

การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ การลดทอน และการสะท้อนสำหรับสายโคแอกเชียล

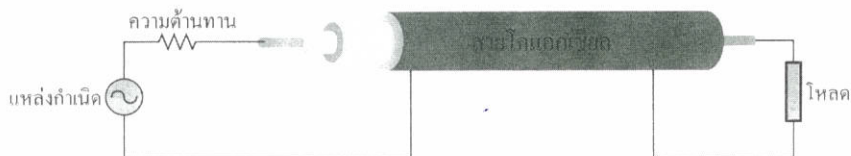
*ปราโมทย์ จางอิสระกุล

สายนำสัญญาณ (transmission line) เป็นอุปกรณ์ในการส่งพลังงานหรือสัญญาณไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด (source) ไปสู่โหลด (load) ความถูกต้องของสัญญาณไฟฟ้าที่ปรากฏ ณ ตำแหน่งนี้จะมากหรือน้อยเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟฟ้าที่แหล่งกำเนิดขึ้นกับตัวแปร เช่น พารามิเตอร์ ความยาวของสายนำสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมที่สายนำสัญญาณถูกนำต่อรวม เป็นต้น การจำแนกชนิดของสายนำสัญญาณสามารถกำหนดได้หลายลักษณะตามคุณสมบัติ แต่ในที่นี้จะแยกออกเป็น 2 แบบ คือ สายนำสัญญาณที่ใช้งานในย่านแถบความถี่ต่ำ (low pass band) เริ่มจากความถี่ศูนย์ (dc) ถึง ความถี่สูงที่ถูกจำกัดไว้ค่า ๆ หนึ่ง เช่น สายโคแอกเชียล (coaxial line) และสายคู่แฉด (twisted-pair line) เป็นต้น และสายนำสัญญาณที่ใช้งานในย่านแถบความถี่สูง (high pass band) เช่น ท่อนำคลื่น (waveguide) เป็นต้น โดยจะพบสายนำสัญญาณชนิดนี้ในระบบไมโครเวฟ บทความนี้ กล่าวถึงสายนำสัญญาณชนิดที่ใ้ช้มากในปัจจุบันคือ สายโคแอกเชียล แสดงการทดลองเกี่ยวกับการวัดคุณสมบัติที่สำคัญของสาย คือ การทดลองวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) การลดทอน (attenuation) และการสะท้อนของคลื่นเมื่อสัญญาณพัลส์เคลื่อนที่เข้าไปในสาย โดยการทดลองเหล่านี้จัดทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าสื่อสาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรและผลการทดลองที่แสดงในที่นี้สามารถนำไปสู่แนวคิดพื้นฐานในหลายเรื่องๆ ด้านวิศวกรรมไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณ เช่น แรงดันและกระแสในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และการออกแบบวงจรสายส่งไมโครสตริป เป็นต้น

* หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต : วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ทฤษฎี

1.1 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ



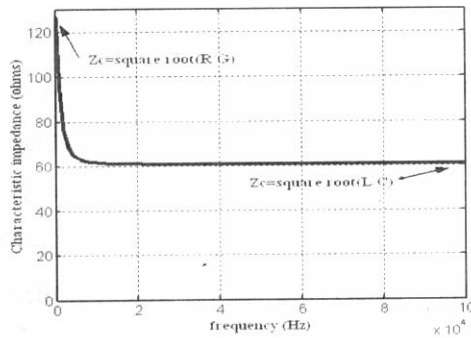
รูปที่ 1 สายนำสัญญาณต่อระหว่างแหล่งกำเนิดและโหลด

ความถูกต้องของสัญญาณ ณ โหลด เมื่อสัญญาณถูกส่งเข้าไปในสายนำสัญญาณขึ้นกับตัวแปรหลายตัว ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็นค่าหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพหรือความถูกต้องของสัญญาณ รูปที่ 1 แสดงการต่อแหล่งกำเนิดที่มีความต้านทานภายในรวมอยู่ด้วยเข้ากับสายนำสัญญาณที่เป็นสายโคแอกเซียล โดยตัวนำภายในของสายจะเป็นสัญญาณบวกและตัวนำภายนอกของสายจะเป็นสัญญาณลบหรือกราวด์ (ground) สำหรับปลายอีกด้านต่อกับโหลด ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (1)$$

