

เครื่องมือและการทดสอบมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับการ ทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง

สาวัดดี บุญยะเวช

ศูนย์ออกแบบระบบบิเล็กทรอนิกส์และการประมวลสัญญาณ (CEDdSP)

คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

email: paru4802@hotmail.com โทรศัพท์ 029883655 ต่อ 1135

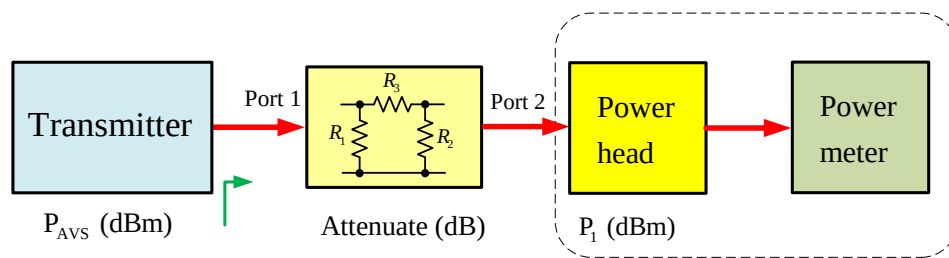
หลังจากคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ได้ออกประกาศ กสทช. เรื่อง หลักเกณฑ์การอนุญาตทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง พ.ศ. 2555 ซึ่งกำหนดให้ผู้ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง จะต้องยื่นคำขอรับใบอนุญาตตามกฎหมายว่าด้วยวิทยุคมนาคมให้แล้วเสร็จภายในหนึ่งปีนับตั้งแต่วันที่ได้รับอนุญาตให้ทดลองประกอบกิจการหรือตามระยะเวลาที่คณะกรรมการกำหนดเป็นอย่างอื่น โดยเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงต้องมีลักษณะทางเทคนิคตามมาตรฐานที่คณะกรรมการกำหนด ผู้ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียงจะต้องดำเนินการทดสอบมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ใช้ในการทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียงจากสำนักงาน กสทช. หรือห้องปฏิบัติการทดสอบที่ได้ลงทะเบียนเป็นห้องปฏิบัติการทดสอบกับสำนักงาน กสทช. ตามประกาศ กสทช. การทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวข้องกับการวัดสัญญาณวิทยุความถี่สูงและกำลังสูง ผู้ปฏิบัติงานทดสอบต้องมีความรู้และทักษะการใช้เครื่องมือ นอกจากนี้ถ้าผู้ ประกอบการมีความรู้ทางเทคนิคเบื้องต้น พร้อมกับเข้าใจหลักการและความจำเป็นของการทดสอบก็จะทำให้เกิดประโยชน์แก่องค์กร สาธารณะ และประเทศชาติตามลำดับ ผู้ประกอบการอาจใช้เป็นข้อมูลเพื่อทำความเข้าใจและมีแนวทางการประกอบการให้สอดคล้องกับข้อปฏิบัติของสำนักงาน กสทช.

การทดสอบมาตรฐานของเครื่องส่งวิทยุประกอบด้วยการทดสอบ 5 หัวข้อ ปัจจุบันใช้เครื่องมือวัดหลักอยู่ 2 ชนิดคือมิเตอร์วัดกำลังสัญญาณวิทยุ (RF power meter) และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณวิทยุ (RF signal analyzer) หรือเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer) ซึ่งทำงานเกี่ยวเนื่องกัน เช่นกำลังสัญญาณวิทยุซึ่งวัดได้จากมิเตอร์วัดกำลังซึ่งเป็นหัวข้อแรกของการทดสอบ (กำลังส่งไม่เกิน 500 วัตต์) จะใช้เป็นระดับอ้างอิงของสเปกตรัมมาสก์ (spectral mask) ของการทดสอบการแพร่รบกวนแถบ หรือใช้เพื่อคำนวณระดับการจำกัดสัญญาณของการแพร่แปลกปลอม

วิธีการทดสอบและเครื่องมือ

1. กำลังคลื่นพาทที่กำหนด (Rated carrier power)

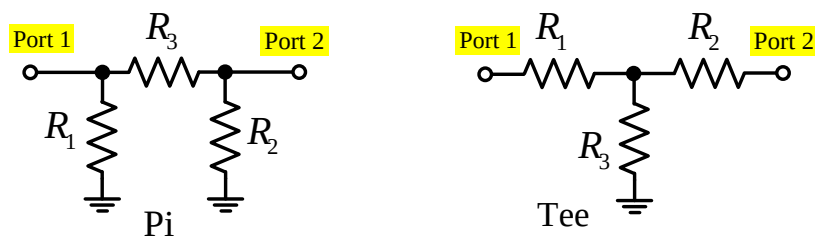
การวัดกำลังสัญญาณคลื่นพาทจากเครื่องส่งวิทยุ (ตามข้อกำหนด ETSI EN 302 018-1 v1.2.1) สามารถทำได้ดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้คือ อุปกรณ์ลดทอนกำลังงานคลื่นวิทยุ (attenuator) สายนำสัญญาณ (transmission line) สำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน และมีเตอร์วัดกำลังงานคลื่นวิทยุ นอกจากนี้อาจต้องมีตัวแปลงหัวต่อสัญญาณ (adapter) เนื่องจากหัวต่อ (connector) ของสายส่งต่างชนิดกัน



รูปที่ 1 การวัดกำลังงานคลื่นพาทของเครื่องส่งวิทยุด้วยมิเตอร์วัดกำลัง

1.1 อุปกรณ์ลดทอนกำลังงานคลื่นวิทยุ

การวัดกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุซึ่งมีกำลังส่งไม่สูงมากอาศัยอุปกรณ์ลดทอนกำลังคลื่นวิทยุ ทำหน้าที่ลดกำลังคลื่นวิทยุให้มีขนาดเหมาะสม ก่อนที่จะจ่ายสัญญาณซึ่งถูกลดทอนกำลังให้กับหัววัดกำลังงานของมิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุ โดยทั่วไปตัวลดทอนกำลังซึ่งใช้กับสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลมีลักษณะเป็นวงจรตัวต้านทานต่อกับในแบบไพ (Pi) หรือแบบที (Tee) ดังแสดงในรูปที่ 2 อุปกรณ์ลดทอนชนิดทนกำลังงานสูงมักจะมีโครงสร้างแบบไพ และอาจไม่สามารถสลับพอร์ตใช้งานได้เหมือนกับอุปกรณ์ลดทอนชนิดที่มีอัตราทนกำลังต่ำๆ เนื่องจากอัตราทนกำลังของตัวต้านทานที่พอร์ต 1 (R_1) จะมีค่าเท่ากับอัตราทนกำลังของตัวลดทอน (เช่น 1 กิโลวัตต์) ในขณะที่อัตราทนกำลังของตัวต้านทานที่พอร์ต 2 (R_2) อาจมีค่าต่ำกว่ามาก

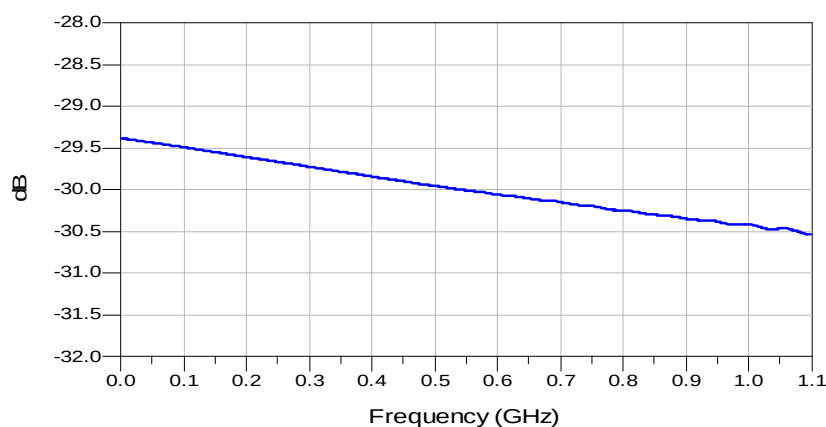


รูปที่ 2 วงจรลดทอนกำลังแบบ"ไพ" และแบบ"ที"

สำหรับวงจรลดทอนกำลังแบบไพ ตัวต้านทาน R_1 (ซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับ R_2) และ R_3 คำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \kappa &= 10^{\left(\frac{A}{20}\right)} \\ R_1 &= R_2 = Z_0 \left(\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \right) \\ R_3 &= \left(\frac{Z_0}{2} \right) \left(\frac{\kappa^2 - 1}{\kappa} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ A คืออัตราลดทอนในหน่วย dB และ Z_0 คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของระบบ เช่น 50Ω ถ้าอัตราลดทอนกำลังเท่ากับ 30 dB เราจะคำนวณได้ว่า $R_1 = R_2 = 53.266 \Omega$ และ $R_3 = 789.799 \Omega$ การทดสอบเครื่องส่งวิทยุกำลังสูงอาจต้องใช้อุปกรณ์ลดทอนกำลังมากกว่า 1 ตัว โดยทั่วไปอัตราลดทอนสูงสุดของตัวลดทอนกำลังสูงสำหรับสายนำสัญญาณโคแอกเซียลที่มีจำหน่ายจะมีค่าเท่ากับ 30 dB เพื่อให้กำลังงานตกกระทบ (incident power) หัววัดกำลังคลื่นวิทยุ (power head) ของมิเตอร์วัดกำลังมีขนาดเหมาะสมจำเป็นต้องใช้ตัวลดทอนกำลังต่ำต่อเพิ่มทีพอร์ต 2 ของตัวลดทอนกำลังสูง ในทางปฏิบัติคุณสมบัติของอุปกรณ์ลดทอนกำลังมีการเปลี่ยนค่าตามความถี่ เนื่องจากความเหนี่ยวนำแฝง (parasitic inductance) และตัวเก็บประจุแฝง (parasitic capacitance) ของอุปกรณ์ ในการวัดแบบแถบความถี่กว้าง เช่นการแพร่แปลกปลอม ต้องมีการชดเชยคุณสมบัติซึ่งเปลี่ยนตามความถี่ของอุปกรณ์ลดทอนกำลังประกอบสายนำสัญญาณให้เหมาะสมจึงจะได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ตัวอย่างการวัดผลตอบแทนของความถี่ (dB[S21]) ของอุปกรณ์ลดทอนกำลังขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ซึ่งมีอัตราลดทอน 30 ดบี ด้วยเครื่องวิเคราะห์เน็ตเวิร์กในช่วงความถี่ 100 kHz ถึง 1.1 GHz แสดงในรูปที่ 3

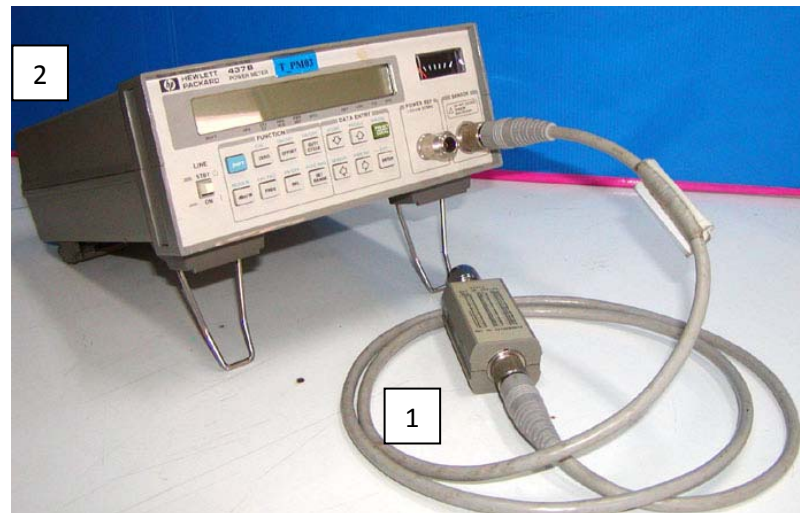


รูปที่ 3 ผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ลดทอนกำลัง Bird 1500-WA-FFEN-30

ในช่วง 100 kHz ถึง 1.1 GHz

1.2 มิเตอร์วัดกำลังงานคลื่นวิทยุ

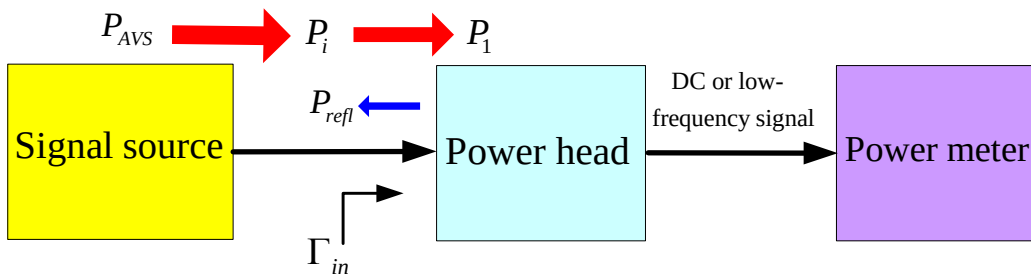
มิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุแบบสัญญาณตกกระทบประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนดังแสดงในรูปที่ 4 คือ (1) หัววัดหรืออุปกรณ์เซนเซอร์ (sensor) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณวิทยุเป็นแรงดันดีซี หรือสัญญาณความถี่ต่ำ และ (2) มิเตอร์วัดกำลังงานทำหน้าที่แปลงแรงดันดีซีหรือสัญญาณความถี่ต่ำจากหัววัด ให้แสดงเป็นค่ากำลังงานด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์และการประมวลสัญญาณ พร้อมกับทำหน้าที่แสดงค่ากำลังของสัญญาณที่วัดได้



รูปที่ 4 มิเตอร์วัดกำลังงานวิทยุ

หัววัดในปัจจุบันแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้คือ (ก) หัววัดแบบเทอร์โมคัปเปิลซึ่งอาศัยปรากฏการณ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าซีเบค (Seebeck electromotive force) จากความร้อนที่เกิดจากคลื่นวิทยุตกกระทบตัวต้าน (50Ω) ในการเปลี่ยนคลื่นวิทยุเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ(ข) ซอตต์กี (Schottky) ไดโอดโครงสร้างแบบ พีดีบี (PDB: Planar-Doped-Barrier) หัววัดแบบไดโอดอาศัยการเรียงกระแส (rectification) สัญญาณคลื่น วิทยุตกกระทบที่ตัวต้านทานต่อปลาย (termination resistor) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

