



กสทช.
สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

รายงาน

โครงการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรม Reverse Intermodulation การออกอากาศของสถานีที่อยู่ใกล้กัน
และแนวทางการดูแลให้เกิดการกวนกันให้น้อยของสถานีวิทยุกระจายเสียง
สำหรับการทดลองประกอบกิจการกระจายเสียง

โดย

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

และ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้วิจัย

ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สัญญาเลขที่ พย.(ป)(พส) ๑๕๑/๒๕๕๖

สารบัญ

	หน้า
1. บทสรุปผู้บริหาร	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.3 คำนำ	2
2. ความถี่อินเตอร์มอดูเลชัน	3
3. การลดการเกิด RIM	5
3.1 วงจรกรองผ่านแถบ (Bandpass Filters: BPF)	5
3.2 วงจรกรองทิ้งหรือกรองตัดแถบ (Notch Filters)	6
3.3 Circulators/Isolators	6
3.4 อุปกรณ์รวมกำลังความถี่วิทยุ (RF Power Combiners)	7
4. กรอบการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบ (BPF) เพื่อใช้ในการป้องกันการเกิด RIM	9
5. แนวทางการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบ (BPF) เพื่อใช้ในการป้องกันการเกิด RIM	10
6. ผลการทดลอง	12
6.1 การหาอัตราการสูญเสีย	12
6.2 การวัดอัตรากว้าง	13
6.3 การนำไปใช้งานจริง	14
7. สรุป	17
8. คำแนะนำเพิ่มเติม	17
9. ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือวัด	18
10. อ้างอิง	22
ภาคผนวก ก โครงสร้างวงจรกรองผ่านแถบ	23

1. บทสรุปผู้บริหาร

การเกิด Reverse Intermodulation: RIM ที่เกิดจากผู้ทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง (เดิมเรียกว่า “วิทยุชุมชน”) ได้สร้างปัญหาอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรบกวนการสื่อสารระหว่างเครื่องบินกับสถานีควบคุมการบินภาคพื้นดิน สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช) ได้ตระหนักถึงปัญหานี้และต้องการหาทางแก้ไข จึงได้เกิดโครงการนี้เพื่อนำเสนอแนวทางที่สามารถนำไปใช้ได้จริง สำหรับแก้ปัญหา RIM ดังกล่าว

ด้วยจำนวนสถานีที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก และกำลังส่งที่ 500 วัตต์ ซึ่งถือว่าเป็นกำลังส่งที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นหากจำเป็นต้องมีการนำเข้าอุปกรณ์เพื่อแก้ปัญหา RIM จากต่างประเทศ ก็จะทำให้ประเทศสิ้นเปลืองเงินตราเป็นอย่างมาก อีกทั้งจะมีสถานีจำนวนหนึ่งที่มีงบประมาณไม่เพียงพอที่จะจัดหาอุปกรณ์ราคาแพงมาใช้ ก็จะทำให้การแก้ปัญหาไม่ประสบความสำเร็จ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอที่มาของปัญหา วิธีการแก้ไขที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป สุดท้ายเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ จากนั้นได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์ที่จะใช้สำหรับแก้ปัญหา ทั้งนี้ได้คำนึงถึงบริบทหลายด้านอันได้แก่ ราคา วัสดุ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ จำนวนขั้นตอนการทำ ตลอดจนมีการเทียบเคียงความสามารถของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นกับอุปกรณ์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าจะสามารถทำงานได้อย่างเป็นที่ยอมรับ

การใช้อุปกรณ์วงจรกรองผ่านแถบเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสามารถผลิตได้เอง มีราคาถูกเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ใช้งานได้ (จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่เหมาะสม) ไม่จำเป็นต้องเปิดเข้าไปในเครื่อง โดยเฉพาะหลังจากการตรวจมาตรฐานแล้ว จะมีการติดตั้งสติกเกอร์เพื่อป้องกันการดัดแปลงภายในเครื่อง โครงสร้างที่เป็นโลหะสามารถช่วยระบายความร้อนได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อมาทำอุปกรณ์กรองสัญญาณความถี่วิทยุสำหรับนำไปแก้ปัญหาทางการรบกวนทางความถี่ ทั้งนี้ได้มุ่งเน้นที่ผลงานจะต้องสามารถนำไปใช้งานได้จริง จึงได้มีการทดสอบการใช้งานในทุกๆ ด้าน มากกว่าที่นำเสนอทฤษฎีทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา หาแนวทางที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เพื่อลดปัญหาการเกิด Reverse Intermodulation: RIM ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่สถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ทำการออกอากาศในพื้นที่ใกล้เคียงกัน แล้วสร้างสัญญาณออกไปรบกวนเครือข่ายสื่อสารอื่น โดยตามมาตรฐานการแพร่แปลกปลอมต้องไม่เกิน -70 dBc สำหรับเครื่องส่งที่ออกอากาศที่ 500 วัตต์

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาที่มาของปัญหา และสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง
- 1.2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และสำรวจวิธีการแก้ปัญหาแบบต่างๆ ที่มีใช้งาน
- 1.2.3 ออกแบบ สร้าง วัดผล วงจรกรองที่เหมาะสม
- 1.2.4 ทดสอบการใช้งานกับสถานีที่ออกอากาศจริง ปรับปรุง แก้ไข
- 1.2.5 สรุป ทำรายงาน พร้อมทั้งนำเสนอแบบโครงสร้างอุปกรณ์ต่างๆ อย่างละเอียด

1.3 คำนำ

อินเตอร์มอดูเลชัน (Intermodulation: IM หรือ Intermodulation distortion: IMD) เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของระบบ ซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะอยู่ในทุกอุปกรณ์เสมอ เพียงแค่เราจะมีการใช้งานอุปกรณ์นั้นๆ ในย่านที่มันไม่เป็นเชิงเส้นหรือไม่ อุปกรณ์บางประเภทจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นมาก เช่น วงจรขยายสัญญาณ class C ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุระบบเอฟเอ็ม ซึ่งไม่ว่าเราจะใช้งานมันอย่างไร เราก็จะเจอความไม่เป็นเชิงเส้นของมันเสมอ ในขณะที่อุปกรณ์บางประเภทมีความเป็นเชิงเส้นสูง เช่น อุปกรณ์เครื่องมือวัด ซึ่งเราจะเจอความไม่เป็นเชิงเส้นของมัน ก็ต่อเมื่อเราป้อนสัญญาณแรงกว่าที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามการเกิดอินเตอร์มอดูเลชันจะเกิดจากอุปกรณ์ ไม่สามารถเกิดขึ้นในอากาศว่างได้

หลักการอินเตอร์มอดูเลชันสามารถนำไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่น ในวงจรผสมสัญญาณ (Mixer) ที่เราต้องการให้ได้ความถี่ผลต่างเพื่อป้อนให้กับภาคขยายไอเอฟ (IF amplifiers) ของเครื่องรับวิทยุแบบ Superheterodyne แต่ขณะเดียวกันมันก็สร้างปัญหามากมายในการแพร่คลื่น เช่น การกระจายเสียงในระบบเอฟเอ็ม (FM broadcast) เนื่องจากผลต่างของความถี่ที่ได้ จะล้าเข้าไปในย่านสื่อสารวิทยุการบิน ซึ่งเป็นการเกี่ยวข้องกับชีวิตและทรัพย์สินของผู้คนจำนวนมาก

อินเตอร์มอดูเลชันที่เกิดขึ้นในการกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มนั้น เกิดขึ้นจากการที่เครื่องส่งเครื่องใดเครื่องหนึ่งหรือทั้งสองเครื่อง ไปรับเอาสัญญาณที่ส่งออกมาจากอีกเครื่อง ย้อนกลับเข้าไปในเครื่องส่ง แล้ววิ่งไปจนถึงภาคขยายกำลังความถี่วิทยุ (RF power amplifier) เนื่องจากภาคขยายกำลังความถี่วิทยุก็มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่แล้ว ดังนั้นมันจึงขยายสัญญาณทั้งสอง (สัญญาณหลักที่ต้องการจะส่งและสัญญาณย้อนเข้ามา) พร้อมๆ ไปกับสร้างความถี่อินเตอร์มอดูเลชันแถมมาให้ เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Reverse Intermodulation: RIM

บทความนี้ได้นำเสนอแนวทางป้องกันการเกิด RIM โดยหาทางลดความแรงของสัญญาณที่ย้อนกลับเข้ามา ซึ่งกระทำได้โดยใช้ตัวกรองผ่านแถบ (Bandpass filter: BPF) ที่ยอมให้เฉพาะความถี่ที่เราตั้งใจส่งออกอากาศผ่านไป-มา ได้ ความถี่อื่นๆ จะถูกลดทอนลงเป็นอย่างมาก ทั้งความถี่อื่นๆ ที่ต้องการจะกลับย้อนเข้าไป และความถี่ที่เกิดมาจากอินเตอร์มอดูเลชัน (หากมี) จนเหลือความแรงของสัญญาณแปลกปลอมน้อยกว่า -70 dBc ตามมาตรฐานข้อจำกัดการแพร่แปลกปลอม

การใช้ตัวกรอง (Filter) ไม่ว่าจะเป็นกรองผ่านแถบ (BPF) หรือกรองตัดแถบ (Notch filter) จะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าการเข้าไปตัดแปลงแก๊ไขวงจรภายในเครื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันเครื่องที่ผ่านการตรวจมาตรฐานจากห้องปฏิบัติการได้มีการติดสติกเกอร์เพื่อป้องกันการปรับแต่งใดๆ เพิ่มเติม

การกรองโดยใช้ตัวกรองแบบผ่านแถบ (BPF) มีข้อได้เปรียบที่เราจะตัดทุกความถี่ที่ไม่ต้องการออกทีเดียว ดังนั้นจึงไม่ต้องกังวลว่าสถานีจะมีโอกาสสร้าง RIM อีกในอนาคต แต่ก็มีข้อเสียเปรียบที่ตัวกรองต้องผ่านพลังงานความถี่วิทยุกำลังสูง ดังนั้นตัวกรองจึงจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้าม การกรองแบบที่ใช้ตัวกรองตัดแถบ (Notch filter) จะเลือกตัดเฉพาะความถี่ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงมีข้อได้เปรียบที่มีขนาดเล็ก เพราะตัวกรองมีหน้าที่นำเอาพลังที่ไม่ต้องการไปทิ้ง ไม่ได้เป็นทางผ่านของสัญญาณที่เราต้องการจะส่งออกอากาศ แต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียเปรียบ ที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่มาก่อให้เกิด RIM ก็จำเป็นต้องมีการปรับแต่งวงจรกรองใหม่ทุกครั้งไป

2. ความถี่อินเตอร์มอดูเลชัน

อินเตอร์มอดูชันจะให้ความถี่ผลลัพธ์ที่เป็นความถี่ผลบวกและผลต่างของสองความถี่ตั้งต้น รวมทั้งความถี่ผลบวกและผลต่างของความถี่ที่เป็นฮาร์โมนิกของสองความถี่ตั้งต้น โดยความถี่ตั้งต้นที่จะมาสร้างอินเตอร์มอดูเลชันไม่ได้มีเงื่อนไขแต่อย่างใด เป็นสองความถี่ใดๆ ก็ได้ที่ไม่เท่ากัน ในที่นี้เพื่อความสะดวก จะขอยกตัวอย่างสองความถี่ที่ 100 MHz และ 95 MHz ซึ่งจะได้ความถี่ผลลัพธ์จากการเกิดอินเตอร์มอดูเลชัน ดังที่แสดงในตาราง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างความถี่ที่เกิดจากอินเตอร์มอดูเลชันระหว่างความถี่ 95 MHz และ 100 MHz

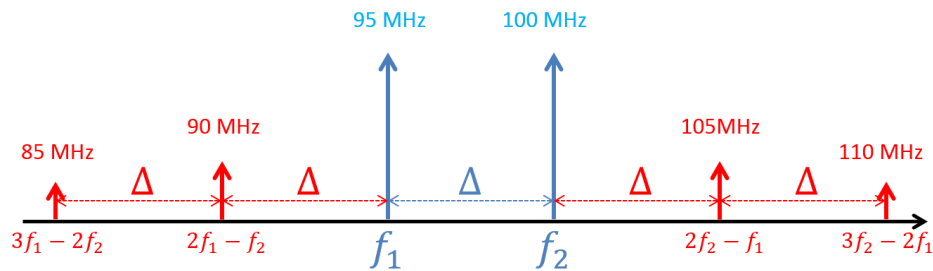
Order	สมการ	ความถี่ผลลัพธ์
2	$f_2 - f_1 = 100 - 95$	5MHz
3	$2f_2 - f_1 = 2 \times 100 - 95$ $2f_1 - f_2 = 2 \times 95 - 100$	105MHz 90MHz
4	$2f_2 - 2f_1 = 2 \times 100 - 2 \times 95$ $3f_2 - f_1 = 3 \times 100 - 95$ $3f_1 - f_2 = 3 \times 95 - 100$	10MHz 205MHz 185MHz
5	$3f_2 - 2f_1 = 3 \times 100 - 2 \times 95$ $3f_1 - 2f_2 = 3 \times 95 - 2 \times 100$ $4f_2 - f_1 = 4 \times 100 - 95$ $4f_1 - f_2 = 4 \times 95 - 100$	110MHz 85MHz 305MHz 280MHz
6	$3f_2 - 3f_1 = 3 \times 100 - 3 \times 95$ $4f_2 - 2f_1 = 4 \times 100 - 2 \times 95$ $4f_1 - 2f_2 = 4 \times 95 - 2 \times 100$ $5f_2 - f_1 = 5 \times 100 - 95$ $5f_1 - f_2 = 5 \times 95 - 100$	15MHz 210MHz 180MHz 405MHz 375MHz
7	$4f_2 - 3f_1 = 4 \times 100 - 3 \times 95$ $4f_1 - 3f_2 = 4 \times 95 - 3 \times 100$ $5f_2 - 2f_1 = 5 \times 100 - 2 \times 95$ $5f_1 - 2f_2 = 5 \times 95 - 2 \times 100$ $6f_2 - f_1 = 6 \times 100 - 95$ $6f_1 - f_2 = 6 \times 95 - 100$	115MHz 80MHz 310MHz 275MHz 505MHz 470MHz

หมายเหตุ

1. Order ของอินเตอร์มอดูเลชันสามารถหาได้จากผลบวกของสัมประสิทธิ์ (ไม่เอาเครื่องหมาย) ของแต่ละความถี่
2. ในที่นี้แสดงให้เห็นถึงแค่ order 7 เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงยังมี order ที่สูงกว่านี้ไปเรื่อยๆ
3. ในที่นี้แสดงเฉพาะความถี่ผลต่าง เนื่องจากความถี่ผลบวกจะมีค่าสูง และจะถูกกำจัดด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ LPF

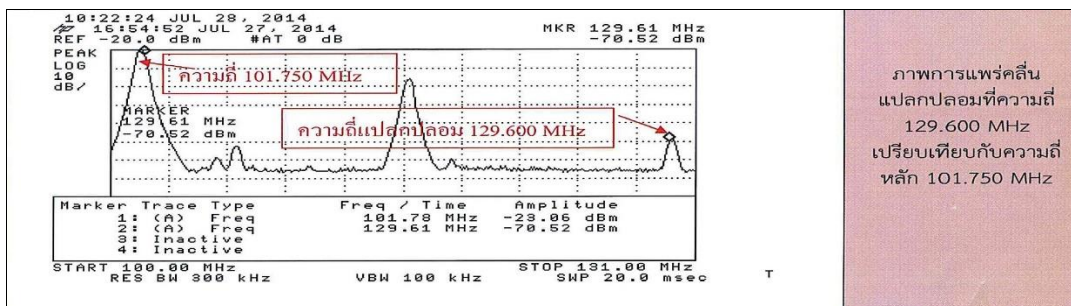
จากตารางจะเห็นว่า Order ที่เป็นเลขคี่ตั้งแต่เลข 3 ขึ้นไป เฉพาะที่ตัวเลขสัมประสิทธิ์ที่ลบกันและต่างกันอยู่ 1 จะได้ความถี่ผลลัพธ์ที่ย้อนกลับมาอยู่ใกล้ๆ กับความถี่ตั้งต้น (แสดงด้วยสีแดงในตาราง) ซึ่งต่อไปนี้จะขอเรียกว่า in-band IM และโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณี RIM จำเป็นต้องอาศัยภาคขยายกำลังความถี่วิทยุภาคสุดท้ายที่ถูกออกแบบมาให้ขยายสัญญาณเฉพาะย่านวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม ดังนั้นเฉพาะ in-band RIM จึงเป็นที่น่าสนใจ ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป

หากเราสนใจเฉพาะ in-band RIM แล้ว การหาตำแหน่งความถี่ของการเกิดอินเตอร์มอดูเลชันจะง่ายขึ้นหากนำเสนอในรูปแบบกราฟ เนื่องจากระยะห่างของความถี่จะห่างเท่ากันกับระยะห่างของความถี่ตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งความถี่ที่เกิดอินเตอร์มอดูเลชัน เฉพาะที่เป็น in-band เท่านั้น

การใช้รูปจะมีประโยชน์มากในกรณีที่เรารับความถี่หลัก 1 ตัวและความถี่อินเตอร์มอดูเลชัน แล้วต้องการทราบความถี่หลักอีกตัว ยกตัวอย่างดังข้างล่างนี้



ภาพการแพร่คลื่น
แปลกปลอมที่ความถี่
129.600 MHz
เปรียบเทียบกับความถี่
หลัก 101.750 MHz

รูปที่ 2 แสดงสเปกตรัมการเกิด RIM ที่ความถี่ 129.60 MHz

ซึ่งเป็นรูปที่วัดได้จากสถานีจริงที่ส่งออกอากาศที่ความถี่ 101.75 MHz แล้วปรากฏว่ามีการแพร่แปลกปลอมไปปรากฏที่ความถี่ 129.60 MHz แต่ถ้าสังเกตให้ดีจะเห็นว่ามีการแพร่แปลกปลอมอีกความถี่หนึ่งที่กลางจอ ซึ่งทั้ง 3 ความถี่ที่ปรากฏจะห่างเท่าๆ กัน ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวของอินเตอร์มอดูเลชัน ดังนั้นเราสามารถหาระยะห่างของแต่ละตัวได้ว่ามีค่าประมาณ $(129.60 - 101.75) / 2 = 13.925$ MHz ซึ่งทำให้เราทราบว่าความถี่หลักที่มากที่สุดทำให้เกิด RIM ที่สถานีนี้มีค่าเท่ากับ $(101.75 - 13.925) = 87.825$ MHz

ถึงแม้ว่าการเกิด RIM จะเกิดจากสองความถี่ แต่เราก็สามารถหาได้ว่าความถี่แปลกปลอมที่แพร่ออกมา นั้น ออกมาจากสถานีใด ดังนั้นการแก้ไขก็จะกระทำกับสถานีนั้นๆ แต่เพียงสถานีเดียว ปัญหาไม่ได้เกี่ยวข้องกับอีกสถานีที่มาช่วยก่อให้เกิด RIM แต่อย่างใด และการเกิดอินเตอร์มอดูเลชันจะเกิดจากอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารเท่านั้น เช่นเครื่องส่ง เครื่องรับ สายอากาศ สายนำสัญญาณ ขั้วต่อ ฯลฯ แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นบนอากาศว่างได้

3. การลดการเกิด RIM

เนื่องจาก RIM นั้นเกิดมาจากการที่มีสัญญาณตั้งแต่สองความถี่ขึ้นไป ทำการส่งที่บริเวณใกล้ๆ กัน ทำให้เครื่องใดเครื่องหนึ่งหรือทั้งสองเครื่อง รับเอาสัญญาณของกันและกันเข้าไปในเครื่องส่ง ดังนั้นการแก้ปัญหาที่ง่ายที่สุดก็คืออย่าทำการส่งสัญญาณในบริเวณใกล้ๆ กัน แต่หากวิธีนี้ไม่สามารถกระทำได้ เรายังมีวิธีการทางเทคนิคเข้ามาช่วย เพื่อให้เข้าใจและสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะขอแบ่งวิธีการออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ

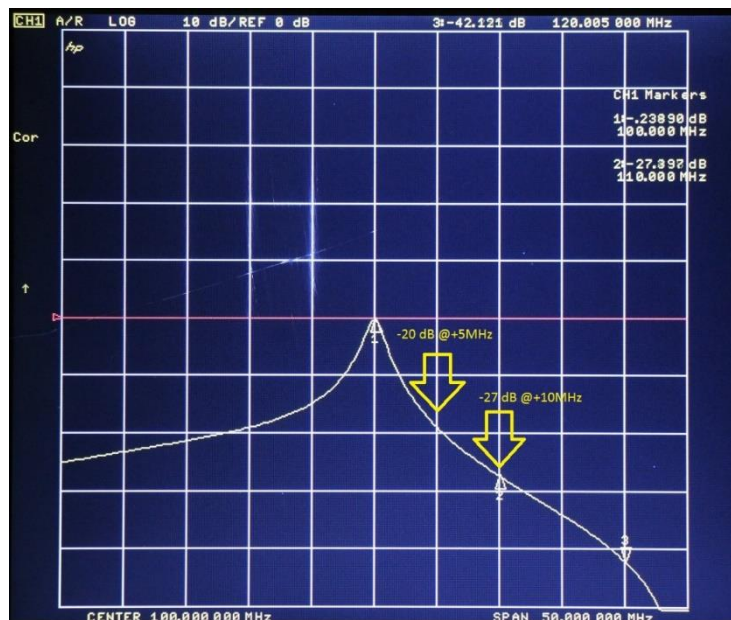
- (ก) ป้องกันสัญญาณจากสถานีอื่นๆ ไม่ให้ย้อนกลับเข้าไปในเครื่องส่งได้
- (ข) (หากเกิดมี RIM เกิดขึ้นแล้ว) หาทางป้องกันไม่ให้สัญญาณ RIM จากเครื่องส่ง ออกไปที่สายอากาศได้

สำหรับอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้น ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่

3.1 วงจรกรองผ่านแถบ (Bandpass Filters: BPF)

เป็นอุปกรณ์ที่ตั้งใจให้ความถี่ใดความถี่หนึ่งผ่านไปได้ และลดทอนสัญญาณความถี่อื่นๆ ทั้งหมด เนื่องจากเราต้องการผ่านความถี่ในย่านแคบๆ ดังนั้นตัวอุปกรณ์วงจรกรองจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ จึงต้องติดตั้งภายนอกตัวกล่องเครื่องส่ง ทั้งนี้เนื่องจากตัววงจรตั้งใจผ่านเฉพาะความถี่ที่ตั้งใจออกอากาศ ดังนั้น BPF นี้จึงทำงานบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งในข้อ (ก) และข้อ (ข)

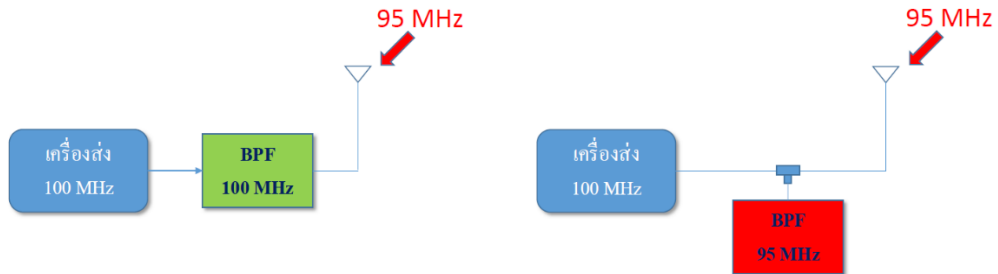
อย่างไรก็ตาม การใช้อุปกรณ์ BPF มีข้อจำกัดที่มันจะสามารถตัดความถี่ที่ไม่ต้องการได้ก็ต่อเมื่อความถี่นั้นอยู่ห่างจากความถี่ที่ใช้งานพอสมควร ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นว่าหากความถี่ที่ต้องการตัดทิ้งนั้นอยู่ห่างน้อยกว่า 2 MHz แล้ว ตัว BPF จะลดทอนความถี่นั้นได้น้อยกว่า 10 dB ซึ่งอาจจะไม่เพียงพอสำหรับการลดทอน RIM ที่ทั้งสองความถี่ตั้งอยู่สถานที่เดียวกัน ดังนั้นอาจจะจำเป็นต้องใช้ BPF มากกว่า 1 ตัว หรือใช้วิธีอื่นประกอบ



รูปที่ 3 แสดงความสามารถของ BPF ที่จะลดทอนความถี่ที่ไม่ต้องการ ที่ความถี่ห่างจากความถี่หลักค่าต่างๆ

3.2 วงจรกรองทิ้งหรือกรองตัดแถบ (Notch Filters)

เป็นอุปกรณ์ที่ตัดสัญญาณที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งเหมือนจะตรงกันข้ามกับ BPF และในทางปฏิบัติแล้ว การเลือกตัดที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งจะกระทำได้ง่ายกว่า (แคบกว่า) วงจรกรองตัดแถบนี้อาจจะสร้างมาจากวงจรกรองผ่านแถบก็ได้ เพราะการกรองตัดแถบก็คือ การกรองผ่านความถี่ที่เราไม่ต้องการไปทั้งนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 4



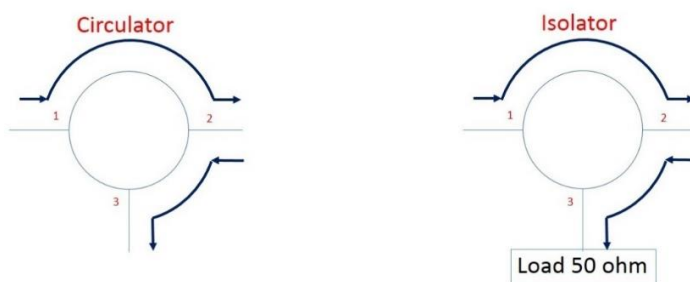
รูปที่ 4 แสดงการต่อ (ซ้าย)วงจรกรองผ่านแถบ (ขวา)วงจรกรองตัดแถบ ที่ทำมาจากวงจรกรองผ่านแถบ

จากรูปที่ 4 ถึงแม้จะมีความคล้ายกันมาก แต่ในทางปฏิบัติแล้วการต่อแต่ละแบบมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบ เช่น ในการใช้งานแบบกรองผ่านแถบ จะมีข้อได้เปรียบคือมันจะผ่านเฉพาะความถี่ที่ใช้งาน ดังนั้นไม่ความถี่ที่เราไม่ต้องการจะมีจำนวนเท่าไร ก็สามารถใช้อุปกรณ์กรองผ่านแถบชุดเดียวได้ ในขณะที่วงจรกรองตัดแถบต้องทำงานที่ความถี่ที่ระบุเท่านั้น

เนื่องจากวงจรกรองตัดแถบไม่ได้เป็นทางผ่านหลักของสัญญาณวิทยุที่เราออกอากาศ ดังนั้นมันจึงมีข้อได้เปรียบที่จะมีขนาดเล็กกว่า และมีการสูญเสียรวมในระบบน้อยกว่า และสามารถทำงานได้ดีเมื่อความถี่ที่ต้องการผ่านและต้องการตัดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และจะเห็นได้ชัดว่าอุปกรณ์กรองตัดแถบนี้จะทำงานบรรลุวัตถุประสงค์ในข้อ (ก) เท่านั้น

3.3 Circulators/Isolators

อุปกรณ์ circulator เป็นอุปกรณ์ที่บังคับให้สัญญาณที่เข้าที่ port หนึ่งวิ่งไปออกที่ port ถัดไป ดังนั้นเราจะสามารถบังคับให้สัญญาณที่วิ่งมาจากเครื่องส่งวิ่งไปออกที่สายอากาศ ส่วนสัญญาณที่วิ่งย้อนกลับมาจากสายอากาศเราจะบังคับให้มันวิ่งไปออกที่ port ที่ต่อ resistor ไว้ ดังนั้นสัญญาณที่ย้อนกลับมาไม่ว่าจะเนื่องด้วย VSWR ของสายอากาศ หรือด้วย RIM จะถูกบังคับให้หายไปที่ resistor นี้ ซึ่งการใช้ circulator ที่มี resistor ต่อไว้ที่ port ที่ไม่ได้ใช้งานนี้ทำให้มันมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า isolator การใช้งาน isolator จะได้เปรียบอุปกรณ์ประเภทวงจรกรอง คือมันไม่มีข้อจำกัดเรื่องความถี่เคียงกันของความถี่ใช้งาน และจะเห็นได้ชัดว่าอุปกรณ์ isolator นี้จะทำงานบรรลุวัตถุประสงค์ในข้อ (ก) เท่านั้น



รูปที่ 5 แสดงการทำงานของ (ซ้าย) Circulator และ (ขวา) Isolator

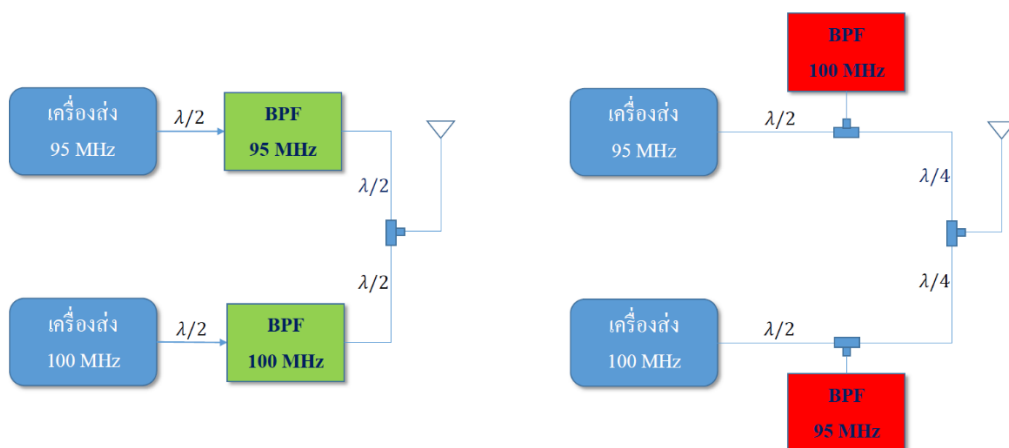
3.4 อุปกรณ์รวมกำลังความถี่วิทยุ (RF Power Combines)

เป็นการต่อยอดการใช้อุปกรณ์วงจรกรองขึ้นมาอีกขั้นหนึ่ง เพราะอุปกรณ์รวมกำลังความถี่วิทยุจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วงจรกรองเป็นส่วนประกอบเสมอ การรวมกำลังความถี่วิทยุนี้มีข้อดีตรงที่หลังจากทำการรวมกันเสร็จแล้ว เราสามารถใช้สายนำสัญญาณและสายอากาศชุดเดียวกันได้ เป็นการประหยัดทรัพยากรเป็นอย่างดี แต่ก็อาจจะเป็นข้อจำกัดไปพร้อมๆ กัน เพราะการที่จะรวมกันได้ เครื่องส่งสองเครื่องจำเป็นต้องอยู่ด้วยกัน

การรวมกำลังความถี่วิทยุนอกจากจะจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วงจรกรองแล้ว ยังจำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณที่มีความยาวที่เหมาะสมด้วย ความยาวที่ว่านี้เป็นความยาวหลังจากที่ชดเชยด้วยตัวคุณความเร็วของคลื่นภายในสายเส้นนั้นๆ แล้ว ยกตัวอย่าง เช่น สายนำสัญญาณที่ฉนวนทำมาจาก solid polyethylene (PE) จะมีตัวคุณความเร็วเท่ากับ 0.66 หรือสายนำสัญญาณที่ฉนวนทำมาจาก foam polyethylene (FE) จะมีตัวคุณความเร็วเท่ากับ 0.80 และสายนำสัญญาณที่ฉนวนทำมาจาก Foam Polystyrene (FS) จะมีตัวคุณความเร็วเท่ากับ 0.91 เพราะตัวคุณทั้งหมดนี้จะทำให้ความยาวคลื่นในสายสั้นกว่าความยาวคลื่นในอากาศว่าง

การรวมกำลังความถี่วิทยุ แบบที่นิยมกันมากสำหรับการรวมกำลังจากเครื่องส่งวิทยุ คือ แบบ star point โดยที่แต่ละเครื่องส่งจะถูกต่อผ่านวงจรกรอง แล้วนำมารวมกัน (ต่อกันตรงๆ) การรวมกันนี้เองที่จำเป็นต้องมีการคำนึงไม่ให้มีผลกระทบซึ่งกันและกันจากแต่ละเส้นที่นำมาต่อ

โดยหลักการแล้ว ในแต่ละเส้นที่มาต่อกันจะต้องมองเห็นเส้นอื่นๆ เป็น วงจรเปิด (open circuit) ที่ความถี่ที่ตัวเองใช้งาน และจากทฤษฎีสายนำสัญญาณ ทุกอย่างจะเกิดขึ้นซ้ำๆ ที่ทุกความยาว $\lambda/2$ แต่ทุกอย่างจะเกิดขึ้นตรงกันข้าม ที่ทุกความยาว $\lambda/4$ เราเอาความรู้ทั้งหมดนี้มาใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการต่อ Start Point Combiner (ซ้าย) แบบใช้วงจรกรองผ่านแถบ (ขวา) แบบใช้วงจรกรองตัดแถบ

จากรูปที่ 6 ซ้ายมือ เมื่อเราใช้อุปกรณ์วงจรกรองผ่านแถบที่ความถี่ที่ใช้งาน เช่น 100 MHz มันจะทำงานเสมือนเป็นวงจรเปิด (open circuit) ที่ความถี่อื่นๆ (อาจจะตรงกันข้ามกับที่กล่าวนี้ ควรตรวจสอบกับตัววงจรกรองนั้นๆ) และเราก็ต้องการให้เป็นวงจรเปิดที่จุดรวม ดังนั้นจากตัวอุปกรณ์วงจรกรอง เราจึงทำการต่อมันด้วยสายที่ยาว $\lambda/2$ ไปยังจุดรวม

ด้วยเหตุผลเดียวกัน จากรูปที่ 6 ขวามือ ที่ด้านล่างตรงเครื่องส่ง 100 MHz จะมีวงจรกรองตัดแถบคอยตัดความถี่ 95 MHz ทิ้งไป ซึ่งมันจะทำหน้าที่เสมือนเป็นลัดวงจรที่ความถี่ 95 MHz แต่เราต้องการให้มันเป็นวงจรเปิดที่ตรงจุดต่อ (เพื่อจะได้ไม่ไปรบกวนกับสัญญาณ 95 MHz ที่มาจากทางด้านบน) ดังนั้นเราจึงต้องทำการเปลี่ยนจากลัดวงจร ให้กลายเป็นวงจรเปิดที่ตรงจุดรวม โดยใช้สายที่ยาว $\lambda/4$ มาต่อระหว่างวงจรกรองกับจุดรวม

จากที่ได้กล่าววิธีการป้องกันและลด RIM มาทั้งหมดนั้น จะขอสรุปอีกครั้งดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปเทคนิคต่างๆ ที่ใช้แก้ไขปัญหาการเกิด RIM

เทคนิค	ข้อดี	ข้อด้อย	หมายเหตุ
วงจรกรองผ่านแถบ (BPF)	- ทิ้งป้องกันและลด RIM	- ขนาดใหญ่	- สองความถี่ต้องต่างกันเกิน 2 MHz
วงจรกรองตัดแถบ	- ขนาดเล็ก - ตัดได้แคบกว่า	- หากมีความถี่ที่ต้องการกำจัดหลายความถี่ ต้องใช้หลายตัว	
Isolator	- ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่	- ราคาแพง - ทนกำลังได้น้อย	- ค่า isolation กำหนดความสามารถของการกำจัด RIM มีค่าประมาณ 20 dB
Combiner	- ใช้สายอากาศและสายนำสัญญาณชุดเดียว - สามารถทำงานได้ดี	- เครื่องส่ง 2 เครื่องจำเป็นต้องอยู่ด้วยกัน	- ต้องใช้อุปกรณ์กรองอย่างน้อย 2 ตัวต่อ 1 ความถี่

จากวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด จะเห็นว่าการใช้ BPF จะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ถึงแม้จะมีข้อจำกัดที่จำเป็นต้องมีความแตกต่างของสองความถี่ไม่น้อยกว่า 2 MHz แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถเพิ่มจำนวน BPF ได้ หรือใช้เทคนิคอื่นช่วย เช่น ใช้อุปกรณ์กรองแบบตัดแถบช่วยก็ได้

การที่ BPF สามารถสร้างได้เอง ทำให้มีราคาถูก ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงเป็นวิธีการหลักที่จะนำเสนอต่อไป อย่างไรก็ตาม หากจะนำ BPF ที่สร้างเองนี้ ไปประกอบเป็น Star point combiner ก็สามารทำได้ เพียงแค่จัดหาสายนำสัญญาณที่เหมาะสมมาต่อเท่านั้น

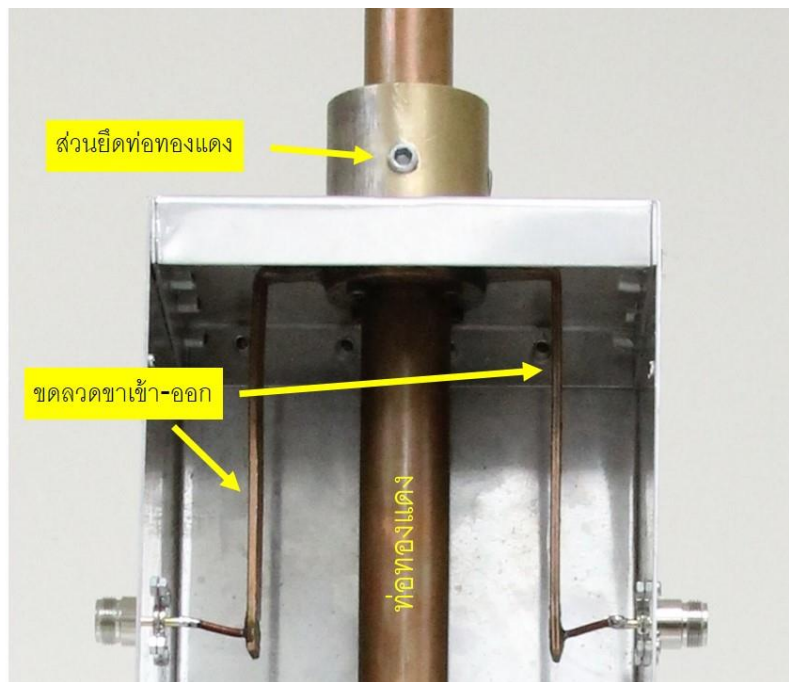
4. กรอบการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบ (BPF) เพื่อใช้ในการป้องกันการเกิด RIM

เพื่อเป็นเป้าหมายในการออกแบบและการสร้างวงจรกรองผ่านแถบให้สามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ จึงได้กำหนดกรอบทางด้านเทคนิคและทางด้านกายภาพ ดังต่อไปนี้

- กรอบทางด้านเทคนิคของวงจรกรอง 1 ตัว
 1. สามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่วิทยุกระจายเสียง 88-108 MHz เป็นอย่างต่ำ
 2. สามารถส่งผ่านกำลังความถี่วิทยุได้ไม่น้อยกว่า 500 วัตต์ โดยมีอุณหภูมิขณะทำงานไม่เกิน 60 องศา
 3. มีอัตราการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ห่างจากความถี่ใช้งานออกไป 10 MHz ได้ไม่ต่ำกว่า 20 dB
 4. มีอัตราการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ห่างจากความถี่ใช้งานออกไป 20 MHz ได้ไม่ต่ำกว่า 40 dB
 5. มีอัตราการสูญเสียที่ความถี่ใช้งานไม่เกิน 0.5 dB
- กรอบทางด้านกายภาพของวงจรกรอง 1 ตัว
 1. มีขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสม สามารถยกได้ด้วยคน 1 คน
 2. ประกอบขึ้นด้วยวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย สามารถหาซื้อได้ในพื้นที่
 3. มีขั้นตอนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน เข้าใจง่าย
 4. ผลิตได้ง่าย มีความทนทาน
 5. มีการระบายความร้อนที่ดี
- สิ่งที่ไม่ได้คำนึงถึงในการออกแบบ
 1. การชดเชยผลของอุณหภูมิจากสภาพอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากการที่ประเทศไทยมีความแตกต่างทางอุณหภูมิระหว่างฤดูร้อนและฤดูหนาวประมาณ 20 องศาเท่านั้น และคาดหวังว่าอุปกรณ์กรองคลื่นนี้จะถูกเก็บไว้ในอาคารที่ไม่ถูกความร้อนหรือความหนาวโดยตรง ดังนั้นการชดเชยเรื่องการขยายตัวของโลหะจึงไม่ได้นำมาพิจารณา
 2. การป้องกันการผุกร่อน เนื่องจากอลูมิเนียมแผ่นที่ใช้ในการทำตัวกล่องนั้นจะทำปฏิกิริยากับอากาศได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณพื้นที่ชายทะเล ดังนั้นอาจจะจำเป็นต้องเพิ่มเติมขั้นตอนเพื่อป้องกันการผุกร่อนดังกล่าว เช่น การพ่นสีเคลือบ

5. แนวทางการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบ (BPF) เพื่อใช้ในการป้องกันการเกิด RIM

วงจรกรองผ่านแถบ (BPF) ที่ใช้กรองผ่านสัญญาณที่เราต้องการ และตัดสัญญาณที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ใช้งาน จำเป็นต้องมี Quality Factor (Q) ที่สูง ดังนั้นเรามักจะใช้กล่องหรือท่อเพื่อสร้างปริมาตรในการเก็บพลังงาน และใช้แท่งทองแดงทำหน้าที่ Resonance ที่ความถี่ที่เราต้องการ เพื่อส่งผ่านพลังงาน การปรับความยาวของแท่งทองแดงจึงมีความสำคัญมาก เพราะมันเป็นตัวกำหนดความถี่ Resonance หรือความถี่ใช้งาน ทางด้านขาออกและขาเข้าจะมีขดลวดเพื่อเปลี่ยนพลังงานความถี่วิทยุให้เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อส่งไปยังแท่งทองแดงอีกที่ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างที่สำคัญของวงจรกรอง (รูปไม่เต็มความยาว)

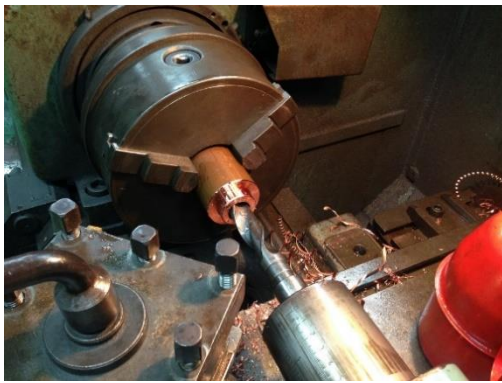
เพื่อให้สามารถรองรับกำลังความถี่วิทยุได้เป็นอย่างดี ส่วนที่นำกระแสมากๆ จะใช้วัสดุทองแดง ซึ่งจะให้ผลดีทั้งทางด้านการนำไฟฟ้า และการระบายความร้อน ตัวท่อทองแดงควรจะเป็นชิ้นเดียว ไม่มีรอยต่อ และแนบสนิทกับตัวกล่องที่ด้านบนเพื่อการนำไฟฟ้าและระบายความร้อนที่ดีไปยังตัวกล่อง

ด้านบนของขดลวดจะต่อลงตัวกล่องด้วยการเชื่อมโลหะทั้ง 3 ชั้นเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อการนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดี จุดนี้เป็นจุดที่สำคัญจุดหนึ่งที่ต้องกระทำอย่างประณีต ดังแสดงในรูปที่ 8 และทำการยึดเข้ากับตัวยึดท่อที่อยู่ด้านบน โดยรูที่จะให้ท่อทองแดงสอดผ่านควรมีขนาดพอดี เนื่องจากต้องการให้นำกระแสไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 9

การยึดขดลวดและตัวยึดท่อกระทำได้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งบริเวณนี้เป็นจุดที่สำคัญเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลมาก ถ้าจุดต่อทุกจุดกระทำเป็นอย่างดี จะช่วยลดการสูญเสียกำลังความถี่วิทยุได้



รูปที่ 8 แสดงการเชื่อมต่อขดลวดขาเข้า-ออก เข้ากับส่วนที่ยึดกับกล่อง



รูปที่ 9 แสดง (ซ้าย) การกลึงตัวยึดท่อเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ (ขวา) หลังจากเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 10 แสดง (ซ้าย) การยึดขดลวดเข้ากับตัวยึดท่อ (ขวา) แสดงตัวเก็บประจุที่ปลายท่อทองแดงด้านล่าง

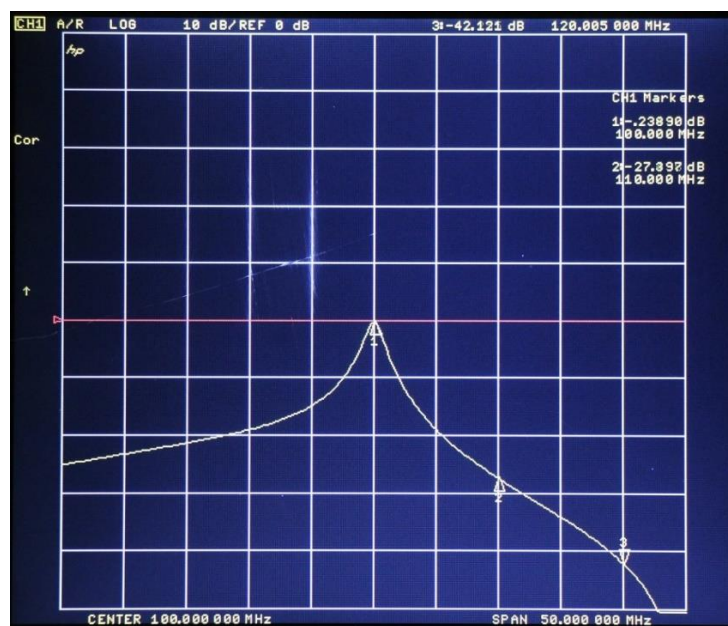
6. ผลการทดลอง

การทดลองกระทำในหลายลักษณะได้แก่

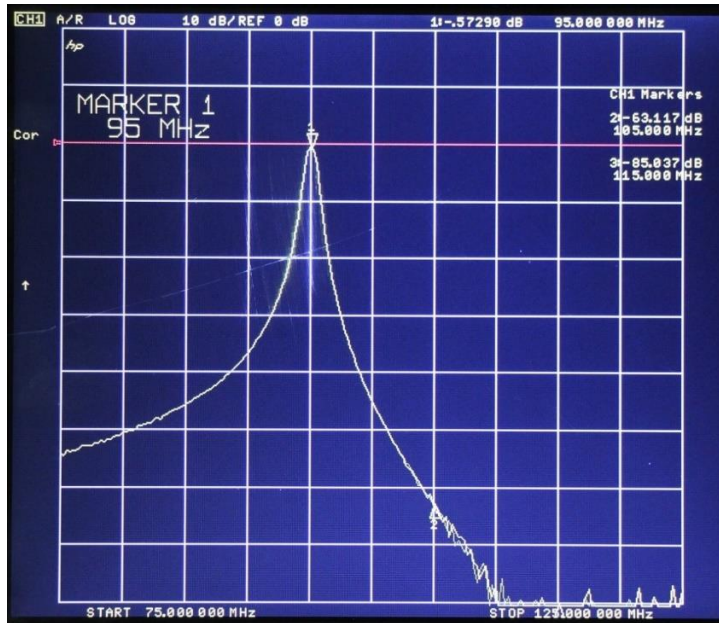
1. การวัดอัตราการสูญเสีย และวัดการลดทอนสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ โดยใช้ Network analyzer HP8753
2. การเพิ่มจำนวน Filter เป็น 2 ตัวช่วยเพิ่มอัตราการลดทอนสัญญาณ
3. การวัดอณูหภูมิบริเวณส่วนที่สำคัญ โดยทำการวัดขณะที่มีการส่งผ่านกำลังความถี่วิทยุประมาณ 500 วัตต์
4. การทดลองใช้งานจริง

6.1 การหาอัตราการสูญเสีย

เมื่อนำ Filter ไปทดสอบโดยใช้ Network Analyzer ปรากฏว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้ตัว Filter มีการสูญเสียที่ความถี่ที่ใช้งานประมาณ 0.3 dB ดังแสดงในรูปที่ 11 และเมื่อเพิ่มจำนวน Filter เป็น 2 พบว่ามีการสูญเสียที่ความถี่ใช้งานประมาณ 0.6 dB ดังแสดงในรูปที่ 12 ทั้งนี้เนื่องจาก Filter มีการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากันระหว่างด้านความถี่สูงและด้านความถี่ต่ำ ดังนั้นจะขอพิจารณาด้านความถี่สูงเป็นหลัก เนื่องจากเป็นด้านที่มีปัญหาการรบกวนกับกิจการวิทยุการบิน



รูปที่ 11 ผลการทดสอบ Filter 1 ตัว มีการสูญเสียที่ความถี่ใช้งานประมาณ 0.3 dB โดยการลดทอนที่ความถี่ที่ห่างไป 10 MHz และ 20 MHz มีค่าเท่ากับ 27 dB และ 42 dB ตามลำดับ



รูปที่ 12 ผลการทดสอบ Filter 2 ตัว มีการสูญเสียที่ความถี่ใช้งานประมาณ 0.6 dB โดยการลดทอนที่ความถี่ที่ห่างไป 10 MHz และ 20 MHz มีค่าเป็น 63 dB และ 85 dB ตามลำดับ

ซึ่งจากผลการทดลองทั้ง 2 ส่วน จะเห็นว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้หากการเกิด RIM ไม่รุนแรงมาก เช่นไม่ได้อยู่บนเสาต้นเดียวกัน การใช้ Filter เพียง 1 ตัวก็เพียงพอที่จะกำจัด RIM ให้ต่ำกว่า -70 dBc ได้

6.2 การวัดอุณหภูมิ

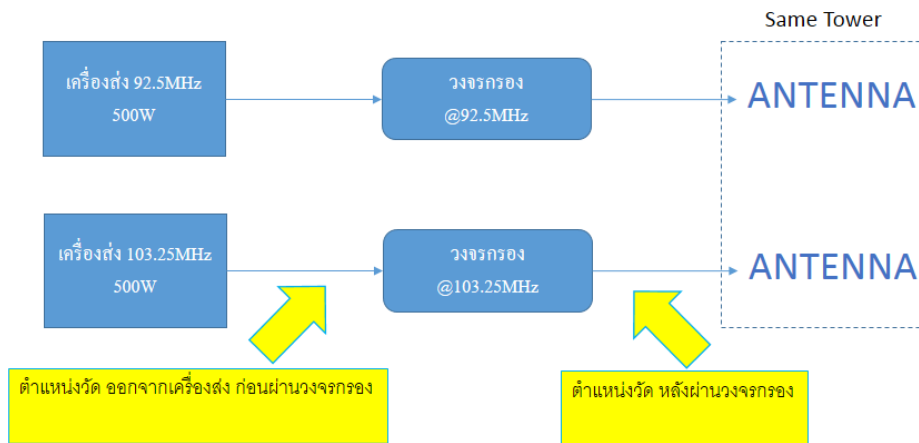
เมื่อทำการทดสอบผ่านสัญญาณความถี่วิทยุที่มีกำลังส่งประมาณ 500 วัตต์ผ่าน Filter แล้วทำการวัดอุณหภูมิ (จำเป็นต้องเปิดฝาอุปกรณ์ ทำให้กำลังความถี่วิทยุที่ส่งผ่านได้จริงลดลงไปมาก) ได้ค่าประมาณ 30 องศาเซลเซียส หรือสูงขึ้นประมาณ 5 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิปกติ ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการระบายความร้อนด้วยทองแดงและอลูมิเนียมที่เป็นส่วนประกอบหลักในการสร้าง



รูปที่ 13 แสดงการวัดอุณหภูมิขณะทำการส่งผ่านกำลังความถี่วิทยุ 500 วัตต์ (แต่เหลือแค่ 287 วัตต์ เนื่องจากเปิดฝาล่อง)

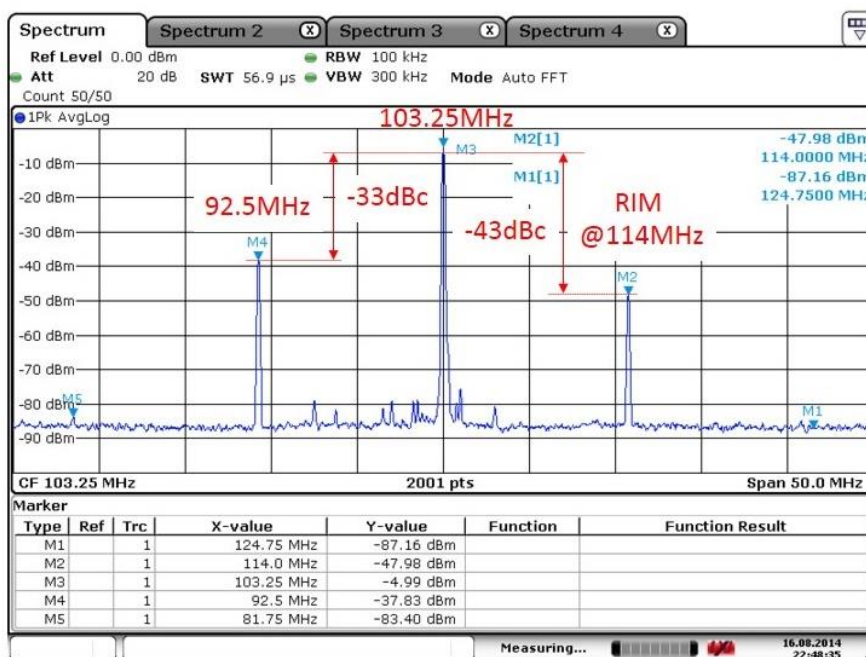
6.3 การนำไปใช้งานจริง

เมื่อนำวงจรกรองไปใช้กับสถานีที่ออกอากาศจริง โดยทั้งสองความถี่ออกอากาศโดยใช้สายอากาศคนละต้น แต่อยู่บนเสา Tower เดียวกันบนดาดฟ้าชั้น 5 ที่ความสูง 60 เมตรวัดจากพื้นดิน ความถี่ 92.5 MHz ออกอากาศโดยใช้ สายอากาศแบบ dipole 8 stack และความถี่ 103.25 MHz ออกอากาศโดยใช้สายอากาศแบบ circular 8 stack ส่วนสายนำสัญญาณเป็นแบบ Heliax 7/8 นิ้วทั้งสองความถี่



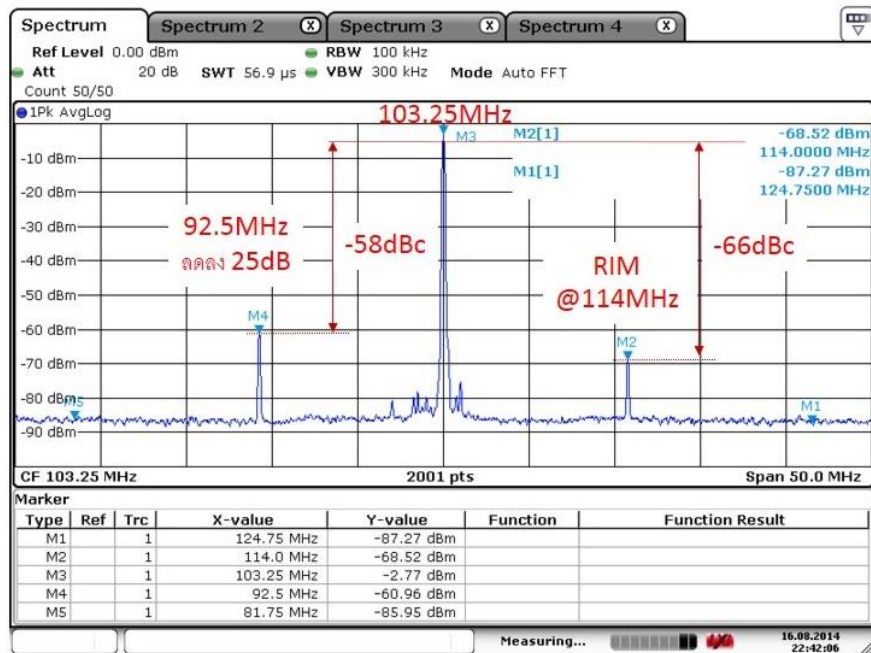
รูปที่ 14 แสดงการต่อและการวัดสัญญาณตามจุดต่างๆ

เพื่อให้ได้ผลการวัดที่แม่นยำตรง การวัดจะกระทำโดยแทรก RF coupler -60 dB ตามจุดต่างๆ ที่ต้องการวัด ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยการวัดจะกระทำที่ความถี่ 103.25 MHz เท่านั้น แต่ก่อนที่จะใส่วงจรกรอง เราได้ทำการวัดสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องส่งไว้เพื่อเป็นการอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 15

