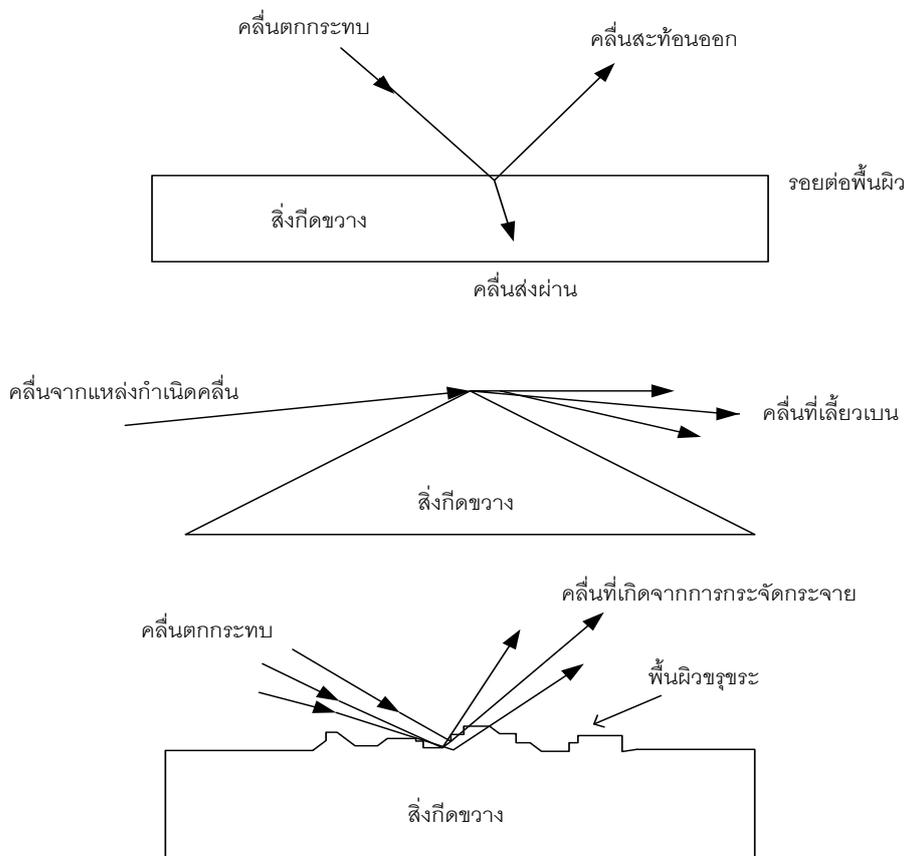


บทที่ 2

การแพร่กระจายคลื่นภายในอาคาร

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น เช่น การสะท้อน การเลี้ยวเบน และการกระจัดกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงแบบจำลองของการแพร่กระจายคลื่นแบบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการสื่อสารภายในอาคารซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา และการทำนายการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ



รูปที่ 2.1 กลไกของการแพร่กระจายคลื่น

2.1 กลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่น

กลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วย 3 องค์ประกอบคือ [10-11]

- 1) การสะท้อน (Reflection)
- 2) การเลี้ยวเบน (Diffraction)
- 3) การกระจัดกระจาย (Scattering)

กลไกพื้นฐานทั้ง 3 องค์ประกอบนี้มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นในระบบสื่อสารเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.1

การสะท้อน เกิดเมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายไปกระทบวัตถุที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ นั้น โดยทั่วไปการสะท้อนคลื่นเกิดจากผิวของดิน, ดึก และผนัง ต่าง ๆ ภายในอาคาร เป็นต้น

การเลี้ยวเบนเกิดเมื่อวิถีคลื่นวิทยุระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับถูกกีดขวางโดยขอบของวัตถุ เช่น ขอบตึก ขอบหลังคา เป็นต้น การเลี้ยวของคลื่นทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้แม้จะถูกวัตถุกีดขวางทางเดินคลื่น การเลี้ยวเบนของคลื่นขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุกีดขวาง นอกจากนี้ขนาดเฟส และ โพลาริเซชันของคลื่นตกกระทบก็มีผลต่อคลื่นเลี้ยวเบนด้วย

การกระจัดกระจาย เมื่อเกิดตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านมีวัตถุที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นและจำนวนของสิ่งกีดขวางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีค่ามาก การกระจัดกระจายทางปฏิบัติการกระจัดกระจายในระบบโทรศัพทที่เคลื่อนที่ เกิดจากใบไม้ ป้ายจราจร บนท้องถนน รวมถึงเสาไฟฟ้า รวมถึงโคมไฟและเฟอร์นิเจอร์ภายในอาคารอีกด้วย

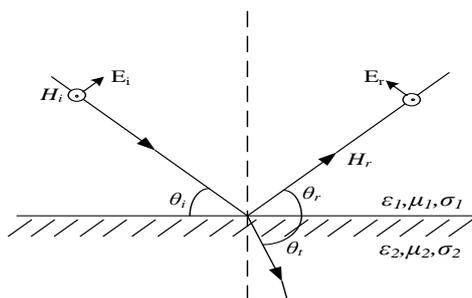
2.2 การสะท้อน

เมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายในตัวกลางหนึ่ง แล้วไปกระทบกับอีกตัวกลางหนึ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แล้วคลื่นวิทยุบางส่วนจะสะท้อน และมีบางส่วนจะแพร่กระจายผ่านตัวกลางที่สอง ถ้าคลื่นตกกระทบบนวัตถุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (Perfect dielectric) แล้ว และไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการดูดกลืน แต่ถ้าตัวกลางที่สองเป็นตัวนำสมบูรณ์ (perfect conductor) แล้ว พลังงานที่ตกกระทบทั้งหมด จะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางแรกโดยปราศจากการสูญเสียพลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านสัมพันธ์กับคลื่นกระทบในตัวกลางแรกด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน Fresnel (Fresnel reflection coefficient : Γ) Γ นี้เป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติสาร และโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับโพลาริเซชัน คลื่นมุมของการตกกระทบ และความถี่ของคลื่น

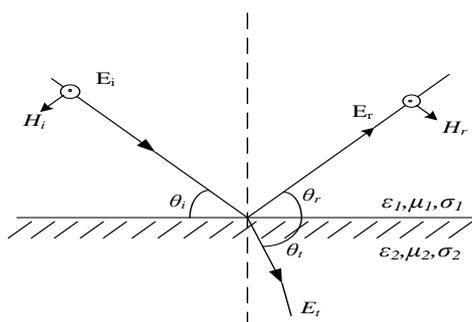
2.2.1 การสะท้อนจากไดอิเล็กตริก

พิจารณาจากรูปที่ 2.2 คลื่นตกกระทบที่ θ_i กับระนาบของเขตที่กั้นระหว่างตัวกลางทั้งสองไดอิเล็กตริก จากรูปจะเห็นว่าพลังงานส่วนหนึ่งสะท้อนกลับไปยังตัวกลางแรกที่มุม θ_r และพลังงานอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่าน (หักเห) ไปยังตัวกลางที่สองที่มุม θ_t ธรรมชาติของการหักเห นั้นแปรเปลี่ยนตามทิศทางของโพลาริเซชัน ของสนาม E คุณสมบัติสำหรับทิศทางของโพลาริเซชันสามารถศึกษาได้โดยการพิจารณาจากสองกรณีในรูปที่ 2.2 ระนาบของการตกกระทบคือ ระนาบที่ประกอบด้วย คลื่นตกกระทบ คลื่นหักเห และคลื่นส่งผ่าน พิจารณารูปที่ 2.2 ก) โพลาริเซชัน สนาม E ขนานกับระนาบของการตกกระทบ (นั่นคือสนาม E เป็นโพลาริเซชันแนวตั้ง หรือส่วนประกอบตั้งฉากเมื่อเทียบกับพื้นผิวการสะท้อน) และในรูปที่ 2.2 ข) โพลาริเซชัน สนาม E ตั้งฉากกับระนาบของการตก

กระทบ (นั่นคือ สนาม E ตกกระทบมีทิศทางพุ่งออกจากกระดาศ, ตั้งฉากกับแผ่นกระดาศและขนานกับพื้นผิวการสะท้อน



ก) สนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบการตกกระทบ



ข) สนามไฟฟ้าตั้งฉากระนาบการตกกระทบ

รูปที่ 2.2 แนวทางเดินของคลื่นสำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างไดอิเล็กตริกทั้ง

สอง

กระทบ (นั่นคือ สนาม E ตกกระทบมีทิศทางพุ่งออกจากกระดาศ, ตั้งฉากกับแผ่นกระดาศและขนานกับพื้นผิวการสะท้อน

ในรูปที่ 2.2 ตัวห้อย i, r, t หมายถึง สนามคลื่นตกกระทบ, สนามคลื่นสะท้อนและสนามคลื่นส่งผ่าน(หักเห) พารามิเตอร์ $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ และ $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ แสดงค่าสภาพยอม (permittivity), ค่าความซึมซาบได้ (permeability) และค่าความนำของตัวกลางทั้งสองตามลำดับ โดยมากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (ไม่มีการสูญเสีย) มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r ดังนี้ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ เมื่อ ϵ_0 มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m ถ้าวัสดุไดอิเล็กตริก มีการสูญเสียพลังงาน จะถูกดูดกลืน และค่าสภาพยอมจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนโดย

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - j\epsilon' \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\epsilon' = \frac{\sigma}{2\pi f} \quad (2.2)$$

และ σ = ค่าความนำของวัตถุ มีหน่วยเป็นซีเมนส์/เมตร

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของวัตถุที่ความถี่ต่าง ๆ [11]

Material	Relative Permittivity ϵ_r	Conductivity σ (s/m)	Frequency (MHz)
Poor Ground	4	0.001	100
Typical Ground	15	0.005	100
Good Ground	25	0.02	100
Sea Water	81	5.0	100
Fresh Water	81	0.001	100
Brick	4.44	0.001	4000
Limestone	7.51	0.028	4000
Glass, Corning 707	4	0.00000018	1
Glass, Corning 707	4	0.000027	100
Glass, Corning 707	4	0.005	10000

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาของวัตถุที่ความถี่ต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ค่า ϵ_r และ σ จะไม่ไวต่อความถี่การทำงานเมื่อวัตถุเป็นตัวนำชั้นดี ($f < \sigma/(\epsilon_0 \epsilon_r)$) และสำหรับวัตถุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียค่า ϵ_0 และ ϵ_r โดยทั่วไปมีค่าคงที่ เมื่อความถี่ทำงานเปลี่ยนไป แต่ σ อาจไวต่อความถี่การทำงาน

ตัวอย่าง เช่น น้ำทะเล (ตัวนำชั้นดี) มีค่า $\sigma/(\epsilon_0 \epsilon_r) = 698$ MHz มีค่ามากกว่าความถี่ทำงานที่ 100 MHz ส่วนแก้ว, คอร์นนิ่ง 707 (ไดอิเล็กตริกที่มีความสูญเสีย) ค่า ϵ_r เท่ากับ 4 คงที่เมื่อความถี่ทำงานมีค่าเปลี่ยนจาก 1 MHz เป็น 100 MHz และ 10,000 MHz ในขณะที่ ค่า σ มีค่าเปลี่ยนไปจาก 0.00000018 S/m เป็น 0.000027 S/m และ 0.005 S/m เมื่อความถี่ทำงานเปลี่ยนไปดังกล่าวตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นสำหรับกรณีโพลาริเซชันสนาม E ขนาน และกรณีตั้งฉากดังกล่าวข้างต้นสามารถกำหนดได้โดย

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_t - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_t + \eta_1 \sin \theta_i} \quad (2.3)$$

(สำหรับสนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบการตกกระทบ)

และ

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_t}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_t} \quad (2.4)$$

(สำหรับสนามไฟฟ้าตั้งฉากระนาบการตกกระทบ)

เมื่อ η_i คือ อินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ของตัวกลางที่ i ($i = 1,2$) และหาค่าได้จากอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กสำหรับคลื่นระนาบสม่ำเสมอในตัวกลางเฉพาะเท่ากับ $\sqrt{\mu_i / \epsilon_i}$ โดยความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหาได้จาก $1/(\sqrt{\mu\epsilon})$ และเงื่อนไขขอบเขตที่พื้นผิวของการตกกระทบตามกฎของ Snell ที่แสดงในรูปที่ 2.2 กำหนดโดย

$$\sqrt{\mu_1 \epsilon_1} \sin(90 - \theta_i) = \sqrt{\mu_2 \epsilon_2} \sin(90 - \theta_r) \quad (2.5)$$

เงื่อนไขขอบเขตจากสมการ Maxwell นำมาใช้ในการหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.6)$$

และ

$$\mathbf{E}_r = \Gamma \mathbf{E}_i \quad (2.7)$$

$$\mathbf{E}_t = (1 + \Gamma) \mathbf{E}_i \quad (2.8)$$

(เมื่อ Γ เป็นได้ทั้ง Γ_{\parallel} หรือ Γ_{\perp} ขึ้นอยู่กับโพลาริเซชัน)

สำหรับกรณีเมื่อตัวกลางแรกเป็นอากาศ และ $\mu_1 = \mu_2$ สัมประสิทธิ์ การสะท้อนสำหรับทั้งสองกรณีหาได้จาก

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{-\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (2.9)$$

และ

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (2.10)$$

2.2.2 มุมบริวสเตอร์ (Brewster Angle)

ตามที่ได้อธิบายแล้วว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบและค่าสภาพ ขอมสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) หากเรานำสมการดังกล่าวมาวาดเป็นกราฟ จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 2.3 โดยกำหนดค่า ϵ_r เท่ากับ 4 และ 12 รูปที่ 2.3 ก) แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับโพลาริเซชัน แนวตั้ง (สนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบเดียวกับการตกกระทบ) ส่วนรูปที่ 2.3 ข) แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับโพลาริเซชันแนวนอน (สนามไฟฟ้าอยู่นอกระนาบเดียวกับการตกกระทบ) จากกราฟรูป 2.3 ก) จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับโพลาริเซชันแนวตั้ง เรา

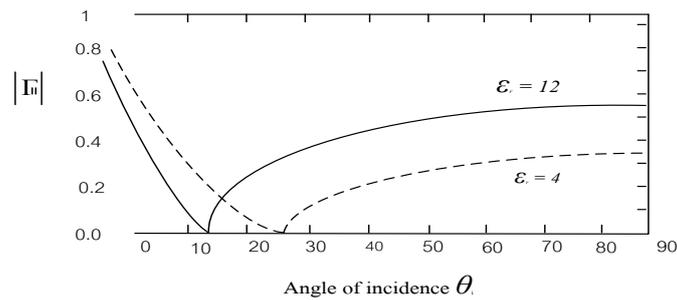
เรียกมุมตกกระทบนี้ว่า “มุมบริวสเตอร์” จะสังเกตได้ว่า มุมบริวสเตอร์นี้จะไม่เกิดขึ้นเมื่อโพลาไรเซชันเป็นแบบแนวนอน (ดูรูปที่ 2.3 ข) ประกอบ) มุมบริวสเตอร์, θ_B หาได้จากสมการ

$$\sin(\theta_B) = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad (2.11)$$

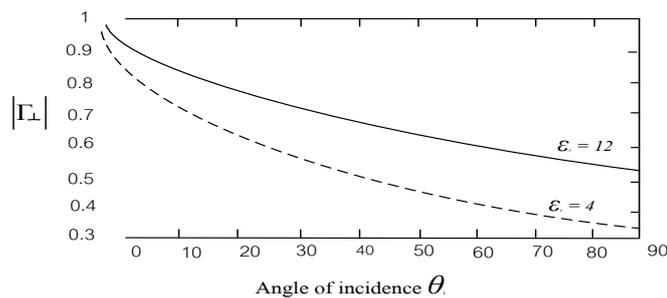
ในกรณีที่ตัวกลางแรกเป็นอวกาศว่าง และตัวกลางที่สองมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เป็น ϵ_r สมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\sin(\theta_B) = \frac{\sqrt{\epsilon_r - 1}}{\sqrt{\epsilon_r^2 - 1}} \quad (2.12)$$

เราจะสังเกตว่ามุมบริวสเตอร์ จะเกิดเมื่อแนวทางการเดินทางของคลื่นวิทยุเป็นแบบโพลาไรเซชันแนวตั้งเท่านั้น



โพลาไรเซชันแนวตั้ง (สนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบการตกกระทบ)



Horizontal polarization (E-field not in plane of incidence)

โพลาไรเซชันแนวนอน (สนามไฟฟ้าไม่อยู่ในระนาบการตกกระทบ)

รูปที่ 2.3 ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับมุมตกกระทบสำหรับ $\epsilon_r = 4, \epsilon_r = 12$ โดยใช้แนวทางการเดินทางของคลื่นในรูปที่ 2.2

2.2.3 การสะท้อนจากตัวนำสมบรูณ์

เราทราบกันดีแล้วว่า พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถผ่านทะลุตัวนำสมบรูณ์ได้ โดยที่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกสะท้อนทั้งหมด จากสมการ Maxwell นั้น สนามไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นคลื่นสะท้อนจะต้องมีขนาดเท่ากับคลื่นตกกระทบ สำหรับในกรณีที่โพลาริเซชันสนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบเดียวกับ การตกกระทบนั้น จากเงื่อนไขขอบเขต จะพบว่า

$$\theta_i = \theta_r \tag{2.13}$$

และ

$$E_i = E_r \tag{2.14}$$

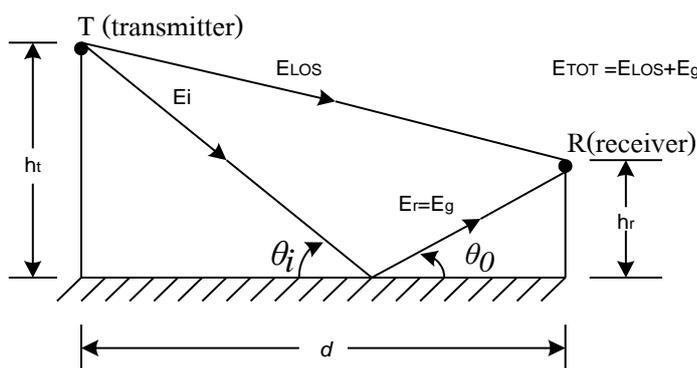
ในทำนองเดียวกัน สำหรับ กรณีที่สนามไฟฟ้า เป็นโพลาริเซชันแนวนอน จากเงื่อนไข ขอบเขตจะพบว่า

$$\theta_i = \theta_r \tag{2.15}$$

และ

$$E_i = -E_r \tag{2.16}$$

จากสมการที่ (2.13) ถึง (2.16) เราจะพบว่า $\Gamma_{\parallel} = 1$ และ $\Gamma_{\perp} = -1$ สำหรับตัวนำสมบรูณ์



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการสะท้อนพื้นดินสองแนวคลื่น

จากหลักการการสะท้อนคลื่นของไดอิเล็กตริกในหัวข้อมก่อนหน้านี้ ทำให้เราทราบว่า

$$\theta_i = \theta_0 \quad (2.20)$$

และ

$$E_g = \Gamma E_i \quad (2.21a)$$

$$E_i = (1 + \Gamma) E_g \quad (2.22b)$$

เมื่อ Γ คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน และถ้ามุม θ_i มีค่าน้อย ๆ คลื่นสะท้อน จะมีขนาดเท่ากับ คลื่นตกกระทบแต่ต่างเฟสกัน 180° ดังนั้นผลลัพธ์ของสนามคลื่น E (สมมติให้การสะท้อนพื้นดิน สมบูรณ์แบบ หรือ $\Gamma = -1$ และ $E_t = 0$) คือผลรวมทางเวกเตอร์ของ (E_{LOS}) และ (E_g) หรือ

$$|E_{TOT}| = |E_{LOS} + E_g| \quad (2.23)$$

สนามไฟฟ้า $E_{TOT}(d,t)$ สามารถถูกแสดงอยู่ในรูปของผลรวมของสมการ (2.18) และ (2.19) ดังนี้

$$E_{TOT}(d,t) = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos(\omega_c(t - \frac{d'}{c})) + (-1) \frac{E_0 d_0}{d''} \cos(\omega_c(t - \frac{d''}{c})) \quad (2.24)$$

พิจารณาวิธีเงา (image) ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า ส่วนต่างวิถีระหว่าง d'' กับ d' มีค่าเท่ากับ Δ สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta = d'' - d' = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (2.25)$$

ถ้าระยะทางระหว่างเครื่องส่ง และเครื่องรับ, d มากกว่าความสูงของ h_t รวมกับ h_r แล้ว สมการ (2.25) สามารถย่อลงได้โดยวิธีการประมาณอนุกรมเทย์เลอร์ ดังนี้

$$\Delta = d'' - d' \approx \frac{2h_t h_r}{d} \quad (2.26)$$

เมื่อสามารถหาผลต่างวิถีได้ ก็สามารถหาค่าผลต่างเฟส $\theta\Delta$ ระหว่างสนามคลื่นทั้งสองแนวได้ รวมถึงการ ประเมินเวลา, τ_d ระหว่างสนามคลื่นทั้งสองได้จากสมการ

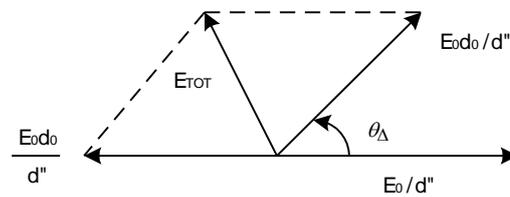
$$\theta\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{\Delta\omega_c}{c} \quad (2.27)$$

และ

$$\tau_d = \frac{\Delta}{c} = \frac{\theta \Delta}{2\pi f_c} \quad (2.28)$$

ให้สังเกตว่า ถ้าระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ, d มีค่ามาก ผลต่างวิถี Δ จะมีค่าน้อยทำให้ขนาดของ E_{LOS} และ E_g มีขนาดใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเฉพาะเฟสเท่านั้น นั่นคือ

$$\left| \frac{E_0 d_0}{d} \right| \approx \left| \frac{E_0 d_0}{d'} \right| \approx \left| \frac{E_0 d_0}{d''} \right| \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟสเซอร์แสดงการรวมกัน ขององค์ประกอบสนามคลื่นทั้งสอง

ค่าสนามคลื่น E_{TOT} ที่เครื่องรับที่เวลา $t = d''/c$ จากสมการ (2.24) คือ

$$\begin{aligned} E_{TOT}(d, t = \frac{d''}{c}) &= \frac{E_0 d_0}{d'} \cos(\omega_c(\frac{d''-d'}{c})) - \frac{E_0 d_0 \cos 0^\circ}{d''} \\ &= \frac{E_0 d_0}{d'} \cos \theta_\Delta - \frac{E_0 d_0}{d''} \\ &= \frac{E_0 d_0}{d} [\cos \theta_\Delta - 1] \end{aligned} \quad (2.30)$$

พิจารณาแผนภาพเฟสเซอร์ในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงการรวมกันของสนามคลื่นตรงและสนามคลื่นสะท้อน เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้า (ที่เครื่องรับ) ที่ระยะทาง d จากเครื่องส่งได้

$$|E_{TOT}(d)| = \sqrt{\left(\frac{E_0 d_0}{d}\right)^2 (\cos \theta_\Delta - 1)^2 + \left(\frac{E_0 d_0}{d}\right)^2 \sin^2 \theta_\Delta} \quad (2.31)$$

หรือ

$$|E_{TOT}(d)| = \frac{E_0 d_0}{d} \sqrt{2 - 2 \cos \theta_\Delta} \quad (2.32)$$

ใช้ความสัมพันธ์ทาง ตรีโกณมิติ , สมการ (2.32) สามารถเขียนเป็น

$$|E_{\text{TOT}}(d)| = 2 \frac{E_0 d_0}{d} \sin\left(\frac{\theta_{\Delta}}{2}\right) \quad (2.33)$$

สังเกตว่าสมการ (2.33) จะอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น เมื่อ $\sin(\theta_{\Delta}/2) \approx \theta_{\Delta}/2$ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ $\theta_{\Delta}/2$ น้อยกว่า 0.3 เรเดียน โดยใช้สมการ (2.26) และ (2.27) ดังนี้

$$\frac{\theta_{\Delta}}{d} \approx \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} < 0.3 \text{rad} \quad (2.34)$$

หรือ

$$d > \frac{20\pi h_t h_r}{3\lambda} \approx \frac{20h_t h_r}{\lambda} \quad (2.35)$$

ดังนั้น สนามคลื่น E_{TOT} นั้นสามารถหาค่าโดยประมาณได้จาก

$$E_{\text{TOT}}(d) \approx \frac{2E_0 d_0}{d} \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \approx \frac{k}{d^2} \text{ V/m} \quad (2.36)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่มีค่าสัมพันธ์กับค่า E_0 , ความสูงของสายอากาศ และความยาวคลื่น ส่วนกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะทาง d มีความสัมพันธ์กับกำลังสองของสนามไฟฟ้า เมื่อรวมอัตราขยายของสายอากาศ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะทาง d จากเครื่องส่งหาได้จาก [11]

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \right) \quad (2.37)$$

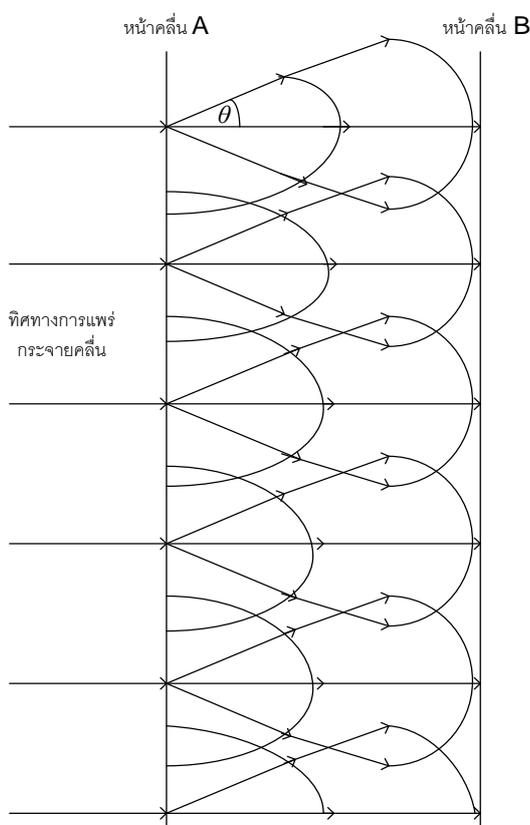
เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.37) จะเห็นว่าที่ระยะทางไกล จากเครื่องส่งมาก ๆ ($d \gg \sqrt{h_t h_r}$) กำลังของสัญญาณที่รับได้ จะตกลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น แปรผกผันกับกำลังสี่ของระยะทางดังกล่าว หรือ อาจกล่าวได้ว่ากำลังของสัญญาณตกลงในอัตรา 40 dB/dec ซึ่งจะเห็นว่าการสูญเสียตามวิถีในกรณีนี้มากกว่าในอวกาศว่างมาก นอกจากนี้จะสังเกตว่า ที่ระยะทางห่างจากเครื่องส่งมาก ๆ กำลังของสัญญาณที่รับได้ และ

การสูญเสียตามวิธีจะไม่ขึ้นกับความถี่อีกด้วย เราสามารถหาค่าการสูญเสียตามวิธีของแบบจำลอง 2 แนวคลื่นนี้ (รวมอัตราขยายของสายอากาศ) ในหน่วย dB ได้จากสมการ

$$PL \text{ (dB)} = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad (2.38)$$

2.3 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

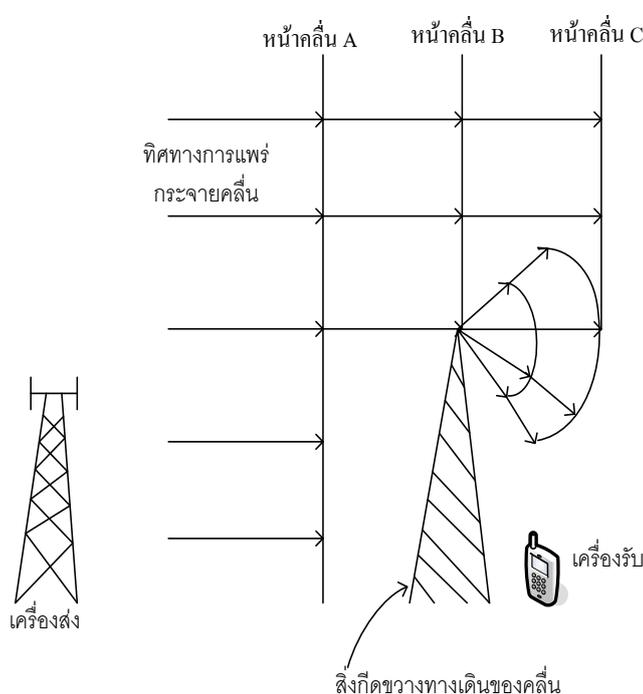
การเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุ นั้น ทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้ แม้ว่าวิถีคลื่นจะถูกกีดขวางก็ตาม ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของ Huygen ซึ่งกล่าวไว้ว่า “ทุกจุดบนหน้าคลื่นจะเป็นจุดกำเนิดคลื่นสำหรับผลิตคลื่นใหม่ และคลื่นใหม่เหล่านี้จะรวมกันเพื่อผลิตหน้าคลื่นใหม่ ในทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น” หลักการของ Huygen สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.7 คลื่นวิทยุแพร่กระจายโดยมีหน้าคลื่น A เป็นระนาบเส้นตรงตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นจุดทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่น A จะเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งแพร่กระจายไปรอบ ๆ จุดกำเนิด โดยมีทิศทางที่มุม θ ดังรูปที่ 2.7 ค่าแอมพลิจูดของคลื่นในทิศทางต่าง ๆ จะไม่เท่ากัน โดยมีค่าเป็น $(1 + \cos \theta)$ เช่น ถ้าคลื่นที่แพร่กระจายออกไปทำมุม $\theta = 0$ จะมีแอมพลิจูด



รูปที่ 2.7 หลักการของ Huygen

สูงสุดคือ มีค่าเท่ากับ 2 และหากคลื่นแพร่กระจายในทิศตรงกันข้าม ($\theta = 180$) แอมพลิจูด จะมีค่าเท่ากับ 1 เป็นต้น ผลรวมของคลื่นเหล่านี้ที่จุดกำเนิดต่าง ๆ บนหน้าคลื่น A จะเกิดเป็นหน้าคลื่นใหม่ (หน้าคลื่น B) ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับทางเดินของระนาบคลื่นจากซ้ายไปขวามือในรูปที่ 2.7 และทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่น B ก็จะเป็นจุดกำเนิดคลื่น เช่นเดียวกับหน้าคลื่น A และจะกำเนิดหน้าคลื่นใหม่ซึ่งเกิดทางด้านขวามือของหน้าคลื่น B ไปเรื่อย ๆ ทำให้เกิดหน้าคลื่นใหม่คลื่นที่จากซ้ายมือไปขวามือไปเรื่อย ๆ

หากมีสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในขณะที่หน้าคลื่นอยู่ในตำแหน่ง B (หน้าคลื่น B) จุดที่ปลายของสิ่งกีดขวางบนหน้าคลื่น B จะเป็นจุดกำเนิดคลื่นซึ่งแพร่กระจายในรอบ ๆ จุดกำเนิด และสามารถแพร่กระจายมายังเครื่องรับได้ ดังนั้นแม้ว่าจะมีสิ่งกีดขวางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ แต่จากการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้



รูปที่ 2.8 การเลี้ยวเบนของคลื่นที่เหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวาง

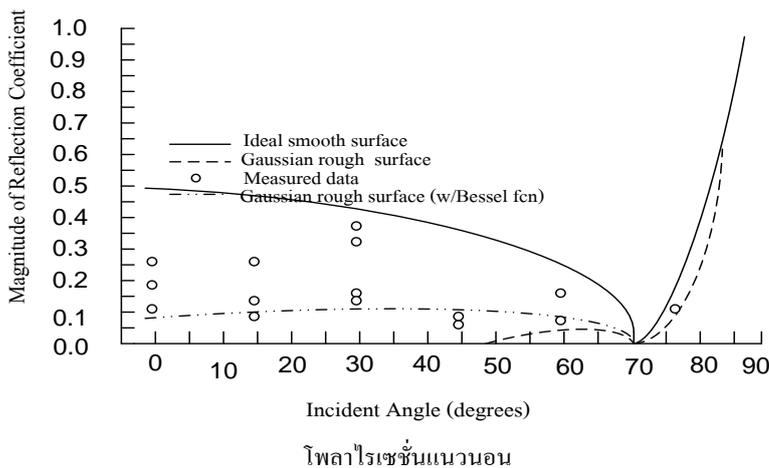
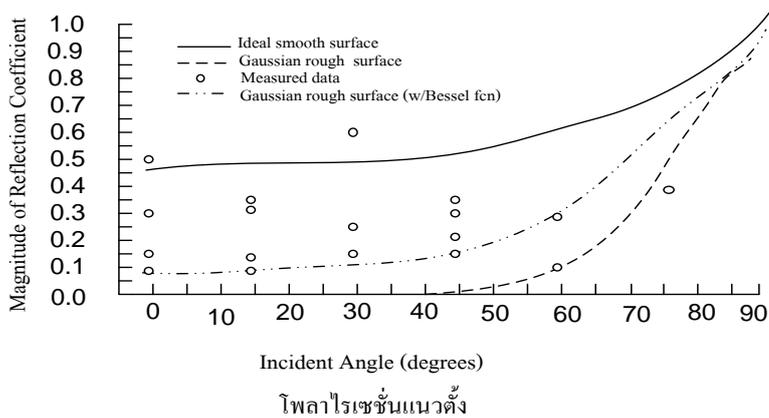
2.4 การกระจัดกระจาย

การรับส่งสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยทั่วไปจะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าค่าสัญญาณที่ทำนายจากแบบจำลองการสะท้อนและการเลี้ยวเบนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นเพราะว่าคลื่นตกกระทบผิววัตถุที่ขรุขระพลังงานจะถูกแผ่ออกในทุกทิศทาง เนื่องจากการกระจัดกระจายนี้เองวัตถุต่าง ๆ เช่น โคมไฟบนท้องถนนและต้นไม้ก็เป็นสิ่งที่สามารถกระจายพลังงานคลื่นได้ทุกทิศทางเช่นเดียวกัน คลื่นกระจัดกระจายเหล่านี้เองทำให้กำลังที่เครื่องรับมีความแรงขึ้นได้

วัตถุผิวเรียบที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นนั้นก็คือผิวสะท้อนคลื่น แต่หากเป็นพื้นผิวที่ขรุขระ (พื้นที่ผิวเรียบมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น) จะทำให้การสะท้อนคลื่นแตกต่างไปจากผิวสะท้อนคลื่นจากวัตถุผิวเรียบ การทดสอบความขรุขระพื้นผิวมักใช้วิธีเกณฑ์แบบเรย์ลี (Rayleigh criterion) ซึ่งกำหนดเกณฑ์ความสูง (h_c) ของปมที่ผิวสำหรับมุมตกกระทบที่กำหนด θ_i โดย

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \quad (2.39)$$

พื้นผิวจะเป็นแบบราบเรียบถ้าความสูงของปมที่ผิวดำสูงถึงสูงสุด h มีค่าน้อยกว่า h_c และพื้นผิวเป็นผิวขรุขระถ้าความสูงของปมที่ผิวมีค่ามากกว่า h_c การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถหาได้จากการกำหนดค่า แฟคเตอร์การสูญเสียจากการกระจัดกระจาย, p_s จากสมการของ เอเมนต์ (Ament)



รูปที่ 2.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกับมุมตกกระทบของผนังหินขรุขระความถี่ 4 GHz

$$\rho_s = \exp\left(\frac{(\pi\sigma h \sin\theta_i)^2}{\lambda}\right) \quad (2.40)$$

เมื่อ σ_h คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงของผิวของค่าเฉลี่ยความสูงของผิว ค่าตัวประกอบการสูญเสียจากการกระจัดกระจายได้ถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดย บอยเทียส (Boithius) ดังนี้

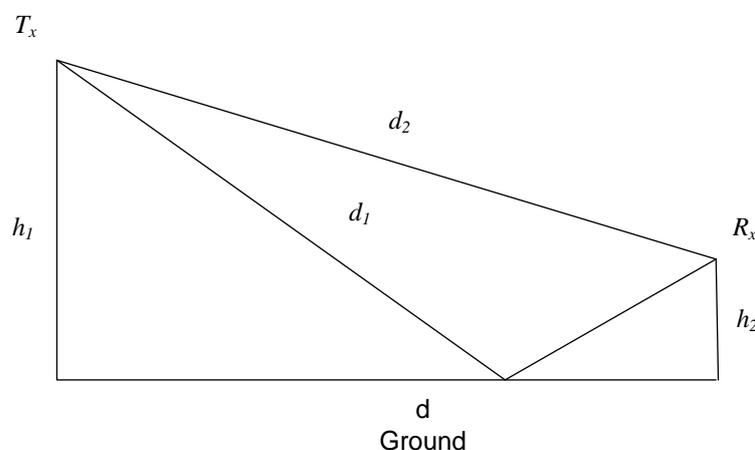
$$\rho_s = \exp\left[-8\left(\frac{\pi\sigma h \sin\theta_i}{\lambda}\right)^2\right] I_0\left[8\left(\frac{\pi\sigma h \sin\theta_i}{l}\right)^2\right] \quad (2.41)$$

เมื่อ I_0 คือ ฟังก์ชัน เบสเซล ของจำพวกแรกและลำดับศูนย์
สนามคลื่นสะท้อน E สำหรับ $h > h_c$ สำหรับผิวสะท้อนขรุขระหาได้จาก

$$\Gamma_{rough} = \rho_s \Gamma \quad (2.42)$$

รูปที่ 2.9 ก) และ ข) แสดงผลการทดสอบโดย Landron โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเปรียบเทียบกับสมการ (2.41) และ (2.42) ของผนังหินขรุขระซึ่งมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 7.51$, $\sigma = 0.028$ และ $\mu = 0.95$ พารามิเตอร์ความขรุขระเท่ากับ $h = 12.7$ ซม. $\sigma_h = 2.54$ ซม. พิสูจน์ว่าสมการทั้งสองสามารถหาค่าได้อย่างถูกต้อง

2.5 แบบจำลองคลื่นสองรังสี (Two-Ray Model)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองคลื่นสองรังสี

รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นอย่างง่ายแสดงได้ด้วยแบบจำลองคลื่นสองรังสี ดังรูปที่ 2.10 h_1 คือความสูงของสายอากาศตัวส่ง (Tx), h_2 คือ ความสูงของสายอากาศ ตัวรับ (Rx), d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับ, d_1 คือ ความยาวของวิถีคลื่นสะท้อน และ d_2 คือ ความยาวของวิถีคลื่นตรง

จากรูปที่ 2.10 ผลต่างระหว่างวิถีคลื่นตรงและวิถีคลื่นสะท้อนหาได้จากสมการ

$$\Delta d = \left[(h_1 + h_2)^2 + d^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(h_1 - h_2)^2 + d^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.43)$$

เมื่อ $\Delta d = d_2 - d_1$ สมการ (2.43) สามารถจัดรูปได้ใหม่เป็น

$$\Delta d = \frac{4h_1h_2}{d \left(\left\{ \frac{(h_1 + h_2)}{d} \right\}^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}} + d \left[\left\{ \frac{(h_1 - h_2)}{d} \right\}^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.44)$$

เมื่อ $(h_1 \pm h_2)/d \ll 1$ ผลต่างของวิถีคลื่นใน (2.44) ลดรูปได้เป็น

$$\Delta d \approx 2 h_1 h_2 / d \quad (2.45)$$

2.6 ผลกระทบจากเขต Fresnel

ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลื่นหลายวิถีนั้น การเลี้ยวเบนของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อหน้าคลื่นเดินทางเข้าหาสิ่งกีดขวาง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองที่พัฒนาโดย Augustin- Jean Fresnel [10] โดยกล่าวว่า ภาคตัดขวาง (cross-section) ของหน้าคลื่นจะถูกแปลงเป็นเขตของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยแต่ละเขตดังกล่าวอยู่ห่างกันเท่ากับ $\lambda / 2$ ดังรูปที่ 2.11 เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น รัศมีของเขต Fresnel ที่ n ถูกกำหนดโดย

$$R_n = [n\lambda(d_1d_2)/(d_1 + d_2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.46)$$

เมื่อ

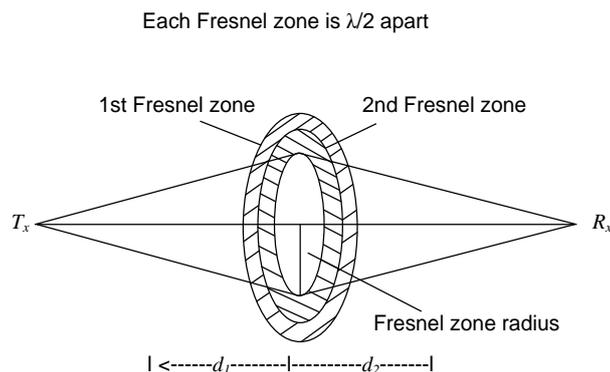
d_1 = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง

d_2 = ระยะทางระหว่างเครื่องรับและสิ่งกีดขวาง

$\lambda = c/f$

$n = 1$ สำหรับเขต Fresnel แรก

$n = 2$ สำหรับเขต Fresnel ที่สอง



รูปที่ 2.11 เขตFresnel

จาก (2.46) จะเห็นว่ารัศมีของเขต Fresnel เป็นส่วนกลับกับรากที่สองของความถี่แสดงให้เห็นได้ว่า ถ้าความสูงของสายอากาศคงที่แล้ว สัญญาณคลื่นวิทยุที่มีความถี่สูง ๆ จะแพร่กระจายไปได้ไกลกว่า ก่อนที่เขตFresnelแรกจะสัมผัสพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) ในขณะที่ ถ้ากำหนดความถี่ของสัญญาณคงที่แล้วสัญญาณจะแพร่กระจายจากสายอากาศที่ส่งได้ไกลกว่าก่อนที่เขต Fresnelแรก จะสัมผัสพื้นดิน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 (ข) ทำให้เห็นว่าการหักเหของสัญญาณคลื่นวิทยุขึ้นขึ้นกับความถี่และความสูงของสายอากาศ

เมื่อผู้ตางวิธีคลื่นระหว่างคลื่นแนวตรงกับคลื่นหักเหมีค่า $\lambda/2$ แล้ว การหักเหมีค่าสูงสุด ดังนั้นสมการ (2.45) สามารถเขียนได้ว่า

$$\Delta d \approx 2 h_1 h_2 / d = \lambda/2 \quad (2.47)$$

หรือ

$$d_0 = d = 4 h_1 h_2 / \lambda \quad (2.48)$$

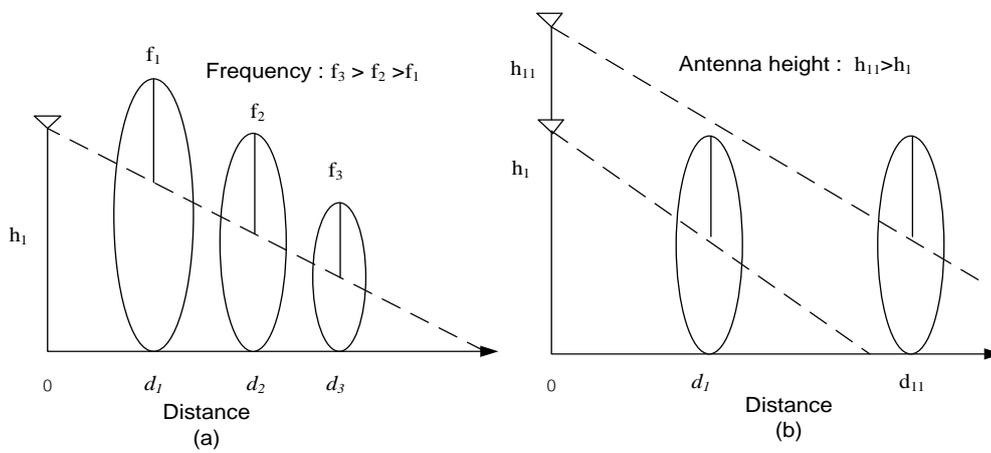
ระยะทาง d_0 เรียกว่า จุดเปลี่ยนเขตFresnel (Fresnel zone breakpoint) ซึ่งขึ้นขึ้นกับความถี่และความสูงของสายอากาศ จากรูปที่ 2.13 พบว่า ความชันของการสูญเสียตามวิถี (γ) มีค่าเดียวกับการสูญเสียตามวิถีของช่องว่างอากาศคือ มีค่าเท่ากับ 2 ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากการเลี้ยวเบนและผลของคลื่นหลายวิถี โดยทั่วไปจะเกิดหลังจากผ่านจุดเปลี่ยน d_0 ไปแล้ว ซึ่งค่าความชันของการสูญเสียตามวิถีจะมีค่ามากกว่า 2 (ในรูปที่ 2.13 RSL = Received signal strength)

2.7 การพิสูจน์ทฤษฎีเขตFresnel

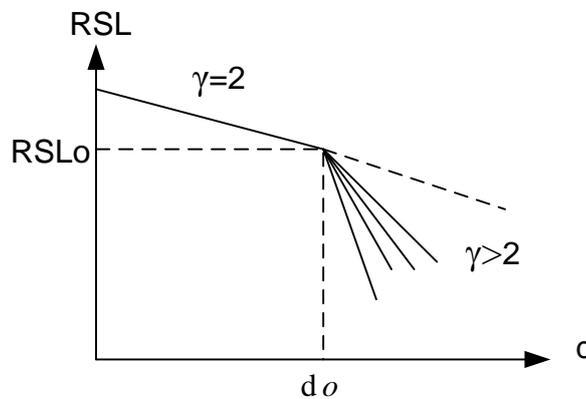
พิจารณาแบบจำลองคลื่นสองแนวตั้งรูปที่ 2.10 กำลังสัญญาณคลื่นที่รับได้หาได้จาก

$$P_r = P_t (\lambda / 4\pi d)^2 [1 + e^{-j\Delta\theta}]^2$$

$$= [P_t (\lambda / 4\pi d)^2] [4 \sin^2(\Delta\theta / 2)] \tag{2.49}$$



รูปที่ 2.12 ก) สัญญาณความถี่สูงกว่าแพร่กระจายไปได้ระยะทางไกลกว่าก่อนที่เขตFresnelแรก สัมผัสพื้นดิน ข) การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศที่สูงกว่าไปได้ระยะทางไกลกว่า ก่อนที่เขต Fresnel แรกสัมผัสพื้นดิน



รูปที่ 2.13 แสดงจุดเปลี่ยนเขตFresnel

เมื่อ $\Delta\theta$ คือ ผลต่างมุมเฟสระหว่างคลื่นแนวตรงกับคลื่นสะท้อน ซึ่งสามารถเขียนให้เป็นฟังก์ชันของผลต่างวิถีได้ว่า

$$\Delta\theta = (2\pi/\lambda) \Delta d \quad (2.50)$$

รวมสมการ (2.49) และ (2.50) ดังนั้น

$$P_r = [P_t (\lambda / 4 \pi d)^2] \cdot [4 \sin^2(\pi/\lambda) \Delta d] \quad (2.51)$$

และ $\Delta d \approx 2 h_1 h_2 / d$ ดังนั้น

$$P_r = [P_t (\lambda / 4 \pi d)^2] [4 \sin^2\{(\pi/\lambda) \cdot 2 h_1 h_2 / d\}] \quad (2.52)$$

สมการ (2.52) มีค่าสูงสุดเมื่อ

$$(\pi/\lambda)2h_1h_2/d = (\pi/2) \quad (2.53)$$

หรือ

$$d_0 = d = 4 h_1 h_2 / \lambda \quad (2.54)$$

ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ระยะห่างของสายอากาศรับและส่งอยู่ห่างกันมากเมื่อเทียบกับความสูงของสายอากาศทั้งสอง หรือ $d \gg h_1$ และ h_2
2. ไม่คิดผลของมุมตกกระทบของคลื่น
3. ผลต่างของเฟส ($\Delta\theta$) ของคลื่นทั้งสองแนวน้อยมาก

สมการ (2.52) สามารถลดรูปเป็น

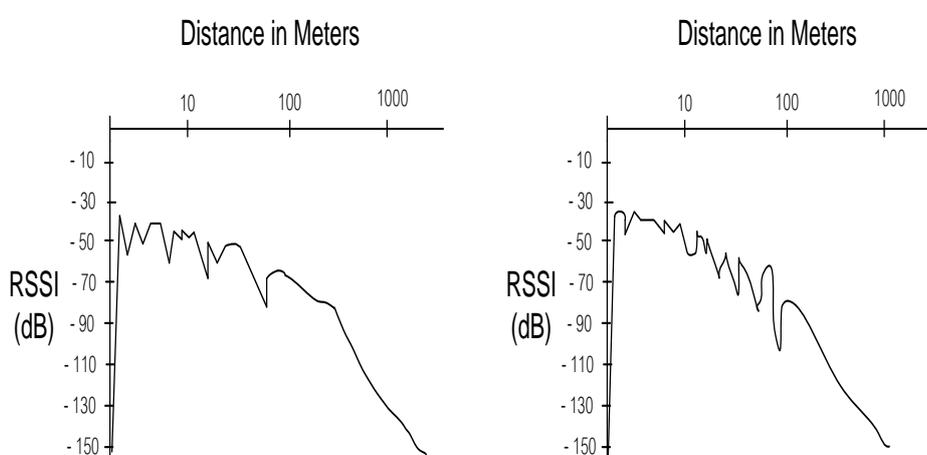
$$P_r \approx [P_t (\lambda / 4 \pi d_0)^2] \quad (2.55)$$

ซึ่งก็คือ การแพร่กระจายคลื่นในช่องอากาศนั่นเอง โดยที่แทนค่า d ด้วย d_0 ซึ่งก็คือจุดเปลี่ยนเขต Fresnel นั่นเอง ดังนั้นคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณภายในระยะทาง d_0 จากเครื่องส่งจะมีคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณเหมือนกับช่องว่างอากาศซึ่งก็คือการลดทอนสัญญาณด้วยกฎกำลังสอง อย่างไรก็ตามสัญญาณคลื่นจะถูกลดทอนอย่างรวดเร็วหลังจุด d_0 เนื่องจากส่วนประกอบหลายวิถีคลื่นซึ่ง

แสดงดังสมการที่ (2.52) และกราฟในรูปที่ 2.14 หรืออาจกล่าวได้ว่าการลดทอนที่รวดเร็วนี้นี้มีสาเหตุมาจากสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมของการแพร่กระจายคลื่นนั่นเอง

2.8 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในอาคาร

หลักการและคุณสมบัติของคลื่นวิทยุในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถใช้ได้ทั้งการสื่อสารภายนอกและภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม การสื่อสารภายในอาคารนั้นมีความซับซ้อนมากเนื่องจากสัญญาณคลื่นจะถูกลดทอนอย่างมาก เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตึกและมีการกระจายของคลื่นภายในอาคาร ทำให้แบบจำลองของการแพร่กระจายคลื่นมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นการพิจารณา



รูปที่ 2.14 ระดับสัญญาณคลื่นที่รับได้ ตามระยะทางจากเครื่องส่งที่แสดงให้เห็นจุดเปลี่ยน d_0 (กำลังเครื่องส่ง 1W)

แบบจำลองการสูญเสียภายในอาคารจึงแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่เครื่องส่งอยู่ภายนอกอาคาร และเครื่องรับอยู่ภายในอาคาร และกรณีที่เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ภายในอาคารทั้งคู่

2.8.1 เครื่องส่งอยู่ภายนอกอาคาร

ก่อนที่สัญญาณคลื่นจากสายอากาศตัวส่งที่อยู่ภายนอกอาคารจะเดินทางเข้าถึงภายในอาคารนั้น คลื่นวิทยุอาจเกิดการลดทอนและการกระจายไปอย่างมากเนื่องจากสิ่งก่อสร้างจำนวนมากภายนอกอาคาร ซึ่งมีผลทำให้คลื่นภายในอาคารมีสัญญาณอ่อนมาก ดังนั้นอาคารจึงควรอยู่ในเขต Fresnel แรก เพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นเป็น LOS พิจารณารูปที่ 2.15 อาคาร 1 อยู่ในเขต Fresnel แรก หรือ อยู่ในในระยะทางจุดเปลี่ยน d_0 ในขณะที่ อาคาร 2 อยู่หลังจุดเปลี่ยนซึ่งสัญญาณคลื่นที่เดินทางเข้าสู่อาคาร 2 นั้น มีสัญญาณที่ต่ำมาก เนื่องจากคลื่นถูกลดทอนอย่างมาก ก่อนที่คลื่นจะเดินทางเข้าสู่อาคาร การแก้ไขก็คือ

การทำให้อาคาร 2 อยู่ภายในระยะทางจุดเปลี่ยน ซึ่งก็ทำได้โดยการเพิ่มความสูงของสายอากาศตั้งสูงเพิ่มขึ้น

ตัวอย่าง เช่น ถ้าความถี่ $F = 900$ MHz, $h_1 = 10$ m, และ $h_2 = 1.5$ m, ระยะทางจุดเปลี่ยน $d_0 = 4 h_1 h_2 / \lambda = 180$ m. จะมีอาคารจำนวนหนึ่งเท่านั้นที่อยู่ภายในระยะทาง 180 m. ซึ่งอยู่ในระยะทางจุดเปลี่ยน อย่างไรก็ตามถ้าหาก $h_1 = 30$ m, d_0 มีค่า 540 m, จำนวนอาคารที่อยู่ภายในจุดเปลี่ยนจะมีเพิ่มขึ้น

2.8.2 เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ในอาคาร

เมื่อเครื่องส่งอยู่ในอาคาร สภาวะแวดล้อมของการแพร่กระจายคลื่นจะเปลี่ยนไป กล่าวคือนอกจากคลื่นที่เดินจากเครื่องส่งถึงสายอากาศตัวรับมาจากคลื่นแนวตรง คลื่นสะท้อนจากพื้นแล้วยังมีคลื่นที่สะท้อนจากเพดานอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เมื่อ

H	= ความสูงของเพดาน
h_1	= ความสูงของสายอากาศตัวส่ง
h_2	= ความสูงของสายอากาศตัวรับ
d	= ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง
D	= วิธีคลื่นตรง
d_1	= วิธีคลื่นสะท้อนจากพื้น
d_2	= วิธีคลื่นสะท้อนจากเพดาน

เนื่องจากมีคลื่นสะท้อนจาก 2 แนว คือ สะท้อนจากพื้นและจากเพดานเป็นหลัก ผลต่างของวิถีคลื่นเหล่านี้สามารถคำนวณจุดเปลี่ยนเขต Fresnel แรกได้

อย่างไรก็ตาม คลื่นสะท้อนจากผนังห้องนั้นเกิดขึ้นได้น้อยเนื่องจากคลื่นทะลุผ่านหน้าต่างบานกระจกหรือช่องระบายอากาศก่อนที่จะเกิดการสะท้อนกลับมาที่เครื่องรับ ดังนั้นจึงไม่คิดการสะท้อนจากผนังดังกล่าว

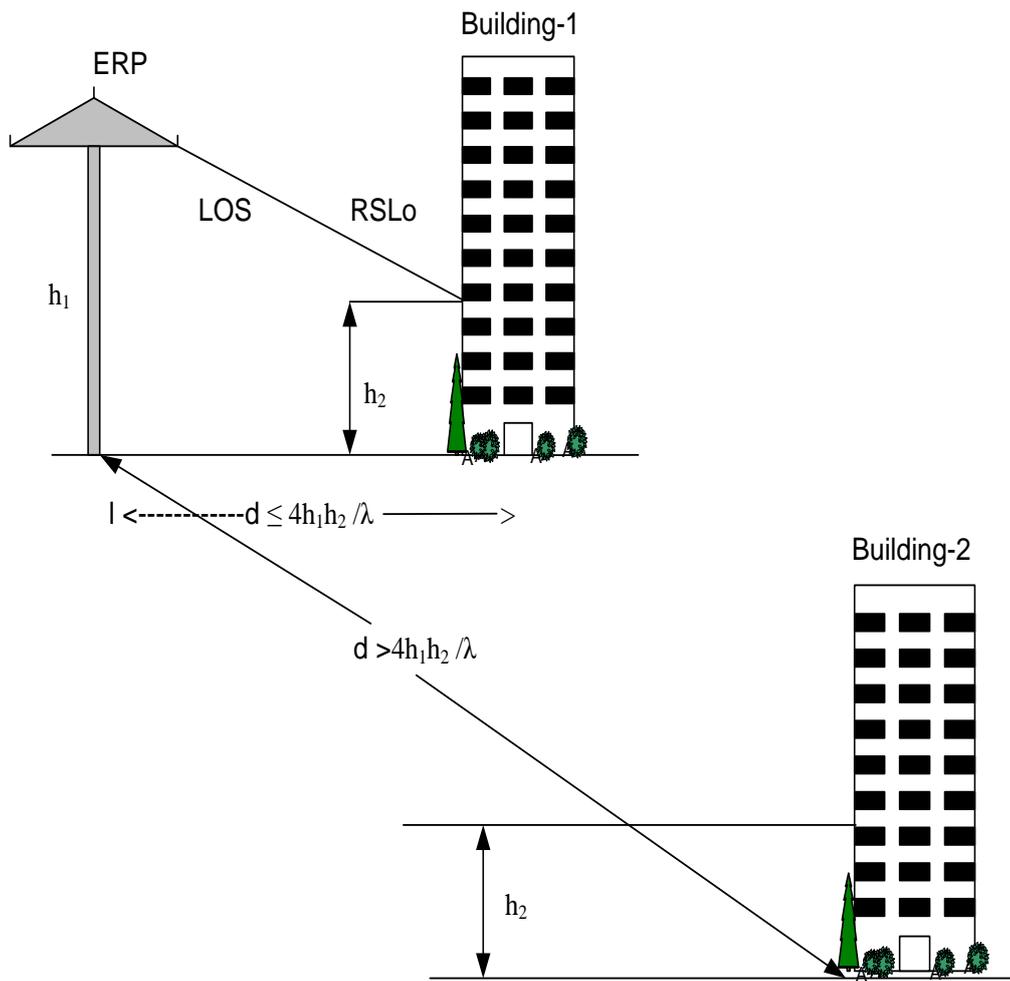
จากรูปที่ 2.16 ผลต่างวิถีระหว่างคลื่นแนวตรงและคลื่นสะท้อนทั้งสอง คือ

$$\Delta d_2 = [\{ (H - h_1) + (H - h_2) \}^2 + d^2]^{1/2} - [\{ (H - h_1) - (H - h_2) \}^2 + d^2]^{1/2} \quad (2.57)$$

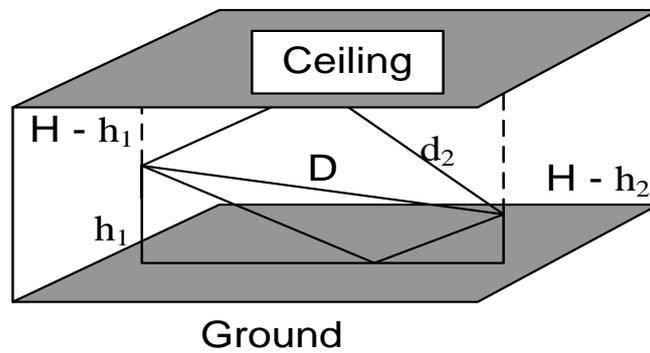
เมื่อ

$$\Delta d_1 = d_1 - D \text{ และ } \Delta d_2 = d_2 - D \text{ จักรูปใหม่ได้เป็น} \quad (2.58)$$

$$\Delta d_1 = [(h_1 + h_2)^2 + d^2]^{1/2} - [(h_1 - h_2)^2 + d^2]^{1/2} \quad (2.56)$$



รูปที่ 2.15 รัศมีการให้บริการระบบสื่อสารภายในอาคารที่อยู่ภายในและภายนอกเขตFresnelแรก



รูปที่ 2.16 แบบจำลองคลื่นสามแนวภายในอาคาร

$$\Delta d_1 = \frac{4h_1 h_2}{d \left[\left\{ \frac{h_1 + h_2}{d} \right\}^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} + d \left[\left\{ \frac{h_1 - h_2}{d} \right\}^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.59)$$

$$\Delta d_2 = \frac{4(H - h_1)(H - h_2)}{d \left[\left\{ \frac{2H - h_1 - h_2}{d} \right\}^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} + d \left[\left\{ \frac{h_2 - h_1}{d} \right\}^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.60)$$

ถ้า $(h_1 \pm h_2)/d \ll 1$ และ $2H - h_1 - h_2 \ll 1$. (2.59) และ (2.60) ลดรูปได้เป็น

$$\Delta d_1 \approx 2h_1 h_2 / d \quad (2.61)$$

$$\Delta d_2 \approx 2(H - h_1)(H - h_2) / d \quad (2.62)$$

เนื่องจากการให้ผลต่างวิถีของคลื่นสะท้อนทั้งสองมีค่าเดียวกันดังนั้นจึงกำหนดให้

$$\Delta d_1 = \Delta d_2 = \Delta d \quad (2.63)$$

ทำให้

$$H = h_1 + h_2 \quad (2.64)$$

ดังนั้นผลต่างวิถีสามารถหาได้จาก

$$\Delta d = 2(H - h_2) h_2 / d \quad (2.65)$$

ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงของเพดานและความสูงของสายอากาศตัวส่ง สำหรับเขตFresnelแรก ผลต่างวิถีที่อยู่ที $\lambda/2$ ซึ่งทำให้เกิดการเลี้ยวเบนสูงสุด ดังนั้นจากสมการ (2.65) สามารถเขียนได้ว่า

$$2(H - h_2) h_2 / d = \lambda / 2 \quad (2.66)$$

หรือ

$$d_0 = d = 4(H - h_2) h_2 / \lambda \quad (2.67)$$

เนื่องจาก $h_1 = H - h_2$ ดังนั้น สายอากาศของตัวส่งควรวางอยู่ต่ำกว่าเพดานเป็นระยะ h_2 เมื่อ h_2 คือ ความสูงของสายอากาศตัวรับ จึงจะทำให้การหาค่า d_0 ได้

