

บทที่ 2

คลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การศึกษาปัญหาของคลื่นรบกวนต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาจแบ่งออกเป็นส่วนสำคัญได้ 3 ส่วน ดังในรูปที่ 2.1 คือ

- 1) ต้นกำเนิดของคลื่นรบกวน (Source of interference)
- 2) กลไกการคับปลิงของคลื่นรบกวน (Coupling mechanism)
- 3) อุปกรณ์หรือวงจรที่มีความไวต่อคลื่นรบกวน (Sensitive circuit or measuring devices)



รูปที่ 2.1 ผังแสดงการรบกวนของสัญญาณรบกวน

การรบกวนอาจเข้ามาทางวงจรโดยผ่านตัวนำ หรือผ่านเข้ามาทางอากาศหรือสนาม การศึกษาในที่นี้จะเน้นถึงการรบกวนในลักษณะของสนาม คือ สนามไฟฟ้าซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน สนามแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าของกระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วย สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน

2.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเกิดจากธรรมชาติ หรือมนุษย์สร้างขึ้น [7, 8]

2.1.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่

1) ฟ้าผ่า ขณะที่เกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างพื้นโลกกับก้อนเมฆมีค่าค่อนข้างสูง และมีกระแสฟ้าผ่าไหลสูงมาก ปรากฏการณ์ฟ้าผ่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดพัลส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP) ขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งก็คือคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงประเภทหนึ่ง

2) สนามแม่เหล็กโลก เป็นสนามแม่เหล็กที่แพร่อยู่ระหว่างขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ โดยมีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากขั้วโลกเหนือไปสู่ขั้วโลกใต้ ในกรณีนี้เรียกว่า พายุสนามแม่เหล็ก (magnetic storm) ซึ่งพายุสนามแม่เหล็กดังกล่าวนี้ยังสร้างสนามไฟฟ้าออกมาด้วย

3) ฝนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีคอสมิก (cosmic) เป็นฝนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเช่น อินฟราเรด อุลตราไวโอเลต ฯลฯ แพร่ออกมาจากระบบสุริยะจักรวาลและดวงอาทิตย์ เข้าสู่โลกในลักษณะของคลื่นระนาบ

2.1.2 แหล่งกำเนิดฝนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น

แหล่งกำเนิดฝนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้นมีอยู่มากมาย แต่ที่สำคัญได้แก่

1) สวิตชิ่งทรานเซียนต์ (switching transient) เป็นแรงดันและกระแสที่มีขนาดสูงผิดปกติ และมีความถี่สูงที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระบวนการสวิตชิ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถสร้างพัลส์ฝนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในวงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันสูง แพร่ออกสู่อวกาศ

2) สัญญาณสื่อสาร เช่น ระบบโทรศัพท์และวิทยุ สามารถสร้างคลื่นรบกวนฝนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงได้

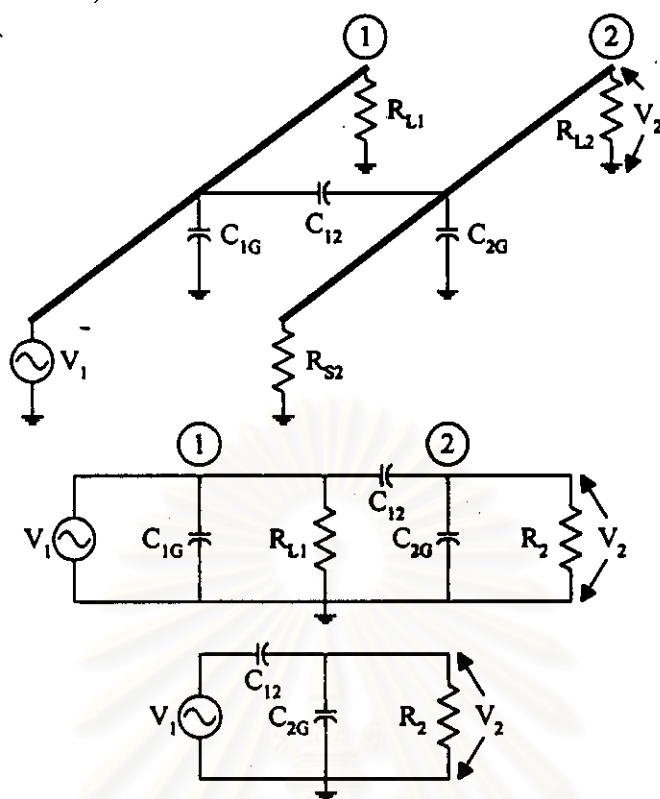
3) สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ 50 Hz

การศึกษาในที่นี้จะเน้นที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่พลังงาน 50 Hz ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถพิจารณาแยกกันได้ เนื่องจากในช่วงความถี่พลังงานนี้การคับปลิงระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กค่อนข้างอ่อน ดังนั้นทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงไม่ขึ้นแก่กัน โดยสนามไฟฟ้าจะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า ส่วนสนามแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมีหลายอย่าง แต่ที่จะพิจารณาในที่นี้คือ บริเวณใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และในสถานีไฟฟ้า

2.2 สนามไฟฟ้า

2.2.1 การคับปลิงสนามไฟฟ้า

เมื่อใดก็ตามที่มีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเสมอ [9] ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ และระยะระหว่างตัวนำทั้ง 2 ชิ้นดังกล่าว การคับปลิงสนามไฟฟ้า จะผ่านความจุไฟฟ้า (capacitor) เรียกว่า ความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray capacitance) เกิดขึ้นระหว่างตัวนำ 2 ตัวนำ ดังนั้นการคับปลิงสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าสามารถแสดงเป็นแบบจำลองของความจุไฟฟ้าสเตรย์ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองความจุไฟฟ้าสแตตริอในช่วงความถี่ต่ำระหว่างสายตัวนำ 2 เส้น