บล็อกไดอะแกรมของการวัดกำลังคลื่นวิทยุตกกระทบแสดงในรูปที่ 5 ในกรณีการทดสอบกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุ แหล่งจ่ายสัญญาณ (signal source) คือคลื่นพาห์ของเครื่องส่งวิทยุซึ่งถูกลดทอนกำลังลงด้วยอุปกรณ์ลดทอนกำลัง (หัวข้อ 1.1) กำลังงานของแหล่งจ่ายสัญญาณต้นทางเรียกว่ากำลังงานที่มีได้ หรือ P_{AVS} (available power) คลื่นวิทยุซึ่งเดินทางถึงหัววัดเรียกว่ากำลังงานคลื่นตกกระทบ (incident wave) หรือ P_i สัญญาณวิทยุที่ตกกระทบส่วนใหญ่จะกลายเป็นสัญญาณอินพุต P_i ของหัววัด มีบางส่วนสะท้อนกลับไปที่แหล่งจ่าย กำลังงานของคลื่นสะท้อนกลับ (reflected wave) เรียกว่า P_{refl} สัญญาณสะท้อนกลับมีขนาดเท่าใด จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient) หรือ Γ_{in} ของหัววัด สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีลักษณะเป็นเลขเชิงซ้อนที่มีขนาด (magnitude) ต่ำกว่า 1 มากๆ ในกรณีอุดมคติสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเท่ากับศูนย์



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของการวัดกำลังงานคลื่นวิทยุตกกระทบ

ความสัมพันธ์ของกำลังงานตกกระทบที่หัววัดและกำลังงานสะท้อนกลับจากหัววัดในกรณีอุดมคติถ้าสมมติว่าระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและหัววัดไม่มีการสูญเสียใดๆ เราได้ความสัมพันธ์ของกำลังสัญญาณวิทยุคือ

$$P_{AVS} = P_i = P_1 + P_{refl} \quad (2)$$

และ

$$P_{refl} = |\Gamma_{in}|^2 \cdot P_i = P_i - P_1 \quad (3)$$

หรือ

$$P_1 = (1 - |\Gamma_{in}|^2) \cdot P_i \quad (4)$$

สัญญาณอินพุต P_i ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความสูญเสียของวัสดุที่ใช้ประกอบเป็นตัวเซนเซอร์ และส่วนหนึ่งสูญเสียไปเนื่องจากการแผ่คลื่น ดังนั้นสัญญาณบางส่วนของ P_i ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\eta_e (1 - |\Gamma_{in}|^2) \cdot P_i$ จะเป็นสัญญาณอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการทำงานของตัวเซนเซอร์ (เทอร์โมคัปเปิลหรือชอตต์กีไดโอด) และขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพหรือ η_e ของตัวเซนเซอร์ ในกรณีอุดมคติเซนเซอร์ $\eta_e = 1$ หัววัดกำลังงานมีพารามิเตอร์ประจำตัวคืออัตราส่วนของสัญญาณตกกระทบต่อสัญญาณที่เข้าถึงตัวเซนเซอร์ซึ่งเรียกว่าสัมประสิทธิ์การปรับเทียบ (calibration factor) K_b โดยมี

$$K_b = \eta_e (1 - |\Gamma_{in}|^2) \quad (5)$$

การปรับเทียบหรือการคาลิเบรต (calibrate) ทำเพื่อชดเชยข้อจำกัดที่กล่าวมาเพื่อให้เราวัด P_i ได้อย่างถูกต้อง หัววัดของมิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุในปัจจุบันทำการคาลิเบรตโดยอัตโนมัติเมื่อต่อหัววัดเข้ากับแหล่งจ่ายสัญญาณมาตรฐานประจำเครื่อง พร้อมกับป้อนตัวเลขความถี่ที่ต้องการใช้งาน ถ้ากำลังงานที่อ่านได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์มีค่าเท่ากับ P_M มิเตอร์จะปรับแก้เป็นคลื่นตกกระทบชั่ววินาทีของหัววัดได้เท่ากับ

$$P_i = \frac{P_M}{K_b} \quad (6)$$

การคาลิเบรตเพื่อชดเชยความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดก่อนทำการวัดจึงเป็นเรื่องจำเป็น ในปัจจุบัน การปรับเทียบทำเพื่อกำหนดความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัด เมื่อผู้ใช้ทำการปรับเทียบไมโครคอนโทรลเลอร์ในตัวมิเตอร์จะอ่าน K_b ของหัววัดที่ความถี่ที่กำหนดจากหน่วยความจำแบบรอม (ROM) ภายในหัววัดและทำการปรับระดับอินพุตเท่ากับศูนย์ และชดเชยตัวเลข K_b โดยอัตโนมัติ เราอาจพิจารณาผลของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดจากตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 1 ถ้าหัววัดกำลังสัญญาณวิทยุมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) เท่ากับ 1.11 จงคำนวณหา กำลังงานอินพุตของหัววัด (P_i) ถ้าแหล่งจ่ายสัญญาณจ่ายกำลังเอาต์พุต (P_{AVS}) เท่ากับ 1 mW เราคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหัววัดได้จากความสัมพันธ์

$$|\Gamma_{in}| = \rho = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} = 0.052$$

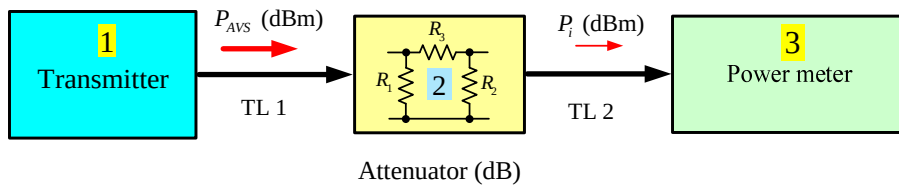
จากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหัววัด ทำให้เราคำนวณกำลังสัญญาณสะท้อนกลับได้

$$P_{refl} = |\Gamma|^2 P_{AVS} = 2.718 \mu W$$

และกำลังงานอินพุตของหัววัดคือ $P_i = 1 \text{ mW} - 2.718 \mu W = 0.997 \text{ mW}$ จะเห็นว่าถ้าไม่มีการชดเชยด้วยการปรับเทียบ เราจะได้ผลการวัดที่คลาดเคลื่อนไปประมาณ 2.7 ไมโครวัตต์

1.3 การวัดกำลังงานคลื่นวิทยุในทางปฏิบัติ

การวัดกำลังงานของเครื่องส่งวิทยุ (เช่นเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็มย่าน 87.5-108 MHz) แสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 6 โดยหมายเลข (1) คือเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง (2) คืออุปกรณ์ลดทอนกำลังงานคลื่นวิทยุ (ซึ่งรวมค่าความสูญเสียของสายนำสัญญาณ TL1 TL2 และตัวแปลงข้อต่อทั้งหมดที่ใช้ในการต่อวงจรเข้าไว้ด้วย) และ (3) คือมิเตอร์วัดค่ากำลังงานสัญญาณวิทยุที่ปรับเทียบหรือคาลิเบรตแล้ว กำลังคลื่นพาห้จากเครื่องส่งวิทยุหรือ P_{AVS} จะคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังงานคลื่นตกกระทบ P_i ที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุ ในการวัดจริงในห้องปฏิบัติการ ตัวเลขอัตราการลดทอนทั้งหมดสามารถกำหนด ให้เป็นค่าออฟเซต (offset) ในการแสดงผลของตัวมิเตอร์วัดกำลังสัญญาณ ซึ่งทำให้เราอ่านค่ากำลังส่งของเครื่องส่งวิทยุได้โดยตรง



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของการวัดกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุ

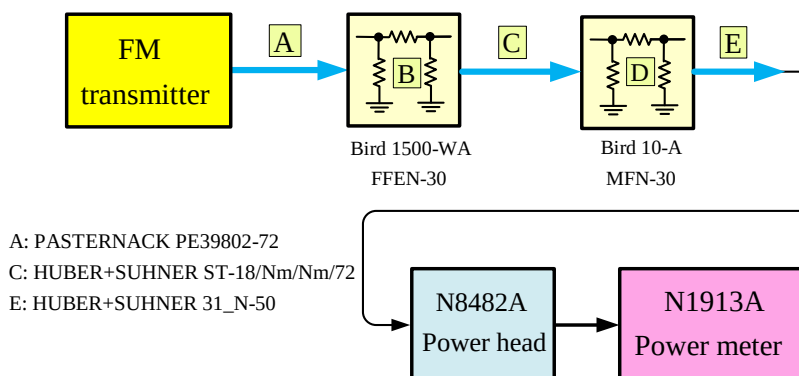
สายนำสัญญาณ TL 1 และตัวแปลงชั่วคราวต้องมีอัตราทอนแรงดันที่เหมาะสม เช่นสมมติว่าเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงมีกำลังงานเอาต์พุตเท่ากับ 57dBm หรือ 27dBW หรือ 501.187W แรงดันที่เข้าเอาต์พุตของเครื่องส่งจะเท่ากับ 447.8 V_{p-p} สายนำสัญญาณ TL1 ควรมีอัตราทอนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า 1 กิโลโวลต์เป็นต้น เราคำนวณกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุ หรือ P_{AVS} ได้จาก

$$P_{AVS(dBm)} = P_{i(dBm)} + Attenuation_{(dB)} \quad (7)$$

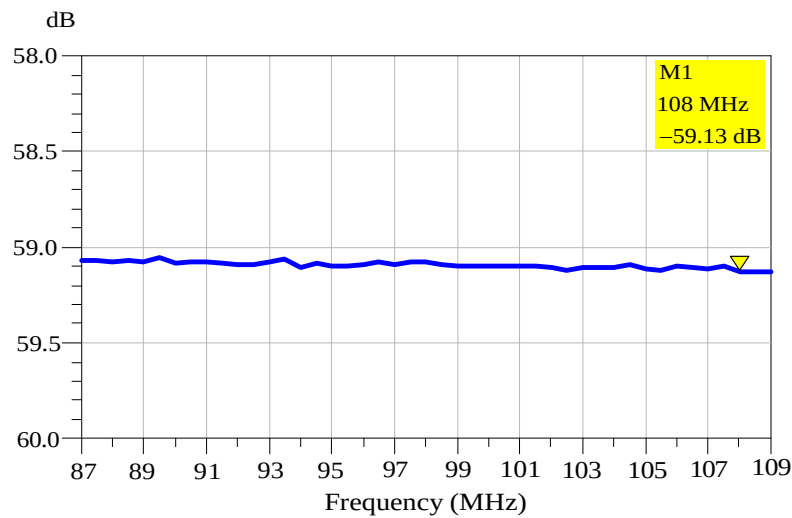
โดย $Attenuation_{(dB)}$ เป็นอัตราการลดทอนสุทธิ ซึ่งเป็นผลรวมของค่าการลดทอนของอุปกรณ์ลดทอนกำลัง ค่าความสูญเสียของสายส่งและตัวแปลงชั่วคราวที่ใช้ทั้งหมดรวมกัน อัตราการลดทอนสุทธิจะแปรตามความถี่ การคำนวณกำลังส่งตามสมการที่ (7) ต้องใช้ตัวเลขการลดทอนที่ความถี่เดียวกันกับความถี่ของคลื่นพาห์ของเครื่องส่งวิทยุ กำลังสัญญาณวิทยุในหน่วย dBm นำมาคำนวณค่ากำลังงานเป็นวัตต์ได้โดย

$$P_{AVS(W)} = (10^{-3}) 10^{(P_{AVS(dBm)})/10} \quad (8)$$

ตัวอย่างที่ 2 การวัดกำลังงานคลื่นวิทยุเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มความถี่ 108 MHz แสดงในรูปที่ 7 ถ้ามิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุอ่านขนาดสัญญาณได้เท่ากับ -2.06 dBm จงคำนวณกำลังงานคลื่นพาห์ของเครื่องส่งวิทยุ โดยคุณสมบัตการลดทอนสุทธิของอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยตัวลดทอนกำลังสัญญาณวิทยุสองตัว สายส่งสองเส้นและตัวแปลงชั่วคราวแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมแสดงการวัดค่ากำลังงานคลื่นพาห์ของเครื่องส่งวิทยุ



รูปที่ 8 การลดทอนของอุปกรณ์ลดทอนกำลังงานรวมสายนำและตัวแปลงชั่วคราวในช่วง 88-108 MHz

กำลังของสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุคำนวณได้จากสมการที่ (8) โดย

$$P_{AVS(dBm)} = -2.06 + 59.13 = 57.07 \text{ dBm}$$

$$\text{หรือ } P_{AVS(w)} = (10^{-3})10^{(57.07/10)} = 509.331 \text{ watt}$$

1.3.1 ข้อพิจารณาประกอบการวัดกำลังคลื่นพาห์

- 1.3.1.1 เนื่องจากมิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุมีการкалиเบรตทุกครั้งก่อนทำการวัด ความถูกต้องของการวัดส่วนใหญ่จึงขึ้นอยู่กับความผิดพลาดของการกำหนดค่าการลดทอนสุทธิ (ซึ่งประกอบด้วย ความสูญเสียของสายนำสัญญาณ ค่าลดทอนอุปกรณ์ลดทอนกำลัง และความสูญเสียของ ตัวแปลงชั่วคราว) ความถูกต้องแม่นยำของค่าอัตราการลดทอนในหลักทศนิยมมีผลมากต่อค่า กำลังงานที่วัดได้ เนื่องจากอัตราการลดทอนสุทธามีค่าสูง
- 1.3.1.2 ไม่ควรถอดสายนำสัญญาณ หรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ลดทอนโดยไม่จำเป็นหลังจากวัดค่าการลดทอนรวมทั้งหมด เนื่องจากแรงบิดซึ่งใช้ประกอบชั่วคราวที่ไม่เท่ากันทำให้การลดทอนใน ทศนิยมหลักที่สองเปลี่ยนแปลง ถ้าทำได้ควรใช้ประแจวัดแรงมาตรฐานในการถอดประกอบ
- 1.3.1.3 ในระหว่างการวัด กำลังงานจากเครื่องส่งวิทยุอาจจะทำให้เกิดความร้อนที่อุปกรณ์ลดทอน กำลัง ไม่ควรต่อหัววัดเข้ากับตัวลดทอนที่เกิดความร้อนโดยตรง การถ่ายเทความร้อนจากตัวลดทอนมายังหัววัดทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนเนื่องจากการจากкалиเบรตหัววัดทำที่อุณหภูมิห้อง
- 1.3.1.4 เราใช้สมการที่ (7) คำนวณกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องส่งบนสมมติฐานว่าเครื่องส่งวิทยุต่อกับโหลด (เริ่มจากสายนำสัญญาณ A ในรูปที่ 7) ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำมาก หรือมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันเข้าใกล้ 1.0

2. การแพร่แปลกปลอม (Spurious emissions)

