

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นด้วยวิธีเชิงรังสี

แบบจำลองที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นแบบจำลองเชิงรังสีที่ใช้ระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตอธิบายการสะท้อนและการส่งผ่านพลังงานของคลื่นที่เดินทางจากสายอากาศส่งที่อยู่ที่ตั้งฐานไปยังสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณการแพร่กระจายคลื่น และใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของคลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบและยอดของดึกที่กีดขวางอยู่ในบริเวณการแพร่กระจายคลื่น โดยแบบจำลองที่เสนอเป็นแบบจำลองตามมิติที่พิจารณาด้วยวิธีกึ่งตามมิติ ในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นมีการจำลองลักษณะของสิ่งกีดขวางในระบบและกำหนดค่าปัจจัยต่างๆ ของระบบสถานีฐาน โดยการจำลองสิ่งกีดขวางในระบบเป็นการจำลองแบบประมาทและละเลยสิ่งกีดขวางบางอย่างที่คาดว่าสามารถสร้างฟังก์ชันชดเชยการลดทอนจากการเปรียบเทียบกับผลการวัดได้ เพื่อลดขั้นตอนการคำนวณและเพื่อให้สอดคล้องกับการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งานจริง ในบทนี้จะกล่าวถึงฐานข้อมูลของสิ่งกีดขวางในระบบและฐานข้อมูลของสายอากาศที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงาน จากนั้นจะเป็นส่วนแสดงรายละเอียดของระเบียบวิธีการติดตามทางเดินรังสีที่ใช้ในแบบจำลองเชิงรังสีที่สร้างขึ้น

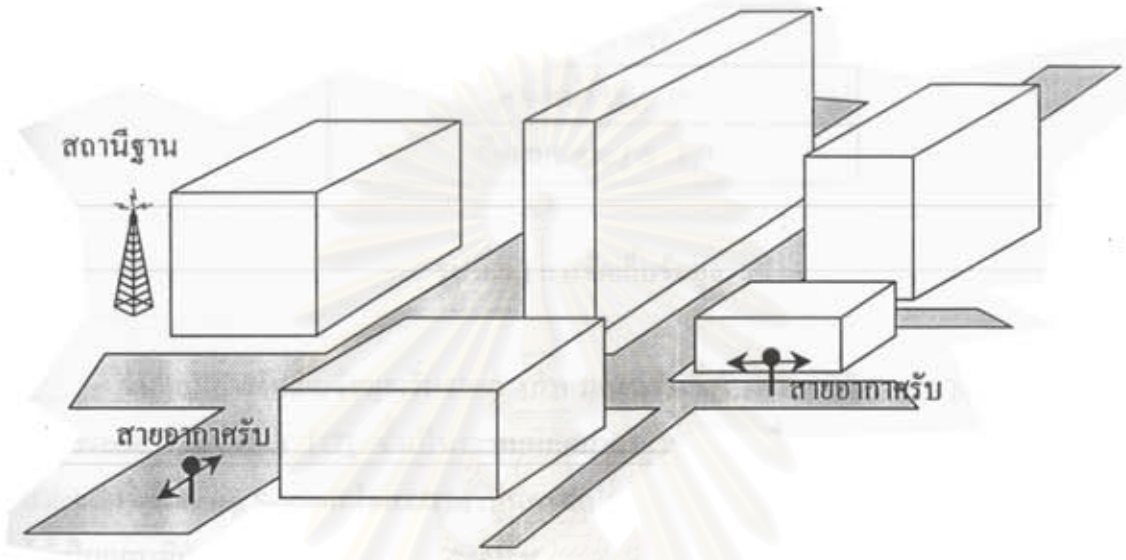
การจำลองสิ่งกีดขวางในระบบ

สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในเขตเมืองโดยทั่วไปอาจจำแนกประเภทของสิ่งกีดขวางในระบบได้ดังนี้

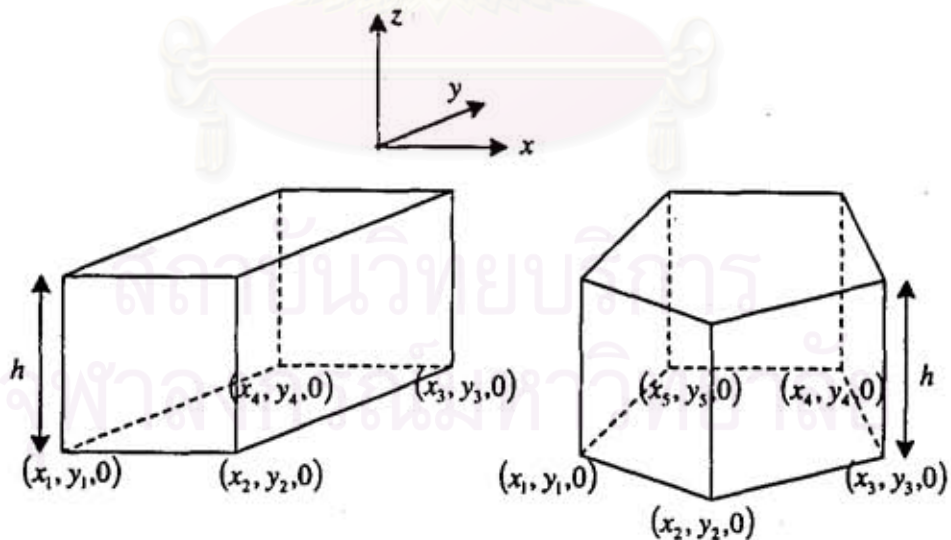
1. ดึกสูง อาคารที่อยู่อาศัย
2. ป้ายชื่อร้านค้า กันสาด
3. เสาไฟฟ้า เสาโทรศัพท์
4. ต้นไม้ข้างถนนและเกาะกลางถนน
5. สะพานลอย ทางยกระดับ
6. รถบนถนนทั้งที่เคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่

อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจเฉพาะสิ่งกีดขวางที่เป็นดึกเท่านั้น เนื่องจากเป็นสิ่งกีดขวางส่วนใหญ่ของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมืองและสิ่งกีดขวางอื่นๆ ที่ละเลยมีขนาดเล็ก

เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นช่วง UHF และเพื่อความง่ายต่อการพิจารณาทางคณิตศาสตร์ วิทยานิพนธ์นี้จึงประมาณสิ่งกีดขวางเป็นรูปทรงเรขาคณิตหลายเหลี่ยมผิวเรียบง่ายๆ ที่วางอยู่บนพื้นผิวราบ เช่น รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปทรงที่ประกอบจากทรงสี่เหลี่ยมหลายรูปและมีค่าคุณลักษณะคอบสนองทางไฟฟ้า ( $\sigma$  และ  $\epsilon_r$ ) สม่ำเสมอตลอดพื้นผิว ซึ่งค่าของ  $\sigma$  และ  $\epsilon_r$  ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นพื้นผิวซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 การวางตัวของสิ่งกีดขวางระหว่างสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่



รูปที่ 3.2 ลักษณะการประมาณอาคารเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมและการกำหนดพิกัด

การจัดเก็บฐานข้อมูลส่วนที่เป็นอาคารนี้จัดเก็บในรูปของข้อมูลเชิงเวกเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 3.3 โดยองค์ประกอบแสดงตำแหน่งจัดเก็บในรูปของพิกัดฉากของมุมพื้นฐานของอาคารดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนองค์ประกอบข้อมูลเฉพาะหมายถึงข้อมูลที่ระบุคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามชนิดของวัสดุที่เป็นพื้นผิวโดยแสดงในรูปของค่า  $\sigma$  และ  $\epsilon_r$

หมายเลขประจำอาคารหรือสิ่งกีดขวาง (ID)
ความสูง ( $m$ )
ตำแหน่ง ( $x_i, y_i, 0$ )
ข้อมูลเฉพาะ ( $\sigma, \epsilon_r$ )

รูปที่ 3.3 การจัดเก็บข้อมูล

ขั้นตอนการจัดเก็บข้อมูลเริ่มจากการกำหนดจุดอ้างอิงในระบบพิกัด UTM (Universal Transverse Mercator) [17] ซึ่งเป็นระบบพิกัดมาตรฐานอย่างหนึ่งของระบบบอกตำแหน่ง GPS (Global Positioning System) โดย UTM เป็นการแปลงแกนพิกัดละติจูด/ลองจิจูดบนผิวโค้งของโลกให้เป็นแกนพิกัดเส้นตัดฉากบนผิวราบมีหน่วยเป็นเมตร ซึ่งจะทำได้พิกัดที่คล้ายกับระบบพิกัดฉาก ( $x, y$ ) ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน โดยการกำหนดพิกัดใช้ GPS เป็นตัวกำหนดพิกัด และเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของ GPS พลเรือนซึ่งอาจมากถึง 10-50 เมตร จึงต้องปรับเทียบพิกัดและระยะทางกับแผนที่ที่มีความน่าเชื่อถือและใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงต่อไป ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แผนที่อัตราส่วน 1:4000 ที่จัดทำโดยความร่วมมือระหว่างรัฐบาลไทยกับรัฐบาลญี่ปุ่น (JICA) เมื่อปี 2531 ร่วมกับแผนที่ที่ใช้ในระบบจัดเก็บข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายคลื่นจริงของบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส (มหาชน) จำกัด

#### การพิจารณาลักษณะสมบัติของสายอากาศ

ลักษณะสมบัติของสายอากาศจะเป็นสิ่งกำหนดลักษณะการแพร่กระจายคลื่นซึ่งประกอบไปด้วย อัตราขยายของสายอากาศ และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ รวมถึงโพลาไรเซชันของสายอากาศ ในการพิจารณาลักษณะคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศส่งที่สถานีฐานไปยังสายอากาศรับก็ต้องพิจารณาค่าเหล่านี้ด้วย ซึ่งข้อมูลต่างๆ เหล่านี้หาได้จากการวัดโดยตรงหรือจากคู่มือสายอากาศที่ได้จากผู้ผลิต เนื่องจากแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้อาศัยข้อมูลวัดจากการแพร่กระจายคลื่นในระบบ GSM 900 ดังนั้นข้อมูลเหล่านี้จึงเป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์

เซอร์วิส (มหาชน) จำกัด ซึ่งข้อมูลที่จะนำมาใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองการการแพร่กระจายคลื่น ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

- อัตราขยายของสายอากาศ
- แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบระดับ (horizontal pattern)
- แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบแนวตั้ง (vertical pattern)
- มุมก้มของสายอากาศ (tilt angle)
- โพลาริเซชัน

จากข้อมูลเหล่านี้ประกอบกับตำแหน่งและความสูงของสายอากาศรับทำให้สามารถคำนวณกำลังของสัญญาณที่ออกจากสายอากาศในทิศทางใด ๆ ได้จากการพิจารณารูปที่ 3.4 โดยรูป (ก) แสดงมุมของแนวรังสีสัญญาณที่ออกจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับที่ทำกับแนวพหุหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบระดับ รูป (ข) แสดงมุมของแนวรังสีเทียบกับแนวพหุหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบแนวตั้งและเทียบกับแนวระดับ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctan[\tan(\text{tilt}) \times \cos(\delta)] \\ &\approx \text{tilt} \times \cos(\delta) \quad \text{เมื่อ } \text{tilt} < 20^\circ \times \frac{\pi}{180} \text{ rad}\end{aligned}$$

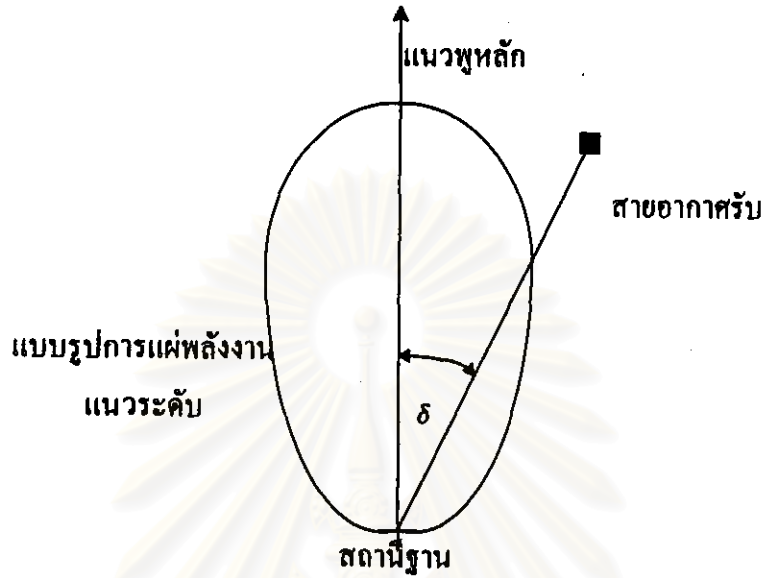
$$\beta = \arctan\left(\frac{H_t - H_r}{D}\right)$$

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (3.1)$$

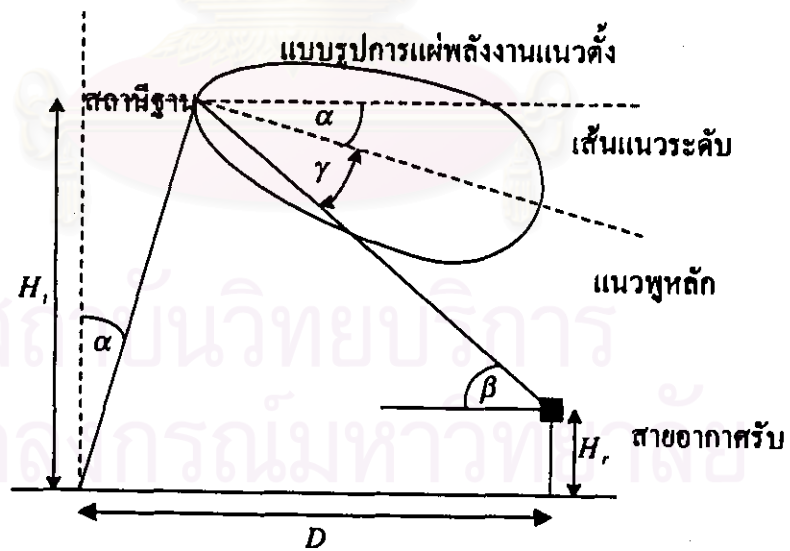
ซึ่ง  $\gamma$  ที่ได้จะใช้เป็นดัชนีมุมในแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบแนวตั้งเพื่อหาขนาดการลดทอน เมื่อได้ค่าการลดทอนแล้วสามารถคำนวณพลังงานในทิศทางที่แนวรังสีออกจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับทำมุม  $\delta$  กับแนวแกนของพหุหลักในระนาบระดับโดยแสดงในสมการที่ (3.2)

$$P_r(\text{tilt}, \delta) = P_{r0} - G(\gamma) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $P_r(\text{tilt}, \delta)$  คือกำลังส่งในทิศทางที่แนวรังสีออกจากสายอากาศส่ง  $P_{tr}$  คือกำลังส่งประสิทธิภาพของสายอากาศ  $G(\gamma)$  คือค่าการลดทอนตามแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบแนวตั้งที่มุม  $\gamma$  ใดๆ เทียบกับแนวแกนพหุหลัก



(ก) มุมเอียงจากแนวพหุหลักในระนาบระดับ



(ข) มุมก้มจากพหุหลักในระนาบแนวตั้งเมื่อเทียบกับสายอากาศรับ

รูปที่ 3.4 มุมก้มและมุมเอียงในระนาบของแบบรูปการแผ่พลังงาน

### การคำนวณค่าสนามไฟฟ้า

ค่าสนามไฟฟ้าที่เดินทางเป็นเส้นตรงคำนวณจากสมการพอยน์ติงเวกเตอร์และสูตรการส่งผ่านพลังงานของฟรีส (Friis transmission formula) ดังนี้

สมการพอยน์ติงเวกเตอร์ -

สำหรับตัวกลางที่เป็นอวกาศว่าง (free space)

$$S = \frac{1}{2} \frac{E_m^2}{\eta_0} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2}$$

$$E_m = \frac{\sqrt{60 P_t G_t}}{d} \quad (3.3)$$

โดย  $E_m$  เป็นขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะทาง  $d$  จากสายอากาศส่ง,  $P_t$  คือพลังงานที่ป้อนให้สายอากาศส่ง และ  $G_t$  คืออัตราขยายของสายอากาศส่ง ส่วนข้อมูลด้านเฟสของสนามไฟฟ้าสามารถเขียนแทนด้วยพจน์  $e^{-jk_0 d}$  ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าที่เดินทางออกจากแหล่งกำเนิด (สายอากาศส่ง) ในอวกาศว่างเป็นระยะทาง  $d$  สามารถแทนด้วยสมการที่ (3.4)

$$E = E_m e^{-jk_0 d} \quad (3.4)$$

สูตรการส่งผ่านพลังงานของฟรีส -

กำลังไฟฟ้าที่สายอากาศรับสามารถรับได้คำนวณโดย

$$P_r = S \cdot A_{er}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{E_m^2}{\eta_0} \cdot \left( G_r \frac{\lambda}{4\pi} \right) \quad (3.5)$$

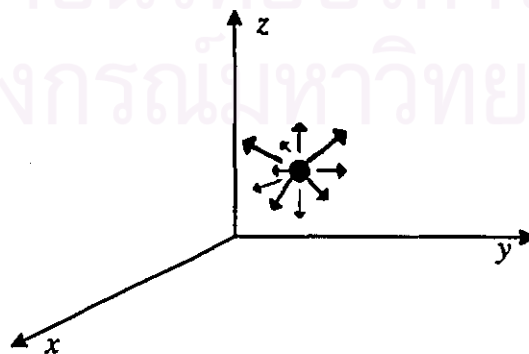
เมื่อ  $A_{er}$  เป็นช่องเปิดประสิทธิภาพของสายอากาศรับซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดโดย  $G_r \cdot \lambda / (4\pi)$  เมื่อ  $G_r$  คืออัตราขยายของสายอากาศ  $E_m$  คือขนาดของสนามไฟฟ้ารวมที่ตำแหน่งสายอากาศรับ ถ้าหากมีสัญญาณเดินทางมาจากหลายทิศทางก็ต้องรวมสัญญาณทั้งหมดแบบเวกเตอร์ก่อนจึงนำขนาดของผลรวมมาคำนวณพลังงานรับ

$$E_{total} = E_m e^{-j\phi} = \sum (E_i e^{-jk_0 d_i}) \quad (3.6)$$



### การตามรอยทางเดินสัญญาณ

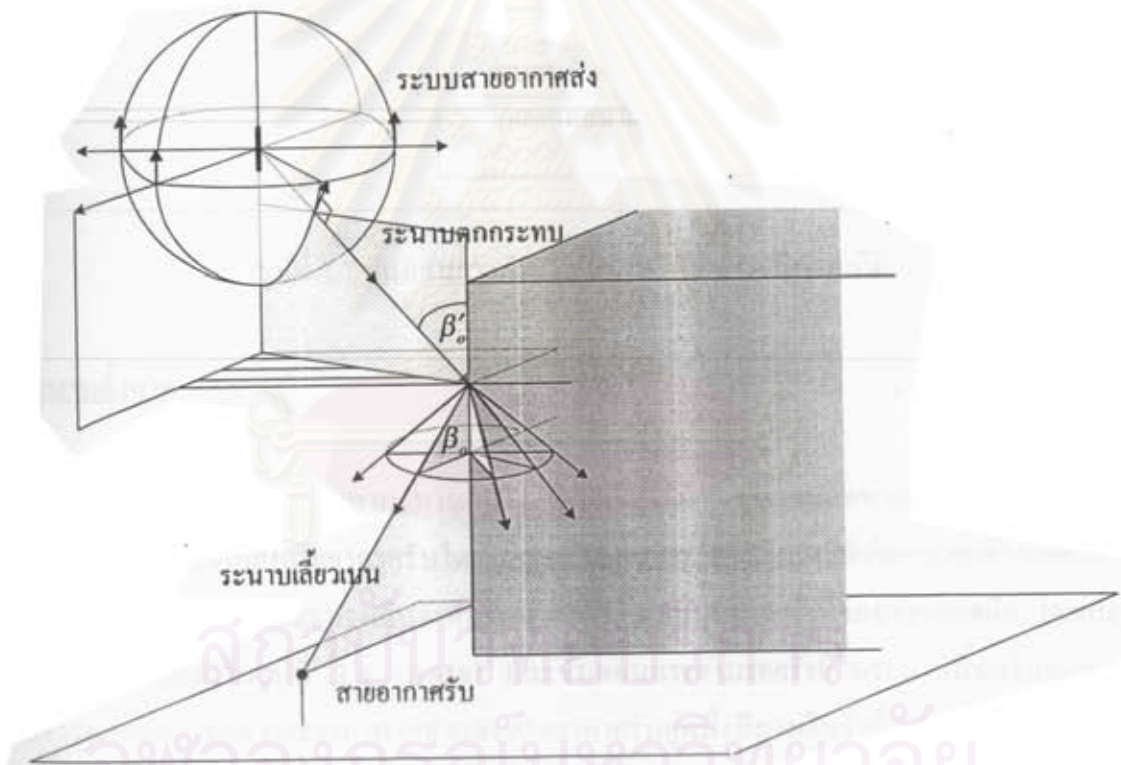
การตามรอยทางเดินสัญญาณที่ออกจากสายอากาศส่งคือการพิจารณาทางเดินของรังสีสัญญาณเมื่อออกจากสายอากาศส่งแล้วมีเส้นทางเป็นอย่างไรและสามารถเดินทางไปถึงสายอากาศรับได้หรือไม่ เพื่อใช้คำนวณขนาดสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับสามารถรับได้ที่ตำแหน่งใดๆ การพิจารณาทางเดินรังสีที่สมบูรณ์ต้องพิจารณาในสามมิติดังรูปที่ 3.5 คือพิจารณาทางเดินของรังสีออกจากแหล่งกำเนิดทุกๆ ทิศทางรอบตัว และพิจารณากลไกการสะท้อนและการเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวางของรังสีตามกฎการสะท้อนและกฎการเลี้ยวเบน สำหรับการพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพิจารณาแบบกึ่งสามมิติเพราะไม่จำเป็นที่จะต้องพิจารณาทุกๆ แนวรังสีเนื่องจากกลไกการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นตัวกำหนดระนาบของรังสีที่สามารถเดินทางจากแหล่งกำเนิดมาถึงจุดสังเกตได้ ดังนั้นจึงวิทยานิพนธ์นี้จึงพิจารณาเฉพาะระนาบหลักที่เกิดกลไกการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ และเนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประมาณรูปทรงดึกด้วยรูปทรงเรขาคณิตที่ผนังทุกด้านตั้งฉากกับพื้นดิน ดังนั้นรังสีที่สามารถเดินทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับจะเกิดจากการสะท้อนที่ผนังดึกหรือการเลี้ยวเบนที่จุดบนขอบและยอดของดึก โดยระนาบที่มีแนวรังสีสะท้อนอยู่จะเป็นระนาบเอียง (slant plane) และรังสีเลี้ยวเบนที่จุดบนขอบยอดดึกจะอยู่บนระนาบตั้งฉากกับพื้นโลก (vertical plane) ซึ่งระนาบทั้งสองเป็นระนาบที่มีสายอากาศส่งและสายอากาศรับอยู่ด้วยดังรูปที่ 3.6 (ก) ในขณะที่รังสีเลี้ยวเบนที่จุดบนขอบมุมด้านข้างของดึกจะอยู่บนพื้นผิวกรวยเลี้ยวเบนซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 (ข) โดยการเลี้ยวเบนที่มุมดึกจะพิจารณาเฉพาะการเลี้ยวเบนครั้งเดียวเท่านั้นเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ เพราะในกรณีที่เกิดการเลี้ยวเบนมากกว่าหนึ่งครั้งจะทำให้พลังงานที่ผ่านการเลี้ยวเบนมีค่าลดลงมากและไม่มีผลกระทบต่อพลังงานโดยรวมน้อยมาก สำหรับในระนาบอื่นๆ ที่ไม่ได้นำมาพิจารณาเนื่องจากรังสีสะท้อนและรังสีเลี้ยวเบนในระนาบนั้นๆ ไม่สามารถเดินทางมาถึงจุดรับได้ โดยพิจารณาจากกฎการสะท้อนและกฎการเลี้ยวเบน



รูปที่ 3.5 การแพร่กระจายในสามมิติ



(ก) ระนาบตั้งฉากและระนาบเอียง

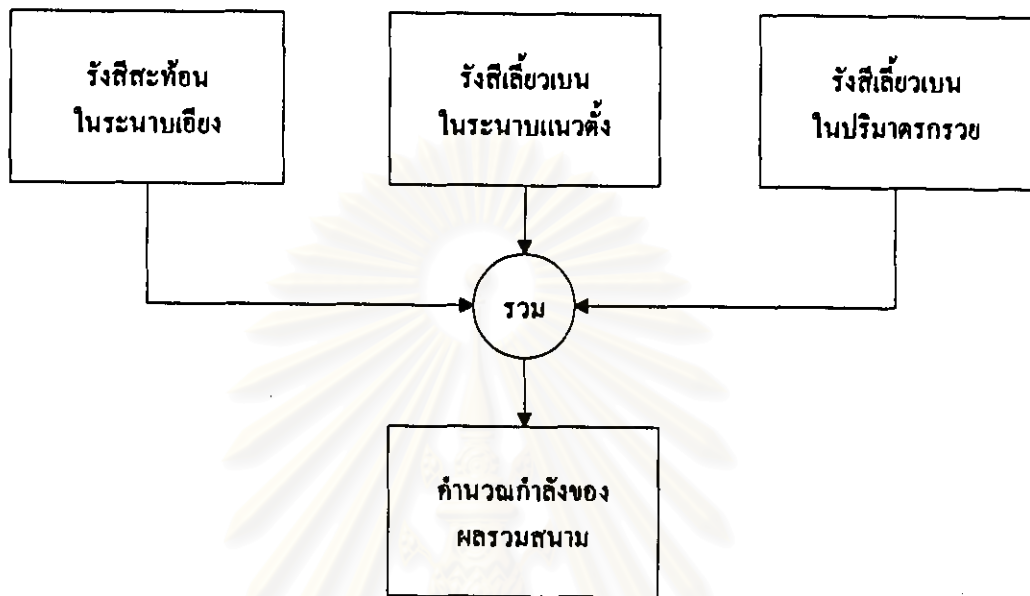


(ข) ระนาบรังสีตกกระทบบและระนาบเอียงเมื่อจุดเอียงบนขอบนขอบด้านข้าง

รูปที่ 3.6 ระนาบการแพร่กระจายหลักที่พิจารณา



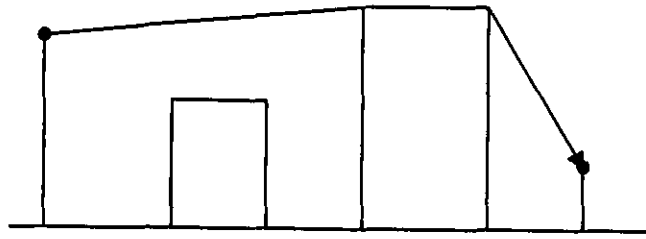
ค่าสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับพิจารณาจากผลรวมของสนามไฟฟ้าของรังสีทุกรังสีที่สามารถเดินทางจากสายอากาศส่งมาถึงสายอากาศรับได้ในระนาบแนวตั้ง ระนาบเอียง และรังสีเฉียงเบนที่มุมตึก โดยการพิจารณาแนวรังสีและสนามไฟฟ้าของแต่ละรังสีจะแยกพิจารณาที่ระนาบดังแสดงในรูปที่ 3.7



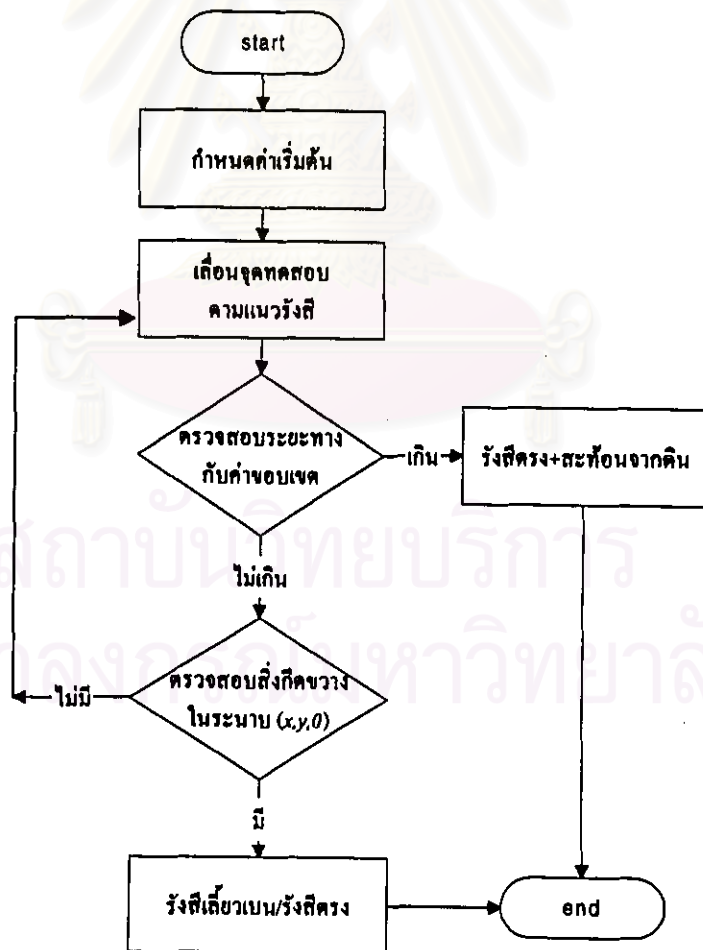
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการคำนวณสนามไฟฟ้าแบบกึ่งสามมิติ

### ระนาบตั้งฉาก

สำหรับในระนาบตั้งฉาก ทางเดินรังสีที่เป็นไปได้มี 3 รูปแบบคือทางเดินรังสีเป็นเส้นตรงจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับโดยไม่ผ่านสิ่งกีดขวาง ทางเดินรังสีที่เกิดการสะท้อนที่พื้นดินก่อนถึงสายอากาศรับ และทางเดินรังสีที่เกิดจากการเฉียงเบนหลายครั้งที่ขอบของยอดตึก โดยแนวรังสีทั้งสามแสดงในรูปที่ 3.8 (ก)-(ข) และขั้นตอนการตามรอยรังสีในระนาบนี้จะเริ่มจากการพิจารณาก่อนว่าระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับคู่หนึ่งมีทางเดินรังสีรูปแบบใดเกิดขึ้นบ้าง ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.9

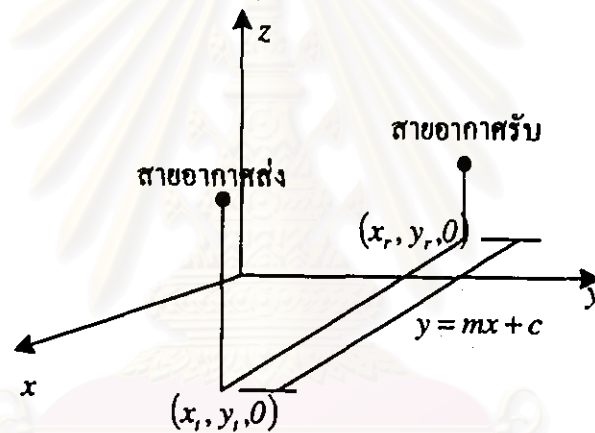


(ก) แนวรังสีเดี่ยวเบน

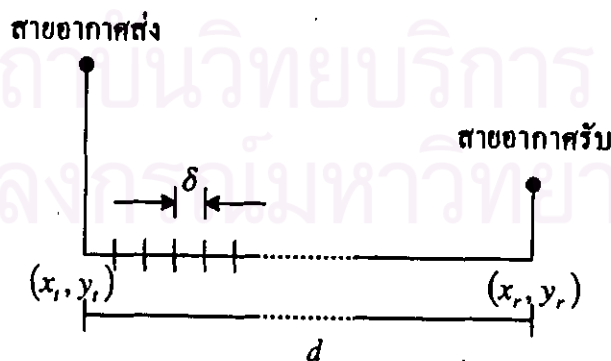
(ข) แนวรังสีตรงและรังสีสะท้อน  
รูปที่ 3.8 แนวรังสีในระนาบตั้งฉาก

รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการพิจารณารูปแบบของรังสี

จากรูปที่ 3.9 การกำหนดค่าเริ่มต้นหมายถึงการกำหนดฐานข้อมูลของสิ่งกีดขวาง ตำแหน่งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เพื่อคำนวณระยะห่างระหว่างจุดทั้งสองและเพื่อกำหนดแนวรังสีทดสอบและสมการของแนวรังสีทดสอบจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ โดยจะพิจารณาในระนาบ  $xy$  ( $z=0$ ) ดังรูปที่ 3.10 (ก) จากค่าเริ่มต้นจะกำหนดพิกัด  $(x_r, y_r)$  ของสายอากาศส่งเป็นจุดทดสอบแรกและเลื่อนจุดทดสอบไปเรื่อยๆ ด้วยระยะ  $\delta = d/20$  เมื่อ  $d$  เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (หรืออาจกำหนดเป็นค่าคงที่อื่นๆ เพื่อความเหมาะสมกับฐานข้อมูล) ขณะเดียวกันก็ตรวจสอบจุดทดสอบกับฐานข้อมูลด้วยว่าจุดทดสอบนี้ติดกับสิ่งกีดขวางใดๆ หรือไม่ ถ้าหากไม่ติดกับสิ่งกีดขวางใดเลยและจุดทดสอบมีระยะห่างจากจุด  $(x_r, y_r)$  เกินระยะ  $d$  แล้วหมายความว่าทางเดินรังสีระหว่างสายอากาศรับและส่งเป็นทางเดินตรงและทางเดินสะท้อนผ่านพื้นดิน ถ้าหากพบว่าจุดทดสอบติดกับสิ่งกีดขวางแสดงว่าเป็นรังสีเลี้ยวเบนและ/หรือเป็นรังสีตรงขึ้นอยู่กับความสูงของสิ่งกีดขวางนั้น



(ก) สมการเส้นตรงในระนาบ  $xy$  ของแนวรังสีทดสอบ



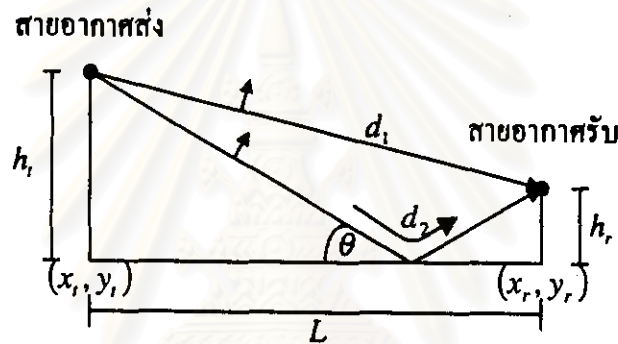
(ข) การแบ่งระยะกำหนดจุดทดสอบในแนวรังสีทดสอบ

รูปที่ 3.10 การกำหนดค่าเริ่มต้น

ผลลัพธ์จากขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือกรณีมีสิ่งกีดขวางและกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง และสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าของรังสีในแต่ละกรณีดังนี้

### กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

สำหรับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางรังสีสัญญาณสามารถเดินทางจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับได้สองเส้นทางคือ รังสีเส้นตรงและรังสีเดินทางโดยการสะท้อนพื้นดิน สำหรับวิทยานิพนธ์นี้กำหนดสายอากาศมีโพลาริเซชันแนวตั้ง [18] ซึ่งในการใช้งานจริงโพลาริเซชันของสายอากาศส่งมีทั้งที่เป็นโพลาริเซชันแนวตั้งและแบบโพลาริเซชันแนว  $\pm 45$  องศาเบี่ยงจากแนวตั้ง ดังนั้นสนามไฟฟ้าของรังสีที่มีโพลาริเซชันแนวตั้งที่มีการเดินทางแต่ละแบบคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 รังสีตรงและรังสีสะท้อน

$$E_{direct} = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d_1} e^{-jk d_1} \quad (3.7ก)$$

$$E_{reflect} = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d_2} \tilde{R}(90 - \theta) e^{-jk d_2} \quad (3.7ข)$$

โดย  $E_{direct}$  และ  $E_{reflect}$  เป็นสนามเนื่องจากรังสีเดินทางเป็นเส้นตรงและโดยการสะท้อนตามลำดับ และค่าปัจจัยอื่นๆ กำหนดดังนี้

$$d_1 = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + L^2}, \quad d_2 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + L^2} \quad \text{และ} \quad \theta = \arctan\left(\frac{h_t + h_r}{L}\right)$$

และเนื่องจากสายอากาศเป็นแบบโพลาไรเซชันแนวตั้ง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบไดแอคติกที่พื้นดินจะเป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบสเกลาร์สำหรับโพลาไรเซชันแบบแจ้งเพียงองค์ประกอบเดียว ดังสมการที่ (3.8)

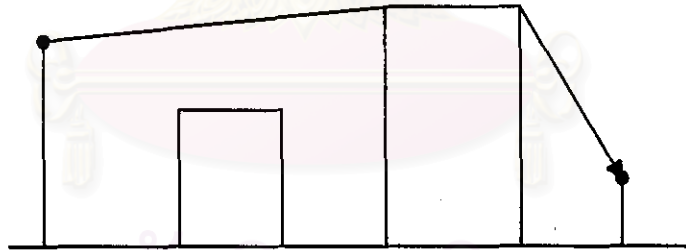
$$\tilde{R}(90-\theta) \rightarrow R_h(90-\theta)$$

$$R_h(\psi) = \frac{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \psi} - \epsilon \cos \psi}{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \psi} + \epsilon \cos \psi} \quad (3.8)$$

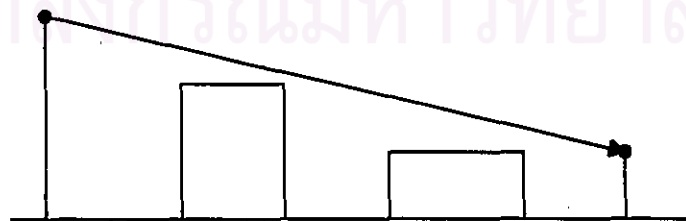
โดย  $\epsilon = \epsilon_r - j60\sigma\lambda$  และกำหนดค่า  $\epsilon_r = 8$  และ  $\sigma = 0.002$  ซึ่งเป็นค่าสำหรับพื้นผิวคอนกรีต [18]

กรณีมีสิ่งกีดขวาง

กรณีมีสิ่งกีดขวางการเดินทางของรังสีสัญญาณจากสายอากาศส่งมายังสายสายอากาศรับจะเป็นการเดินทางโดยการเลี้ยวเบนผ่านยอดดึก และในกรณีที่ความสูงของดึกไม่สูงมาก รังสีทางตรงก็อาจจะเกิดขึ้นได้



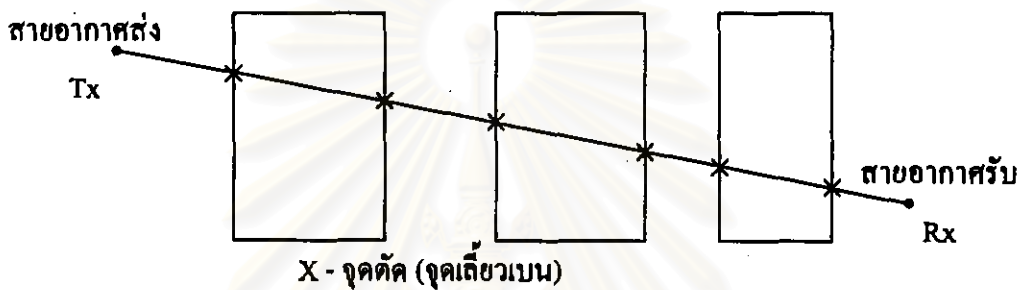
(ข) สิ่งกีดขวางสูงกว่าทางเดินรังสีตรง



(ข) สิ่งกีดขวางต่ำกว่าทางเดินรังสีตรง

รูปที่ 3.12 แนวรังสีในกรณีมีสิ่งกีดขวางในระนาบแนวตั้ง

ทั้งสองกรณีใช้วิธีพิจารณาแบบเดียวกัน เริ่มจากการกำหนดจุดเดี่ยวบนบนยอดตึกทั้งหมด แล้วจึงหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ ซึ่งอาจเป็นเส้นทางที่ไม่มีจุดเดี่ยวบนเลยหรืออาจเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยจุดเดี่ยวบนหลายจุดก็ได้ แต่จะพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่มีจุดเดี่ยวบนน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ เนื่องจากสนามของรังสีอื่นๆ จะมีนัยสำคัญน้อยมาก เมื่อเทียบกับรังสีที่มีจุดเดี่ยวบนน้อยสุด จากกฎการเดี่ยวบนที่ว่ามุมระหว่างแนวรังสีตกกระทบกับแกนของสันตคกกระทบจะเท่ากับมุมระหว่างแนวรังสีเดี่ยวบนกับแกนของสันตคกกระทบ ดังนั้นการหาจุดเดี่ยวบนที่สั้นขอบของยอดตึกจะเริ่มจากการกำหนดจุดตัดกันของแนวรังสีที่ฉายลงบนระนาบขนานพื้นโลกกับแนวสันขอบของตึกที่ฉายลงบนระนาบเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.13



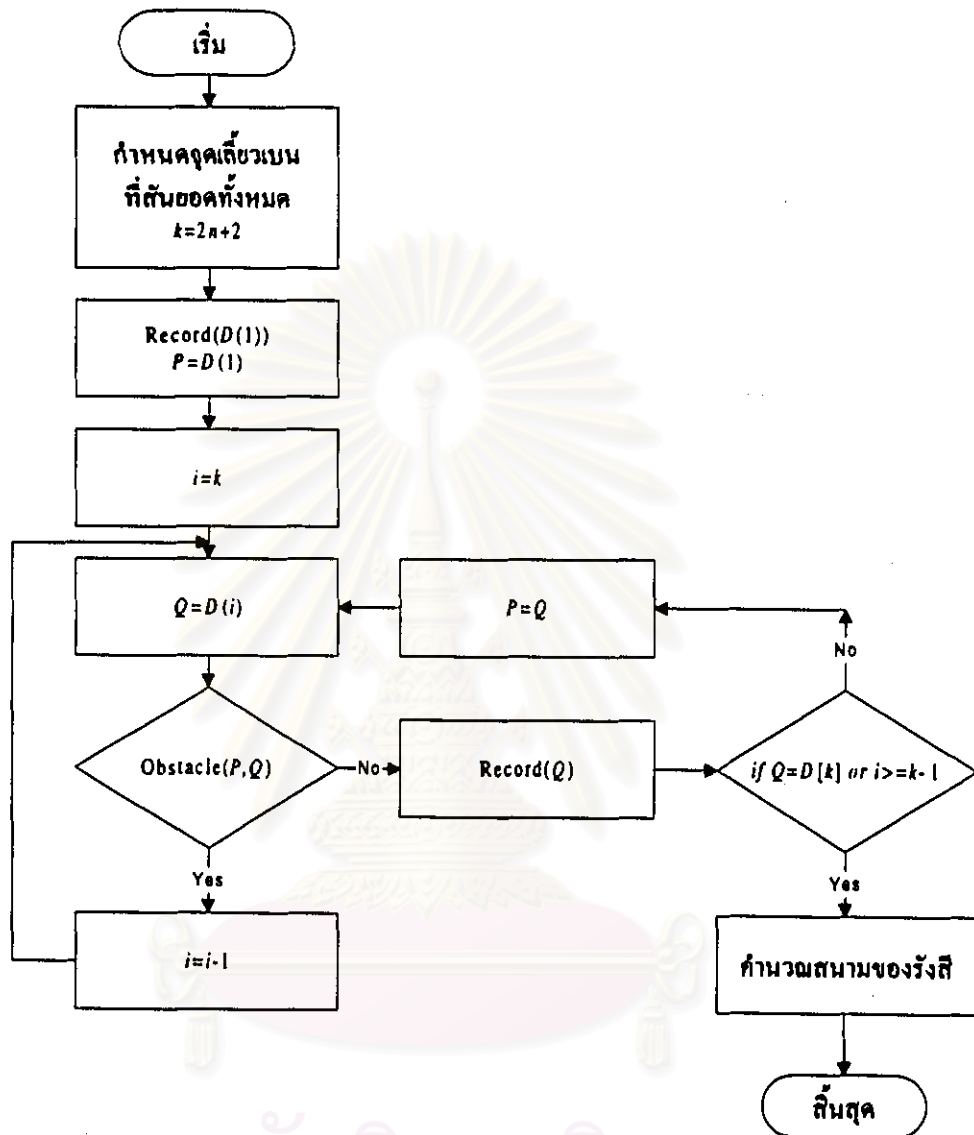
รูปที่ 3.13 จุดตัดของแนวรังสีและแนวสันขอบในระนาบฉาย

จุดเดี่ยวบนที่สั้นยอดตึกมีพิกัดเป็น  $Q_d(x_d, y_d, z_d)$  โดย  $x_d, y_d$  ได้จากจุดตัดกันที่แสดงในรูปที่ 3.13 ส่วน  $z_d$  คือความสูงของตึกที่เกิดจุดเดี่ยวบนนั้นๆ จากพิกัดจุดเดี่ยวบนและพิกัดของสายอากาศส่งและรับจะสามารถสร้างชุดของจุดที่ประกอบด้วย  $D = (Tx, Q_{d1}, Q_{d2}, \dots, Q_{dn}, Rx)$  ซึ่ง  $D$  จะมีสมาชิกจำนวน  $k = 2n + 2$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนตึกทั้งหมดที่อยู่ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และการเลือกทางเดินรังสีที่สั้นที่สุดสามารถเขียนขั้นตอนการเลือกได้ดังรูปที่ 3.14 โดยกำหนดฟังก์ชัน Record( ) เป็นฟังก์ชันที่เก็บจุดที่รังสีเดินทางสั้นที่สุด โดยจุดแรกจะเป็นจุด  $D(1)$  (หรือ  $Tx$ ) และจุดสุดท้ายจะเป็น  $D(k)$  (หรือ  $Rx$ ) เสมอ ส่วนฟังก์ชัน Obstacle( ) จะเป็นฟังก์ชันหาตึกกีดขวางระหว่างจุดสองจุดจากฐานข้อมูล โดยพิจารณาความสูงของตึกและความสูงของแนวรังสีด้วยและจะให้คำตอบเป็นมีตึกกีดขวางหรือไม่มีตึกกีดขวางอยู่

การพิจารณาจะเลือกคู่ของจุดสายอากาศส่งและสายอากาศรับก่อนถ้าหากมีตึกกีดขวางอยู่ จะเลื่อนจุดคู่พิจารณาจากสายอากาศรับเป็นจุดเดี่ยวบนสุดท้าย ถ้ายังพบตึกกีดขวางอีก ก็จะเลื่อนคู่พิจารณาเป็นจุดเดี่ยวบนก่อนหน้านั้นไปเรื่อยๆ จนพบคู่ของจุดสายอากาศส่งที่ทำให้ไม่มีตึกกีดขวางจึงบันทึกจุดนี้ไว้ แล้วใช้จุดนี้เป็นจุดเริ่มจับคู่กับจุดสายอากาศรับใหม่แล้วหาจุดที่จับคู่กับจุดนี้แล้วไม่มีตึกกีดขวางก็บันทึกจุดเพิ่มเข้าไป เริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งเหมือนเดิมจนครบทุก



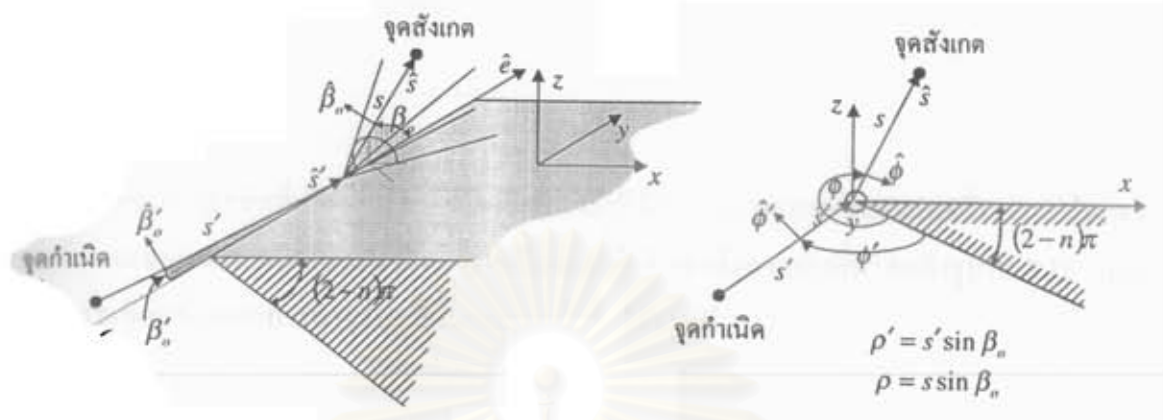
จุดเลี้ยวเบนก็จะได้บันทึกจุดของจุดเลี้ยวเบนทั้งหมดที่จะให้เส้นทางรังสีมีระยะทางสั้นที่สุด จากนั้นจึงคำนวณสนามของรังสีจากสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่จุดเลี้ยวเบนทั้งหมดในแนวรังสี



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการเลือกทางเดินรังสีที่สั้นที่สุด

เมื่อได้จุดเลี้ยวเบนที่ทำให้ได้แนวรังสีที่สั้นที่สุดแล้ว ค่าสนามไฟฟ้าของรังสีคำนวณจากผลคูณของสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบน เนื่องจากกำหนดสายอากาศส่งเป็นแบบโพลาไรเซชันแนวตั้ง ดังนั้นแนวเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่ปรากฏที่จุดเลี้ยวเบนบนสั้นขอดจะอยู่ในแนว  $\hat{\phi}'$  และ  $\hat{\phi}$  ดังนั้นสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบโคแอดิกที่จุดเลี้ยวเบนบนสั้นขอดนี้จึงเหลือเพียงองค์ประกอบเดียวและเป็นสัมประสิทธิ์แบบสเกลาร์คือ  $D_n$  และเนื่องจากสั้นขอดเป็นแบบถื่น 90 องศา ดังนั้นค่า

ของ  $n$  ในรูปที่ 3.15 จึงมีค่า 1.5 เมื่อแทนค่าลงในสมการสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนในสมการที่ (2.38ข)แล้วจะได้สมการสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนดังสมการที่ (3.9)



(ก) แนวเวกเตอร์ในระนาบคกกระทบ

(ข) มุมมองด้านข้าง

และระนาบเลี้ยวเบน

รูปที่ 3.15 ลักษณะแนวเวกเตอร์ที่สันยอดเลี้ยวเบน

$$D_h = \frac{-e^{-jx/4}}{3\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \left[ \begin{array}{l} \cot \left[ \frac{\pi + (\phi - \phi')}{3} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ + \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{3} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ + R_h^n \cot \left[ \frac{\pi + (\phi + \phi')}{3} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ + R_h^o \cot \left[ \frac{\pi - (\phi + \phi')}{3} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{array} \right] \quad (3.9)$$

เมื่อ  $F(x)$  เป็นฟังก์ชันทรานซิชันที่กล่าวแล้วในบทที่ 2 โดยมีค่าปัจจัย  $L$  กำหนดโดย

$$L = \frac{ss' \sin^2 \beta_0}{s + s'} \text{ และฟังก์ชัน } a^\pm(x) \text{ กำหนดโดย } a^\pm(x) = 2 \cos^2 \left[ \frac{3\pi N^\pm - x}{2} \right] \text{ เมื่อ } N^\pm \text{ คือเลข}$$

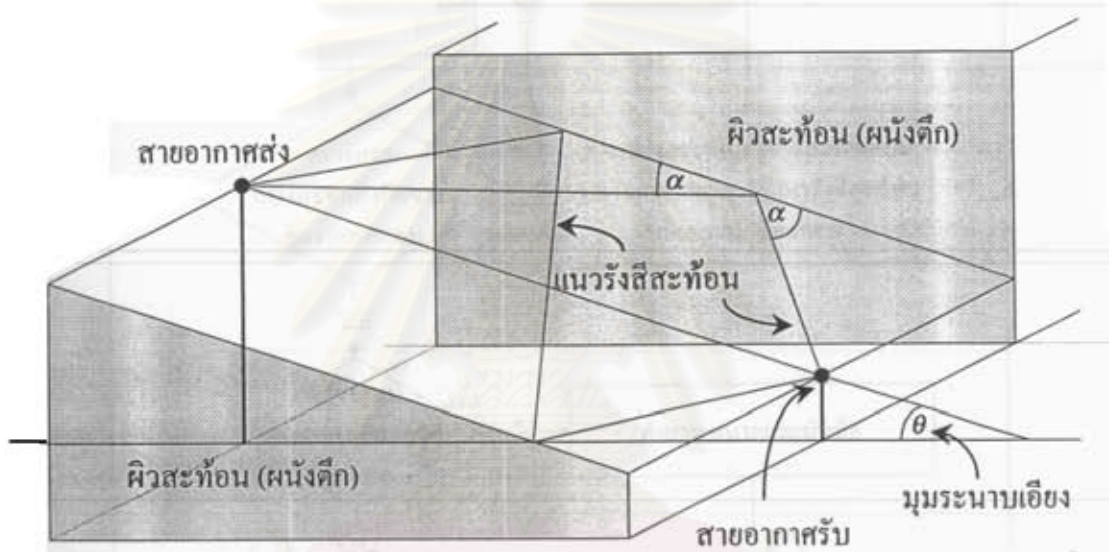
จำนวนเต็มที่ทำให้ฟังก์ชันต่อไปนี้มีค่าใกล้เคียงที่สุด

$$\left. \begin{array}{l} 3\pi N^+ - x = \pi \\ 3\pi N^- - x = -\pi \end{array} \right\} x = \phi + \phi', \phi - \phi'$$

เมื่อ  $R_n^\circ$  เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านรังสีตกกระทบด้วยมุมตกกระทบเท่ากับ  $\phi'$  สำหรับโพลาไรเซชันแบบแข็ง และ  $R_n^\circ$  เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านรังสีเดียวกันออกจากขอบด้วยมุมสะท้อนเท่ากับ  $3\pi/2 - \phi$  สำหรับโพลาไรเซชันแบบแข็ง

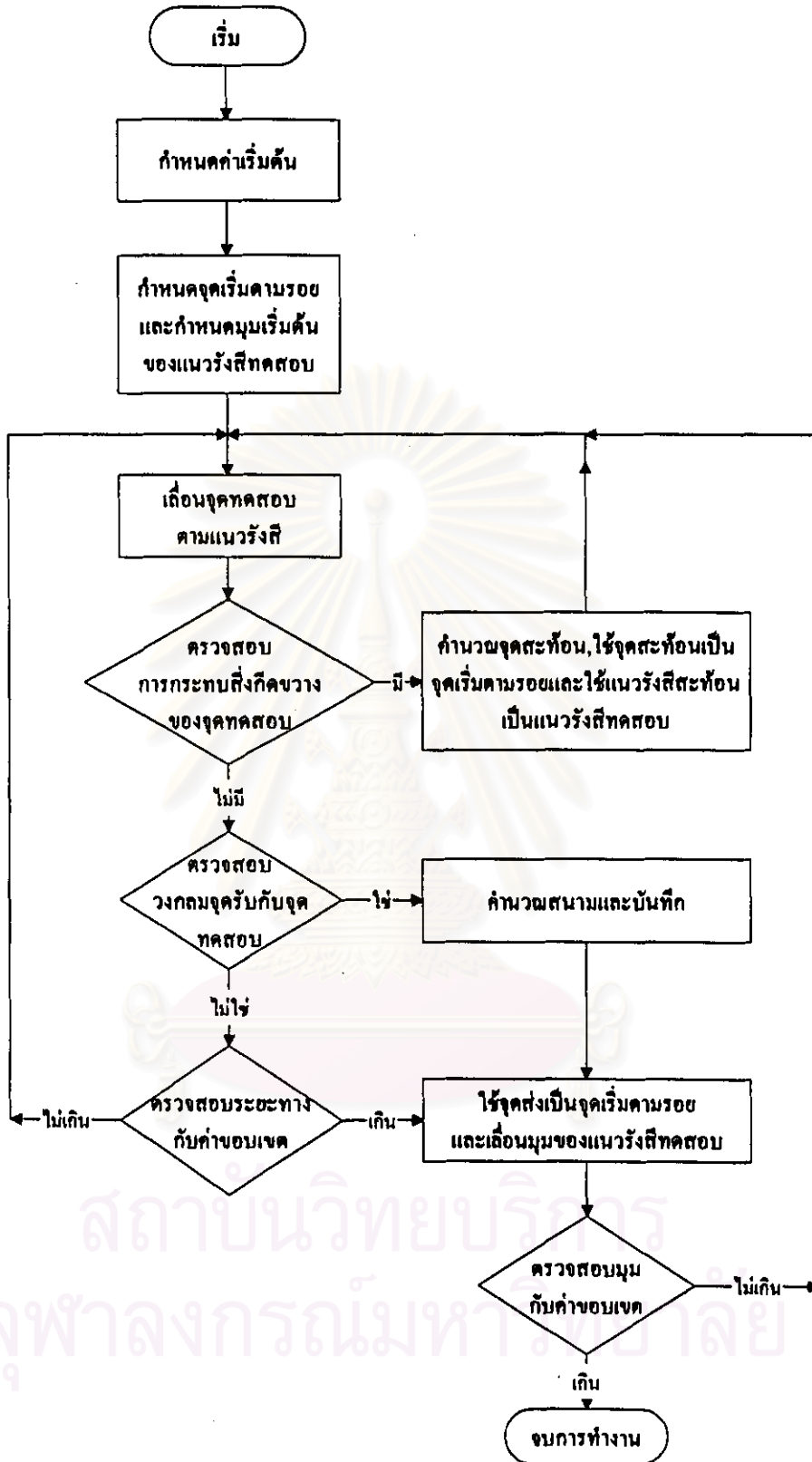
### ระนาบเอียง

แนวรังสีหลักที่เกิดในระนาบเอียงคือแนวรังสีที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้ง โดยจุดสะท้อนจะอยู่บนแนวตัดกันระหว่างระนาบเอียงและผิวดิ่งซึ่งตั้งฉากกับพื้นโลกดังรูปที่ 3.16 และสามารถเขียนขั้นตอนการหาจุดสะท้อนบนแนวรังสีได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 ระนาบเอียงและแนวตัดกับพื้นผิวสะท้อน

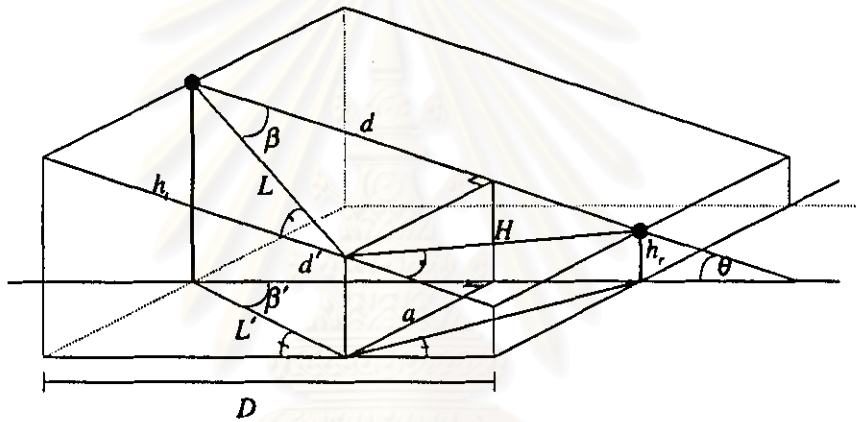
การกำหนดค่าเริ่มต้นก่อนการตามรอยทางเดินรังสีประกอบด้วย การกำหนดค่าปัจจัยของเสาอากาศ, ค่ามุมเริ่มต้นของแนวรังสีตกกระทบ, ตำแหน่งของเสาอากาศส่งและเสาอากาศรับรวมถึงความสูงด้วย, กำลังส่งและความถี่ใช้งานของเสาอากาศส่ง, ฐานข้อมูลของดิกทิกขวางในบริเวณที่พิจารณา และต้องกำหนดแนวแกนอ้างอิงด้วย ขั้นตอนการเลื่อนจุดทดสอบในรูปที่ 3.17 หมายถึง การเลื่อนจุดพิจารณาไปเรื่อยๆ บนแนวรังสีตกกระทบโดยเริ่มต้นออกจากจุดเสาอากาศส่งไปตามแนวรังสีตกกระทบจนกว่าระยะทางจากจุดพิจารณาจะเกินกว่าค่าขอบเขตที่กำหนด ซึ่งเป็นค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อระยะทางเกินค่าขอบเขตจะเปลี่ยนไปพิจารณาแนวรังสีตกกระทบแนวอื่นต่อไปเรื่อยๆ



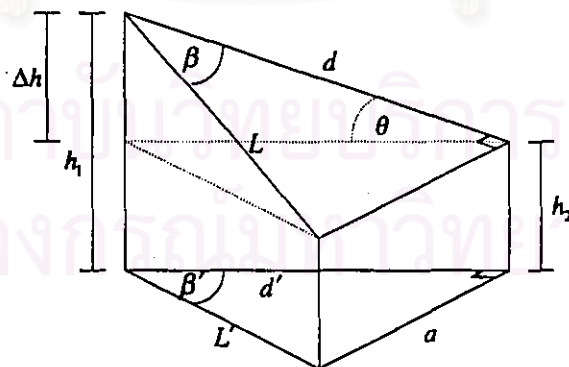
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการกำหนดจุดสะท้อนและคำนวณรังสีสะท้อนบนระนาบเอียง

การตรวจสอบสิ่งกีดขวางจะคล้ายกับกรณีของฟังก์ชัน Obstacle ( ) ในระนาบแนวตั้งคือ เมื่อเลื่อนจุดทดสอบไปแล้วจะตรวจสอบว่าจุดทดสอบขณะนั้นตกกระทบสิ่งกีดขวางใดหรือไม่ ถ้ามีสิ่งกีดขวางก็คำนวณจุดสะท้อนที่แท้จริงและกำหนดแนวรังสีทดสอบใหม่เป็นแนวรังสีสะท้อน จากนั้นจึงเลื่อนจุดทดสอบไปเรื่อยๆ และทำซ้ำกระบวนการเดิมจนกว่าจุดทดสอบจะตกกระทบ วงกลมจุดรับซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

การตามรอยทางเดินรังสีในระนาบเอียงจะพิจารณาจากแนวรังสีในระนาบระดับแล้วจึง คำนวณระยะทางและมุมให้เป็นค่าในระนาบเอียง โดยมุมที่รังสีเดินทางออกจากสายอากาศส่งใน แบบจำลองนี้จะหมายถึงมุมที่อยู่ในระนาบระดับ การหาทางเดินรังสีสะท้อนจะทำในระนาบสองมิติ โดยการฉายภาพแนวรังสีในระนาบเอียงลงบนระนาบระดับดังรูปที่ 3.18



(ก) ภาพฉายรังสี



(ข) มุมและระยะบนระนาบระดับเทียบกับระนาบเอียง

รูปที่ 3.18 การฉายภาพแนวรังสีจากระนาบเอียงลงบนระนาบระดับ



ความสัมพันธ์ของมุมและระยะทางบนระนาบเอียงและบนระนาบระดับสามารถพิจารณาจากรูปที่ 3.18 (ข) ซึ่งความสัมพันธ์ของระยะทางพิจารณาจาก

$$L' = \sqrt{a^2 + (d')^2} = \frac{d'}{\cos \beta'}$$

และ

$$L = \sqrt{(\Delta h)^2 + (L')^2}$$

$$L = L' \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{L'}\right)^2 + 1}$$

ดังนั้น

$$L = L' \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta h}{d'}\right) \cdot \cos \beta'\right]^2 + 1} = L' \sqrt{(\tan \theta \cos \beta')^2 + 1} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $\theta$  มุมเอียงของระนาบเอียงซึ่งหาได้จากค่าจากความต่างของความสูงของสายอากาศส่งและรับหารด้วยระยะทางระนาบระดับจากสายอากาศส่งถึงสายอากาศรับ  $\beta'$  คือมุมที่แนวรังสีทำกับแนวสายตาจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับในระนาบระดับ

จากรูปที่ 3.18 (ข) จะได้ความสัมพันธ์ของมุมปรากฏบนระนาบเอียงดังนี้

$$\tan \alpha = \frac{a}{d} = \frac{d' \tan \beta}{\sqrt{(\Delta h)^2 + (d')^2}}$$

$$\alpha = \arctan \left( \frac{d' \tan \beta}{\sqrt{(\Delta h)^2 + (d')^2}} \right)$$

$$\alpha = \arctan \left( \frac{d' \tan \beta}{d' / \cos \theta} \right) = \arctan(\tan \beta \cos \theta) \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11)  $\alpha$  คือมุมที่ปรากฏบนระนาบเอียง  $\beta$  คือมุมที่ปรากฏบนระนาบระดับและ  $\theta$  คือมุมเอียงของระนาบเอียง



ตำแหน่งที่แท้จริงของจุดสะท้อนบนระนาบเอียงสามารถหาได้จากจุดสะท้อนบนระนาบระดับแต่ต้องคำนวณความสูงแท้จริงของจุดสะท้อนด้วย ซึ่งจุดสะท้อนที่คำนวณได้นี้อาจจะไม่มีอยู่จริงก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าความสูงของจุดสะท้อนที่คำนวณได้อยู่ในขอบเขตความสูงของผิวสะท้อนที่รังสีตกกระทบหรือไม่ ซึ่งความสูงของจุดสะท้อนสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.12) ดังนี้

$$\tan \theta = \frac{H - h_r}{D - d'} \quad (3.12)$$

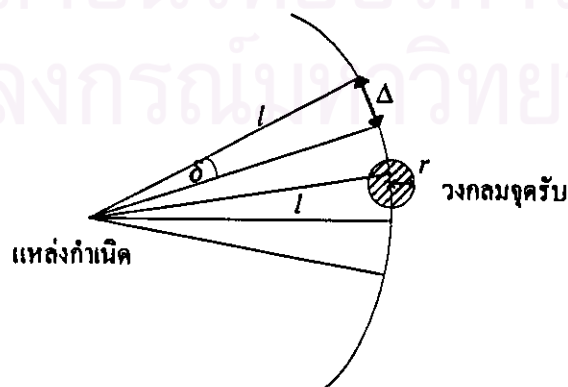
เมื่อ  $H$  คือความสูงของจุดสะท้อน  $D$  คือระยะทางตรงจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับบนระนาบระดับ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} H &= (D - d') \tan \theta + h_r \\ H &= (D - L' \cos \beta) \tan \theta + h_r \end{aligned} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $L'$  คือระยะห่างระหว่างจุดสะท้อนและจุดกำเนิด  $h_r$  คือความสูงของสายอากาศรับ

**การกำหนดแนวรังสีและการกำหนดวงกลมจุดรับ**

เพื่อให้การตามรอยทางเดินรังสีครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่จุดรับอาจจะวางอยู่ ดังนั้นการกำหนดระยะห่างระหว่างแนวรังสีที่ตามรอยและการกำหนดขอบเขตการตัดสินใจว่าแนวรังสีติดกับจุดรับหรือไม่จึงเป็นส่วนสำคัญและจำเป็น ดังนั้นแทนที่จะกำหนดจุดรับเป็นจุดก็จะพิจารณาจุดรับเป็นวงกลมจุดรับที่มีรัศมีของวงกลมขึ้นอยู่กับระยะห่างของแนวรังสีทดสอบและระยะทางที่รังสีเดินทางดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ระยะห่างระหว่างแนวรังสีและวงกลมจุดรับ

จากรูปที่ 3.19 ระยะห่างระหว่างแนวรังสีมีค่าเชิงมุมเป็น  $\delta$  เรเดียนและเทียบเป็นระยะทาง ดังสมการที่ (3.14)

$$\Delta = 2l \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.14)$$

รัศมีของวงกลมจอร์บกำหนดโดยสมการที่ (3.15)

$$\begin{aligned} r &\geq \frac{\Delta}{2} = l \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ r &= l \frac{\delta}{2} \quad \text{เมื่อ } \frac{\delta}{2} \text{ มีค่าน้อยมากๆ} \end{aligned} \quad (3.15)$$

หากจุดทดสอบตกอยู่ในพื้นที่รัศมี  $r$  รอบจอร์บจะถือว่าจุดทดสอบนี้ตกกระทบกับจอร์บ และจะคำนวณสนามของรังสีนี้และบันทึกเก็บไว้เพื่อคำนวณสนามรวมอีกครั้ง

เมื่อทราบจุดสะท้อนและสัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งหมดตลอดแนวรังสี สนามไฟฟ้าของรังสีคำนวณ โดยสมการที่ (3.16)

$$E = \frac{E_0}{d} \left(\prod R\right) e^{-jkd} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $E_0$  เป็นขนาดสนามเนื่องจากการแพร่กระจายทางตรงกำหนดโดย  $E_0 = \sqrt{60P_r G_r}$  หรือ  $E_0 = \sqrt{60EIRP}$ ,  $\prod R$  คือผลคูณของสัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งหมดตลอดแนวรังสี,  $d$  คือระยะทางที่รังสีเดินทางโดยตรงจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับบนระนาบเอียง

โพลาริเซชันของสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นโพลาริเซชันแนวตั้ง ดังนั้นที่จุดสะท้อนบริเวณผนังดึกสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเป็นแบบสำหรับโพลาริเซชันแบบอ่อน (แนวเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.17)

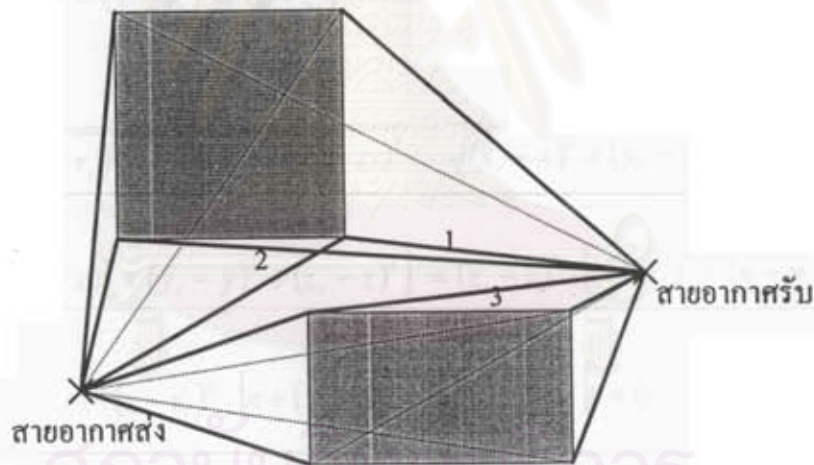
$$R_s(\psi) = \frac{\cos\psi - \sqrt{\epsilon - \sin^2\psi}}{\cos\psi + \sqrt{\epsilon - \sin^2\psi}} \quad (3.17)$$

เมื่อ  $\psi$  คือมุมที่แนวรังสีตกกระทบทำกับแนวเวกเตอร์ปกติที่ผิวสะท้อนในระนาบเอียง

## ระนาบรังสีเดี่ยวเบน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณารังสีเดี่ยวเบนเฉพาะกรณีที่เกิดการเดี่ยวเบนหนึ่งครั้งเท่านั้น ซึ่งหลักการหาจุดเดี่ยวเบนจะพิจารณาคล้ายกับการหาจุดสะท้อน คือพิจารณาจุดขอบในระนาบระดับสองมิติก่อนแล้วจึงขยายผลเป็นจุดเดี่ยวเบนในพิกัดสามมิติโดยการคำนวณความสูงจากระนาบระดับของจุด จากนั้นจึงเลือกจุดเดี่ยวเบนที่มีอยู่จริงบนขอบด้านข้างของดึก โดยสามารถสรุปขั้นตอนคร่าวๆ ได้ดังนี้

1. เลือกจุดขอบที่มีอยู่ทั้งหมด
2. เลือกเฉพาะจุดขอบที่สามารถเชื่อมทางเดินจากสายอากาศส่งมายังจุดรับและจากจุดส่งไปยังสายอากาศรับ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางเลย (พิจารณาในระนาบระดับ)
3. คำนวณความสูงของจุดเดี่ยวเบนบนขอบจากกฎการเดี่ยวเบนของ Keller
4. เลือกจุดเดี่ยวเบนที่มีอยู่จริงบนขอบและคำนวณสนามของรังสีจากสัมประสิทธิ์การเดี่ยวเบนคังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 3.20 เส้นทางเชื่อมระหว่างสายอากาศส่งมายังจุดขอบ และจากจุดขอบ ไปยังสายอากาศรับ

จากรูปที่ 3.20 จะพบว่าแนวรังสีที่เดินทางระหว่างสายอากาศส่งมายังจุดขอบและจากจุดขอบไปยังสายอากาศรับโดยไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นคือแนวรังสีหมายเลข 1, 2 และ 3 เท่านั้น ส่วนแนวรังสีอื่นจะถูกบดบังโดยดึกหมด จากหลักการเลือกเช่นนี้เราจะได้จุดขอบที่จะให้แนวรังสีเดี่ยวเบนที่มีการเดี่ยวเบนหนึ่งครั้งในแนวรังสีเท่านั้น เมื่อเลือกจุดขอบที่มีความเป็นไปได้แล้วก็ใช้กฎการเดี่ยวเบนของ Keller เพื่อคำนวณความสูงของจุดเดี่ยวเบนในปริภูมิสามมิติ โดยสมมุติว่าจุด

เส้นแวงบนมีพิกัดเป็น  $Q_D = (x, y, z)$  โดย  $x$  และ  $y$  ได้จากพิกัดของมุมตึกในระนาบระดับ และกำหนดพิกัดของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น  $Tx = (x_r, y_r, z_r)$  และ  $Rx = (x_r, y_r, z_r)$  ตามลำดับ

จากกฎการเลี้ยวเบน  $\hat{s}_i \cdot \hat{e} = \hat{s}_d \cdot \hat{e}$  (3.18)

เมื่อ  $\hat{s}_i$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีตกกระทบกำหนดโดย  $\hat{s}_i = \frac{(Q_D - Tx)}{|Q_D - Tx|}$

$\hat{s}_d$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีเลี้ยวเบนกำหนดโดย  $\hat{s}_d = \frac{(Rx - Q_D)}{|Rx - Q_D|}$

$\hat{e}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกนขอบเลี้ยวเบนจากรูปที่ 3.6 และ 3.15  $\hat{e} = \hat{a}_z$

จากสมการที่ (3.18) จะได้

$$\frac{[(x - x_r)\hat{a}_x + (y - y_r)\hat{a}_y + (z - z_r)\hat{a}_z] \cdot \hat{a}_z}{\sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2}} = \frac{[(x_r - x)\hat{a}_x + (y_r - y)\hat{a}_y + (z_r - z)\hat{a}_z] \cdot \hat{a}_z}{\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2}}$$

$$\frac{(z - z_r)}{\sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2}} = \frac{(z_r - z)}{\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2}}$$

$$(z - z_r)^2 \cdot [(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2] = (z_r - z)^2 \cdot [(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2]$$

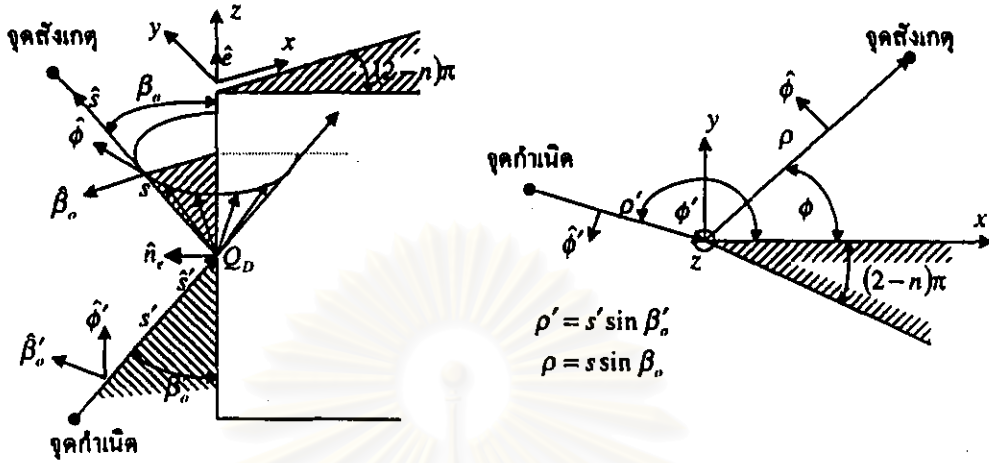
$$(z - z_r)^2 \cdot [a + (z_r - z)^2] = (z_r - z)^2 \cdot [b + (z - z_r)^2]$$

$$z = \frac{\sqrt{a} \cdot z_r + \sqrt{b} \cdot z_r}{\sqrt{a} + \sqrt{b}} \quad (3.19)$$

เมื่อ  $z$  คือความสูงของจุดเลี้ยวเบน,  $z_r$  และ  $z_r$  คือความสูงของสายอากาศส่งและรับตามลำดับ  $\sqrt{a}$  คือระยะทางจากจุดเลี้ยวเบนไปถึงจุดรับในระนาบระดับ และ  $\sqrt{b}$  คือระยะทางจากสายอากาศส่งถึงจุดเลี้ยวเบนในระนาบระดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 และ 3.21 จะเห็นว่าแนวเวกเตอร์ของสนามที่ปรากฏที่ขอบเลี้ยวเบนจะอยู่ในแนวเดียวกันกับ  $\beta'$  แต่ทิศตรงข้าม ดังนั้นสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบโคแอดิกที่จุด

เส้นเวกเตอร์จะลดรูปเหลือเพียงองค์ประกอบสเกลาร์ในแนว  $\beta'_0$  (สัมพันธ์กับการเคลื่อนแบบอ่อน,  $D_s$ ) ดังแสดงด้วยสมการที่ (3.20) ซึ่งได้จากการแทนค่า  $n = 1.5$  ลงในสมการที่ (2.38ก)



(ก) แนวเวกเตอร์ในระนาบคกกระทบ  
และระนาบเส้นเวก

(ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 3.21 ลักษณะแนวเวกเตอร์ที่ขอบเส้นเวก

$$D_s = \frac{-e^{-j\pi/4}}{3\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[ \frac{\pi + (\phi - \phi')}{3} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ + \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{3} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ + R_s' \cot \left[ \frac{\pi + (\phi + \phi')}{3} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ + R_s'' \cot \left[ \frac{\pi - (\phi + \phi')}{3} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{array} \right\} \quad (3.20)$$

ค่าปัจจัยอื่นๆ ในสมการที่ (3.20) กำหนดโดยลักษณะทางเรขาคณิตของแนวรังสีคกกระทบและแนวรังสีเส้นเวกที่เทียบกับขอบ และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้ารังสีเส้นเวกและสัมพันธ์กับการเคลื่อนได้ดังนี้

$$E^d(s) = D_s E^i(Q_D) \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} e^{-jks} \quad (3.21)$$

จากหลักการตามรอยทางเดินสัญญาณที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดเริ่มจากการตามทางเดินในระนาบตั้งฉาก ระนาบเอียง และแนวรังสีเส้นเวกที่ขอบตึก ทำให้ได้แนวรังสีที่แสดงการ

แพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับที่จุดสังเกตใดๆ และพลังงานที่สายอากาศรับสามารถรับได้คำนวณจากผลรวมสนามที่เกิดจากรังสีสัญญาณทั้งหมดที่ได้จากการคามรอยทางเดินสัญญาณ

สำหรับการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้หลักการที่กล่าวมาข้างต้น โดยข้อมูลที่ต้องการสำหรับการจำลองการแพร่กระจายคลื่น ได้แก่

1. ฐานข้อมูลเชิงเลขของดิกในสภาพแวดล้อมที่ต้องการจำลองการแพร่กระจาย
2. ค่าปัจจัยของสายอากาศส่งและรับ ได้แก่ ตำแหน่งของสายอากาศส่ง ความสูงของสายอากาศส่งและรับ ทิศทางของสายอากาศส่ง มุมก้มของสายอากาศส่ง แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบแนวตั้งและระนาบแนวระดับ อัตราขยายของสายอากาศรับ
3. กำลังคลื่นแผ่พลังงานสมมูลแบบไอโซทรอปิก (Equivalent isotropically radiated power, EIRP) และความถี่ใช้งาน
4. ตำแหน่งทดสอบที่ต้องการทราบค่าพลังงานที่สายอากาศรับจะสามารถรับได้

## สรุป

การคำนวณขนาดสนามไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีพื้นฐานอยู่บนระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตและทฤษฎีการเลี้ยวเบนเอกรูปคิงที่กล่าวในบทที่ 2 และจากระเบียบวิธีดังกล่าวประกอบกับการพิจารณาลักษณะทางเรขาคณิตของรูปทรงของดิกก็คขวางและค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ใช้ตลอดจนค่าปัจจัยทั้งหลายที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นทั้งที่ใช้จริงและที่ประมาณค่าขึ้น เช่น ความถี่ใช้งาน กำลังส่ง ตำแหน่งที่ตั้ง ค่าคุณลักษณะของพื้นผิวสะท้อน เป็นต้น ทำให้สามารถคำนวณค่าระดับความแรงสัญญาณได้ และในบทต่อไปจะแสดงให้เห็นผลการคำนวณและการหาค่าฟังก์ชันชดเชยการลดทอนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย