รายการอ้างอิง

[1] R. C. V. Macradio. Personal and Mobile Radio Systems. London: Peter Peregrins Ltd. 1993.

[2] Hata. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. VT-29. Aug. 1980. pp. 313-325.

[3] K. E. Stocker, B. E. Gschwendtner and F.M. Landstorfer. Neural Network Approach to Prediction of Terrestrial Wave Propagation for Mobile Radio. IEE Microwave , Antenna and Propagation Proceedings. Vol. 140. No. 4. Aug. 1993. pp. 315-320.

[4] H. L. Bertoni, L. Piazzi, G. Liang, Nai Wo and E. Wong. Prediction of Site Specific Coverage and Cell Shape for Outdoor Microcell. ELECTRO'96 Professional Program Proceedings. 1996. pp. 29-36.

[5] S. Y. Tan and H. S. Tan. A Theory for Propagation Path-Loss Characteristics in a City-Street Grid. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 37. No. 3. Aug. 1995. pp. 333-342.

[6] S. Y. Tan and H. S. Tan. UTD Propagation Model in an Urban Street Scene for Microcellular Communications. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 35. No. 4. Nov. 1993. pp. 423-428.

[7] S. Y. Tan and H. S. Tan. A Microcellular Communications Propagation Model Based on The Uniform Theory of Diffraction and Multiple Image Theory. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 44. No. 10. Oct. 1996. pp. 1317-1326.

[8] J. L. Ordials, F. P. Fontan and J. M. Hernando. Validation Results of a GTD based Propagation Prediction Model and Comparison with Conventional Models of Propagation. IEEE 7th Mediterranean Electrotechnical Conference Proceedings. Vol. 3. Apr. 1994. pp. 1170-1173.

[9] F. Ikegami, T. Takeuchi et al. Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. AP-32. No. 8. Aug. 1984 pp. 822-829.

[10] A. M. D. Turkmani and A.A. Arowojolu. Microcellular Propagation for PCN Network – A Review. 1994 3^{rd} Annual International Conference on Universal Personal Communications. 1994. pp. 171 - 177.

[11] Jin Au Kong. Electromagnetic Wave Theory. 2^{nd} Edition. John Wiley & Sons. 1990.

[12] C. A. Balanis. Advance Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons. 1990.

[13] H. R. Anderson. A Ray-Tracing Propagation Model for Ditital Broadcast Systems in Urban Areas. IEEE Transcations on Broadcasting. Vol.39. No. 3. Sep. 1993 pp. 309-317.

[14] T. Kurner and D. J. Cichon. Concepts and Results for 3D Digital Terrain-Based Wave Propagation Model : An Overview. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. 11. No. 7. Sep. 1993. pp. 1002-1012.

[15] A. G. Kanatas, I. D. Koutuoris, G. B. Kostaras and Philip Constantinou. A UTD Propagation Model in Urban Microcellular Environments. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 46. No. 1. Feb. 1997. pp. 185-193.

[16] ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข. การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์-มหาวิทยาลัย. 2539.

[17] งานวิชาการวางโครงแผนที่. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรการรังวัดชั้นสูง รุ่นที่ 11 ประจำปีงบประมาณ 2542. ฝ่ายอำนวยการรังวัดและทำแผนที่. กองรังวัดและทำแผนที่. กรมที่ดิน. พฤศจิกายน 2541.

[18] Jean-Frédé Wagen and K. Rizk. Simulation of Radio Wave Propagation in Urban Microcellular Environments. 2^{nd} International Conference on Universal Personal Communications. Vol. 2. 1993. pp. 595-599.

[19] J. M. Pielou and D. M. Holdem. Propagation Studies for 1.8 GHz Personal Communications: Analysis of Macrocell Measurements. IEE Colloquium on National Radio Propagation Program. Digest No. 004. Jan. 1991. pp. 14/1-5.

[20] Asha Mehrotra. Cellular Radio Performance Engineering. London: Artech House. Boston. 1994.

[21] William C. Y. Lee. Mobile communications engineering. New York: McGraw-Hill Book Company. 1982.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความสัมพันธ์ระหว่างทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้ากับระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต

เนื่องจากระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตพิจารณาปรากฏการณ์คลื่นเป็นปรากฏการณ์แบบอนุภาค การอธิบายมุมมองของระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตที่มีต่อการเคลื่อนที่ไปของคลื่นว่าเป็นการส่งผ่านพลังงานในลำรังสี สามารถแสดงให้เห็นได้โดยการหาผลเฉลยของสมการแมกซ์เวลล์ซึ่งเป็นสมการเชิงเวกเตอร์ด้วยวิธีการประมาณเชิงวิเคราะห์ในย่านความถี่สูงมากหรือเมื่อความถี่เชิงมุมเข้าใกล้ค่าอนันต์ เริ่มต้นจากการกำหนดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันเวกเตอร์เชิงตำแหน่งดังนี้

$$\overline{E}(\overline{r}) = \overline{E}e^{-jk_oL(\overline{r})} \tag{ก.1}$$

$$\overline{H}(\overline{r}) = \overline{H}e^{-jk_oL(\overline{r})} \tag{ก.2}$$

โดย $\overline{r}$ เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่ง $k_o = \frac{\omega}{c} = \omega\sqrt{\mu_o\varepsilon_o}$ เมื่อ ω เป็นความถี่เชิงมุมของคลื่น μ_o เป็นค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของอวกาศว่าง (permeability) ε_o เป็นค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอวกาศว่าง (permittivity) c เป็นความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในอวกาศว่าง เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงจะประมาณ $k_o \to \infty$ ได้

พิจารณาสมการแมกซ์เวล (Maxwell's equation) ในบริเวณปราศจากแหล่งกำเนิดตามสมการที่ (ก.3.1) – (ก.3.4)

$$\nabla \times \overline{E} + j\omega\mu\overline{H} = 0 \tag{ก.3.1}$$

$$\nabla \times \overline{H} - j\omega\varepsilon\overline{E} = 0 \tag{ก.3.2}$$

$$\nabla \cdot \overline{E} = 0 \tag{ก.3.3}$$

$$\nabla \cdot \overline{H} = 0 \tag{ก.3.4}$$

μ เป็นค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของตัวกลาง (permeability) ε เป็นค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลาง (permittivity) และในกรณีที่ตัวกลางเป็นอวกาศว่าง $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = \varepsilon_o$

แทนค่าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสมการที่ (ก.1) และ (ก.2) ลงในสมการแมกซ์เวลและใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์ $\nabla \times (\overline{A}\phi) = \phi\nabla \times \overline{A} + \nabla\phi \times \overline{A}$ และ $\nabla \cdot (\overline{A}\phi) = \nabla\phi \cdot \overline{A} + \phi\nabla \cdot \overline{A}$ จะได้

(ก.3.1) $\Rightarrow$ $$e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla \times \overline{E} + e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla(-jk_oL(\bar{r})) \times \overline{E} + j\omega\mu\overline{H}e^{-jk_oL(\bar{r})} = 0 \tag{ก.4.1}$$

(ก.3.2) $\Rightarrow$ $$e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla \times \overline{H} + e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla(-jk_oL(\bar{r})) \times \overline{H} - j\omega\varepsilon\overline{E}e^{-jk_oL(\bar{r})} = 0 \tag{ก.4.2}$$

(ก.3.3) $\Rightarrow$ $$e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla(-jk_oL(\bar{r})) \cdot \overline{E} + e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla \cdot \overline{E} = 0 \tag{ก.4.3}$$

(ก.3.4) $\Rightarrow$ $$e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla(-jk_oL(\bar{r})) \cdot \overline{H} + e^{-jk_oL(\bar{r})}\nabla \cdot \overline{H} = 0 \tag{ก.4.4}$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ (ก.5.1) – (ก.5.4)

$$\nabla L(\bar{r}) \times \overline{E} - n\eta\overline{H} = \frac{-j}{k_o}\nabla \times \overline{E} \tag{ก.5.1}$$

$$\nabla L(\bar{r}) \times \overline{H} + \frac{n}{\eta}\overline{E} = \frac{-j}{k_o}\nabla \times \overline{H} \tag{ก.5.2}$$

$$\nabla L(\bar{r}) \cdot \overline{E} = \frac{-j}{k_o}\nabla \cdot \overline{E} \tag{ก.5.3}$$

$$\nabla L(\bar{r}) \cdot \overline{H} = \frac{-j}{k_o}\nabla \cdot \overline{H} \tag{ก.5.4}$$

โดย n คือค่าดัชนีหักเหของตัวกลางมีค่า $n=\frac{k}{k_o}$ เมื่อ $k=\frac{\omega}{v}=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}$,v คือความเร็วของคลื่นในตัวกลาง และ η เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางบริเวณการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นตัวกลางแบบไอโซ-ทรอปิก มีค่า $\eta=\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ เมื่อพิจารณาที่ขอบเขตความถี่สูง $k_o\rightarrow\infty$ พจน์ขวามือของสมการที่ (ก.5.1) – (ก.5.4) มีค่าเป็น 0

$$\nabla L(\bar{r})\times\bar{E}-n\eta\bar{H}=0 \qquad (ก.6.1)$$

$$\nabla L(\bar{r})\times\bar{H}+\frac{n}{\eta}\bar{E}=0 \qquad (ก.6.2)$$

$$\nabla L(\bar{r})\cdot\bar{E}=0 \qquad (ก.6.3)$$

$$\nabla L(\bar{r})\cdot\bar{H}=0 \qquad (ก.6.4)$$

จะเห็นว่าสมการที่ (ก.6.1) – (ก.6.4) เป็นสมการที่ไม่ขึ้นกับความถี่และอธิบายคุณสมบัติของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในเชิงไม่ใช่คุณสมบัติของคลื่นแต่เป็นคุณสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ เมื่อแทนค่า $\bar{H}$ จากสมการที่ (ก.6.1) ลงใน (ก.6.2) จะได้

$$\nabla L(\bar{r})\times\left(\frac{1}{n\eta}\nabla L(\bar{r})\times\bar{E}\right)+\frac{n}{\eta}\bar{E}=0$$

$$\nabla L(\bar{r})\times\left(\nabla L(\bar{r})\times\bar{E}\right)+n^2\bar{E}=0$$

$$\nabla L(\bar{r})(\nabla\cdot\bar{E})-(\nabla L(\bar{r}))^2\bar{E}+n^2\bar{E}=0$$

$$(\nabla L(\bar{r}))^2\bar{E}=n^2\bar{E} \qquad (ก.7)$$

สมการที่ (ก.7) เรียกว่าสมการไอโคนอล (eikonal equation) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายลักษณะการเดินทางของคลื่นตามระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต และเรียกฟังก์ชันแสดงเฟส $L(\bar{r})$ ว่าฟังก์ชันไอโคนอล ซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงพื้นผิวของระนาบหน้าคลื่นและอธิบายด้วยสมการ

$L(\bar{r})$ เท่ากับค่าคงที่ ถ้าให้ $\hat{s}$ เป็นเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย (unit normal vector) ที่ตั้งฉากกับหน้าคลื่น ผลเฉลยของสมการที่ (ก.7) แสดงด้วยสมการที่ (ก.8)

$$\nabla L = \hat{s}n \qquad \text{(ก.8)}$$

และเรียก $\hat{s}n$ ว่าเวกเตอร์รังสี (ray vector)

<u>ลักษณะการส่งผ่านพลังงานในลำรังสี</u>

การอธิบายลักษณะการส่งผ่านพลังงานนั้นจะอธิบายด้วยทิศทางการส่งผ่านพลังงานและขนาดของพลังงานที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวของทิศทางการส่งผ่าน โดยทิศทางการส่งผ่านพลังงานคลื่นสามารถพิจารณาได้จากค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของกำลังพอยน์ติง (time-average Poynting's power) ดังนั้นจากสมการที่ (ก.6.1) และ (ก.6.2) จะได้

$$\langle \bar{S} \rangle = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\{\bar{E}\times\bar{H}^*\} = \frac{1}{2n\eta}\mathrm{Re}\{\bar{E}\times(\nabla L\times\bar{E})^*\}$$

$$= \frac{1}{2n\eta}(\bar{E}\cdot\bar{E}^*)\nabla L = \frac{1}{2n\eta}(\bar{E}\cdot\bar{E}^*)\nabla L = \hat{s}\frac{1}{2\eta}(\bar{E}\cdot\bar{E}^*) \qquad \text{(ก.9)}$$

ทำนองเดียวกัน ถ้าพิจารณาในพจน์ของสนามแม่เหล็กจะได้

$$\langle \bar{S} \rangle = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\{\bar{E}\times\bar{H}^*\} = \frac{\eta}{2n}\mathrm{Re}\{(\nabla L\times\bar{H})\times\bar{H}^*\}$$

$$= \frac{\eta}{2n}(\bar{H}\cdot\bar{H}^*)\nabla L = \frac{\eta}{2n}(\bar{H}\cdot\bar{H}^*)\nabla L = \hat{s}\frac{\eta}{2}(\bar{H}\cdot\bar{H}^*) \qquad \text{(ก.10)}$$

จากสมการที่ (ก.9) และ (ก.10) พบว่าทิศทางการส่งผ่านพลังงานของคลื่นอยู่ในทิศเดียวกับเวกเตอร์รังสี $\hat{s}n$ และมีขนาดของผลเฉลี่ยดังสมการที่ (ก.9) และ (ก.10) และจากทฤษฎีพอยท์ติงเชิงซ้อนที่ได้จากเอกลักษณ์เวกเตอร์ $\nabla\cdot(\bar{E}\times\bar{H}^*) = \bar{H}^*\cdot\nabla\times\bar{E} - \bar{E}\cdot\nabla\times\bar{H}^*$ ร่วมกับสมการที่ (ก.3.1) - (ก.3.2) จะได้

$$\nabla \cdot \left(\overline{E} \times \overline{H}^{*}\right) = j\omega\left(\mu\overline{H} \cdot \overline{H}^{*} - \varepsilon\overline{E} \cdot \overline{E}^{*}\right)$$

$$\nabla \cdot \overline{S} = j\omega\left(\mu\overline{H} \cdot \overline{H}^{*} - \varepsilon\overline{E} \cdot \overline{E}^{*}\right) \tag{ก.11}$$

จากขนาดของค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของกำลังพอยน์ติงในสมการที่ (ก.9) และ (ก.10)

$$\left|\left\langle\overline{S}\right\rangle\right| = \frac{1}{2\eta}\left(\overline{E} \cdot \overline{E}^{*}\right) = \frac{\eta}{2}\left(\overline{H} \cdot \overline{H}^{*}\right)$$

$$\therefore \quad \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\left(\overline{E} \cdot \overline{E}^{*}\right) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left(\overline{H} \cdot \overline{H}^{*}\right)$$

$$\varepsilon\left(\overline{E} \cdot \overline{E}^{*}\right) = \mu\left(\overline{H} \cdot \overline{H}^{*}\right) \tag{ก.12}$$

แทนค่าจากสมการที่ (ก.12) ลงในสมการที่ (ก.11) จะได้

$$\nabla \cdot \overline{S} = 0 \tag{ก.13}$$

ความหมายของสมการที่ (ก.11) และ (ก.13) ตามทฤษฎีพอยท์ติงแล้วหมายความว่าสามารถใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานกับระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตได้

จากสมการที่ (ก.6.1) และความสัมพันธ์จาก สมการที่ (ก.8)

$$\nabla L \times \overline{E} - n\eta\overline{H} = 0$$

$$n\eta\overline{H} = \nabla L \times \overline{E}$$

$$\eta\overline{H} = \frac{\nabla L}{n} \times \overline{E}$$

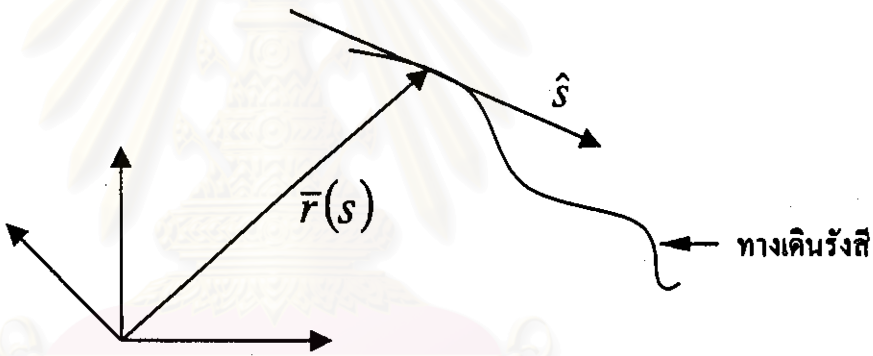
$$\overline{H} = \frac{\hat{s} \times \overline{E}}{\eta} \tag{ก.14}$$

เมื่อ $\eta = \sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}$ คือ อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของตัวกลางในบริเวณการแพร่กระจายคลื่น

จากความสัมพันธ์ของ $\bar{E},\bar{H}$ และ $\hat{s}$ ในสมการที่ (ก.6.3) - (ก.6.4) และ (ก.14) พบว่า คุณสมบัติของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเนื่องจากระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตนั้น สอดคล้องกับสมบัติของคลื่นระนาบในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

<u>การพิจารณาลักษณะทางเดินรังสี</u>

เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{E},\bar{H}$ และ $\hat{s}$ แล้วลักษณะแนวการเคลื่อนที่ไปของรังสีก็มีความสำคัญที่จะต้องพิจารณาด้วย โดยในเบื้องต้นจะสมมุติแนวทางเดินรังสีว่าเดินทางเป็นเส้นโค้งใดๆ และเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง



รูปที่ ก.1 การพิจารณาเส้นโค้งรังสีใดๆ ตามระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต

จากรูปที่ ก.1 สมมุติว่าทางเดินรังสีเป็นเส้นโค้งใดๆ ที่เป็นฟังก์ชันเชิงตำแหน่ง $\bar{r}(s)$ และมีความชันของเส้นโค้งเป็น $d\bar{r}/ds = \hat{s}$ การพิจารณาแนวโค้งของรังสีจะพิจารณาจากอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันเส้นโค้งรังสีดังสมการที่ (ก.15)

$$\frac{d^2\bar{r}}{ds^2} = \frac{d}{ds}\left(\frac{d\bar{r}}{ds}\right) = \frac{d}{ds}(\hat{s}) \qquad \text{(ก.15)}$$

เนื่องจาก $\dfrac{d\hat{s}}{ds} = (\hat{s}\cdot\nabla)\hat{s}$ และจากเอกลักษณ์เวกเตอร์ $\nabla(\bar{A}\cdot\bar{B}) = (\bar{A}\cdot\nabla)\bar{B} + (\bar{B}\cdot\nabla)\bar{A} + \bar{B}\times(\nabla\times\bar{A})$ $+\bar{A}\times(\nabla\times\bar{B})$ เมื่อแทนค่า $\bar{A},\bar{B}$ ด้วย $\hat{s}$ จะได้

$$\nabla(\hat{s}\cdot\hat{s}) = (\hat{s}\cdot\nabla)\hat{s} + (\hat{s}\cdot\nabla)\hat{s} + \hat{s}\times(\nabla\times\hat{s}) + \hat{s}\times(\nabla\times\hat{s})$$

$$\therefore \quad (\hat{s}\cdot\nabla)\hat{s} = -\hat{s}\times(\nabla\times\hat{s})$$

แทนค่าในสมการที่ (ก.15)

$$\frac{d^2\bar{r}}{ds^2} = (\hat{s}\cdot\nabla)\hat{s} = -\hat{s}\times(\nabla\times\hat{s}) \tag{ก.16}$$

เมื่อแทน $\hat{s} = \frac{\nabla L}{n}$ ลงในสมการที่ (ก.16) ใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์ $\nabla\times(\phi\bar{A}) = \nabla\phi\times\bar{A} + \phi\nabla\times\bar{A}$ และ $\nabla\times\nabla\phi = 0$ และเนื่องจาก $\nabla\frac{1}{n} = -\frac{1}{n^2}\nabla n = -\frac{\nabla \ln n}{n}$ จะได้

$$\frac{d^2\bar{r}}{ds^2} = -\hat{s}\times(\nabla\times\frac{\nabla L}{n}) = -\hat{s}\times(\nabla\frac{1}{n}\times\nabla L + \frac{1}{n}\nabla\times\nabla L) = -\hat{s}\times(\nabla\frac{1}{n}\times\nabla L)$$

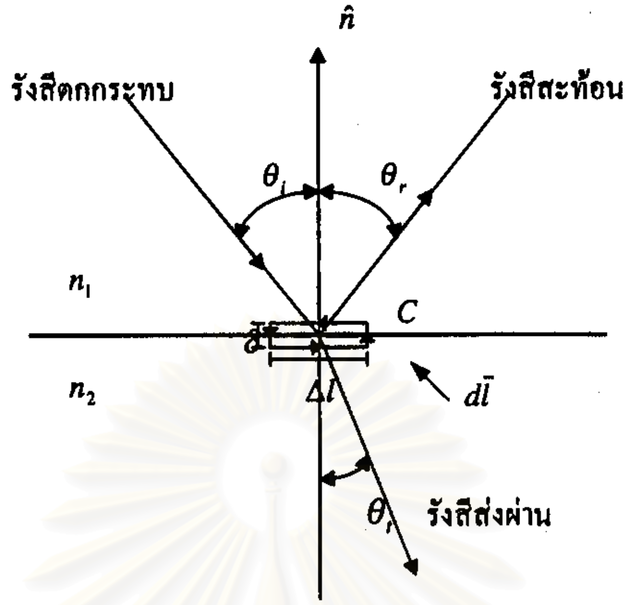
$$= -\hat{s}\times\left(-\frac{1}{n}\nabla\ln n\times\nabla L\right) = -\hat{s}\times(\hat{s}\times\nabla\ln n) \tag{ก.17}$$

จากเอกลักษณ์เวกเตอร์ $\bar{A}\times(\bar{B}\times\bar{C}) = (\bar{A}\cdot\bar{C})\bar{B} - (\bar{A}\cdot\bar{B})\bar{C}$ ดังนั้น

$$\frac{d^2\bar{r}}{ds^2} = -(\hat{s}\cdot\nabla\ln n)\hat{s} + (\hat{s}\cdot\hat{s})\nabla\ln n = -(\hat{s}\cdot\nabla\ln n)\hat{s} + \nabla\ln n \tag{ก.18}$$

สำหรับตัวกลางเอกพันธุ์ ค่าดัชนีหักเห n จะเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่ง ทำให้ $\nabla\ln n = 0$ ดังนั้นสมการที่ (ก.18) จะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึงอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเส้นโค้งมีค่าคงที่ ดังนั้นเส้นโค้งทางเดินรังสีนี้จึงเป็นเส้นตรงในตัวกลางเอกพันธุ์ แต่สำหรับตัวกลางไม่เอกพันธุ์ $\nabla\ln n \neq 0$ ทางเดินรังสีจะเป็นเส้นโค้ง

กฎของสเนล (Snell's law)



รูปที่ ก.2 การสะท้อนและการส่งผ่านระหว่างตัวกลาง

จากรูปที่ ก.2 คลื่นเดินทางผ่านรอยต่อของตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็น n_1 และ n_2 โดยมีมุมตกกระทบ θ_i มุมสะท้อน θ_r และมุมส่งผ่าน θ_t ซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และรังสีส่งผ่านทำกับแนวเวกเตอร์ตั้งฉากของรอยต่อระหว่างตัวกลางตามลำดับ

เมื่อดำเนินการ $\nabla\times$ กับสมการที่ (ก.8) จะได้

$$\nabla\times(\nabla L)=\nabla\times(\hat{s}n)=0 \tag{ก.19}$$

ทำการคูณแบบจุดสมการที่ (ก.19) ด้วย $d\bar{S}$ เมื่อ $d\bar{S}$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับพื้นที่เล็กๆ ที่ล้อมรอบด้วยเส้นรอบวง C แล้วอินทิเกรตผลคูณที่ได้บนพื้นที่ปิดระหว่างขอบเขตรอยต่อของตัวกลางดังรูปที่ ก.2 โดยกำหนด $\delta\rightarrow 0$ และใช้ทฤษฎีของสโตก (Stokes' theorem) จะได้

$$\iint d\bar{S}\cdot\nabla\times(\hat{s}n)=\oint_C d\bar{l}\cdot\hat{s}n=0 \tag{ก.20}$$

ในกรณีรังสีส่งผ่าน ผลที่ได้จากการอินทิเกรตเวกเตอร์รังสีตามเส้นวงรอบปิด C ในสมการที่ (ก.20) คือ

$$\oint_C d\bar{l}\cdot\hat{s}n = \int_\delta d\bar{l}\cdot\hat{s}n + \int_{\Delta l} d\bar{l}\cdot\hat{s}n$$
$$0 = 0 - n_1\Delta L\sin\theta_i + n_2\Delta L\sin\theta_t$$
$$n_1\sin\theta_i = n_2\sin\theta_t \qquad \text{(ก.21)}$$

สำหรับรังสีสะท้อนพิจารณาโดยการแทนค่า $\theta_t = \pi - \theta_r$ และ $n_2 = n_1$ ลงในสมการที่ (ก.21) ซึ่งจะทำให้ได้

$$n_1\sin\theta_i = n_1\sin\theta_r \qquad \text{(ก.22)}$$

ผลที่ตามมาจากสมการที่ (ก.21) และ (ก.22) คือกฎการสะท้อนของสเนล (Snell's law of reflection) และกฎการหักเหของสเนล (Snell's law of refraction) ดังสมการที่ (ก.23.1) – (ก.23.2)

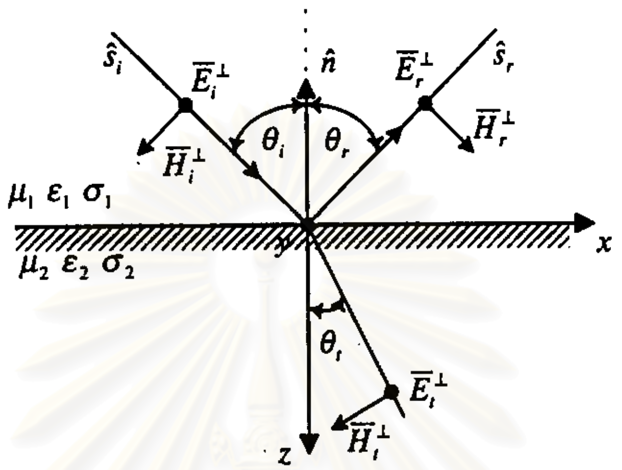
$$\theta_i = \theta_r \qquad \text{กฎการสะท้อนของสเนล} \qquad \text{(ก.23.1)}$$

$$n_1\sin\theta_i = n_2\sin\theta_t \qquad \text{กฎการหักเหของสเนล} \qquad \text{(ก.23.2)}$$

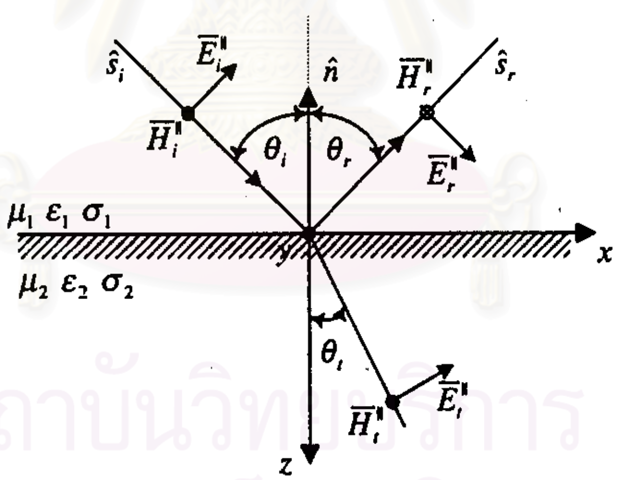
นอกจากการพิสูจน์ด้วยวิธีนี้แล้วกฎการสะท้อนของสเนลยังสามารถพิสูจน์จากหลักการของแฟร์มาต์หรือหลักการเฟสแมทชิง (phase matching) สำหรับคลื่นระนาบได้ด้วย

<u>สัมประสิทธิ์การสะท้อน</u>

สัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตที่พื้นผิวสะท้อน โดยจะแยกหาทีละชนิด ด้วยการพิจารณารูปที่ ก.3 (1) และ (2)



(1) โพลาไรเซชันแบบตั้งฉาก



(2) โพลาไรเซชันแบบขนาน

รูปที่ ก.3 แนวเวกเตอร์ของรังสีและของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เงื่อนไขขอบเขตแสดงความต่อเนื่องสำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่รอยต่อของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 แสดงได้ดังนี้

$$\left(\overline{E}_i^{\parallel,\perp} + \overline{E}_r^{\parallel,\perp}\right)_{\substack{tan \\ z=0}} = \left(\overline{E}_t^{\parallel,\perp}\right)_{\substack{tan \\ z=0}} \tag{ก.24.1}$$

$$\left(\overline{H}_i^{\parallel,\perp} + \overline{H}_r^{\parallel,\perp}\right)_{\substack{tan \\ z=0}} = \left(\overline{H}_t^{\parallel,\perp}\right)_{\substack{tan \\ z=0}} \tag{ก.24.2}$$

การหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามตกกระทบ สนามสะท้อนและสนามส่งผ่านจะแยกพิจารณาตามลักษณะของโพลาไรเซชันของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบจุดสะท้อน โดยแบ่งเป็นกรณีสนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันตั้งฉากกับระนาบตกกระทบและกรณีสนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันขนานกับระนาบตกกระทบ ซึ่งระนาบตกกระทบเป็นระนาบเดียวกับระนาบสะท้อนและเป็นระนาบที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์ตกกระทบ เวกเตอร์สะท้อนและเวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวสะท้อน

- สนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (soft polarization)

จากรูปที่ ก.3 (1) พิจารณาว่าการสะท้อนเป็นการสะท้อนแบบไม่มีการเปลี่ยนโพลาไรเซชัน (specula reflection) คือถ้ารังสีตกกระทบมีโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากกับระนาบตกกระทบแล้ว รังสีสะท้อนก็จะมีโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากกับระนาบสะท้อนด้วย และความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงดังสมการที่ (ก.25.1) - (ก.27.2)

สนามตกกระทบ

$$\overline{E}_i^{\perp} = \hat{a}_y E_i^{\perp} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} \tag{ก.25.1}$$

$$\begin{aligned} \overline{H}_i^{\perp} &= \left(-\hat{a}_x \cos\theta_i + \hat{a}_z \sin\theta_i\right) H_i^{\perp} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} \\ &= \left(-\hat{a}_x \cos\theta_i + \hat{a}_z \sin\theta_i\right) \frac{E_i^{\perp}}{\eta_1} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} \end{aligned} \tag{ก.25.2}$$

สนามสะท้อน

$$\overline{E}_r^{\perp} = \hat{a}_y E_r^{\perp} e^{-jk_r \cdot r} \tag{ก.26.1}$$

$$\begin{aligned} \overline{H}_r^{\perp} &= \left(\hat{a}_x \cos\theta_r + \hat{a}_z \sin\theta_r\right) H_r^{\perp} e^{-jk_r \cdot \bar{r}} \\ &= \left(\hat{a}_x \cos\theta_r + \hat{a}_z \sin\theta_r\right) \frac{E_r^{\perp}}{\eta_1} e^{-jk_r \cdot \bar{r}} \end{aligned} \tag{ก.26.2}$$

สนามส่งผ่าน

$$\overline{E}_t^{\perp} = \hat{a}_y E_t^{\perp} e^{-jk_t\cdot\bar{r}} \qquad (ก.27.1)$$

$$\begin{aligned}\overline{H}_t^{\perp} &= \left(-\hat{a}_x\cos\theta_t + \hat{a}_z\sin\theta_t\right)H_t^{\perp}e^{-jk_t\cdot\bar{r}} \\ &= \left(-\hat{a}_x\cos\theta_t + \hat{a}_z\sin\theta_t\right)\frac{E_t^{\perp}}{\eta_2}e^{-jk_t\cdot\bar{r}}\end{aligned} \qquad (ก.27.2)$$

ใช้เงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณรอยต่อดังสมการที่ (ก.24.1) – (ก.24.2) ดังนั้นจากสมการที่ (ก.25.1) - (ก.27.2) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสนามเฉพาะในแนวสัมผัสรอยต่อได้เป็น

$$E_i^{\perp}e^{-jk_i\cdot\bar{r}} + E_r^{\perp}e^{-jk_r\cdot\bar{r}} = E_t^{\perp}e^{-jk_t\cdot\bar{r}} \qquad (ก.28)$$

และ

$$-H_i^{\perp}\cos\theta_i e^{-jk_i\cdot\bar{r}} + H_r^{\perp}\cos\theta_r e^{-jk_r\cdot\bar{r}} = -H_t^{\perp}\cos\theta_t e^{-jk_t\cdot\bar{r}}$$

หรือ
$$-\frac{E_i^{\perp}}{\eta_1}\cos\theta_i e^{-jk_i\cdot\bar{r}} + \frac{E_r^{\perp}}{\eta_1}\cos\theta_r e^{-jk_r\cdot\bar{r}} = -\frac{E_t^{\perp}}{\eta_2}\cos\theta_t e^{-jk_t\cdot\bar{r}}$$
(ก.29)

จากหลักการเฟสสมมูล $\left(e^{-jk_i\cdot\bar{r}} = e^{-jk_r\cdot\bar{r}} = e^{-jk_t\cdot\bar{r}}\right)$ เมื่อแทนค่า $E_t^{\perp}$ จากสมการที่ (ก.28) ลงในสมการที่ (ก.29) จะได้

$$-\eta_2 E_i^{\perp}\cos\theta_i + \eta_2 E_r^{\perp}\cos\theta_r = -\eta_1 E_i^{\perp}\cos\theta_t - \eta_1 E_r^{\perp}\cos\theta_t$$

$$E_r^{\perp} = \frac{\eta_2\cos\theta_i - \eta_1\cos\theta_t}{\eta_2\cos\theta_r + \eta_1\cos\theta_t}E_i^{\perp} \qquad (ก.30)$$

เนื่องจาก $E_r^{\perp} = R_{s,\perp}E_i^{\perp}$ ดังนั้น

$$R_{s,\perp} = \frac{\eta_2\cos\theta_i - \eta_1\cos\theta_t}{\eta_2\cos\theta_r + \eta_1\cos\theta_t} \qquad (ก.31)$$

- สนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันในทิศที่ขนานกับระนาบตกกระทบ (hard polarization)

จากรูปที่ ก.3 (2) สำหรับสนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันในทิศที่ขนานกับระนาบตกกระทบจะพิจารณาคล้ายกับกรณีโพลาไรเซชันตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ

สนามตกกระทบ

$$\overline{E}_i^{\parallel} = \left(\hat{a}_x \cos\theta_i - \hat{a}_z \sin\theta_i\right) E_i^{\parallel} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} \tag{ก.32.1}$$

$$\overline{H}_i^{\parallel} = \hat{a}_y H_i^{\parallel} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} = \hat{a}_y \frac{E_i^{\parallel}}{\eta_1} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} \tag{ก.32.2}$$

สนามสะท้อน

$$\overline{E}_r^{\parallel} = \left(\hat{a}_x \cos\theta_r + \hat{a}_z \sin\theta_r\right) E_r^{\parallel} e^{-jk_r \cdot \bar{r}} \tag{ก.33.1}$$

$$\overline{H}_r^{\parallel} = -\hat{a}_y H_r^{\parallel} e^{-jk_r \cdot r} = -\hat{a}_y \frac{E_r^{\parallel}}{\eta_1} e^{-jk_r \cdot r} \tag{ก.33.2}$$

สนามส่งผ่าน

$$\overline{E}_t^{\parallel} = \left(\hat{a}_x \cos\theta_t - \hat{a}_z \sin\theta_t\right) E_t^{\parallel} e^{-jk_t \cdot \bar{r}} \tag{ก.34.1}$$

$$\overline{H}_t^{\parallel} = \hat{a}_y H_t^{\parallel} e^{-jk_t \cdot \bar{r}} = \hat{a}_y \frac{E_t^{\parallel}}{\eta_2} e^{-jk_t \cdot \bar{r}} \tag{ก.34.2}$$

ใช้เงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้นสมการที่ (ก.32.1) - (ก.34.2) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสนามในแนวสัมผัสรอยต่อได้เป็น

$$E_i^{\parallel} \cos\theta_i e^{-jk_i \cdot \bar{r}} + E_r^{\parallel} \cos\theta_r e^{-jk_r \cdot \bar{r}} = E_t^{\parallel} \cos\theta_t e^{-jk_t \cdot \bar{r}} \tag{ก.35}$$

และ

$$H_i^{\parallel} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} - H_r^{\parallel} e^{-jk_r \cdot \bar{r}} = H_t^{\parallel} e^{-jk_t \cdot \bar{r}}$$

หรือ

$$\frac{E_i^{\parallel}}{\eta_1} e^{-jk_i \cdot \bar{r}} - \frac{E_r^{\parallel}}{\eta_1} e^{-jk_r \cdot \bar{r}} = \frac{E_t^{\parallel}}{\eta_2} e^{-jk_t \cdot \bar{r}} \tag{ก.36}$$

จากหลักการเฟสสมมูล $\left(e^{-jk_i\cdot\bar{r}} = e^{-jk_r\cdot\bar{r}} = e^{-jk_t\cdot\bar{r}}\right)$ เมื่อแทนค่า $E_t^{\parallel}$ จากสมการที่ (ก.36) ลงในสมการที่ (ก.35) จะได้

$$\eta_1 E_i^{\parallel}\cos\theta_i + \eta_1 E_r^{\parallel}\cos\theta_r = \eta_2 E_i^{\parallel}\cos\theta_t - \eta_2 E_r^{\parallel}\cos\theta_t$$

$$E_r^{\parallel} = \frac{\eta_2\cos\theta_t - \eta_1\cos\theta_i}{\eta_2\cos\theta_t + \eta_1\cos\theta_r}E_i^{\parallel} \qquad (ก.37)$$

เนื่องจาก $E_r^{\parallel} = R_{h,\parallel}E_i^{\parallel}$ ดังนั้น

$$R_{h,\parallel} = \frac{\eta_2\cos\theta_t - \eta_1\cos\theta_i}{\eta_2\cos\theta_t + \eta_1\cos\theta_r} \qquad (ก.38)$$

จากกฎการสะท้อนและกฎการหักเหของสเนลในสมการที่ (ก.25.1) – (ก.25.2) สามารถเขียนสมการที่ (ก.31) และ (ก.38) ได้ใหม่ดังนี้

$$R_{s,\perp} = \frac{\eta_2\cos\theta_i - \eta_1\cos\theta_t}{\eta_2\cos\theta_i + \eta_1\cos\theta_t} \qquad (ก.39.1)$$

$$R_{h,\parallel} = \frac{\eta_2\cos\theta_t - \eta_1\cos\theta_i}{\eta_2\cos\theta_t + \eta_1\cos\theta_i} \qquad (ก.39.2)$$

โดย $\eta_m = \sqrt{\dfrac{j\omega\mu_m}{\sigma_m + j\omega\varepsilon_m}}$, $k_m = \omega\sqrt{\mu_m\varepsilon_m - \dfrac{j\mu_m\sigma_m}{\omega}}$ สำหรับตัวกลางไดอิเลกตริกที่มีการสูญเสีย ในปัญหาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมืองการสะท้อนจะเกิดบนพื้นผิวของตึกและพื้นดิน ดังนั้นอาจมองตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศและตัวกลางที่ 2 เป็นตึกหรือพื้นดินและความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของตัวกลางทั่วไป $\mu \approx \mu_o$ ซึ่งทำให้ได้

สำหรับตัวกลางที่ 1 (อากาศ)

$$\eta_1 = \eta_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}}\ ,\ k_1 = k_o = \omega\sqrt{\mu_o\varepsilon_o} \qquad (ก.40)$$

และสำหรับตัวกลางที่ 2 (พื้นดินหรือผิวตึก)

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{j\omega\mu_o}{\sigma + j\omega\varepsilon_r\varepsilon_o}} = \eta_o \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r - j(\sigma/\omega\varepsilon_o)}} = \eta_o \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$$
$$k_2 = \omega\sqrt{\mu_o\varepsilon_r\varepsilon_o - j\frac{\mu_o\sigma}{\omega}} = \omega\sqrt{\mu_o\varepsilon_o}\sqrt{\varepsilon_r - j(\sigma/\omega\varepsilon_o)} = k_o\sqrt{\varepsilon} \qquad \text{(ก.41)}$$

เมื่อ $\varepsilon = \varepsilon_r - j(\sigma/\omega\varepsilon_o) = \varepsilon_r - j60\sigma\lambda$

จากสมการที่ (ก.40) - (ก.41) และจากกฎการหักเหของสเนลจะได้ $\cos\theta_t = \sqrt{1-\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2(\sin\theta_i)^2}$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (ก.39.1) และ (ก.39.2) จะได้

$$R_{s,\perp} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i}} \qquad \text{(ก.42.1)}$$

$$R_{h,\parallel} = \frac{\sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i} - \varepsilon\cos\theta_i}{\sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i} + \varepsilon\cos\theta_i} \qquad \text{(ก.42.2)}$$

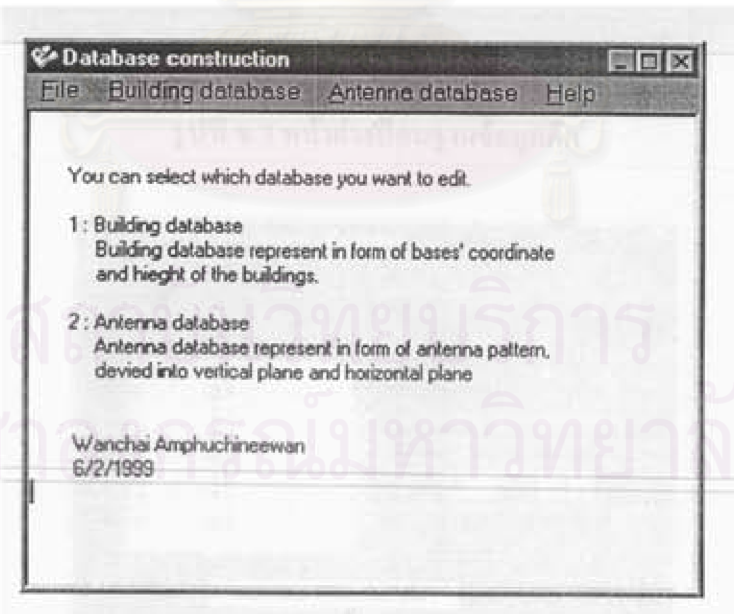
ภาคผนวก ข.

ลักษณะโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลและโปรแกรมคำนวณ

โปรแกรมคำนวณพัฒนาด้วยภาษา Delphi รุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ซึ่งเป็นภาษาที่สามารถสร้างโปรแกรมประยุกต์ที่ต้องการออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานให้เข้าใจง่ายและใช้สะดวก นอกจากนี้ยังง่ายต่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งส่วนการพัฒนาโปรแกรมออกเป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วยส่วนจัดการฐานข้อมูลทั้งของตึกกีดขวางและของสายอากาศ อีกส่วนที่เหลือคือส่วนที่นำฐานข้อมูลเหล่านี้ไปประกอบกับค่า input ของแบบจำลองเพื่อทำนายลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ในเบื้องต้นจะกล่าวถึงลักษณะส่วนจัดการฐานข้อมูลก่อนแล้วจึงจะกล่าวถึงส่วนนำฐานข้อมูลนี้ไปประกอบการคำนวณต่อไป

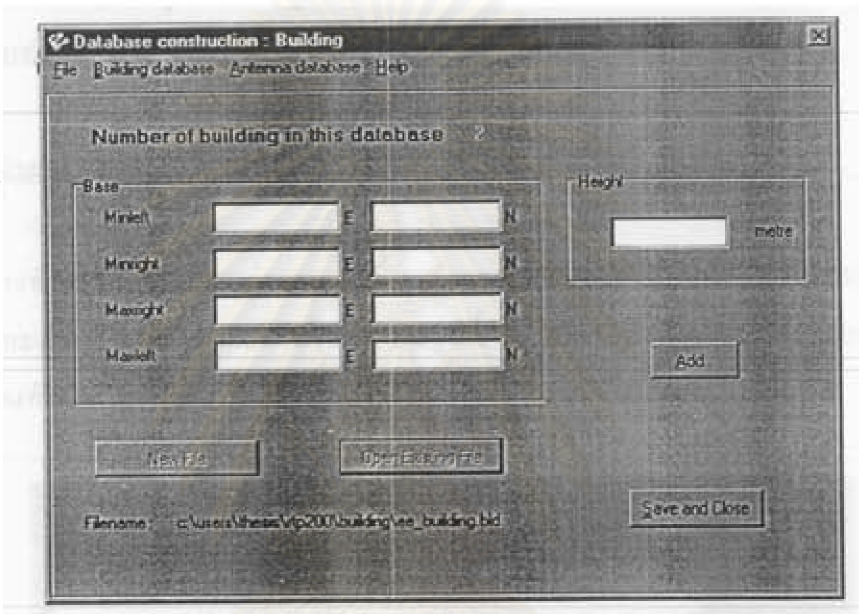
<u>โปรแกรมจัดการฐานข้อมูล</u>

หน้าต่างแรกของโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลจะเป็นการแนะนำวิธีใช้งานเบื้องต้นเพื่อให้เลือกว่าจะจัดเก็บข้อมูลของตึกหรือของสายอากาศ โดยมีหน้าต่างแสดงผลดังรูปที่ ข.1

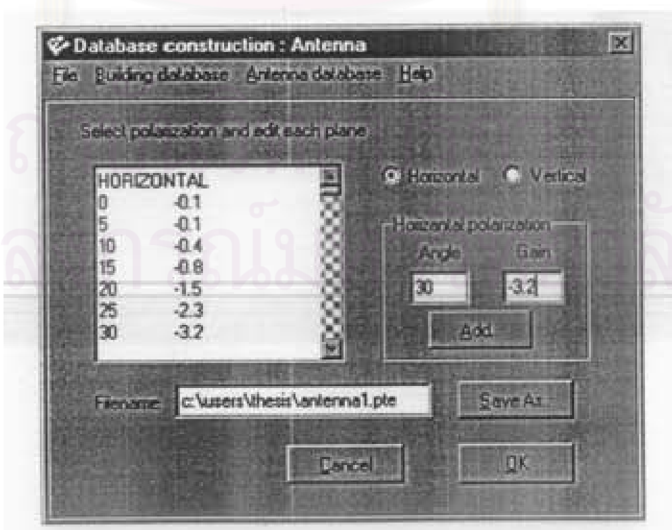


รูปที่ ข.1 หน้าต่างแรกของโปรแกรมจัดการฐานข้อมูล

เมื่อเลือก Building database จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ข.2 ซึ่งสามารถป้อนข้อมูลได้สองส่วนคือ ส่วนของความสูงและตำแหน่งมุมทั้งสี่ของฐานตึกในระบบพิกัด UTM (E-N) การป้อนพิกัดของฐานจะป้อนพิกัดเวียนขวาโดยเริ่มจากมุมใดก่อนก็ได้ ในกรณีที่ตึกเป็นรูปหลายเหลี่ยมใดๆ จะประมาณด้วยการแยกเป็นการประกอบกันของตึกทรงสี่เหลี่ยมหลายตึก ส่วนที่สองเป็นส่วนจัดการกับแฟ้มข้อมูลซึ่งคือการเปิดแฟ้มเดิมขึ้นมาแล้วเพิ่มข้อมูลเข้าไป หรือจัดเก็บเป็นแฟ้มใหม่ โดยหน้าต่างนี้จะแสดงจำนวนตึกที่อยู่ในฐานข้อมูลด้วย ตัวอย่างของแฟ้มที่แสดงในรูปที่ ข.2 คือแฟ้มข้อมูล ee_building.bld ซึ่งมีจำนวนตึกในแฟ้มข้อมูล 2 ตึก



รูปที่ ข.2 หน้าต่างป้อนฐานข้อมูลตึก



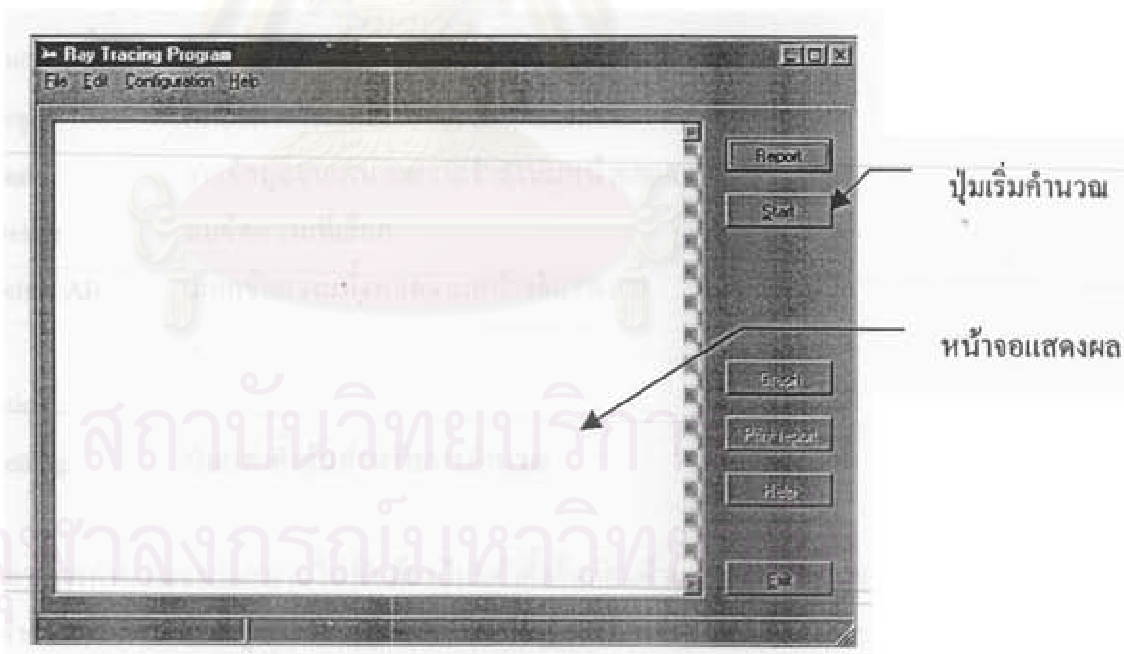
รูปที่ ข.3 หน้าต่างป้อนข้อมูลสายอากาศ

เมื่อเลือกที่ Antenna database จะปรากฏหน้าต่างป้อนข้อมูลของสายอากาศดังรูปที่ ข.3 โดยข้อมูลจะเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในรูปของมุมทิศและการลดทอนในทิศนั้นๆ ตัวอย่างในรูปที่ ข.3 เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบ Celwave และจัดเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลชื่อ antenna1.pte

เมื่อจัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับายอากาศในรูปของแฟ้มข้อมูลแล้ว จะสามารถนำไปใช้ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำนายลักษณะการแพร่กระจายคลื่นต่อไป ซึ่งรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมจัดเก็บข้อมูลนี้จะเป็นรูปแบบเฉพาะที่สามารถอ่านได้ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นเองในแบบจำลองเท่านั้น

<u>โปรแกรมจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่น</u>

การจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือส่วนตามรอยทางเดินสัญญาณและส่วนคำนวณขนาดสนามไฟฟ้า โดยรูปที่ ข.4 แสดงหน้าต่างแรกของโปรแกรม และรูปที่ ข.5 แสดงคำสั่งต่างๆ ในเมนูของหน้าต่างแรก



รูปที่ ข.4 หน้าต่างแรกของโปรแกรมแบบจำลอง

รูปที่ ข.5 คำสั่งต่างๆ ในเมนู

คำสั่งต่างๆ ในแต่ละเมนูประกอบด้วย

File :

Open Old Prediction	เปิดแฟ้มข้อมูลผลการคำนวณเดิมมาแสดงบนหน้าจอแสดงผล
Save Calculation	เก็บผลการคำนวณบนหน้าจอแสดงผลลงในแฟ้มข้อมูล
Close	ปิดแฟ้มข้อมูลผลการคำนวณที่เปิดอยู่
Exit	ออกจากโปรแกรม

Edit :

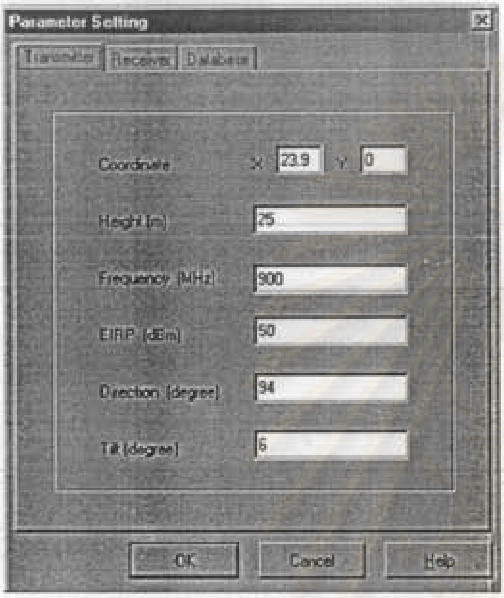
Cut	ตัดข้อความที่เลือกเข้าในหน่วยความจำ
Copy	คัดลอกข้อความที่เลือกเข้าในหน่วยความจำ
Paste	วางข้อมูลจากหน่วยความจำลงบนหน้าจอแสดงผล
Delete	ลบข้อความที่เลือก
Select All	เลือกข้อความทั้งหมดจากหน้าจอแสดงผล

Configuration :

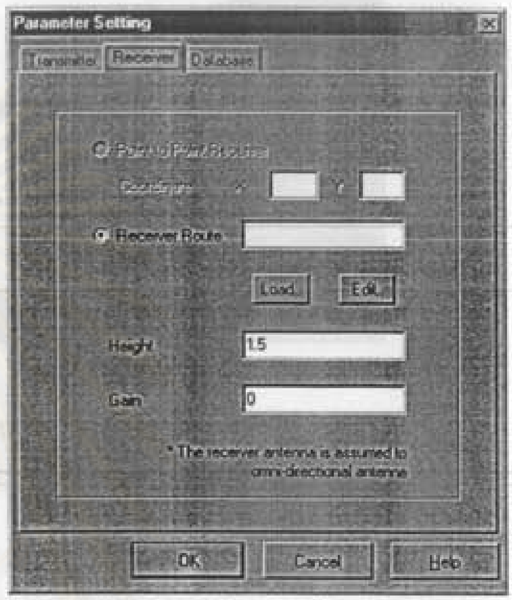
Setting	ป้อนค่าตั้งต้นสำหรับการคำนวณ

ก่อนการคำนวณขนาดสนามไฟฟ้า ต้องป้อนค่าตั้งต้นก่อนด้วยเมนู Configuration→Setting ซึ่งมีหน้าต่างแสดงผลแสดงดังรูปที่ ข.6 (1) - (3) โดยแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนป้อนข้อมูลของภาคส่ง ส่วนป้อนข้อมูลภาครับ และส่วนป้อนชื่อแฟ้มข้อมูลของสายอากาศส่งและฐานข้อมูลตึก จากข้อมูลที่ป้อนในหน้าต่างทั้งสามนี้จะทำให้โปรแกรมสามารถติดตามทางเดินสัญญาณและคำนวณสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการทราบได้

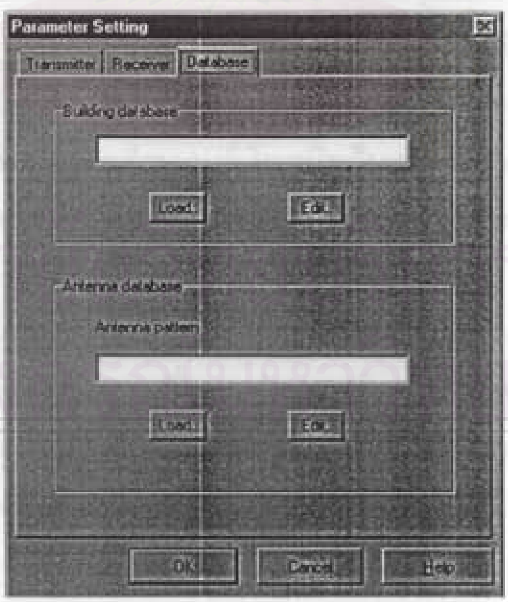
เมื่อป้อนข้อมูลตั้งต้นแล้ว กดที่ปุ่ม Start เพื่อเริ่มต้นคำนวณ ขณะที่คำนวณบริเวณหน้าจอแสดงผลจะแสดงค่าตั้งต้นที่ป้อนเข้าไปทั้งหมดและแสดงสถานะภาพการคำนวณในขณะปัจจุบัน ดังตัวอย่างในรูปที่ ข.7 และผลการคำนวณที่ได้สามารถเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดการแพร่กระจายจริงได้ด้วยโปรแกรมที่สามารถสร้างกราฟได้ ไม่ว่าจะเป็น MS. EXCEL หรือ MATLAB ก็ได้



(1) ป้อนข้อมูลของตัวส่ง



(2) ป้อนข้อมูลตัวรับและเส้นทางเดินตัวรับ



(3) กำหนดชื่อแฟ้มข้อมูลของฐานข้อมูล

รูปที่ ข.6 หน้าต่างป้อนค่าเริ่มต้น

รูปที่ ข.7 หน้าจอแสดงผลขณะกำลังคำนวณ

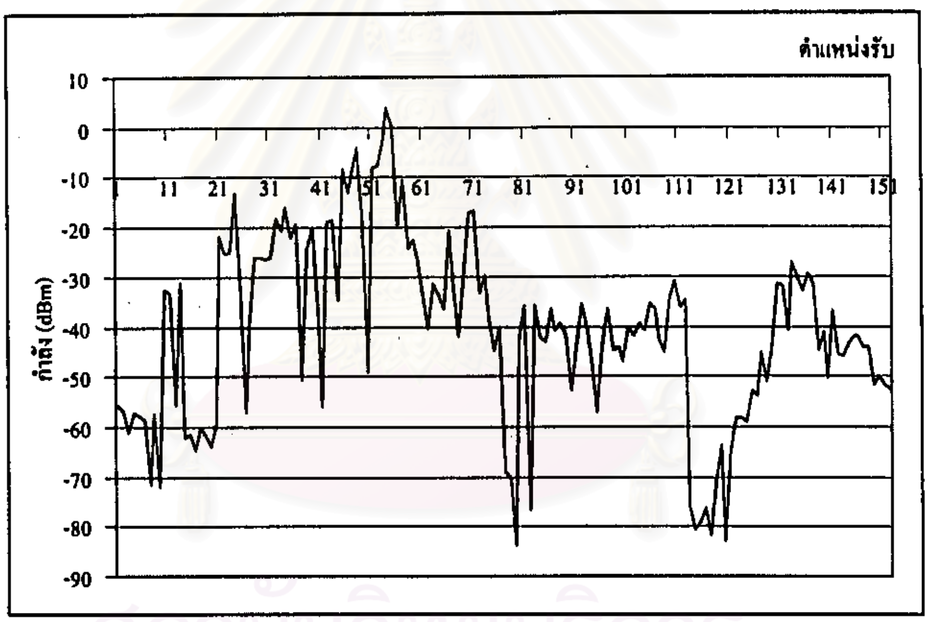
<u>ตัวอย่างผลการคำนวณ</u>

กรณีตัวอย่างเป็นการทำนายลักษณะการแพร่กระจายคลื่นบริเวณถนนพหลโยธินโดยเส้นทางสุ่มจุดรับเริ่มจากคลองบางซื่อจนกระทั่งถึงบริเวณทางด่วนอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ มีระยะห่างของการสุ่มจุดรับเป็น 20 เมตร จุดส่งเป็นสถานีฐานที่ตึกชินวัตร 2 โดยมีค่าปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณดังตารางที่ ข.1 ตำแหน่งของสายอากาศแสดงในรูปของพิกัดแบบ UTM ค่าแนวเล็งของสายอากาศหมายถึงทิศทางที่ชี้สายอากาศไปโดยเทียบแนวชี้ทิศเหนือเป็นแนว 0 องศาและนับองศาวนตามเข็มนาฬิกา โดยกำหนดสายอากาศรับเป็นสายอากาศแบบรอบทิศและกำหนดความสูงของสายอากาศรับเป็น 1.5 เมตร

จากการกำหนดค่าปัจจัยดังตารางที่ ข.1 ประกอบกับฐานข้อมูลของสิ่งกีดขวางบริเวณถนนพหลโยธินจะได้ผลการคำนวณแสดงด้วยกราฟดังรูปที่ ข.8 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่ากำลังที่รับได้เทียบกับตำแหน่งรับต่างๆ จากตำแหน่งแรกจนถึงตำแหน่งสุดท้าย

ตารางที่ ข.1 ค่าปัจจัยเพื่อการคำนวณกรณีตัวอย่างถนนพหลโยธิน

ตำแหน่งสถานีส่ง[1]	E 667555 N 1524352
ความสูงสายอากาศส่ง	25 m
กำลังส่ง	50 dBm
ความถี่ปฏิบัติการ	950.4 MHz
มุมก้มของสายอากาศ	6 degree
แนวเล็งของสายอากาศ	30 degree
ชนิดของสายอากาศส่ง	Kathrein 738819



รูปที่ ข.8 ตัวอย่างผลการคำนวณจากโปรแกรมคำนวณ

การจำลองการแพร่กระจายคลื่นเพื่อทำนายลักษณะการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรมคำนวณใช้วิธีเดียวกับตัวอย่างการคำนวณที่กล่าวแล้วข้างต้น สามารถคำนวณได้หลายกรณีโดยการเปลี่ยนค่าปัจจัยในตารางใหม่ ซึ่งอาจจะเป็น ค่าพิกัดของสายอากาศส่ง ความสูงของสายอากาศส่ง

[1] พิกัด UTM แสดงโดยแกนตะวันออก-เหนือ หรือ E-N ตัวอย่างเช่นพิกัด E 100 N 200 หมายถึงพิกัดอยู่ที่ตะวันออก 100 เมตร เหนือ 200 เมตร เทียบกับจุดอ้างอิง E 0 N 0 ที่เส้นละติจูด 0 องศา ลองจิจูด 99 องศา สำหรับประเทศไทย

กำลังส่ง ความถี่ใช้งาน มุมก้ม แนวเล็งและชนิดของสายอากาศ แต่เนื่องจากมีขีดจำกัดของการวัดผลการแพร่กระจายจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณ ดังนั้นการกำหนดค่าปัจจัยต่างๆ เพื่อจำลองการแพร่กระจายคลื่นจะอ้างอิงจากค่าปัจจัยที่ใช้ในการวัดการแพร่กระจายจริงเป็นเกณฑ์ในการคำนวณ เพื่อให้สามารถนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการวัดได้

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างสิ่งแวดล้อมการแพร่กระจายคลื่น

การวัดผลการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบทำในบริเวณถนนพหลโยธิน บริเวณถนนสี่พระยา-สุรวงศ์ และบริเวณถนนพญาไทซึ่งมีสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปเป็นดังนี้

ถนนพหลโยธิน

อาคารในบริเวณถนนนี้มีความสูงต่ำที่แตกต่างกันสลับไปเรื่อยๆ นอกจากนี้กลางถนนยังมีทางรถไฟฟ้าลอยฟ้าอยู่ด้วย

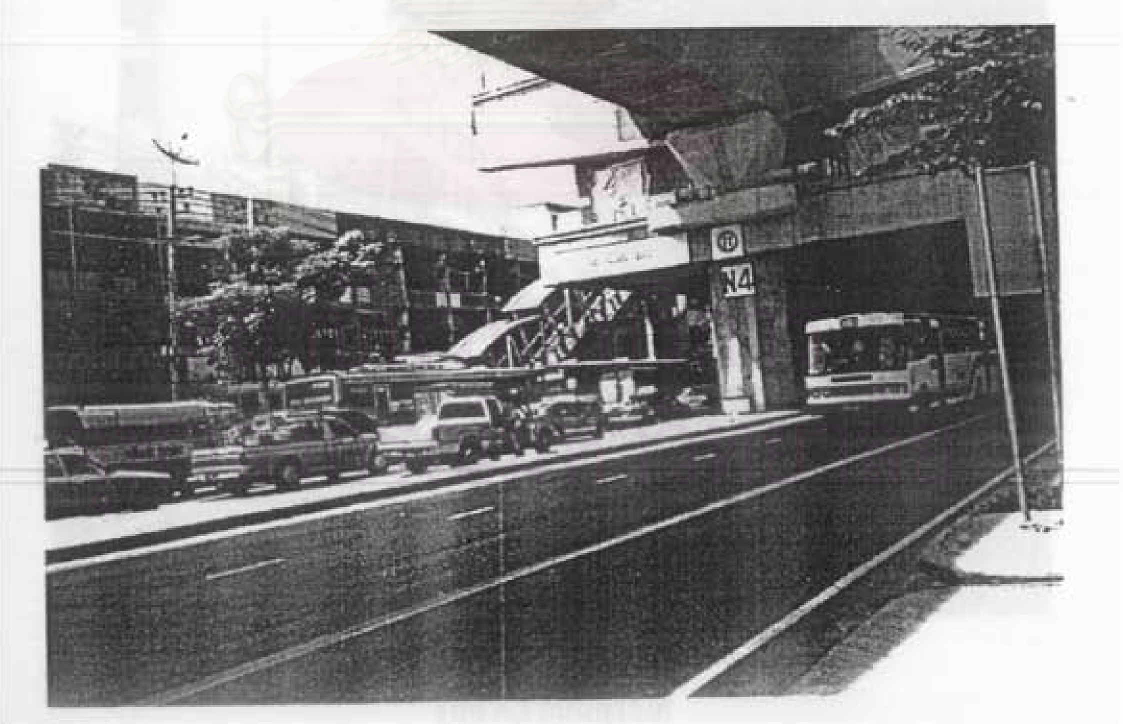
ถนนสี่พระยา-สุรวงศ์

อาคารบริเวณนี้มีความเป็นระเบียบค่อนข้างมากเพราะส่วนใหญ่เป็นตึกแถวอาคารพาณิชย์ ยกเว้นถนนสุรวงศ์ที่มีอาคารสูงสลับบ้าง

ถนนพญาไท

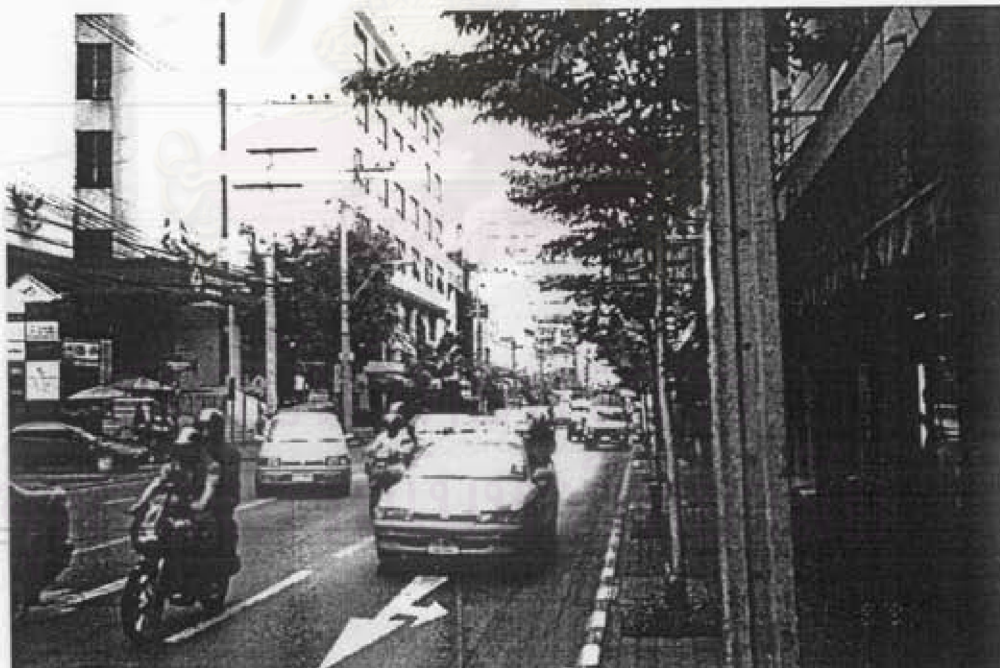
มีสภาพคล้ายกับถนนพหลโยธินแต่มีความโปร่งมากกว่า มีตึกสูงน้อยกว่า

ลักษณะโดยทั่วไปของบริเวณที่ทำการทดสอบแสดงดังรูป (ไม่แสดงบริเวณถนนพญาไท)



รูปที่ ค.1 ถนนพหลโยธิน

รูปที่ ค.2 ถนนพหลโยธิน

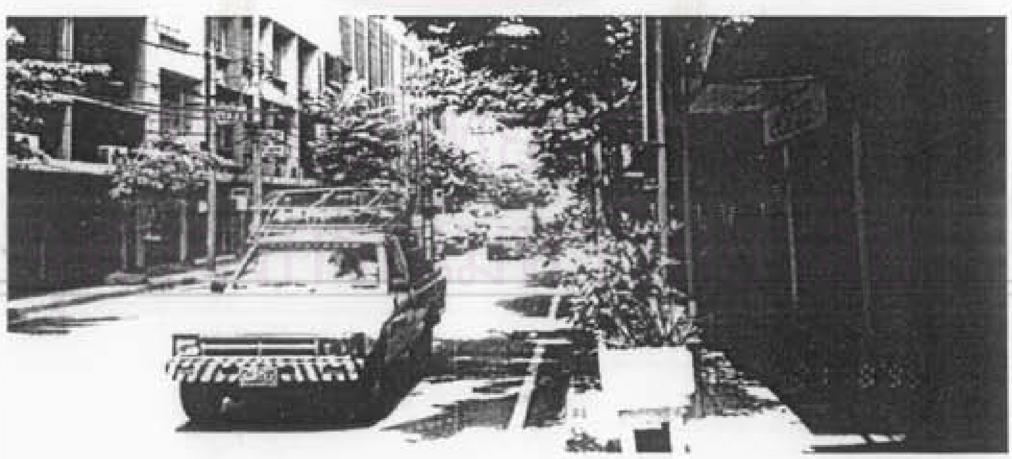


รูปที่ ค.3 ถนนสุรวงศ์

รูปที่ ค.4 ถนนสุรวงศ์

รูปที่ ค.5 ถนนทรัพย์

รูปที่ ค.6 ถนนสี่พระยา



ประวัติผู้เขียน

นายวันชัย อัมพุชินีวรรณ เกิดวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520 ที่อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540

มีนาคม พ.ศ. 2542 เสนอผลงานวิจัยเรื่อง "Path Loss Prediction in Bangkok Mobile Communication Environment" ในที่ประชุมวิชาการ Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS1999 ระหว่างวันที่ 22-26 มีนาคม พ.ศ. 2542 ที่ประเทศไต้หวัน

พฤษภาคม พ.ศ. 2542 เสนอผลงานวิจัยเรื่อง "Radio Wave Propagation over Rooftop of Mixed Height Buildings" ในที่ประชุมวิชาการ International Wireless and Telecommunications Symposium, IWTS1999 ระหว่างวันที่ 17-21 พฤษภาคม พ.ศ. 2542 ที่ประเทศมาเลเซีย