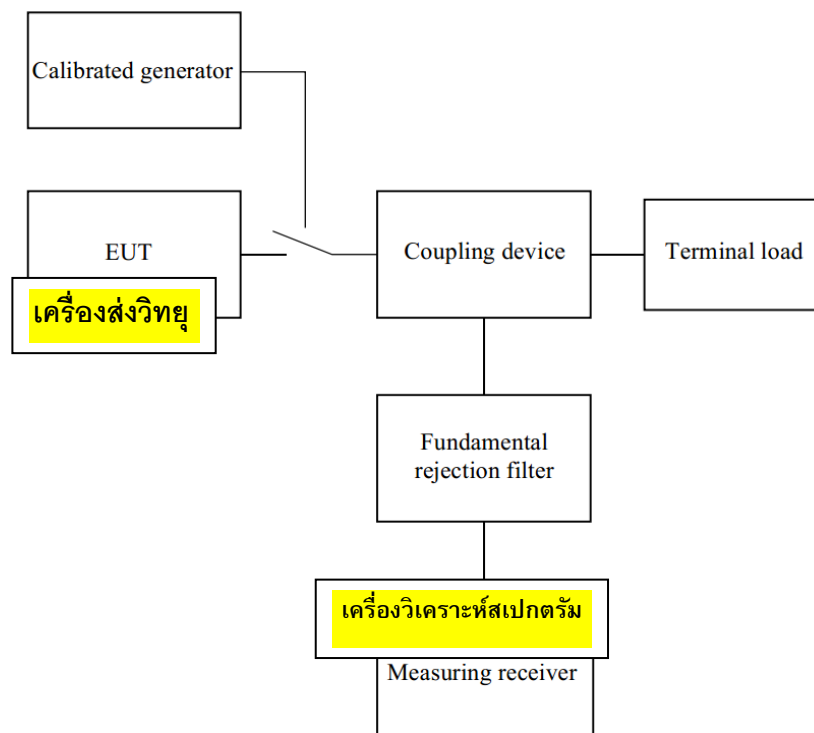
การแพร่แปลกปลอมตามข้อแนะนำ ITU-R SM.329-11 (01/2011) หมายถึงสัญญาณอื่นใดที่แพร่ ออกจากเครื่องส่งวิทยุ นอกเหนือจากสัญญาณในแบนด์วิดท์ที่กำหนดและจำเป็นของช่องสัญญาณ ซึ่งหมายรวมถึง

- (1) การแพร่ฮาร์โมนิกส์ (harmonic emissions) เป็นการแพร่คลื่นที่เกิดจากความถี่ทวีคูณหรือฮาร์โมนิกส์ของพาห်อันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรขยายสัญญาณ ไซด์แบนด์ของสัญญาณฮาร์โมนิกจะมีความถี่เบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นตามเลขฮาร์โมนิก เช่น ถ้าคลื่นพาห်มีความถี่ 100 MHz และมีความถี่เบี่ยงเบนตามมาตรฐาน ± 75 KHz สัญญาณแปลกปลอมเชิงฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 200 MHz จะมีความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ ± 150 KHz เป็นต้น
- (2) การแพร่แปลกปลอมแฝง (parasitic emissions) เป็นความถี่แปลกปลอมซึ่งถูกสร้างขึ้นจากเครื่องส่งโดยไม่เกี่ยวข้องกับความถี่และฮาร์โมนิกของคลื่นพาห်หรือกระบวนการสร้างคลื่นพาห်ของเครื่องส่งวิทยุ
- (3) อินเตอร์มอดูเลชันโปรดักส์ (intermodulation products) เป็นความถี่แปลกปลอมซึ่งถูกสร้างขึ้นใหม่จากกระบวนการผสมความถี่จากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความถี่ซึ่งถูกสร้างขึ้นอาจมีความสัมพันธ์กับคลื่นพาห်และฮาร์โมนิกส์ของคลื่นพาห်ของเครื่องวิทยุเครื่องเดียวกัน หรือเกิดจากสัญญาณที่แพร่มาจากเครื่องส่งวิทยุเครื่องที่ 2 ซึ่งอยู่ในบริเวณเดียวกันทำให้เกิดคลื่นตกกระทบในระบบสายอากาศของเครื่องส่งวิทยุเครื่องที่ 1 สัญญาณ วิทยุจากคลื่นตกกระทบที่เกิดขึ้นทำให้เกิดปรากฏการณ์อินเตอร์มอดูเลชันกลับทาง (reverse intermodulation) ขึ้นกับวงจรขยายกำลังของเครื่องส่งที่ 1
- (4) ความถี่แปลกปลอมจากกระบวนการแปลงความถี่ (frequency conversion products) ความถี่แปลกปลอมเหล่านี้มาจากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างคลื่นพาห်โดยไม่เกี่ยวกับสัญญาณที่เป็นความถี่ฮาร์โมนิกส์

วิธีการวัดการแพร่แปลกปลอมของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มตาม category B ของ ITU-R SM.329-11 (2011-01) แสดงในแบบบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 9 โดยมีย่านการวัดคือ 9 kHz ถึง 1080 MHz (ฮาร์โมนิกที่ 10 ของความถี่ 108 MHz) ในการทดสอบอาจใช้อุปกรณ์ลดทอนกำลังงานคลื่นวิทยุแทนอุปกรณ์คัปปลิง (coupling device) วงจรกรองกำจัดแถบ (fundamental rejection filter) ใช้เพื่อลดทอนกำลังงานสัญญาณความถี่มูลฐานของคลื่นพาห် ในกรณีที่เครื่องมือวัดมีพิสัยพลวัต (dynamic range) ไม่เพียงพอสำหรับการวัดสัญญาณกำลังที่มีขนาดแตกต่างกันมากๆ อย่างไรก็ตามการใช้วงจรกรองกำจัดแถบจะทำให้เกิดการลดทอนที่ความถี่อื่นและสร้างปัญหาเรื่องการชดเชยการลดทอนความถี่อื่นตามมา เราใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม หรือ

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณวิทยุ ทำงานเป็นอุปกรณ์ measuring receiver ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 9 โดยกำหนดให้แบนด์วิดท์อ้างอิงสำหรับการวัดสัญญาณคือ

- 1 kHz ระหว่างความถี่ 9 ถึง 150 kHz (RBW=1kHz, VBW=3kHz)
- 10 kHz ระหว่างความถี่ 150 kHz ถึง 30 MHz (RBW=10kHz, VBW=30kHz)
- 100 kHz ระหว่างความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz (RBW=100kHz, VBW=300kHz)
- 1 MHz เมื่อความถี่มากกว่า 1 GHz
- สำหรับการแพร่นอกแถบให้ใช้แบนด์วิดท์ 1 kHz
- ใช้ค่า VBW (Video bandwidth) เป็น 3 ถึง 5 เท่าของ RBW (Resolution bandwidth)



รูปที่ 9 การวัดการแพร่แปลกปลอมตามข้อกำหนด ITU-R SM.329-11 (01/2011)

ระดับกำลังงานของสัญญาณจากการแพร่แปลกปลอมที่เอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุต้องไม่เกิน 70 dBc หรือตัวเลขซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9) โดยให้ใช้ตัวเลขที่น้อยกว่า

$$P_{\text{spur(dBc)}} = 46 + 10 \log P_{Tx} \quad (9)$$

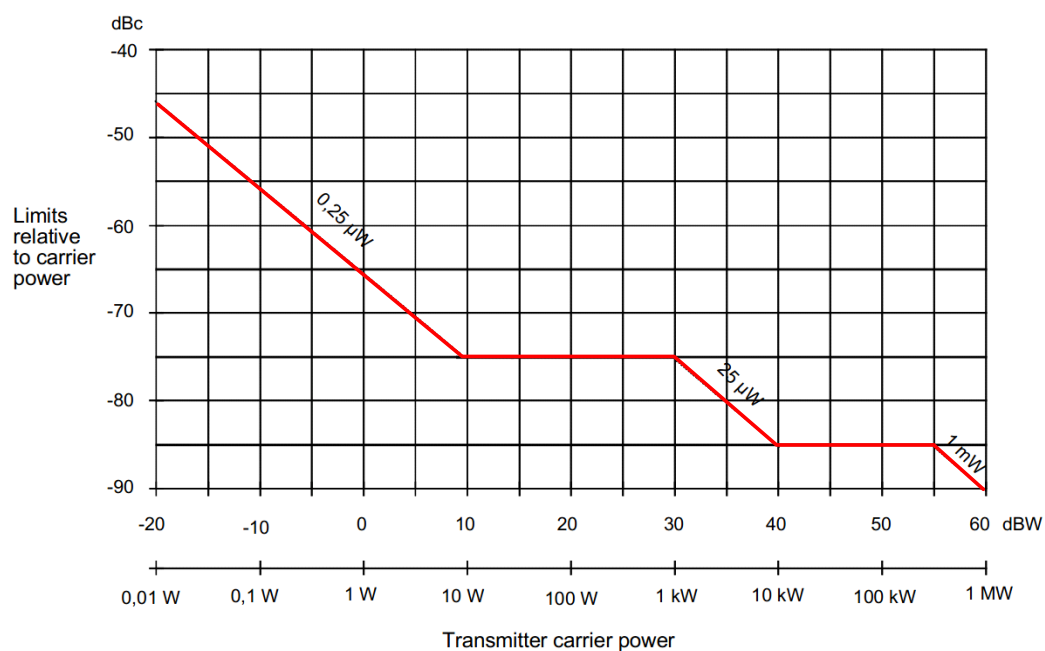
เช่น เครื่องส่งวิทยุมีกำลังส่ง 100 W หรือ 50 dBm หรือ 20 dBW จะต้องมี P_{spur} ไม่เกิน 66 dBc หรือ -16 dBm หรือ -46 dBW ถ้าเครื่องเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงมีกำลังส่ง 500 W หรือ 57 dBm (หรือ 27

dBW) จะต้องมี P_{spur} ไม่เกิน 70 dBc (คำนวณตามสมการที่ (3) ได้เท่ากับ 73 dB จึงใช้ค่า 70 dBc ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่เบากว่าหรือ less stringent) หรือมีขนาด P_{spur} ไม่เกิน -13 dBm (หรือ -43 dBW)

การแพร่แปลกปลอมของวิทยุกระจายเสียงมีข้อกำหนดเพิ่มเพื่อคุ้มครองการใช้ความถี่วิทยุในกิจการเดินอากาศของอากาศยาน (aeronautical radio) ในช่วงความถี่ 108-137 MHz แสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 10 เป็นกราฟของระดับของสัญญาณแพร่แปลกปลอมเมื่อเทียบกับคลื่นพาห์

FM broadcasting	$87.5 \text{ MHz} \leq f \leq 137 \text{ MHz}$: -36 dBm for $P < 9 \text{ dBW}$ 75 dBc for $9 \text{ dBW} \leq P < 29 \text{ dBW}$ -16 dBm for $29 \text{ dBW} \leq P < 39 \text{ dBW}$ 85 dBc for $39 \text{ dBW} \leq P < 50 \text{ dBW}$ -5 dBm for $50 \text{ dBW} \leq P$ $30 \text{ MHz} < f < 87.5 \text{ MHz}$ and $137 \text{ MHz} < f < (\text{see recommends 2.5})$: -36 dBm for $P < 4 \text{ dBW}$ 70 dBc for $4 \text{ dBW} \leq P < 40 \text{ dBW}$ 0 dBm for $40 \text{ dBW} \leq P$
-----------------	---

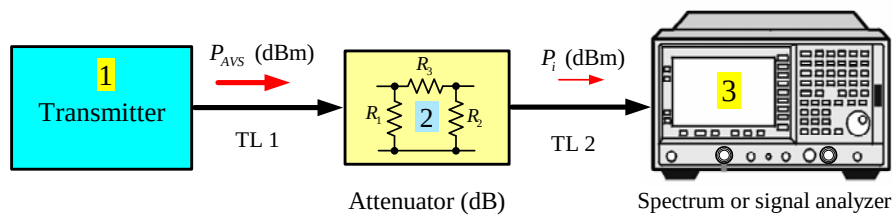
ตารางที่ 1 ข้อกำหนดการแพร่แปลกปลอมในช่วงความถี่ 30-137 MHz (ที่มา ITU-R SM.329-11)



รูปที่ 10 มาตรฐานของระดับการแพร่แปลกปลอมเทียบกับกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุในช่วงความถี่ 87.5-137 MHz (ที่มา EST 300 384)

2.1 การวัดการแพร่แปลกปลอมโดยการนำสัญญาณ (Conducted spurious emissions measurements)

การวัดการแพร่แปลกปลอมตามข้อแนะนำ ITU-R SM.329-11 ในทางปฏิบัติเมื่อใช้อุปกรณ์ลดทอนกำลัง (หมายเลข2) เชื่อมต่อกับเครื่องส่งวิทยุทำได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 11 การวัดการแพร่แปลกปลอมเป็นการวัดสัญญาณวิทยุในช่วงแถบความถี่กว้าง (wideband measurements) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (หมายเลข3) หรือเครื่องวิเคราะห์สัญญาณวิทยุซึ่งมีพิสัยพลวัตสูง การวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ความเข้าใจหลักการพื้นฐานของเครื่องมือและข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเป็นเรื่องสำคัญ



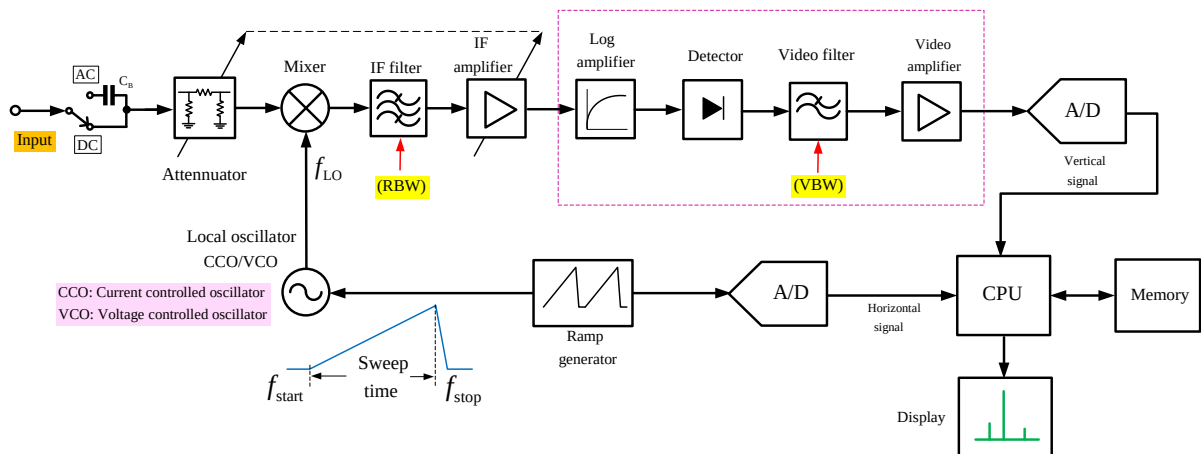
รูปที่ 11 บล็อกไดอะแกรมแสดงการวัดการแพร่แปลกปลอมในทางปฏิบัติ

2.2 การทำงานขั้นพื้นฐานของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

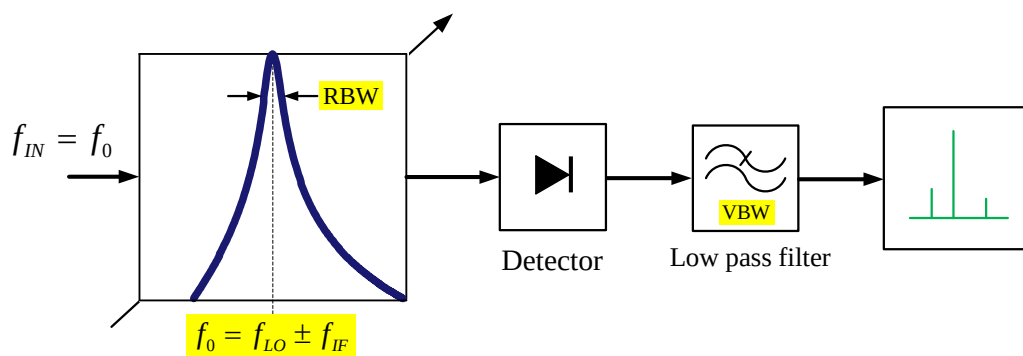
เทคโนโลยีซึ่งใช้สร้างเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณไฟฟ้ามีหลายแบบ ในช่วงความถี่ต่ำอาจใช้วิธีวิเคราะห์แบบแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาด้วยวิธีการ FFT (fast Fourier transform) ขณะที่ความถี่วิทยุและไมโครเวฟใช้หลักการเฮเทอโรไดนา (heterodyne) รูปที่ 12 เป็นบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบกวาดความถี่ (swept-tuned spectrum analyzer) หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบนี้คล้ายกับเครื่องรับวิทยุแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดนา (superheterodyne receiver) ซึ่งค้นหาสัญญาณอินพุตโดยการกวาดความถี่สัญญาณโลคอลออสซิลเลเตอร์ (local oscillator) ที่จ่ายให้วงจรมิกเซอร์ (mixer) เพื่อแปลงความถี่สัญญาณวิทยุที่ค้นหาให้เป็นสัญญาณความถี่กลางหรือสัญญาณไอเอฟ (IF: intermediate frequency) ซึ่งมีความถี่คงที่ การกวาดความถี่หมายถึงการที่โลคอลออสซิลเลเตอร์เพิ่มความถี่จากความถี่เริ่มต้น (f_{start} , f_1) ขึ้นเรื่อยๆจนถึงความถี่หยุด (f_{stop} , f_2) ช่วงการกวาดความถี่ของวงจรโลคอลออสซิลเลเตอร์ถูกควบคุมโดยเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณรูปแรมป์ (ramp signal) ความชันของสัญญาณรูปแรมป์มาจากค่าสแกนของการกวาดความถี่ (frequency span) กระบวนการกวาดความถี่ของโลคอลออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 12 ให้ผลเสมือนกับการนำวงจรกรองผ่านแถบ (band-pass filter) ซึ่งมีความถี่กลาง (centre frequency) เท่ากับผลต่าง (หรือผลบวก) ระหว่างความถี่ของโลคอลออสซิลเลเตอร์ (ณ.เวลานั้น) กับความถี่กลางของวงจรกรองไอเอฟ กวาดรับสัญญาณวิทยุที่ชั่วอินพุตในช่วงความถี่ระหว่าง f_1 ถึง f_2 แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านแถบบ้างกำหนดโดย

ความกว้างแถบการแยกชัด (resolution bandwidth: RBW) กระบวนการนี้แสดงได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายในรูปที่ 13

ในทางปฏิบัติ สเปกตรัมของสัญญาณรูปไซน์ที่สมบูรณ์ (purely sinusoidal signal) ก็ได้ปรากฏบนหน้าจอเป็นเส้นตรงเส้นเดียวดังเช่นเดลต้าฟังก์ชันของทฤษฎีการแปลงฟูริเยร์ เส้นสเปกตรัม (spectral line) ซึ่งปรากฏบนหน้าจอของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเป็นผลที่ได้จากระบวนการคอนโวลูชัน (convolution) หรือการกวาดผ่าน (swept past) ระหว่างสเปกตรัมของสัญญาณรูปไซน์และผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองไอเอฟซึ่งกำหนดแบนด์วิดท์การแยกชัด RBW ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม กล่าวโดยสรุปคือภาพที่เห็นบนหน้าจอของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบกวาดความถี่เป็นภาพผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองไอเอฟ



รูปที่ 12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบกวาดความถี่



รูปที่ 13 การทำงานอย่างง่ายของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบกวาดความถี่

หลังจากเลือกชนิดการคัปปลิง (coupling) สัญญาณเป็นแบบเอซี (ผ่านตัวเก็บประจุ C_B) หรือดีซี สัญญาณอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมจะป้อนผ่านวงจรลดทอนแบบปรับค่าได้ เพื่อปรับความไว (sensitivity) ของการรับสัญญาณให้เหมาะสมกับขนาดสัญญาณอินพุต และป้องกันไม่ให้อินพุตขนาดใหญ่ทำความเสียหาย

ให้วงจรมิกเซอร์ สัญญาณอินพุตซึ่งมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้สัญญาณเอาต์พุตของมิกเซอร์เกิดความผิดเพี้ยน และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสดงผลการวัดผิดปกติ สัญญาณไอเอฟจากวงจรมิกเซอร์จะถูกขยายจนกระทั่งมีขนาดเหมาะสมด้วยวงจรขยายสัญญาณไอเอฟ อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณไอเอฟจะถูกปรับให้สอดคล้องกับอัตราการลดทอนของวงจรลดทอนโดยอัตโนมัติ เพื่อให้สัญญาณที่แสดงแสดงบนหน้าจอแสดงผลมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการปรับค่าอัตราการลดทอนของวงจรลดทอนกำลังสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณไอเอฟอาจเลือกให้มีผลตอบสนองขนาดของอัตราขยายแบบเชิงเส้นหรือแบบล็อกได้ตามลักษณะการแสดงผลที่ต้องการ สัญญาณไอเอฟที่ถูกขยายจนมีขนาดเหมาะสม จะถูกตรวจวัดขนาดโดยวงจรดีเทคเตอร์ (detector) วงจรกรองสัญญาณวิดีโอ (video filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ (low pass filter) ทำหน้าที่กรองสัญญาณวิทยุที่เหลือจากการทำงานของวงจรตรวจวัดขนาด ความถี่ตัด (cutoff frequency) ของวงจรกรองผ่านต่ำกำหนดด้วยค่าแบนด์วิดท์สัญญาณภาพ (video bandwidth: VBW) วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital: A/D) แปลงสัญญาณวิดีโอให้เป็นสัญญาณดิจิทัลสำหรับการประมวลผล และแสดงผลในขั้นตอนต่อไป

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processing: DSP) ในปัจจุบันทำให้กระบวนการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเริ่มที่ความถี่ไอเอฟสุดท้ายของเครื่องรับแทนที่จะแปลงสัญญาณภาพที่ได้จากวงจรดีเทคเตอร์ วงจรกรองดิจิทัล (digital filter) ทำให้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมี RBW ได้ต่ำถึงความถี่ระดับเฮิรตซ์ และมีความสามารถวิเคราะห์สัญญาณได้หลากหลายด้วยซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงให้สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตแต่ละแบบที่ต้องการวิเคราะห์ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในห้องปฏิบัติการทดสอบมาตรฐานเครื่องส่งวิทยุซึ่งได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกสทช.วิเคราะห์สัญญาณเอฟเอ็มด้วยซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณเช่นกัน

2.3 การใช้งาน

การใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมทดสอบสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุมีข้อพิจารณาประกอบหลายประการ การใช้งานเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมต้องมีการปรับตัวแปรต่างๆให้สอดคล้องกัน (เช่น span, RBW และ sweep time เป็นต้น) แม้ว่าในปัจจุบันเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน และตัวแปรต่างๆถูกปรับให้สอดคล้องกันโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้ก็ควรทราบคุณลักษณะและข้อจำกัดซึ่งมีผลโดยตรงกับผลการวัด

2.3.1 วงจรมิกเซอร์ต้องมีสัญญาณอินพุตที่ไม่ใหญ่เกินไปจนความเพี้ยนของวงจรมิกเซอร์มาปรากฏในผลกับการวัด คุณสมบัตินี้ดูได้จากคู่มือ เช่น ความเพี้ยนจากฮาร์โมนิกที่ 2 มีค่าต่ำกว่า -90 dBc เมื่อวงจรมิกเซอร์มีสัญญาณอินพุตขนาด -10 dBm การวัดการแพร่แปลกปลอมเป็นการวัดแบบแบนด์วิดท์กว้าง สัญญาณแพร่แปลกปลอมที่แสดงบนหน้าจอ อาจเกิดจากวงจรมิกเซอร์ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรับสัญญาณอินพุตมากเกินไป

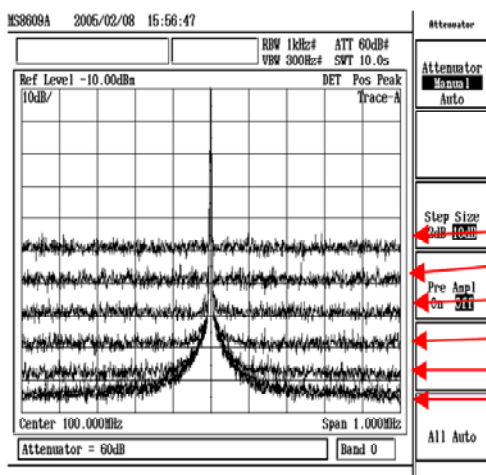
2.3.2 สัญญาณอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมต้องมีกำลังไม่เกินระดับที่ทำให้ตัวลดทอนสัญญาณ

ภายในเครื่องเสียหาย เช่นไม่เกิน 30 dBm หรือ 1 วัตต์

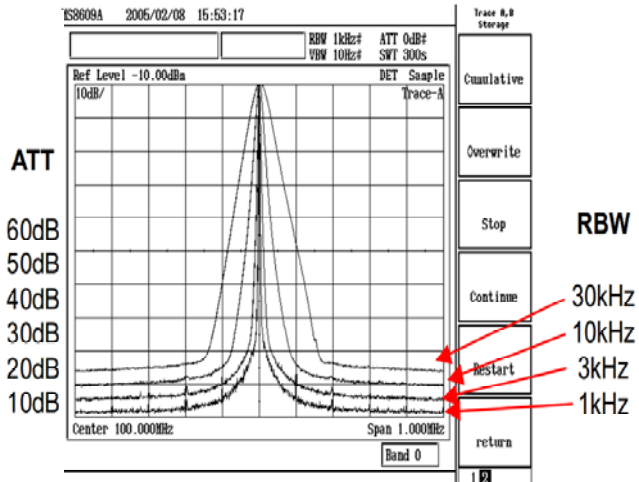
- 2.3.3 คุณสมบัติของวงจรส่วนหน้า (front end) ในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมด้อยลงเมื่อใช้งานที่ความถี่สูงขึ้น เมื่อทำการวัดสัญญาณแบบแบนด์วิดท์กว้าง เช่น ความถี่เริ่มต้นและความถี่หยุดต่างกันมากๆ จะเห็นว่าระดับนอยส์ฟลอร์ (noise floor) เพิ่มขึ้นตามความถี่ คุณสมบัติที่ด้อยลงนี้เกิดจากความสูญเสีย (loss) จากตัวลดทอนสัญญาณ ความสูญเสียของมิกเซอร์ และความสูญเสียของขั้วต่อและสายส่ง
- 2.3.4 สัญญาณวิทยุเล็กที่สุดที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสามารถแสดงได้ขึ้นอยู่กับระดับนอยส์ฟลอร์ ถ้าสมมติว่าวงจรดีเทคเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมทำงานได้ตั้งแต่อัตราส่วนสัญญาณ (โอเอฟ) ต่อสัญญาณรบกวน (SNR: signal to noise ratio) เท่ากับ 1 กำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณเล็กที่สุดที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้องอาจคำนวณได้จาก

$$P_{IN,min}(dBm) = -174dBm/Hz + NF + 10\log RBW \quad (10)$$

เมื่อ NF คือตัวเลขสัญญาณรบกวน (noise figure) ของเครื่องวิเคราะห์ การลดทอนสัญญาณอินพุตมีผลทำให้ตัวเลขสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับอัตราการลดทอน



(ก)



(ข)

รูปที่ 14 (ก) ระดับนอยส์ฟลอร์ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเปลี่ยนไปจากการลดทอนกำลัง และ (ข) ระดับนอยส์ฟลอร์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากแบนด์วิดท์ของเครื่องรับเพิ่มขึ้น ใช้ภาพจาก Anritsu [13]

แบนด์วิดท์การแยกซัดที่กว้างขึ้นก็ทำให้ระดับนอยส์ฟลอร์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งจะเห็นว่าถ้าอัตราการลดทอนเพิ่มขึ้น 10 dB ก็จะทำให้ นอยส์ฟลอร์สูงขึ้น 10 dB และถ้า RBW เพิ่ม

จาก 1kHz เป็น 10 kHz ระดับนอยซ์ฟลอร์ก็เพิ่มขึ้น 10 เท่า หรือ 10 dB เช่นกัน

2.3.5 ปัจจุบันเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมส่วนใหญ่ใช้วิธีการประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล และลักษณะการทำงานของดีเทคเตอร์ในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมีหลายแบบคือ

2.3.5.1 ดีเทคเตอร์แบบปกติ (normal detector) แสดงผลค่าสูงสุด และต่ำสุดของค่าซิก

ตัวอย่างปัจจุบัน (current sample point) และค่าซิกตัวอย่างถัดไป

2.3.5.2 ดีเทคเตอร์แบบค่ายอดซีกบวก (positive peak detector) แสดงค่าสูงสุดด้านบวกที่

เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณซิกตัวอย่างปัจจุบัน กับสัญญาณซิกตัวอย่างถัดไป

2.3.5.3 ดีเทคเตอร์แบบค่ายอดซีกลบ (negative peak detector) แสดงค่าต่ำสุดที่เกิดขึ้น

ระหว่างสัญญาณซิกตัวอย่างปัจจุบัน กับสัญญาณซิกตัวอย่างถัดไป

2.3.5.4 ดีเทคเตอร์แบบซิกตัวอย่าง (sample detector) แสดงค่าชั่วขณะนั้นของสัญญาณซิกตัวอย่าง

2.3.5.5 ดีเทคเตอร์แบบอาร์เอ็มเอส (RMS detector) แสดงค่าอาร์เอ็มเอส (Root-mean-square: RMS) ของสัญญาณอินพุตจากสัญญาณซิกตัวอย่างปัจจุบัน กับสัญญาณซิกตัวอย่างถัดไป