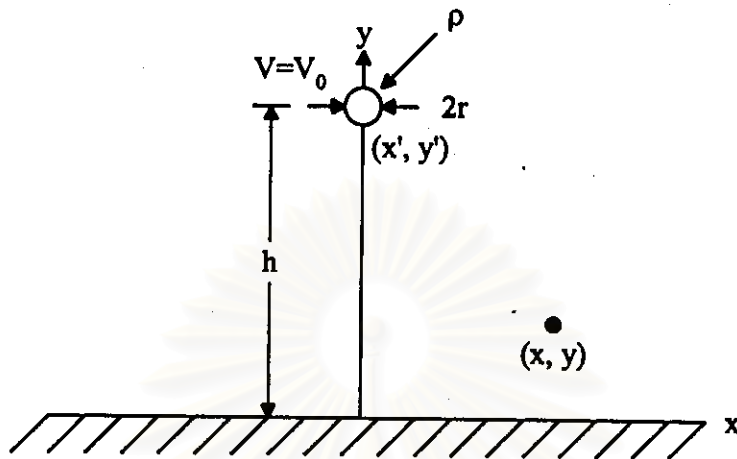
จากรูปที่ 2.2 สายตัวนำเส้นที่ 1 มีแรงดัน V_1 และเส้นที่ 2 เป็นโหลดซึ่งแทนด้วยอิมพีแดนซ์ $R_2 = R_{S2} // R_{L2}$ โดยที่ C_{1G} และ C_{2G} เป็นความจุไฟฟ้าสแตตริอ์ลงดินของตัวนำแต่ละเส้น ค่าความจุไฟฟ้าสแตตริอ์ระหว่างตัวนำแทนด้วยค่า C_{12} และ V_2 เป็นแรงดันตกคร่อมโหลด R_2 ในกรณีอุดมคติ V_1 และ V_2 จะเป็นอิสระต่อกัน และ V_2 ไม่ได้เป็นตัวแปรของ V_1 แต่เนื่องจากการคับปลิงสนามไฟฟ้า (C_{12}) ทำให้ไม่สามารถพิจารณา V_1 และ V_2 แยกกันได้ เป็นสาเหตุให้ V_2 มีค่าขึ้นอยู่กับ V_1 ดังแสดงเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง V_1 กับ V_2 ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$V_2 = \frac{sV_1 C_{12}}{1 + sR_2(C_{12} + C_{2G})} \quad (2.1)$$

สมการที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า V_2 จะมีค่าขึ้นอยู่กับ V_1 จากรูปที่ 2.2 ถ้าสายตัวนำเส้นที่ 1 ซึ่งมีแรงดัน V_1 คือ แหล่งกำเนิดคลื่นรบกวน เช่น สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และสายตัวนำเส้นที่ 2 ซึ่งมีแรงดัน V_2 คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งนั่นก็คือการเกิดปัญหาสัญญาณรบกวนขึ้นนั่นเอง

2.2.2 การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ใช้แบบจำลอง 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นแบบตัวนำเส้นเดี่ยว

กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างสายส่งจ่ายกับกราวด์เป็น V_0 โวลต์ ระยะห่างระหว่างสายส่งกับกราวด์เป็น h เมตร ศักย์ไฟฟ้าที่จุด (x, y) ใดๆ $V(x, y)$ จะต้องสอดคล้องกับสมการสนามไฟฟ้าสถิตดังนี้คือ

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.2)$$

เมื่อแก้สมการที่ 2.2 พร้อมด้วยเงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าบนสายส่งจ่ายกับกราวด์แล้ว ก็จะได้ผลเฉลยของ $V(x, y)$ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ก. ถึง 2.3 ค. [10]

$$V(x, y) = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{(y+h)^2 + x^2}{(y-h)^2 + x^2} \right] \quad (2.3 ก.)$$

$$\vec{E}(x, y) = \frac{-\rho}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2(y+h)\vec{a}_y + 2x\vec{a}_x}{(y+h)^2 + x^2} - \frac{2(y-h)\vec{a}_y + 2x\vec{a}_x}{(y-h)^2 + x^2} \right] \quad (2.3 ข.)$$

$$\rho \approx \frac{2\pi\epsilon_0 V_0}{\ln(2h/r)} \quad (2.3 ค.)$$

โดยที่ V_0 คือ แรงดันที่กระจายบนสายตัวนำ หรือ $V(0, h-r)$

ρ คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของสายตัวนำ

r คือ รัศมีของสายตัวนำ

h คือ ความสูงของสายตัวนำ

ถ้าสมมติให้พื้นดินหรือกราวด์เป็นตัวนำที่คิดหนึ่งที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ในระบบสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ตัวนำหลายเส้น ซึ่งการคำนวณก็จะซับซ้อนมากขึ้น นั่นคือจะต้องนำสมการ 2.3 มาประยุกต์ใหม่ ให้สามารถคิดตั้งตัวนำแต่ละเส้นอยู่ที่ใดก็ได้ ในอากาศหรือในแกน x และ y ที่กำหนดขึ้นมา โดยแทน x ด้วย $x-x'$ แทน $y+h$ ด้วย $y+y'$ และแทน $y-h$ ด้วย $y-y'$ เมื่อ (x', y') คือตำแหน่งที่ตั้งของสายตัวนำ (x, y) คือ จุดที่ต้องการพิจารณาและ ρ คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าตามสายตัวนำ จากสมการ 2.3 ก. และ ข. จะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$V(x, y) = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{(y+y')^2 + (x-x')^2}{(y-y')^2 + (x-x')^2} \right] \quad (2.4 ก.)$$

$$\vec{E}(x, y) = \frac{-\rho}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2(y+y')\hat{a}_y + 2(x-x')\hat{a}_x}{(y+y')^2 + (x-x')^2} - \frac{2(y-y')\hat{a}_y + 2(x-x')\hat{a}_x}{(y-y')^2 + (x-x')^2} \right] \quad (2.4 ข.)$$

ในการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับระบบสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลายเส้น จะต้องหาค่าประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นเสียก่อน เนื่องจากว่าแรงดันที่กระจายจากสายตัวนำแต่ละเส้นจะมีผลต่อสายตัวนำเส้นอื่นๆ ทำให้ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน เป็นสาเหตุให้สมการ 2.3 ก. ที่ใช้หาค่าประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำเส้นเดียว ไม่สามารถนำมาใช้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบ 3 เฟส ซึ่งยังต้องพิจารณาถึงผลของมุมเฟสที่นำหรือตามกัน 120° ด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการประยุกต์สมการใหม่เพิ่มเติม โดยพิจารณารูปที่ 2.4 ประกอบ



(x, y)

รูปที่ 2.4 ระบบสายส่งสมมติซึ่งมีสายตัวนำหลายเส้น

จากรูปที่ 2.4 สมมติระบบซึ่งมีสายตัวนำหลายเส้นขึ้นมา จากสมการ 2.4 ก. ถ้ากำหนดให้

$$V(x, y) = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{(y+y')^2 + (x-x')^2}{(y-y')^2 + (x-x')^2} \right] = \rho Z \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาผลของการกระจายแรงดันจากสายตัวนำแต่ละเส้นที่มีต่อสายตัวนำเส้นอื่นๆ ซึ่งจากสมการที่ 2.5 ก็คือ Z เป็นตัวกำหนดถึงผลดังกล่าว และการกระจายแรงดันจากสายตัวนำนี้จะทำให้ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสายตัวนำแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะมีค่าแรงดันเท่ากันก็ตาม จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho_1 Z_{1,1} + \rho_2 Z_{1,2} + \dots + \rho_n Z_{1,n} &= V_1 \\ \rho_1 Z_{2,1} + \rho_2 Z_{2,2} + \dots + \rho_n Z_{2,n} &= V_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho_1 Z_{m,1} + \rho_2 Z_{m,2} + \dots + \rho_n Z_{m,n} &= V_m \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่ $Z_{m,n}$ คือ ผลของสายตัวนำ n บนสายตัวนำ m โดยที่ n เท่ากับ m

ρ_n คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำ n

V_m คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งทราบค่าของสายตัวนำ m

สมการ 2.6 แสดงให้เห็นว่า แรงดันบนสายส่งตัวนำแต่ละเส้น จะได้จากการรวมผลของประจุไฟฟ้าของสายตัวนำเส้นอื่นๆบนสายตัวนำเส้นนั้น และสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{1,n} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{2,n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{m,1} & Z_{m,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_m \end{bmatrix}^T \quad (2.7)$$

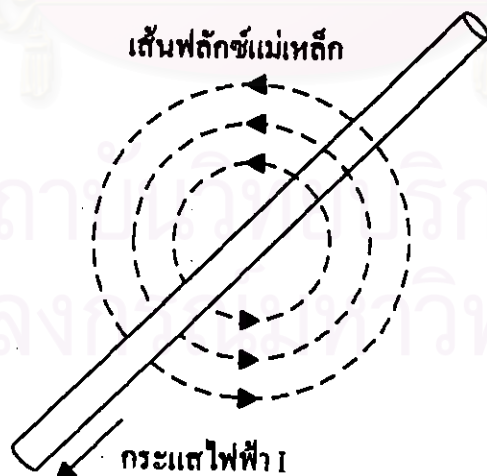
โดยใช้สมการที่ 2.5 - 2.7 จะสามารถแก้สมการหาค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นออกมาได้ โดยจะต้องทราบค่า Z ในเมตริกซ์ทั้งหมด และนำค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นที่ได้มาแทนค่าในสมการที่ 2.4 ข. ซึ่งสามารถคำนวณแยกกันได้ จะได้ค่าสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากสายตัวนำแต่ละเส้น จากนั้นนำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากสายตัวนำทั้งหมดมารวมกันตามแนวแกน x และ y และหาขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้า ความถูกต้องของการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้านี้ จะอยู่ที่การหาค่าประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้น ซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่ามีแรงดันไฟฟ้าเท่ากันก็ตาม

2.3 สนามแม่เหล็ก

เป็นที่ทราบกันดีว่า ตัวนำใดก็ตามที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ในที่นี้จะเน้นไปที่สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบสายตัวนำ สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นสำคัญ

2.3.1 การค้ำป้อถึงสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กรอบตัวนำใด ๆ จะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เส้นประคือ เส้นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) ซึ่งจะครบรอบเสมอ ความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density, B) มีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก H (magnetic field intensity) ที่เกิดจากกระแส I ที่ระยะ x [9] ดังแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9



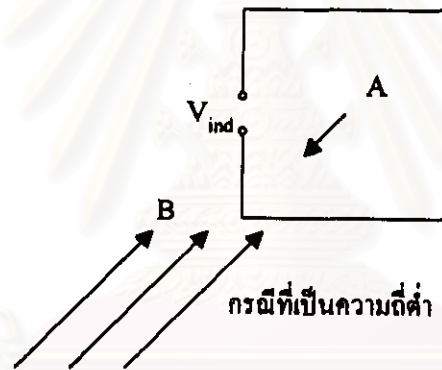
รูปที่ 2.5 สนามแม่เหล็กซึ่งแพร่ออกมาจากสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

$$H_\phi = f(I) = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.8)$$

$$B = \mu H \quad (2.9)$$

- โดยที่ B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb/m^2 หรือ Tesla
 μ คือ ค่าเปอร์มิบิลิตี (permeability) ของตัวกลางที่เส้นฟลักซ์แม่เหล็กแพร่ผ่าน มีค่า $\mu_0 \mu_r$ โดย μ_0 คือ ค่าเปอร์มิบิลิตีของอากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ และ μ_r คือ ค่าเปอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์ของวัสดุที่เส้นฟลักซ์แม่เหล็กแพร่ผ่าน
 H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A/m

การคับปลิงระหว่างสนามแม่เหล็กกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สามารถอธิบายได้โดยใช้หลักการของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กตามกฎหมายของฟาราเดย์ และใช้รูปที่ 2.6 ประกอบ



รูปที่ 2.6 แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรถ้าเป็นรูป ในพื้นที่ที่เต็มไปด้วยสนามแม่เหล็ก