เมื่อ R G C และ L คือ ความต้านทาน ความนำ ความจุ และความเหนี่ยวนำ ต่อหนึ่งหน่วยความยาว ตามลำดับ สำหรับ ω คือ ความถี่เชิงมุม ($\omega = 2\pi f$) และ $j = \sqrt{-1}$ จากสมการที่ (1) อิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าทั่วไปเป็นจำนวนเชิงซ้อนแต่สามารถเป็นจำนวนจริงได้ในกรณีความถี่เท่ากับศูนย์ ($f = 0$) ทำให้ค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวไม่มีผลต่อสมการที่ (1) แสดงได้ดังนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{R}{G}} \quad (2)$$



รูปที่ 2 ขนาดของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่แปรตามความถี่

จากสมการที่ (1) และรูปที่ 2 ซึ่งแสดงขนาดของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่แปรตามค่าความถี่ พบว่า ที่ความถี่ต่ำประมาณ 0 - 100 Hz ขนาดของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็นจริงด้วยสมการ $Z_c = \sqrt{L/C}$ เนื่องจากประมาณค่าความถี่เข้าใกล้ศูนย์ในสมการที่ (1) และที่ความถี่สูงกว่า 100 kHz ขนาดของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็นจริงด้วยสมการ เนื่องจากประมาณค่าความถี่มีค่ามาก ๆ ในสมการที่ (1) นอกจากนี้จากกราฟขนาด Z_c ไม่ขึ้นกับความยาวของสาย

1.2 การลดทอน

สายนำสัญญาณที่ใช้ในทางปฏิบัติมีค่าความสูญเสียในสาย ประกอบด้วยการสูญเสียจากความต้านทานของตัวนำภายในและตัวนำภายนอก และจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริก สาเหตุของการสูญเสียในแบบแรกมาจากปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) ซึ่งขึ้นกับความถี่ จากผลอันนี้ทำให้ช่วงความถี่ของสายถูกจำกัด แต่ในการแก้ปัญหาเรื่องนี้ทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของตัวนำภายในและตัวนำภายนอกให้มีขนาดใหญ่ ตัวอย่างของสาย เช่น สายโคแอกเชียล RG58 มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของ RG174 ทำให้การสูญเสียในสาย RG58 มีค่าน้อยกว่าการสูญเสียในสาย RG174 เมื่อความยาวของสายทั้งสองเท่ากัน สำหรับการสูญเสียในแบบที่สองมาจากการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก

1.3 การสะท้อนของคลื่น

การเคลื่อนที่ของพลังงานคลื่นแม่เหล็กตามสายตัวนำเกิดขึ้นในรูปที่เรียกว่า คลื่น มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามเวลาและระยะทาง ณ เวลาหนึ่งที่ค่า ๆ หนึ่ง จะประกอบด้วยรูปคลื่น กระแสและแรงดัน จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นรูปคลื่นทั้งสองจะเปลี่ยนแปลงไป ถ้ากำหนดให้สายนำสัญญาณเส้นหนึ่งมีความยาวเท่ากับ ปลายสายด้านซ้ายมือต่อกับแหล่งกำเนิดและอีก

ด้านของปลายสายต่อกับอิมพีแดนซ์แทนด้วย Z_2 โดยที่ Z_2 มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_C เมื่อพิจารณาตามทฤษฎีแล้ว มีเพียงคลื่นไปหน้า (forward traveling wave) แทนด้วย V_+ เกิดบนสายนำสัญญาณ โดยไม่มีการสะท้อนของคลื่น เนื่องจากอิมพีแดนซ์ที่ต่อปลายสายจะรับพลังงานของคลื่นทั้งหมด แต่ถ้าปลายสายของสายนำสัญญาณต่อกับอิมพีแดนซ์ $Z_2 \neq Z_C$ แล้วจะมีบางส่วนของพลังงานถูกสะท้อนกลับที่ด้านแหล่งกำเนิด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สายไม่แมตช์ (mismatched line) นั่นคือ เกิดทั้งคลื่นไปหน้าและคลื่นย้อนกลับ (backward traveling wave) แทนด้วย V_- บนสายนำสัญญาณ คลื่นย้อนกลับอาจ หมายถึง คลื่นสะท้อน ขนาดของคลื่นสะท้อนสามารถหาจากสมการสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เกิด ณ ปลายสาย ดังนี้