ดีเทคเตอร์แต่ละประเภทจะให้ผลการวัดที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ดีเทคเตอร์แต่ละแบบขึ้นอยู่กับสิ่งที่ต้องการวัดจากสัญญาณอินพุต ประเภทของสัญญาณที่มอดูเลตกับคลื่นพาห์ สัญญาณแบบกำหนดค่าได้ (deterministic signal) หรือสัญญาณแบบสุ่ม (random signal) เป็นต้น

ตัวอย่างที่ 3 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเครื่องหนึ่ง ข้อกำหนดคุณสมบัติ (specification) แจ้งว่ามีระดับนอยซ์ฟลอร์ -120 dBm ที่แบนด์วิดท์การแยกซิกเท่ากับ 300 Hz จงคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

จากสมการที่(10)

$$\begin{aligned}-120 &= -174 \text{ dBm/Hz} + NF + 10 \log 300 \\ NF &= -120 + 174 - 24.8 = 29.2 \text{ dB}\end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเครื่องหนึ่งมีตัวเลขสัญญาณรบกวนเท่ากับ 42 dB ขณะใช้แบนด์วิดท์การแยกซิกเท่ากับ 10 kHz เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเครื่องนี้สามารถใช้วัดสัญญาณวิทยุขนาด -95 dBm ได้หรือไม่

เราคำนวณระดับนอยซ์ฟลอร์ได้จาก

$$-174\text{dBm/Hz} + 42 + 10\log 10000 = -92 \text{ dBm}$$

จะเห็นว่าสัญญาณอินพุตมีขนาดต่ำกว่าระดับนอยซ์ฟลอร์ จึงไม่สามารถแสดงผลการวัดสัญญาณอินพุตได้

2.4 การกรองสัญญาณภาพและการแสดงค่าเฉลี่ยของสัญญาณ

เราเรียกสัญญาณเอาต์พุตของดีเทคเตอร์ในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 12 ว่าสัญญาณภาพ เนื่องจากใช้สร้างภาพสเปกตรัมของสัญญาณอินพุตบนจอแสดงผล ภาพสเปกตรัมที่แสดงบนจอเป็นผลมาจากสัญญาณอินพุตบวกกับนอยซ์ภายในเครื่องมือวัด เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมวิเคราะห์สัญญาณอินพุตรวมกับนอยซ์ มิได้แสดงผลวิเคราะห์เฉพาะสัญญาณอินพุตอย่างเดียว ขนาดสเปกตรัมของสัญญาณที่แสดงผลบนหน้าจอเป็นดังสมการที่ (11) สัญญาณอินพุตขนาดเล็กที่สุดซึ่งแสดงผลได้จะมีกำลังเท่ากับกำลังงานเฉลี่ยของนอยซ์ (average noise power) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ดังนั้น

$$\frac{S + N}{N} = 2 \quad (11)$$

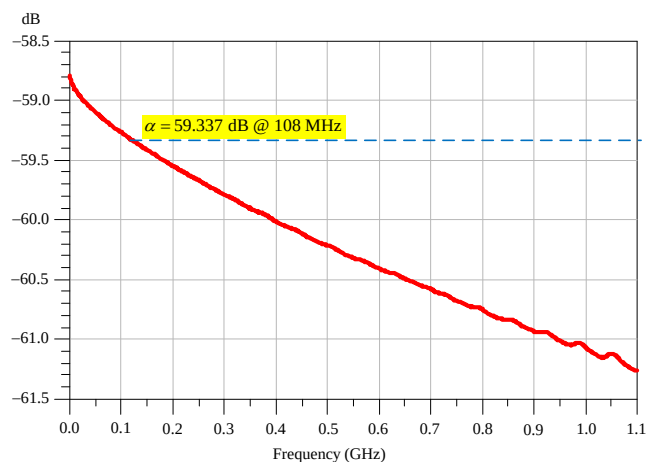
โดย S คือกำลังงานของสัญญาณ และ N คือกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ

ถ้ากำลังของสัญญาณรวมกับกำลังงานเฉลี่ยของนอยซ์ หรือสัญญาณรบกวนซึ่งมีขนาดเท่ากัน เมื่อแสดงผลบนหน้าจอจะพบว่าขนาดของสัญญาณจะเพิ่มขึ้น 3 dB การลดขนาดของสัญญาณรบกวนทำได้โดยการแสดงผลแบบเฉลี่ย (average) หรือกำหนดแบนด์วิดท์สัญญาณภาพของเครื่องวิเคราะห์ให้เหมาะสม

2.5 การทดสอบเครื่องส่งวิทยุ

การวัดการแพร่แปลงปลอมของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงทำได้โดยการนำสัญญาณผ่านสายนำสัญญาณ ผ่านอุปกรณ์ลดทอนกำลัง และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเป็นเครื่องมือวัดต่อที่ปลายสาย ดังแสดงในรูปที่ 11 การวัดทำในช่วงความถี่ 9 kHz ถึง 1080 MHz เป็นการวัดซึ่งมีช่วงกว้าง ผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ประกอบการวัดและเครื่องมือวัดซึ่งประกอบด้วย สายส่ง ตัวลดทอนกำลัง ตัวแปลงขั้วต่อ เป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดความถูกต้องของผลการวัด การลดทอนซึ่งเพิ่มขึ้นตามความถี่ของเครื่องมือ ให้ผลเหมือนกับการมีวงจรกรองผ่านต่ำต่ออยู่ระหว่างเครื่องส่งวิทยุและเครื่องมือวัด (ถ้าสมมติว่าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมให้ผลการวัดซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่อินพุตที่ทดสอบ) โดยเฉพาะการลดทอนซึ่งเปลี่ยนตามความถี่ในช่วง 108 ถึง 1080 MHz ของสายส่งและตัวลดทอนกำลังต้องถูกนำมาชดเชยกับผลการวัดซึ่งได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมจึงจะได้ผลการวัดที่ถูกต้อง

รูปที่ 15 แสดงอัตราการลดทอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของอุปกรณ์ลดทอนกำลังชุดหนึ่ง ในช่วงความถี่ 100 kHz ถึง 1.1 GHz เปรียบเทียบกับการลดทอนที่ความถี่ 108 MHz จะเห็นว่าการลดทอนที่ความถี่ 1080 MHz มีค่าต่างจากอัตราการลดทอนที่ความถี่ 108 MHz ประมาณ 2 dB



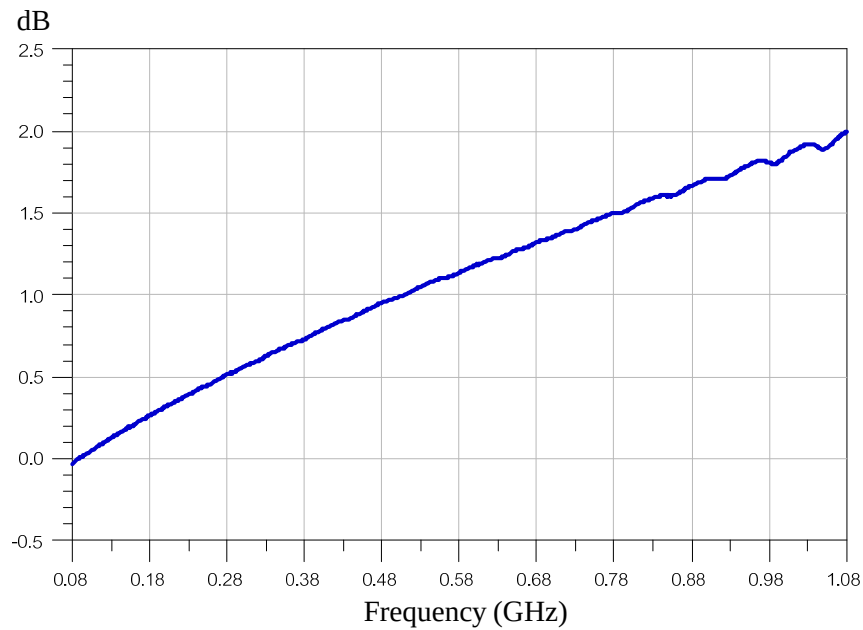
รูปที่ 15 ตัวอย่างอัตราการลดทอนของอุปกรณ์ลดทอนในช่วง 100 kHz -1100 MHz

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในปัจจุบันสามารถนำตัวเลขอัตราการลดทอนของระบบนำสัญญาณซึ่งเปลี่ยนไปตามความถี่มาคำนวณเพื่อชดเชยกับผลการวัด ไฟล์ข้อมูล (.csv หรือ .s2p) ของอัตราการลดทอน (หรืออัตราขยาย) ของระบบนำสัญญาณที่ได้จากการวัดคุณสมบัติของสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ลดทอนกำลังด้วยเครื่องวิเคราะห์เน็ตเวิร์ก (network analyzer) สามารถนำไปเก็บไว้ในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม และนำมาคำนวณชดเชยผลการวัดโดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามเราได้นำค่าการลดทอนจริง (absolute) เช่น -60 dB ที่ 400MHz มาใช้โดยตรงเนื่องจากจะทำให้ผลลัพธ์ของการวัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลดลงอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 14 (ก) การลดทอนซึ่งเปลี่ยนตามความถี่อาจพิจารณาในแบบ

$$\alpha = \alpha(0) + \alpha(f) \quad (12)$$

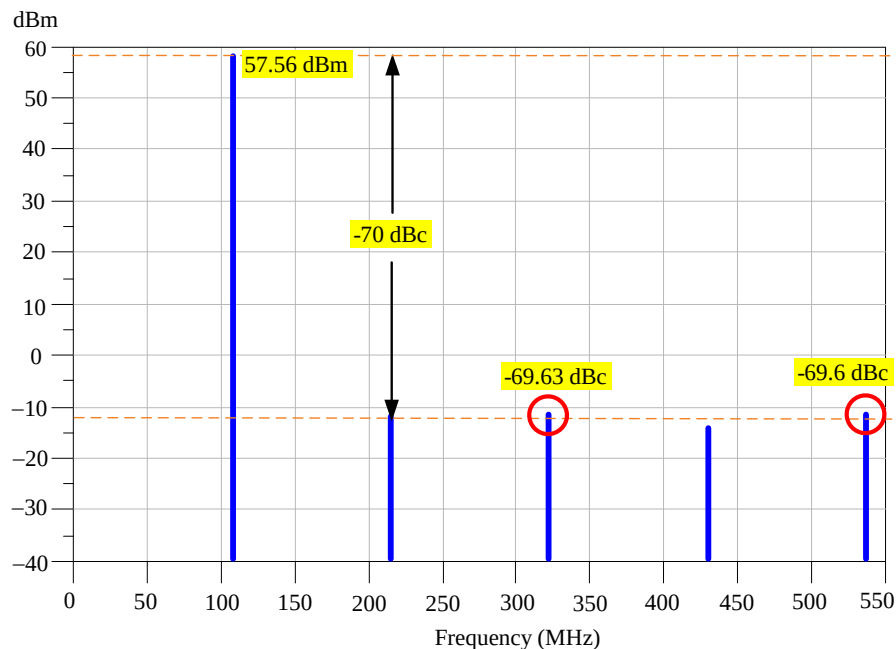
โดย $\alpha(0)$ เป็นการลดทอนที่ความถี่เริ่มต้นซึ่งอาจใช้เป็นค่าออฟเซ็ต และ $\alpha(f)$ คืออัตราการลดทอนที่เปลี่ยนตามความถี่ซึ่งเก็บไว้เป็นไฟล์ปรับแก้ (correction file) ในคอมพิวเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ลักษณะของการลดทอนเปลี่ยนตามความถี่ $\alpha(f)$ แสดงในรูปที่ 16

การทดสอบการแพร่แปลกปลอม (และการแพร่นอกแถบ) ของเครื่องส่งวิทยุโดยไม่พิจารณาข้อจำกัดเรื่องสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นนอยซ์ฟลอร์ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม อาจทำให้เครื่องส่งที่ได้มาตรฐานถูกตัด สิ้นว่าไม่ผ่านมาตรฐาน หรือในทางกลับกันการทดสอบการแพร่แปลกปลอมโดยไม่คำนึงถึงอัตราการลดทอน(ของตัวลดทอนและสายส่ง) ซึ่งมีการเปลี่ยนค่าตามความถี่ก็อาจจะทำให้เครื่องส่งที่ไม่ได้มาตรฐานผ่านการทดสอบเช่นกัน

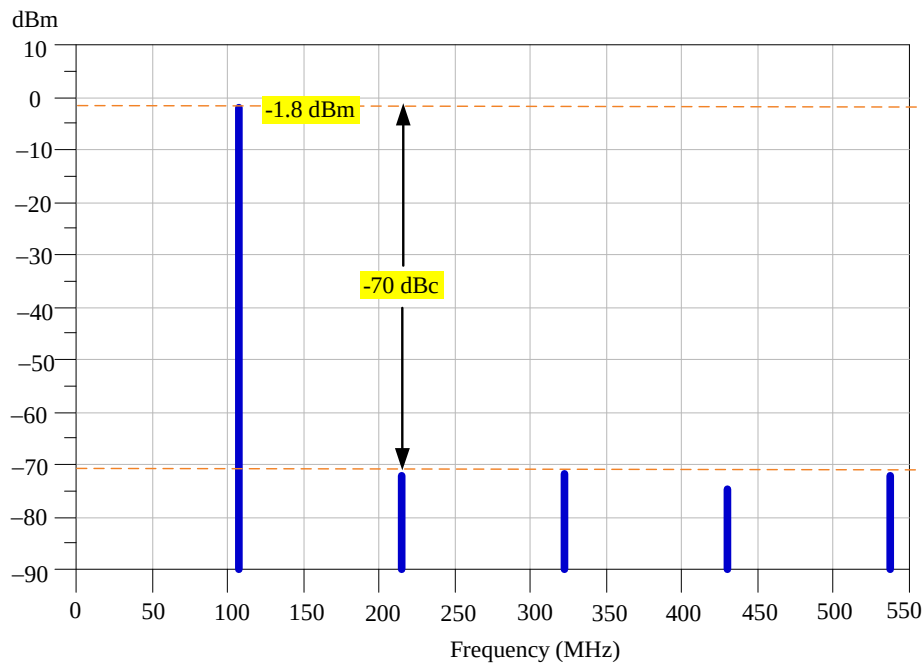


รูปที่ 16 ตัวอย่าง $\alpha(f)$ ของอุปกรณ์ลดทอนในช่วง 88 - 1080 MHz

ตัวอย่างที่ 5 รูปที่ 17 (ก) เป็นการเลียนแบบสเปกตรัมกำลังของสัญญาณเอาต์พุต ของเครื่องส่งเอฟเอ็ม ความถี่ 107.5 MHz เครื่องหนึ่งด้วยโปรแกรม ADS[®] เมื่อใช้อุปกรณ์ลดทอนกำลังซึ่งมีคุณสมบัติ ดังที่แสดงในรูปที่ 15 สัญญาณเอาต์พุตที่ปลายสายนำสัญญาณก่อนที่จะป้อนให้เครื่องมือวัดจะมี สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 17 (ข)