ในรูปที่ 2.6 เมื่อเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา $B = B_0 e^{j\omega t}$ เมื่อ B_0 คือ ค่ายอดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก จึงผ่านส่วนประกอบที่เป็นรูป (loop) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หนึ่งๆ จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นภายในรูปนั้น ตามกฎหมายของฟาราเดย์ (Faraday's Law) แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรต ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ของรูป A ดังสมการที่ 2.10

$$V_{ind} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot \vec{n} dA$$

$$V_{ind} = -\frac{d}{dt} B_0 e^{j\omega t} A \cos\theta$$

$$V_{ind} = -j\omega B_0 e^{j\omega t} A \cos\theta \quad (2.10)$$

โดยที่ \bar{n} คือ เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นที่รูป
 θ คือ มุมระหว่างทิศทางของ \bar{B} กับ \bar{n}

ด้วยเหตุนี้เองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่มีส่วนประกอบเป็นรูป จึงสามารถจะถูก รบกวนจากสนามแม่เหล็กที่แผ่ออกมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

2.3.2 การคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ สามารถนำกฎของ Biot-Savart มาประยุกต์ใช้ได้ โดยใช้รูป 2.3 มาประกอบการคำนวณ สมมติว่าพื้นดินเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (non-magnetic material) จากกฎของ Biot-Savart [10] จะได้

$$\bar{B}(x, y) = -2I \left[\frac{(y-h)a_x - xa_y}{(y-h)^2 + x^2} \right] \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 เมื่อเขียนใหม่เพื่อใช้กับระบบสายส่งจ่ายที่ประกอบด้วยตัวนำหลายเส้น โดยแทน x ด้วย $x-x'$ และ $y-h$ ด้วย $y-y'$ โดยที่ (x', y') เป็นตำแหน่งของสายตัวนำและ (x, y) เป็นจุดที่ต้องทำการพิจารณา จากสมการ 2.11 จะได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$\bar{B}(x, y) = -2I \left[\frac{(y-y')a_x - (x-x')a_y}{(y-y')^2 + (x-x')^2} \right] \quad (2.12)$$

ในกรณีของระบบ 3 เฟส จะต้องพิจารณาดังมุมของแต่ละเฟสที่สัมพันธ์กัน 120° ด้วย

2.4 การชดเชย

เนื่องจากว่าปัญหาสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะมีสาเหตุมาจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการป้องกันคลื่นรบกวนในที่นี้ ก็จะเป็นการปิดกั้นสนามแม่เหล็ก เป็นการลดทอนหรือป้องกันการคับปลิงของสนามแม่เหล็กที่ไม่พึงปรารถนาเข้ามายังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีวิธีหลัก ๆ อยู่ 2 วิธี [11] คือ

1) Flux Shunting คือการใช้โลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูง มาวางกันระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับตัวรับสัญญาณ ในที่นี้คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดไหลในเนื้อโลหะ

2) Eddy Current คือการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่เข้ามาบริเวณ โดยใช้โลหะที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงๆมาวางกันระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับตัวรับสัญญาณ ในลักษณะที่เป็นวงล้อมรอบตัวรับสัญญาณ เพื่อให้ Eddy Current ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นสามารถไหลได้ครบวงจรและสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้าง ทั้งนี้และทั้งนั้นการจัดวางโลหะดังกล่าวนี้จะต้องขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่แพร่เข้ามาด้วย

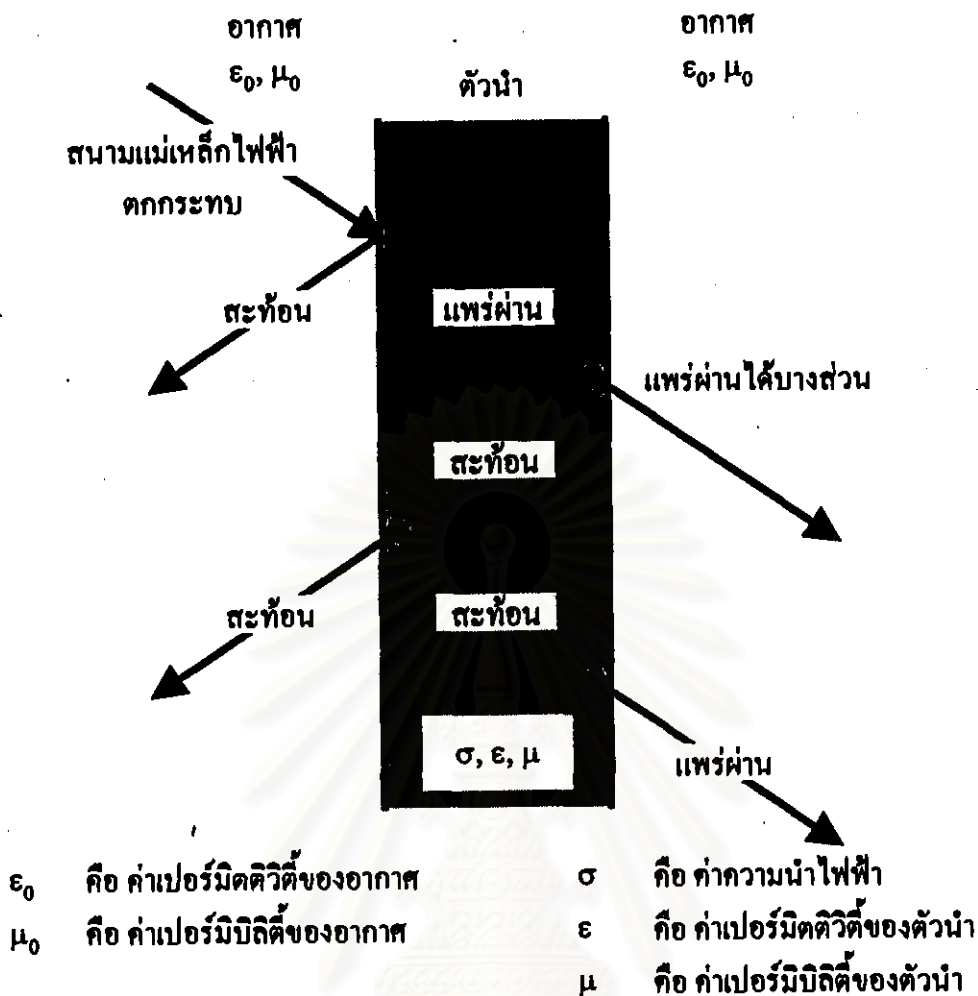
2.4.1 ประสิทธิภาพของการชิลด์ (Shielding effectiveness)

ประสิทธิภาพของการชิลด์ จะกำหนดโดยอัตราส่วนการลดทอนสนามแม่เหล็ก ขณะที่สนามแม่เหล็กแพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิด จะทำการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตจุดหนึ่งก่อนโดยไม่มีการชิลด์ หลังจากทำการติดตั้งชิลด์ระหว่างแหล่งกำเนิดกับจุดสังเกต ก็ทำการวัดที่จุดเดิมอีกครั้งหนึ่ง ประสิทธิภาพของการชิลด์สามารถคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กก่อนการชิลด์ และหลังการชิลด์ดังสมการที่ 2.13

$$SE(\text{dB}) = 20 \log \left[\frac{|B|_{\text{unshielded}}}{|B|_{\text{shielded}}} \right] \quad (2.13)$$

การปิดกั้นสนามแม่เหล็ก จะอาศัยหลักการการลดทอนสนามแม่เหล็กเมื่อแพร่ผ่านผนังโลหะ คือ การสะท้อนสัญญาณ (reflection) และการดูดกลืนสัญญาณ (absorption) [9] ดังในรูปที่ 2.7 หลักการชิลด์มีพื้นฐานมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านผนังโลหะ และการสะท้อนจากผิวของโลหะ คลื่นรบกวนจากแหล่งกำเนิดจะสะท้อนจากผิวของชิลด์ส่วนหนึ่ง และคลื่นรบกวนที่เหลือจะแพร่ผ่านชิลด์ หลังจากถูกดูดกลืนไว้ในชิลด์อีกส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ก็ยังมี การสะท้อนไปมา (multiple reflection) ระหว่างผิวของผนังโลหะด้านใน สำหรับชิลด์ที่เป็นแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ทราบความหนาแน่นอน ประสิทธิภาพของการชิลด์สามารถประมาณได้ด้วยตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณ (absorption loss, A) ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนสัญญาณ (reflection loss, R) และตัวแปรอีกตัวหนึ่งคือ M แทนตัวแปรของการสะท้อนไปมา

$$S = A + R + M \quad (\text{dB}) \quad (2.14)$$



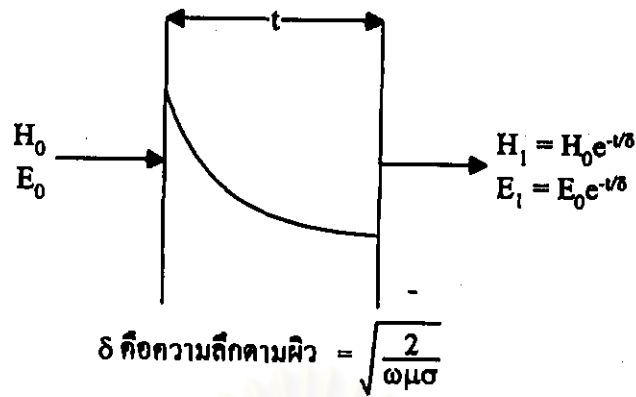
รูปที่ 2.7 ผลกระทบของผนังโลหะต่อสัญญาณรบกวน

หลักการลดทอนสนามแม่เหล็กจะอาศัยการดูดกลืนและการสะท้อนคลื่นดังต่อไปนี้

1) ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพรม่านโลหะตัวนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานให้กับค่าความต้านทานของโลหะ ด้วยสาเหตุนี้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีความเข้มลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล ตามความหนาของโลหะตัวนำไฟฟ้า ความลึกตามผิว (skin depth) ของโลหะ ซึ่งหมายถึง ระยะทางใต้พื้นผิวของโลหะที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดทอนลงโดยตัวแปร e (exponential) จะเป็นตัวกำหนดค่าคงที่การลดทอนสัญญาณ

จากรูปที่ 2.8 ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณ สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพรม่านเข้ามายังผนังโลหะกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดทอนลงที่อีกด้านหนึ่งของผนังโลหะ



รูปที่ 2.8 การลดทอนสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

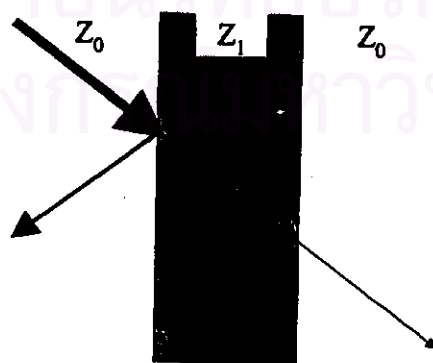
- โดยที่ t คือ ความหนาของโลหะตัวนำไฟฟ้า
 δ คือ ความลึกตามผิวของโลหะตัวนำไฟฟ้า

$$A = 20 \log \left[\frac{H_0}{H_0 e^{-\nu \delta}} \right]$$

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.15)$$

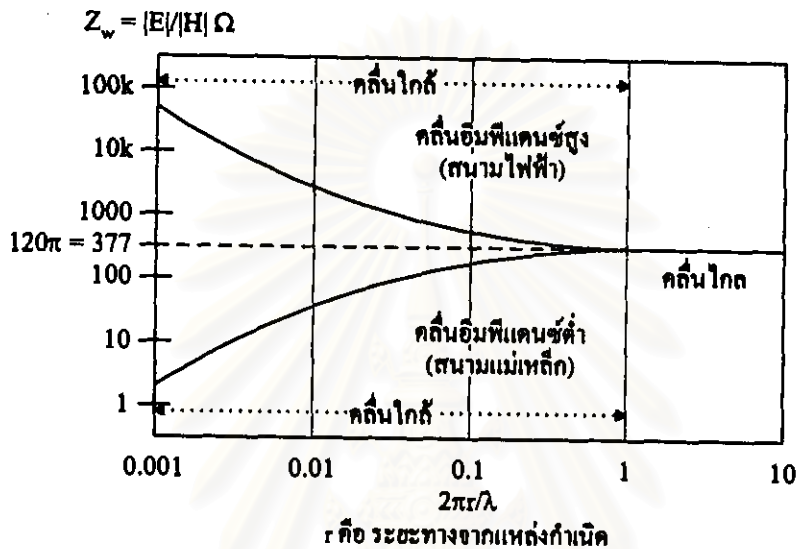
2) ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่น

ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นเกิดขึ้นได้เพราะการที่อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านมีค่าเปลี่ยนไป ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.9 ผนังชนิดนี้มีขอบเขตการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์อยู่ 2 แห่ง แห่งแรกคือ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านจากอากาศซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 เข้าสู่โลหะซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_1 และแห่งที่สอง คือ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ออกจากโลหะสู่อากาศ



รูปที่ 2.9 ขอบเขตการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านผนังโลหะ

การคำนวณค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่น จะเริ่มที่การหาค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น (wave impedance, Z_w) เสียก่อน ดังรูปที่ 2.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า [12] อิมพีแดนซ์ของคลื่นก็คืออัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า (E) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) โดยอัตราส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับระยะทาง r จากแหล่งกำเนิดไปยัง จุดที่ทำการวัด



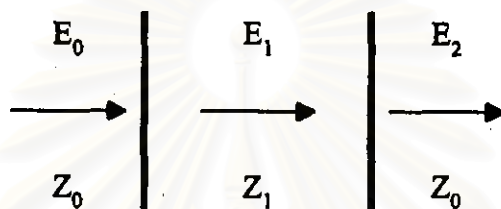
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายความหมายของคลื่นใกล้ (near field) และคลื่นไกล (far field) ได้ดังนี้ คือ

- จุดที่ $2\pi r/\lambda = 1$ หรือเมื่อระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น $r = \lambda/2\pi$ จะเป็นจุดที่แบ่งแยกระหว่างคลื่นใกล้และคลื่นไกล
- คลื่นใด ๆ ก็ตามจะอยู่ในสภาวะคลื่นไกล ก็ต่อเมื่อ $r \gg \lambda/2\pi$ ซึ่งในสภาวะคลื่นไกลนี้ อิมพีแดนซ์ของคลื่น $Z_w = Z_0 = E/H = 377 \Omega$ คลื่นจะเป็นคลื่นระนาบ (plane wave)
- เมื่อ $r \ll \lambda/2\pi$ คลื่นใด ๆ จะอยู่ในสภาวะของคลื่นใกล้ อิมพีแดนซ์ของคลื่น $Z_w = E/H = Z_0 \lambda/2\pi r$ ในกรณีนี้ $Z_w \gg Z_0$ เนื่องจาก $\lambda/2\pi r \gg 1$ คลื่นที่อยู่ในเงื่อนไขนี้ก็คือ สนามไฟฟ้า หรือ สนามอิมพีแดนซ์สูง (High impedance field)
- ในสภาวะคลื่นใกล้เช่นเดียวกับข้อที่แล้ว ถ้าคลื่นมี $Z_w \ll Z_0$ เมื่อ $\lambda/2\pi r \gg 1$ หรือมี $Z_w = E/H = Z_0 \lambda/2\pi r$ คลื่นนี้จะเรียกว่าเป็น สนามแม่เหล็ก หรือ สนามอิมพีแดนซ์ต่ำ (Low impedance field)

สรุปได้ว่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นจะมีค่าสูงเมื่อจุดที่ทำการวัดอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า และในทางตรงกันข้ามถ้าจุดที่ทำการวัดอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ของคลื่นก็จะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามถ้าจุดที่ทำการวัดอยู่ไกลจากทั้งแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นจะมีค่าเข้าใกล้ 120π หรือ 377Ω ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นระนาบ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของคลื่นว่าเป็นสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก รูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงการแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กผ่านตัวนำไฟฟ้าตามลำดับ



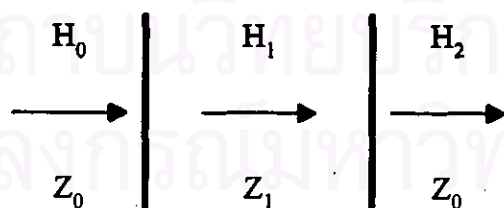
รูปที่ 2.11 การแพร่ของสนามไฟฟ้าผ่านตัวนำ

เมื่อละเลยการสะท้อนไปมาภายในจะได้

$$E_1 = \frac{2Z_1}{Z_0 + Z_1} E_0 \quad E_2 = \frac{4Z_0 Z_1}{(Z_0 + Z_1)^2} E_0$$

และเมื่อ $Z_1 \ll Z_0$ จะได้

$$E_2 = \frac{4Z_1}{Z_0} E_0 \quad R_E = 20 \log \left[\frac{Z_0}{4Z_1} \right]$$



รูปที่ 2.12 การแพร่ของสนามแม่เหล็กผ่านตัวนำ

เมื่อละเลยการสะท้อนไปมาภายในจะได้

$$H_1 = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_1} H_0 \quad H_2 = \frac{4Z_0 Z_1}{(Z_0 + Z_1)^2} H_0$$

และเมื่อ $Z_1 \ll Z_0$ จะได้

$$H_2 = \frac{4Z_1}{Z_0} H_0 \quad R_H = 20 \log \left[\frac{Z_0}{4Z_1} \right]$$

จากรูปที่ 2.11 สนามไฟฟ้าความเข้ม E_0 แพร่จากตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 เข้าไปยังตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_1 ซึ่งสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มลดลงเหลือ E_1 การชดเชยที่ค่า E_1 จะต้องมีค่าต่ำ เพราะนั่นหมายความว่าสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่แพร่เข้ามาจะสะท้อนกลับที่ผนังของตัวนำ ในเนื้อตัวนำ สนามไฟฟ้า E_1 ยังแพร่ต่อไปถึงแม้ว่าจะลดทอนลงเนื่องจากผลของผนังโลหะ เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของค่าการสูญเสียจากการสะท้อนและค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณสนามไฟฟ้า E_2 ซึ่งแพร่ผ่านออกจากผนังอีกด้านหนึ่งของตัวนำสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 จากสมการแสดงให้เห็นว่าตัวนำมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำจะลดค่าการสูญเสียจากการสะท้อนลงได้

จากรูปที่ 2.12 ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนของสนามแม่เหล็กก็สามารถคำนวณได้คล้ายๆ กับของสนามไฟฟ้า ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนของสนามแม่เหล็กจะมีค่าต่ำกว่าของสนามไฟฟ้าในกรณีที่อยู่ในสถานะคลื่นไกล เพราะว่าอิมพีแดนซ์ Z_0 จะมีค่าต่ำลงเมื่ออยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิด สนามแม่เหล็ก ภายในเนื้อตัวนำลักษณะสมบัติของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างจากสนามไฟฟ้า เนื่องจากสถานะขอบเขต (boundary condition) ที่แตกต่างกัน ในเนื้อตัวนำ สนามแม่เหล็ก H_1 จะมีค่าเท่ากับ $2H_0$ ถ้าหากว่า Z_1 มีค่าต่ำกว่า Z_0 มาก ๆ ซึ่งไม่เหมือนกับกรณีของสนามไฟฟ้า ในกรณีที่ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณมีค่าต่ำ พลังงานที่สะท้อนกลับภายในตัวนำที่ขอบเขตผนังที่สองของตัวนำ จะไม่สามารถละเลยทิ้งได้

2.4.2 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำและวัสดุที่ใช้ปิดกั้น

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อน สำหรับสถานะคลื่นไกลทั้งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นจะเป็นกลไกการชดเชยที่สำคัญในการพิจารณาสำหรับในช่วงความถี่ต่ำ ขณะที่ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่นเป็นกลไกสำคัญในช่วงความถี่สูง สำหรับสนามไฟฟ้าในสถานะคลื่นไกล ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนเป็นกลไกหลักในช่วงความถี่ต่ำ ขณะที่ในช่วงความถี่สูง ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่นจะเป็นตัวแปรสำคัญ แต่สำหรับสนามแม่เหล็กในสถานะคลื่นไกล สถานการณ์ที่เกิดขึ้นค่อนข้างแตกต่างจากของสนามไฟฟ้า คือ ทั้งค่าการสูญเสียจากการสะท้อนและการดูดกลืนคลื่นจะมีค่าค่อนข้างต่ำในช่วงความถี่ต่ำ และค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่นจะเป็นกลไกหลักของการชดเชยที่ทุกช่วงความถี่ นั่นหมายความว่า การปิดกั้นสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่ต่ำจะทำได้ค่อนข้างยาก ข้อความข้างต้นได้ไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สภาวะคลื่นไกลและคลื่นใกล้ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ชนิดของคลื่น	สภาวะ	กลไกการซัดที่สำคัญ	
		ช่วงความถี่ต่ำ	ช่วงความถี่สูง
สนามไฟฟ้า	คลื่นไกล	R	A
	คลื่นใกล้	R	A
สนามแม่เหล็ก	คลื่นไกล	R	A
	คลื่นใกล้	R, A	A

หมายเหตุ R คือ ค่าการสูญเสียจากการสะท้อน

A คือ ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่น

การปิดกั้นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำมี 2 วิธี คือ

- 1) การเพิ่มค่าการสูญเสียการดูดกลืนสัญญาณให้กับ โทหะที่จะใช้เป็นซัดด์
- 2) การทำให้สนามแม่เหล็กในบริเวณที่มีความไวต่อคลื่นรบกวนลดลง

ทั้ง 2 วิธีสามารถทำได้โดยใช้วัสดุที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูงมาทำเป็นซัดด์ ซึ่งจะช่วยลดความถี่

ตามผิว $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ และจัดเตรียมส่วนที่มีค่ารีลักแตนซ์ (reluctance) ต่ำเพื่อเป็นเส้นทางไหลของเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก

วัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กสามารถแบ่งตามโครงสร้างอะตอมของวัสดุและค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์ (relative permeability) ได้ดังนี้ [13]

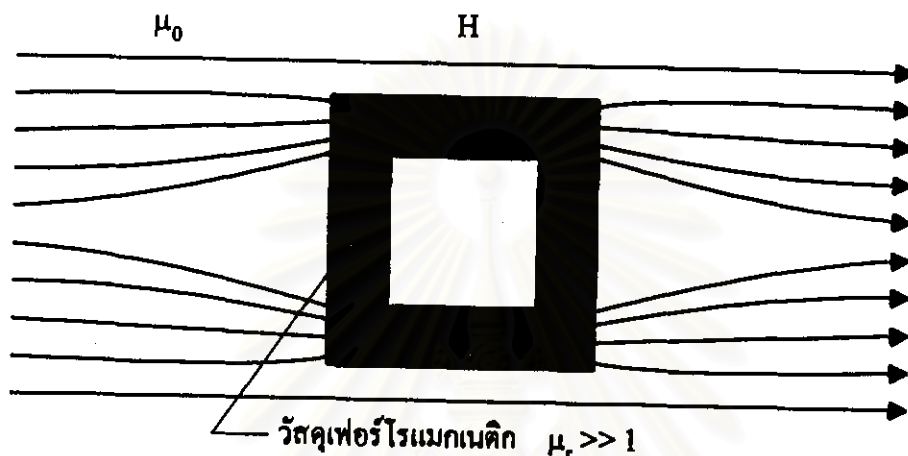
- วัสดุไดแมกเนติก (diamagnetic material) มีค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์ต่ำกว่า 1
- วัสดุพาราแมกเนติก (paramagnetic) และแอนตี้เฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic) มีค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์สูงกว่า 1 เล็กน้อย
- วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) และเฟอร์ริแมกเนติก (ferrimagnetic) มีค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์สูงกว่า 1 มาก

ในตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ ได- พารา- และเฟอร์โรแมกเนติก

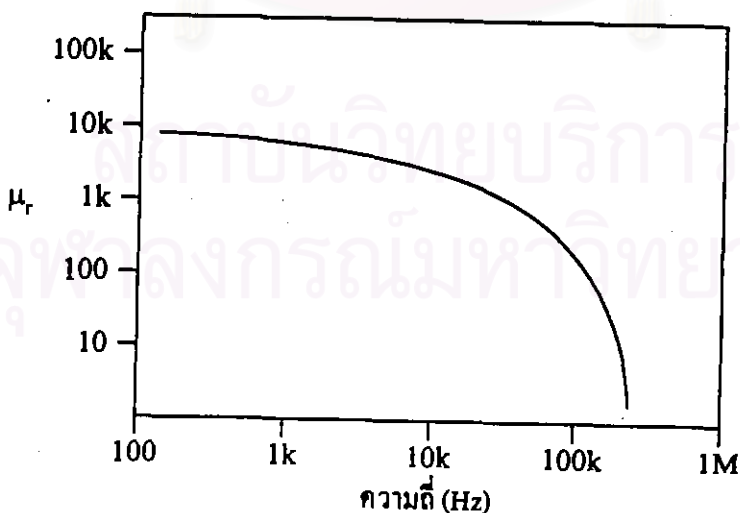
คุณสมบัติ	ไดแมกเนติก	พาราแมกเนติก	เฟอร์โรแมกเนติก
ความไวต่อสนามแม่เหล็ก	ต่ำและเป็นลบ	ต่ำและเป็นบวก	สูงและเป็นบวก
เปอร์มีบิลิตี	< 1	> 1	>> 1
การเรียงตัวของสารแม่เหล็ก	ตรงกันข้าม	สะเปะสะปะ	ทิศทางเดียวกัน

จากตารางที่ 2.2 วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการปิดกั้นสนามแม่เหล็ก วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีความสามารถในการรวมเส้นฟลักซ์แม่เหล็กหรือเพิ่มเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในเนื้อวัสดุ เนื่องจากว่ามีค่ารีลักแตนซ์ต่ำ ทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านเนื้อวัสดุได้ง่ายกว่าไหลไปทางอื่น ดังในรูปที่ 2.13 แสดงการเบี่ยงเบนเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

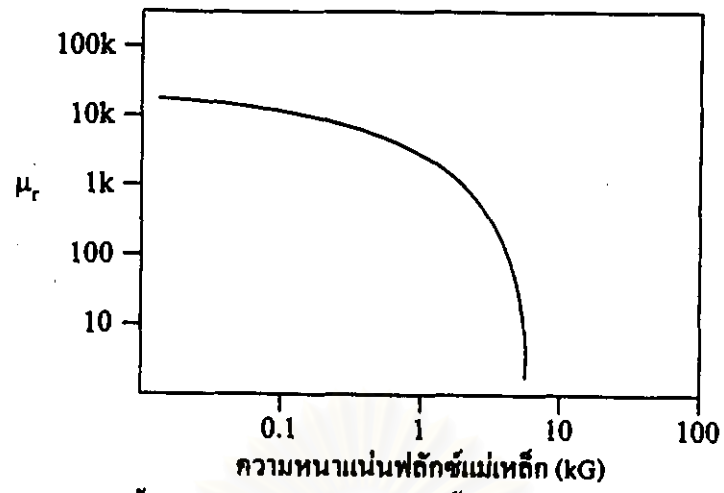


รูปที่ 2.13 การเบี่ยงเบนของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

อย่างไรก็ตามมีปัจจัย 2 ปัจจัย ที่จะทำให้ประสิทธิภาพของการปิดกั้นสนามแม่เหล็กลดลง ก็คือ ค่าเปอร์มิบิลิตีของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นและความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 [9] ตามลำดับ



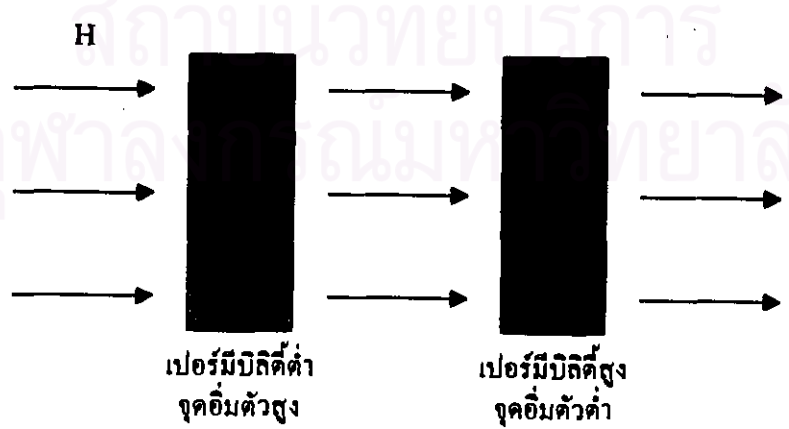
รูปที่ 2.14 ค่าเปอร์มิบิลิตีของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกขึ้นอยู่กับความถี่



รูปที่ 2.15 ค่าเปอร์มีบิลิตีของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกขึ้นอยู่กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

ในรูปที่ 2.14 และ 2.15 แสดงถึงปรากฏการณ์อิ่มตัว (saturation) ของค่าเปอร์มีบิลิตี เมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะสูญเสียคุณสมบัติที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูง ซึ่งโดยส่วนใหญ่ วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูง จะมีจุดอิ่มตัวต่ำ ทำให้สูญเสียความสามารถในการปิดกั้นสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่สูง และ/หรือ ในบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงมาก ๆ

ในกรณีสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ การอิ่มตัวเนื่องจากความถี่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งทำให้การอิ่มตัวโดยความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ยังมีความสำคัญมากขึ้น การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้ โดยการปิดกั้นโดยใช้วัสดุหลาย ๆ ชั้น การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้วัสดุหลาย ๆ ชั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการชิลด์ได้แม้แต่ในบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงมาก ๆ ในรูปที่ 2.16 วัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กและมีค่าเปอร์มีบิลิตีต่ำ แต่จุดอิ่มตัวสูง จะวางไว้ระหว่างแท่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับวัสดุที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูงแต่จุดอิ่มตัวต่ำ วัสดุที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีต่ำแต่จุดอิ่มตัวสูงนี้จะลดทอนสนามแม่เหล็กไปส่วนหนึ่งก่อนที่สนามแม่เหล็กที่เหลือจะแพร่เข้าสู่วัสดุที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูงแต่จุดอิ่มตัวต่ำ ทำให้สมบัติของการชิลด์ไม่เสียเนื่องจากการอิ่มตัวของค่าเปอร์มีบิลิตี



รูปที่ 2.16 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กหลาย ๆ ชั้น