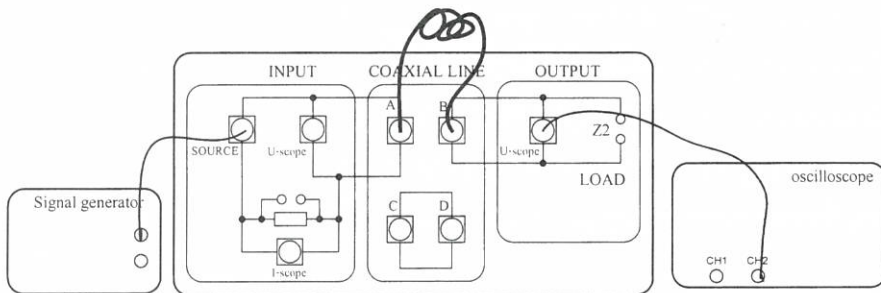
$$r = \frac{V_-}{V_+} \quad (3)$$

เมื่อ r แทนสัมประสิทธิ์การสะท้อน นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถแสดงในฟังก์ชันของอิมพีแดนซ์ Z_2 และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_C ดังนี้

$$r = \frac{Z_2 - Z_C}{Z_2 + Z_C} \quad (4)$$

โดยทั่วไปแล้วสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน (complex number) มีขนาดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และมีมุมอยู่ระหว่าง 0 ถึง 360 องศา

2. การทดลอง



รูปที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การทดลองวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะด้วยวิธีการวัดวงจรลัด (short-circuit measurement) และการวัดวงจรเปิด (open-circuit measurement) มีวงจรการต่อดังรูปที่ 3 (บางส่วนของเครื่องมือการต่อตามขั้นตอนการทดลอง) การทดลองใช้สายโคแอกเซียลที่มีค่าการสูญเสีย

เสียดำ คือ ชนิด RG58 ความยาว 100 เมตร และชนิด RG174 ความยาว 50 เมตร และมีช่วงความถี่ในการทดลองเริ่มตั้งแต่ 100 kHz ถึง 2500 kHz การวัดจะมี 2 กรณี คือ (1) การวัดวงจรลัดโดยการลัดวงจรด้านออก ($Z_2 = 0$) เพื่อต้องการทราบอิมพีแดนซ์ Z_{sc} และ (2) การวัดวงจรเปิด โดยการเปิดวงจรด้านออก ($Z_2 = \infty$) เพื่อต้องการทราบอิมพีแดนซ์ Z_{oc} จากนั้นผลของการวัดอิมพีแดนซ์ทั้งสองแทนในสมการ $Z_c = \sqrt{Z_{sc} \cdot Z_{oc}}$ (จาก Klaus Breidenbach, 1995)

ต่ออิมพีแดนซ์ขนาด 50 โอห์มที่ด้านออก ($Z_2 = 50$) ต่อสายโคแอกเซียลที่ต้องการทดสอบที่ตำแหน่ง COAXIAL LINE (ในรูปที่ 3) และต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ปรับขนาดของสัญญาณ 10 Vpp เมื่อได้รูปคลื่นไซน์แล้ว ให้ถอดอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มออก จากนั้นการหาอิมพีแดนซ์ Z_{sc} และ Z_{oc} ใช้การวัดกระแสด้านเข้าแทนด้วย I_i และแรงดันด้านเข้าแทนด้วย V_i ณ ตำแหน่งสายด้านเข้า (line input) ด้วยออสซิลโลสโคป เมื่อมีการลัดวงจร ($Z_2 = 0$) และเปิดวงจร ($Z_2 = \infty$) ที่ตำแหน่งสายด้านออก (line output) ตามลำดับ ค่ากระแส I_i และแรงดัน V_i ที่ทราบนี้ นำมาหาอิมพีแดนซ์ด้วยความสัมพันธ์ $Z_{sc} = V_i / I_i$ เมื่อลัดวงจร และ $Z_{oc} = V_i / I_i$ เมื่อเปิดวงจร การวัด I_i หมายถึงการวัดแรงดัน ณ ตำแหน่ง I-scope Input ที่ต่อคร่อมความต้านทาน 1 โอห์ม ความหมาย คือ กระแสแสดงด้วยความสัมพันธ์ $I_i = V / 1$ สำหรับการวัด V_i หมายถึงการวัดแรงดัน ณ ตำแหน่ง U-scope Input ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

