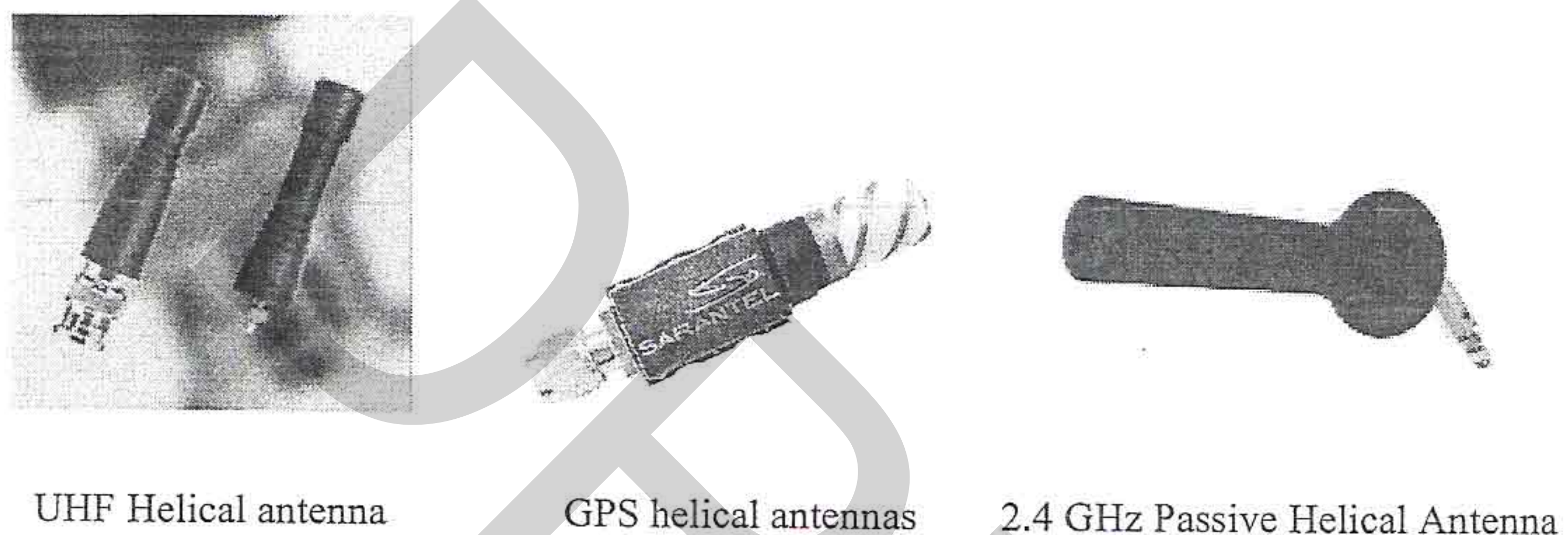


บทที่ 2

ทฤษฎีสายอากาศแบบเฮลิคซ์

ในปัจจุบันสายอากาศแบบเฮลิคซ์มีการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม โทรศัพท์เคลื่อนที่ วิทยุสื่อสาร และระบบเครือข่ายไร้สาย เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างโดยรวมของสายอากาศแบบเฮลิคซ์อยู่ในรูปแบบทรงกระบอก ทำให้สะดวกการติดตั้งและใช้งาน ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 สายอากาศแบบเฮลิคซ์แบบต่าง ๆ ที่มีใช้งานในปัจจุบัน

การนำสายอากาศเฮลิคซ์มาใช้งานในระบบต่าง ๆ จะมีการออกแบบที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับย่านความถี่ที่ใช้งาน โหมดในการแพร่กระจายคลื่น และอัตราการขยาย เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอการทฤษฎีพื้นฐานและการออกแบบสายอากาศแบบเฮลิคซ์ ที่จะนำไปเป็นพื้นฐานในการสร้างสายอากาศแบบเฮลิคซ์สำหรับระบบ WLAN มาตรฐาน 802.11 b/g ต่อไป

2.1 โครงสร้างสายอากาศแบบเฮลิคซ์ [1]

สายอากาศแบบเฮลิคซ์โดยทั่วไปมีโครงสร้าง ดังรูป 2.2 โดยมีลวดตัวนำที่พันในลักษณะเกลียว เป็นรูปขดลวดทรงกระบอก ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น และแผ่นโลหะสำหรับการสะท้อนคลื่น ส่วนในการป้อนสัญญาณเข้านั้นจะส่งผ่านมาจากสายโคแอกเซียลทางด้านหลังของแผ่นสะท้อนคลื่น ในบางกรณีที่ปลายของสายโคแอกเซียลจะมีคอนเนกเตอร์ ต่อเข้ากับสตับ (stub) ก่อนที่จะต่อกับลวดตัวนำ เพื่อที่จะทำให้อิมพีแดนซ์เข้าคู่กัน (matched impedances) ระหว่างสายโคแอกเซียลกับสายอากาศ

โดยตัวแปรในโครงสร้างของขดลวดรูปเฮลิคซ์ ในรูป 2.2 มีดังนี้

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (จากศูนย์กลางของขดลวด ถึงศูนย์กลางของเส้นลวด)

C = เส้นรอบวงของขดลวดเฮลิคซ์ (πD)

S = ระยะทางระหว่างขดลวด

α = มุม pitch ($\arctan S / \pi D$)

L = ระยะทางของเส้นลวดใน 1 รอบ

n = จำนวนรอบของขดลวด

A = ความยาวตามแนวแกนของขดลวด (nS)

ตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

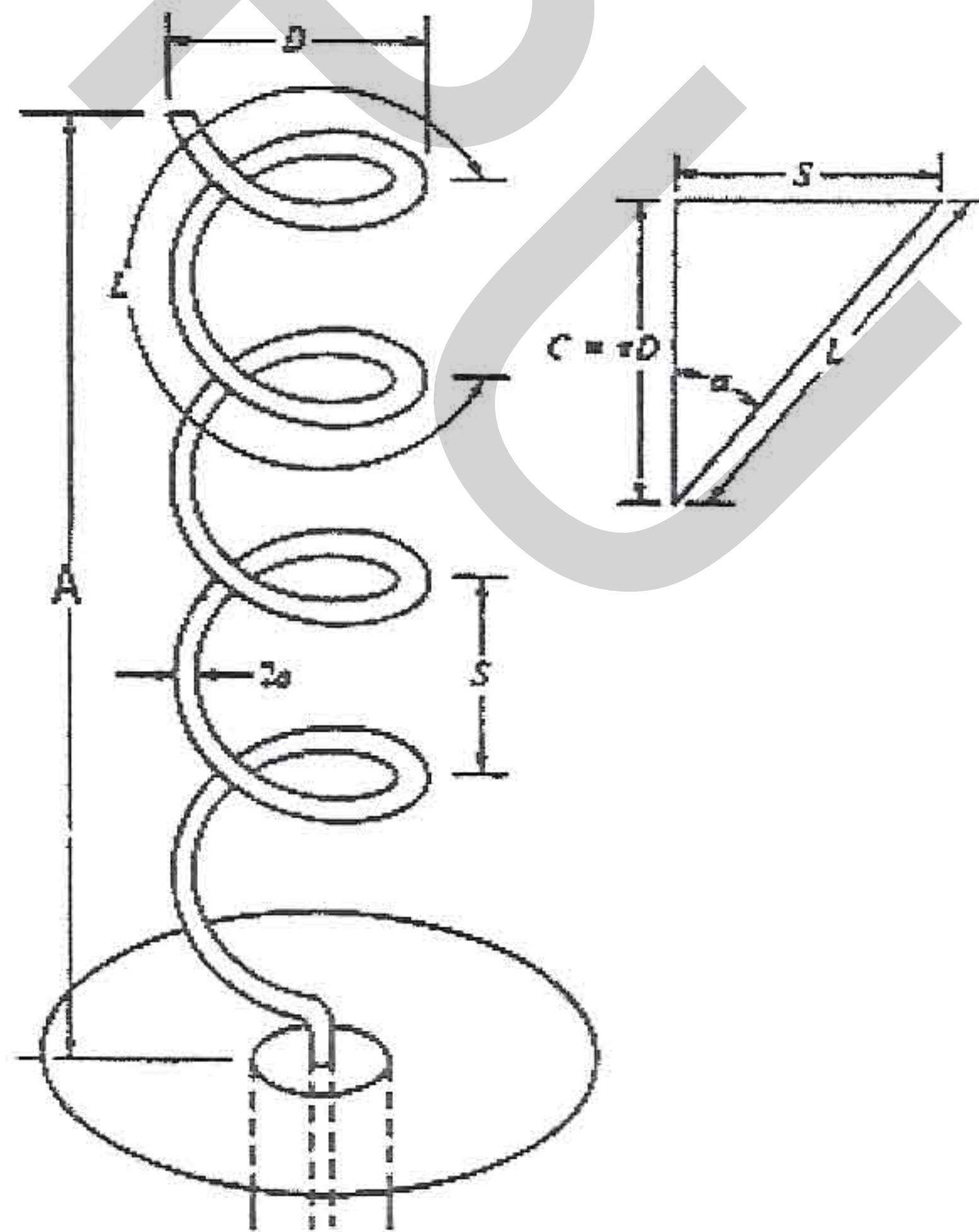
$$C = \pi D$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{S}{\pi D} \right\}$$

$$L = \{S^2 + (\pi D)^2\}^{1/2}$$

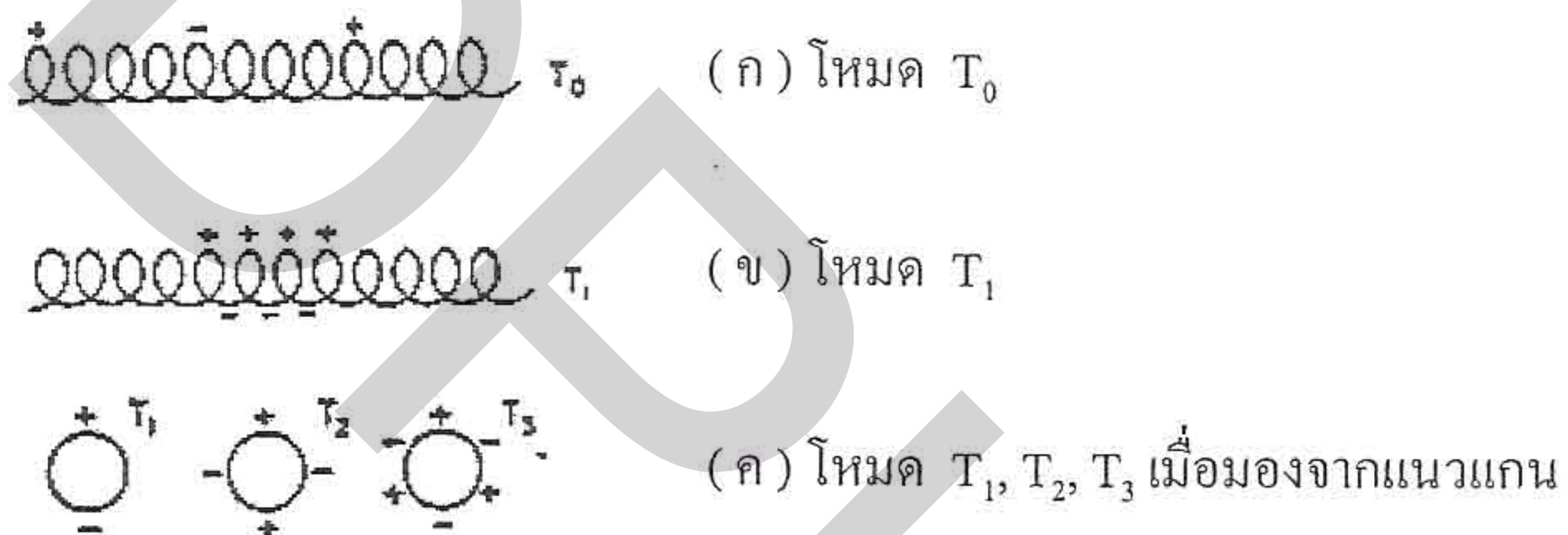
$$A = nS$$

(2.1)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคซ์

เมื่อพิจารณาโหมดของกระแสที่ไหลบนโครงสร้างของเฮลิคซ์ จากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีพบว่ากระแสจะไหลได้หลายโหมดดังที่แสดงไว้ในรูป 2.3 โดยที่เครื่องหมาย + และ - แสดงเครื่องหมายของประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนั้น ๆ โหมด T_0 เป็นโหมดต่ำสุดซึ่งมีบทบาทมากในกรณีที่ L สั้นกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ ในกรณีที่ $nL \ll \lambda$ โหมดนี้จะเป็นโหมดหลักที่ทำให้เกิดการกระจายคลื่นออกไป การกระจายคลื่นในโหมดนี้จะคล้ายคลึงกับการกระจายคลื่นออกจากสายอากาศรูปขนาดเล็ก ซึ่งคลื่นที่กระจายออกป็นั้นจะออกไปในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของเฮลิคซ์จึงทำให้มีชื่อเรียกเป็นสายอากาศเฮลิคซ์โหมดตั้งฉาก (normal mode helical antenna) เนื่องจากสายอากาศเฮลิคซ์โหมดตั้งฉากนี้เป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์แคบจึงจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้ อย่างไรก็ตามรูปร่างที่กะทัดรัดทำให้สายอากาศนี้มีที่ใช้งานวิทยุสื่อสาร ที่ไม่ต้องการแบนด์วิดท์กว้าง



รูปที่ 2.3 ประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนสายอากาศของเฮลิคซ์โหมดต่าง ๆ

โหมด T_1 เป็นโหมดหลักในกรณีที่ C มีค่าประมาณหนึ่งความยาวคลื่น และถ้าโครงสร้างของขดลวดมีมุมพิชต์แคบก็จะทำให้กระแสชั่วขณะมีการกระจายดังที่แสดงไว้ในรูป 2.3 (ข) และ (ค) กล่าวคือกระแสชั่วขณะที่มีเฟสเป็นบวกและมีเฟสเป็นลบจะอยู่ห่างกันครึ่งรอบหรืออยู่ฝั่งตรงข้ามของเส้นผ่านศูนย์กลาง กระแสในโหมดนี้จะทำให้เกิดการกระจายคลื่นออกไปในทิศแนวแกนและมีแบนด์วิดท์กว้างดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป สายอากาศเฮลิคซ์ที่มีโหมด T_1 เป็นหลักนี้ จึงเรียกว่าสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกน (axial mode helical antenna)

สำหรับโหมด T_2 และ T_3 และโหมดที่สูงกว่านั้นจะเกิดขึ้น เมื่อ C มีขนาดยาวกว่าความยาวคลื่น รูปที่ 2.3 (ค) นั้นแสดงค่าประจุชั่วขณะของกรณีที่มีมุมพิชต์แคบ การกระจายคลื่นจากโหมดนี้จะออกไปหลายทิศทาง และทิศทางของเมนบีมก็เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ได้มาก ดังนั้นจึงไม่ค่อยมีที่ใช้ในแง่ของสายอากาศ

2.2 คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกน [1]

สายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกนนี้เป็นสายอากาศที่ให้คลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลม ในทิศแนวแกน และมีแบนวิทที่กว้าง จึงมีที่ใช้ในงานสื่อสารทั่วไป และเป็นสายอากาศแบบโพลาไรซ์วงกลม (Circular Polarized) แบบหนึ่งที่ใช้เป็นสายอากาศติดต่อกับจรวดและยานอวกาศอย่างแพร่หลาย

2.2.1 กระแสที่ไหลและอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกน

โหมดของกระแสที่ไหลบนสายอากาศเฮลิคซ์ขนาดต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ข้างบนนั้น ได้มีผู้ทำการทดลองวัดขนาดจริง ๆ ของกระแสที่ไหลบนสายอากาศเฮลิคซ์ ซึ่งตัวอย่างของผลการวัดส่วนหนึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ในกรณีของรูป (ก) นั้นเป็นกรณีที่ $C = 0.6\lambda$ จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นลวดจะอยู่ในรูปคลื่นยืน (standing wave) ที่มีปลายสายเปิดวงจรอยู่สำหรับรูป (ข) นั้นเป็นกรณีที่ $C = 1.07\lambda$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอที่บริเวณส่วนใหญ่ยกเว้นปลายทั้งสองของขดลวดเหตุผลที่กระแสไหลตามแบบในรูป (ก) นั้น จะสามารถอธิบายได้โดยรูป (ค) กล่าวคือในช่วงที่ C มีขนาดประมาณ 0.6λ หรือเล็กกว่านี้ โหมดของกระแสที่ไหลจะเป็น T_0 เป็นหลัก และกระแสโหมด T_0 นี้ก็จะเป็นคลื่นจรรอออกจากจุดป้อนแล้วไปสะท้อนที่ปลายเส้นลวด จึงทำให้เกิดคลื่นยืนตามที่เห็นในรูป (ก)

สำหรับกรณีของรูป (ข) นั้นจะอธิบายได้โดยใช้รูป (ง) และ (จ) ดังนี้คือ ในกรณีที่ C มีขนาดประมาณหนึ่งความยาวคลื่น โหมดของกระแสที่เกิดขึ้นได้มี 2 โหมดด้วยกันคือ T_0 และ T_1 โหมด T_0 นั้นเป็นโหมดที่ไม่สามารถส่งผ่านไปตามโครงสร้างได้ จึงมีขนาดใหญ่บริเวณจุดป้อนแล้วจะมีขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากจุดป้อน สำหรับโหมด T_1 นั้นจะเป็นโหมดที่สามารถส่งผ่านไปตามโครงสร้างได้ และคลื่นจรรของโหมดนี้ที่ออกจากจุดป้อนก็จะมีขนาดคงที่ตลอดความยาวของเส้นลวด เมื่อพิจารณาที่ปลายสายคลื่นจรรโหมด T_1 เมื่อพบกับปลายที่เปิดวงจรอยู่ก็จะเกิดการสะท้อนโดยการสะท้อนนี้จะมีโหมด T_0 และโหมด T_1 ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นพร้อมกัน และเช่นเดียวกันที่จุดป้อนโหมด T_0 ที่สะท้อนกลับมานั้นจะเล็กลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากปลายสาย ในขณะที่โหมด T_1 จะส่งผ่านเป็นคลื่นจรรกลับมาทางจุดป้อน เนื่องจากโหมด T_0 และโหมด T_1 มีค่าคงตัวของการส่งผ่านไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อรวมกระแสโหมด T_0 และโหมด T_1 เข้าไปด้วยกันจะเป็นรูปกราฟดังที่แสดงไว้ในรูป (จ) กล่าวคือจะมีบริเวณที่ค่ากระแสมีขนาดเล็กลงเกือบศูนย์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากเฟสของกระแสทั้งสองตรงข้ามกันในขณะที่ขนาดของกระแสเท่า ๆ กัน ลักษณะดังกล่าวนี้ก็จะเกิดกับกระแสที่สะท้อนกลับมาเช่นเดียวกัน และเนื่องจากกระแสโหมด T_1 ที่สะท้อนกลับมามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขาไป จึงทำให้คลื่นยืนที่

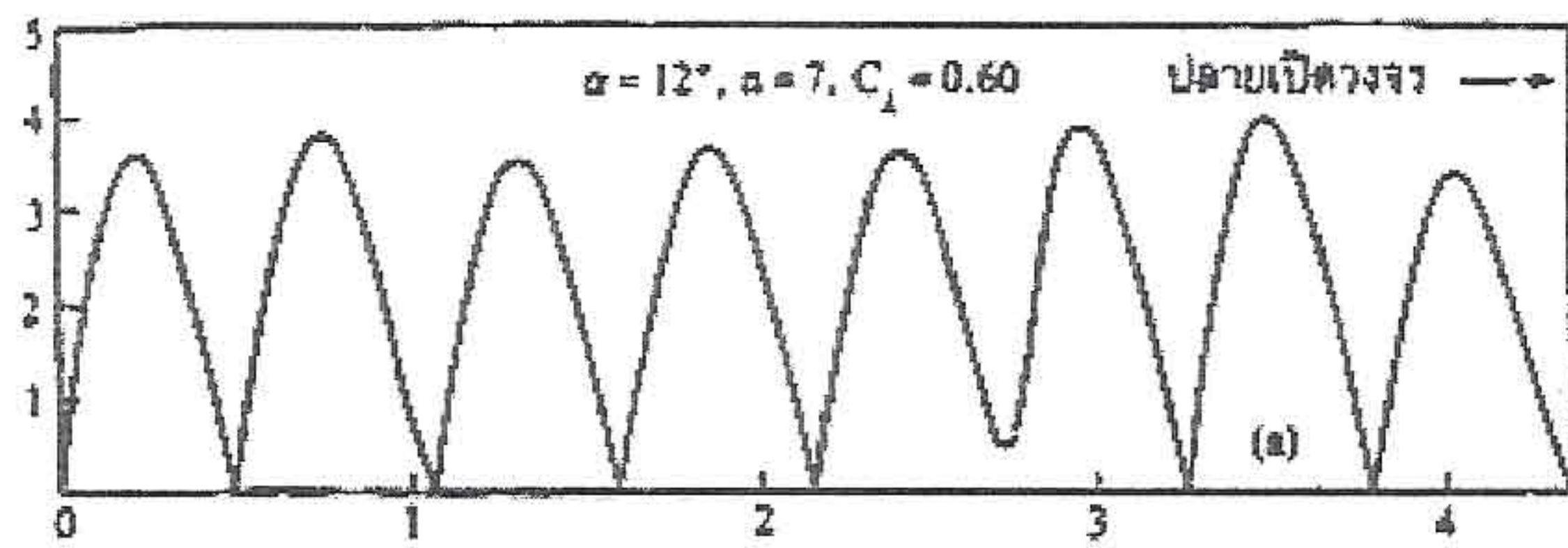
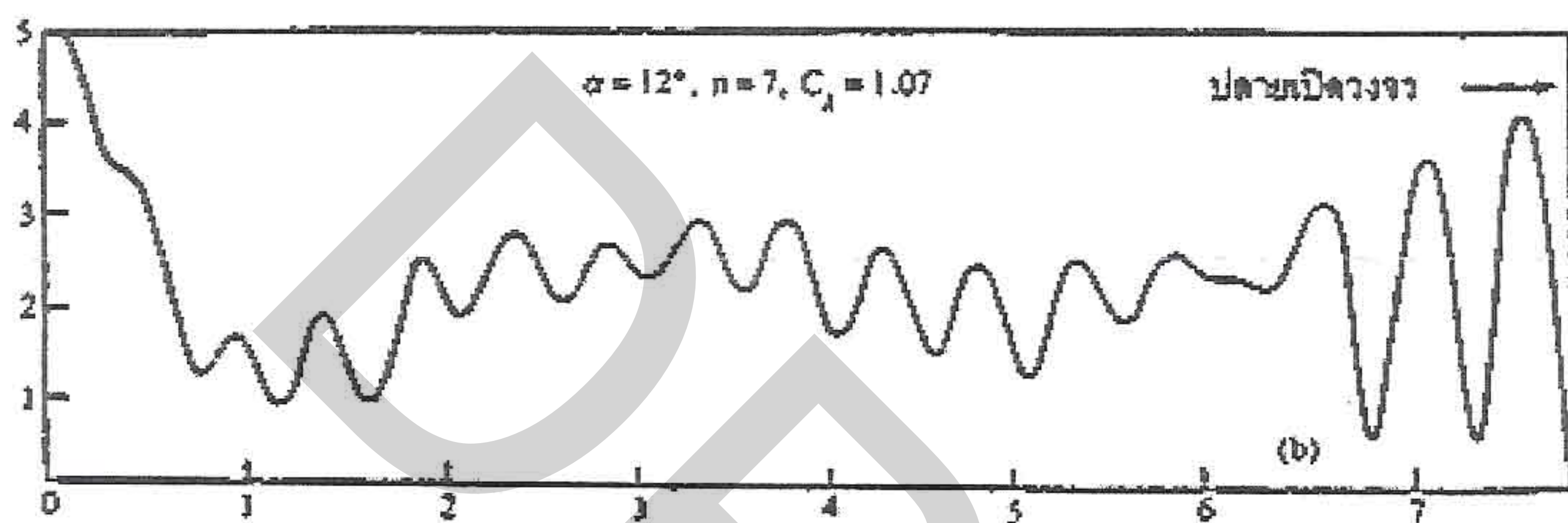
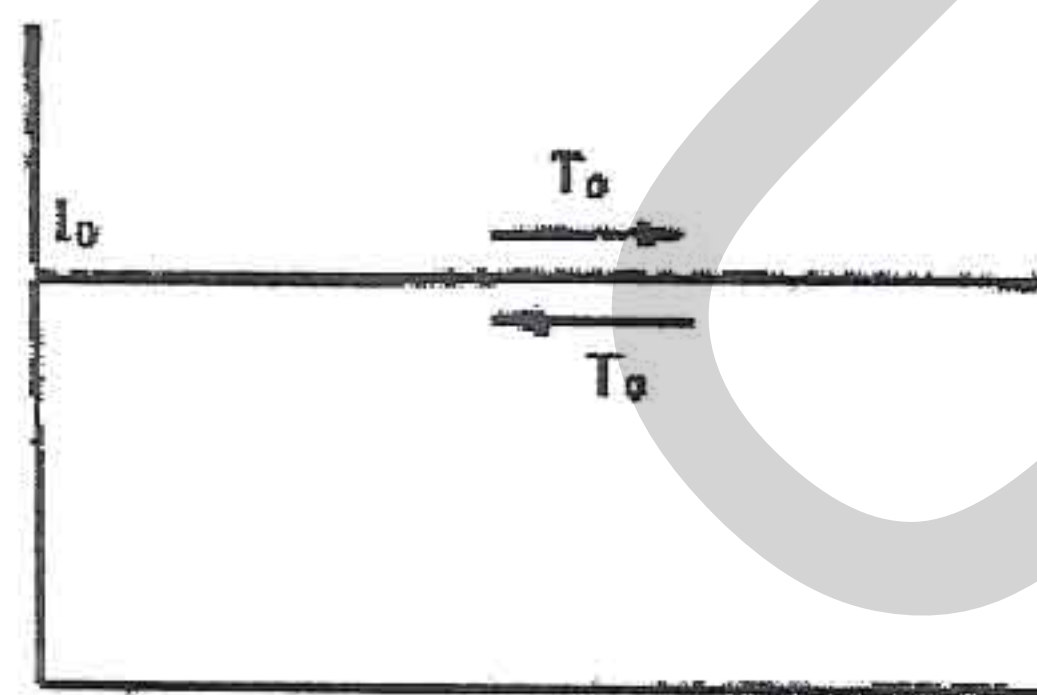
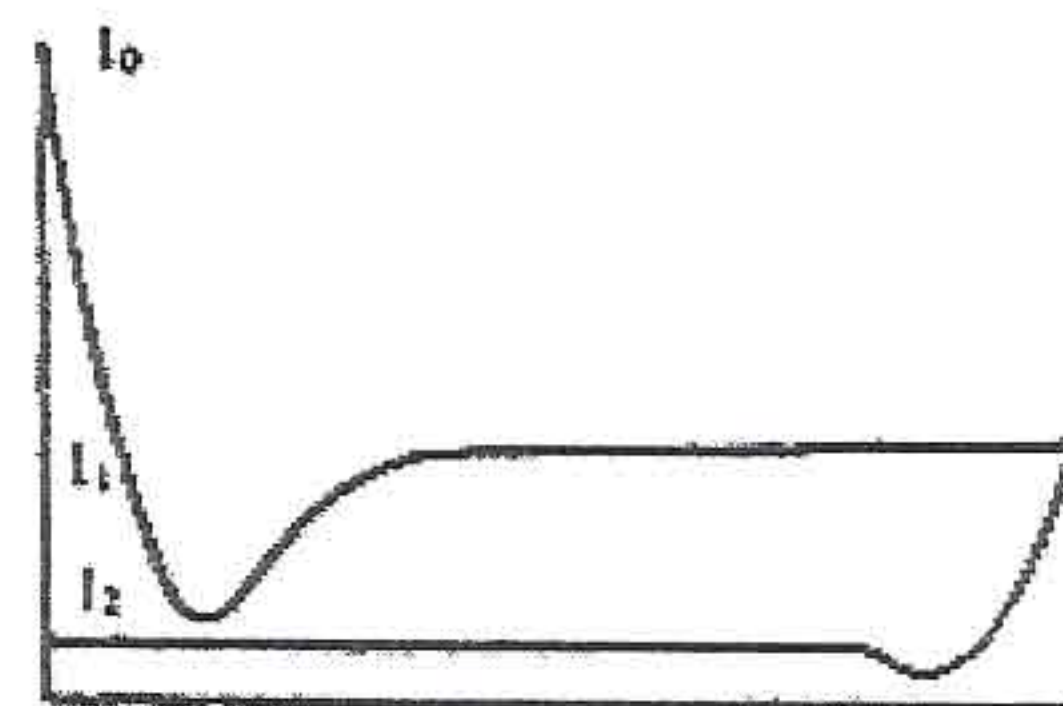
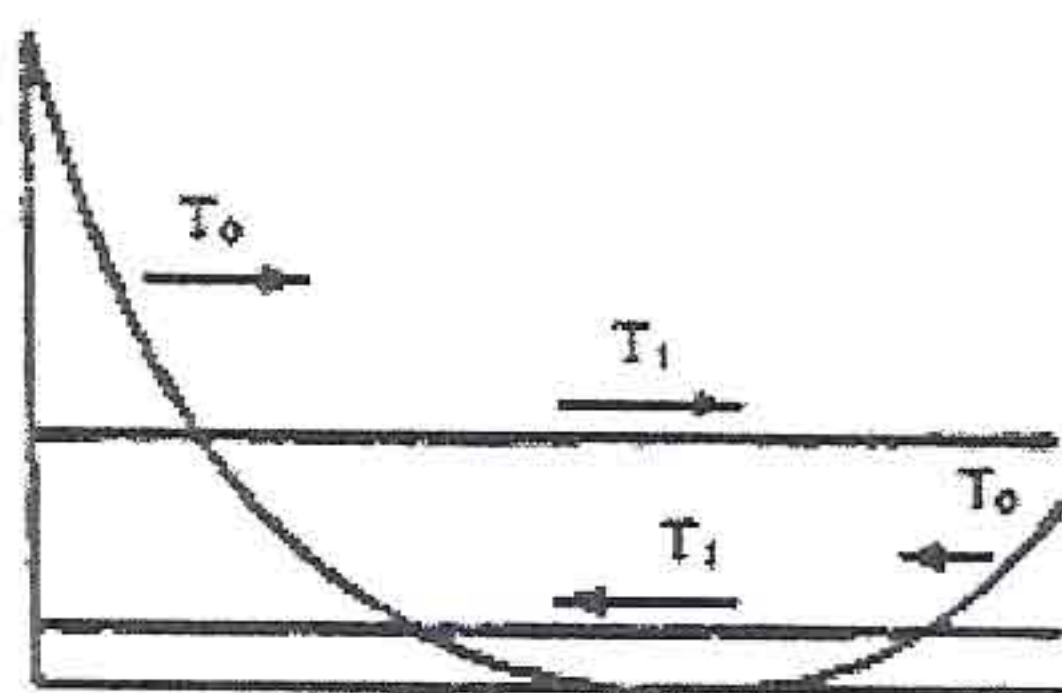
เกิดขึ้นตรงบริเวณกลาง ๆ ของขดลวดมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอตามที่เห็นจากผลการวัดในรูป (ข) หนึ่งตามคำอธิบายข้างบนนี้จะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นลวดเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นจะต้องมากเพียงพอ จึงจะทำให้เกิดกระแสที่บริเวณกลาง ๆ มีค่าสม่ำเสมอตามที่เห็นจากรูป (ข) และจากการทดลองพบว่าช่วงของค่า C และมุม α ที่ทำให้ได้กระแสใกล้เคียงกับรูป (ข) นั้นคือ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ และ $12^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$

เมื่อทำการพิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากรูปร่างของกระแสในรูป 2.4 จะพิจารณา ลักษณะเฉพาะของอินพุตอิมพีแดนซ์ของกรณีที่ C มีขนาดเล็กกว่า $2/3\lambda$ และกรณีที่ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ ได้ดังนี้คือ ตามรูป (ก) เมื่อความถี่เปลี่ยนไป ความยาวของเส้นลวดเมื่อเทียบกับ λ จะเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้กระแสของคลื่นยืนที่ปรากฏที่ขั้วอินพุตเปลี่ยนไป ผลก็คือทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป และการเปลี่ยนแปลงนี้ค่อนข้างจะมากซึ่งทำให้แบนวิดท์ในเชิงของอินพุตอิมพีแดนซ์มีขนาดแคบ

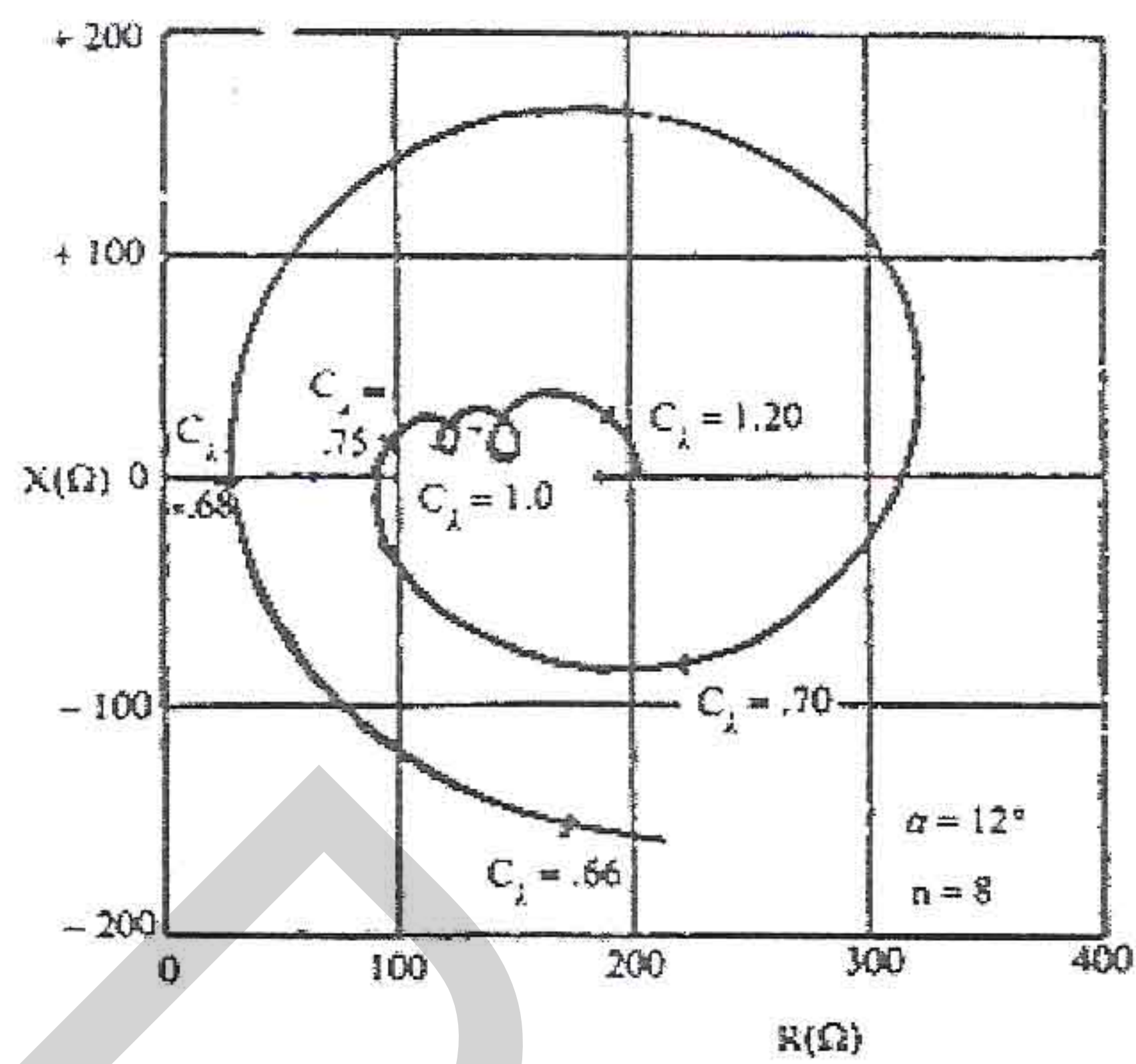
สำหรับในกรณีที่ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ นั้น จากรูป 2.4 (จ) จะเห็นได้ว่าที่ขั้วอินพุตกระแส ฆ่าไป กับกระแสที่สะท้อนกลับมามีขนาดต่างกันมาก ทำให้ผลกระทบจากการสะท้อนกลับของ กระแสตามความถี่มีน้อยด้วย ดังนั้นสายอากาศในเงื่อนไขดังกล่าวนี้มีแบนวิดท์ในเชิงอินพุตอิมพีแดนซ์กว้าง รูป 2.5 แสดงผลการวัดอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคซ์ตามโครงสร้างใน รูป (ก) ที่มี $\alpha = 12^\circ, n = 8$ และ $\alpha = 18^\circ, n = 5$ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่บริเวณ C/λ ต่ำกว่า 0.7 จะมีการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ค่อนข้างมาก และบริเวณที่ C/λ อยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 1.2 นั้น อินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่ารีแอคแตนซ์มาก และมีค่ารีซิสแตนซ์อยู่ในช่วง 100 ถึง 200 (Ω) สำหรับค่ารีซิสแตนซ์นี้จากผลการทดลองหลาย ๆ โครงสร้างพบว่าในเงื่อนไขต่อไปนี้คือ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ ค่ารีซิสแตนซ์ R จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$R = 140 \cdot C/\lambda \quad (2.2)$$

โดยมีความผิดพลาดอยู่ภายใน $\pm 20\%$

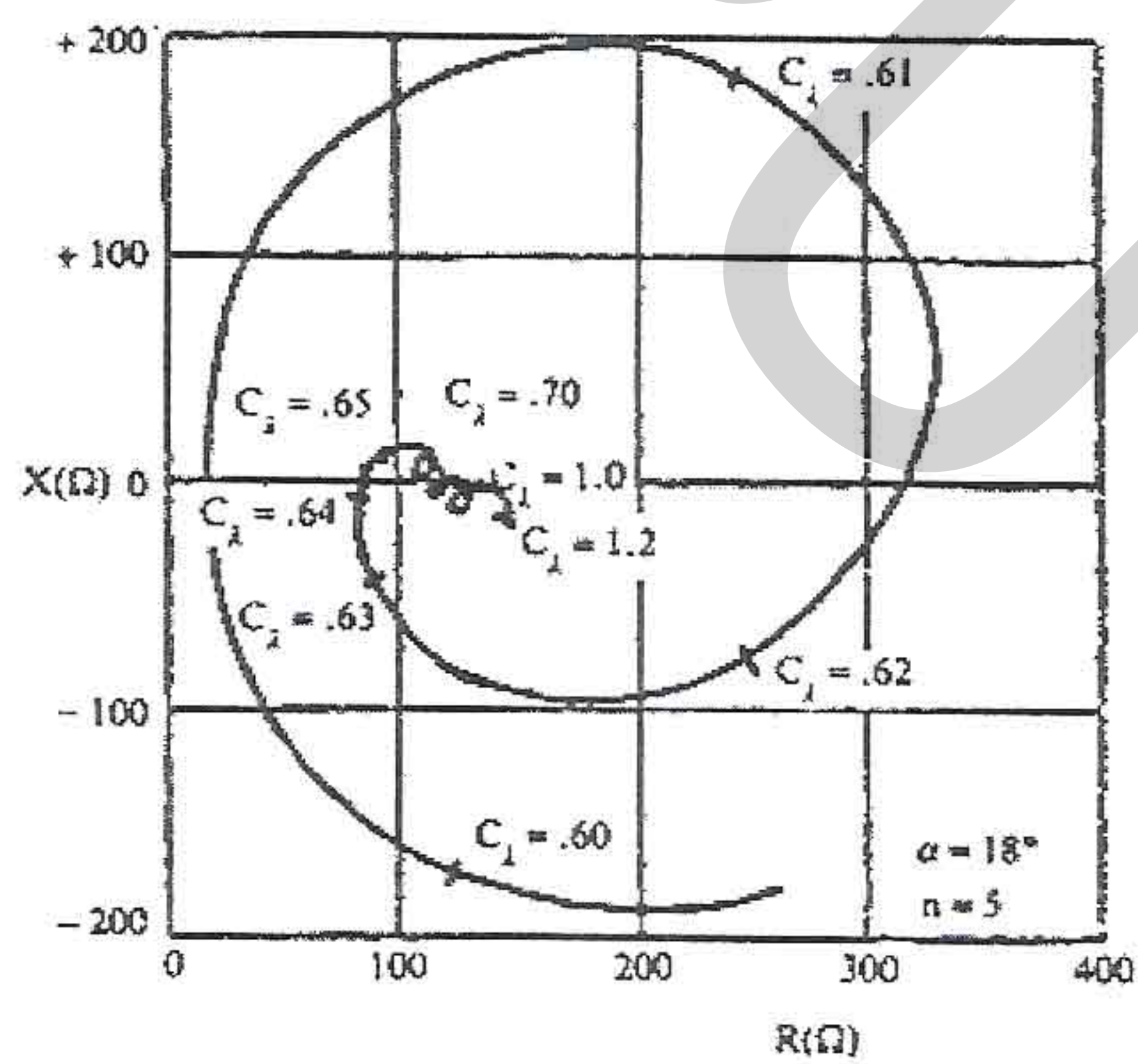
(ก) กรณีที่มีกระแสโหมด T_0 เป็นหลัก(ข) กรณีที่มีกระแสโหมด T_1 เป็นหลัก(ค) กระแสคลื่นจรรของกระแสโหมด T_0 (จ) กระแสคลื่นจรรของกรณที่มีโหมด T_1 เป็นหลัก (จ) กระแสรวมของกรณที่มีโหมด T_1 เป็นหลัก

รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลของกระแสบนสายอากาศเซลิคซ์ขนาดต่าง ๆ



$$C_1 = C/\lambda$$

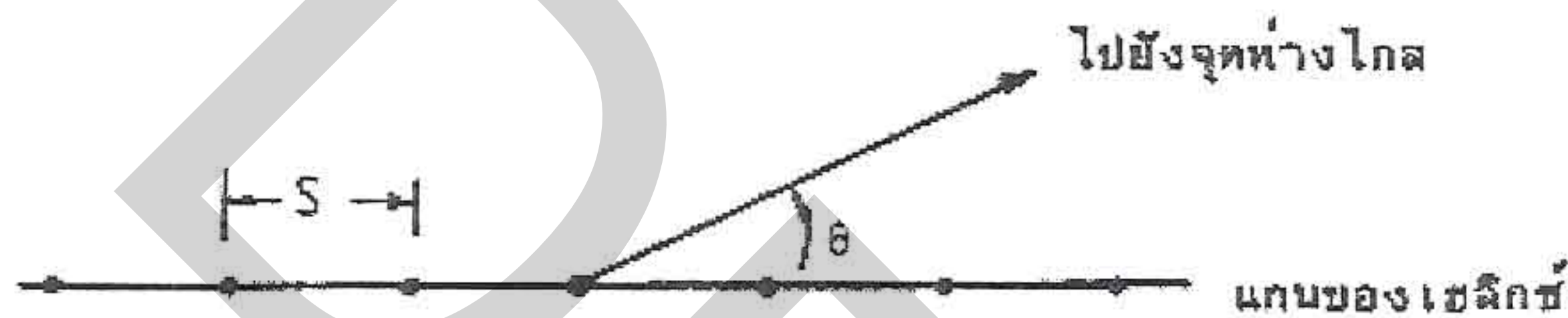
(n)



รูปที่ 2.5 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคัล

2.2.2 ความเร็วเฟสของกระแสนบนสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกน

ในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกไปจากสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกนนี้จำเป็นต้องรู้ความเร็วเฟสของกระแสที่ไหลบนสายอากาศ เพื่อให้การพิจารณาทำได้ง่ายจะใช้วิธีการประมาณค่าอันดับหนึ่ง กล่าวคือ สมมติให้กระแสที่ไหลบนสายอากาศอยู่ในรูปคลื่นจที่มีค่าสม่ำเสมอ การพิจารณาค่าความเร็วเฟสของกระแสที่ต้องการเพื่อให้สายอากาศเฮลิคซ์ทำงานในโหมดแนวแกนนั้นอาจจะพิจารณาได้โดยใช้หลักการของสายอากาศอะเรย์ดังนี้คือ ให้เส้นลวดแต่ละขดเป็นตัวประกอบของอะเรย์ ซึ่งจะทำให้แพทเทิร์นของการกระจายคลื่นเป็นผลคูณของแพทเทิร์นที่เกิดจากเส้นลวดหนึ่งขด กับอะเรย์แฟกเตอร์ ที่เกิดจากการเรียงตัวของกระแสนจุดที่วางห่างกัน S ดังที่แสดงไว้ในรูป 2.6 เพื่อให้



รูปที่ 2.6 การหาอะเรย์แฟกเตอร์ของสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกนโดยให้กระแสแบบจุดแทนเส้นลวดหนึ่งขด

แพทเทิร์นรวมชี้ไปในทิศแนวแกน แพทเทิร์นของอะเรย์แฟกเตอร์ก็ต้องชี้ไปในทิศแนวแกนด้วย อะเรย์แฟกเตอร์ในกรณีนี้จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$A_n(u) = \frac{\sin\left(\frac{nu}{2}\right)}{n \sin \frac{u}{2}} \quad (2.3)$$

โดยที่

$$u = kS \cdot \cos \theta + \delta \quad (2.4)$$

และ n เป็นจำนวนตัวประกอบ และ δ เป็นเฟสของตัวประกอบที่ i เมื่อเทียบกับตัวประกอบที่ $(i-1)$ ถ้าให้ความเร็วเฟสของกระแสนบนเส้นลวดเป็น

$$v = pc \quad (2.5)$$

จะสามารถเขียนสมการ 2.4 ในรูปต่อไปนี้

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \left(S \cos \theta - \frac{L}{p} \right) \quad (2.6)$$

เพื่อให้แพทเทิร์นของอะเรย์แฟกเตอร์ในสมการ 2.3 ชี้ไปในทิศแนวแกนหรือเป็นเอนด์ไฟร้อะเรย์ค่า u ในสมการ 2.6 ในทิศ $\theta = 0^\circ$ จะต้องเป็นดังนี้คือ

$$u = -2 \cdot \pi \cdot m \quad (2.7)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 2.7 พร้อมเงื่อนไข $\theta = 0^\circ$ ลงในสมการ 2.6 ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ดังนี้คือ

$$\frac{L}{p} = S + m\lambda \quad (2.8)$$

ในกรณีที่ $m = 1$ และ $p = 1$ ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ S ดังนี้คือ

$$L - S = \lambda \quad (2.9)$$

ในกรณีที่ $m = 1$ นี้ กระแสที่ไหลคือ โหมด T_1 และถ้า $m = 2$ กระแสที่ไหลก็จะเป็นโหมด T_2 ดังนั้นค่า m จึงเป็นค่าที่แสดงโหมดของกระแสที่ทำให้ได้แพทเทิร์นชี้ไปในแนวแกนด้วยอย่างไรก็ตามในกรณีที่ $m = 0$ นั้น ค่า p จะต้องใหญ่กว่า 1 จึงจะเป็นไปได้ เพราะถ้าค่า $p = 1$ จากสมการ 2.8 จะได้ว่า $L = S$ ซึ่งก็หมายถึงเส้นลวดถูกยึดเป็นเส้นตรงนั่นเอง และเนื่องจากจะไม่มีคลื่นกระจายออกไปในทิศแนวแกนของเส้นลวดเส้นตรง ดังนั้นในเงื่อนไขที่ $p = 1$ นี้ จะไม่มีคลื่นออกไปในทิศ $\theta = 0^\circ$

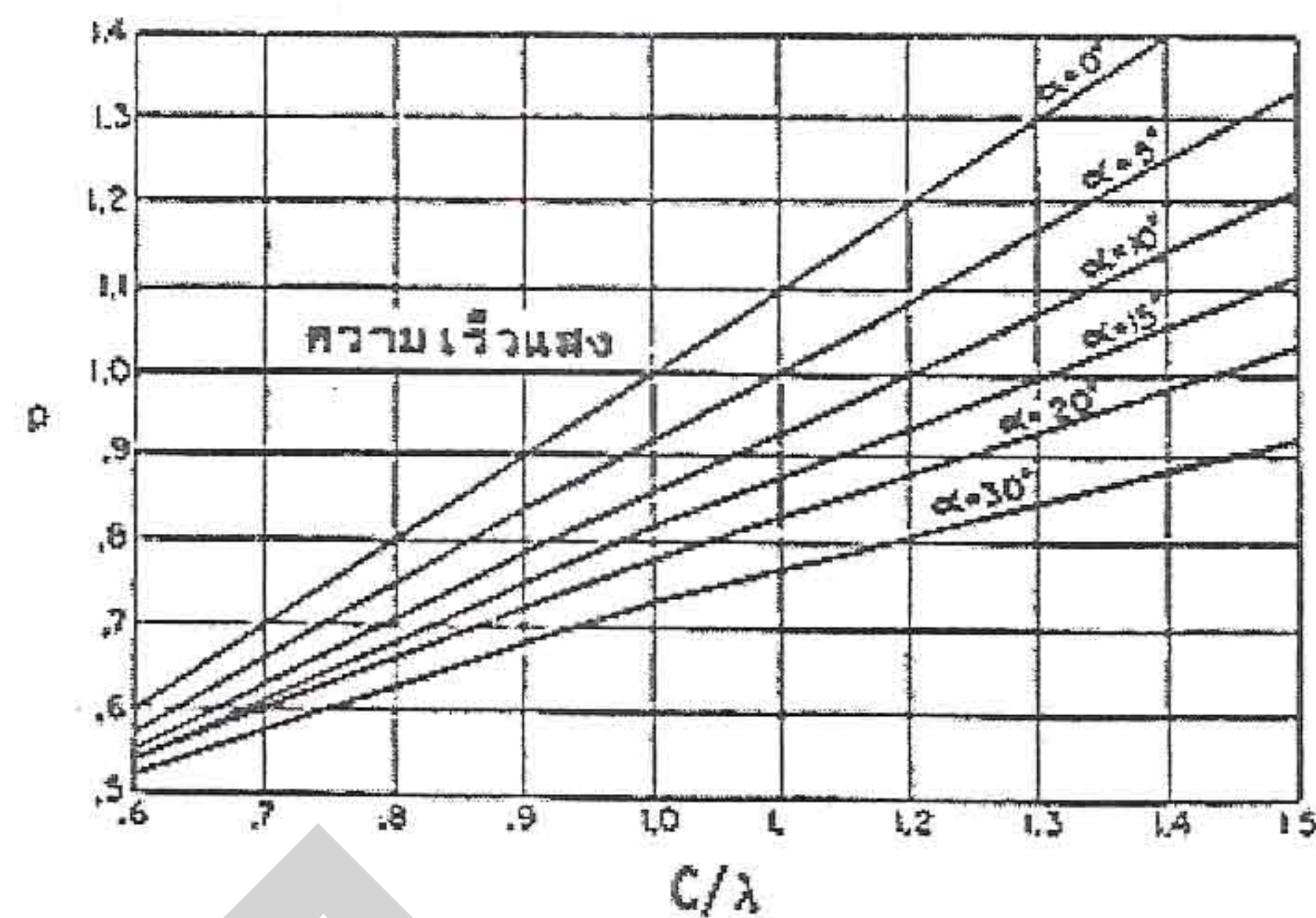
เนื่องจากโหมดที่มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นนั้น เป็นโหมด T_1 ดังนั้นจะขอพิจารณาเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับ p ในกรณีที่ $m = 1$ จากสมการ 2.8 จะสามารถเขียน p ได้ดังนี้คือ

$$p = \frac{L}{S + \lambda} \quad (2.10)$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในโครงสร้างตามสมการ 2.1 แล้วเขียนสมการ 2.10 ในรูปของ C จะได้เป็นดังนี้

$$p = \frac{1}{\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \lambda / C} \quad (2.11)$$

โดยรูป 2.7 แสดงผลการคำนวณค่า p โดยมี C/λ เป็นตัวแปรจากรูปจะเห็นได้ว่าที่บริเวณ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ และ $12^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$ ค่า p จะต่ำกว่า 1 ซึ่งจากการวัดก็ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้เล็กน้อย

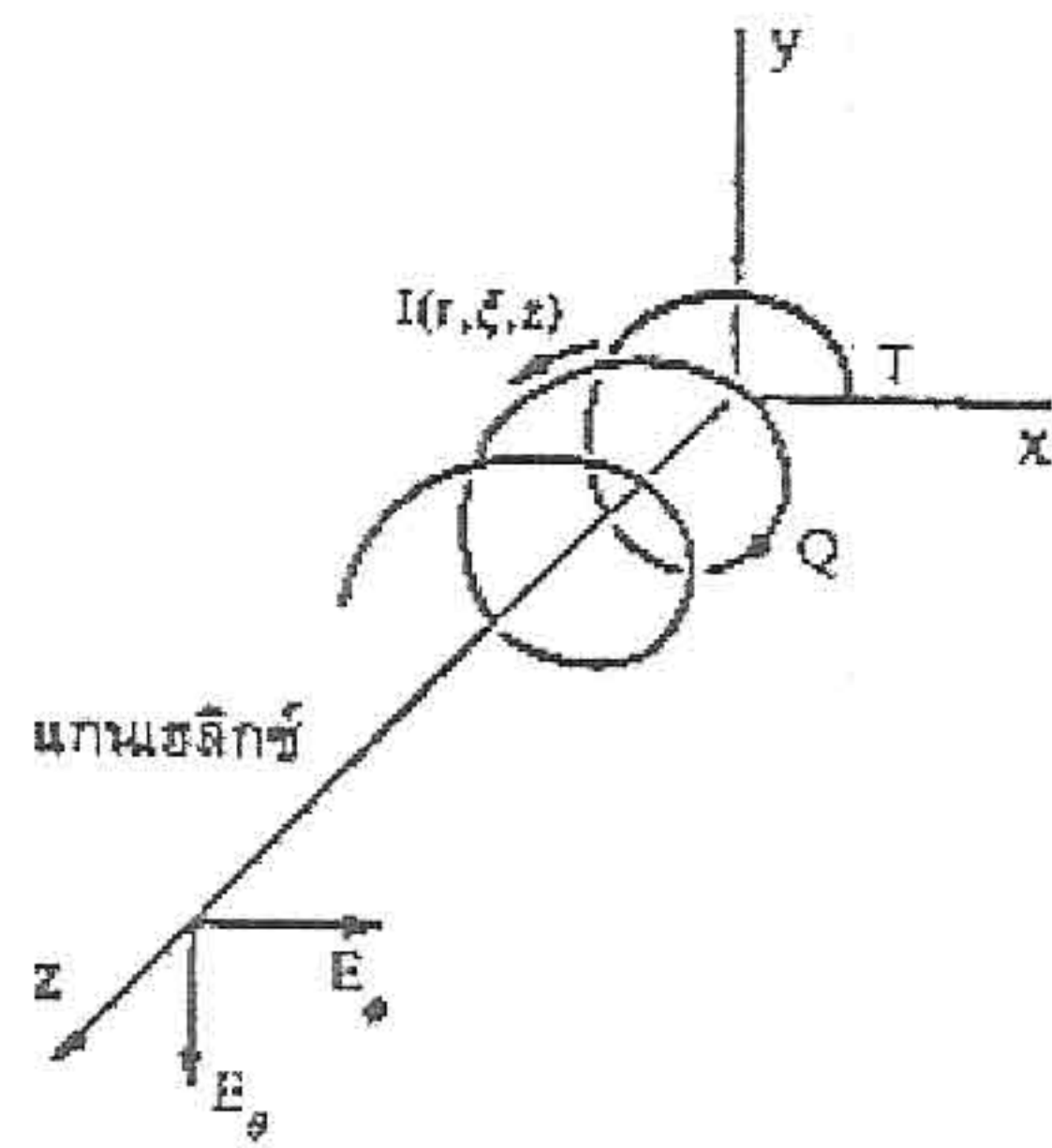


รูปที่ 2.7 อัตราส่วนระหว่างความเร็วเฟสในสายอากาศเฮลิคซ์กับความเร็วในกรณีที่สายอากาศทำงานในโหมดแนวแกน

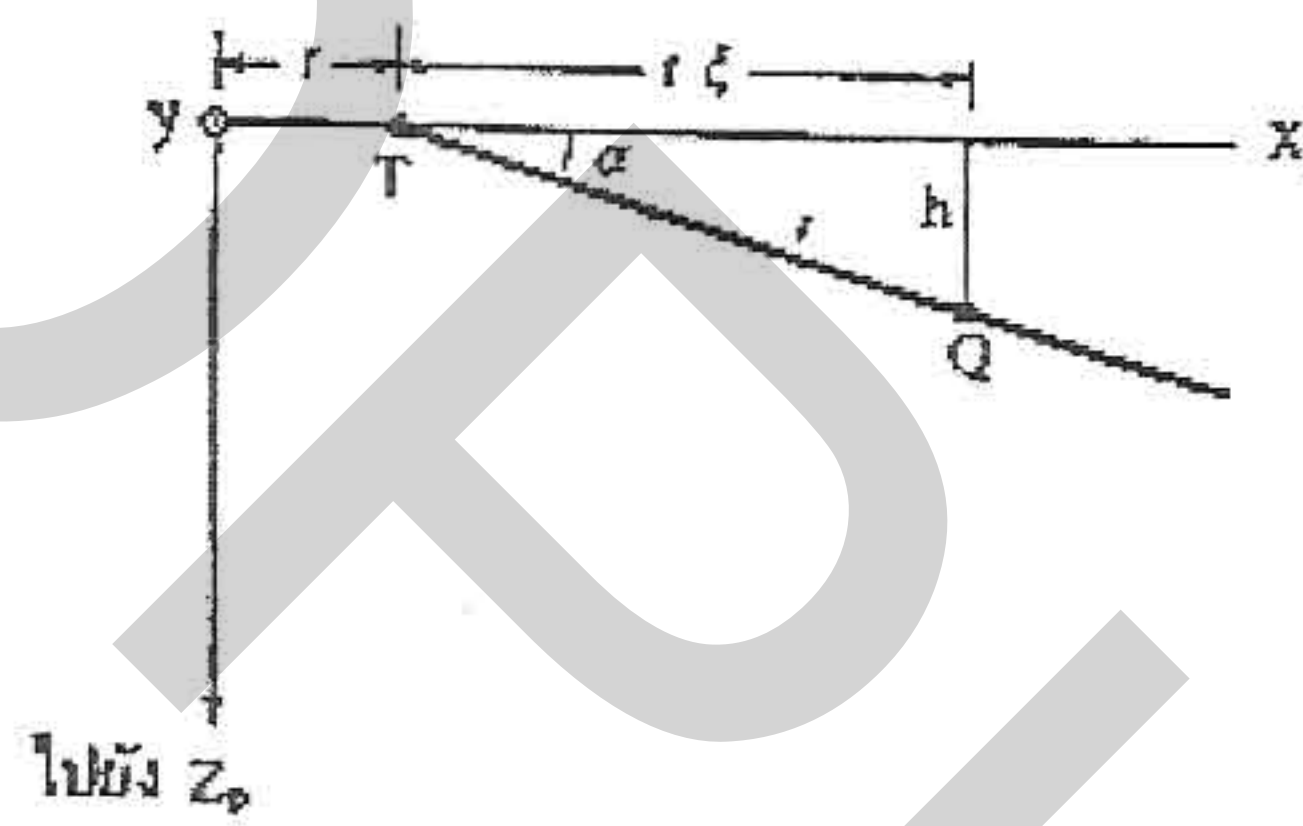
2.2.3 การกระจายคลื่นจากสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกน

การคิดการกระจายคลื่นจากสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกนนั้นจะทำได้โดยการใช้วิธีประมาณค่ากระแสให้อยู่ในรูปคลื่นจร และใช้ความเร็วเฟสของกระแสตามสมการ 2.10 หรือสมการ 2.11 ถ้าให้สายอากาศเฮลิคซ์วางตัวอยู่ในรูป 2.8 (ก) เมื่อแกนเส้นลวดออกไปในระนาบ $x-z$ จะได้เป็นรูป (ข) ส่วนรูป (ค) แสดงรูปสายอากาศที่มองจากแกน z ตรงจุด Q ตามรูป (ค) นี้ตำแหน่งจุด Q บนเส้นลวดอาจแสดงได้โดยใช้ระบบแกนประสานแบบทรงกระบอกเป็น (r, ξ, z) ถ้าให้ ℓ เป็นระยะทางตามเส้นลวดจากจุดต้นทาง T ถึงจุด Q จะได้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของตัวแปรต่างๆ ในรูปต่อไปนี้

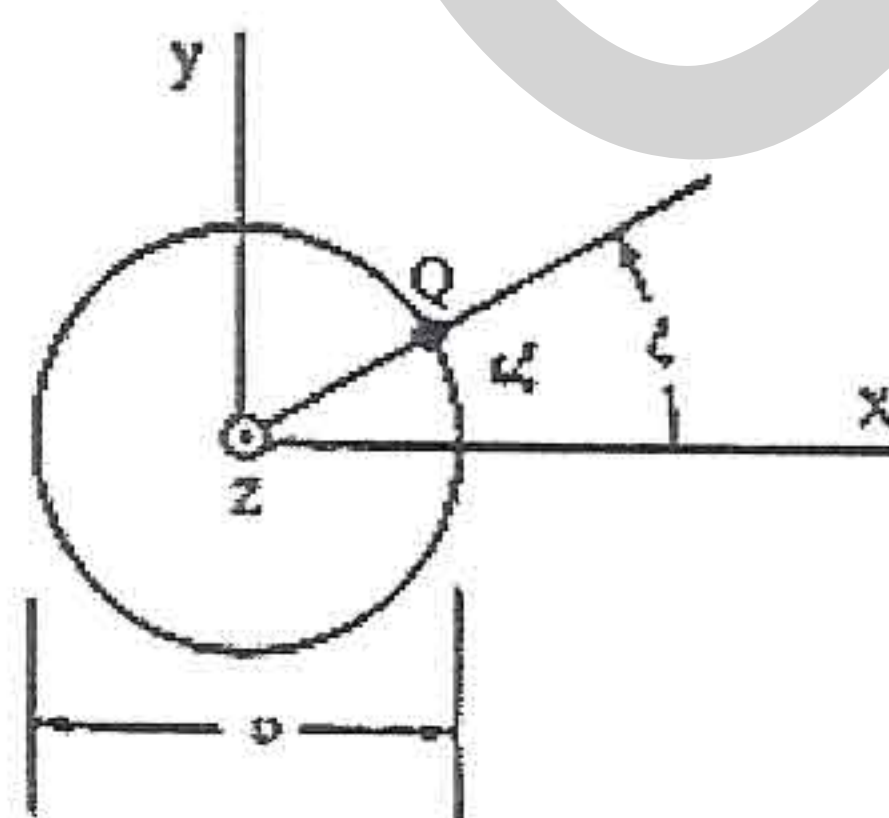
$$\begin{aligned} h &= \ell \sin \alpha \\ \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{S}{\pi D} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{r \xi}{\ell} \right) \\ r \xi &= \ell \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.12)$$



(ก) การวางตัวของสายอากาศ



(ข) เมื่อแผ่นเส้นลวดออกไปในระนาบ X-Z



(ค) เมื่อมองจากแกน Z

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสายอากาศเซลิซกับการพิจารณาทางไปยังจุดสังเกต

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะขอพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดห่างไกลบนแกน และให้ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงจุดสังเกตเป็น Z_p จะพบว่าระยะทางจากจุด Q ถึงจุดสังเกตเป็น ดังนี้คือ

$$Z_p - h = Z_p - \ell \sin \alpha \quad (2.13)$$

และกระแสที่ไหลตรงตำแหน่ง Q จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$I(r, \xi, z) = I_0 e^{-j \frac{2\pi}{\lambda p} \cdot \ell} \quad (2.14)$$

โดยที่ I_0 เป็นขนาดของกระแสคลื่นจร จากสมการ 2.13 และสมการ 2.14 ข้างบนจะสามารถ คำนวณหาสนามไฟฟ้า E_θ และ E_ϕ ในรูปต่อไปนี้เป็น

$$E_\theta = j30kI_0 \cos \alpha \frac{e^{-jkZ_p}}{Z_p} \int_0^{2\pi} \cos \xi \cdot e^{jk\ell(\sin \alpha - \frac{1}{p})} d\xi \quad (2.15)$$

$$E_\phi = j30kI_0 \cos \alpha \frac{e^{-jkZ_p}}{Z_p} \int_0^{2\pi} \sin \xi \cdot e^{jk\ell(\sin \alpha - \frac{1}{p})} d\xi \quad (2.16)$$

จาก $\ell \cos \alpha = r\xi$ ในสมการ 2.12 จะทำให้สามารถเขียน $k\ell(\sin \alpha - \frac{1}{p})$ ได้ในรูปต่อไปนี้เป็น

$$k\ell\left(\sin \alpha - \frac{1}{p}\right) = kr\xi\left(\tan \alpha - \frac{1}{p \cos \alpha}\right) \quad (2.17)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 2.17 ลงในสมการ 2.15 และสมการ 2.16 แล้วทำการอินทิเกรต จะได้ E_θ และ E_ϕ ในรูปต่อไปนี้เป็น

$$E_\theta = 30kI_0 \cos \alpha \cdot \frac{e^{-jkZ_p}}{Z_p} \cdot \frac{k'(e^{jk'2\pi} - 1)}{(k'^2 - 1)} \quad (2.18)$$

$$E_\phi = 30kI_0 \cos \alpha \cdot \frac{e^{-jkZ_p}}{Z_p} \cdot \frac{(e^{jk'2\pi} - 1)}{(k'^2 - 1)} \quad (2.19)$$

โดยที่

$$k' = kr\left(\tan \alpha - \frac{1}{p \cos \alpha}\right) = \frac{L}{\lambda}\left(\sin \alpha - \frac{1}{p}\right) \quad (2.20)$$

เมื่อนำสมการ 2.19 หาค่าด้วยสมการ 2.18 เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างโพลาไรเซชันในแกนหลัก (Axial ratio ย่อว่า AR) จะได้ผลดังนี้คือ

$$AR = \frac{|E_\phi|}{|E_\theta|} = \frac{|j|}{|k'|} = \frac{1}{|k'|} \quad (2.21)$$

จากสมการข้างบนจะเห็นได้ว่า ถ้า $|k'| = 1$ จะได้โพลาริเซชันแบบวงกลม ซึ่งจะเป็นแบบหมุนซ้ายหรือหมุนขวานั้นจะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ k' จากสมการ 2.20 เมื่อพิจารณาว่าในช่วงที่ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ ค่า p จะน้อยกว่า 1 ดังนั้น k' ก็ควรมีเครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งจะได้โพลาริเซชันวงกลมแบบหมุนขวา เงื่อนไขของโพลาริเซชันแบบวงกลมนี้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง p กับ L และ S ได้โดยสมการ 2.20 ดังนี้คือ

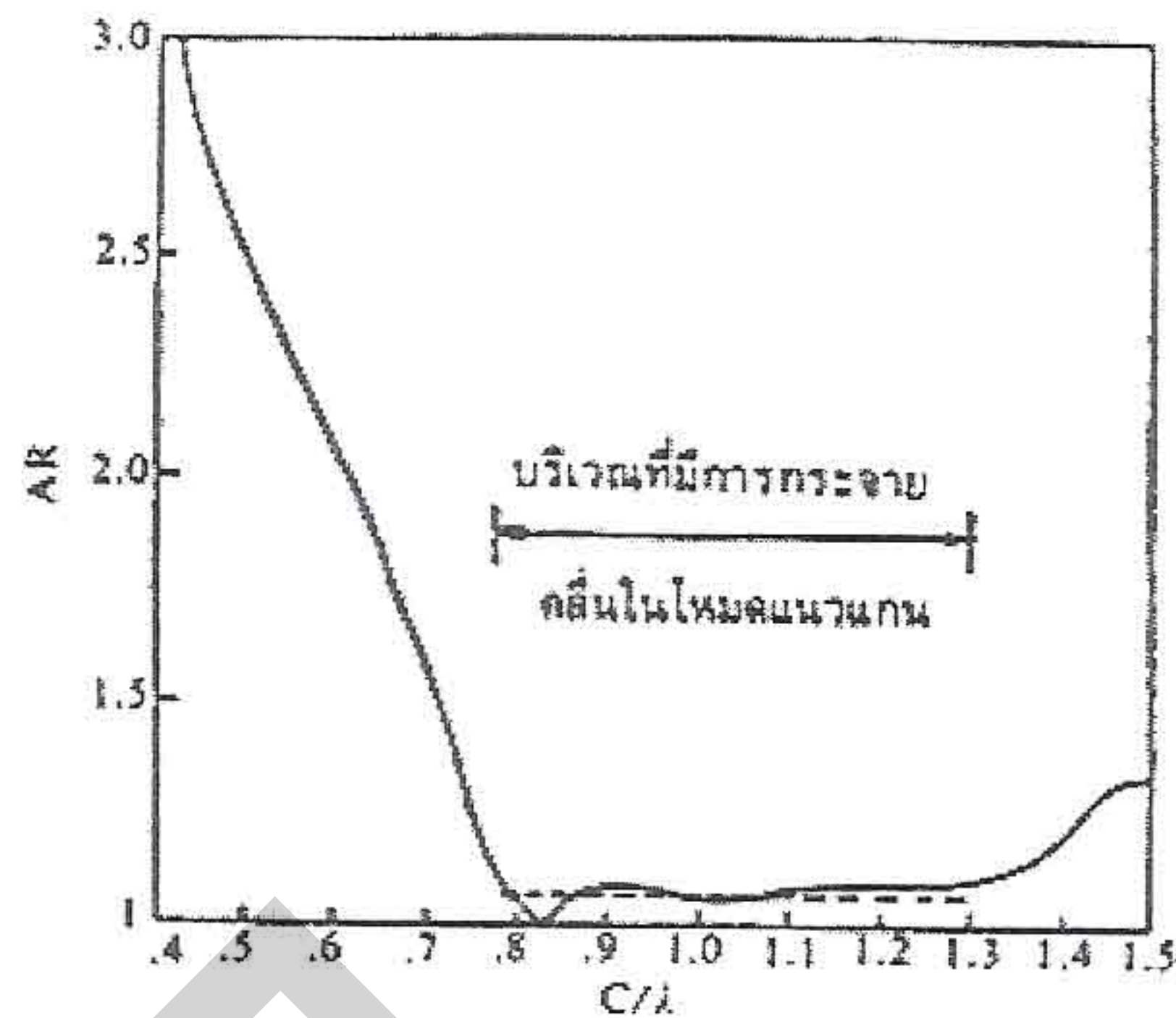
$$\frac{L}{\lambda} \left(\sin \alpha - \frac{1}{p} \right) = -1$$

$$p = \frac{L}{L \sin \alpha + \lambda} = \frac{L}{S + \lambda} \quad (2.22)$$

เงื่อนไขของ p ในสมการ 2.22 นี้จะตรงกับเงื่อนไขของ p ในสมการ 2.10 เพราะฉะนั้นสายอากาศเฮลิคซ์ที่มี C/λ ประมาณ 1 จึงสร้างคลื่นในแนวแกนที่มีโพลาริเซชันเป็นวงกลมหรือใกล้เคียงกับวงกลม รูปที่ 2.9 แสดงผลการคำนวณสมการ 2.21 โดยให้ค่า AR อยู่ระหว่าง 1 ถึง ∞ กล่าวคือ ถ้า $|E_\theta| > |E_\phi|$ ก็จะเป็นผลการคำนวณของ AR ในรูปต่อไปนี้

$$AR = \frac{|E_\theta|}{|E_\phi|} = |k'| \quad (2.23)$$

ผลการคำนวณในรูปที่ 2.9 เป็นกรณีที่สายอากาศมีโครงสร้างเป็น $\alpha = 13^\circ$ และ n เป็น 7 รอบ และใช้ค่า p ที่ได้จากการวัดในการคำนวณ จากรูปเห็นได้ว่าที่ค่า $C/\lambda = 0.83$ จะได้ AR เป็น 1 และในช่วงที่ C/λ มีค่าอยู่ระหว่าง $3/4$ ถึง $4/3$ ค่า AR จะต่ำกว่า 1.2



รูปที่ 2.9 ค่าอัตราส่วนของโพลาริเซชันในแกนหลักของสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกน

2.2.4 การออกแบบสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกน

จากคุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกนที่กล่าวมาข้างบนจะเห็นได้ว่าถ้าต้องการให้สายอากาศเฮลิคซ์โหมดแนวแกนทำงานในลักษณะที่ให้คลื่นโพลาริเซชันวงกลมในแนวแกนของเฮลิคซ์จะต้องออกแบบให้เส้นรอบวงของเฮลิคซ์ มุมพิตช์ และจำนวนรอบมีค่าดังนี้คือ

$$\left. \begin{aligned} 3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3 \\ 12^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ \\ n > 3 \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

เมื่อทำการเลือกค่าโครงสร้างตามเงื่อนไขข้างบนแล้วจะสามารถคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของการกระจายคลื่นโดยใช้ตาราง 2.1 ซึ่งเป็นสูตรที่ทำให้ง่ายเข้าโดยผลการทดลองประกอบในการจัดทำ ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จากสูตรต่าง ๆ เหล่านี้จะใกล้เคียงกับผลการทดลองในระดับที่ใช้งานได้

ตาราง 2.1 สูตรการคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ในการกระจายคลื่นของสายอากาศเฮลิคซ์โหมด
แนวแกน

อินพุตอิมพีแดนซ์	$140C/\lambda \ (\Omega)$
บีมวิทท์	$52\lambda/C \left\{ C\sqrt{n\frac{S}{\lambda}} \right\}$ องศา
ความสามารถในการชี้ทิศ	$15\left(\frac{C}{\lambda}\right)^2 \cdot n\frac{S}{\lambda}$ เท่า
อัตราส่วนระหว่างโพลาริเซชันในแกนหลัก	$\left \frac{L}{\lambda} \left(\sin \alpha - \frac{1}{p} \right) \right $