รูปที่ 17 (ก) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุในช่วงความถี่ซึ่งการแพร่แปลกปลอมไม่เป็นไปตามมาตรฐาน



รูปที่ 17 (ข) สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องส่งเมื่อผ่านอุปกรณ์ลดทอนกำลังและสายนำสัญญาณที่ใช้ประกอบวงจร

ถ้าสัญญาณซึ่งวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเป็นดังรูปที่ 17 (ข) ก็จะตัดสินว่าเครื่องส่งวิทยุนี้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน อย่างไรก็ตามระดับกำลังฮาร์โมนิกซึ่งไม่เกินข้อกำหนดนั้นเกิดจากผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณซึ่งมิใช่คุณลักษณะประจำตัวของเครื่องส่งวิทยุเครื่องนี้ แม้ว่าตัว อย่างนี้มีสาเหตุการเกิดขึ้นได้จริง แต่ก็แสดงให้เห็นผลที่เกิดขึ้นถ้าละเลยการลดทอนสัญญาณที่แปรตามความถี่ของอุปกรณ์ประกอบการวัด

3. การแพร่นอกแถบ (Out-of-band emissions)

ขณะที่ไม่มีการมอดูเลต คลื่นพาห์ของเครื่องส่งวิทยุมีความถี่ชั่วขณะ (instantaneous frequency) หรือ f_0 คงที่ การมอดูเลตแบบเอฟเอ็มทำให้คลื่นพาห์เปลี่ยนความถี่ชั่วขณะ เบี่ยงเบนออกจาก f_0 ไปตามทิศ ทางของสัญญาณเบสแบนด์ ปรากฏการณ์เบี่ยงเบนความถี่ (frequency deviation) เป็นคุณลักษณะของระบบส่งสัญญาณแบบเอฟเอ็ม การเบี่ยงเบนความถี่ชั่วขณะ (instantaneous deviation) เป็นผลต่างของความถี่ชั่วขณะ ที่เวลาใดๆกับความถี่คลื่นพาห์ที่ไม่มีการมอดูเลต (f_0) ณ เวลาใดๆ ความถี่ชั่วขณะของสัญญาณเอฟเอ็มกำหนดด้วยสมการ

$$f(t) = f_0 + \Delta f(t) \quad (13)$$

ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด Δf คือค่าสมบูรณ์สูงสุด (absolute maximum) ของความแตกต่างระหว่างความถี่คลื่นพาห์ (f_0) และความถี่ชั่วขณะ $f(t)$ ของสัญญาณวิทยุ ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (13) เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ในระยะเวลาใด ๆ ระยะเวลาหนึ่งจะมีลักษณะเป็นกลุ่มความถี่ปรากฏเป็นไซด์แบนด์อยู่ข้างคลื่นพาห์อย่างสมมาตร เครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มส่งสัญญาณกลุ่มความถี่นี้ไปยังเครื่องรับ และเครื่องรับก็จะแปลงความถี่เบี่ยงเบนชั่วขณะให้เป็นสัญญาณเบสแบนด์ กลุ่มความถี่หรือไซด์แบนด์ซึ่งเครื่องส่งวิทยุแพร่ออกอากาศจะต้องไม่เกินแถบความถี่ของช่องสัญญาณที่กำหนด

การแพร่ นอกแถบตามข้อแนะนำ ESTI EN 302 018-1 V1.2.1 (03/2006) หมายถึงการแพร่สัญญาณ หรือกลุ่มสัญญาณอื่นใดออกจากเครื่องส่งวิทยุ นอกเหนือจากสัญญาณในแบนด์วิดท์ที่จำเป็นของช่องสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับการระบวมอดูเลต แต่ไม่รวมถึงการแพร่แปลกปลอม การประมาณแบนด์วิดท์ที่จำเป็นของการส่งสัญญาณเอฟเอ็มอาจคำนวณได้จากกฎของคาร์สันโดย

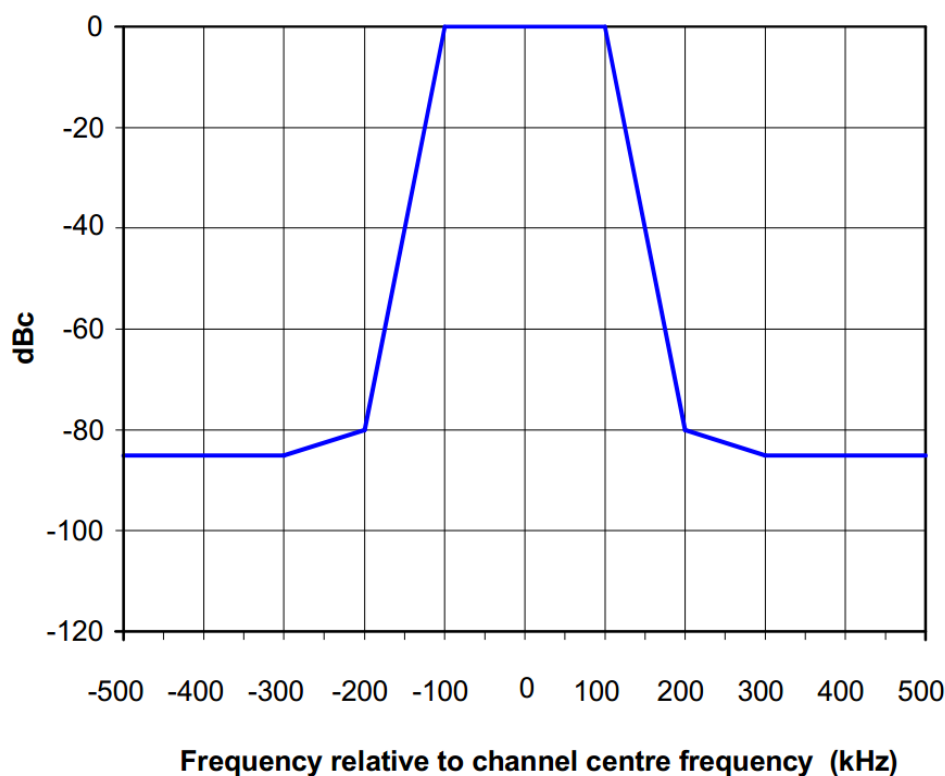
$$C_{BW} = 2(\Delta f + f_m) \quad (14)$$

เมื่อ C_{BW} คือแบนด์วิดท์ที่จำเป็น และ f_m คือความถี่สูงสุดของสัญญาณเบสแบนด์ที่มอดูเลตกับคลื่นพาห์ เช่น สัญญาณเอฟเอ็มมีความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด 75 kHz และความถี่สูงสุดของสัญญาณเบสแบนด์คือ 15 kHz ดังนั้นแบนด์วิดท์ที่จำเป็นในการส่งสัญญาณคือ $2(75+15) = 180$ kHz

การแพร่คลื่นวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็มนอกแถบต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามตารางที่ 2 และสเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็มจากแบนด์วิดท์ที่คำนวณได้ตามสมการที่ (13) ต้องวางอยู่ในสเปกตรัมมาส์กดังแสดงในรูปที่ 18

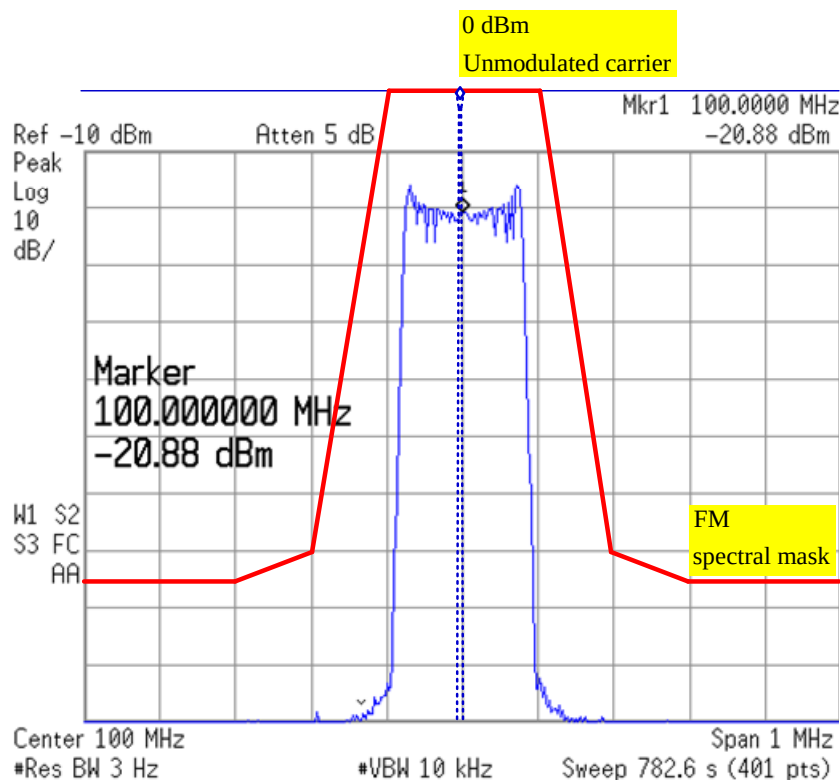
Frequency relative to the centre of the channel (kHz)	Relative level (dBc)
-500	-85
-300	-85
-200	-80
-100	0
100	0
200	-80
300	-85
500	-85

ตารางที่ 2 จุดเปลี่ยนแปลง (breakpoints) ของสเปกตรัมมาส์กในข้อกำหนดการแพร่ นอกแถบสำหรับการกระจายเสียงวีเซชเอฟเอ็ม (ที่มา ESTI EN 302 018-1 V1.2.)



รูปที่ 18 ลักษณะสเปกตรัมมาสก์ที่ใช้พิจารณาการแพร่รบกวนของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม (ที่มา ESTI EN 302 018-1 V1.2.1)

การมอดูเลตสัญญาณเบสแบนด์ หรือสัญญาณไพลอต (pilot signal) เข้ากับคลื่นพาห้ในแบบเอฟเอ็มทำให้กำลังงานของคลื่นพาห้ในโดเมนความถี่ซึ่งเดิมมีแบนด์วิดท์ 1 Hz กระจายออกตามขนาดของดัชนีการมอดูเลต (modulation index: $\beta = \Delta f / f_m$) ขนาดสเปกตรัมกำลังของคลื่นพาห้จะลดลงโดยกำลังงานจะแบ่งไปอยู่ที่ไซด์แบนด์ทั้งสองด้านโดยสอดคล้องกับขนาดของเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) การมอดูเลตแบบเอฟเอ็มมีดัชนีการมอดูเลตบางค่าที่ทำให้คลื่นพาห้หายไป เมื่อสัญญาณเอฟเอ็มมีการเบี่ยงเบนความถี่มากกำลังสัญญาณที่ตำแหน่งคลื่นพาห้จะลดตามไปด้วย กำลังคลื่นพาห้กระจายไปตามไซด์แบนด์ซึ่งเกิดขึ้นจากการมอดูเลต รูปที่ 19 เป็นตัวอย่างสัญญาณเอฟเอ็ม (โมโน) ซึ่งมีความถี่คลื่นพาห้เท่ากับ 100 MHz และมีกำลังงาน 0 dBm มอดูเลตกับสัญญาณเบสแบนด์ความถี่ 1 kHz โดยมีการเบี่ยงเบนความถี่เท่ากับ ± 75 kHz (ความกว้างแถบการแยกชัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมีค่าเท่ากับ 3 Hz และมีระดับนอยซ์ฟลอร์อยู่ที่ -113 dBm)

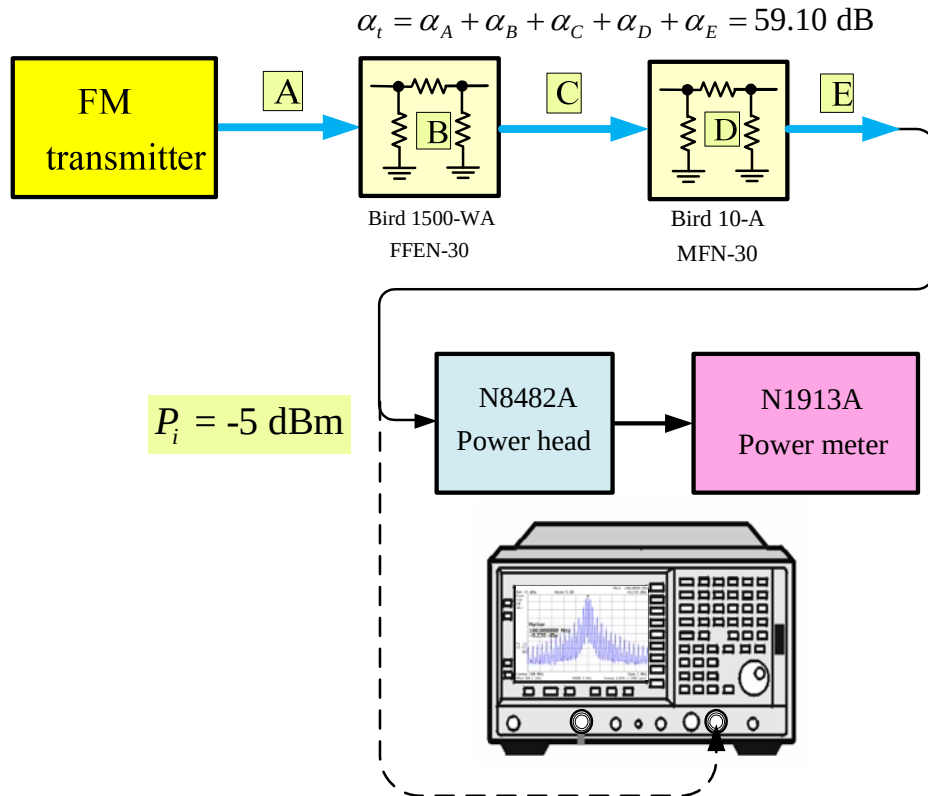


รูปที่ 19 สัญญาณเอฟเอ็มความถี่ 100MHz กำลังงาน 0 dBm ซึ่งมีสัญญาณเบสแบนด์เท่ากับ 1kHz และความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ $\pm 75\text{kHz}$ เทียบกับคลื่นพาห้ขนาด 0 dBm ที่ยังไม่มีกรรมอดุลเลต