	Cable : RG58 Length : 100m			Cable : RG174 Length : 50m		
-(kHz)	$Z_{sc} (\Omega)$	$Z_{oc} (\Omega)$	$Z_c (\Omega)$	$Z_{sc} (\Omega)$	$Z_{oc} (\Omega)$	$Z_c (\Omega)$
100	21.33	149.15	56.40	25.33	292.76	86.11
300	100	31.25	55.90	49.47	89.41	66.50
500	275.97	10.13	52.88	91.85	46.90	65.63
1000	16.16	147.27	48.78	134.61	22.13	54.58
1500	108.57	21.76	48.61	36.20	77.02	52.8
2000	27.18	87.80	48.85	26.27	94.28	49.76
2500	73.91	31.66	48.37	78.94	32.5	50.65

จากตารางที่ 1 ความถี่เริ่มต้นประมาณ 100 kHz อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสาย RG58 และ RG174 ที่คำนวณได้ผู้เข้าหาอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม แต่สาย RG 174 จะมีความผิดพลาดในช่วง 4 ความถี่แรกมากกว่า RG 58 เนื่องจากการสูญเสียในสาย ดังนั้นวิธีการนี้เหมาะสมกับการหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะบนความถี่สูงกว่า 100 kHz

การทดลองวัดค่าการลดทอนของสาย มีวงจรการต่อดังรูปที่ 3 (บางส่วนจะมีการปรับอุปกรณ์การต่อตามขั้นตอนการทดลอง) ป้อนสัญญาณพัลส์เข้าที่ด้านเข้าของสาย จากนั้นต่ออิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งโหลดด้วยสมการ $Z_2 = Z_c$ ใช้ออสซิลโลสโคปวัดขนาดแรงดัน (amplitude) ของสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งสายด้านเข้า ณ จุด U-scope Input และวัดที่ตำแหน่งสายด้านออก ณ ตำแหน่ง U-scope Output ของสาย RG58 ความยาว 100 เมตร และชนิด RG174 ความยาว 100 เมตร ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำโดยปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ตามค่าในตารางที่ 2 เมื่อได้ค่าแรงดันทั้งสองแล้ว คำนวณค่าการลดทอนของสายด้วยสมการ $a = 200 \log (V_1 / V_2) \text{ dB/km}$ โดยตัวเลข 200 มาจากการแปลง 100 เมตร ไปสู่ 1000 เมตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

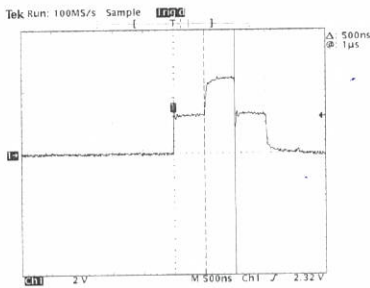
ตารางที่ 2 ผลการวัดการลดทอนของสาย

		Cable : RG58 Length : 100m			Cable : RG174 Length : 100m		
$T_0(ns)$	$\tau_p(kHz)$	$V_1(V)$	$V_2(V)$	$a(dBKm^{-1})$	$V_1(V)$	$V_2(V)$	$a(dBKm^{-1})$
1000	100	2.56	2.24	11.60	3.04	1.76	47.47
500	200	2.56	2.16	14.75	2.88	1.52	55.50
250	400	2.48	2.08	15.27	2.72	1.36	60.20
125	800	2.40	2.00	15.83	2.56	1.12	71.80

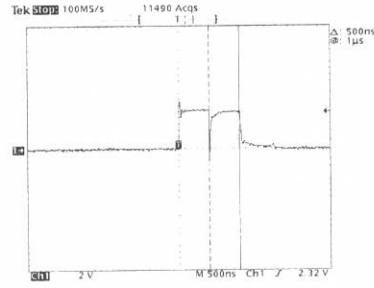
จากตารางที่ 2 ค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นทั้ง RG58 และ RG174 มีค่าไม่สูงมากนัก แต่ค่าจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ทางผิว นอกจากนี้สาย RG58 มีค่าการลดทอนน้อยกว่าค่าการลดทอนของสาย RG174 เนื่องจากสาย RG58 มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่า

การทดลองวัดการสะท้อนของคลื่น มีวงจรการต่อดังรูปที่ 3 (บางส่วนจะมีการปรับอุปกรณ์การต่อตามขั้นตอนการทดลอง) เมื่อป้อนสัญญาณพัลส์เข้าที่ด้านเข้าของสาย โดยปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ให้มีขนาด $T_0 = 100ns$ ต่อเข้ากับสาย RG58 ความยาว 50 เมตร สัญญาณพัลส์จะเปรียบเสมือนคลื่นที่เดินทางในสาย ใช้ออสซิลโลสโคปวัดขนาดแรงดันของ

สัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งสายด้านเข้า ณ จุด U-scope Input ส่วนที่ตำแหน่งสายด้านออกจะมี การต่อ 3 ลักษณะ คือ เปิดวงจร ($Z_2 = \infty$) ลัดวงจร ($Z_2 = 0$) และต่อโหลด ($Z_2 = Z_c$) สัญญาณ ที่เกิดบนสายจะประกอบด้วยสัญญาณพัลส์ส่งและพัลส์สะท้อนกลับ มีผลการทดลองดังแสดง ในรูปต่อไปนี้

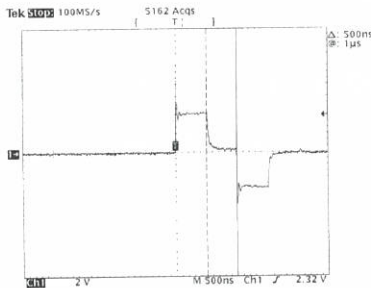


(ก) $T_0 = 1000ns$

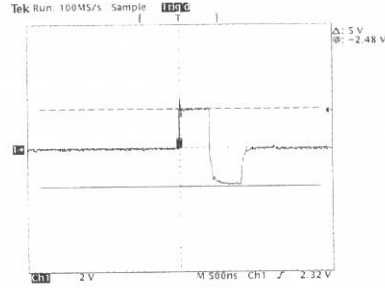


(ข) $T_0 = 500ns$

รูปที่ 4 สัญญาณพัลส์ส่งและพัลส์สะท้อนกลับ เมื่อเปิดวงจร

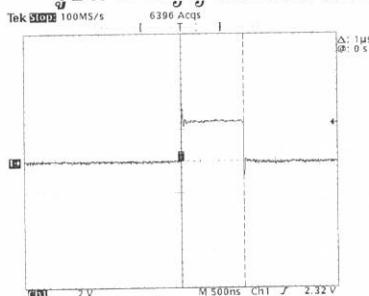


(ก) $T_0 = 1000ns$

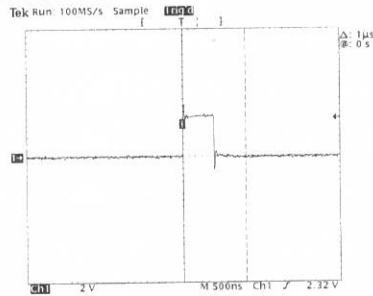


(ข) $T_0 = 500ns$

รูปที่ 5 สัญญาณพัลส์ส่งและพัลส์สะท้อนกลับ เมื่อปิดวงจร



(ก) $T_0 = 1000ns$



(ข) $T_0 = 500ns$

รูปที่ 6 สัญญาณพัลส์ส่ง ไม่เกิดพัลส์สะท้อนกลับ เมื่อต่อโหลด

เวลาของการเกิดสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับในสาย RG 58 ความยาว 50 เมตรเท่ากับ 500 ns โดยคำนวณมาจากความเร็วเฟส (phase velocity) ดังนี้ จากรูปที่ 4 (ก) เมื่อปลายสายเปิดวงจรและพัลส์ส่งมีเวลา $T_0 = 100ns$ เกิดพัลส์สะท้อนที่ปลายสายและมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ $+1 (R = +1)$ เนื่องจากพัลส์ทั้งสองมีสัญญาณเป็นช่วงบวกและมีขนาดเท่ากัน นอกจากนี้เกิดการซ้อนกัน (overlap) ของพัลส์ทั้งสองด้วยช่วงเวลา 500 ns และรวมกันจะมีขนาดเพิ่มเป็นสองเท่า สำหรับในรูปที่ 4 (ข) พัลส์ส่งมีเวลา $T_0 = 500ns$ เท่ากับเวลาของการเกิดสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับในสาย ทำให้พัลส์ทั้งสองไม่เกิดการซ้อนกันและมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ $+1$ เช่นกัน

รูปที่ 5 (ก) เมื่อปลายสายปิดวงจรและพัลส์ส่งมีเวลา $T_0 = 100ns$ เกิดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ $-1 (R = -1)$ เนื่องจากพัลส์ส่งมีสัญญาณเป็นช่วงบวก และพัลส์สะท้อนมีสัญญาณเป็นช่วงลบ แต่พัลส์ทั้งสองมีขนาดเท่ากัน นอกจากนี้เกิดการซ้อนกันของพัลส์ทั้งสองด้วยช่วงเวลา 500 ns และหักล้างกันเท่ากับศูนย์ รูปที่ 5 (ข) พัลส์ทั้งสองไม่เกิดการซ้อนกันและมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -1

รูปที่ 6 เมื่อปลายสายต่อโหลด หมายถึงอิมพีแดนซ์ที่โหลดเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสาย ผลทำให้โหลดได้รับพลังงานสูงสุดจากการส่งของแหล่งกำเนิด จึงไม่เกิดพัลส์สะท้อนในสาย

บทความนี้แสดงการทดลองวัดคุณสมบัติที่สำคัญของสายโคแอกเซียลชนิด RG58 และ RG174 ประกอบด้วย อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ การลดทอน และการสะท้อนของพัลส์ในสาย (1) การทดลองวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะด้วยวิธีการวัดวงจรลัดและการวัดวงจรเปิดเพื่อหา Z_{sc} และ Z_{oc} จากนั้นแทนอิมพีแดนซ์ทั้งสองในสมการ $Z_c = \sqrt{Z_{sc} \cdot Z_{oc}}$ กำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz -2500 kHz ผลการวัดที่ได้มีค่าอยู่เข้าสู่อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสาย จะมีความผิดพลาดบ้างกับสาย RG174 แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ให้ผลถูกต้องในระดับดีของการหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (2) การทดลองวัดค่าการลดทอนของสาย มีหลักการพื้นฐานจากการวัดขนาดแรงดันของสัญญาณที่ตำแหน่งด้านเข้า (V_1) และขนาดของแรงดันของสัญญาณที่ตำแหน่งด้านออก (V_2) จากนั้นแทนแรงดันทั้งสองในสมการ $a = 200 \log (V_1 / V_2)$ มีหน่วยเป็น dB / km หมายถึงการลดทอนของสัญญาณในหน่วย dB ต่อระยะสาย 1 กิโลเมตร แม้ในการทดลองจะใช้กับสายโคแอกเซียลความยาว 100 เมตรก็ตาม แต่สามารถแปลงหน่วยไปสู่กิโลเมตรได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายโคแอกเซียลที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็ก (สาย RG174 มีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าสาย RG58) จะมีค่าการลดทอนมาก และเมื่อความถี่ของสัญญาณที่เดิน

ทางในสายเพิ่มมากขึ้นการลดทอนจะมีมากขึ้นเช่นกัน เป็นผลจากปรากฏการณ์ทางผิว แต่สามารถหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์นี้ด้วยการใช้ท่อนำคลื่น และ (3) การทดลองวัดการสะท้อนของคลื่น มีหลักการที่สำคัญ คือ ป้อนสัญญาณพัลส์เข้าที่ด้านเข้าของสาย แล้ววัดแรงดันของสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งนี้ โดยที่ตำแหน่งปลายสายมีการต่อ 3 ลักษณะ คือ เปิดวงจร ($Z_2 = \infty$) ลัดวงจร ($Z_2 = 0$) ต่อโหลด $Z_2 = Z_C$ ผลการทดลอง คือ ถ้าปลายสายต่อแบบเปิดวงจร แบบลัดวงจร และแบบต่อโหลด $Z_2 = Z_C$ จะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อน $r = +1$ $r = -1$ และ $r = 0$ ตามลำดับ สายสัญญาณที่ต่อในระบบไม่ควรที่จะเกิดการสะท้อนของคลื่นหรือมีการสะท้อนของคลื่นค่าต่ำ นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ความกว้างของสัญญาณพัลส์ (T_0) จะมีผลต่อการเกิดการซ้อนกันของสัญญาณ โดยทำให้ขนาดของพัลส์ส่งและพัลส์สะท้อนกลับมีการเสริมกันหรือหักล้างกัน นั่นคือ ถ้าเกิดการเสริมกัน ทำให้มีขนาดของพัลส์เพิ่มเป็นสองเท่า แต่ถ้าเกิดการหักล้างกัน ขนาดของพัลส์จะเป็นศูนย์ ซึ่งสิ่งนี้จะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาแรงดันเกินในสายของระบบสายส่ง



บรรณานุกรม

- ศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร. (2541) กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- Breidenbach, Klaus. (1995). **Transmission Technology : Measurements on Coaxial Lines**. Germany : Leybold Didactic GmbH.
- Kraus, John D. and Fleisch, Daniel A. (1999). **Electromagnetics : with Applications**. (5th ed.) Boston : McGraw-Hill.