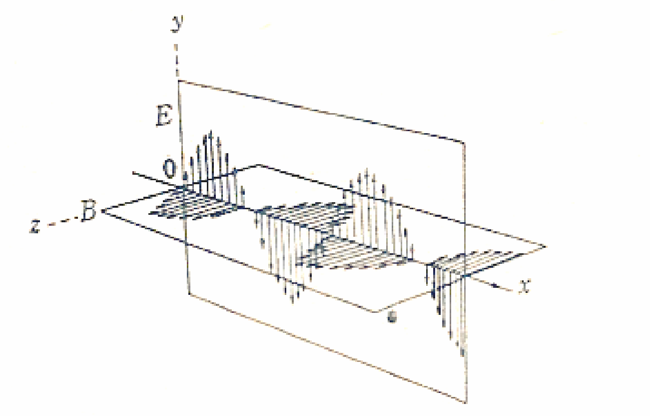
หน่วยที่ 6
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

6.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกัน และเคลื่อนที่ด้วยเฟสตรงกันตลอดเวลาเช่น คลื่นแสง ดังรูป 7.1 การเคลื่อนที่เป็นไปตามกฎของแม่เหล็กและไฟฟ้าดังนี้



รูป 6.1 ระนาบแม่เหล็กและไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กล่าวมาในหน่วยที่ 1 และ 3 เป็นสนามที่มีลักษณะสถิต กล่าวคือจะมีค่าคงที่เสมอไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ขนาดของสนามจะแปรค่าไปตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามไปยังตำแหน่งที่ต้องการหาสนามนั้น ในยุคก่อนนั้นเชื่อกันว่าปรากฏการณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กเป็นปรากฏการณ์ที่แยกจากกันอย่างเด็ดขาด จนถึง ค.ศ. 1865 เจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ (James Cleark Maxwel) ได้เสอสมการเกี่ยวกับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า 4 สมการ และยังทำนายด้วยว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสามารถเดินทางร่วมกันในอวกาศได้ เรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในสมัยนั้นยังไม่มีการค้นพบคลื่นวิทยุและยังไม่มีใครทราบว่าแสงก็จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง

6.1.1 สมการแมกซ์เวลล์

สมการแมกซ์เวลล์ทั้งสี่สมการได้มาจากการรวบรวมกฎที่สำคัญซึ่งเป็นรากฐานของวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์สร้างเป็นสมการ รายละเอียดของแต่ละสมการมีดังนี้

1. สมการแรกจะเป็นกฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า กล่าวว่าฟลักซ์ทั้งหมด (ϕ_E) ผ่านพื้นที่ผิวปิดจะมีค่าเท่ากับประจุสุทธิภายในผิวปิดนั้นเสมอ ดังสมการ

$$\phi_E = \in_0 \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = q \qquad \text{...................} (6.1)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าเส้นแรงของสนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเปิด เส้นแรงจะเริ่มต้นจากประจุบวกไปยังประจุลบ แรงทางไฟฟ้าสถิตสามารถหาได้จากกฎของคูลอมบ์ ประจุไฟฟ้าอิสระในธรรมชาติมีได้ทั้งประจุบวกหรือประจุลบ จากคณิตศาสตร์ในเรื่องเวกเตอร์วิเคราะห์ การอินทิเกรตรอบผิวปิดใด ๆ สามารถเขียนแทนได้ด้วยอินทิเกรตเชิงปริมาตร โดยใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (divergence theorem) ดังนี้

$$\oint_S \vec{A} \cdot d\vec{s} = \int_V (\vec{\nabla}.\vec{A}) dV \qquad \text{...................} (6.2)$$

จากสมการ (6.1) เปลี่ยนประจุ q ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นประจุ (ρ) คูณด้วยปริมาตรย่อยเล็ก ๆ (dV) จะได้

$$q = \int_V \rho dV$$

กฎของเกาส์ในสมการ (6.1) จะกลายเป็น

$$\varepsilon_0 \int_V (\vec{\nabla}.\vec{E}) dV = \int_V \rho dV$$

สมการนี้เป็นจริงเสมอที่ทุกๆ จุดใดๆ ในปริมาตร เขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{\nabla}.\vec{E} = \rho / \varepsilon_0 \qquad \text{...................} (6.3)$$

2. สมการที่ 2 ของแมกซ์เวลล์ จะเป็นกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก เพราะว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นวงปิดเสมอ เส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้าผิวปิดจึงมีค่าเท่ากับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกจากผิวปิด จำนวนเส้นแรงสุทธิที่ผ่านผิวปิดหนึ่ง ๆ จึงมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\phi_B = \oint_S \vec{B}.d\vec{s} = 0 \qquad \text{...................} (6.4)$$

อาศัยทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์จะได้

$$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \qquad \text{...................} (6.5)$$

สมการ (6.5) แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า เราไม่สามารถพบขั้วแม่เหล็กอิสระ (แม่เหล็กที่มีขั้วเหนือหรือขั้วใต้เพียงอย่างเดียว) เหมือนกับที่ได้พบประจุอิสระ

3. สมการที่ 3 เป็นสมการเกี่ยวกับการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือทำให้เกิดสนามไฟฟ้าได้

จากกฎของฟาราเดย์จะได้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรอบวงจรปิด $= -\frac{\partial \phi_B}{\partial t}$

หรือ $\oint \vec{E}.d\vec{l} = -\frac{\partial \int \vec{B}.d\vec{s}}{\partial t}$ ....(6.6)

อาศัยทฤษฎีของสโตกส์ (Stoke's Theorem) จากเรื่องเวกเตอร์วิเคราะห์ ซึ่งเปลี่ยนรูปการอินทิเกรตรอบเส้นปิดให้เป็นการอินทิเกรตเชิงพื้นที่ได้ดังนี้

$$\oint_L \vec{A}.d\vec{l} = \int_S (\vec{\nabla} \times \vec{A}).d\vec{s} \quad ....(6.7)$$

สมการ (6.6) จึงเปลี่ยนรูปได้ใหม่เป็น

$$\int_S (\vec{\nabla} \times \vec{E}).d\vec{s} = -\frac{\partial \int \vec{B}.d\vec{s}}{\partial t} \quad ....(6.8)$$

สมการ (6.8) เป็นจริงเสมอกับทุก ๆ ผิวย่อย ds เขียนให้อยู่ในรูปเชิงอนุพันธ์จะได้เป็น

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad ....(6.9)$$

4. สมการที่ 4 เป็นกฎของแอมแปร์ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\oint_L \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I \quad ....(6.10)$$

สมการ (6.10) หมายถึงการหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กไปตามเส้นปิดล้อม L จะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่ที่ถูกปิดล้อมด้วยเส้นปิดนั้นเสมอ สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่สนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา แต่ถ้าบริเวณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าหรือขนาดประจุมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลาจะต้องคิดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ด้วย กระแสไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกว่า “กระแสไฟฟ้าการขจัด” (displacement current, I_d)

กระแสไฟฟ้าการขจัดหาได้จากสูตร

$$I_d = \frac{\partial \phi_E}{\partial t}$$

$$= \frac{d}{dt}\int (\varepsilon_0 \vec{E}.d\vec{s}) \quad ....(6.11)$$

เมื่อรวมกระแสการขจัดเข้าไปด้วย สมการ (6.10) จะได้เป็น

$$\oint \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 (I + I_d) \quad ....(6.12)$$

แทนค่า I = $\int \vec{J}.d\vec{s}$ และ I_d จากสมการ (6.11)

$$\oint \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 \left(\int \vec{J}.d\vec{s} + \int \frac{d}{dt}(\varepsilon_0 \vec{E}.d\vec{s}) \right)$$

ใช้ทฤษฎีของสโตกส์ สมการ (6.7)

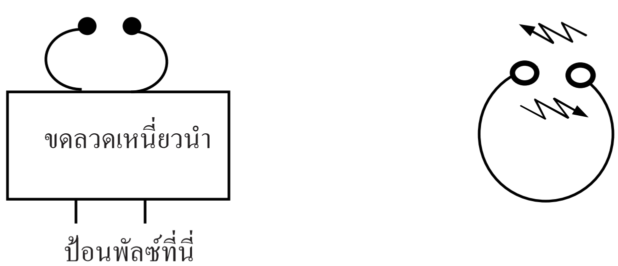
$$\int_S (\vec{\nabla} \times \vec{B}).d\vec{s} = \mu_0 \left(\int \vec{J}.d\vec{s} + \int \frac{d}{dt}(\varepsilon_0 \vec{E}.d\vec{s}) \right)$$

เขียนให้อยู่ในรูปเชิงอนุพันธ์จะได้

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \text{.................(6.13)}$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (6.13) กับสมการ (6.9) จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก ถ้าให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $(\vec{J})$ ในสมการ (6.13) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

หลังจากแมกซ์เวลล์ได้เสนอสมการแมกซ์เวลล์ 4 สมการและทำนายว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีจริง ผู้ที่ตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคนแรกยืนยันคำทำนายของแมกซ์เวลล์คือ เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz) โดยทดลองในปี ค.ศ. 1887



รูป 6.2 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของเฮิร์ตซ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับโลหะทรงกลม 2 ลูก ซึ่งวางใกล้กันมาก จะทำหน้าที่คล้ายกับเป็นตัวเก็บประจุ อุปกรณ์ชุดนี้ทำหน้าที่คล้ายวงจร LC ของเครื่องส่งคลื่นวิทยุ การสั่นแกว่ง (oscillate) ของคลื่นเกิดขึ้นได้โดยป้อนความต่างศักย์เป็นคลื่นช่วงสั้น ๆ (pulse) เข้าไปที่ขดลวดตัวนำ จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ประมาณ 100 MHz จากนั้นเฮิร์ตซ์สร้างวงจรขึ้นมาอีกวงหนึ่ง ประกอบด้วยขดลวดเพียงขดเดียว ที่ปลายขดลวดมีทรงกลมตัวนำวางไว้ใกล้ ๆ กัน วงจรชุดนี้ทำหน้าที่คล้ายเครื่องรับคลื่น เฮิร์ตซ์พบอีกว่าวงจรรับคลื่นจะสามารถรับคลื่นได้ก็ต่อเมื่อความถี่ที่ส่งมา

นั้นเป็นความถี่อภินาทของวงจรรับคลื่นพอดี ถ้าความต่างศักย์บนขดลวดชุดรับคลื่นมีค่าสูงจะทำให้เกิดประกายไฟกระโดดข้ามระหว่างทรงกลมทั้งสอง การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าพลังงานสามารถส่งผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้โดยอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเขียนสมการเพื่อแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้โดยนำสมการแมกซ์เวลล์บางสมการมาจัดรูปใหม่ เริ่มต้นด้วยสมการ (6.9) ใช้วิธีการเคิร์ล (curl) กับสมการนี้ทั้งสองข้าง

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \frac{-\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \times \vec{B})$$

แทนเทอมด้านขวามือด้วยสมการ (6.13) ในตัวกลางที่เป็นอวกาศ ความหนาแน่นกระแส (J) = 0

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \frac{-\partial}{\partial t}(\mu_0 \in_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t})$$

เพราะว่า $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E}$

ในอวกาศไม่ประจุอิสระ ($\rho = 0$) ดังนั้น $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$

จะได้ $$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \in_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \qquad \text{...................(6.14)}$$

สมการ (6.14) เป็นสมการคลื่นที่มีสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรกับตำแหน่งและเวลา

ในทำนองเดียวกันถ้าเริ่มต้นด้วยสมการ (6.13) จะได้สมการของคลื่นสนามแม่เหล็กที่แปรตามตำแหน่งและเวลาเช่นเดียวกัน

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \in_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \qquad \text{...................(6.15)}$$

เมื่อเทียบกับสมการคลื่นทั่วๆ ไปใน 3 มิติ f (r, t) คือ

$$\vec{\nabla}^2 f = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 f}{dt^2} \qquad \text{...................(6.16)}$$

เมื่อ v คือความเร็วของคลื่น

ให้ c เป็นความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของเทอมด้านขวามือของสมการ (6.15) และ (6.16) จะเห็นว่า

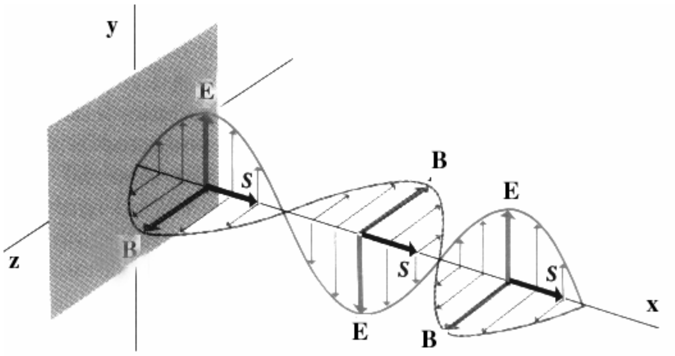
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \in_0}} \qquad \text{...................(6.17)}$$

สมการ (6.17) เป็นผลพลอยได้จากสมการแมกซ์เวลล์เมื่อแทนค่า μ_0 และ $\in_0$ สามารถคำนวณหาความเร็วแสงได้

$$c = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7})(8.8542 \times 10^{-12})}}$$

$$= 2.998 \times 10^{8} \text{ m/s}$$

สมการ (6.15) และสมการ (6.16) เป็นสมการอนุพันธ์ซึ่งแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบ (plane wave) สนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ และสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ จะแปรค่าตามตำแหน่งพิกัด (x, y, z) และเวลา t แนวการเปลี่ยนค่าของ $\vec{E}$ และ $\vec{B}$ จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งได้ฉากกับทิศการเคลื่อนที่ เพราะแนวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีทิศตั้งฉากซึ่งกันและกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงจัดเป็นคลื่นตามขวาง (transverse wave)



รูป 6.3 แสดงสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งพิกัด x และ t

เมื่อหาคำตอบสมการอนุพันธ์ (6.15) และ (6.16) จะได้ฟังก์ชันคลื่นระนาบที่มีความถี่ $f = \omega / 2\pi$ และ $\lambda = 2\pi/k$ ดังนี้

$$E = E_0 \sin (kx - \omega t)$$

$$B = B_0 \sin (kx - \omega t)$$

เมื่อ E_0 และ B_0 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กคือ

$$n|E| = c|B|$$

เมื่อ n คือดัชนีหักเหของตัวกลางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสำหรับสูญญากาศ n = 1

6.1.2 การถอดสมการแมกซ์เวลล์และคลื่นระนาบ

การเขียนสมการเพื่อแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้โดยนำสมการแมกซ์เวลล์บางสมการมาจัดรูปใหม่ เริ่มต้นด้วยสมการ (a.8) ใช้วิธีการเคิร์ล (curl) กับสมการนี้ทั้งสองข้าง

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \frac{-\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \times \vec{B})$$

แทนเทอมด้านขวามือด้วยสมการ (a.11) ในตัวกลางที่เป็นอวกาศ ความหนาแน่นกระแส (J) = 0

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \frac{-\partial}{\partial t}(\mu_0 \in_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t})$$

เพราะว่า $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E}$

ในอวกาศไม่ประจุอิสระ (ρ = 0) ดังนั้น $\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ = 0

จะได้ $$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \in_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \qquad \text{..................(6.19)}$$

สมการ (6.19) เป็นสมการคลื่นที่มีสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรกับตำแหน่งและเวลาในทำนองเดียวกันถ้าเริ่มต้นด้วยสมการ (6.18) จะได้สมการของคลื่นสนามแม่เหล็กที่แปรตามตำแหน่งและเวลาเช่นเดียวกัน

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \in_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \qquad \text{..................(6.20)}$$

เมื่อเทียบกับสมการคลื่นทั่วๆ ไปใน 3 มิติ f (r, t) คือ

$$\vec{\nabla}^2 f = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 f}{dt^2} \qquad \text{..................(6.21)}$$

เมื่อ v คือความเร็วของคลื่น

ให้ c เป็นความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของเทอมด้านขวามือของสมการ (6.20) และ (6.21) จะเห็นว่า

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \in_0}} \qquad \text{..................(6.22)}$$

สมการ (6.22) เป็นผลพลอยได้จากสมการแมกซ์เวลล์เมื่อแทนค่า μ_0 และ $\in_0$ สามารถคำนวณหาความเร็วแสงได้

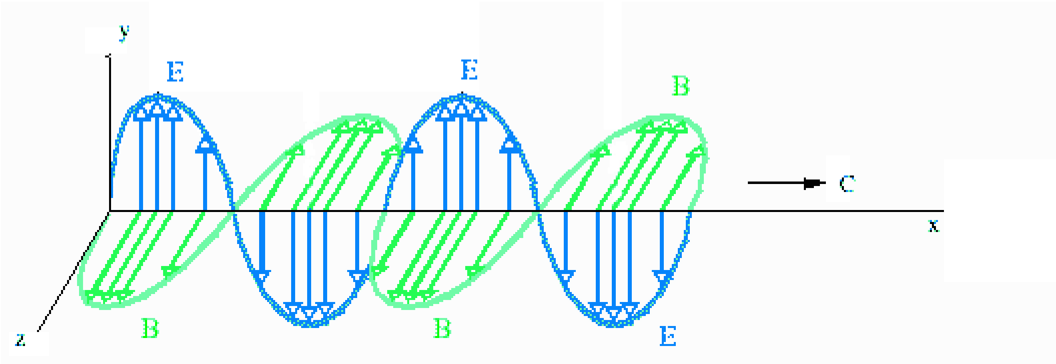
$$c = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7})(8.8542 \times 10^{-12})}}$$

$$= \quad 2.998 \times 10^{8} \quad m/s$$

และ ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆ $v = \dfrac{1}{\sqrt{\mu \in}}$

เมื่อ μ และ ε เป็นความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก และสภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางนั้นๆ

สมการ (6.20) และสมการ (6.21) เป็นสมการอนุพันธ์ซึ่งแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบ (plane wave) สนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ และสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ จะแปรค่าตามตำแหน่งพิกัด (x, y, z) และเวลา t แนวการเปลี่ยนค่าของ $\vec{E}$ และ $\vec{B}$ จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งได้ฉากกับทิศการเคลื่อนที่ เพราะแนวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีทิศตั้งฉากซึ่งกันและกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงจัดเป็นคลื่นตามขวาง (transverse wave)



