชิงแอมพลิจูด (AM: Amplitude modulation) ในพารามิเตอร์ของร้อยละของการผสมสัญญาณ (Percentage of modulation) ด้วยไม่ให้เกิน 100% ด้วย เพื่อควบคุมคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ถูกส่งออกจากวงจรภาคส่งด้วย

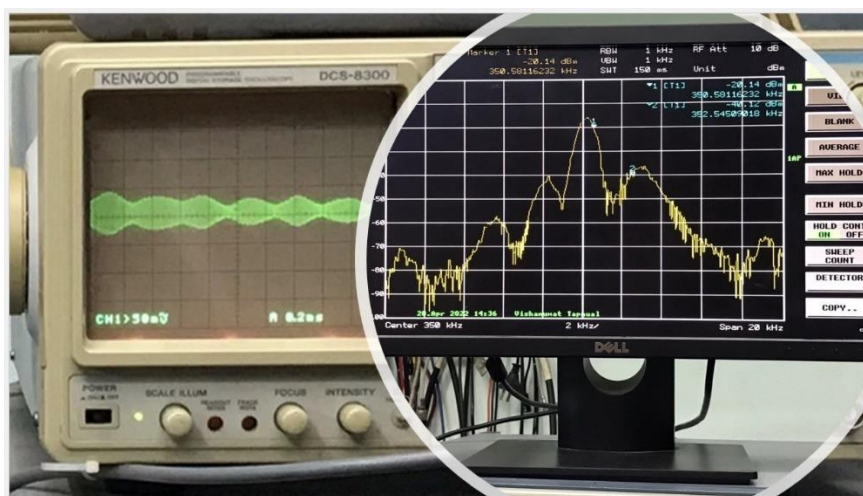
การวัดทดสอบวงจรภาคส่งตามที่กำหนดมีกระบวนการดังนี้ 1) ป้อนสัญญาณเสียงแบบสองความถี่ (Two-tone audio signal) ที่ความถี่ 500 Hz สำหรับเสียงโทนต่ำและที่ความถี่ 2.4 kHz สำหรับเสียงโทนสูง ด้วยระดับแรงดัน 5 mV จากเครื่องมือ Radio Communications Test Set ให้กับวงจรปริแอมพลิฟายสัญญาณเสียงของวงจรภาคส่งวิทยุซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าขนาด 12.7 V จาก Power Supply จ่ายให้กับวงจรดังกล่าว จากนั้นใช้ Attenuator จำนวน 2 ตัวเพื่อลดระดับกำลังของสัญญาณที่ออกจากวงจรภาคส่งให้ลดต่ำลงอีก 50 dB เพื่อไม่เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer และ Oscilloscope ซึ่งถูกต่อแยกออกมาจาก 2-way Splitter ที่มีการลดทอนอีก 3.27 dB และเมื่อรวมกับค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณและข้อต่อทั้งหมดแล้วจะมีการลดทอนทั้งสิ้นประมาณ 53.6 dB

จากนั้นเริ่มทำการวัดทดสอบค่ากำลังของวงจรรภาคส่งวิทยุในโหมดกำลังส่งสูงสุดที่ 15 วัตต์ ในขณะที่ปราศจากการมอดูเลชันสัญญาณเสียงแบบสองความถี่เข้าไป โดยการปรับตั้งเครื่องมือวัดทดสอบทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 60



รูปที่ 60 การปรับตั้งเครื่องมือวัดทดสอบเพื่อวัดค่ากำลังส่งของวงจรรภาคส่งวิทยุ SSB-TTE-350 kHz

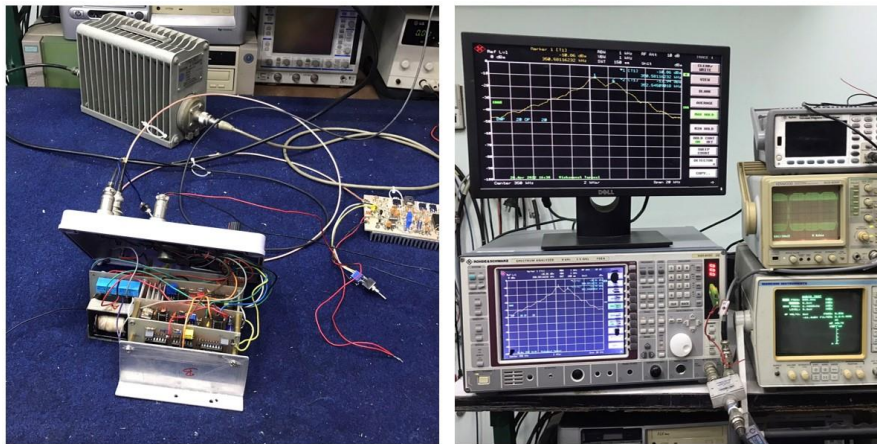
เนื่องจากการวิจัยและพัฒนาเครื่องวิทยุสื่อสารระบบแอนะล็อกแบบ SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 นั้น คณะผู้วิจัยยังคงใช้วงจรรภาคส่งรุ่นเดียวกับเครื่องวิทยุสื่อสารรุ่นที่ 1 แต่ได้มีการเพิ่มวงจรรขยายกำลังแบบเลือกปรับค่ากำลังได้ที่ 5 วัตต์ และ 15 วัตต์ จากรูปที่ 60 จึงอาจมีข้อสังเกตได้ว่ารูปทรงของกล่องบรรจุ (ภาพกลาง) เหมือนกับวิทยุสื่อสารรุ่นที่ 1 จากการวัดทดสอบตามไดอะแกรมในรูปที่ 59 โดยไม่มีการป้อนสัญญาณเสียงสองความถี่เข้าไปที่อินพุตของวงจรรภาคส่ง ผลการวัดทดสอบรูปร่างของคลื่นความถี่ที่มีการมอดูเลชันแบบ USB และค่าระดับกำลังที่วัดได้ แสดงไว้ในรูปที่ 61



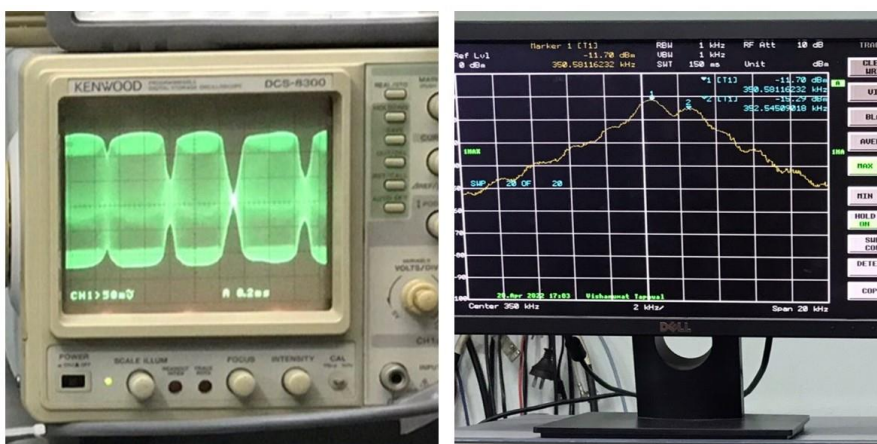
รูปที่ 61 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังส่งของวงจรรภาคส่งวิทยุ SSB-TTE-350 kHz ขณะไม่มีการมอดูเลชัน

จากรูปที่ 61 พบว่าค่าระดับของสัญญาณที่ปรากฏบนเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer ที่ความถี่ 350.58 kHz ซึ่งเป็นความถี่เริ่มต้นแถบของ USB (Upper Side Band) อยู่ที่ประมาณ -20.14 dBm และเมื่อพิจารณาจากขนาดความกว้างแถบ (Bandwidth) 2 kHz ตามมาตรฐานของการมอดูเลชันแบบ SSB ความถี่ปลายแถบของ USB จะอยู่ที่ 352.54 kHz ซึ่งมีระดับของค่ากำลังที่วัดได้อยู่ที่ -40.12 dBm เมื่อนำมาคำนวณชดเชยกับค่าการลดทอนรวมของตัวลดทอน สายนำสัญญาณและขั้วต่อประมาณ 53.6 dB จะได้ค่ากำลังส่งในขณะที่ยังไม่มี การมอดูเลชันของ USB อยู่ที่ประมาณ $-20.14 + 53.6 = 33.6$ dBm (2.09 วัตต์) และ $-40.12 + 53.6 = 13.48$ dBm (0.02 วัตต์) ในขณะที่รูปคลื่นในขณะที่ยังไม่มี การมอดูเลชันได้ปรากฏบนจอของออสซิลโลสโคปอย่างชัดเจนทางทฤษฎีแต่อาจมีสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำอื่นๆ ที่มีกำลังต่ำเข้าไปในวงจรมอดูเลชันบ้างเล็กน้อย จึงไม่แสดงผลออกมาในรูปของคลื่นพาห์ที่ปราศจากการมอดูเลชันแบบอุดมคติ

ขั้นตอนต่อไปได้ทำการวัดทดสอบค่ากำลังของภาคเครื่องส่งวิทยุในขณะที่มีการมอดูเลชันด้วยสัญญาณเสียงสองความถี่ (500 Hz และ 2.4 kHz) เข้าไปในวงจรมอดูเลชัน และปรับโหมดกำลังส่งสูงสุดอยู่ที่ 15 วัตต์ โดยยังคงใช้วิธีการปรับตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดทดสอบตามรูปที่ 59 และผลการวัดทดสอบรูปร่างของคลื่นความถี่ที่มีการมอดูเลชันแบบ USB และค่าระดับกำลังที่วัดได้ แสดงไว้ในรูปที่ 62



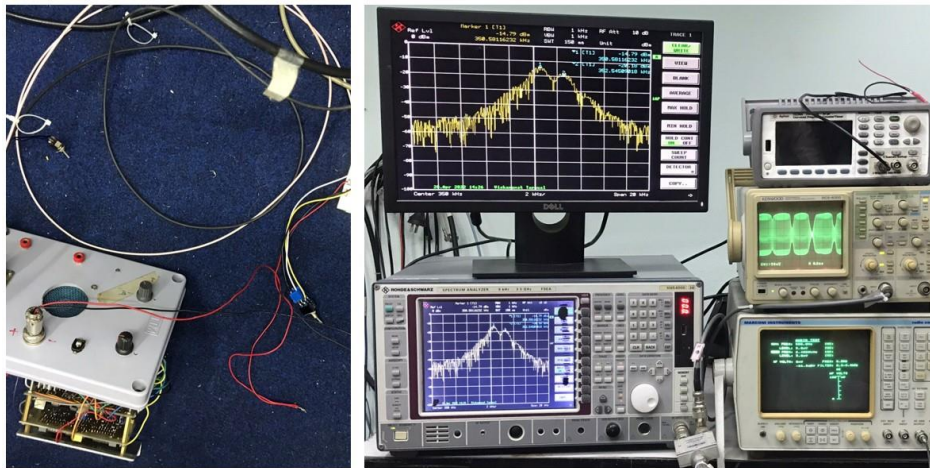
รูปที่ 62 การปรับตั้งเครื่องมือวัดทดสอบเพื่อวัดค่ากำลังส่งของวงจรภาคส่งวิทยุ SSB-TTE-350 kHz ขณะอยู่ในโหมดกำลังส่ง 15 วัตต์และมีการมอดูเลชันด้วยสัญญาณเสียงสองความถี่



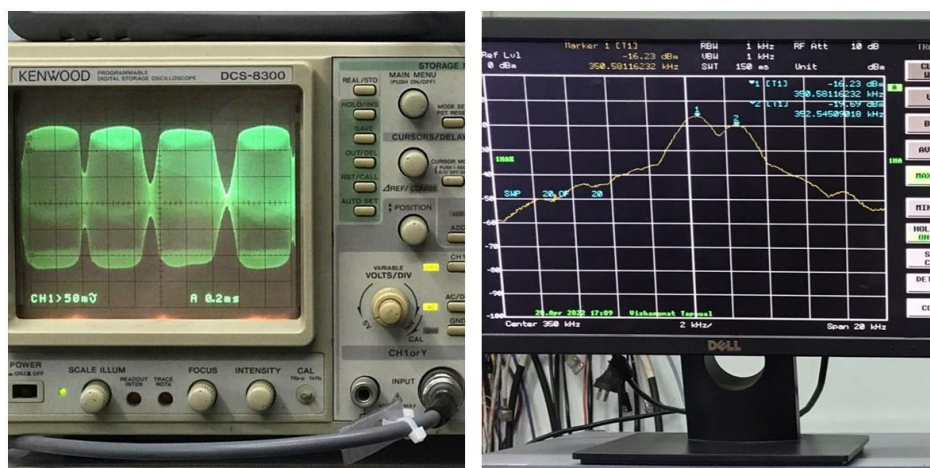
รูปที่ 63 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังส่งของวงจรภาคส่งวิทยุ SSB-TTE-350 kHz ในโหมดกำลังส่ง 15 วัตต์ ขณะมีการมอดูเลชัน

จากรูปที่ 63 พบว่าค่าระดับของสัญญาณที่ปรากฏบนเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer ที่ความถี่ต้นแถบ 350.58 kHz ของ USB อยู่ที่ประมาณ -11.7 dBm และความถี่ปลายแถบของ USB จะอยู่ที่ 352.54 kHz ซึ่งมีระดับของค่ากำลังที่วัดได้อยู่ที่ -15.29 dBm เมื่อนำมาคำนวณชดเชยกับค่าการลดทอนรวมของตัวลดทอน สายนำสัญญาณและขั้วต่อประมาณ 53.6 dB จะได้ค่ากำลังส่งในขณะที่ยังไม่มีมอดูเลชันของ USB อยู่ที่ประมาณ $-11.7 + 53.6 = 41.9$ dBm (15.49 วัตต์) และ $-15.29 + 53.6 = 38.3$ dBm (6.76 วัตต์) ในขณะที่รูปคลื่นหลังจากที่มีการมอดูเลชันด้วยความถี่เสียง 500 Hz และ 2.4 kHz ได้ปรากฏบนจอของออสซิลโลสโคปในรูปแบบของการมอดูเลชันแบบ SSB/USB อย่างชัดเจนทางทฤษฎี

ขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการวัดทดสอบค่ากำลังของภาคเครื่องส่งวิทยุในขณะที่มีการมอดูเลชันด้วยสัญญาณเสียงสองความถี่ (500 Hz และ 2.4 kHz) เข้าไปในวงจรมอดูเลชัน ขณะที่ยังจรรยาภาคส่งทำงานในโหมดกำลังส่งต่ำที่ 5 วัตต์ และยังคงใช้วิธีการปรับตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดทดสอบตามรูปที่ 59 โดยผลการวัดทดสอบรูปร่างของคลื่นความถี่ที่มีการมอดูเลชันแบบ USB และค่าระดับกำลังที่วัดได้ แสดงไว้ในรูปที่ 64



รูปที่ 64 การปรับตั้งเครื่องมือวัดทดสอบเพื่อวัดค่ากำลังส่งของวงจรรภาคส่งวิทยุ SSB-TTE-350 kHz ขณะอยู่ในโหมดกำลังส่ง 5 วัตต์และมีการมอดูเลชันด้วยสัญญาณเสียงสองความถี่



รูปที่ 65 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังส่งของวงจรรภาคส่งวิทยุ SSB-TTE-350 kHz ในโหมดกำลังส่ง 5 วัตต์ ขณะมีการมอดูเลชัน

จากรูปที่ 65 ผลการวัดค่าระดับของสัญญาณที่ปรากฏบนเครื่องมือวัด Spectrum Analyzer ที่ความถี่ต้นแถบ 350.58 kHz ของ USB อยู่ที่ประมาณ -16.23 dBm และความถี่ปลายแถบของ USB จะอยู่ที่ 352.54 kHz ซึ่งมีระดับของค่ากำลังที่วัดได้อยู่ที่ -19.69 dBm เมื่อนำมาคำนวณชดเชยกับค่าการลดทอนรวมของตัวลดทอน สายนำสัญญาณและขั้วต่อประมาณ 53.6 dB จะได้ค่ากำลังส่งในขณะที่ยังไม่มี การมอดูเลชันของ USB อยู่ที่ประมาณ $-16.23 + 53.6 = 37.37$ dBm (5.46 วัตต์) และ $-19.69 + 53.6 = 33.91$ dBm (2.46 วัตต์) โดยปรากฏรูปคลื่นหลังจากที่มีการมอดูเลชันด้วยความถี่เสียง 500 Hz และ 2.4 kHz บนจอของออสซิลโลสโคปในรูปแบบของการมอดูเลชันแบบ SSB/USB เช่นเดิม

2) การวัดทดสอบวงจรภาครับ

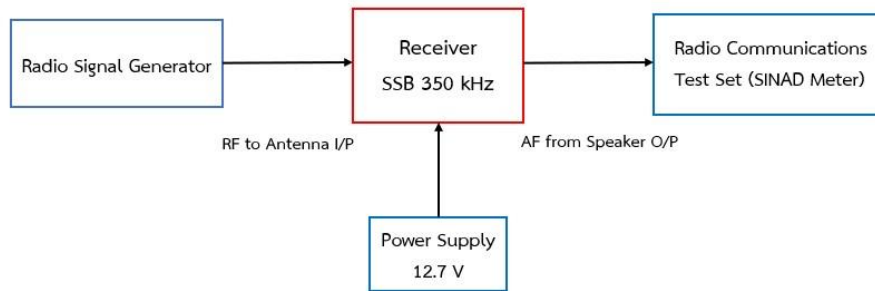
วงจรภาครับของเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาใหม่ทั้งหมด โดยวงจรภาครับแบบเดิมของวิทยุสื่อสารต้นแบบ HeyPhone 87 kHz ได้ใช้เทคนิคการดีมอดูเลตสัญญาณเสียงออกจากสัญญาณคลื่นพาห์ที่ถูกผสมกับสัญญาณเสียงแบบ SSB โดยใช้เทคนิค I-Q Demodulator ซึ่งต้องมีระดับความไวของสัญญาณอินพุตที่รับผ่านสายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกเข้ามาไม่ต่ำกว่า -50 dBm แต่จากผลการศึกษาพฤติกรรมคลื่นที่คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดยส่งคลื่นความถี่ 350 kHz แบบต่อเนื่อง (CW: Continuous Wave) จากบนภูเขาหินปูนและหินทรายผ่านลงไปตลอดระยะความยาวของโพรงถ้ำพบว่าระดับของสัญญาณที่รับได้ด้วยเครื่อง Spectrum Analyzer มีระดับต่ำกว่า -50 dBm เป็นส่วนใหญ่ และทำการทดสอบด้วยเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1 พบว่าเมื่อมีการผสมสัญญาณเสียงพูดหรือสัญญาณปีคอนเข้ากับคลื่นพาห์ 350 kHz แบบ SSB และส่งผ่านจากบนภูเขาลงไปในโพรงถ้ำปรากฏว่าสัญญาณเสียงที่รับฟังได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากระดับของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบ SSB ส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง -60 dBm ถึง -80 dBm และเกิดสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูงจนไม่สามารถรับสัญญาณจริงได้ชัดเจน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบในส่วนของวงจรภาครับเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ให้เป็นแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Superheterodyne) ซึ่งสามารถออกแบบให้มีค่าความไวในการรับสัญญาณต่ำได้ดีกว่าและประสิทธิภาพความชัดเจนของเสียงดีกว่าแบบเดิม ดังที่อธิบายไว้แล้วในข้างต้น

การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรภาครับสัญญาณแบบ SSB แบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ ความถี่ 350 kHz ได้ทำการวัดพารามิเตอร์สำคัญที่เรียกว่า SINAD (Signal to Noise and Distortion) ซึ่งเป็นการวัดประสิทธิภาพความไวของวงจรับสัญญาณที่ใช้กับเครื่องรับวิทยุและระบบการสื่อสารทางวิทยุทั่วไป และสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่ายจากสมการ

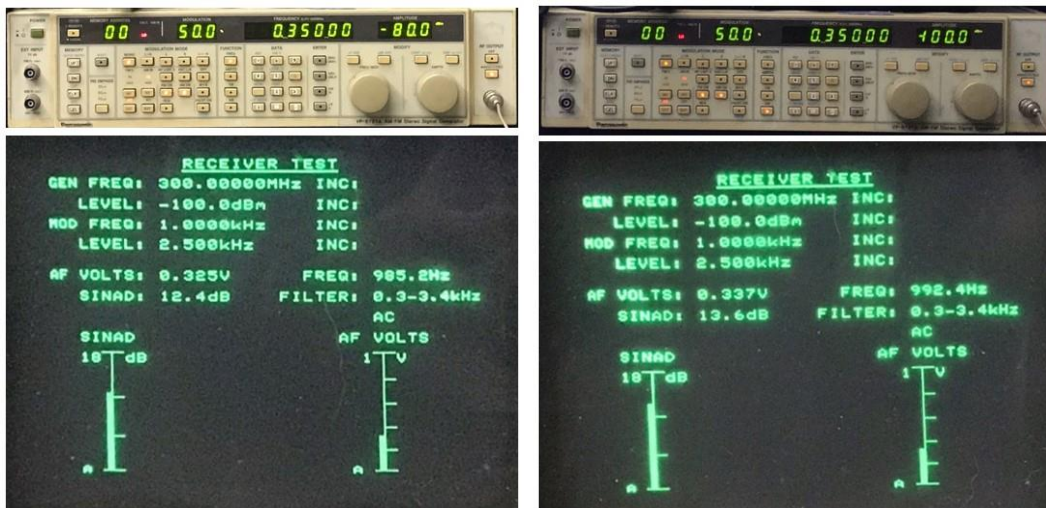
$$\text{SINAD} = \frac{P_{\text{signal}} + P_{\text{noise}} + P_{\text{distortion}}}{P_{\text{noise}} + P_{\text{distortion}}}$$

โดยที่ P_{signal} , P_{noise} และ $P_{\text{distortion}}$ คือ ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียง สัญญาณรบกวน และสัญญาณที่ผิดเพี้ยน ตามลำดับ โดยค่าของ SINAD จะแสดงในหน่วย dB และต้องมีค่ามากกว่าหนึ่งเสมอ อย่างไรก็ตามตามมาตรฐานค่า SINAD สำหรับเครื่องวิทยุสื่อสารย่าน VHF และ UHF ที่มีการมอดูเลชันแบบ FM ต้องมีค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงจะต้องมีค่าสูงกว่าค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไม่ต่ำกว่า 12 dB ที่ระดับความไวสัญญาณอินพุตต่ำสุด $0.25 \mu\text{V}$ หรือประมาณ -119 dBm อย่างไรก็ตามกรณีของเครื่องรับวิทยุที่มีการมอดูเลชันแบบ AM หรือแบบ SSB จะมีสัญญาณรบกวนสูงกว่าแบบ FM ดังนั้นค่าความไวสัญญาณอินพุตต่ำสุดจะสูงกว่า $0.25 \mu\text{V}$ เสมอ ซึ่งเครื่องรับวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ได้ถูกออกแบบให้มีค่าระดับความไวสัญญาณอินพุตต่ำสุดอยู่ที่ -80 dBm ($22.4 \mu\text{V}$) และ -100 dBm ($2.24 \mu\text{V}$)

ดังนั้นจึงได้ทำการวัดทดสอบค่า SINAD จากค่าระดับความไวสัญญาณอินพุตต่ำสุดทั้งสองค่าดังกล่าว โดยการปรับตั้งเครื่องมือวัดทดสอบสำหรับวัดค่า SINAD ของวงจรรภาครับวิทยุของโรงการวิจัย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 66 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องผลิตสัญญาณความถี่วิทยุ AM-FM Signal Generator และเครื่องมือทดสอบวิทยุสื่อสาร Radio Communications Test Set โดยใช้ฟังก์ชัน SINAD Meter เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดสอบ โดยผลการวัดทดสอบค่า SINAD ทั้งกรณีที่ค่าระดับความไวการรับสัญญาณที่ -80 dBm และ -100 dBm ได้แสดงไว้ในรูปที่ 67 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 66 ไดอะแกรมแสดงวิธีการวัดทดสอบการทำงานของวงจรรภาครับของวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบ



(ก) SINAD @ -80 dBm

(ข) SINAD @ -100 dBm

รูปที่ 67 ผลการวัดทดสอบค่า SINAD ของวงจรรภาครับของวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2

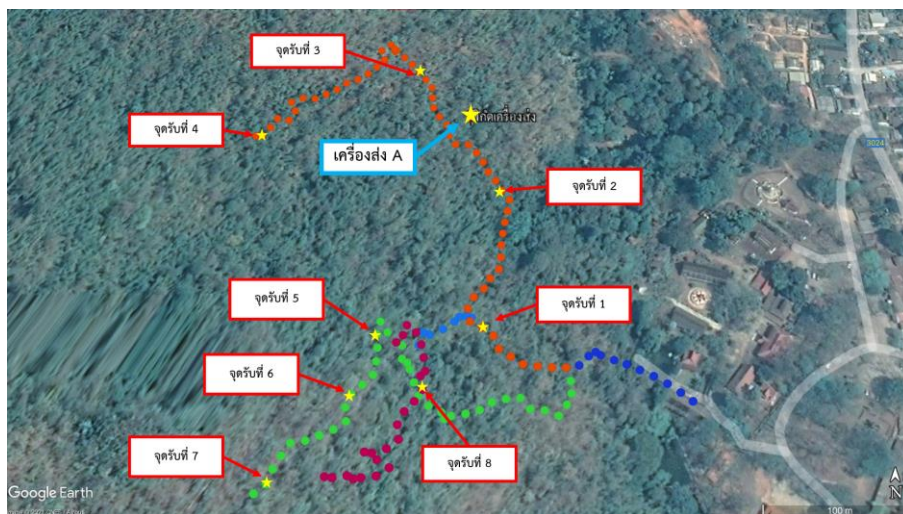
จากรูปที่ 67 เป็นผลการวัดทดสอบค่า SINAD ของวงจรรภาครับของวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 โดยใช้เครื่องมือวัด Radio Communications Test Set รุ่น 2955B ยี่ห้อ Marconi Instruments ในโหมดฟังก์ชัน SINAD Meter ซึ่งวัดค่าจากสัญญาณความถี่เสียงจากเอาต์พุตของภาค AF Amplifier ของวงจรรภาครับของวิทยุสื่อสารดังกล่าว โดยทำการป้อนสัญญาณแบบ AM/SSB จากเครื่องมือ AM-FM Stereo Signal Generator รุ่น VP-8121A ยี่ห้อ Panasonic ที่ปรับระดับแอมพลิจูดของสัญญาณไว้ที่ -80 dBm และ -100 dBm เพื่อป้อนให้กับอินพุตของวงจรรภาครับที่ขั้วต่อของสายอากาศโดยตรง จากรูปที่ 67 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าวงจรรภาครับของวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 มีค่า SINAD อยู่ที่ 12.4 dB และ 13.6

dB ด้วยค่าระดับความไวสัญญาณที่อินพุตต่ำสุดเท่ากับ -80 dBm และ -100 dBm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน SINAD ที่กำหนดให้สูงกว่า 12 dB

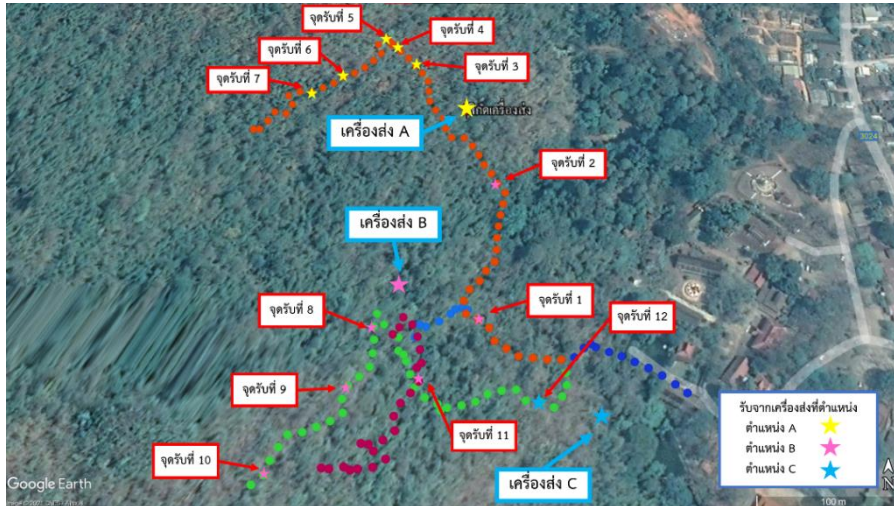
7. ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2

7.1 ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสารที่ถ้ำเชียงดาว

การวัดทดสอบการใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ TTE-SSB-350 kHz ต้นแบบรุ่นที่ 2 ได้กำหนดให้สายอากาศของเครื่องวิทยุสื่อสารถูกนำไปติดตั้งแบบประจำที่ไว้บนภูเขาที่อยู่เหนือโพรงถ้ำเชียงดาว สามตำแหน่ง (เครื่องส่ง A, B และ C) ดังแสดงในรูปที่ 69 และมีตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยใช้สายอากาศแบบส่งผ่านพื้นโลกชุดเดิมที่เคยใช้กับเครื่องวิทยุสื่อสารรุ่นที่ 1 เหตุผลของการติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุแยกออกจากกันสองตำแหน่งเนื่องจากทิศทางของแนวโพรงถ้ำในเส้นทางไปยังถ้ำน้ำและถ้ำน้ำมีลักษณะที่เกือบจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้การโพลาไรซ์ของสายอากาศหากติดตั้งเพียงตำแหน่งเดียวเหมาะสมกับเพียงแนวถ้ำเดียวและทำให้ประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสารกับแนวโพรงถ้ำอีกแนวหนึ่งลดลง ดังนั้นตำแหน่งเครื่องส่ง A จึงใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารกับแนวโพรงถ้ำน้ำเพื่อใช้ทดสอบกับเครื่องวิทยุสื่อสาร ณ จุดรับที่ 1-7 ขณะที่ตำแหน่งเครื่องส่ง B จะใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารกับแนวโพรงถ้ำน้ำเพื่อใช้ทดสอบกับเครื่องวิทยุสื่อสาร ณ จุดรับที่ 8-12 ซึ่งผลการวัดทดสอบระดับของสัญญาณเสียงในขณะที่มีการส่งสัญญาณบีคอนและคุณภาพของเสียงขณะที่มีการสนทนา ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกันอีกครั้งหนึ่งระหว่างเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 68 และ 69 โดยผลการวัดทดสอบวิทยุสื่อสารทั้งสองรุ่น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 และ 5



รูปที่ 68 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่ตั้งสายอากาศภาครับที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำและสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำเชียงดาว ขณะทดสอบวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1



รูปที่ 69 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่ตั้งสายอากาศภาครับที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำและสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำเชียงใหม่ ขณะทดสอบวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2

ตารางที่ 3 ตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 บริเวณเหนือโพรงถ้ำเชียงใหม่

ตำแหน่ง เครื่องส่ง	ตำแหน่งพิกัด		ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	
A	19.39582253	98.92682648	516
B	19.394515	98.926387	530
C	19.393684	98.927709	435

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1 ณ ถ้ำเชียงใหม่

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทาง บนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะ กระจัด (เมตร)	กำลังที่ได้รับ (dBm)	ความชัดเจน ของสัญญาณ
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)				
1	19.39425154	98.92690901	199.8	192.4	-55.3	3
2	19.395267	98.92705796	70.1	101.7	-50.2	3
3	19.39622197	98.92647328	70.3	94.9	-48.5	4
4	19.39571473	98.92523141	270.3	181.4	-85.0	2
5	19.39419989	98.92619259	267.1	202.3	-58.9	3
6	19.39380683	98.92604382	339.3	246.2	-56.8	3
7	19.3932616	98.92554738	464.6	319.3	-92.0	1
8	19.39383837	98.92651106	274.9	235.3	-73.0	2

จากตารางที่ 4 เป็นผลการวัดทดสอบการใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz รุ่นที่ 1 โดยเครื่องวิทยุที่อยู่บนภูเขาเหนือถ้ำเชียงดาวถูกติดตั้งเพียงจุดเดียวที่ตำแหน่ง A (ละติจูด 19.39582253 องศา/ลองจิจูด 98.92682648 องศา) ขณะที่เครื่องวิทยุสื่อสารอีกเครื่องหนึ่งจะทำงานในลักษณะเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 1-8 ตามตำแหน่งพิกัดตามตารางดังกล่าว จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังที่เครื่องวิทยุสื่อสารที่สามารถรับฟังสัญญาณได้อย่างชัดเจนจะต้องไม่ต่ำกว่า -58.9 dBm จากการทดสอบในครั้งนี้พบว่าจุดที่ 4 ซึ่งอยู่บริเวณปลายโพรงถ้ำน้ำสามารถวัดค่ากำลังได้ -85 dBm และมีคุณภาพของสัญญาณเสียงที่รับฟังได้อยู่ที่ระดับ 2 ในขณะที่ตำแหน่งที่ 7 ซึ่งอยู่ที่ปลายโพรงถ้ำน้ำจะมีค่าระดับกำลังอยู่ที่ -92 dBm จะรับสัญญาณเสียงพูดได้ไม่ชัดเจนแต่สัญญาณบีคอนจะมีความชัดเจนสูงกว่า และพบว่าบริเวณทางเดินในโพรงถ้ำที่มีการเดินสายไฟฟ้าแสงสว่าง (จุด 2 และ 3) จะมีระดับของสัญญาณรบกวนในลักษณะของ Noise floor ที่เกิดจากหลอดไฟ LED ที่ใช้ส่องสว่างให้นักท่องเที่ยวมีระดับที่สูงถึง -60 dBm ทำให้สัญญาณเสียงที่รับส่งระหว่างกันขาดความชัดเจนเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ณ ถ้ำเชียงดาว (แนวโพรงถ้ำน้ำ)

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทางบนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะกระจัด (เมตร)	กำลังที่รับได้ (dBm)	ความชัดเจนของสัญญาณ
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)				
1	19.39425154	98.92690901	195.6	112.6	-46.0	4
2	19.39526700	98.92705796	315.3	142.3	-63.0	3
3	19.39622197	98.92647328	70.3	94.9	-55.1	4
4	19.3964286	98.9262944	100.2	114.3	-70.6	3
5	19.39655016	98.92618101	120.3	128.2	-76.3	3
6	19.39618744	98.92584454	180.4	131.8	-70.8	3
7	19.3960437	98.92560684	210.3	148.2	-76.7	3
8	19.39419989	98.92619259	47.0	86.6	-37.8	5
9	19.39380683	98.92604382	97.1	113.7	-40.5	5
10	19.3932616	98.92554738	187.2	177.8	-55.2	4
11	19.39383837	98.92651106	65.1	116.8	-74.9	3
12	19.39371011	98.92731176	20.2	43.7	-40.8	4

หมายเหตุ ระดับความชัดเจนของสัญญาณ

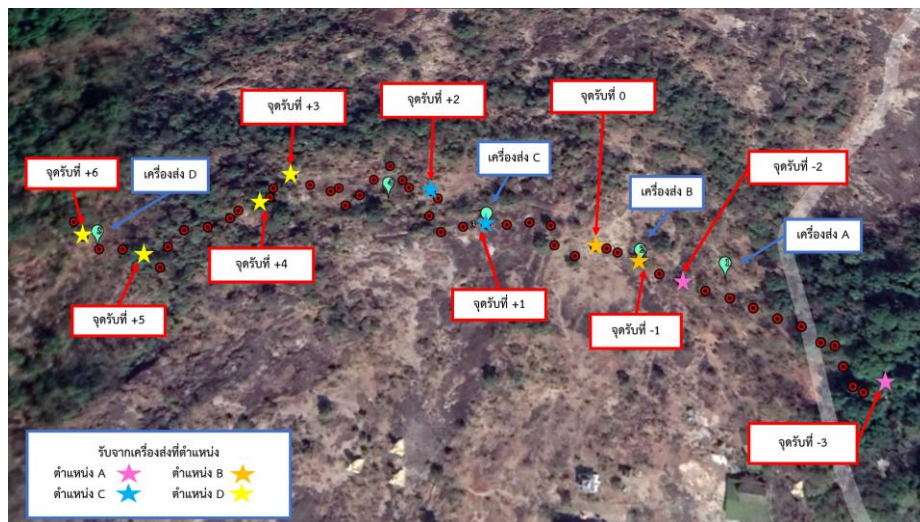
- 1 หมายถึง จับใจความไม่ได้, 2 หมายถึง ไม่ชัดเจน แต่พอฟังได้, 3 หมายถึง ชัดเจนพอใช้
4 หมายถึง ชัดเจนดี, 5 หมายถึง ชัดเจนดีมาก

ผลจากการออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ให้สามารถปรับกำลังส่งสูงขึ้นและปรับค่าระดับความไวการรับสัญญาณได้ดีขึ้น รวมทั้งปรับการโพลาริซของสายอากาศทั้งที่อยู่บนภูเขาและในโพรงถ้ำให้มีความเหมาะสมตามสภาพภูมิประเทศมากขึ้น ทำให้การวัดทดสอบในขั้นตอนนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยมากขึ้น

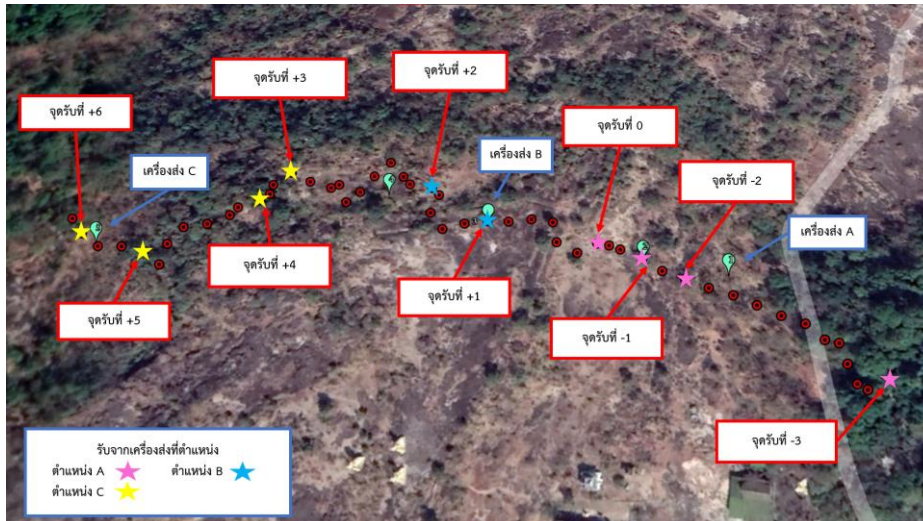
เมื่อพิจารณาจุดติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุสื่อสารที่กำหนดไว้ในรูปที่ 68 และผลการวัดทดสอบที่แสดงในตารางที่ 5 จะเห็นว่าค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้จากตำแหน่ง 1-12 ที่อยู่ในโพรงถ้ำจุดรับที่ 5 มีค่าสูงสุดประมาณ -37.8 dBm ความชัดเจนของสัญญาณเสียงระดับ 5 และที่จุดรับที่ 7 มีค่ากำลังที่รับได้ต่ำสุดประมาณ -76.7 dBm ความชัดเจนของสัญญาณเสียงระดับ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ก่อนถึงปลายถ้ำน้ำ (การวัดทดสอบเมื่อ 25 พฤษภาคม 2565 ทางเดินมีน้ำท่วมสูงไม่สามารถเข้าไปถึงปลายถ้ำน้ำได้) ขณะที่ปลายถ้ำน้ำ (จุดรับที่ 10) ค่ากำลังที่รับสัญญาณได้อยู่ที่ -55.2 dBm ความชัดเจนของสัญญาณเสียงอยู่ที่ระดับ 4 และตำแหน่งที่น่าสนใจคือ จุดรับที่ 11 ภายในโพรงถ้ำแก้ว ซึ่งถือว่าเป็นโพรงถ้ำชั้นล่างสุดและมีระดับความลึกของแนวโพรงถ้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง จากผลการวัดทดสอบพบว่าค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้อยู่ที่ -74.9 dBm และมีความชัดเจนของสัญญาณเสียงระดับ 3 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ในภาพรวมที่น่าพึงพอใจมาก

7.2 ผลการทดสอบเครื่องวิทยุสื่อสารที่ถ้ำปาฏิหาริย์

การวัดทดสอบการใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสารต้นแบบ TTE-SSB-350 kHz รุ่นที่ 2 กำหนดให้สายอากาศของเครื่องวิทยุสื่อสารถูกนำไปติดตั้งแบบประจำที่ไว้บนภูเขาที่อยู่เหนือโพรงถ้ำปาฏิหาริย์สี่ตำแหน่ง (เครื่องส่ง A, B, C และ D) ดังแสดงในรูปที่ 70 และ 71 ซึ่งตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งแสดงไว้ในตารางที่ 6 ในการวัดทดสอบครั้งนี้ได้มีการพิจารณาความสำคัญของการโพลาริไซในการติดตั้งสายอากาศเช่นเดียวกับกรณีของถ้ำเชียงดาว เพื่อให้การติดต่อสื่อสารตลอดแนวโพรงถ้ำทั้ง 10 ตำแหน่งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นแม้ว่าจะต้องพบอุปสรรคในเรื่องของธรรมชาติการก่ตัวของถ้ำหินทรายเช่นเดิมก็ตาม ซึ่งผลการวัดทดสอบระดับของสัญญาณเสียงในขณะที่มีการส่งสัญญาณบีคอนและคุณภาพของเสียงขณะที่มีการสนทนา ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกันอีกครั้งหนึ่งระหว่างเครื่องวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 70 และ 71 โดยผลการวัดทดสอบทั้งสองรุ่น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7 และ 9



รูปที่ 70 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่ตั้งสายอากาศภาครับที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำและสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ ขณะทดสอบวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1



รูปที่ 71 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่ตั้งสายอากาศภาครับที่ติดตั้งภายในทางเดินของโพรงถ้ำและสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำป่าภูหารีย์ ขณะทดสอบวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2

ตารางที่ 6 ตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1 บริเวณเหนือโพรงถ้ำป่าภูหารีย์

ตำแหน่งเครื่องส่ง	ตำแหน่งพิกัด		ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	
A	15.60136700	105.57325400	256
B	15.60161883	105.57232300	260.6
C	15.60158000	105.57075600	250

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 1 ณ ถ้ำป่าภูหารีย์

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทางบนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะกระจัด (เมตร)	กำลังที่รับได้ (dBm)	ความชัดเจนของสัญญาณ
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)				
-3	15.60088400	105.57377300	74.8	77.4	-69.0	3
-2	15.60134022	105.57308250	20.6	21.9	-72.7	2
-1	15.60143547	105.57292710	0.0	13.5	-72.3	2
0	15.60150456	105.57275510	20.2	23.4	รับไม่ได้	0
1	15.60161883	105.57232300	0.0	15.1	-60.7	4
2	15.60178058	105.57210030	44.7	33.7	-75.9	2
3	15.60187106	105.57151840	106.8	88.2	-69.5	4
4	15.60174407	105.57139880	86.8	71.6	-44.8	5
5	15.60152176	105.57095680	20.5	24.0	-74.2	2
6	15.60160848	105.57069690	10.4	8.5	-83.4	1

จากตารางที่ 7 เป็นผลการวัดทดสอบการใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz รุ่นที่ 1 โดยเครื่องวิทยุที่อยู่บนภูเขาเหนือถ้ำป่าภูหารีย์ถูกติดตั้งที่ตำแหน่ง A, B, C และ D ตามตำแหน่งพิกัดที่แสดงในตารางที่ 6 ขณะที่เครื่องวิทยุสื่อสารอีกเครื่องหนึ่งจะทำงานในลักษณะเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 70 และตามตำแหน่งพิกัดที่กำหนดไว้ในตารางที่ 7 จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังที่เครื่องวิทยุสื่อสารที่สามารถรับฟังสัญญาณได้อย่างชัดเจนที่ระดับ 2 จะต้องไม่ต่ำกว่า -75.9 dBm (เทียบจากค่ากำลังที่วัดได้ต่ำสุดจากตำแหน่งที่ 2) จากการทดสอบในครั้งนี้พบว่าจุดที่ 0 ซึ่งอยู่บริเวณประมาณกลางโพรงถ้ำ (หลังพระประธาน) ไม่สามารถวัดค่ากำลังได้เลย ซึ่งทีมวิจัยซึ่งเป็นนักธรณีวิทยาสันนิษฐานว่าเพดานถ้ำบริเวณนั้นอาจเกิดจากการซ้อนทับของแผ่นหินทรายและมีช่องว่างเป็นอากาศหรือเนื้อดินที่ทำให้คลื่นความถี่ 350 kHz เกิดการลดทอนสูงมากจนไม่สามารถเหนี่ยวนำผ่านลงมาในโพรงถ้ำได้ทั้งที่ระยะกระจัดจากตำแหน่งเครื่องส่ง B และ C ไปยังจุดที่ 0 ไม่ไกลมากนัก อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าบริเวณจุดรับอื่นๆ สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ทั้งหมดและมีคุณภาพของสัญญาณเสียงที่รับฟังได้อยู่ที่ระดับ 2-4 และมีระดับความชัดเจนของเสียงอยู่ระหว่าง -44.8 dBm ถึง -83.4 dBm ในขณะตำแหน่งที่ 6 ซึ่งอยู่ที่ปลายโพรงถ้ำจะมีค่าระดับกำลังอยู่ที่ -83.4 dBm จะรับสัญญาณเสียงพูดได้ไม่ชัดเจน (ความชัดเจนระดับ 1) แต่สัญญาณบีคอนจะมีความชัดเจนสูงกว่า เช่นเดียวกับกรณีของถ้ำหินปูนที่ อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ และพบว่าบริเวณทางเดินในโพรงถ้ำที่มีการเดินสายไฟฟ้าแสงสว่าง (จุด -1 และ -2) จะมีระดับของสัญญาณรบกวนในลักษณะของ Noise floor ที่เกิดจากหลอดไฟ LED ที่ใช้ส่องสว่างให้นักท่องเที่ยวมีระดับที่สูงถึง -63 dBm ทำให้สัญญาณเสียงที่รับส่งระหว่างกันไม่คมชัดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ ที่มีค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ตั้งแต่ -69.0 dBm ขึ้นไป

ในการวัดทดสอบการใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสาร TTE-SSB-350 kHz รุ่นที่ 2 ณ ถ้ำป่าภูหารีย์อีกครั้งหนึ่งด้วยเครื่องวิทยุสื่อสารที่ได้พัฒนาปรับปรุงแล้ว พบว่าการติดตั้งเครื่องวิทยุสื่อสารบนภูเขาเหนือโพรงถ้ำ สามารถลดตำแหน่งของการติดตั้งสายอากาศและเครื่องวิทยุสื่อสารจากเดิม 4 ตำแหน่งลงเหลือเพียง 3 ตำแหน่ง ก็สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ตลอดแนวโพรงถ้ำ โดยตำแหน่งพิกัดที่มีการติดตั้งเครื่องวิทยุสื่อสารบนภูเขาได้แสดงไว้ในตารางที่ 8 และผลการวัดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ตำแหน่งพิกัดของเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 บริเวณเหนือโพรงถ้ำป่าภูหารีย์

ตำแหน่ง เครื่องส่ง	ตำแหน่งพิกัด		ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	
A	15.60136700	105.57325400	256
B	15.60161883	105.57232300	260.6
C	15.60158000	105.57075600	250

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบเครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ณ ถ้ำป่าภูหารีย์

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทาง บนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะ กระจัด (เมตร)	กำลังที่รับได้ (dBm)	ความชัดเจน ของสัญญาณ
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)				
-3	15.60088400	105.57377300	74.8	77.4	-53.6	4
-2	15.60134022	105.57308250	20.6	21.9	-51.3	4

จุดที่	ตำแหน่งพิกัด		ระยะทาง บนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะ กระจัด (เมตร)	กำลังที่รับได้ (dBm)	ความชัดเจน ของสัญญาณ
-1	15.60143547	105.57292710	51.3	37.9	-53.9	4
0	15.60150456	105.57275510	76.4	56.7	-70.7	2
1	15.60161883	105.57232300	0.0	15.1	-48.8	5
2	15.60178058	105.57210030	44.7	33.7	-45.3	5
3	15.60187106	105.57151840	106.8	88.2	-48.5	5
4	15.60174407	105.57139880	86.8	71.6	-28.0	5
5	15.60152176	105.57095680	20.5	24.0	-55.0	3
6	15.60160848	105.57069690	10.4	8.5	-60.6	3

จากรูปที่ 71 ที่ได้แสดงจุดติดตั้งสายอากาศและเครื่องส่งวิทยุสื่อสารในการทดสอบวิทยุสื่อสาร รุ่นที่ 2 ซึ่งสามารถลดตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศและเครื่องวิทยุสื่อสารที่ตำแหน่ง B (เดิม) ที่ตำแหน่งพิกัด ละติจูด 15.60143547/ลองจิจูด 105.57292710 ออกไปได้ คงเหลือเฉพาะสามจุดที่แสดงตำแหน่งไว้ในตาราง ที่ 8 และได้ทำการบันทึกผลการวัดทดสอบไว้ในตารางที่ 9 จะเห็นว่าค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ตามแนว โพรงถ้ำทั้ง 10 จุดสามารถรับส่งสัญญาณระหว่างบนภูเขาและในโพรงถ้ำได้ทั้งหมด โดยเฉพาะจุดที่ 0 จากเดิม ที่ไม่สามารถรับส่งสัญญาณได้เลย กลับมารับสัญญาณได้ด้วยค่ากำลังประมาณ -70.7 dBm ส่วนจุดอื่นๆ ที่ เหลือสามารถรับค่ากำลังสัญญาณได้ตั้งแต่ -28.0 dBm ถึง -60.6 dBm ซึ่งมีค่าสูงกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบ แบบจุดต่อจุด โดยจุดที่ 4 สามารถรับค่ากำลังของสัญญาณได้สูงสุดและที่ระดับความคมชัดของเสียงในระดับ 5 ขณะที่จุดที่ 0 รัรับค่ากำลังของสัญญาณได้ต่ำสุดและที่ระดับความคมชัดของเสียงในระดับ 2 ซึ่งพอจับ ใจความได้แต่ขาดความคมชัด ส่วนจุดอื่นๆ ที่เหลือมีความชัดเจนของเสียงในระดับ 3 ถึง 5 ซึ่งถือว่าได้ผลลัพธ์ ในภาพรวมเป็นที่น่าพึงพอใจมาก

7.3 สรุปผลการวิจัยพัฒนาเครื่องวิทยุสื่อสารแบบ TTE-SSB 350 kHz รุ่นที่ 2

จะเห็นว่าการที่เครื่องส่งวิทยุสื่อสาร SSB-TTE-350 kHz รุ่นที่ 2 ได้ถูกพัฒนาต่อยอดจากเครื่อง วิทยุสื่อสารรุ่นที่ 1 โดยการพัฒนาให้สามารถปรับกำลังส่งสูงขึ้น ปรับค่าระดับความไวการรับสัญญาณได้ดีขึ้น ปรับลดเสียงซ่าจากสัญญาณรบกวน และปรับค่าความเหมาะสมระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องวิทยุสื่อสาร และสายอากาศ (Impedance matching) รวมทั้งปรับการโพลาไรซ์ของสายอากาศทั้งที่อยู่บนภูเขาและใน โพรงถ้ำให้มีความเหมาะสมตามสภาพภูมิประเทศมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นถ้ำที่มีชั้นหินเป็นแบบหินปูนหรือหินทราย ที่อยู่ในสภาพความชื้นที่แตกต่างกันก็ตาม ทำให้การวัดทดสอบเครื่องส่งวิทยุสื่อสารระบบแอนะล็อกแบบ SSB-TTE-350 kHz ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของโครงวิจัยและสามารถนำไปใช้งานในภาคสนามได้ อย่างแท้จริง

8. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม

- [1] ร.ต.อ.สุชาติ กังวานจิตต์, “หลักการทํางานเครื่องรับส่งวิทยุและวิทยุสื่อสาร,” สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2541
- [2] น.ท. วิโรจน์ แก้วจันทร์, “ทฤษฎีเครื่องส่งวิทยุ,” ฝ่ายวิชาการ บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด, 2549.
- [3] Charles L. Hutchinson, “The ARRL Handbook for the Radio Amateur,” ARRL, 1985.
- [4] RSGB, “Radio Communication Handbook,” Egre & Spottis woode Ltd., 1983.
- [5] Jacques Huri and Christian Ebi, “Alpine Cave Radio-Earth-current at Holloch,” Journal of BCRA Cave Radio & Electronics Group, No.25, September 1996.
- [6] Mike Bedford, “Introducing a New Cave Radio for Rescue Use,” BCRA Cave Radio & Electronics Group, Journal 41, September 2000.
- [7] Mike Bedford, “Introducing the HeyPhone,” C&C Magazine, pp.15-17, Autumn/winter 2001.
- [8] Mike Bedford, “The HeyPhone to the Rescue,” RadCom Magazine, pp.16-18, January 2002.
- [9] Sudo Null Company, “As we send SMS from the cave,” <https://sudonull.com/post/1312-As-we-send-SMS-from-the-cave>, 2019.
- [10] F.P.Bosch, M. Gurk, P.-Y. Jeannin, and I. Müller, “Geophysical cave detection with a portable Very Low Frequency (VLF) radio transmitter,” EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria, May 2010.
- [11] Steve Taranovich, “Daring Thailand cave rescue: The technology behind it,” AspenCore Inc., <https://www.edn.com/daring-thailand-cave-rescue-the-technology-behind-it/>
- [12] Chris Trayner, “CRO HeyPhone Communications System Technical Reference Manual (Temporary),” Issue 3, 2002 June 23, 39 หน้า
- [13] British Cave Research Association (BCRA), “HeyPhone Cave Rescue Communication System: User Manual,” Issue 2, 2nd Published in July 2002, 22 หน้า
- [14] David J. Daniels, “Ground Penetrating Radar Edition 2,” IEE Radar Series 15, pp. 90, The Institute Electrical Engineers, London, UK, 2004.
- [15] PWJ. Glover, “Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Electrical Properties,” Elsevier B.V., pp.103, 2015.