การทดสอบการแพร่รบกวนแถบในหัวข้อ 4.4.3.2.2 ของ ESTI EN 302 018-1 V1.2.1 (03/2006) กำหนดให้วางระดับอ้างอิง 0 dB ไว้ที่ระดับกำลังงานของคลื่นพาห้ที่ยังไม่มีกรรมอดุลเลต (a carrier without modulation) ดังนั้นถ้าจะวัดการแพร่รบกวนแถบของสัญญาณเอฟเอ็มในรูปที่ 19 เราต้องปรับระดับอ้างอิง (Ref) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมให้เท่ากับกำลังงานของคลื่นพาห้ที่ยังไม่มีกรรมอดุลเลตหรือ 0 dBm (แสดงด้วยเส้นประ)

ในทางปฏิบัติเรากำหนดระดับอ้างอิงจากกำลังงานของคลื่นพาห้ของสัญญาณเอฟเอ็มได้จากได้จากระดับกำลังสัญญาณที่ผ่านอุปกรณ์ลดทอนแล้ว (หรือ P_i ของการวัดกำลังคลื่นพาห้ที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 6) การวัดกำลังสัญญาณวิทยุเอฟเอ็มด้วยมิเตอร์วัดกำลังสัญญาณวิทยุได้ค่ากำลังเท่ากันเสมอไม่ว่าคลื่นพาห้นั้นมีการมอดุลเลตหรือไม่ ลักษณะเช่นนี้เป็นคุณลักษณะเฉพาะของสัญญาณเอฟเอ็ม

ตัวอย่างที่ 5 รูปที่ 20 เป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบกำลังคลื่นพาห้ที่กำหนด และการแพร่รบกวนของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มสเตอริโอเครื่องหนึ่งซึ่งใช้วงจรรวม BH1415 เป็นเอฟเอ็มมอดุลเลเตอร์ เครื่องส่งวิทยุใช้ความถี่คลื่นพาห้ 100 MHz ในการทดสอบ มีการลดทอนรวมสุทธิของระบบนำสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังเครื่องมือวัดที่ความถี่ 100 MHz เท่ากับ 59.10 dB



รูปที่ 20 การทดสอบกำลังคลื่นพาห์ที่กำหนดและการแพร่รบกวนของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มสเตอริโอเครื่องหนึ่ง

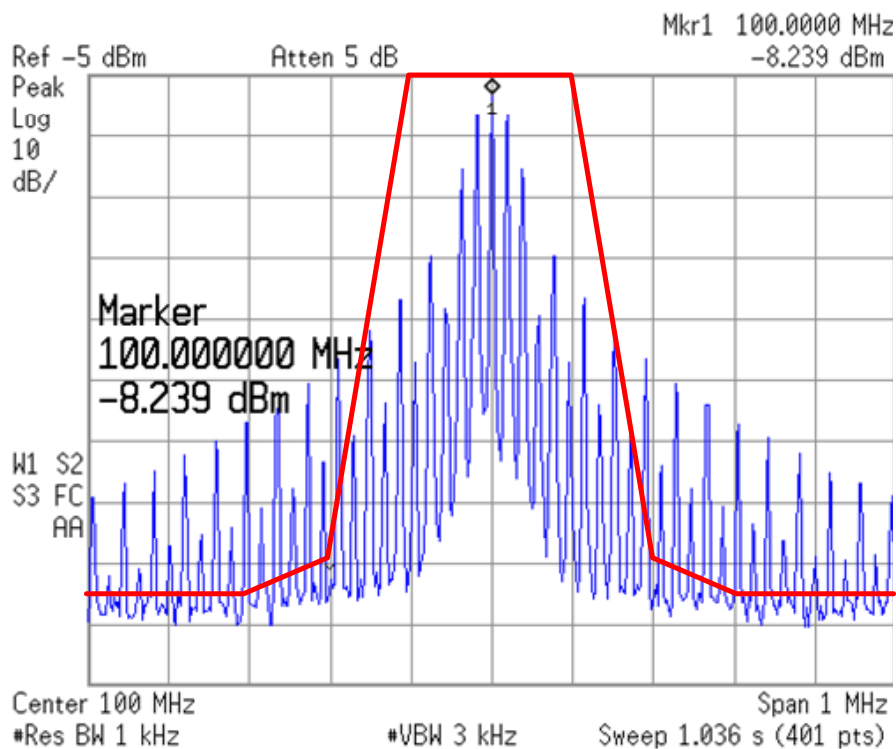
มิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุอ่านค่าได้ -5 dBm เราคำนวณกำลังงานคลื่นพาห์ได้จากสมการ

$$P_{AVS(dBm)} = -5.0 + 59.10 = 54.10 \text{ dBm}$$

หรือ

$$P_{AVS(watt)} = (10^{-3})10^{(P_{dBm}/10)} = 257.04 \text{ W}$$

การวัดการแพร่รบกวนเรากำหนดระดับอ้างอิง 0 dB ของสเปกตรัมมาส์กไว้เท่ากับกำลังงานคลื่นพาห์ซึ่งวัดได้จากมิเตอร์วัดกำลังคลื่นวิทยุคือ -5dBm สเปกตรัมซึ่งวัดได้จากเครื่องส่งเครื่องนี้แสดงในรูปที่ 21 ซึ่งสเปกตรัมแสดงคลื่นพาห์ 100 MHz มอดูเลตกับสัญญาณไฟลื้อต 19kHz เราจะเห็นว่าเครื่องส่งวิทยุเครื่องนี้มีกำลังงานคลื่นพาห์ไม่เกินข้อกำหนด และไม่ผ่านการทดสอบการแพร่รบกวน เพราะไซด์แบนด์ซึ่งเกิดขึ้นจากสัญญาณไฟลื้อต 19kHz มีขนาดเกินสเปกตรัมมาส์กเนื่องจากวงจรรวม BH1415 ใช้สัญญาณไฟลื้อต ที่สร้างจากคลื่นรูปเหลี่ยม (square wave) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นฮาร์โมนิกส์จำนวนมาก



รูปที่ 21 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุที่เกิดจากการใช้คลื่นรูปเหลี่ยม 19 kHz เป็นสัญญาณไฟลิต

4. ค่าผิดพลาดทางความถี่ (Frequency error)

ค่าผิดพลาดทางความถี่หมายถึงตัวเลขความถี่ของคลื่นพาห์ที่วัดได้ต่างไปจากที่กำหนดไว้ ค่าความผิดพลาดทางความถี่ของคลื่นพาห์ของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงตามข้อกำหนด ETS- 300 384 กำหนดไว้ไม่เกิน ± 2 KHz และกำหนดเงื่อนไขแวดล้อมในการทดสอบไว้คือ

Normal operating and test conditions

- ambient temperature: 15°C to 30°C;
- mains voltage: Voltage: $U_0 + 6\%$ to -10%

Frequency: 49 Hz to 51 Hz

Distortion: $\leq 10\%$

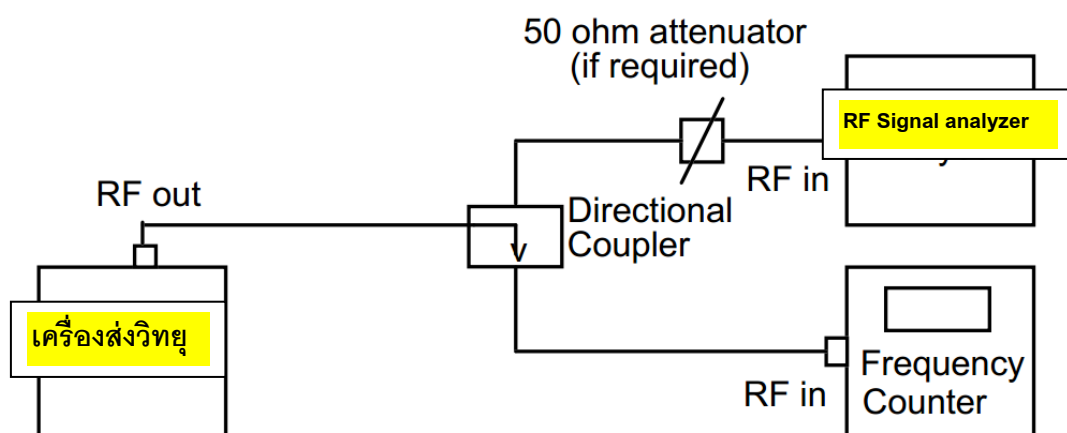
where U_0 is the nominal single or three phase supply voltage, as declared by the manufacturer;

- altitude: $\leq 3\,000$ metres above sea level;
- warm-up period: 20 minutes, except 1 hour for frequency stability;
- humidity: $\leq 90\%$ RH non condensing with the transmitter at a higher temperature than the ambient temperature.

Extreme operating and test conditions

- ambient temperature: 0°C to 40°C;
- mains voltage: $U_0 + 6\%$ to -10% ;

วิธีการทดสอบค่าผิดพลาดทางความถี่ตามข้อกำหนด ETS- 300 384 แสดงในรูปที่ 22 ซึ่งอาจใช้เครื่องนับความถี่ (frequency counter) หรือเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมซึ่งมีฟังก์ชันนับความถี่ ความแม่นยำของการวัดของเครื่องมือทั้ง 2 ชนิดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง (reference clock) ซึ่งใช้ในเครื่องนับความถี่ หรือเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



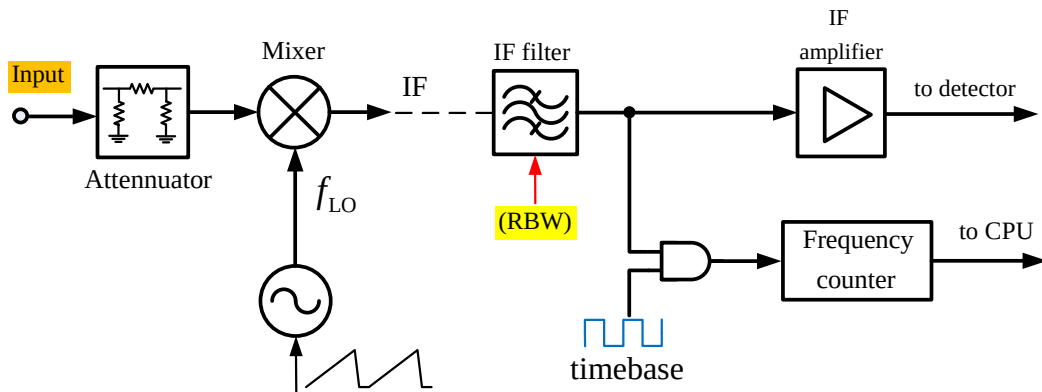
รูปที่ 22 บล็อกไดอะแกรมของวิธีทดสอบความผิดพลาดทางความถี่ของคลื่นพาห์ (ที่มา ETS 300 454)

4.1 การแสดงตัวเลขความถี่ของสัญญาณอินพุต

การแสดงผลตัวเลขความถี่ (frequency readout) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมี 2 ลักษณะ คือ

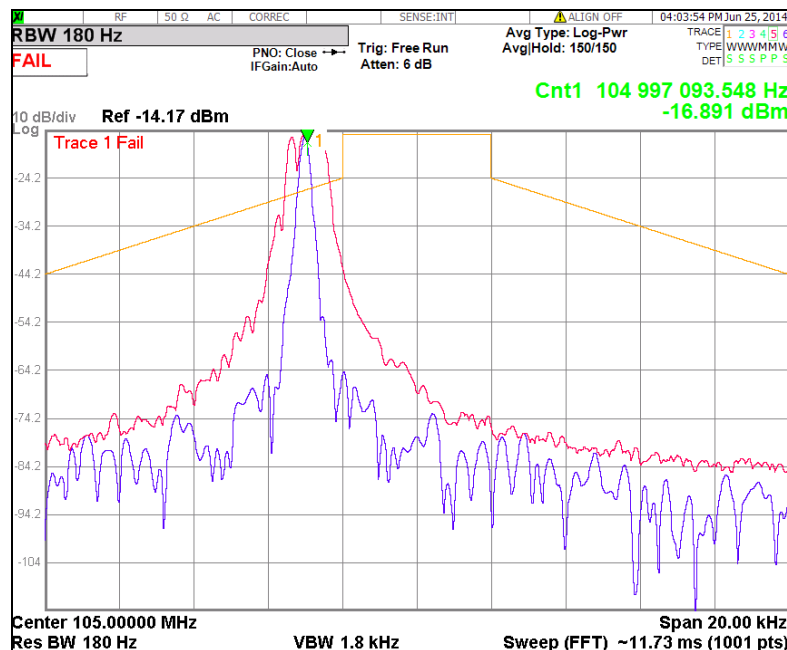
- (1) คำนวณจากความถี่กลาง (center frequency) ค่าสเปน (span) และจำนวนจุดภาพ (pixel) ระหว่างความถี่เริ่มต้น (f_{start}) ถึงความถี่หยุด (f_{stop}) เช่นมีจุดภาพ 301 จุด แต่ละจุดก็จะเป็นตำแหน่งโคออร์ดิเนตของความถี่เริ่มต้นจนกระทั่งถึงตำแหน่งความถี่หยุด วิธีการแสดงความถี่ของมาร์กเกอร์ (marker) บนหน้าจอลักษณะนี้อาจจะหายาบ และไม่ตรงกับความถี่จริงของสัญญาณอินพุตโดยเฉพาะถ้าความถี่สเปนมีค่ากว้าง
- (2) ใช้วิธีนับความถี่ของสัญญาณไอเอฟโดยตรงและคำนวณกลับเป็นความถี่ของสัญญาณอินพุต บล็อกไดอะแกรมของการนับความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสดงในรูปที่ 23 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมจะกวาดความถี่จนถึงตำแหน่งมาร์กเกอร์แล้วหยุดชั่วคราว และวัดความถี่ของสัญญาณอินพุตจากจำนวน

ครั้งที่สัญญาณไอเอฟผ่านจุดศูนย์ (zero crossing) การวัดความถี่ลักษณะนี้ต้องรอให้สัญญาณไอเอฟเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (steady state) จึงต้องทำที่ค่าความถี่การแยกชุด RBW ซึ่งกว้างพอ และมีเวลานับความถี่เพียงพอ วิธีการแสดงค่าความถี่ด้วยการนับมีความแม่นยำสูงเท่ากับความแม่นยำของสัญญาณนาฬิกาหรือสัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



รูปที่ 23 บล็อกไดอะแกรมแสดงการนับความถี่แบบละเอียดในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

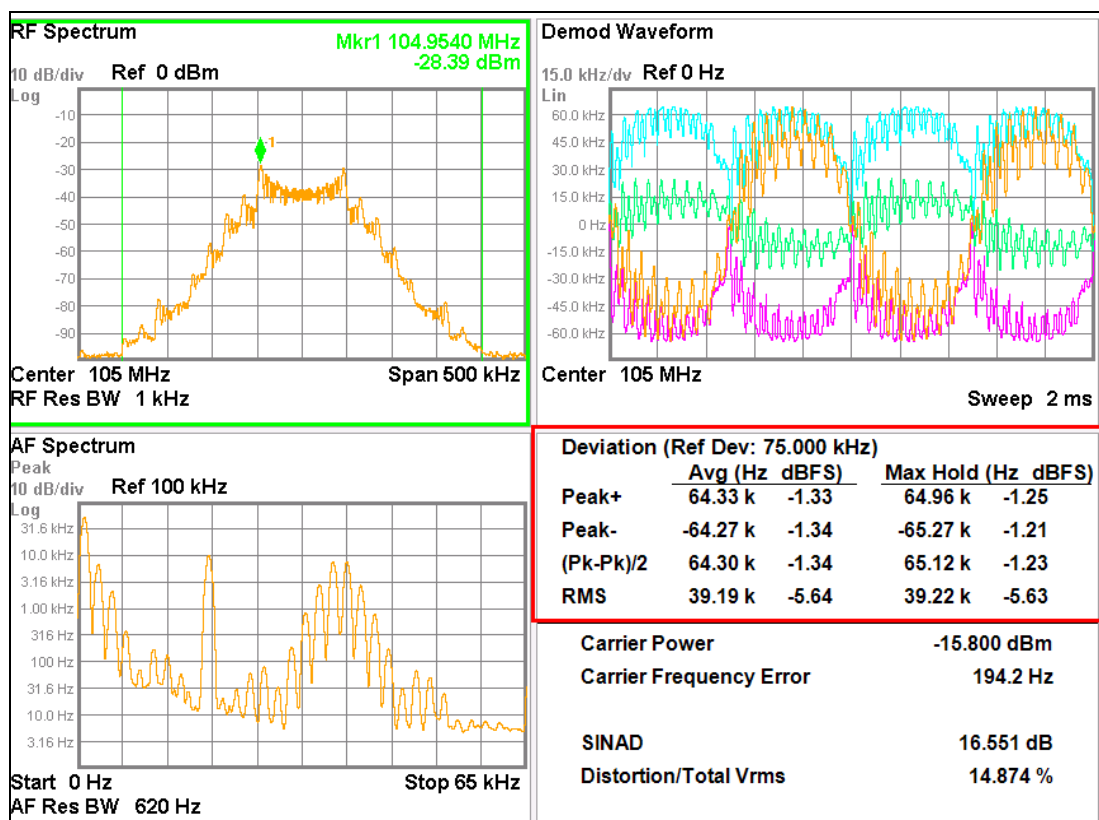
นอกจากนี้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมยังสามารถกำหนดสเปกตรัมมาส์กเพื่อแสดงช่วงความถี่ผิดพลาดของคลื่นพาห์ตามข้อกำหนด ETS 300 454 ดังแสดงในรูปที่ 24 ซึ่งเป็นผลการวัดค่าผิดพลาดทางความถี่ของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มซึ่งมีความถี่คลื่นพาห์ 105.00 MHz จะเห็นว่าเครื่องส่งวิทยุเครื่องนี้มีค่าผิดพลาดทางความถี่เกินมาตรฐาน



รูปที่ 24 ผลการวัดค่าผิดพลาดทางความถี่ของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มเครื่องหนึ่ง

5. ค่าเบี่ยงเบนทางความถี่ (Frequency deviation)

ค่าเบี่ยงเบนทางความถี่หมายถึงค่าความแตกต่างระหว่างความถี่สูงสุดชั่วขณะ (instantaneous frequency) เมื่อคลื่นพาห้มีการมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับความถี่คลื่นพาห้เมื่อไม่มีการมอดูเลต ข้อกำหนดของ EST EN 302 018-1 V1.2.1 (03-2006) กำหนดไว้ว่าไม่เกิน $\pm 75\text{ kHz}$ (ลักษณะในโดเมนความถี่ของสัญญาณวิทยุแบบเอฟเอ็มที่มีความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด $\pm 75\text{ kHz}$ แสดงในรูปที่ 19) การทดสอบค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณวิทยุ หรือเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในปัจจุบันใช้วิธีประมวลสัญญาณดิจิทัลกระทำที่ความถี่ไอเอฟสุดท้ายของเครื่องรับในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม กระบวนการประมวลสัญญาณดิจิทัลทำให้สามารถแสดงคุณลักษณะของสัญญาณวิทยุเช่น ดัชนีการมอดูเลต การเบี่ยงเบนความถี่ชั่วขณะ รวมถึงการติมอดูเลตสัญญาณเบสแบนด์ซึ่งมอดูเลตอยู่กับคลื่นพาห้ ในกรณีของการทดสอบเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็ม การใช้วิธีการประมวลสัญญาณดิจิทัลทำให้สามารถติมอดูเลตสัญญาณเบสแบนด์ แบบโมนอสเตอริโอ และสัญญาณอาร์ดีเอสได้ในการแสดงผลครั้งเดียวกันดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 25 การแสดงผลการวัดค่าเบี่ยงเบนทางความถี่ซึ่งได้จากระบวนการประมวลสัญญาณดิจิทัล และซอฟต์แวร์

5.1 การทดสอบการเบี่ยงเบนความถี่เกินกำหนดโดยอาศัยสเปกตรัมมาสก์ (Simple spectrum mask based method to indicate the exceeding of frequency deviation)

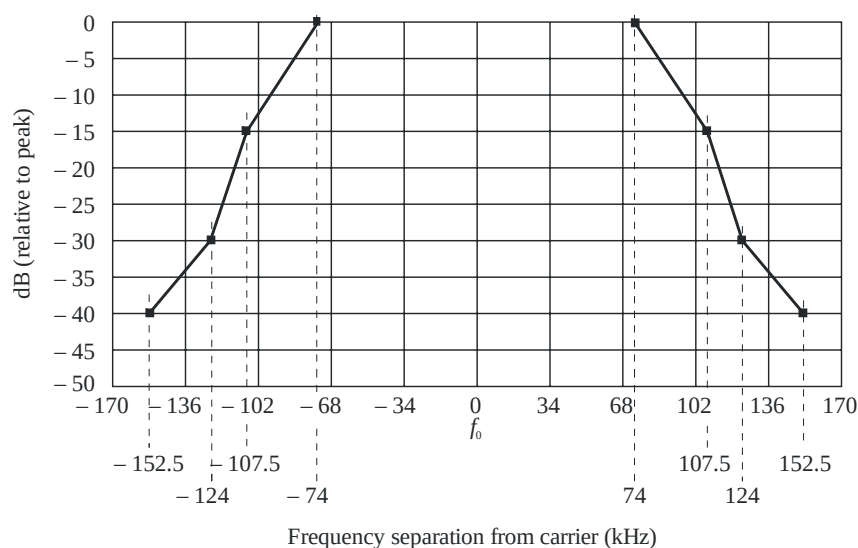
การทดสอบลักษณะนี้เป็นการทดสอบเครื่องส่งขณะกระจายสัญญาณ ซึ่งนำมาใช้กับการนำสัญญาณผ่านอุปกรณ์เครื่องมือวัดเครื่องมือวัด การทดสอบใช้สัญญาณรบกวนดัดแปลง (coloured noise) แทนโปรแกรมการออกอากาศ (สัญญาณเสียงและสัญญาณ RDS) ในกรณีที่เป็นการรับสัญญาณวิทยุจากสถานีวิทยุกระจาย

x-axis (kHz)	y-axis (dB)
$f_0 - 74$	0
$f_0 - 107.5$	-15
$f_0 - 124$	-30
$f_0 - 152.5$	-40

x-axis (kHz)	y-axis (dB)
$f_0 + 74$	0
$f_0 + 107.5$	-15
$f_0 + 124$	-30
$f_0 + 152.5$	-40

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดของสเปกตรัมมาสก์สำหรับการวัดความถี่เบี่ยงเบน (ที่มา R-REC-SM.1268-2-201102)

เสียงที่กำลังออกอากาศ ข้อเสนอ R-REC-SM.1268-2-201102 กำหนดให้ทำสามครั้ง ครั้งละ 5 นาที ลักษณะของสเปกตรัมมาสก์ซึ่งใช้ประกอบการพิจารณาการเบี่ยงเบนความถี่ที่เกินกำหนดแสดงในรูปที่ 22 สเปกตรัมมาสก์สร้างขึ้นจากเส้นตรงต่อจุดโคออดิเนต (coordinate) ตามตารางที่ 3



SM.1268-01

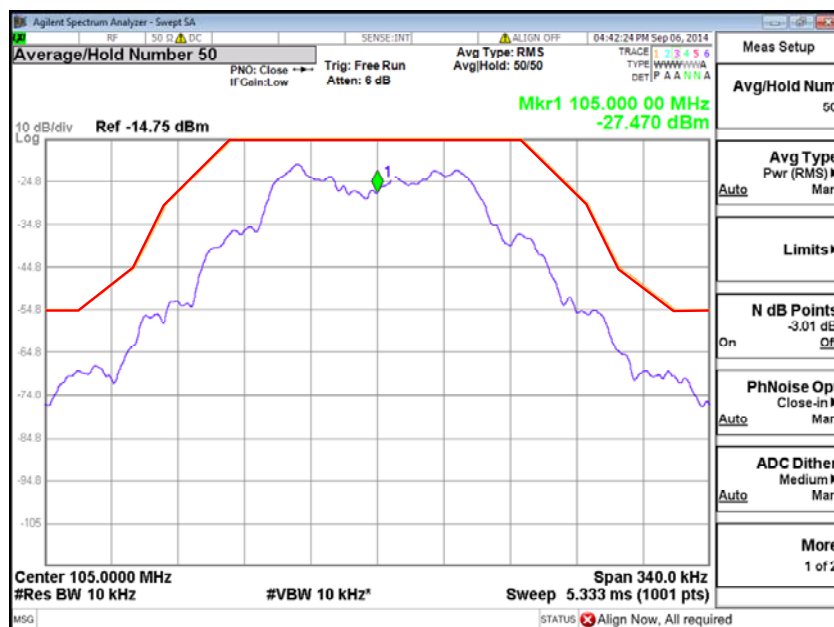
รูปที่ 26 ลักษณะสเปกตรัมมาสก์ที่ใช้พิจารณาความถี่เบี่ยงเบนของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม (ที่มา R-REC-SM.1268-2-201102)

5.1.1 การปรับตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสำหรับการทดสอบการเบี่ยงเบนความถี่เกินกำหนดโดยอาศัยสเปกตรัมมาสก์

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมปรับตั้งค่าดังนี้

- ความถี่กลาง (CF) เท่ากับคลื่นพาห์ของเครื่องส่งวิทยุ
- RBW 10 kHz (IF filter);
- VBW 10kHz (video filter);
- span: 340 kHz;
- เวลาในการกวาด 340 ms หรือ 1 ms/kHz Zเวลากวาดความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในปัจจุบันอาจควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งควบคุมการทำงานของเครื่องให้สอดคล้องกับสมรรถนะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายใน ดังนั้นเวลากวาดความถี่อาจจะน้อยกว่านี้)
- เก็บข้อมูลสัญญาณแบบ max hold
- การลดทอนสัญญาณมีระดับเหมาะสมกับสัญญาณอินพุต

ผลการทดสอบของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มซึ่งใช้คลื่นพาห์ความถี่ 105.00 MHz เครื่องหนึ่งมีผลการทดสอบการการเบี่ยงเบนความถี่เกินกำหนดโดยอาศัยสเปกตรัมมาสก์แสดงในรูปที่ 27



รูปที่ 27 ตัวอย่างผลการทดสอบความถี่เบี่ยงเบนของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็มโดยอาศัยสเปกตรัมมาสก์

สรุป

บทความนี้ได้แสดงให้เห็นวิธีทดสอบเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มสำหรับทดลองประกอบกิจการกระจายเสียงพร้อมกับหลักการขั้นพื้นฐานของเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้อง การประเมินมาตรฐานของเครื่องส่งวิทยุในบางหัวข้อของการทดสอบ ต้องการความรู้ ความเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องมือมาประกอบการตัดสินใจ ผู้ทำการทดสอบต้องทราบว่าผลการวัดซึ่งเครื่องมือแสดง เป็นสิ่งที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณซึ่งคือเครื่องส่งวิทยุ หรือเป็นผลที่เกิดจากการทำงานของเครื่องมือวัดและกระบวนการวัด ความเข้าใจนี้จะทำให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง วิธีการทดสอบมาตรฐานเครื่องส่งวิทยุที่กล่าวมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องส่งวิทยุประเภทอื่นได้เช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] การขึ้นทะเบียนเครื่องส่งวิทยุสำหรับผู้ทดลองประกอบกิจการกระจายเสียงและขั้นตอนการขออนุญาตทำ นำเข้า ใช้ เครื่องส่งฯ และขออนุญาตตั้งสถานี, กลุ่มงานขับเคลื่อนโทรทัศน์เคลื่อนที่และโทรทัศน์ในระบบไอพี (พส.), สำนักงาน คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, กันยายน 2556.
- [2] Recommendation ITU-R SM.329-11, *Unwanted emission in the spurious domain*, International Telecommunication Union, 2011.
- [3] ESTI EN 302 018-1 v1.2.1 (2006-03), *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters; Transmitting equipment for the Frequency Modulated (FM) sound broadcasting service; Part1: Technical characteristics and test methods*, European Telecommunications Standards Institute, 2006.
- [4] ETR 132 (August 1994), *Radio broadcasting systems; Code of practice for site engineering Very High Frequency (VHF), frequency modulated, sound broadcasting transmitters*, European Telecommunications Standards Institute, 1994.
- [5] ETS 300 384 (January 1995), *Radio broadcasting systems; Very High Frequency (VHF), frequency modulated, sound broadcasting transmitters*, European Telecommunications Standards Institute, 1995.
- [6] Recommendation ITU-R SM.1268-2, *Method of measuring the maximum frequency deviation of FM broadcast emissions at monitoring stations*.
- [7] ETS 300 454 (December 1995), *Radio Equipment and Systems (RES); Wide band audio links; Technical characteristics and test methods*, European Telecommunications Standards Institute, 1995.
- [8] P. Vizmuller, *RF Design Guide-Systems, Circuits And Equations*, Artech House, Massachusetts, 1995.
- [9] Bryant, G. H., *Principle of Microwave Measurements*, Peter Peregrinus, London, United Kingdom, 1988.
- [10] Agilent Technologies, Application note AN-64-1C, “Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements,” 2001.
- [11] C. Rauscher, *Fundamentals of Spectrum Analysis*, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2001.
- [12] Rohde & Schwarz, *Service Manual*, Handheld Spectrum Analyzer R&S FSH.

- [13] Anritsu, Technical note, *The Basis of Spectrum Analyzers*, 2007.
- [14] Anritsu, *Guide to Spectrum Analyzers*, 2008.
- [15] Agilent Technologies, Application note AN-150, "Spectrum Analysis Basics," 2014.