รูป 6.4 แสดงสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งพิกัด x และ t

เมื่อหาคำตอบสมการอนุพันธ์ (6.20) และ (6.21) จะได้ฟังก์ชันคลื่นระนาบที่มีความถี่ $f = \omega / 2\pi$ และ $\lambda = 2\pi/k$ ดังนี้

$$E = E_0 \sin(kx - \omega t) = E_0 \sin(x - ct)$$

$$B = B_0 \sin(kx - \omega t) = B_0 \sin(x - ct)$$

เมื่อ $k = 2\pi/\lambda$ (เลขคลื่น) และ E_0 และ B_0 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กคือ

$$n|E| = c|B| \qquad (6.23)$$

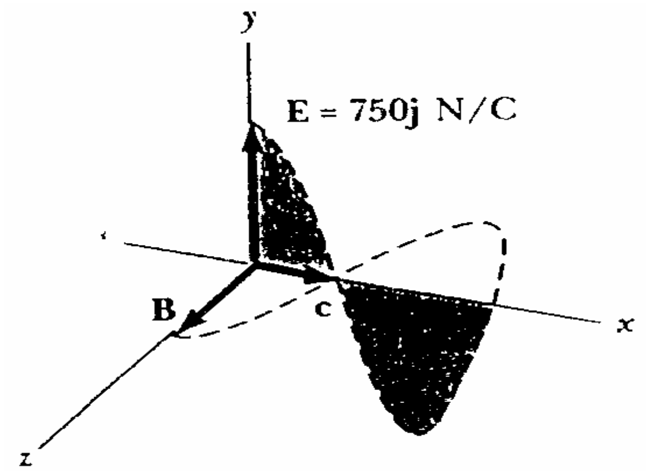
เมื่อ n คือดัชนีหักเหของตัวกลางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสำหรับสูญญากาศ n = 1

ตัวอย่าง 6.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคลื่นไซน์มีความถี่ 40.0 MHz เคลื่อนที่ในทิศ +x ดังรูป ณ จุดหนึ่ง เวลาใดๆ มีสนามไฟฟ้ามากที่สุดเป็น 750 N/C ตามแกน y จงหา

ก. ความยาวคลื่นและคาบของคลื่น

ข. สนามแม่เหล็ก เมื่อ สนามไฟฟ้าเท่ากับ 750 N/C ในแนวแกน y

ค. สมการคลื่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า



รูปที่6.5 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

วิธีทำ

ก. ความยาวคลื่นและคาบของคลื่น

เนื่องจาก $$c = f\lambda \rightarrow \lambda = c/f = \frac{3.00\times10^{8}}{40.0\times10^{7}} = 7.50 \quad m.$$

$$\tau = \frac{1}{f} = \frac{1}{40.0\times10^{7}} = 2.5\times10^{-8}\,\text{sec}.$$

ข. สนามแม่เหล็ก เมื่อ สนามไฟฟ้าเท่ากับ 750 N/C ในแนวแกน y

เนื่องจาก $$\vec{B}_{\max} = \frac{\vec{E}_{\max}}{c} = \frac{750N/C}{30\times10^{8}m/s} = 2.5\times10^{6} \quad T.$$

ค. สมการคลื่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

เนื่องจาก $$\omega = 2\pi f = 8\pi\times10^{7} \quad s^{-1}$$

$$k = 2\pi/\lambda = 0.838 \quad rad./m.$$

และ $$\vec{E} = \vec{E}_{\max}\cos(kx-\omega t) = 750\cos(0.838\bar{x} - 8\pi\times10^{-7}t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_{\max}\cos(kx-\omega t) = 2.5\times10^{-6}\cos(0.838\bar{x} - 8\pi\times10^{-7}t)$$

....

6.1.3 **พลังงานของโมเมนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ก็จะนำพลังงานไปด้วย ถ้าให้ u_B เป็น พลังงานแม่เหล็กที่สะสมต่อหน่วยปริมาตรซึ่งเรียกว่าความหนาแน่นพลังงานแม่เหล็กและ u_E เป็นความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้า

เมื่อความหนาแน่นพลังงานแม่เหล็กเป็น $u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$

ความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเป็น $u_B = \frac{1}{2\mu_0}B^2$

จากสมการ (a.16) และ (a.15) จะได้ความหนาแน่นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศเป็น

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0}B^2 = \frac{E^2}{2\mu_0 C^2} = \frac{1}{2\varepsilon_0 E^2}$$

ความหนาแน่นพลังงานรวมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (u) จึงมีค่าเป็น $u = u_E + u_B$ ดังนั้น $u = \varepsilon_0 E^2$

$$= \varepsilon_0 E^2 \sin^2(\omega t - kx)$$

หรือ $$u = \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2}\left[1 - \cos 2(\omega t - kx)\right]$$

ค่าเฉลี่ยของ $\cos 2(\omega t - kx)$ เมื่อเทียบกับเวลามีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจาก ณ ตำแหน่งใดๆ ค่าเฉลี่ยนี้จะมีค่าเป็นบวกในเวลาครึ่งคาบ และเป็นลบในเวลาอีกครึ่งคาบ ดังนั้นความหนาแน่นพลังงานเฉลี่ย μ_{av} ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็น $\mu_{av} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_0^2$

ความเข้มของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งหมายถึง พลังงานที่ผ่านหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา จะได้

$$I = uC = C\varepsilon_0 E^2$$

โดยที่ ความเข้มเฉลี่ย (ความเข้มรังสี) หรือ พอยน์ติงเวกเตอร์เฉลี่ยเป็น $I_{av} = \frac{1}{2}c\varepsilon_0 E^2{}_0$

เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและโมเมนตัมของคลื่น $p = vu/c^2$

เมื่อ p คือ โมเมนตัมของคลื่น และ v = c ดังนั้น $p = u/c$ ในรูปของเวกเตอร์

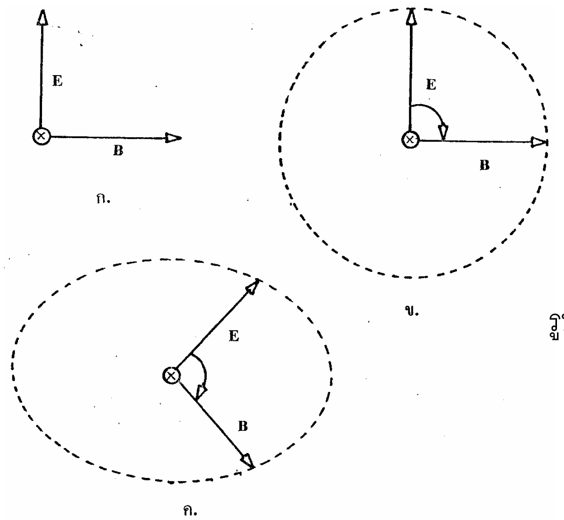
$\vec{p} = \frac{u}{c}\hat{e}$ ในเมื่อ p เป็นโมเมนตัมที่คลื่นพาหะไป และ $\hat{e}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมบัติที่ค่อนข้างสำคัญของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกประการหนึ่ง คือ โพลาไรเซชัน (polarization) เนื่องจากสนามไฟฟ้าตั้งได้ฉากกับสนามแม่เหล็กเสมอ ดังนั้นพิจารณาแต่สนามไฟฟ้าของคลื่นแต่อย่างเดียวก็บ่งชนิดของโพลาไรเซชันได้ ดังนี้

1. **โพลาไรเซชันตามเส้นหรือตามระนาบ** (linear or plane) แนวของสนามไฟฟ้าจะอยู่คงที่ตลอดไป คือ จะชี้ไปในแนวหนึ่งแนวใดไม่เปลี่ยนไปตามเวลา เช่น ถ้าชี้ไปตามแกน Y ก็อาจจะเป็นบวกหรือลบได้ แต่จะยังคงอยู่ตามแกน Y เสมอ

2. **โพลาไรเซชันตามวงกลม** (circular polarization) แนวของสนามไฟฟ้าจะเป็นรัศมีของวงกลมและจุหมุนรอบแกนซึ่งเป็นแนวของการเคลื่อนที่ของคลื่น

3. **โพลาไรเซชันตามวงรี** (elliptical polarization) นั้น ปลายของแนวของสนามไฟฟ้าจะเป็นเส้นรอบของวงรี (โพลาไรเซชันตามวงกลมเป็นกรณีพิเศษของการโพลาไรเซชัน ตามวงรี) ดังรูป 6.6



รูป 6.6 ก. โพลาไรเซชันตามเส้นหรือระนาบ
ข. โพลาไรเซชันตามวงกลม
ค. โพลาไรเซชันตามวงรี

ตัวอย่าง 6.2 สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศมีขนาดตามแนวแกนต่างๆดังนี้

$$E_x = 10 \sin 2\pi (ct-x), \qquad E_y = 0, \qquad E_z = 0$$

จงหา ก) เลขคลื่น

ข) สนามไฟฟ้าสูงสุด

ค) สนามแม่เหล็กขณะหนึ่ง

ง) สนามแม่เหล็กสูงสุด

จ) ความยาวคลื่นและความถี่

ฉ) ความเข้มรังสี

วิธีทำ

ก) จาก $E_x = 10 \sin 2\pi (ct-x)$

$E_x = 10 \sin (2\pi ct - 2\pi x)$

เปรียบเทียบสมการ $E = E_0 \sin (\omega t - kx)$

จะได้ $k = 2\pi \quad m^{-1}$

ข) จาก $E_x = 10 \sin 2\pi(ct-x)$

เปรียบเทียบสมการ $E = E_0 \sin(\omega t - kx)$

เพราะฉะนั้น $E_0 = 10$ m.

ค) จาก $B = E/c$

$B = B_x = (10/3\text{x}10^8) \sin 2\pi(ct-x)$

ง) เพราะฉะนั้น $B_0 = (10/3\text{x}10^8)$

จ) $k = 2\pi/\lambda$ นั้นคือ $\lambda = 2\pi/2\pi = 1$ m.

$c = f\lambda$ นั้นคือ $f = 3\text{x}10^8/1 = 3\text{x}10^8$ s^{-1}

ฉ) $I_{av} = \frac{1}{2}c\varepsilon_0 E^2{}_0 = 0.5 \times 3 \times 10^8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 10^2$

$= 0.133$ W/m^2

6.2 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ความเร็ว (v) ความถี่ (f) และความยาวคลื่น (λ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เหมือนกับคลื่นชนิดอื่น ๆ คือ

$$v = f\lambda \qquad \text{..................(6.24)}$$

ความถี่ของคลื่นจะเป็นปฏิภาคผกผันกับความยาวคลื่น เราสามารถแบ่งประเภทของคลื่นแม่เหล็กโดยอาศัยความถี่เป็นหลัก เรียกว่าสเปกตรัม (spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แบ่งเป็น

1. **คลื่นวิทยุโทรทัศน์** เป็นคลื่นที่ใช้ส่ง-รับวิทยุและโทรทัศน์ มีความถี่ตั้งแต่ 2-3 Hz ไปจนถึง 10^9 Hz คลื่นวิทยุในช่วง AM (Amplitude Modulation) มีความถี่พาหะอยู่ระหว่าง 530 KHz ถึง 1600 KHz คลื่นวิทยุ FM (Frequency Modulation) มีความถี่ในช่วง 88 MHz ถึง 108 MHz คลื่นวิทยุ-โทรทัศน์นี้ทำให้เกิดได้โดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าจะมีความถี่ในย่านนี้เช่นกัน

2. **ไมโครเวฟ** (Microwave) มีความยาวคลื่นในช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 30 เซนติเมตร หรือความถี่ 10^9 Hz ถึง 3×10^{11} Hz สามารถผลิตคลื่นชนิดนี้ได้โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เราใช้คลื่นไมโครเวฟในการประกอบอาหารเพราะความถี่ในช่วงไมโครเวฟเป็นความถี่ธรรมชาติของโมเลกุลของน้ำ พลังงานที่โมเลกุลของน้ำได้รับจะกลายเป็นความร้อนทำให้อาหารสุก

ไมโครเวฟใช้ทำเรดาร์ (RADAR, Radio Detection and Ranging) ซึ่งใช้ในการตรวจจับเครื่องบินและการจราจร

3. **รังสีอินฟราเรด** (Infrared Wave) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นรังสีความร้อน มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรถึง 7×10^{-7} เมตร หรือความถี่ตั้งแต่ 3×10^{11} Hz ถึง 4×10^{14} Hz วัตถุเมื่อได้รับรังสีนี้จะร้อนขึ้นเพราะพลังงานของคลื่นจะทำให้อะตอมสั่นมากขึ้น

รังสีอินฟราเรดสามารถผ่านหมอกควันได้ดีกว่าแสงที่ตามองเห็น จึงมีการพัฒนาฟิล์มที่ไวต่อแสงอินฟราเรด เมื่อถ่ายภาพภูมิประเทศจากเครื่องบินหรือดาวเทียมโดยใช้ฟิล์มชนิดนี้จะมองเห็นความแตกต่างและรายละเอียดของพื้นดินได้มากกว่าใช้ฟิล์มปกติ เช่น สามารถจำแนกทุ่งข้าวโพดและทุ่งข้าวสาลีได้ เพราะธัญพืชทั้งสองแผ่รังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นต่างกัน

กล้องโทรทัศน์บางชนิดสามารถรับรังสีอินฟราเรดและเปลี่ยนภาพที่เกิดจากรังสีอินฟราเรดนี้เป็นคลื่นแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ รายละเอียดของภาพจะต่างไปจากภาพที่เห็นทั่วไป ตรงส่วนที่ไม่มีเสื้อผ้าปกคลุมจะสว่างมากกว่าปกติ ในทางการแพทย์การตรวจร่างกายด้วยรังสีอินฟราเรดจะเห็นตำแหน่งที่ให้รังสีความร้อนมากกว่าปกติ ตำแหน่งตรงนั้นมีแนวโน้มที่เนื้อเยื่อเจริญแบบผิดปกติ

4. **แสงที่ตามองเห็นได้** (Visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 7,000 แองสตรอม (1 แองสตรอม = 10^{-10} เมตร) หรือความถี่อยู่ในช่วง 4×10^{14} Hz ถึง 8×10^{14} Hz เพราะความถี่ที่แตกต่างกันทำให้ตามนุษย์มองเห็นเป็นสีต่าง ๆ กัน ประสาทตาของมนุษย์จะไวต่อแสงสีเหลืองแกมเขียวซึ่งมีความยาวคลื่น 5.6×10^{-7} เมตร มากที่สุด

ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงที่ตามองเห็นได้แยกเป็นตารางดังนี้

ตาราง 6.1 ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงที่ตามองเห็นได้

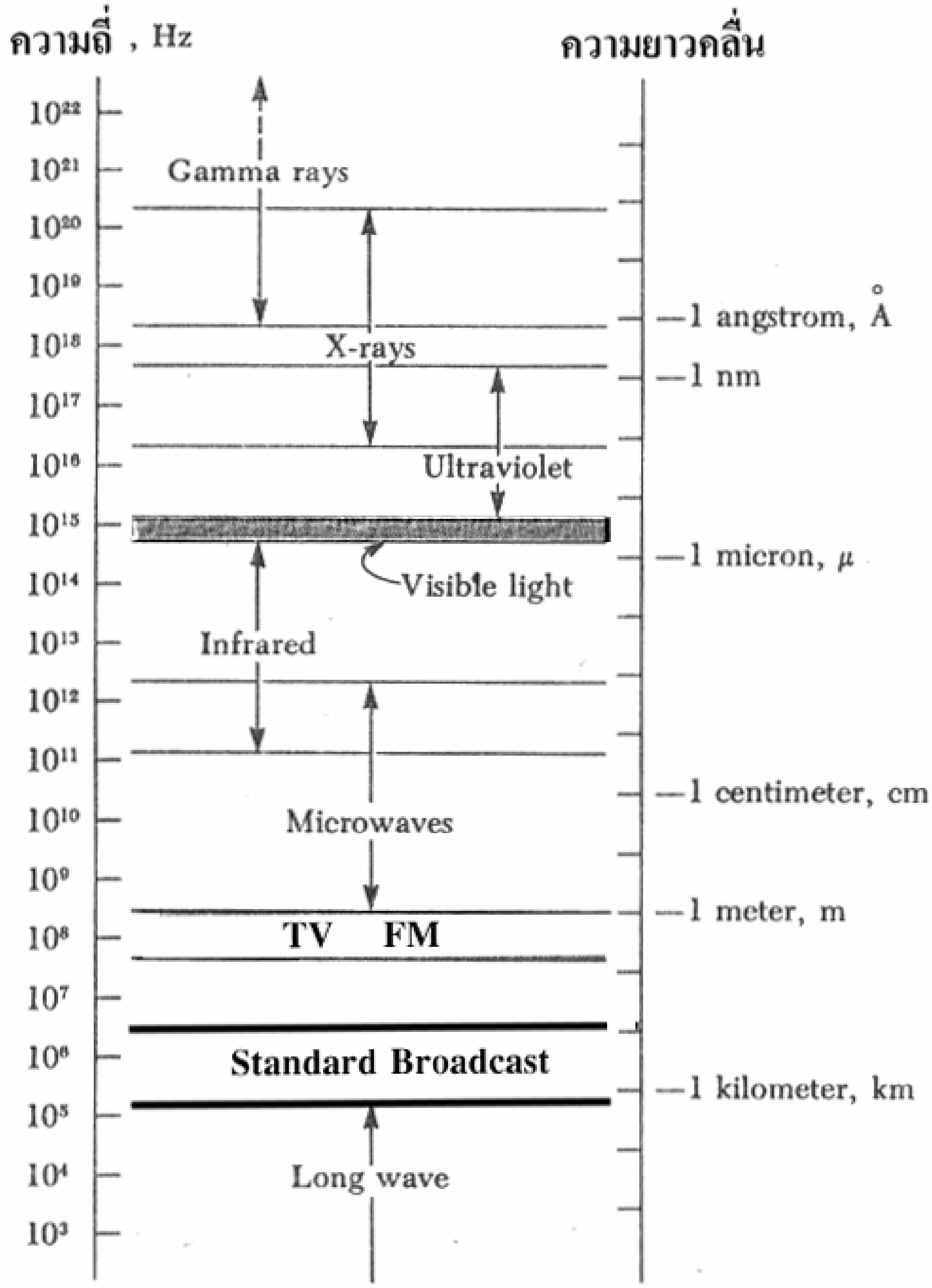
สี	ความยาวคลื่น (10^{-7} m)	ความถี่ (10^{14}Hz)
ม่วง	3.90 - 4.55	7.69 - 6.59
น้ำเงิน	4.55 - 4.92	6.59 - 6.10
เขียว	4.92 - 5.77	6.10 - 5.20
เหลือง	5.77 - 5.97	5.20 - 5.03
ส้ม	5.97 - 6.22	5.03 - 4.82
แดง	6.22 - 7.80	4.82 - 3.84

5. **รังสีอุลตราไวโอเลต** (Ultraviolet light) มีความยาวคลื่นในช่วง 60 นาโนเมตรถึง 380 นาโนเมตร หรือความถี่ในช่วง 8×10^{4} Hz ถึง 3×10^{17} Hz รังสีนี้ส่วนใหญ่ได้มาจากดวงอาทิตย์ ถ้ามนุษย์ได้รับรังสีนี้เป็นจำนวนมากจะเป็นอันตรายได้ ถ้าได้รับเป็นจำนวนน้อย ๆ จะทำให้ผิวหนังเป็นสีน้ำตาล ชั้นบรรยากาศที่อยู่สูงจากพื้นโลกจะมีโอโซน (Ozone, O_3) ช่วยป้องกันรังสีนี้

รังสีอุลตราไวโอเลตใช้ฆ่าเชื้อโรค หลอดอุลตราไวโอเลตตามโรงพยาบาลใช้ในการอบฆ่าเชื้อเครื่องมือผ่าตัด และห้องผ่าตัด เราใช้หลอดไฟอุลตราไวโอเลตที่มีความเข้มต่ำส่องเหนือชั้นวางของชำและเนื้อสดเพื่อลดปริมาณการเน่าเสีย

6. **รังสีเอ็กซ์** (X-rays) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-4} นาโนเมตร ถึง 10 นาโนเมตร หรือมีความถี่ในช่วง 3×10^{17} Hz ถึง 5×10^{19} Hz รังสีเอ็กซ์ได้มาจากอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานสูงเคลื่อนที่ผ่านอะตอมของธาตุโลหะหนัก อิเล็กตรอนจะถูกหน่วง การเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนพลังงานจะถูกปล่อยออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ ประโยชน์ของรังสีเอ็กซ์ใช้ในการวินิจฉัยโรคและตรวจสอบวัสดุทึบแสง เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องจักร

7. **รังสีแกมมา** (Gamma rays) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^{-10} เมตร จนถึง 10^{-14} เมตร หรือมีความถี่ตั้งแต่ 3×10^{18} Hz ถึง 3×10^{32} Hz พบรังสีนี้จากการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีและเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สามารถทะลุและทำลายเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต เราสามารถใช้รังสีแกมมาในการรักษาโรคมะเร็งได้



รูป 6.7 แผนภาพแสดงสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

6.3 การสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

มนุษย์ตั้งแต่สมัยโบราณ เช่น แสงแดดในเวลากลางวัน ตะเกียงในเวลากลาง หลักสำคัญในการสื่อสารสมัยโบราณ ก็คือ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงจากน้อยไปหามาก หรือมากไปหาน้อย เพื่อจะใช้ในการส่งรหัสหรือสัญญาณซึ่งเป็นที่เข้าใจกันระหว่างผู้ส่งและผู้รับ ในยุคปัจจุบัน ข่าวสารที่ส่งนั้นสามารถจะส่งเป็นคำพูด เสียงดนตรี และภาพที่เคลื่อนไหวได้ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

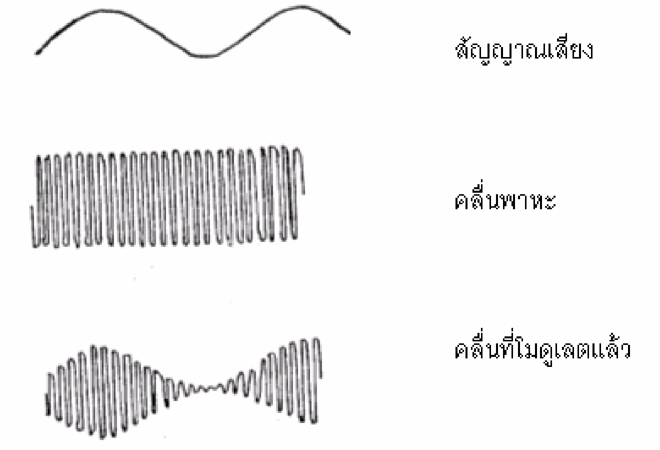
ในระยะแรกที่มีการค้นพบและนำเอาคลื่นวิทยุมาส่งได้รหัสมอร์ส (Morse code) คือ ยาวและสั้น แล้วประกอบกันขึ้นเป็นอักษรที่ละตัว ต่อมาก็สามารถส่งเสียง จนกระทั่งส่งภาพโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของคลื่นพาหะ (carrier wave) เพราะเราไม่สามารถจะใช้คลื่นเสียงในการติดต่อทางไกลได้ แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ที่เหมะสมจะเดินทางได้ไกล วิธีการที่จะใส่สัญญาณลงไปในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ เราเรียกว่า โมดูเลชัน (modulation) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปถึงปลายทางแล้วก็มิวิธีการที่แยกเอาสัญญาณที่ต้องการออก และขบวนการนั้นเรียกว่า ดีโมดูเลชัน (demdulation)

ในขั้นแรก เราจะพิจารณาการส่งวิทยุโทรเลขเสียก่อน การส่งวิทยุโทรเลขเป็นการส่งสัญญาณใช้รหัสมอร์ส (Morse code) เครื่องส่งจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง มีความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นวิทยุที่จะใช้เป็นคลื่นพาหะ ถ้าไฟฟ้าความถี่สูงมีกำลังมากพอก็จะถูกส่งออกไปตามสายอากาศและเคลื่อนที่ไปตามที่ว่างถึงผู้ที่จะรับ ผู้รับต้องใช้สายอากาศสำหรับรับคลื่นวิทยุ แยกเอาเฉพาะคลื่นที่ต้องการด้วยวงจรเรโซแนนซ์ ส่วนมากสัญญาณเมื่อมาถึงผู้รับจะมีกำลังอ่อนมาก จะต้องอาศัยเครื่องขยายและแยกเอารหัสที่ต้องการออกด้วยเครื่องตรวจวัด(detector) เพราะเพียงคลื่นวิทยุอย่างเดียวหูฟังจะไม่สามารถได้ยินรหัสได้ เนื่องจากความถี่ของคลื่นพาหะสูงเกินไปที่จะรับฟังได้ด้วยหู ถ้าไม่ใช้หูฟัง รหัสอาจถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่องรับโทรเลข หรือในสมัยใหม่ใช้เครื่องโทรพิมพ์ (teletype) พิมพ์ออกมาเป็นข้อความและอ่านได้เลย

การส่งกระจายเสียงออกเป็นคำพูดและเสียงดนตรีนั้น การใส่คลื่นเสียงลงไปในคลื่นพาหะที่เรียกว่า โมดูเลชันนั้น มีวิธีที่นิยมอยู่ 2 วิธี คือ โมดูแลชันด้วยแอมพลิจูด (amplitude modulation) ที่เรียกย่อๆ เอ เอม (A.M.) และโมดูเลชันด้วยความถี่ (frequency modulation) ซึ่งเรียกย่อๆ ว่า เอฟ เอม (F.M.) ความแตกต่างระหว่างเอ เอม และเอฟ เอม เป็นดังนี้

โมดูเลชันด้วยแอมพลิจูดอาศัยการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของคลื่นพาซึ่งสอดคล้องกับความถี่ของคลื่นเสียงที่เป็นสัญญาณ ดังรูป 6.8

คลื่นพาหะเมื่อยังไม่ถูกโมดูเลต จะสังเกตเห็นได้ว่ามีแอมพลิจูดคงที่ ส่วนรูปที่แสดงถึงคลื่นวิทยุที่ถูกโมดูเลตแล้วและแผนภาพของคลื่นเสียง จะสังเกตได้ว่า ความถี่ของคลื่นวิทยุมีค่าคงที่ตลอดเวลาทั้งก่อนและหลังการโมดูเลต



รูป 6.8 แสดงโมดูเลชันด้วยแอมพลิจูด

การโมดูเลตด้วยความถี่นั้นอาศัยการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของคลื่นพาหะเล็กน้อย ความถี่ที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณ ส่วนแอมพลิจูดของคลื่นพาและคลื่นที่ถูกโมดูเลตแล้วไม่เปลี่ยนมีค่าคงที่ ความถี่หรือความยาวคลื่นเปลี่ยนไปจากคลื่นที่ยังไม่ถูกโมดูเลตโดยที่แอมพลิจูดมีค่าคงที่เสมอทำให้พลังงานที่ออกอากาศมีค่าเสมดต้นเสมอปลายได้ดีกว่าระบบเอ เอม

การส่งภาพโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นภาพนิ่งหรือโทรทัศน์ก็ตามมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นทั้งการส่งภาพนิ่งและโทรทัศน์จะต้องแบ่งภาพออกเป็นเส้นเรียงจากบนลงมาข้างล่างแล้ววัดความเข้ม และสัญญาณจะต้องบอกความเข้ม ณ จุดหนึ่งจุดใดของภาพ ที่เรียกว่า การกวาด (scanning)
การส่งภาพนิ่งทำได้ง่ายกว่าการส่งโทรทัศน์ เพราะแต่ละครั้งจะมีอยู่ภาพเดียว การที่จะกำหนดว่าตำแหน่งของความเข้มที่ส่งนั้นทำได้โดยอาศัยสัญญาณกำหนดเวลา เช่น จากจุดตั้งต้นของเส้นแรกและจุดตั้งต้นของเส้นต่อๆ ไป ก็จะต้องมีสัญญาณกำหนดเวลาบอกไว้ทุกครั้งไป

ส่วนการส่งภาพที่เคลื่อนไหวได้นั้น อาศัยหลักการส่งภาพนิ่งหลายๆ ภาพ ในช่วงเวลาที่สั้น กว่าขีดจำกัดของสายตาในการแยกภาพ ทำให้ผู้รับมีความรู้สึกว่าเห็นวัตถุเคลื่อนไหวได้ เช่น ภาพยนตร์ การส่งวิทยุโทรทัศน์นั้นแบ่งได้เป็น 2 ภาค คือ ภาคเสียง และภาคภาพ ใช้ความถี่ต่างกันแต่ไม่ห่างกันมากนัก ภาคเสียงใช้ระบบเอฟ เอม และภาคภาพใช้ระบบเอ เอม

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีประโยชน์มากสำหรับการติดต่อสื่อสารและความถี่ที่ใช้ก็มีได้หลายช่วง เช่น ตั้งแต่ความถี่ต่ำมากสำหรับใช้ในการติดต่อระหว่างเรือดำน้ำและฐานปฏิบัติการ คลื่นไมโครเวฟ

ใช้สำหรับการติดต่อเป็นเส้นตรงระหว่างจุดส่งถึงจุดรับ เช่น จากพื้นดินถึงดาวเทียม นอกจากนั้นการโมดูเลตคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า โมดูเลชันด้วยคลื่นดล (pulse modulation) คือตัดช่วงคลื่นให้เป็นช่วงสั้นๆ ที่เรียกว่า คลื่นดล (pulse) ซึ่งจะหาความรู้เพิ่มเติม ได้จากตำราวิศวกรรมอิเลกโทรนิกส์

นอกจากจะใช้ในการสื่อสารแล้ว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่บางขนาด เช่น ไมโครเวฟ ยังเป็นประโยชน์สามารถใช้แทนนัยน์ตาในเมื่อคลื่นแสงไม่สามารถเดินทางผ่านได้ เช่น ในกรณีหมอกลงจัด ระบบเรดาร์ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนของไมโครเวฟจากวัตถุทั้งที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่ ทำให้สามารถเห็นภูมิประเทศสะดวกในการขึ้นลงของเครื่องบิน และหาเครื่องบินและเรือรบในยามสงคราม เป็นการเตือนภัยล่วงหน้าได้อย่างดี การตรวจตำแหน่งของเครื่องบินพาณิชย์ของหอบังคับการบิน

แบบฝึกหัดหน่วยที่ 6
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

6.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางในสุญญากาศ และเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นตัวนำได้หรือไม่

6.2 ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในน้ำบริสุทธิ์เป็นเท่าใดถ้าค่าคงที่ไดอิเลกตริกของน้ำเท่ากับ 81

6.3 คลื่นโทรทัศน์ช่องหนึ่งมีความถี่ 200 เมกะเฮิร์ทซ์ จงคำนวณหาความยาวของคลื่นโทรทัศน์ที่เดินทางผ่านน้ำบริสุทธิ์

6.4 สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบในสุญญากาศมี

$$E_y = 0.5\cos\left\{2\pi x10^8\left(t-\frac{x}{c}\right)\right\} \quad \text{และ} \quad E_z = E_x = 0 \;\; E_z = E_x = 0$$

จงหา ก) ความยาวของคลื่น ชนิดของโพลาไรเซชัน และแนวของการเคลื่อนที

ข) สนามแม่เหล็กของคลื่น

ค) ความเข้มเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

6.5 สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบในสุญญากาศขณะหนึ่งคือ

$$\vec{E} = 0.5\sin[2\times10^8(t-\frac{x}{c})]$$

จงหา ก) ความยาวคลื่น (3 เมตร)

ข) สนามแม่เหล็กขณะหนึ่ง $(\frac{10^{-6}}{6}\left[\sin\left(2\pi\times10^8(t-\frac{x}{c}\right)\right])$

ค) ความหนแน่นพลังงานเฉลี่ย (3.3×10^{-4} W/m^2)

6.6 สารโปร่งแสงชนิดหนึ่งเมื่อให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่แสงผ่านพบว่ามีค่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative magnetic permeability) เท่ากับ 1 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.25

ก. จงหาความเร็วของแสงในตัวกลางนี้ (2×10^8 เมตร/วินาที)

ข. ดัชนีหักเหของสารนี้ (1.5)

6.7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศพบว่ามีค่าสนามไฟฟ้าค่าสูงสุดเท่ากับ 500 โวลต์/เมตร จงหาค่าสนาม แม่เหล็กสูงสุดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชุดนี้ (1.667×10^{-6} เทสลา)