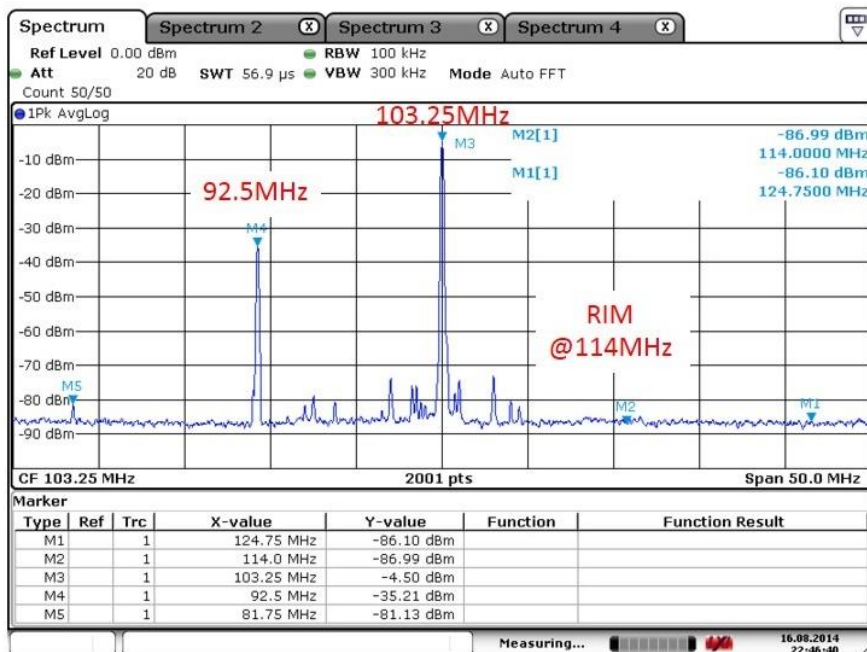


รูปที่ 15 แสดงสัญญาณที่วัดได้ภายในสายส่งที่ออกจากเครื่องส่ง 103.25 MHz ก่อนที่จะมีการใส่วงจรกรองใดๆ

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าสัญญาณความถี่ 92.5 MHz ที่ยอนเข้ามามีความแรงต่ำกว่าสัญญาณที่เราตั้งใจส่งเพียง -33 dBc ซึ่งเป็นระดับที่แรงมาก แล้วก่อให้เกิด RIM ที่ความถี่ 114 MHz ด้วยความแรงที่ต่ำกว่าสัญญาณที่เราตั้งใจส่งเพียง -43 dBc ซึ่งตามเกณฑ์แล้ว การแพร่แปลกปลอมต้องน้อยกว่า -70 dBc



รูปที่ 16 แสดงสัญญาณที่ออกจากเครื่องส่ง ก่อนผ่านวงจรกรอง



รูปที่ 17 แสดงสัญญาณที่ผ่านวงจรกรอง

รูปที่ 16 แสดงสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องส่ง ที่จุดนี้จะเห็นได้ชัดว่าสัญญาณความถี่ 92.5 MHz ที่ย้อนเข้ามา ได้ถูกลดทอนลงต่ำกว่าสัญญาณที่เราตั้งใจส่งไปอยู่ที่ -58 dBc (จากเดิม -33 dBc) นั่นคือสัญญาณความถี่ 92.5 MHz ถูกวงจรกรองลดทอนไป 25 dB แต่ถึงกระนั้นเครื่องส่งก็ยังสร้างสัญญาณ RIM ออกมาที่ความแรง -66 dBc

รูปที่ 17 แสดงสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้ว จะเห็นว่าสัญญาณ RIM มีค่าต่ำกว่าสัญญาณที่เราตั้งใจส่งที่ -80 dBc ซึ่งก็เพียงพอที่ถือว่าเครื่องส่ง 103.25 MHz ไม่ได้มีการแพร่แปลกปลอมแต่อย่างใด

จากการทดลองนี้จะเห็นว่า การใช้วงจรกรองเพียง 1 ตัวต่อ 1 คลื่นก็เพียงพอที่จะกำจัด RIM ที่เกิดจากการส่งจากเสา Tower ต้นเดียวกันได้เป็นอย่างดี (ซึ่งถือว่าเป็นการเกิด RIM ที่รุนแรงที่สุด) ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากในที่นี่ทั้งสองความถี่แตกต่างกันมากถึงประมาณ 10 MHz ซึ่งถ้าหากทั้งสองความถี่แตกต่างกันประมาณ 5 MHz ก็อาจจะจำเป็นต้องใช้วงจรกรอง 2 ตัวต่อ 1 คลื่น หรือถ้าทั้งสองความถี่แตกต่างกันน้อยกว่า 2 MHz ก็อาจจะจำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นประกอบ

และจากการทดลองพบว่า connector ที่ไม่ได้คุณภาพมีผลต่อใช้งานมาก ดังนั้นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องจัดหา connector ที่มีคุณภาพมาใช้ หรือใช้ขนาดที่โตขึ้น เช่น DIN 7/16 เป็นต้น

การปรับแต่งความถี่ใช้งานอาจจะปรับเพื่อใช้งานเบื้องต้นไปก่อน แล้วพอใช้งานไปประมาณ 30 นาทีหรือจนอุ่นคงที่แล้วก็ปรับแต่งใหม่อีกครั้ง หรืออาจจะปรับครั้งเดียว แต่ปรับแต่งที่ความถี่ที่สูงกว่าความถี่ใช้งานประมาณ 25 kHz

การวางใช้งาน การขนย้าย ควรจัดวางอุปกรณ์กรองในแนวตั้งเสมอ หรือหาอุปกรณ์ Teflon ค้ำที่บริเวณ capacitor ที่ปลายท่อ กับผนังกล่องเพื่อป้องกันการแกว่งไปมา (ในแบบไม่ได้แสดงไว้ เนื่องจาก Teflon หาซื้อยากและมีราคาแพง) และขณะใช้งานควรวางบนพื้นแข็ง ไม่มีการสั่นไหว



รูปที่ 18 แสดงการวัดกำลัง (ซ้าย) ก่อนเข้าวงจรกรองวัดได้ 440 วัตต์ (ขวา) หลังผ่านวงจรกรองวัดได้ 410 วัตต์

7. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบ สร้าง และทดสอบ อุปกรณ์กรองผ่านแถบ (Bandpass filter: BPF) ที่ผ่านความถี่ย่านวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็มเฉพาะความถี่ที่เราตั้งใจให้ออกอากาศ เพื่อนำไปใช้ป้องกันการเกิด RIM ของสถานีวิทยุที่ออกอากาศอยู่บริเวณใกล้เคียงกัน การออกแบบได้มุ่งเน้นให้สร้างได้ง่าย ทั้งเรื่องวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้และขั้นตอนการสร้าง ผลการทดลองได้ผลเป็นที่น่าพอใจ สามารถกรองผ่านสัญญาณที่ใช้งานด้วยอัตราการสูญเสียเพียงประมาณ 0.3 dB ในขณะที่สามารถตัดสัญญาณที่ห่างออกไป 10 MHz และ 20 MHz ด้วยอัตราการลดทอน 27 dB และ 42 dB ตามลำดับ

เมื่อนำอุปกรณ์วงจรกรองนี้ไปใช้กับสถานีวิทยุที่ออกอากาศ 2 ความถี่จากที่ตั้งเดียวกัน โดยมีความถี่แตกต่างกันประมาณ 10 MHz พบว่าก่อนที่จะทำการติดตั้งวงจรกรอง วัตต์สัญญาณ RIM ได้ความแรงอยู่ที่ประมาณ -33 dBc แล้วหลังจากที่ทำการติดตั้งวงจรกรองให้กับเครื่องส่ง 1 ตัวต่อ 1 คลื่น ปรากฏว่าสัญญาณ RIM ลดลงไปอยู่ต่ำกว่า -80 dBc

การสูญเสียจากวงจรกรองมีค่าประมาณ 0.3-0.5 dB หรือคิดเป็นประมาณ 50 วัตต์ ที่กำลังส่ง 500 วัตต์ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ในขณะที่ความร้อนที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่ประมาณ 60 องศาในห้องไม่มีการปรับอากาศ ซึ่งก็ถือว่าอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้มีการขยายตัวจนเกิดการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานแต่อย่างใด และถ้าหากวางไว้ในห้องที่มีการปรับอากาศ และติดแผ่นระบายความร้อนให้บ้าง ก็จะทำให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่านี้

8. คำแนะนำเพิ่มเติม

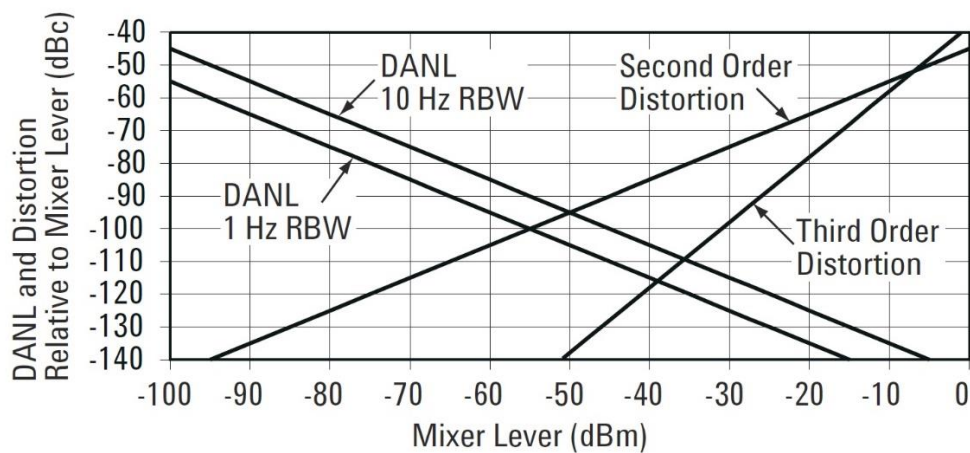
เป็นที่ทราบดีว่า การใช้สายอากาศแบบ Dipole มีความได้เปรียบที่สัญญาณที่รับได้มีความแรงมากกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ แต่ด้วยลักษณะที่สายอากาศของแต่ละสถานีจะขนานกันเสมอ ไม่ว่าสถานีเหล่านั้นตั้งอยู่ตำแหน่งใดก็ตาม ทำให้โอกาสที่จะเกิด RIM ก็มีมากตามไปด้วย ในทางตรงกันข้าม การแพร่คลื่นด้วยสายอากาศประเภท Circular หรือ Elliptic ถึงแม้จะเสียเปรียบเรื่องความแรงของสัญญาณ แต่ด้วยคุณสมบัติของสายอากาศประเภทนี้ ที่จะมีการหมุนของสนามไฟฟ้าที่ตรงข้ามกันเมื่อหันหน้าเข้าหากัน ดังนั้นโอกาสการเกิด RIM ก็จะลดลงไปมาก เพราะในทางทฤษฎีแล้ว การรับสัญญาณด้วยสายอากาศที่มีโพลาไรซ์แบบตรงกันข้าม (cross polarized) จะลดทอนสัญญาณลงไปกว่า 10 dB หรือหากเป็นกรณีที่หันไปในทิศเดียวกัน ก็จะมีตัวเสา Tower ช่วยบังให้ตัวที่อยู่ด้านหน้าจากสัญญาณที่มาจากตัวด้านหลัง ดังนั้นการใช้สายอากาศแบบ circular จะมีส่วนช่วยลดความรุนแรงของการเกิด RIM ระดับหนึ่ง

การใช้อุปกรณ์ Isolator ก็เป็นทางเลือกอีกทางของการแก้ปัญหา RIM นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความแตกต่างของความถี่มีค่าน้อยกว่า 2 MHz หากการเปลี่ยนความถี่ไม่สามารถกระทำได้ การใช้อุปกรณ์ Isolator ก็อาจจะเป็นทางเลือกสุดท้าย อุปกรณ์ประเภทนี้มักจะมีราคาสูง และอาจจะจำเป็นต้องเปิดเครื่องเข้าไปติดตั้งภายใน เพราะการติดตั้งมักจะติดตั้งก่อนที่มีการรวมกำลังสัญญาณความถี่วิทยุ เพราะหากกระทำหลังจากที่ทำการรวมกำลังสัญญาณความถี่วิทยุแล้ว ตัวอุปกรณ์ Isolator แบบที่สามารถทนกำลังได้มาก ก็จะมีราคาสูงขึ้นไปมาก

9. ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือวัด

เครื่องมือวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer: SA) ก็สามารถสร้างอินเตอร์มอดูเลชันเองได้ภายในเครื่อง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่ต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง ที่เมื่อเรากำลังจะไปวัดความไม่ปกติของเครื่องส่ง แต่ตัวเครื่องมือวัดเอง ก็มีความผิดปกติแบบเดียวกันแฝงอยู่

ความสามารถในการแสดงผลของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมจะถูกจำกัดด้วยปัจจัยที่สำคัญคือ ระดับสัญญาณรบกวน (Display average noise level: DANL) ที่อยู่ด้านล่างของจอแสดงผล และเป็นที่น่าทึ่งที่ทราบกันว่า การลด Resolution bandwidth (RBW) จะทำให้ระดับ DANL ลดลงอย่างเป็นสัดส่วน เช่นเมื่อเราทำการลด RBW ลง 10 เท่า ก็จะทำให้ DANL ลดลง 10 เท่า หรือ 10 dB เช่นกัน และการลด DANL นี้จะไม่ส่งผลต่อระดับสัญญาณแต่อย่างใด เพียงแต่จะเพิ่มจำนวนช่องที่สามารถแสดงผลได้



รูปที่ 19 แสดงตัวอย่าง Dynamic range ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (แต่ละรุ่นจะมีกราฟนี้แตกต่างกันไป) โดยแกนนอนจะแสดงความแรงที่หน้า Mixer ส่วนแกนตั้งจะแสดงระดับ Dynamic range ที่เครื่องสามารถแสดงผลได้

จากรูปที่ 19 ค่าความแรงที่หน้า Mixer ซึ่งหาได้จากค่าความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ลบด้วยค่า Attenuation ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเราทำการวัดสัญญาณ(ตัวที่แรงที่สุดที่กำลังแสดงอยู่ที่หน้าจอ) ที่ -10 dBm และมีการตั้งค่า Attenuation ภายในเครื่องเป็น 30 dB ดังนั้นค่าความแรงที่หน้า Mixer จะมีค่า $-10 - 30 = -40$ dBm

ทางด้านขวาของรูปที่ 19 มีเส้นที่จำกัดอยู่ 2 เส้น ในกรณีที่เรากำลังพิจารณาอินเตอร์มอดูเลชัน จะใช้เส้น Third Order Distortion เป็นหลัก (เมื่อเราพิจารณา Harmonic ที่ 2 ก็จะใช้เส้น Second Order Distortion) ซึ่งจะเห็นว่าหากเราให้ความแรงที่หน้า Mixer มีค่าที่เหมาะสมที่ประมาณ -35 dBm เราจะมี dynamic range มากถึงประมาณ -110 dBc

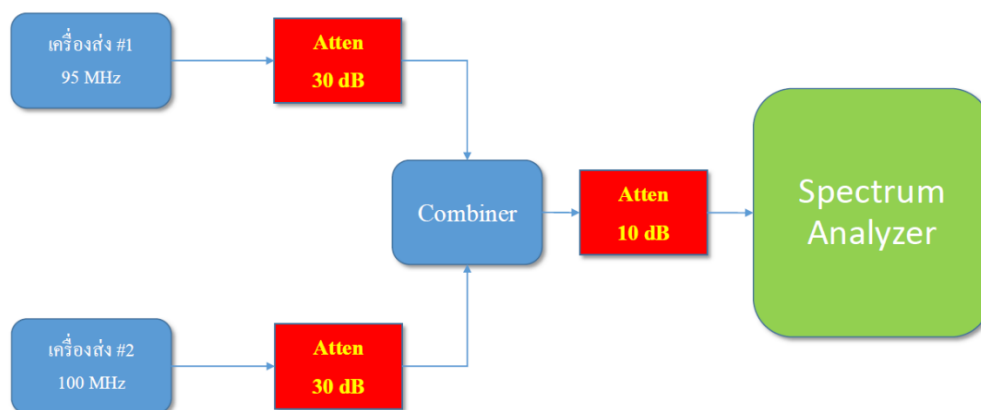
ในทางตรงกันข้าม หากเราตั้งความแรงที่หน้า Mixer ไม่เหมาะสม เช่น -10 dBm เราจะได้ dynamic range เพียงแค่ประมาณ -60 dBc นั้นหมายความว่า ถึงแม้สัญญาณที่เรานำมาทดสอบจะไม่มีสัญญาณอินเตอร์มอดูเลชันเลย เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเครื่องนี้ก็สร้างสัญญาณอินเตอร์มอดูเลชันให้เราที่ความแรง -60 dBc และถ้าใช้เกณฑ์การแพร่แปลกปลอมที่ -70 dBc เราก็จะตัดสินอย่างผิดพลาดว่ามีการแพร่แปลกปลอมที่เกินมาตรฐาน

หากเราไม่สามารถหาข้อมูลดังที่แสดงในรูปที่ 19 นี้ได้ อีกวิธีหนึ่งที่จะหาจุดที่เหมาะสมคือ ให้ตั้งค่าที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมให้เห็นความถี่ที่ออกอากาศ และความถี่ที่เกิดอินเตอร์มอดูเลชัน แล้วทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. วัดสัญญาณจากสถานีที่เราสนใจ อ่านค่าระดับความแรงของสัญญาณ (โดยสัญญาณจากสถานีอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องควรอยู่ต่ำกว่าสัญญาณที่เราสนใจอย่างน้อยประมาณ 20 dB)
2. คำนวณหาความแรงที่หน้า Mixer = ระดับความแรงของสัญญาณ - ค่า Attenuation ภายในเครื่อง
3. ตั้งความแรงที่หน้า Mixer ให้ได้ประมาณ -30 dBm โดยการปรับค่า Attenuation ภายในเครื่อง (ตาม ข้อ 2.)
4. ตั้ง Reference Level เพื่อให้ยอดสูงสุดของสัญญาณอยู่ที่ประมาณช่องที่ 9-10 นับจากด้านล่าง
5. ลด RBW จนระดับสัญญาณรบกวน (DANL) อยู่ที่ประมาณช่องที่ 1 หรือต่ำกว่า (ค่า VBW ให้มีค่าเท่ากับ RBW)
6. หากปรากฏเห็นสัญญาณอินเตอร์มอดูเลชันที่หน้าจอ ให้เพิ่มค่า Attenuation ภายในเครื่อง แล้วสังเกตระดับสัญญาณอินเตอร์มอดูเลชัน หากมีการเปลี่ยนแปลง เราต้องทำการเพิ่มค่า Attenuation ภายในเครื่องจนกว่าระดับของสัญญาณอินเตอร์มอดูเลชันไม่มีการเปลี่ยนแปลง
7. ทุกครั้งที่มีการเพิ่มค่า Attenuation x dB (ตามข้อ 6) จะเห็นว่าระดับ DANL สูงขึ้น x dB เท่ากัน ดังนั้นต้องทำการลด RBW เพื่อให้ DANL อยู่ที่ระดับช่องที่ 1 หรือต่ำกว่า (ตามข้อ 2) หากไม่สามารถลดระดับ DANL ได้ตามต้องการ อาจจะต้องเปลี่ยนตำแหน่งที่ทำกรวัด หรือเปลี่ยนเครื่องมือวัด (เครื่องวัดบางเครื่องมี Dynamic range น้อยกว่า 70 dB)

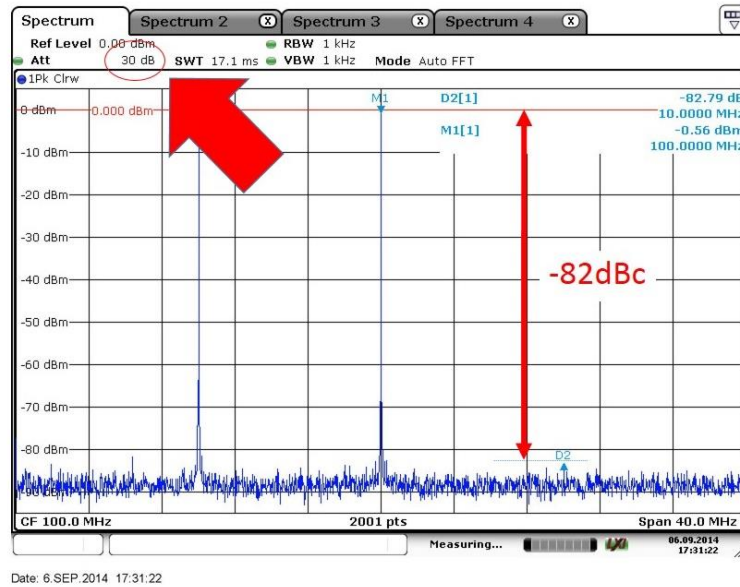
เมื่อทำตามขั้นตอนดังที่กล่าวแล้ว จึงมั่นใจได้ว่าค่าระดับสัญญาณอินเตอร์มอดูเลชันที่อ่านได้เป็นค่าที่มาจากภายนอกเครื่องจริงๆ

เพื่อให้เห็นผลของการตั้งระดับความแรงที่หน้า Mixer ไม่ถูกต้องแล้วจะส่งผลกระทบต่ออย่างไร เราได้ทำการสร้างสถานการณ์ของสัญญาณที่ปราศจากอินเตอร์มอดูเลชัน โดยนำเครื่องส่งวิทยุมา 2 เครื่อง ผ่านการลดทอน 30 dB ก่อนจะทำการรวมสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อลดทอนสัญญาณจากแต่ละเครื่อง ที่จะย้อนไปเข้าอีกเครื่องหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 20

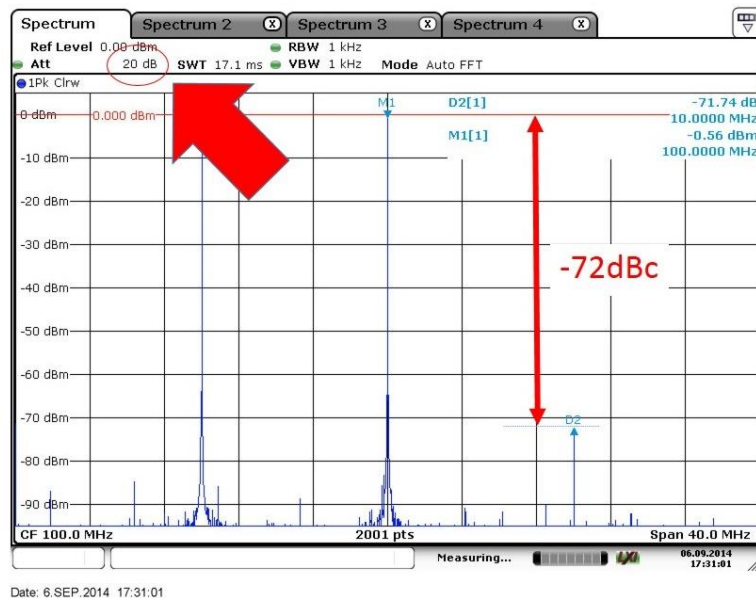


รูปที่ 20 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อสร้างสัญญาณที่ปราศจากอินเตอร์มอดูเลชัน สำหรับใช้ทดสอบเครื่องวัด

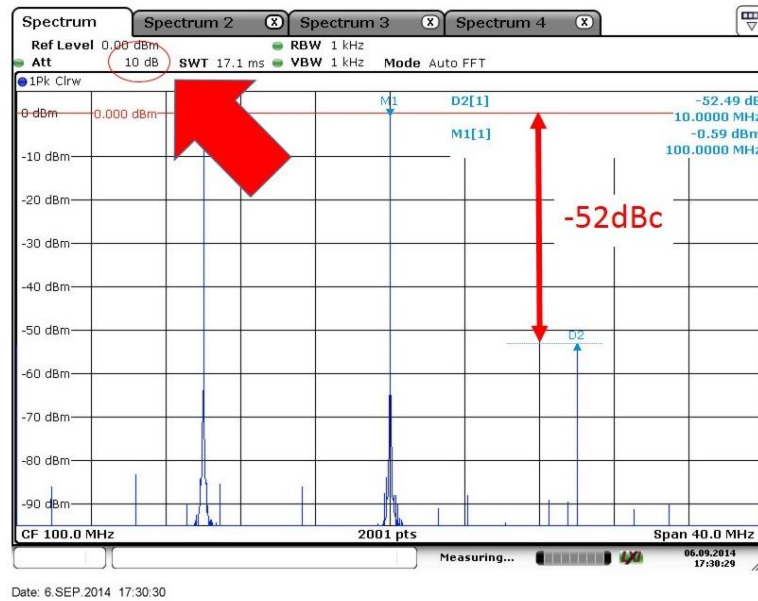
จากรูปที่ 21 ถึงรูปที่ 23 มีการปรับแก้ Attenuation ภายในเครื่องเท่านั้น จะเห็นได้ชัดเลยว่าเมื่อเราให้สัญญาณที่หน้า Mixer แรงกว่าจุดที่เหมาะสม จะเริ่มเกิดมี IM ที่เครื่องวัดสร้างขึ้นมาเอง ดังนั้นจึงเป็นประเด็นที่ต้องระวังเป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 21 เมื่อความแรงที่หน้า Mixer มีเป็นค่าที่เหมาะสมประมาณ $0 - 30 = -30$ dBm จะเห็นว่าสัญญาณที่ใช้ทดสอบมี IM ปนมาน้อยกว่า -80 dBc



รูปที่ 22 เมื่อลดค่า Attenuation เหลือ 20 dB ทำให้ความแรงที่หน้า Mixer เพิ่มขึ้นเป็น -20 dBm จะเห็นว่า IM เกิดมากขึ้น



Date: 6.SEP.2014 17:30:30

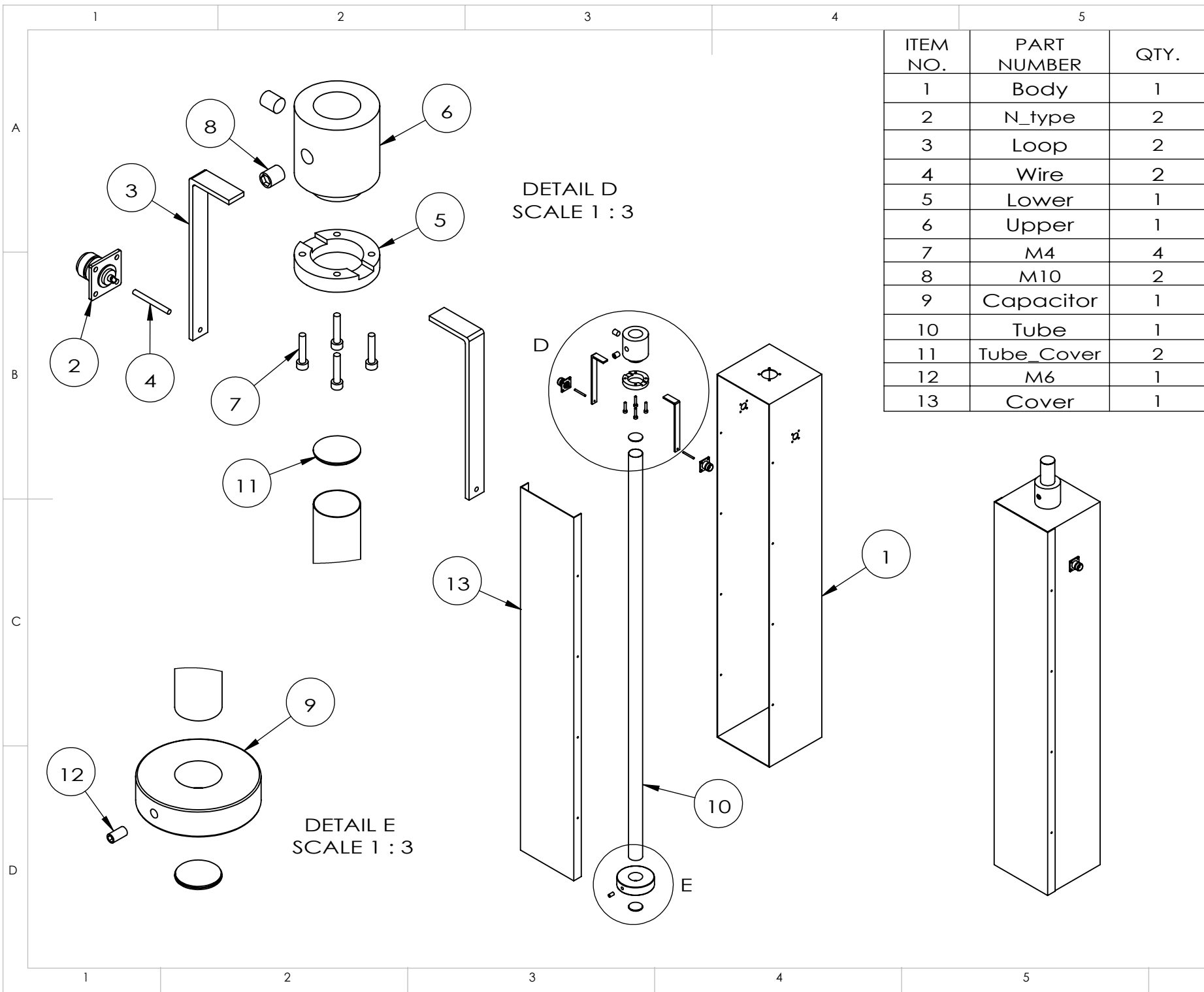
รูปที่ 23 เมื่อลดค่า Attenuation เหลือ 10 dB ทำให้ความแรงที่หน้า Mixer เพิ่มขึ้นเป็น -10 dBm ซึ่งมากเกินไป และเป็นสถานการณ์ที่ไม่ถูกต้องเป็นอย่างยิ่ง จะเห็นว่าค่า IM ที่แสดงที่หน้าจอขณะนี้มีค่าสูงมาก ทำให้เราได้ค่าการแพร่ แปลกปลอมเพียง -52 dBc ซึ่งแน่นอนว่าไม่ผ่านเกณฑ์ -70 dBc

10. อ้างอิง

- [1] A. Bruce Carlson and Paul B. Crilly, “Communication Systems,” McGraw-Hill, 5th Edition. Boston, 2010.
- [2] Christoph Rauscher, “Fundamental of Spectrum Analysis,” Rohde & Schwarz GmbH & Co, KG, 7th Edition, Munchen, 2011.
- [3] Lloyd Butler, “Intermodulation Performance and Measurement of Intermodulation Component,” Available online at <http://users.tpg.com.au/users/ldbutler/Intermodulation.htm>.
- [4] Agilent Technologies, “Spectrum Analysis Basics: Application Note 150,” Available online at <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-0292.pdf>.
- [5] Agilent Technologies, “Optimizing Dynamic Range for Distortion Measurements: Product Note,” Available online at <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5980-3079EN.pdf>.

ภาคผนวก ก

โครงสร้างวงจรกรองผ่านแถบ



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Body	1
2	N_type	2
3	Loop	2
4	Wire	2
5	Lower	1
6	Upper	1
7	M4	4
8	M10	2
9	Capacitor	1
10	Tube	1
11	Tube_Cover	2
12	M6	1
13	Cover	1



Title:
Cavity
Bandpass
Filter

Subtitle:
-

Draft:
PANYA HANTULA

Date:
16 September 2014

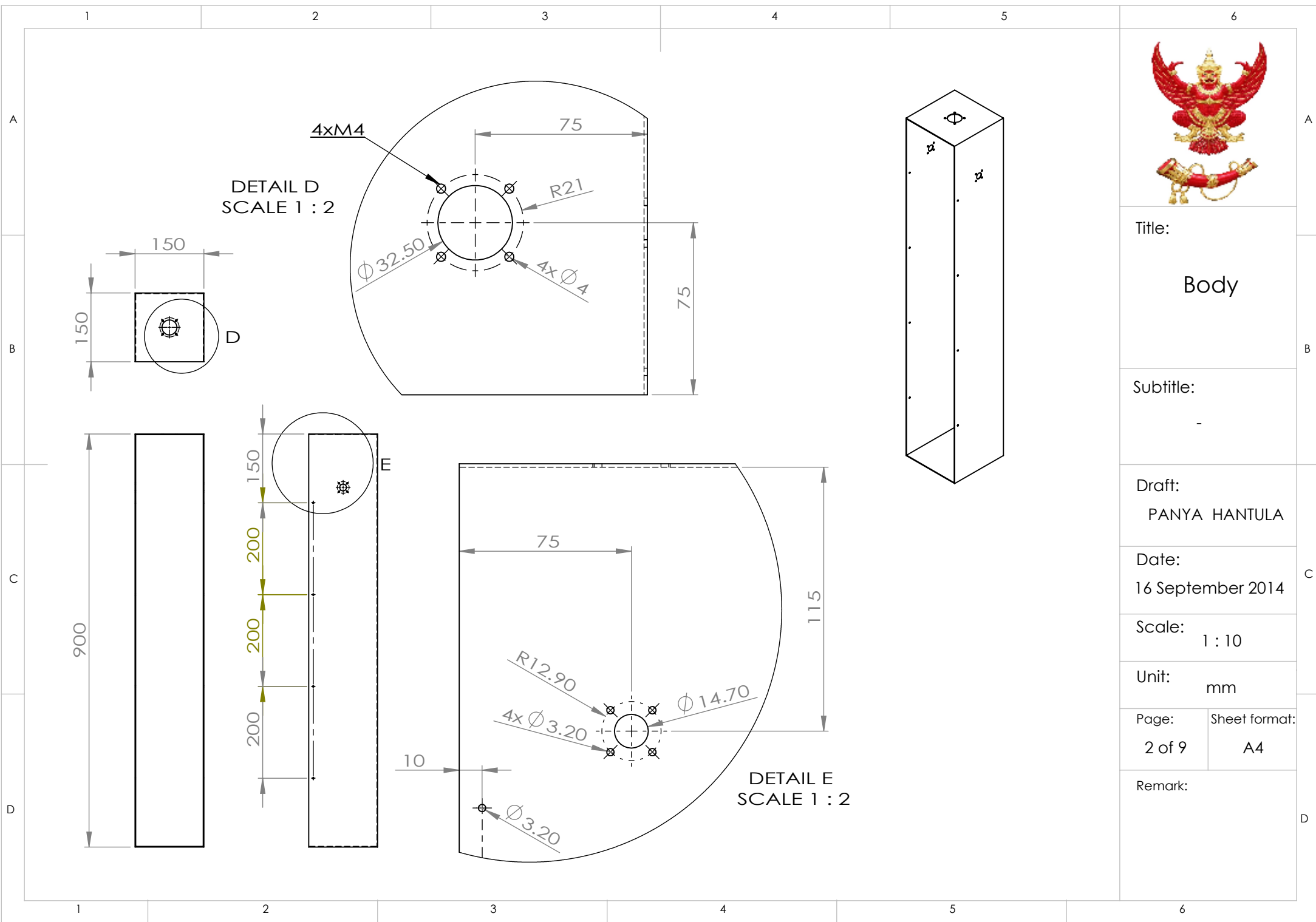
Scale:
1 : 10

Unit:
mm

Page:
1 of 9

Sheet format:
A4

Remark:



Title:

Body

Subtitle:

-

Draft:

PANYA HANTULA

Date:

16 September 2014

Scale:

1 : 10

Unit:

mm

Page:

2 of 9

Sheet format:

A4

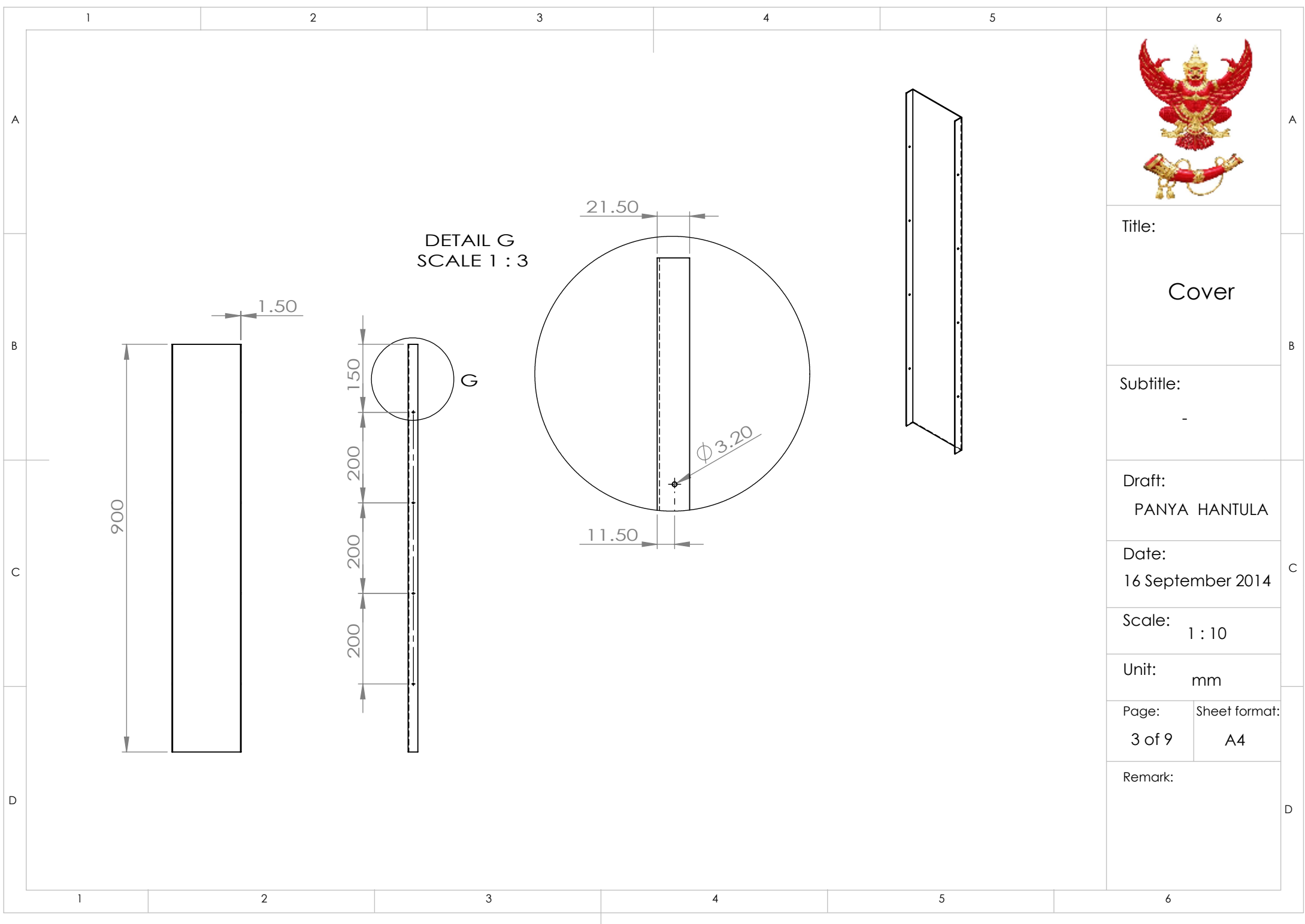
Remark:

A

B

C

D



Title:

Cover

Subtitle:

-

Draft:

PANYA HANTULA

Date:

16 September 2014

Scale:

1 : 10

Unit:

mm

Page:

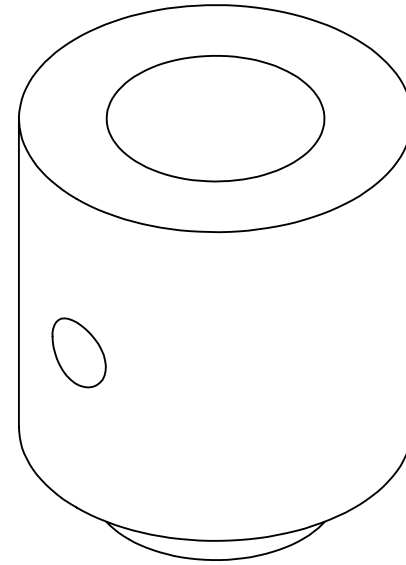
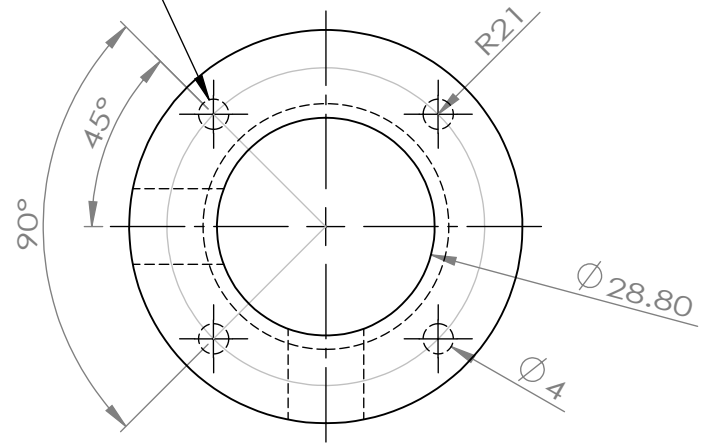
3 of 9

Sheet format:

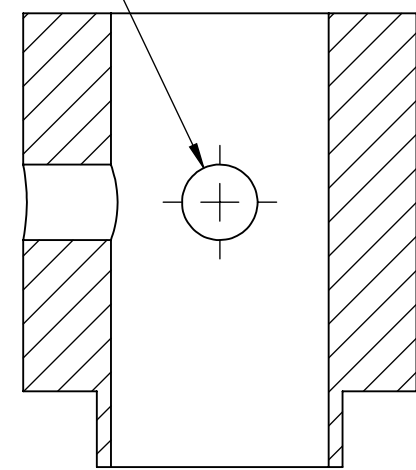
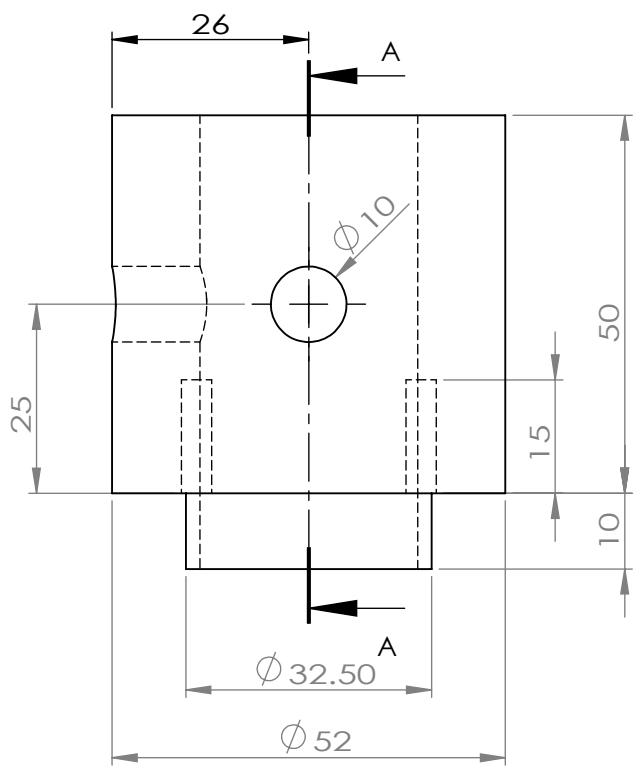
A4

Remark:

4 x Helic
Size : M4



2 x Helic
Size : M10



Title:

Upper

Subtitle:

-

Draft:

PANYA HANTULA

Date:

16 September 2014

Scale:

1 : 1

Unit:

mm

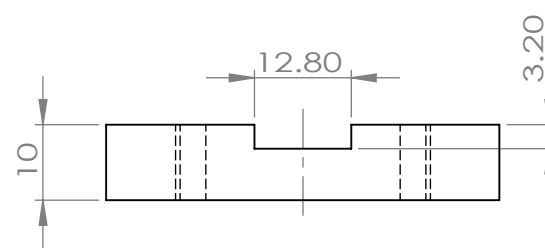
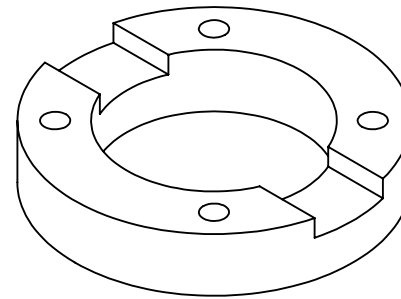
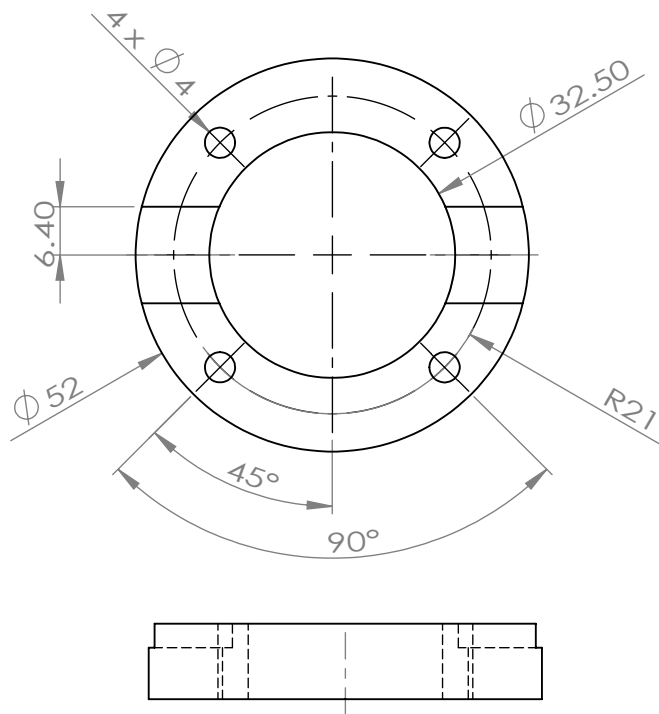
Page:

4 of 9

Sheet format:

A4

Remark:



Title:

Lower

Subtitle:

-

Draft:

PANYA HANTULA

Date:

16 September 2014

Scale:

1 : 1

Unit:

mm

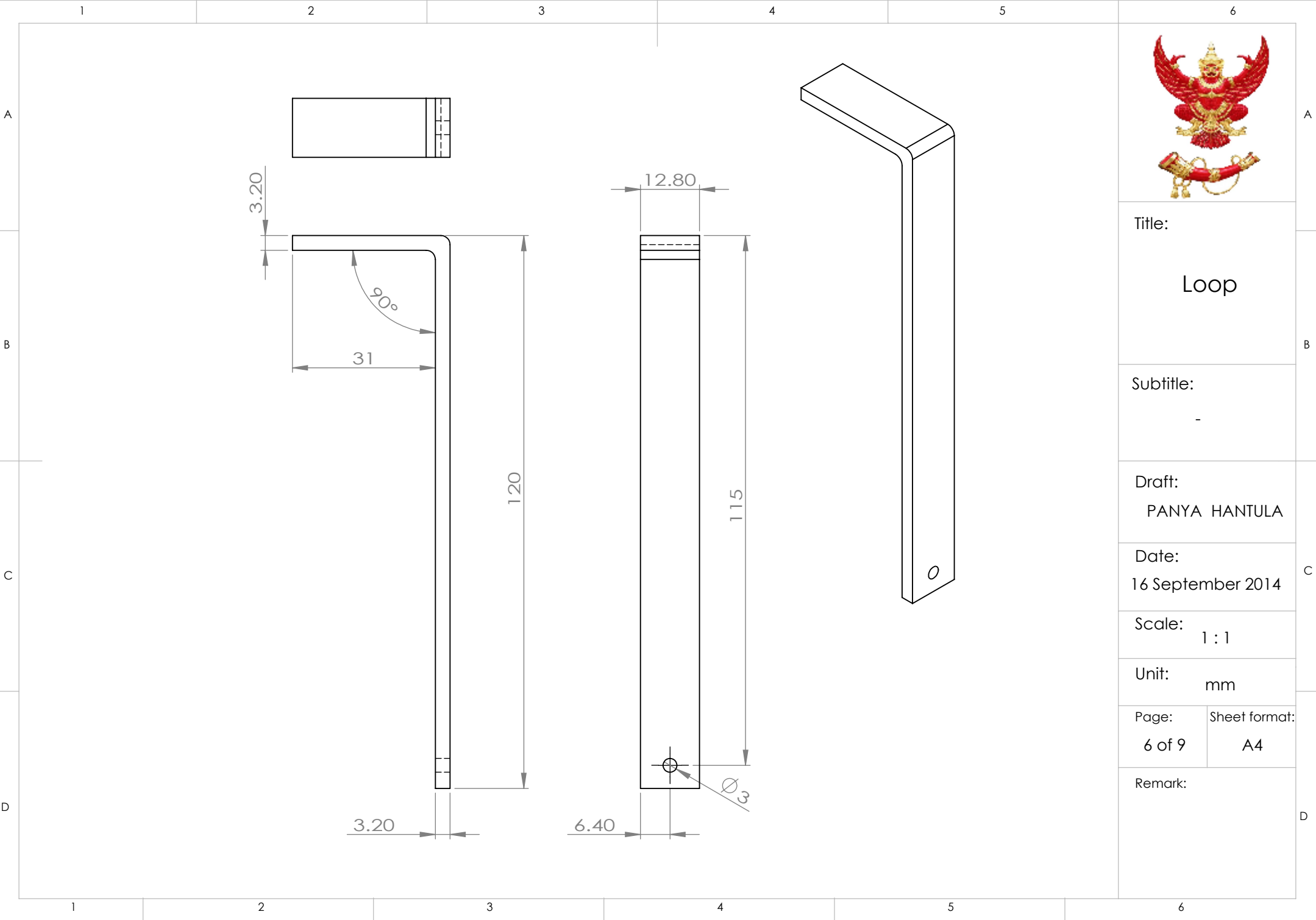
Page:


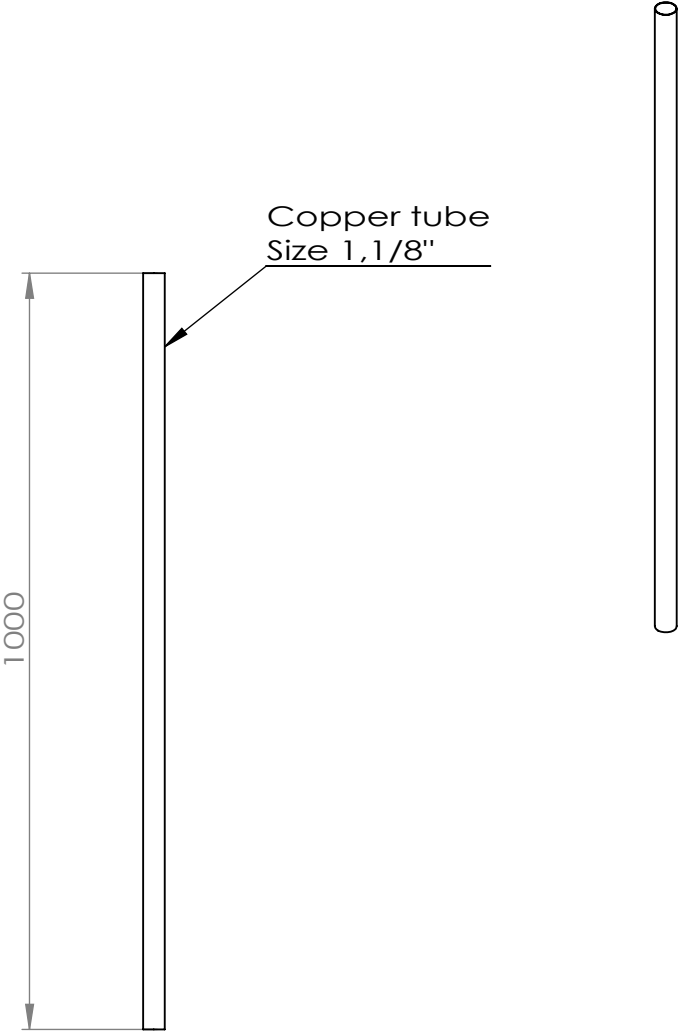
5 of 9

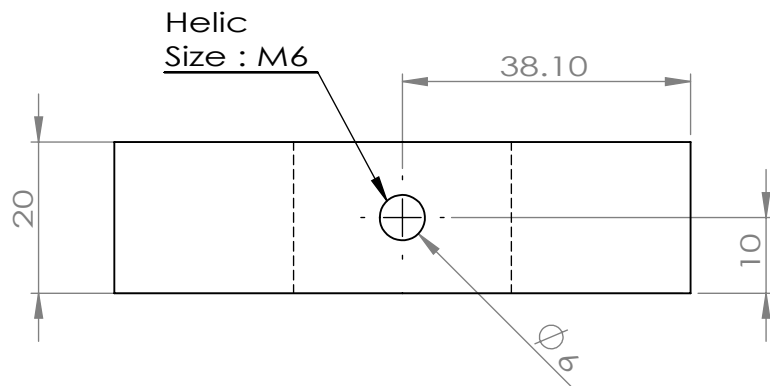
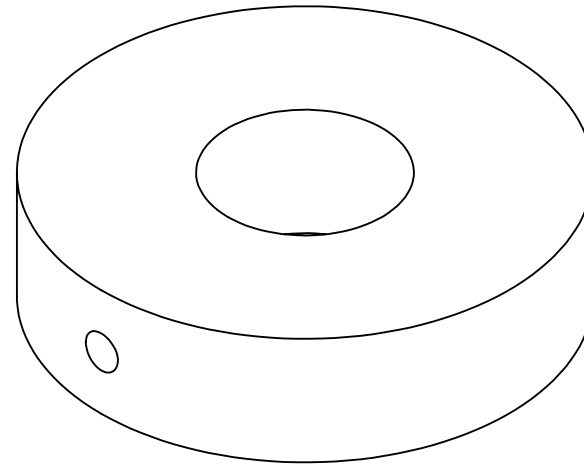
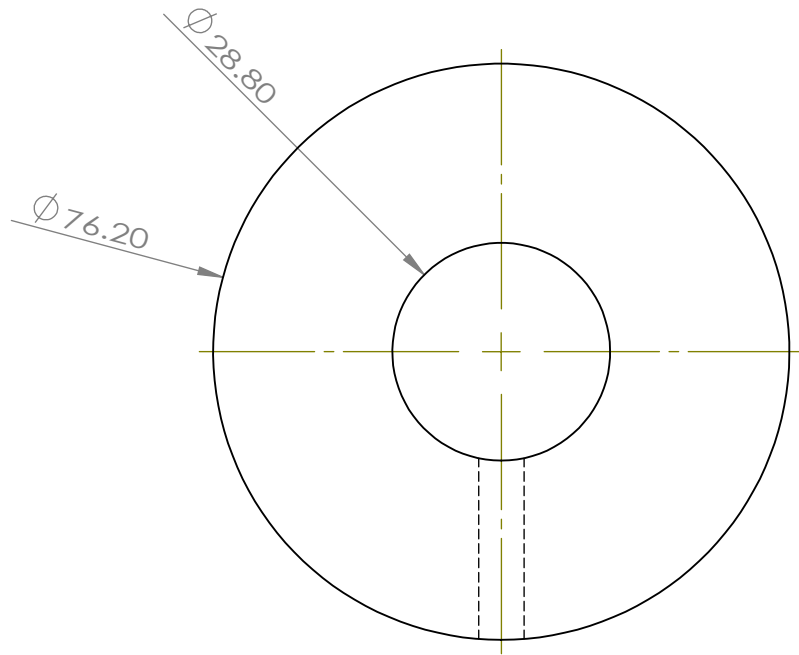
Sheet format:

A4

Remark:



	1	2	3	4	5	6
A						
B						Title: Tube
C						Subtitle: -
D						Draft: PANYA HANTULA
						Date: 16 September 2014
						Scale: 1 : 10
						Unit: mm
	Page: 7 of 9				Sheet format: A4	
	Remark:					
	1	2	3	4	5	6



Title:

Capacitor

Subtitle:

-

Draft:

PANYA HANTULA

Date:

16 September 2014

Scale:

1 : 1

Unit:

mm

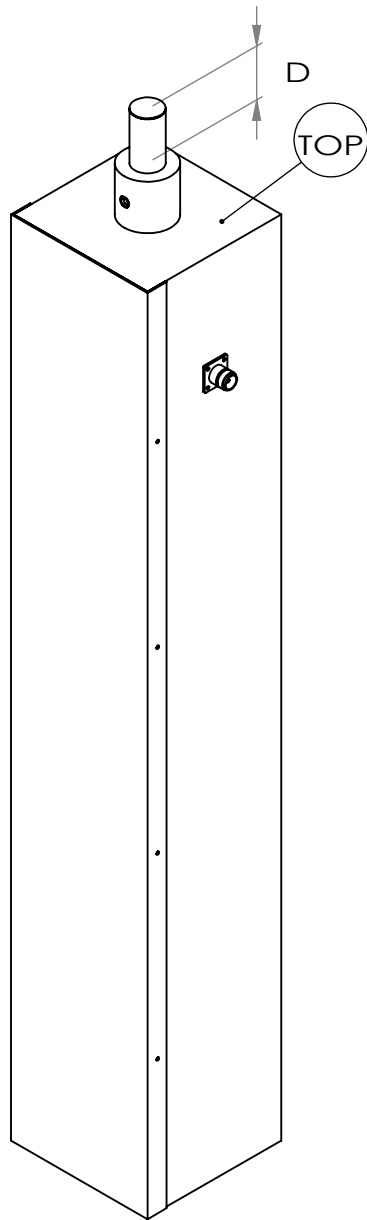
Page:

8 of 9

Sheet format:

A4

Remark:



Frequency (MHz)	Distance (D)
88.00	210
89.00	218
90.00	228
91.00	237
92.00	246
93.00	254
94.00	262
95.00	271
96.00	279
97.00	287
98.00	294
99.00	301
100.00	309
101.00	315
102.00	232
103.00	330
104.00	337
105.00	344
106.00	350
107.00	357

วางอุปกรณ์นี้ในแนวตั้งเท่านั้น



Title:

Detail

Subtitle:

88.00 - 108.00 MHz

Draft:

PANYA HANTULA

Date:

16 September 2014

Scale:

1 : 6

Unit:

mm

Page:

9 of 9

Sheet format:

A4

Remark: