

รายการอ้างอิง

- [1] A. R. Cherrette, Shung-Wu Lee and Roberto J. Acosta. A Method for Producing a Shaped Contour Radiation Pattern Using a Single Shaped Reflector and a Single Feed. IEEE Transactions on Antennas and Propagation Vol. 37 No. 6 June 1989: 698-705.
- [2] Kazuyoshi Shogen, Hayato Nishida and Noboru Toyama. Single Shaped Reflector Antennas for Broadcasting satellites. IEEE Transactions on Antennas and Propagation Vol. 40 No.2 February 1992:178-187.
- [3] S.-L. Chen and H.-R. Chuang. Comparison of the Design of a Contoured-Beam and Elliptical-Beam Satellite Offset Reflector Antennas to Cover the Taiwan Island Region for Satellite Communications. IEEE Transactions on Broadcasting Vol. 43 No. 2 June 1997: 117-126.
- [4] J. R. Bergmann, F. L. Teixeira and F. J. S. Moreira. Diffraction Synthesis of Reflector Antennas: An Efficient Approach for the Optimization Procedure. Antennas and Propagation Society International Symposium Vol 1 1993: 266-269.
- [5] Dah-Wei Duan and Yahya Rahmat-Samii. A Generalized Diffraction Synthesis Technique for High Performance Reflector Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation Vol. 43 No.1 January 1995: 27-40.
- [6] J. R. Bergmann and F. J.V. Hasselmann. A Reflector Antenna Synthesis for Proposed Brasilsat B3 South American Coverage at C and Ku Bands. Microwave and Optoelectronics Conference SBMO/IEEE MTT-S International Vol. 2 1997 : 577-581.
- [7] Westcott, B. S. Shaped Reflector Antenna Design. Research Studies Press, 1993.
- [8] J. R. Bergmann and Flavio J.V. Hasselmann. A Comparison Between Techniques for Global Surface Interpolation in Shaped Reflector Analysis. IEEE Transactions on Antennas and Propagation Vol. 42 No. 1 January 1994: 47-53.
- [9] Balanis, C. A. Antenna Theory Analysis and Design. John Wiley & Sons , 1982 .

- [10] Arie Michaeli. Elimination of Infinities in Equivalent Edge Currents, Part 1 : fringe Current Components IEEE Transactions on Antennas and Propagation Vol. AP-34 No. 7 July 1986 : 912-918.
- [11] Roddy, D. Satellite Communications. McGraw-Hill 1996.
- [12] Scott, C. Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design. Artech House,1990.
- [13] ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. คณิตศาสตร์วิศวกรรม. (ม. ป. ท., ม. ป. ป.).
- [14] ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข. การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดงานสะท้อนเตี้ยรูปพาราโบลา. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [15] อนล ศาสตร์. ย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2540.
- [16] Brown, R.C. Fourier Analysis in Reflector Antenna Synthesis. (n.p. , n.d.).
- [17] Ludwig, A.C. The definition of cross polarization. IEEE Transactions on Antennas and Propagation AP-21 January 1973: 116-119.
- [18] Stephen G. Nash and Ariela Sofer. Linear and Nonlinear Programing .McGraw-Hill,1996.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ระเบียบวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ

ระเบียบวิธีทัศนศาสตร์กายภาพเมื่อนำมาใช้วิเคราะห์ระบบสายอากาศงานสะท้อนสามารถพิจารณาจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่เคลื่อนที่มาตกกระทบกับพื้นผิวงานสะท้อนซึ่งเป็นพื้นผิวดำนำสมบูรณ์ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสทัศนศาสตร์กายภาพบนพื้นผิวงานสะท้อนที่ตำแหน่ง r' มีค่าเป็นดังสมการ (ก.1)

$$\vec{J} = 2\hat{n} \times \vec{H}^i \quad (ก.1)$$

เมื่อ \hat{n} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากและมีทิศพุ่งออกจากพื้นผิวงานสะท้อน และ \vec{H}^i คือ สนามแม่เหล็กที่ตกกระทบ สนามไฟฟ้าที่จุดสังเกต r เกิดจากการกระจายของแหล่งกระแสเหนี่ยวนำสามารถเขียนได้เป็น [12]

$$\vec{E}(r) = -j\omega\mu\vec{A}(r) + \frac{1}{j\omega\epsilon}\nabla[\nabla \cdot \vec{A}(r)] \quad (ก.2)$$

โดย
$$\vec{A}(r) = \iint_{S'} \vec{J}(r')G(\vec{r} | \vec{r}')ds' \quad (ก.3)$$

และ
$$G(\vec{r} | \vec{r}') = \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \quad (ก.4)$$

$\vec{A}(r)$ คือศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้า $G(\vec{r} | \vec{r}')$ คือฟังก์ชันกรีน ซึ่งหาได้จากผลเฉลยของสมการคลื่น (ก.5)

$$(\nabla^2 + k^2)G(r | r') = -\delta(r - r') \quad (ก.5)$$

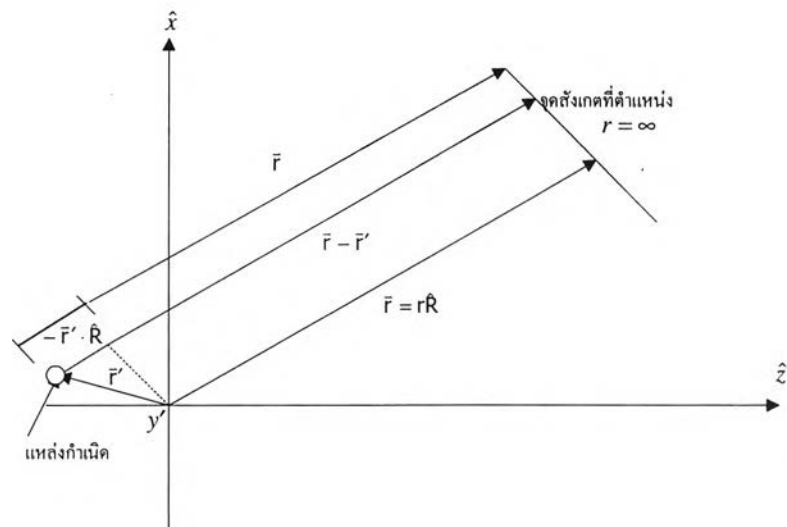
จากสมการ (ก. 2) สามารถหาสนามไฟฟ้าในรูปแบบของแหล่งกระแสเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$\vec{E}(r) = -jkZ_0 \left(1 + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \cdot \right) \cdot \iint_{S'} \vec{J}(r')G(\vec{r} | \vec{r}')ds' \quad (ก.6)$$

โดยที่ k คือเลขคลื่น Z_0 คืออิมพีแดนซ์ของอวกาศว่าง

ค่า I คือ ไดออดิกหนึ่งหน่วย (เมทริกซ์เอกลักษ์ณ์) และพจน์ $\nabla\nabla$ คือไดออดิกจากสมการ (ก.7) พจน์ $\nabla\nabla$ ตามด้วยผลคูณสเกลลาร์ ของเวกเตอร์หมายถึงการหาอนุพันธ์ของไดเวอร์เจนซ์ของฟังก์ชัน ในย่านสนามไกลสามารถประมาณฟังก์ชันกรีนได้ดังรูป ก.1 ดังนี้

$$\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \approx \frac{e^{-jk\vec{r}}}{4\pi\vec{r}} e^{jk\vec{r}'\cdot\vec{R}} \quad (\text{ก.8})$$



รูป ก.1 การประมาณค่ารังสีขนานในย่านสนามไกล (แหล่งกำเนิดและจุดสังเกตอยู่ในระนาบ x-z)

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของจุดสังเกตสามารถเขียนในพจน์ของระบบพิกัดทรงกลมได้เป็น

$$\hat{R} = \hat{x} \sin \theta \cos \phi + \hat{y} \sin \theta \sin \phi + \hat{z} \cos \theta \quad (\text{ก.9})$$

จากสมการ 2.12 จะได้

$$\vec{E}(\vec{r}) = -jkZ_0 \left(I + \frac{1}{k^2} \nabla\nabla \right) \cdot \iiint_{S'} J(\vec{r}') \frac{e^{-jk\vec{r}}}{4\pi} e^{jk\vec{r}'\cdot\vec{R}} ds' \quad (\text{ก.10})$$

และจาก

$$\nabla \cdot \left[J(r') \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\hat{r}' \cdot \hat{R}} \right] = J(r') \cdot \nabla \left[\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\hat{r}' \cdot \hat{R}} \right] \quad (\text{ก.11})$$

สมการ (ก.11) ได้จากการใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์

$$\nabla \cdot (\psi \mathbf{a}) = \mathbf{a} \cdot \nabla \psi \quad (\text{ก.12})$$

โดยที่ \mathbf{a} เป็นค่าคงที่ เนื่องจากแหล่งกระแสสมมูล $J(r')$ มีค่าคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบพิกัดของจุดสังเกตจึงสามารถใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์ได้ ในระบบพิกัดทรงกลม

$$\nabla = \hat{r} \frac{\partial}{\partial r} + \hat{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \hat{\phi} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \quad (\text{ก.13})$$

จากสมการ (ก.11) หาอนุพันธ์ในแนวแกน r จะได้

$$\frac{1}{4\pi} \left[\frac{-jkr e^{-jkr} - e^{-jkr}}{r^2} \right] e^{jk\hat{r}' \cdot \hat{R}} \quad (\text{ก.14})$$

พิจารณาพจน์ แรกของสมการ ก.14 จะได้

$$-jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\hat{r}' \cdot \hat{R}} \quad (\text{ก.15})$$

จากสมการ (ก.14) และ (ก.15) ส่วนประกอบของอนุพันธ์ในทิศทาง (θ, ϕ) จะแปรเปลี่ยนตามระยะ r เช่นเดียวกับพจน์ $\frac{e^{-jkr}}{r^2}$

การแยกตัวประกอบของฟังก์ชันกรีน เป็นองค์ประกอบในแนว r และในแนว (θ, ϕ) ของฟังก์ชันกรีน ทำให้การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันกรีนในทิศทาง $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$ ไม่ขึ้นกับอนุพันธ์ที่เทียบกับ θ และ ϕ ดังนั้นในย่านสนามไกลจะได้

$$\nabla \left[\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} \right] \approx (-jk) \bar{R} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} \quad (\text{ก.16})$$

ดังนั้นเมื่อหาอนุพันธ์อันดับสองจากสมการ(ก.10) จะได้

$$\begin{aligned} \bar{J}(r') \cdot (-jk) \bar{R} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} &= [\bar{J}(r') \cdot \bar{R}] \left[-jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} \right] \\ &= f(r, \theta, \phi) \cdot g(r, \theta, \phi) \end{aligned} \quad (\text{ก.17})$$

$$\text{จาก} \quad \nabla(fg) = f\nabla g + g\nabla f \quad (\text{ก.18})$$

เมื่อหาค่าพจน์แยกของสมการ (ก.18) จาก (ก.16) จะได้

$$f\nabla g = [\bar{J}(r') \cdot \bar{R}] (-jk)^2 \bar{R} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} \quad (\text{ก.19})$$

จาก (ก.9) ฟังก์ชัน $F = \bar{J}(r') \cdot \bar{R} = J_r$ จะเป็นฟังก์ชันของ (θ, ϕ) เท่านั้น ดังนั้นในสมการ (ก.15) ส่วนประกอบ (θ, ϕ) ของ ∇f สามารถหาได้ และ

$$\nabla \left[\bar{J}(r') \cdot (-jk) \bar{R} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} \right] \approx \bar{R} [\bar{J}(r') \cdot \bar{R}] (-k^2) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} \quad (\text{ก.20})$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าจากสมการ (ก.10) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\bar{E}(r) = -jkZ_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - R\bar{R}) \cdot \iint_S \bar{J}(r') e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{R}} ds' \quad (\text{ก.21})$$

สนามไฟฟ้าจากวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$\bar{E}(\bar{r}) = -j\omega\mu \left(\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \right) \int_{S_a} [\bar{J}_s^{PO}(r') - (\hat{r} \cdot \bar{J}_s^{PO}(r')) \hat{r}] e^{jk\bar{r}' \cdot \bar{r}} ds' \quad (\text{ก.22})$$

โดย k คือเลขคลื่น s_a คือขนาดเงาของพื้นผิวงานสะท้อน \hat{r} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของจุดสังเกต และกระแสเหนี่ยวนำเชิงผิวทางกายภาพทำให้เกิดแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจะมีความถูกต้องของลากลื่นในช่วงพูประธานและพูข้างเคียงแรก ๆ เท่านั้น

กำลังคลื่นแม่พลังงานเทียบเท่าแบบไอโซทรอปิก (EIRP)

แหล่งกำเนิดแบบไอโซทรอปิกหมายถึงแหล่งกำเนิดที่ให้กำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากันทุกทิศทาง สมมติให้ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์ แสดงว่ากำลังคลื่นที่ป้อนให้กับระบบสายอากาศมีค่าเท่ากับกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานออกมาจากระบบสายอากาศ $P_T = P_n$ กำหนดให้แหล่งกำเนิดแบบไอโซทรอปิกอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของคลื่นทรงกลมที่มีรัศมี r ความหนาแน่นของกำลังงานคลื่นซึ่งเป็นค่ากำลังคลื่นที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางหน่วยคือ

$$\psi_i = \frac{P_T}{4\pi r^2} \tag{ข.1}$$

และอัตราขยายของสายอากาศคือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกำลังคลื่นในทิศทางที่มากที่สุดเทียบกับความหนาแน่นของกำลังคลื่นเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นแบบไอโซทรอปิกที่มีระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิด r เท่ากัน ดังนั้นจะได้อัตราขยายของสายอากาศเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกคือ

$$G = \frac{\psi_M}{\psi_i} \tag{ข.2}$$

จากสมการ (ข.1) และ (ข.2) ความหนาแน่นกำลังคลื่นที่มีค่ามากที่สุดโดยมีระยะทางห่างจากสายอากาศส่ง r และสายอากาศส่ง มีอัตราขยาย G มีค่าเป็น

$$\psi_M = \frac{GP_T}{4\pi r^2} \tag{ข.3}$$

ความหนาแน่นของกำลังคลื่น ψ_M เป็นความหนาแน่นกำลังคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของกำลังคลื่นเมื่อแหล่งกำเนิดเป็นแบบไอโซทรอปิกซึ่งมีความหนาแน่นของกำลังงานเท่ากันทุกทิศทาง ดังนั้นอัตราขยายของระบบสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก (G) คูณกับกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศส่ง P_T คือกำลังคลื่นแม่พลังงานเทียบเท่าแบบไอโซทรอปิกซึ่งเป็นกำลังคลื่นที่แผ่ออกจากสายอากาศ ที่เกิดจากกำลังส่งจริงของเครื่องส่งสัญญาณและอัตราขยายของระบบสายอากาศ (EIRP- Equivalent Isotropically Radiated Power) แสดงดังสมการ (ข.4)

$$EIRP = GP_T \quad (ข.4)$$

EIRP สามารถแสดงในหน่วยเดซิเบลเปรียบเทียบกับหนึ่งวัตต์ หรือ dBW กำหนดให้ P_T มีหน่วยเป็นวัตต์ ดังนั้น

$$[EIRP] = [P_T] + [G] \text{ dBW} \quad (ข.5)$$

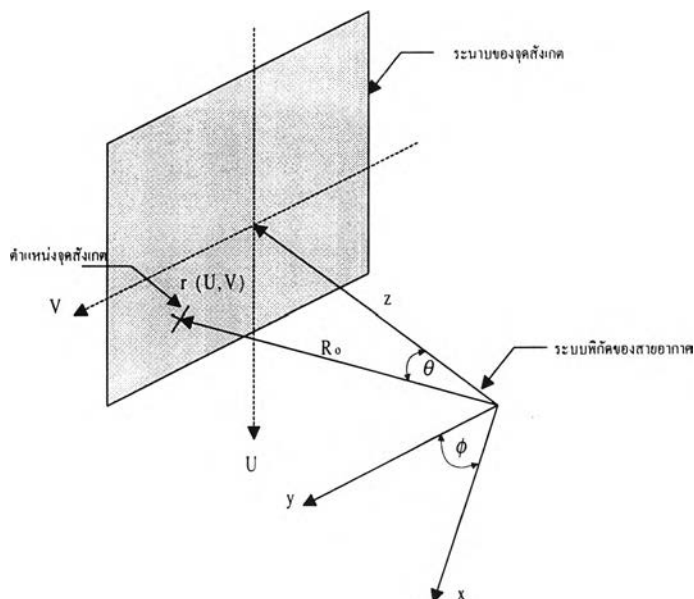
โดยที่ $[P_T]$ มีหน่วยเป็น dBW และ $[G]$ มีหน่วยเป็น dB

ระบบพิกัดของจุดสังเกต

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดจุดสังเกตในรูปแบบแบบจำลองวงรอบ ได้แก่ระบบพิกัด (U,V) ซึ่งเป็นระบบพิกัดที่สมมติขึ้นไม่ได้อ้างอิงกับระบบพิกัดดาวเทียม และระบบพิกัดละติจูดและลองจิจูดซึ่งเป็นค่าจากแผนที่ทางภูมิศาสตร์จริง ๆ โดยอ้างอิงกับระบบพิกัดดาวเทียม ระบบพิกัดทั้งสองแบบมีรายละเอียดดังนี้

ระบบพิกัด (U,V)

ระบบพิกัด (U,V) เป็นการมองพิกัดตำแหน่งของจุดสังเกตต่างๆ จากระบบสายอากาศงานสะท้อนโดยตรงซึ่งเป็นระบบพิกัดที่ใช้โดยทั่วไป โดยที่ตำแหน่งของจุดสังเกตไม่ขึ้นกับค่าละติจูดและลองจิจูดซึ่งค่าเหล่านี้จะใช้กับจุดสังเกตที่อ้างอิงกับตำแหน่งภูมิศาสตร์บนโลก ระบบพิกัด(U,V) แสดงดังรูป ค.1



รูป ค.1 ระบบพิกัดของงานสะท้อนสัมพันธ์กับจุดสังเกต

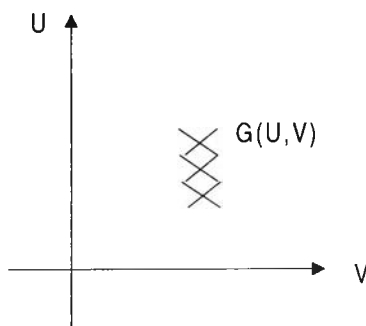
จากรูป ค.1 กำหนดระบบพิกัดของสายอากาศงานสะท้อน (x,y,z) จุดสังเกต r อยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของระบบพิกัดสายอากาศงานสะท้อนเป็นระยะทาง R_0 และทำมุม θ กับ แกน z ทำมุม ϕ กับแกน x ดังนั้นระบบ (x,y,z) สัมพันธ์กับ (r,θ,ϕ) ดังนี้

$$\begin{aligned}x &= R_0 \sin\theta \cos\phi \\y &= R_0 \sin\theta \sin\phi \\z &= R_0 \cos\theta\end{aligned}\tag{ค.1}$$

นำ R_0 หารตลอดสมการ (ค.1) และเนื่องจากแกน U มีทิศทางเดียวกับแกน x ของระบบสายอากาศ และแกน V มีทิศทางเดียวกับแกน y ของระบบสายอากาศจะได้

$$\begin{aligned}U &= \frac{x}{R_0} = \sin\theta \cos\phi \\V &= \frac{y}{R_0} = \sin\theta \sin\phi\end{aligned}\tag{ค.2}$$

ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการตามตำแหน่ง (U,V) ได้แก่ $G(U,V)$ คืออัตราขยายของระบบสายอากาศที่ต้องการตามตำแหน่ง (U,V) แสดงดังรูป ค.2 หลังจากกำหนดตำแหน่ง (U,V) แล้วสามารถหาตำแหน่งมุม (θ,ϕ) จากระบบสายอากาศงานสะท้อนโดยมีความสัมพันธ์กับระบบพิกัด (U,V) ดังนี้



รูป ค.2 การกำหนดอัตราขยายของระบบสายอากาศตามระบบพิกัด (U,V)

จากสมการ (ค.2) จะได้

$$\tan\phi = \frac{V}{U}\tag{ค.3}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V}{U} \quad (\text{ค.4})$$

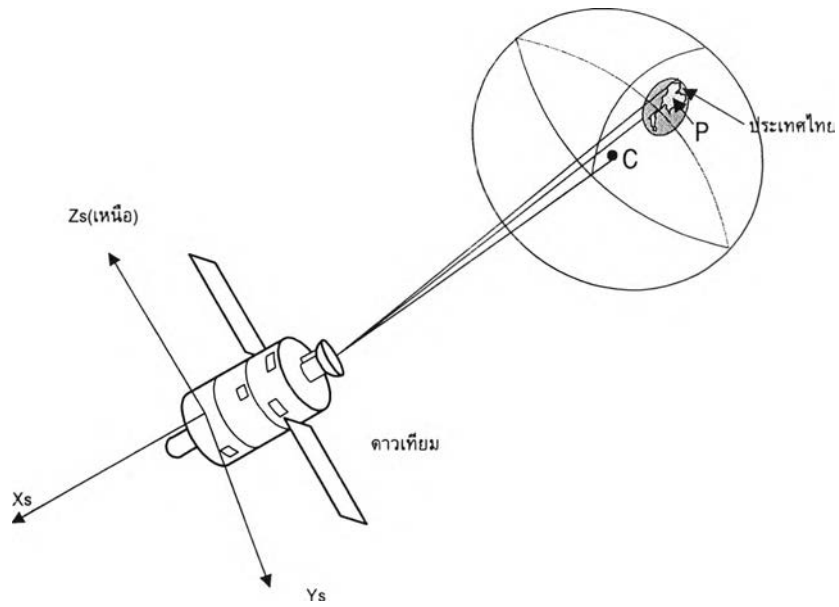
และ $\cos \theta = \sqrt{1 - (U^2 + V^2)}$ (ค.5)

$$\theta = \cos^{-1} \sqrt{1 - (U^2 + V^2)} \quad (\text{ค.6})$$

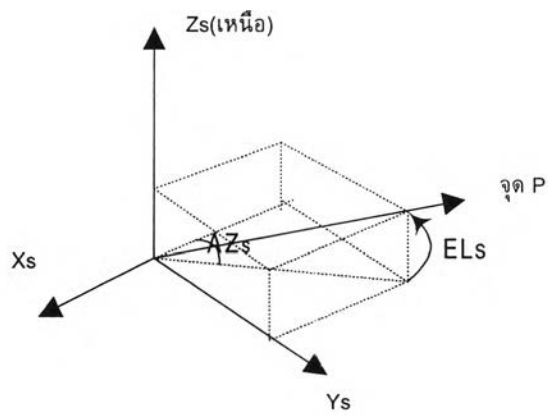
ระบบพิกัดละติจูดและลองจิจูด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดตำแหน่งของดาวเทียมที่วงโคจรค้างฟ้า ซึ่งเป็นวงโคจรที่ดาวเทียมปรากฏคงที่เมื่อเทียบกับโลก และเป็นที่ยอมรับใช้กันเนื่องจากระบบสายอากาศบนโลกสามารถเคลื่อนที่ตามตำแหน่งดาวเทียมได้อัตโนมัติไม่ต้องใช้ระบบติดตามดาวเทียม วงโคจรค้างฟ้าจะอยู่ที่ตำแหน่งระนาบศูนย์สูตรและต้องให้ดาวเทียมโคจรรอบโลกในทิศทางและความเร็วเดียวกับที่โลกเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วคงที่

ระบบพิกัดละติจูดและลองจิจูดใช้แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสำหรับครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการในรูปแบบลำคลื่นวงรอบ พิจารณาพื้นที่ที่ครอบคลุมซึ่งเป็นมุมมองจากระบบสายอากาศงานสะท้อนบนดาวเทียม ณ ตำแหน่งวงโคจรค้างฟ้า รูป ค.3 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นที่ครอบคลุมกับระบบพิกัดดาวเทียมในรูปแบบของมุมเงย (elevation angle) และมุมกวาด (azimuth angle) ระบบพิกัดดาวเทียมประกอบด้วยแกน x_s มีทิศชี้ออกจากจุดศูนย์กลางของโลก, แกน y_s และแกน z_s มีทิศชี้ไปทางทิศเหนือ โดยจุดสังเกต P ทำมุมเงยจากระนาบ $x_s y_s$ เป็น EL_s และทำมุม AZ_s กับแกน $-x_s$ ของระบบพิกัดดาวเทียม เส้นทางของวงโคจรดาวเทียมซึ่งเป็นวงโคจรค้างฟ้าจะเป็นวงกลมดังรูป ค.4 ระบบพิกัดดาวเทียม (x_s, y_s, z_s) มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดสายอากาศงานสะท้อน ค่ามุมเงยและมุมกวาดในระบบพิกัดดาวเทียมสามารถวิเคราะห์ได้จากลักษณะทางเรขาคณิตของโลก ตำแหน่งและพิกัดดาวเทียมจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

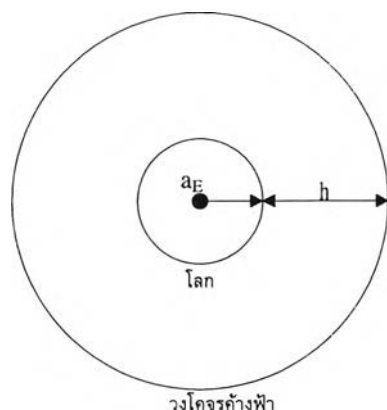


(ก) มุมมองจากระบบพิกัดดาวเทียมมายังจุดสังเกตบนโลก



(ข) การกำหนดมุมเงยและมุมกวาดของระบบดาวเทียม

รูป ค.3 จุดสังเกตบนโลกในระบบพิกัดดาวเทียมได้แก่มุมกวาดและมุมเงย



รูป ก:4 วงโคจรค้างฟ้าที่มีเส้นทางวงโคจรเป็นวงกลมและวางอยู่บนระนาบศูนย์สูตร โดยมีระยะสูง $h=35,786$ กิโลเมตรจากเส้นศูนย์สูตร

จากรูป ก.4 a_E คือรัศมีระนาบศูนย์สูตรของโลก และ h คือระยะสูงของวงโคจรจากเส้นศูนย์สูตร คาบของวงโคจรค้างฟ้า (P) มีค่า 23 ชั่วโมง 56 นาที จากกฎข้อที่ 3 ของเคปเลอร์ [11] โดยที่ μ คือค่าคงตัวสนามโน้มถ่วงศูนย์กลางโลก (earth's geocentric gravitational constant) มีค่าเป็น $3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ ดังนั้นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางโลกไปยังวงโคจรค้างฟ้า (a_{GSO}) มีค่า

$$a_{GSO} = \left(\frac{\mu P}{4\pi^2} \right)^{1/3}$$

$$= 42,164 \text{ กิโลเมตร}$$

ดังนั้นความสูงค้างฟ้ามีค่า

$$h_{GSO} = a_{GSO} - a_E$$

$$= 42,164 - 6378$$

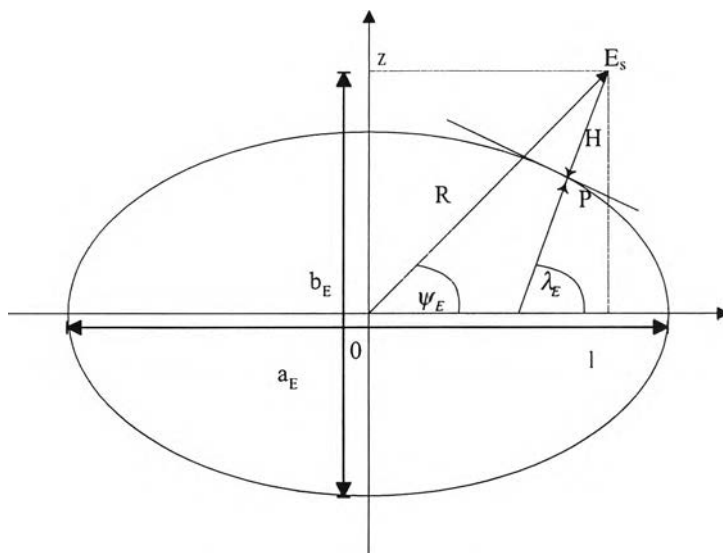
$$= 35786 \text{ กิโลเมตร}$$

ค่าความสูงค้างฟ้ามีค่าประมาณได้เท่ากับ 36,000 กิโลเมตร a_E คือความยาวแกนหลัก ระนาบหน้าตัดวงรีของโลกมีค่าเท่ากับ 6,378.1414 กิโลเมตร ดังแสดงในรูป ก.5 b_E คือความยาวแกนรองของระนาบวงรีโลกมีค่าเท่ากับ 6,356.755 กิโลเมตร ระดับความรีโลก (eccentricity of the earth) มีค่า $e_E = \frac{\sqrt{a_E^2 - b_E^2}}{a_E} = 0.08182$ ระนาบหน้าตัดวงรีโดยสมมติว่าผิวของวงรีคือระดับน้ำทะเล

ปานกลางประกอบด้วยจุดสถานีบนโลก E_s มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางโลกเป็นระยะ R ตำแหน่งสถานีบนโลกทำมุม ψ_E ระหว่างระยะทางจากจุดศูนย์กลางโลก R กับแกนหลักของระนาบวงรี เรียก มุม ψ_E ว่าละติจูดจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางโลก (geocentric latitude) และทำมุม λ_E ระหว่างแกนหลักของระนาบวงรีกับจุด P ซึ่งเป็นจุดที่ตั้งฉากระหว่างผิวโลกกับสถานีบนโลก เรียก มุม λ_E ว่าละติจูดที่พื้นผิวโลก (geodetic latitude) และระยะ H คือ ความสูงของสถานีบนโลกจากระดับน้ำทะเล ระยะ l และ z มีค่าเป็น [11]

$$l = \left(\frac{a_E}{\sqrt{1 - e_E^2 \sin^2(\lambda_E)}} + H \right) \cos(\lambda_E) \tag{ค.7}$$

$$z = \left(\frac{a_E(1 - e_E^2)}{\sqrt{1 - e_E^2 \sin^2(\lambda_E)}} + H \right) \sin(\lambda_E) \tag{ค.8}$$



รูป ค.5 ระนาบหน้าตัดวงรีของโลก

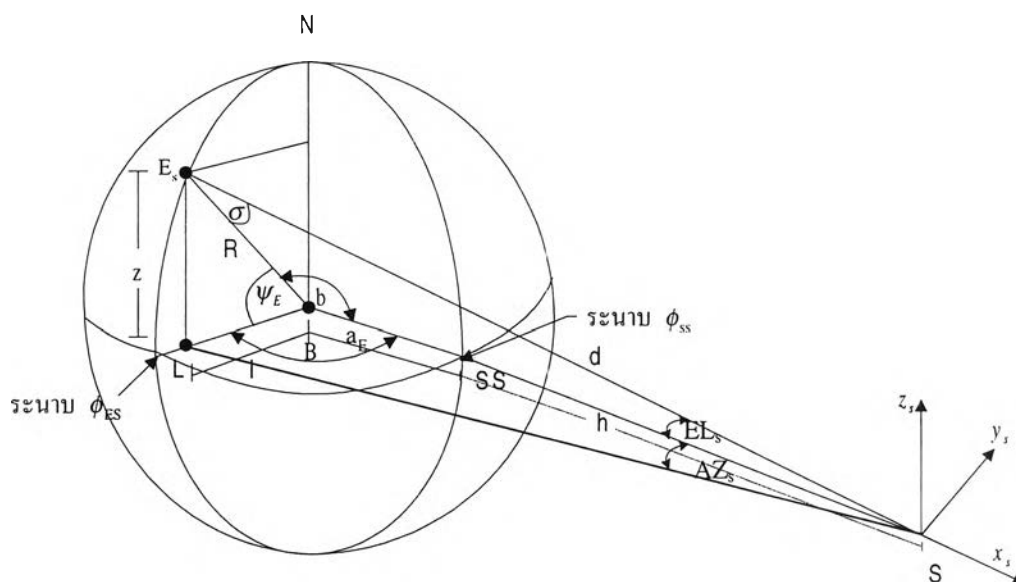
มุม ψ_E คือมุมที่ศูนย์กลางโลกกระทำกับตำแหน่งสถานีบนโลกมีค่าเป็น

$$\psi_E = \arctan \frac{z}{l} \tag{ค.9}$$

ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางโลก R ถึงสถานีบนโลกมีค่าเป็น

$$R = \sqrt{l^2 + z^2} \quad (\text{ค.10})$$

พิจารณามุมมองจากระบบพิกัดบนดาวเทียมมายังสถานีบนโลกในแบบมุมกวาดและมุมเงยตามรูป ค.3 นั้น สามารถแสดงรูปร่างของโลกในรูปเรขาคณิตดังรูป ค.6



รูป ค.6 รูปร่างของโลกโดยมองจากมุมมองของสายอากาศบนดาวเทียมค้างฟ้า

จากรูป ค.6 S เป็นตำแหน่งของดาวเทียมค้างฟ้าซึ่งอยู่บนวงโคจรค้างฟ้าในระนาบศูนย์สูตร ประกอบด้วยพิกัด $+x_s$ พุ่งออกจากจุดศูนย์กลางโลก $+y_s$ เป็นทิศไปทางทิศตะวันออก $+z_s$ มีทิศชี้ไปยังทิศเหนือ จุด SS (subsattellite point) คือจุดบนพื้นผิวโลกเมื่อมองจากดาวเทียมมายังจุดศูนย์กลางโลก h คือความสูงค้างฟ้ามีค่าประมาณ 36,000 กิโลเมตร a_E คือความยาวแกนหลักของระนาบวงรีโลกมีค่า 6,378.1414 กิโลเมตร d คือระยะห่างระหว่างดาวเทียมกับสถานีโลก เมื่อทราบตำแหน่งพิกัดของสถานีบนโลกและตำแหน่งลองจิจูดของดาวเทียมแล้ว มุมกวาดและมุมเงยของตำแหน่งสถานีบนโลกโดยมองจากระบบพิกัดดาวเทียมสามารถพิจารณาได้ดังนี้

มุม b ซึ่งเป็นมุมของระนาบสามเหลี่ยม O-ES-S พิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของระบบพิกัด (x,y,z) และชุดของเวกเตอร์ $\hat{U}, \hat{V}, \hat{W}$ โดย \hat{V} มีทิศจากจุด o ไปยังตำแหน่งพิกัดบนโลกและทำมุม ψ_E กับ \hat{W} มีทิศเดียวกับ $\hat{\phi}_{ES}$ และทำมุม B กับ \hat{U} \hat{U} มีทิศจากจุดศูนย์กลางโลกซึ่งไปยังตำแหน่งดาวเทียมค้างฟ้าซึ่งมีทิศทางเดียวกับ x_s ดังรูป ค.7 จะได้ความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{U} &= \cos \phi \hat{x} + \sin \phi \hat{y} \\ \hat{W} &= \cos \phi_1 \hat{x} + \sin \phi_1 \hat{y} \\ \hat{V} &= \sin(90 - \psi_E) \cos \phi_1 \hat{x} + \sin(90 - \psi_E) \sin \phi_1 \hat{y} + \cos(90 - \psi_E) \hat{z} \quad (\text{ค.11})\end{aligned}$$

ดังนั้นมุม b สามารถหาได้โดยการคูณแบบจุดระหว่าง \hat{V} กับ \hat{U} จะได้

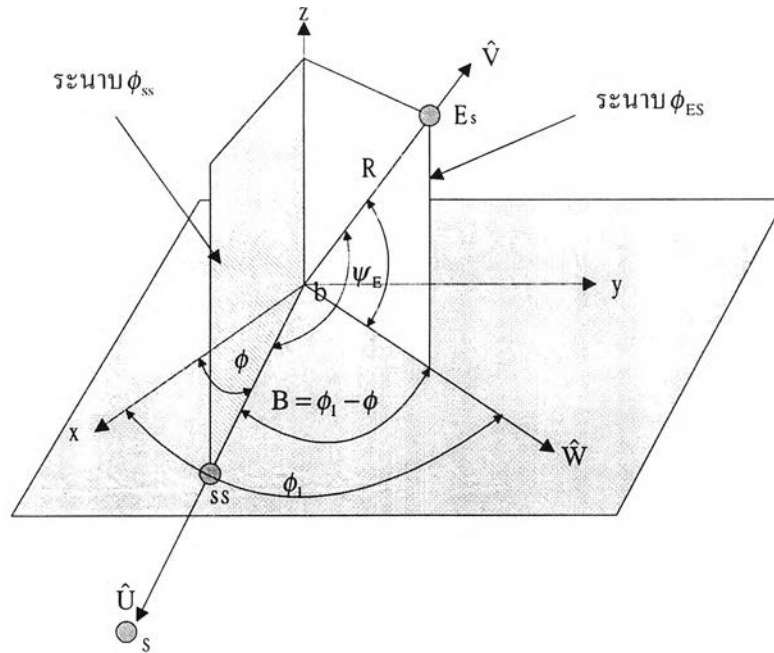
$$\begin{aligned}\cos b &= \hat{U} \cdot \hat{V} \\ &= \sin(90 - \psi_E) \cos \phi_1 \cos \phi + \sin(90 - \psi_E) \sin \phi_1 \sin \phi \\ &= \cos \psi_E [\cos \phi_1 \cos \phi + \sin \phi_1 \sin \phi] \\ &= \cos \psi_E \cos(\phi_1 - \phi) \quad (\text{ค.12})\end{aligned}$$

จากรูป ค.6 B คือมุมระหว่างระนาบที่มีผ่านสถานีโลก (ϕ_E) และระนาบที่ผ่านจุด $SS(\phi_{SS})$ มีค่าดังนี้

$$B = \phi_E - \phi_{SS} \quad (\text{ค.13})$$

จะได้

$$\cos b = \cos B \cos \psi_E \quad (\text{ค.14})$$

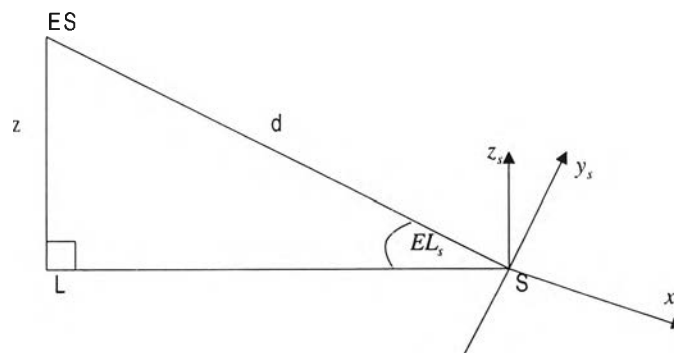


รูป ค.7 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดฉาก(x,y,z) และชุดของเวกเตอร์ $\hat{U}, \hat{V}, \hat{W}$

จากรูป ค.6 อาศัยกฎของโคไซน์จะได้ระยะทางระหว่างสถานีโลกกับดาวเทียมค้างฟ้า (d)
เป็นดังสมการ (ค.15)

$$d = \sqrt{R^2 + a^2_{GSO} - 2Ra_{GSO} \cos b} \tag{ค.15}$$

มุมเงยพิจารณาได้จากระนาบสามเหลี่ยม ES-L-S ซึ่งมีระยะระหว่าง ES กับ L เท่ากับ z และมี
ระยะห่างระหว่างสถานีโลกกับดาวเทียม d ดังรูป ค.8

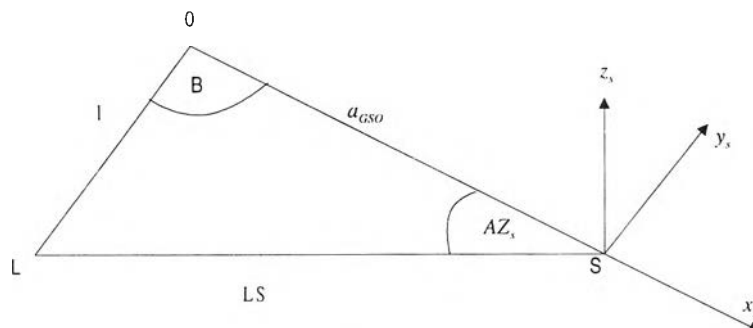


รูป ค.8 ระนาบสามเหลี่ยม ES-L-S

ดังนั้นมุมเงย EL_s มีค่าเท่ากับ

$$EL_s = \sin^{-1} \frac{z}{d} \quad (\text{ค.16})$$

มุมกวาดพิจารณาจากระนาบสามเหลี่ยม L-O-S ดังรูป 2.14



รูป ค.9 ระนาบสามเหลี่ยม L-O-S

จากกฎของโคไซน์ จะได้มุมกวาดมีค่าเท่ากับ

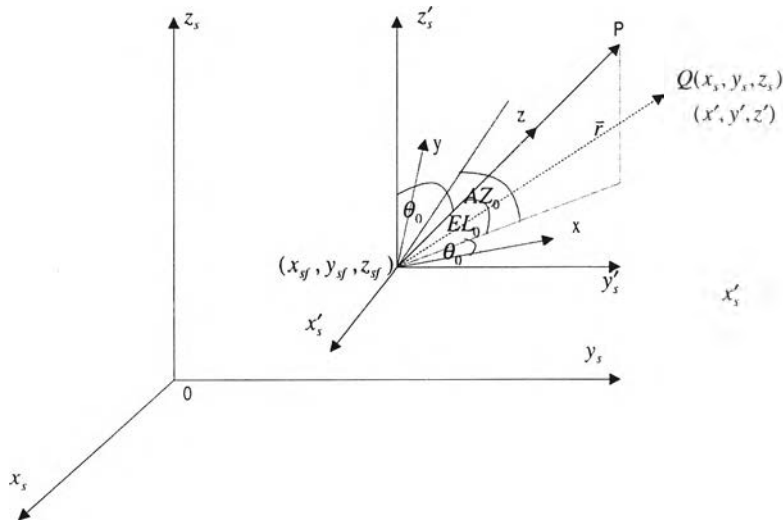
$$AZ_s = \tan^{-1} \left(\frac{l \sin(|B|)}{a_{GSO} - l \cot(|B|) \sin(|B|)} \right) \quad (\text{ค.17})$$

เมื่อทราบตำแหน่งพิกัดของจุดสังเกตในรูปแบบพิกัดละติจูดและลองจิจูดแล้ว พิจารณาสมการ (ค.16) และ (ค.17) จะได้มุมกวาดและมุมยกของจุดสังเกตเมื่ออ้างอิงกับระบบพิกัดดาวเทียม (x_s, y_s, z_s) โดยตำแหน่งพิกัด x_s, y_s, z_s ของระบบดาวเทียมมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} x_s &= d \cos EL_s \cos(\pi + AZ_s) \\ y_s &= d \cos EL_s \sin(\pi + AZ_s) \\ z_s &= d \sin EL_s \end{aligned} \quad (\text{ค.18})$$

ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดดาวเทียม (x_s, y_s, z_s) และระบบพิกัดพิกัดสายอากาศ (x, y, z) พิจารณาโดยกำหนดให้มุมเงยของสายอากาศซึ่งไปยังตำแหน่งบนโลกที่ละติจูดและลองจิจูดที่ต้องการ(P) แล้ววิเคราะห์จากสมการ ค.16 และ ค.17 เพื่อหาค่ามุมเงยของสายอากาศในรูปแบบมุมกวาด (AZ_0) และมุมยกของสายอากาศ (EL_0) โดยอ้างอิงกับระบบพิกัดดาวเทียมดังรูปค.10 ระบบ

พิกัดของสายอากาศ (x,y,z) เกิดจากการย้ายระบบพิกัดดาวเทียม (x_s,y_s,z_s) ไปอยู่ที่ตำแหน่ง (x'_s,y'_s,z'_s) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดดาวเทียมดังสมการ(ค.19)



รูป ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดของระบบสายอากาศงานสะท้อน (x,y,z) กับระบบพิกัดดาวเทียม (x_s,y_s,z_s)

$$\begin{bmatrix} x'_s \\ y'_s \\ z'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s - x_{sf} \\ y_s - y_{sf} \\ z_s - z_{sf} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.19})$$

ระยะพิกัด (x,y,z) เกิดจากการหมุนแกน z'_s รอบแกน y_s เป็นมุม θ_0 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และหมุนแกน x'_s รอบแกน z เป็นมุม ϕ_0 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา จากรูป ค.10 จะได้ว่า

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} - EL_0 \quad (\text{ค.20})$$

$$\phi_0 = \pi - AZ_0 \quad (\text{ค.21})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดสายอากาศ (x,y,z) และระบบพิกัดดาวเทียม (x_s,y_s,z_s) สามารถพิจารณาจากเวกเตอร์บอกตำแหน่ง \vec{r} ที่จุด Q ใดๆ ของระบบพิกัดทั้งสองดังสมการ (ค.22)

$$\vec{r} = x'_s \vec{a}_{x'_s} + y'_s \vec{a}_{y'_s} + z'_s \vec{a}_{z'_s} = x \vec{a}_x + y \vec{a}_y + z \vec{a}_z \quad (\text{ค.22})$$

กระจายเวกเตอร์ \vec{r} ในระบบพิกัดดาวเทียม (x'_s, y'_s, z'_s) ให้อยู่ในแนวแกนแต่ละองค์ประกอบของระบบพิกัดสายอากาศ (x, y, z) เขียนเป็นรูปเมตริกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_0 \cos AZ_0 & \cos \theta_0 \sin AZ_0 & -\sin \theta_0 \\ -\sin AZ_0 & -\cos AZ_0 & 0 \\ -\sin \theta_0 \cos AZ_0 & \sin \theta_0 \sin AZ_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s - x_{sf} \\ y_s - y_{sf} \\ z_s - z_{sf} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.23})$$

จากสมการ (ค.23) จะได้ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดสายอากาศ (x, y, z) ซึ่งเป็นระบบพิกัดคาร์ทีเซียนมีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดทรงกลม (r, θ, ϕ) ดังนี้

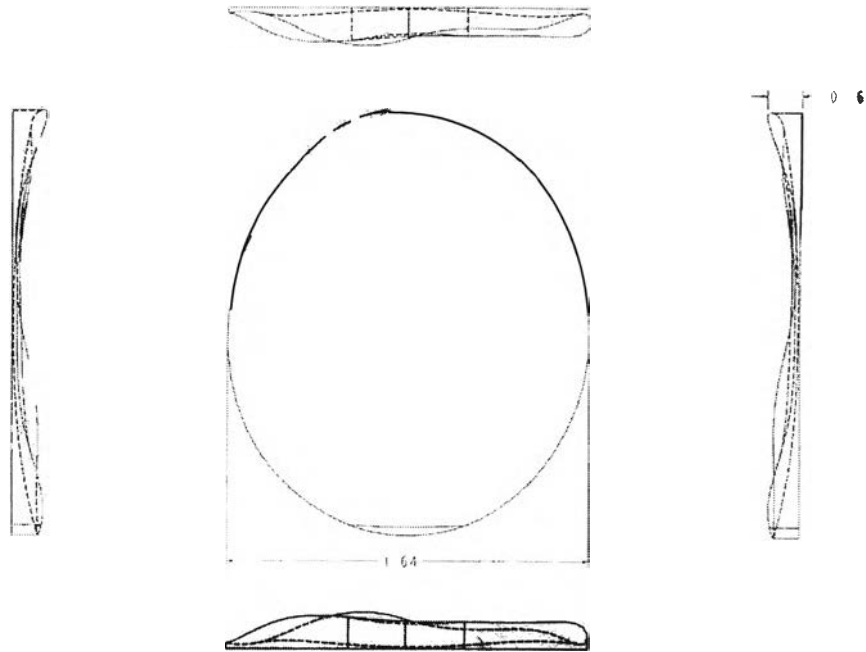
$$\phi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (\text{ค.24})$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (\text{ค.25})$$

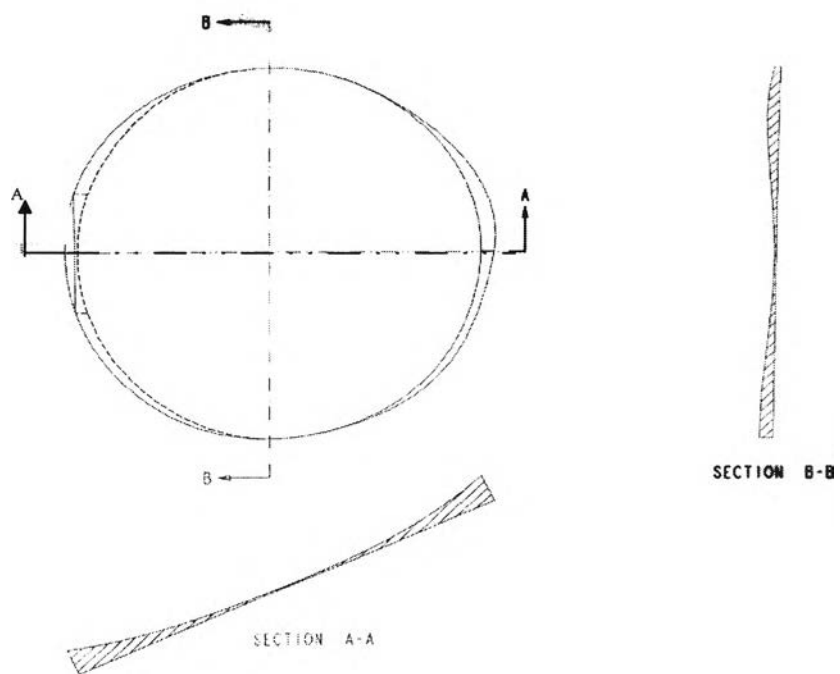
(θ, ϕ) ที่ได้จากสมการ ค.24 และ ค.25 คือมุมที่อ้างอิงจากตำแหน่งพิกัดบนโลกกับระบบพิกัดสายอากาศ และมุมกวาดกับมุมเงยจากสมการ ค.16 และ ค.17 ยังสามารถนำไปใช้เป็นระบบพิกัดมุมกวาด มุมเงย ได้เช่นเดียวกับระบบพิกัดละติจูดและลองจิจูด

ภาคผนวก ง

แบบร่างรูปสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวคักรูป



รูป ง.1 มุมมองด้านข้างสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวคักรูป



รูป ง.2 ภาพตัดขวางตามแนวแกนสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวคักรูป

ขั้นตอนการหาคำตอบของกรรวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไข

ในโปรแกรม Matlab มีชุดเครื่องมือสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุด ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดประเภทต่างๆ ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของประเภทงาน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้กรรวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไข ซึ่งมีรายละเอียดของสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขดังนี้ กำหนดให้สมการวัตถุประสงค์เป็น $f(X)$ และกำหนดให้สมการเงื่อนไขเป็น $G(X)$ โดย X คือตัวแปรที่ทำให้สมการวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด และ X ต้องสอดคล้องกับสมการเงื่อนไข $G(x)$ โดยกำหนดให้ $G(X)$ ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ดังนั้นในการคำนวณหาคำตอบของตัวแปร X สามารถใช้ชุดคำสั่งในโปรแกรม Matlab โดยมีรูปแบบของชุดคำสั่งเป็น

$$x = \text{constr}('f', X0, \text{options}) \quad (\text{จ.1})$$

X คือคำตอบที่ได้จากกรรวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด $X0$ คือคำตอบแรกเริ่มที่กำหนดลงไปเพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ f คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นที่ต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด options คือรายละเอียดต่างๆ ที่ผู้ใช้งานสามารถกำหนดได้ รายละเอียดเหล่านั้นได้แก่

1. $\text{options}(1)$ ใช้สำหรับควบคุมการแสดงผล ถ้ากำหนดให้มีค่าเป็น 1 จะทำให้เมื่ออยู่ในระหว่างการคำนวณหาคำตอบจะแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการคำนวณทุกรอบของการคำนวณ
2. $\text{options}(2)$ ใช้สำหรับควบคุมความถูกต้องของตัวแปร X ซึ่งเป็นคำตอบที่ได้จากกรรวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด
3. $\text{options}(3)$ ใช้สำหรับควบคุมความถูกต้องของคำตอบที่นำไปใช้คำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (f)
4. $\text{options}(4)$ ใช้สำหรับควบคุมความถูกต้องของฟังก์ชันเงื่อนไข (G)

ในกรณีถ้าผู้ใช้งานไม่ได้กำหนดค่าของชุดคำสั่ง options โปรแกรม Matlab จะกำหนดค่าต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมาให้เอง ดังนั้นเมื่อนำกรรวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดไปพิจารณาร่วมกับงานวิจัยนี้ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือผลรวมของผลต่างของอัตราขยายที่ต้องการกับอัตราขยายที่คำนวณได้ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการทำให้น้อยที่สุดแสดงดังสมการ (2.2) ตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดคือสัมประสิทธิ์ของสมการพื้นผิวงานสะท้อนของสมการ (2.1) ฟังก์ชันเงื่อนไขคือความลึกของพื้นผิว

งานสะท้อนตามแนวแกน z ของสายอากาศ ซึ่งกำหนดเป็นผลต่างของขนาดพิกัดตำแหน่งของสายอากาศงานสะท้อน (z_{\max}) กับพิกัดของตำแหน่งของสายอากาศงานสะท้อนที่น้อยที่สุด (z_{\min}) จะได้ฟังก์ชันเงื่อนไขเป็นคังสมการ(จ.2) โดยกำหนดให้มีขนาดน้อยกว่า 2 เมตร สาเหตุที่ต้องกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเนื่องจากต้องการให้ความลึกของสายอากาศมีขนาดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

$$G(x) = |z_{\max} - z_{\min}| \quad (จ.2)$$

การหาค่าเหมาะสมที่สุดเริ่มจากการกำหนดจุดสังเกตลงบนพื้นที่ครอบคลุม และกำหนดให้มีอัตราขยายตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจะเลือกปัจจัยต่างๆของระบบสายอากาศงานสะท้อน แล้วนำปัจจัยต่างๆเหล่านี้ไปคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยกำหนดให้เป็นพื้นผิวพาราโบลา เพื่อพิจารณาว่าอัตราขยายที่คำนวณได้จะสอดคล้องกับอัตราขยายที่ต้องการหรือไม่ ถ้าอัตราขยายที่คำนวณได้ไม่สอดคล้องกับอัตราขยายที่ต้องการจะต้องเปลี่ยนค่าปัจจัยของระบบสายอากาศใหม่ แล้วคำนวณจนกว่าจะได้อัตราขยายที่ต้องการ การทดสอบที่ได้กล่าวมานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการเลือกปัจจัยของระบบสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อน เมื่อได้ค่าปัจจัยของระบบสายอากาศที่ต้องการแล้วจะเริ่มสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อน โดยกำหนดให้พื้นผิวแรกเริ่มเป็นพาราโบลา ซึ่งสามารถกำหนดจากสมการพื้นผิว (2.1) โดยกำหนดให้ $a_2 = \frac{1}{4f}$, $a_5 = \frac{1}{4f}$, $c_{11} = -f$ โดย f คือระยะโฟกัสของสายอากาศงานสะท้อนพาราโบลา ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ตัวอื่นๆเป็น 0 แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ไปใช้เป็นค่าตอบแรกเริ่มของกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแล้วจึงคำนวณหาค่าตอบเมื่อได้คำตอบที่ต้องการแล้วจะได้สมการพื้นผิวงานสะท้อนที่ต้องการ

คำตอบที่คำนวณได้อาจจะทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุดหรือไม่ก็ได้ เนื่องจากการคำนวณตามกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้น อาจพบคำตอบตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

เมื่อพิจารณารูปแบบสมการวัตถุประสงค์และฟังก์ชันเงื่อนไขจะเห็นว่าเป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดชนิดไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อน โดยในโปรแกรม Matlab ได้เลือกใช้กรรมวิธี SQP (Sequential Quadratic Programming) [18] ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปเนื่องจากการลู่ออกของคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ต้องการ กรรมวิธี SQP มีขั้นตอนหลักๆดังนี้ ขึ้น

แรกคือการปรับปรุงค่าเมตริกซ์เฮสเซียน(Hessian Metrix)ทุกๆรอบของการคำนวณหาคำตอบโดยใช้วิธี BFGS(Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno) เมตริกซ์เฮสเซียนที่ได้ปรับปรุงแล้วจะนำไปใช้ในขั้นที่สองคือ กรรมวิธี QP (Quadratic Programming Solution) ซึ่งมีหลักการคือ จะนำเมตริกซ์เฮสเซียนนี้มาปรับปรุงค่าแล้วไปใช้ในการคำนวณในสมการควอดราติกเพื่อคำนวณตัวแปรทิศทางค้นหา(search direction) และขั้นตอนที่สามคือ การคำนวณค่าความยาวขั้น(step length) โดยความยาวขั้นที่คำนวณได้จะต้องทำให้ฟังก์ชันคุณสมบัติ (merit function) มีค่าต่ำที่สุด หลังจากนั้นตัวแปรทิศทางค้นหาที่ได้จากขั้นที่สองและความยาวขั้นที่ได้จากขั้นที่สาม จะนำมาใช้ในการหาค่าตัวแปรที่ต้องการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะกว่าจะได้คำตอบที่ต้องการ

ประวัติผู้เขียน

นาย วิชาส วงศ์แจ่มบุญ เกิดวันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2518 ที่เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีการศึกษา 2539 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาคณิตแม่เหล็กไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540

