บทที่ 5

การออกแบบสายอากาศแบบคอร์รูเกตเต็อฮอร์น

การออกแบบสายอากาศแบบคอร์รูเกตเต็ดฮอร์นวงกลมที่จะกล่าวถึงในบทนี้ เป็นการออกแบบเพื่อใช้เป็นฟีดฮอร์น (FEED HORN) ระบบสายอากาศแบบแคสซีเกรนสำหรับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบแคสซีเกรนกว้างๆ ส่วนประกอบของฟีดฮอร์น ข้อควรคำนึงในการออกแบบ และการออกแบบ โดยในตอนท้ายจะเสนอวิธีการออกแบบคอร์รูเกตใช้กับสายอากาศแคสซีเกรน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 เมตร ที่ใช้กับระบบความถี่ 4/6 GH_z

5.1 โครงสร้างสายอากาศแบบแคสซีเกรน

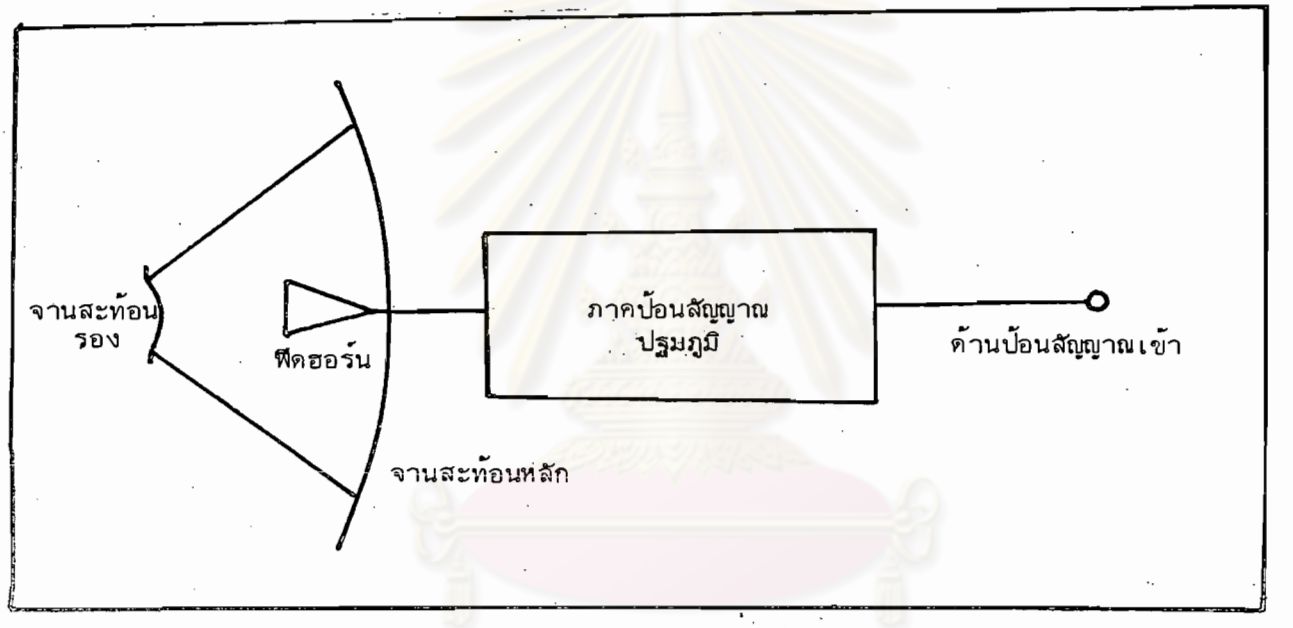
เนื่องจากการออกแบบสายอากาศแบบคอร์รูเกตเต็ดฮอร์นในบทนี้ เป็นการออกแบบเพื่อนำมาใช้เป็นฟีดฮอร์นในระบบสายอากาศแบบแคสซีเกรน ดังนั้นการพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ เพื่อประกอบการออกแบบจึงอยู่บนพื้นฐานนี้ กล่าวคือ เราต้องรู้องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องของสายอากาศแบบแคสซีเกรนก่อน

องค์ประกอบของระบบสายอากาศแบบแคสซีเกรน

1. จานสะท้อนหลัก (MAIN REFLECTOR)
2. จานสะท้อนรอง (SUB REFLECTOR)
3. อุปกรณ์ป้อนสัญญาณปฐมภูมิ (PRIMARY FEED)

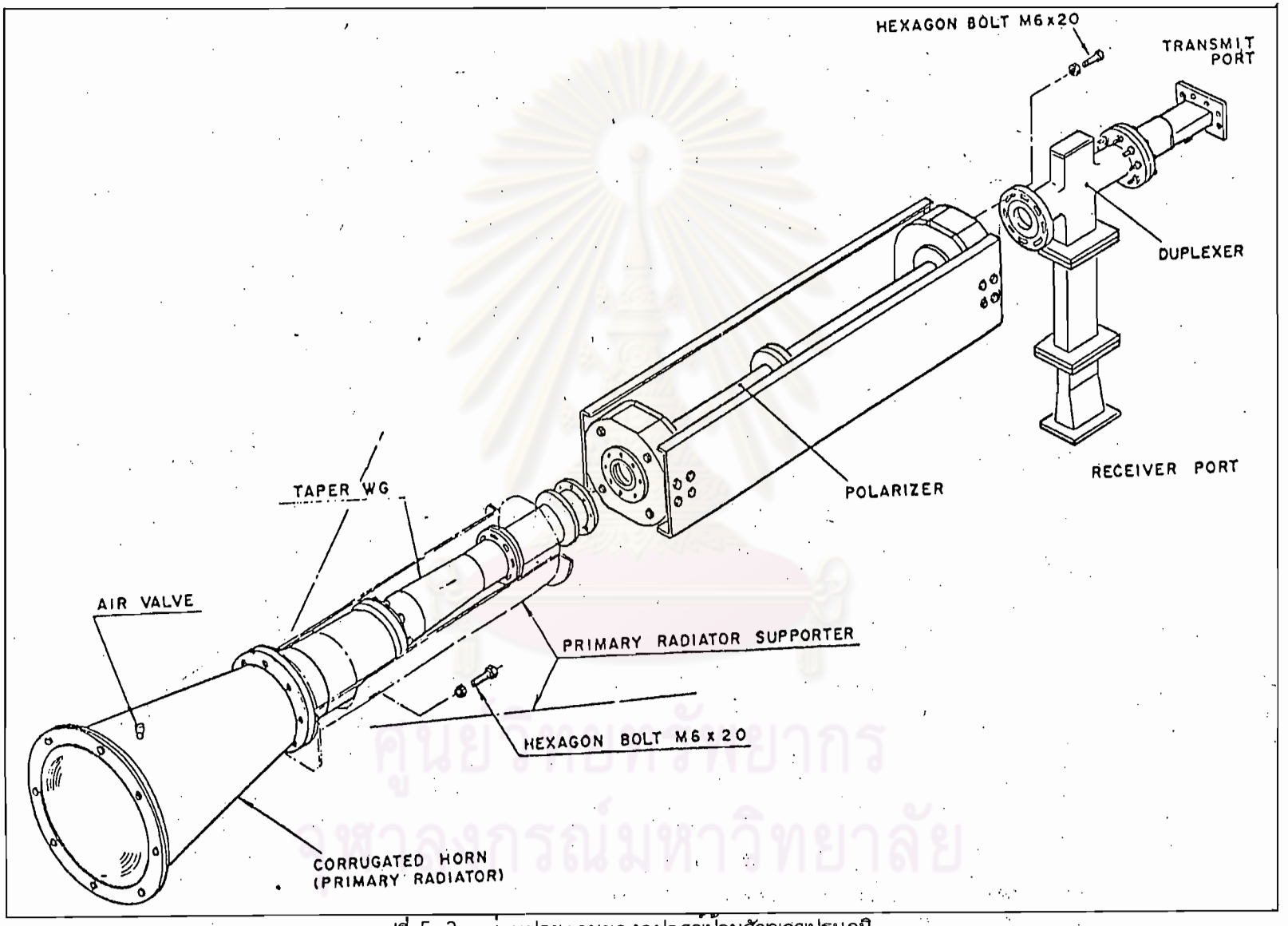
การจัดองค์ประกอบของระบบสายอากาศแบบแคสซีเกรน แสดงดังรูปที่ 5.1 จานสะท้อนหลักและจานสะท้อนรองจะถูกออกแบบให้ผิวโค้งของจานสะท้อนคลื่นทั้งสองให้เป็นรูปพาราโบลอยด์และไฮเปอร์โบลอยด์ตามลำดับ โดยทั่วไปจานสะท้อนคลื่นจะสร้างด้วยโลหะอลูมิเนียม หรือ ถ้าเป็นจานขนาดเล็กจะสร้างด้วยพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FIBRE-REINFORCED PLASTIC RESIN) ที่เคลือบด้วยละอองอลูมิเนียม (SPRAYED ALUMINIUM) ซึ่งมีคุณสมบัติสะท้อนคลื่นวิทยุได้ดี สำหรับอุปกรณ์ป้อนสัญญาณปฐมภูมิประกอบด้วยฟีดฮอร์น (FEED HORN) โพลาไรเซอร์ (POLARIZER) ดูเพล็กเซอร์ (DUPLEXER) และอุปกรณ์ขจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการ (REJECTION FILTER) ดังรูปที่ 5.2 ฟีดฮอร์นแบบคอร์รูเกตใช้เป็นอุปกรณ์แผ่คลื่นปฐมภูมิของระบบแคสซีเกรน โดยแพทเทอร์นการ

การแผ่คลื่นมีลักษณะสมมาตรทั้งในระนาบ E และระนาบ H ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูง โพลาไร-เซอร์ใช้งานได้ 2 อย่าง ในกรณีที่ทำงานด้วยโหมดขั้วคลื่นเชิงเส้นโพลาไรเซอร์จะหมุนขั้วคลื่นให้ปรับตัวเข้ากับดูเพล็กเซอร์ ในกรณีที่ทำงานด้วยโหมดขั้วคลื่นวงกลม โพลาไรเซอร์จะเปลี่ยนขั้วคลื่นจากเชิงเส้นเป็นวงกลมสำหรับการส่งและจากวงกลมเป็นเชิงเส้นสำหรับการรับ เมื่อระนาบเลื่อนเฟส (PHASE SHIFT PLANE) ทำมุม 45 องศา กับขั้วต่อด้านสัญญาณเข้าของดูเพล็กเซอร์ ระบบเลื่อนเฟสจะยังคงจัดตัวขนานกับขั้วด้านสัญญาณเข้านั้น สำหรับดูเพล็กเซอร์จะทำหน้าที่แยกการส่งและการรับสัญญาณไม่ให้มีการรบกวนกัน



รูปที่ 5.1 การจัดองค์ประกอบสำหรับสายอากาศแบบแคสซีเกรน

เนื่องจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจานสายอากาศ ทำได้โดยการปรับรูปร่างของจานสะท้อน (REFLECTOR SHAPING) เพื่อให้หน้าคลื่นที่กระจายออกจากระบบจานสายอากาศมีลักษณะสม่ำเสมอมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และลดพลังงานที่ล้นขอบจานสะท้อน (SPILLOVER POWER) ลงให้น้อยที่สุด สำหรับส่วนแผ่คลื่นปฐมภูมิควรจะออกแบบให้แพทเทอร์นการแผ่คลื่นที่ได้มีระดับพลังงานที่ขอบของจานสะท้อนรองมีระดับต่ำ



รูปที่ 5.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ป้อนสัญญาณปฐมภูมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

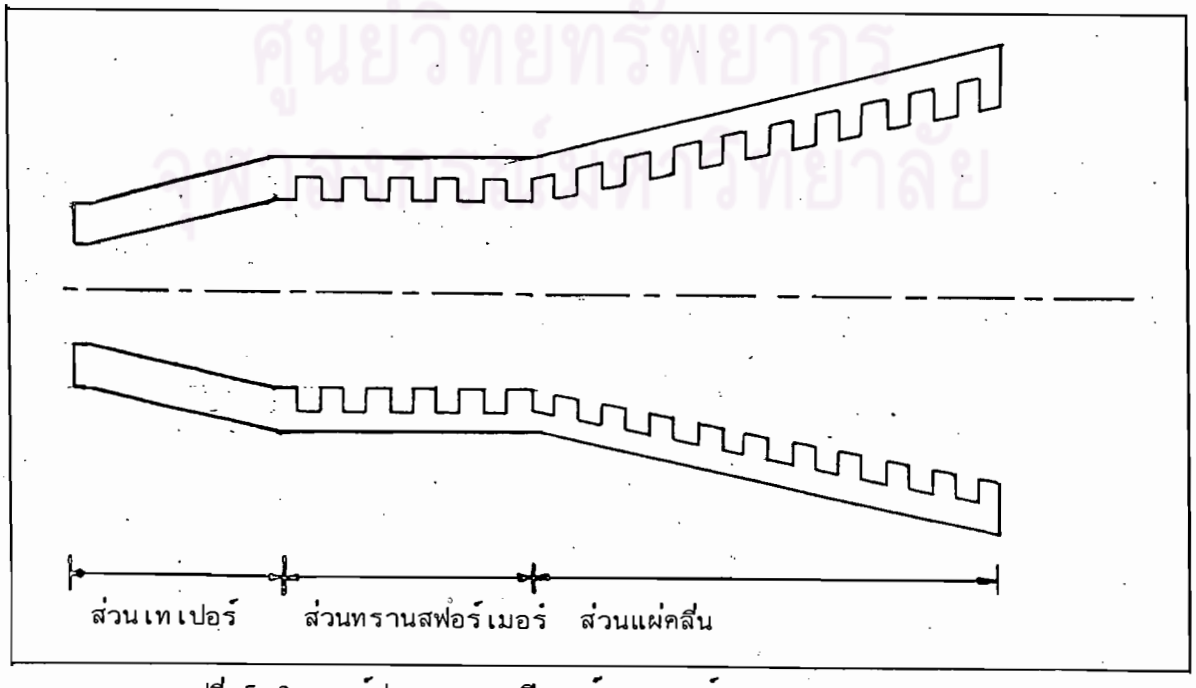
45

5.2 ส่วนประกอบของฟีดฮอร์น

โดยทั่วไปฟีดฮอร์นที่ใช้สายอากาศแบบแคสซีเกรนจะมีปากฮอร์นใหญ่กว่าขนาดของท่อนำคลื่นที่ต้นทางอยู่มาก ดังนั้นการต่อทั้งสองส่วนนี้เข้าด้วยกันในทันทีเลยนั้นจะทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนกลับมาก และเพื่อที่จะลดปัญหาดังกล่าวเราต้องมีท่อนำคลื่นเทเปอร์ (TAPERED WAVEGUIDE) มาต่อระหว่างท่อนำคลื่นกับฟีดฮอร์น เพื่อให้คลื่นที่ส่งผ่านภายในไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ส่วนต่อมาที่จะต้องพิจารณา คือ ช่วงต่อระหว่างท่อนำคลื่นผิวเรียบมาสู่ฟีดฮอร์นซึ่งเป็นผิวคอร์รูเกต ซึ่งในส่วนนี้ก็เช่นเกียวกันหากเอาท่อนำคลื่นเทเปอร์มาต่อกับฮอร์นโดยตรงก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดขึ้น เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้ก่อนที่จะส่งผ่านคลื่นเข้าสู่ฮอร์นจะมีท่อนำคลื่นที่ผิวภายในเป็นผิวคอร์รูเกต ซึ่งให้ทำหน้าที่ 2 ประการ ประการแรกให้ทำหน้าที่เป็นช่วงผ่านของคลื่นจากท่อนำคลื่นผิวเรียบมาสู่ท่อนำคลื่นคอร์รูเกต และประการที่สองเป็นส่วนที่ให้กำเนิดคลื่นไฮบริดในท่อนำคลื่น ตลอดจนควบคุมโหมดการส่งผ่านคลื่นเพื่อส่งต่อไปยังฮอร์น ดังนั้นรูปร่างของฟีดฮอร์นที่ควรจะเป็น จึงประกอบด้วย

1. ท่อนำคลื่นเทเปอร์ (TAPERED WAVEGUIDE) เป็นส่วนที่ต่อกับสัญญาณด้านเข้า
2. ท่อนำคลื่นคอร์รูเกต (CORRUGATED WAVEGUIDE) เป็นส่วนที่อยู่ระหว่างท่อนำคลื่นเทเปอร์กับฮอร์น เรียกว่าส่วนทรานสฟอร์เมอร์ (TRANSFORMER SECTION)
3. ฮอร์นแบบคอร์รูเกต (CORRUGATED HORN) เป็นส่วนแผ่คลื่นปฐมภูมิ (PRIMARY RADIATOR) เรียกว่าส่วนแผ่คลื่น (RADIATOR SECTION)

การแสดงส่วนประกอบดังกล่าวนี้ดูได้จากรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 องค์ประกอบของฟีดฮอร์นแบบคอร์รูเกต

5.3 ข้อควรคำนึงในการออกแบบ

ในการออกแบบมีส่วนที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

5.3.1 การคำนึงถึงลักษณะสมบัติของฟีดฮอร์น

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในด้านคุณสมบัติสำหรับการออกแบบฟีดฮอร์น ได้แก่ การทำความเข้าใจปรากฏการณ์การส่งผ่านคลื่นภายในฟีดฮอร์นที่ผนังภายในเป็นผิวคอร์รูเกต ซึ่งพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของ $k_{co}a$ เมื่อความถี่แปรค่าไป โดยในบทที่ 2 ได้แสดงคุณสมบัติของ $k_{co}a$ ไว้ว่าค่า $k_{co}a$ เปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความถี่ และมิติทางกายภายของฟีดฮอร์น ได้แก่ รัศมี ระยะพิตช์ ระยะสล๊อต โดยจะให้การตอบสนองต่อความถี่ดีที่สุดเมื่ออัตราส่วนระยะสล๊อตต่อระยะพิตช์มีค่าเท่ากับ 1 และค่า $k_{co}a$ นี้จะแปรค่าอยู่ระหว่าง 2.405 ถึง 1.841 ในขณะที่ความถี่เปลี่ยนไปประมาณ 1 ออคเตฟ ขณะที่ค่า $k_{co}a$ เท่ากับ 2.405 นั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับบทที่ 3 จะพบว่าการส่งผ่านคลื่นจะอยู่ในสภาวะไฮบริดสมดุลย์เมื่อ $\alpha = 1$ ซึ่งจะให้คุณสมบัติการกระจายสนามบนช่วงเปิดเป็นขั้วคลื่นเชิงเส้น และใกล้เคียงกับฟังก์ชั่นเกาเซียน ซึ่งให้แพทเทอร์นการแผ่คลื่นที่มีลักษณะสมมาตรและสอดคล้องกับความลึกของสล๊อตเท่ากับ $\lambda/4$ เมื่อรัศมีมีขนาดใหญ่ ซึ่งดูได้จากโลกัสของค่าศูนย์ครั้งที่หนึ่งของโหมด EH_{11} ในรูปที่ 3.1 ส่วนค่า $k_{co}a$ เท่ากับ 1.841 จะให้คุณสมบัติเหมือนท่อนำคลื่นผิวเรียบธรรมดา และจะสอดคล้องกับความลึกของสล๊อตเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งดูได้จากโลกัสของค่าโพลครั้งที่หนึ่งของโหมด EH_{11} ในรูปที่ 3.1 โดยทั่วไปเราต้องการออกแบบฟีดฮอร์นให้มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อความถี่ได้ดีที่สุด และให้ได้แพทเทอร์นการแผ่คลื่นที่มีลักษณะสมมาตรที่สุดเท่าที่จะทำได้ในช่วงแถบความถี่ที่กว้าง ตัวอย่างเช่น ในระบบ 4/6 GH_z เราต้องกำหนดความถี่ทำงานในแถบความถี่ 4 GH_z ให้สอดคล้องกับค่า $k_{co}a$ เท่ากับ 2.405 มากที่สุด และควบคุมให้ค่า $k_{co}a$ นี้แปรผันไปน้อยที่สุดในช่วงความถี่จาก 4 GH_z ถึง 6 GH_z ซึ่งทำได้โดยจัดโครงสร้างคอร์รูเกตให้ระยะสล๊อตต่อระยะพิตช์มีค่าใกล้ 1 มากที่สุดเท่าที่จะทำได้นั่นเอง และเนื่องจากฮอร์นที่ออกแบบนี้ใช้ทำหน้าที่เป็นภาคฟีดฮอร์นของระบบสายอากาศแบบแคสซีเกรน ดังนั้นต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่อง VSWR (VOLTAGE STANDING WAVE RATIO) ระหว่างท่อนำคลื่นผิวเรียบกับฟีดฮอร์นซึ่งเป็นผิวคอร์รูเกตด้วย โดยต้องพยายามให้มีค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ โดยเงื่อนไขที่เป็นไปได้สำหรับกรณีนี้คือ ให้อัตราส่วนระยะสล๊อตต่อระยะพิตช์, S/D, น้อยกว่า 1 มากๆ ที่บริเวณใกล้รอยต่อ เพราะเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.2 จะพบว่าที่ S/D = 0.25 การแปรผันของ $k_{co}a$ เทียบกับ $k_{co}a = 1.841$ จะน้อยกว่ากรณีที่ S/D มีค่า 0.75 และ 1 มาก

5.3.2 การคำนึงถึงประสิทธิภาพของช่องเปิด (APERTURE EFFICIENCY)

เนื่องจากกำลังของลำคลื่นที่มาตกกระทบบนจานสะท้อนรอง เมื่อเทียบกับกำลังที่แผ่ออกจากฟีดฮอร์นจะต้องมีค่าสูง จึงจะทำให้อัตราขยาย (GAIN) ของระบบแคสซีเกรนมีค่าสูง ซึ่งจะทำได้ดีก็ต่อเมื่อตำแหน่งของฮอร์นและจานสะท้อนรองอยู่ใกล้กันมากๆ แต่ก็จะเกิดปัญหาขึ้นกล่าวคือ เมื่ออยู่ใกล้กันมากฟีดฮอร์นจะไปกั้นลำคลื่นที่จะไปตกกระทบบนจานสะท้อนหลัก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของช่องเปิดลดลงอีก ดังนั้นจึงต้องประนีประนอมผลที่เกิดขึ้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยลำคลื่นที่แผ่จากฟีดฮอร์นนั้นจะต้องให้ความกว้างของลำคลื่น (BEAMWIDTH) ไม่กว้างเกินไปจนทำให้เกิดลำคลื่นล้นขอบจาน (SPILLOVER) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากฮอร์นกับระยะห่างระหว่างปากฮอร์นถึงจานสะท้อนรองต้องอยู่ในระยะที่เหมาะสม โดยพยายามให้อยู่ในเงื่อนไขที่เกิดการกั้นลำคลื่นน้อยที่สุด ซึ่งการประนีประนอมผลดังกล่าวพิจารณาได้จากแพทเทอร์นการแผ่คลื่น ซึ่งแสดงออกด้วยค่าพารามิเตอร์ t เมื่อ $t > 0$, มุมของแพทเทอร์นการแผ่คลื่น (RADIATION PATTERN ANGLE), θ', ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากฮอร์น ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะสามารถนำมากำหนดรูปร่างของฟีดฮอร์นที่เหมาะสมได้ กล่าวคือให้แพทเทอร์นตามที่ต้องการและอยู่ในเงื่อนไขที่เกิดการกั้นลำคลื่นน้อยที่สุด ในการคำนึงถึงพารามิเตอร์ t นั้นพิจารณาได้ว่าเมื่อ $t > 0$ แสดงถึงว่ารูปร่างของฮอร์นได้เข้ามามีบทบาทต่อแพทเทอร์นการแผ่คลื่นแล้ว กล่าวคือจะทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนเฟสอันเนื่องมาจากขนาดความยาวอันจำกัดของฮอร์น และระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของช่องเปิดไปยังจานสะท้อนรองมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับรัศมียกกำลังสอง จากแพทเทอร์นรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อ t มีค่ามากขึ้น ความกว้างของลำคลื่น (BEAMWIDTH) จะกว้างขึ้น ซึ่งไม่เป็นผลดีเพราะจะทำให้เกิดลำคลื่นล้นขอบจานมาก และนอกจากนี้ยังเกิดปัญหาเรื่องการแปรผันของเฟส (PHASE VARIATION) อันเนื่องมาจาก $t > 0$ เมื่อความถี่เปลี่ยนไปอีกด้วย จากคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของการส่งผ่านคลื่นเมื่อความถี่เปลี่ยนไป จากหัวข้อ 5.3.1 เราสนใจการแปรผันในช่วง 1 ออคเตฟ ดังนั้นและโดยที่ t เป็นฟังก์ชั่นที่แปรผันตรงกับความถี่ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนของความถี่ในช่วง 1 ออคเตฟ จะให้ $t = 0.5$, 1.0 และ 0.2 จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าจะเกิดความคลาดเคลื่อนเฟสสัมพัทธ์ (RELATIVE PHASE ERROR) โดยคิดเปรียบเทียบกับเฟสที่ $U = 0$ เมื่อ $t = 0.5$ ขณะที่ความแรงสัญญาณ -10 dB จะพบว่าที่ $t = 0.5$ ให้ความคลาดเคลื่อนเฟส 40 องศา หากเพิ่มความถี่ขึ้นไปอีก 1 ออคเตฟ ที่ $t = 1.0$ จะพบว่าความคลาดเคลื่อนเฟสลดลงเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเทียบกับ $U = 0$ และ $t = 0.5$ และเมื่อเพิ่มความถี่ไปอีก 1 ออคเตฟ ที่ $t = 2.0$ จะพบว่าเกิด

ผลในทำนองเดียวกัน ถ้าพิจารณาร่วมกันเมื่อ t = 0.25, 0.3 และ 0.4 จะเห็นว่ามีความต่างเฟสเทียบกันเมื่อ t = 0.5 เท่ากับ 25.39, 20.4 และ 9.747 องศา ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในแง่การเปลี่ยนแปลงของเฟส จะเห็นว่าค่า t ไม่ควรจะน้อยกว่า 0.4 ในทางปฏิบัติเช่นในระบบสายอากาศที่ต้องการแถบคลื่นกว้าง เช่น ในระบบ 4/6 GH_z เราไม่ต้องการให้เฟสเปลี่ยนแปลงไปมากนักเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 4 GH_z ไปเป็น 6 GH_z ดังนั้นจึงต้องพยายามหาระดับที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงของเฟสมีน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่นี้จะพบว่าที่ระดับความแรงสัญญาณที่เหมาะสม คือ ประมาณ -10 dB แต่อย่างไรก็ตามความกว้างของลำคลื่นที่ได้ในกรณีนี้ยังแคบอยู่เมื่อดูจากพลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกจากฟีดฮอร์น ดังนั้นเมื่อต้องการให้ประสิทธิภาพที่ช่องเปิดสูงก็ต้องยอมให้ความกว้างของลำคลื่นกว้างกว่านี้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนเฟสก็จะมากขึ้นตามมาด้วย ซึ่งระดับความแรงสัญญาณที่พอจะเป็นไปได้ไม่ควรจะต่ำกว่า -20 dB เพราะจะมีผลกระทบจากโลบข้างเคียงได้ เนื่องจากกรณีเมื่อ t = 0 ระดับโลบข้างเคียงจะมีขนาดตั้งแต่ -20 dB ถึง -31.75 dB เมื่อ χ แปรค่าจาก 1.841 ถึง 2.405 ตามลำดับ ดังนั้นในการออกแบบเราจึงเลือกค่า t ไม่ควรจะน้อยกว่า 0.4 เพราะการแปรผันของเฟสสูงมาก แต่ก็ไม่ควรจะมากเกินไป เพราะจะทำให้ความกว้างของลำคลื่น (BEAMWIDTH) กว้างเกินไปจนทำให้เกิดลำคลื่นล้นขอบจานได้ โดยหลักการนี้ทำให้เราสามารถออกแบบฮอร์นที่ให้ประสิทธิภาพที่ช่องเปิดได้

5.4 การออกแบบ

5.4.1 จุดมุ่งหมายของการออกแบบฟีดฮอร์น

ฟีดฮอร์นที่จะออกแบบนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำมาใช้ประกอบกับระบบจานสะท้อนของสายอากาศแคสซีเกรน ซึ่งมีขนาดแน่นอนอยู่แล้ว โดยทำการเลือกชุดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ ตำแหน่งของปากฮอร์น เส้นผ่าศูนย์กลางของปากฮอร์น และมุมบานของฮอร์น เป็นต้น เพื่อให้ได้แพทเทอร์นที่ต้องการ

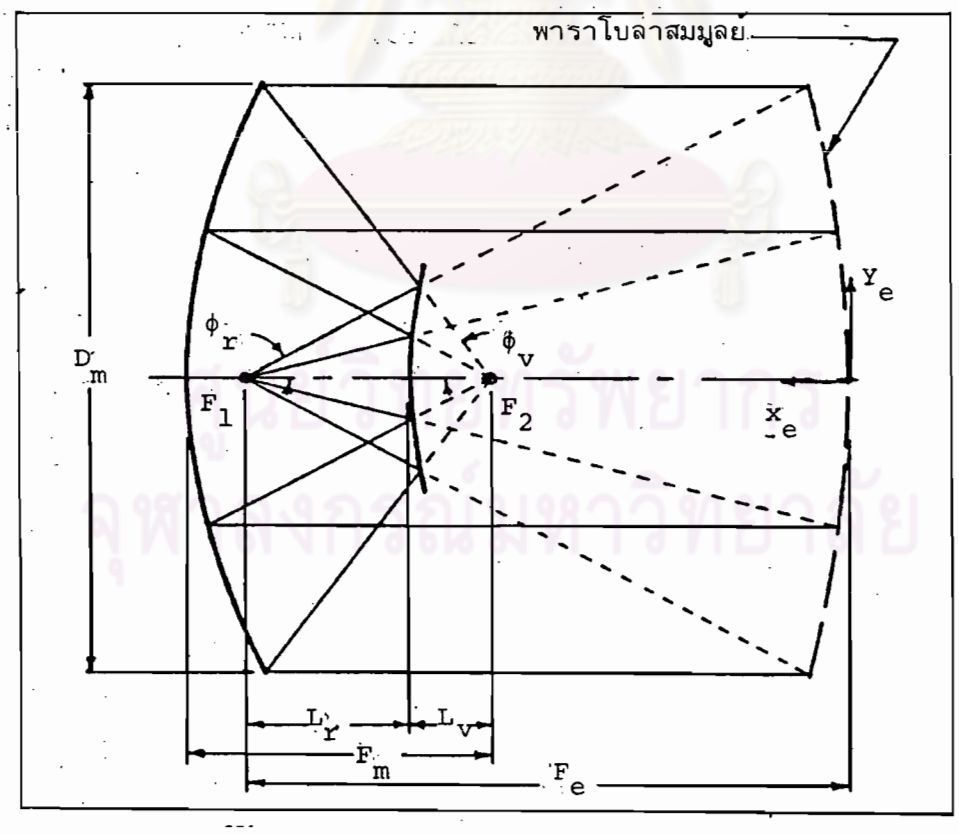
5.4.2 ข้อกำหนดเบื้องต้น

ในที่นี้จะกำหนดเงื่อนไขว่า มิติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมากๆ เพื่อจะได้สามารถใช้การพิจารณาเชิงแสง (OPTICAL CONSIDERATION) ได้ หากมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ในเชิงคลื่น (WAVE ANALYSIS) แพทเทอร์นการแผ่คลื่นที่ก่อรูปขึ้นที่จานสะท้อน

หลักหลังจากการแผ่คลื่นจากฟีดฮอร์นผ่านจานสะท้อนรองเป็นแพทเทอร์นของสนามเสี้ยวเบนในโซนเฟรสเนล (FRESNEL DIFFRACTION PATTERN)[14,15] โดยที่ฮอร์นที่ต้องการสร้างมีลักษณะสมมาตร มุมบานมีค่าไม่มากนัก และศูนย์กลางเฟส (PHASE CENTER) อยู่บนช่องเปิด โดยมีแพทเทอร์นการแผ่คลื่นเมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกลมีลักษณะสมมาตรรอบแนวแกน

5.4.3 วิธีการออกแบบ

วิธีการออกแบบทำได้โดยใช้แนวความคิดเกี่ยวกับพาราโบลาสมมูลย์ (EQUIVALENT PARABOLA) ที่เสนอโดย HANNAN [14] ซึ่งเป็นการแปลงระบบสายอากาศแบบแคสซีเกรนให้เป็นระบบจานสะท้อนพาราโบลาเดี่ยวแบบฟีดที่ตำแหน่งโฟกัส (PRIME FOCUS FEED PARABOLIC REFLECTOR) ดูรูปที่ 5.4 โดยจุดโฟกัสของพาราโมลาสมมูลย์ คือ จุดโฟกัสจริง (REAL FOCUS) ของระบบแคสซีเกรน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพาราโมลาสมมูลย์มีขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของจานสะท้อนหลักของระบบแคสซีเกรน



รูปที่ 5.4 แสดงแนวความคิดเกี่ยวกับพาราโบลาสมมูลย์

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่สัมพันธ์กันระหว่างระบบแคสซีเกรนกับพาราโมลาสมมูลย์แสดงได้ดังนี้

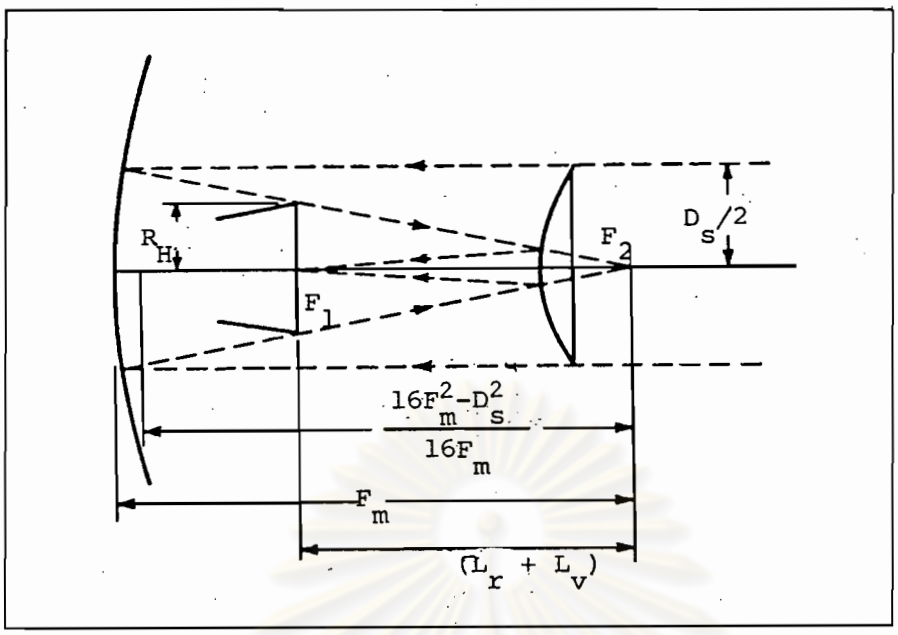
$$\frac{1}{4}\frac{D_m}{F_e} = \tan\frac{1}{2}\phi_r \tag{5.1}$$

$$x_e = \frac{y_e^2}{4F_e} \tag{5.2}$$

$$\frac{\pm F_e}{F_m} = \frac{\tan\frac{1}{2}\phi_v}{\tan\frac{1}{2}\phi_r} = \frac{L_r}{L_v} = \frac{e+1}{e-1} \tag{5.3}$$

สมการ (5.1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโฟกัสสมมูลย์, F_e กับเส้นผ่าศูนย์กลางของจาน (EQUIVALENT FOCAL LENGTH) สะท้อนหลักในเทอมของมุมที่รองรับจานสะท้อนรอง, ϕ_r สมการ (5.2) แสดงพาราโมลาสมมูลย์ในเทอมของระยะโฟกัสสมมูลย์ และความสัมพันธ์ในลักษณะต่างๆ ของสมการ (8) สำหรับอัตราส่วนของความยาวโฟกัสสมมูลย์ต่อความยาวโฟกัสของจานสะท้อนหลัก, F_e/F_m โดยเครื่องหมายบวกใช้กับระบบแคสซีเกรน (CASSEGRAIN SYSTEM) และเครื่องหมายลบใช้กับระบบเกร์กอเรน (GREGORAIN SYSTEM) โดยในระบบแคสซีเกรน $F_e/F_m \geq 1$ เสมอ[14] ดังนั้นเมื่อรู้จุดโฟกัสจริงและจุดโฟกัสเสมือน (VIRTUAL FOCUS) ของระบบแคสซีเกรน เราสามารถหาความยาวโฟกัสสมมูลย์ที่แน่นอนได้ และเราสามารถพิจารณาสมรรถนะ (PERFORMANCE) ของระบบแคสซีเกรนได้โดยใช้หลักการพาราโมลาสมมูลย์ กล่าวคือเปลี่ยนจาก F_m/D_m ในระบบแคสซีเกรนมาเป็น F_e/D_m ในระบบพาราโมลาสมมูลย์ เมื่อรู้ค่า F_e/D_m ที่แน่นอนแล้ว จากนั้นก็หามุมที่รองรับจานสะท้อนรองของระบบแคสซีเกรน, ϕ_r, ได้จากสมการ (5.1) และหามุมของแพทเทอร์นการแผ่คลื่น (RADIATION PATTERN ANGLE), θ', ได้โดย $\theta' = \phi_r/2$ สำหรับการออกแบบฟีดฮอร์นนั้นตามข้อกำหนดเบื้องต้นในหัวข้อ 5.4.2 จะให้ศูนย์กลางเฟสอยู่ที่จุดกึ่งกลางบนช่องเปิด และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิดต้องอยู่ในเงื่อนไขการกั้นลำคลื่นต่ำสุด (MINIMUM BLOCKING CONDITION)[15] เพื่อจัดขนาดและระยะของฮอร์นให้เหมาะสม โดยกั้นลำคลื่นที่กระจายจากจานสะท้อนรองไปยังจานสะท้อนหลักน้อยที่สุดตามรูปที่ 5.5 โดยมีเงื่อนไขว่า

$$\frac{D_H}{(L_r + L_v)} \leq \frac{8\,D_s\,F_m}{16\,F_m^2 - D_s^2} \tag{5.4}$$



รูปที่ 5.5 แสดงเงื่อนไขการกั้นลำคลื่นต่ำสุด

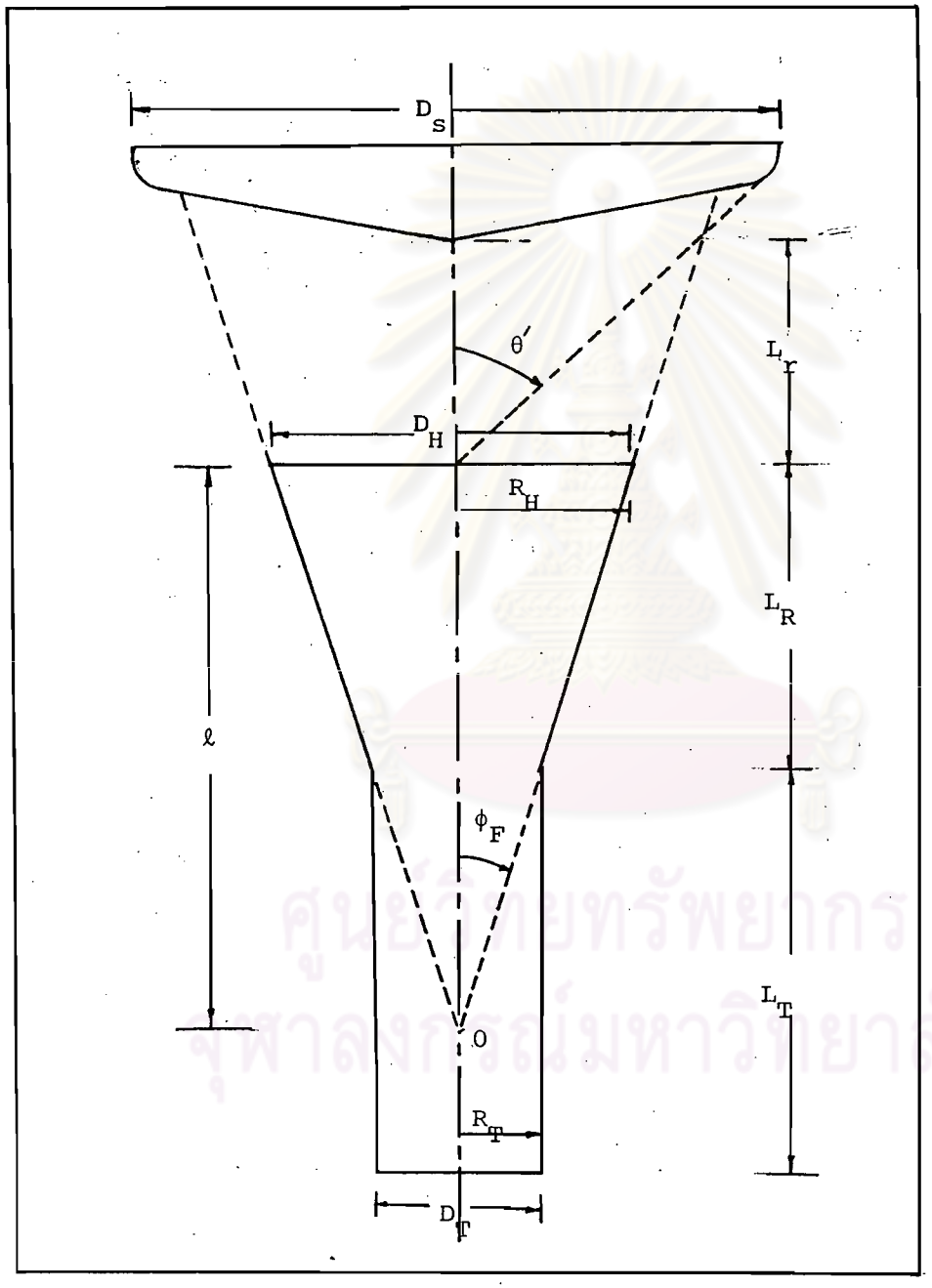
จากนั้นก็พิจารณาแพทเทอร์นที่เราต้องการ ซึ่งกำหนดจาก ความถี่ทำงาน , เส้นผ่าศูนย์กลางของปากฮอร์น และมุมของแพทเทอร์นที่เรารู้ค่าแล้วซึ่งแสดงในรูปของ $U = ka \sin \theta'$ โดยมีความแรงสัญญาณในระดับที่เราต้องการ เช่น ถ้าเราต้องการความแรงสัญญาณที่ต่ำกว่าค่าสูงสุดของแพทเทอร์น 20 dB ที่ค่า $U = 7.15$ จะต้องใช้ฟีดฮอร์นที่ค่า t มีค่า 0.5 เป็นต้น เมื่อรู้ค่า t ก็สามารถหาความยาวของฮอร์น, ℓ, ได้จากความสัมพันธ์

$$t = \frac{D_H^2}{8\lambda_1}\left(\frac{1}{\ell} + \frac{1}{L_r}\right) \qquad (5.5)$$

โดย λ_1 เป็นความยาวคลื่นของความถี่ทำงาน

เมื่อรู้ค่า D_H และ ℓ ก็สามารถหามุมบาน (FLARE ANGLE) ของฟีดฮอร์น , ϕ_F, ได้ ดังนั้นจึงได้รูปร่างของฟีดฮอร์นและตำแหน่งของปากฮอร์นที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แพทเทอร์นที่ต้องการ

ในขั้นต่อไปก็พิจารณาออกแบบผิวภายในของฟีดฮอร์นให้เป็นผิวคอร์รูเกต โดยให้สอดคล้องกับความถี่ทำงานที่ต้องการ ได้ผลตอบสนองต่อความถี่ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ และพยายามให้ V S W R ที่ช่วงต่อระหว่างท่อนำคลื่นที่เป็นผิวธรรมดากับผิวคอร์รูเกตมีค่าน้อยที่สุด เริ่มต้นด้วยการแบ่งฮอร์นออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแผ่คลื่น ส่วนทรานสฟอร์เมอร์ และท่อนำเทเปอร์ โดย



รูปที่ 5.6 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดตำแหน่งและขนาดของฟีดฮอร์น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

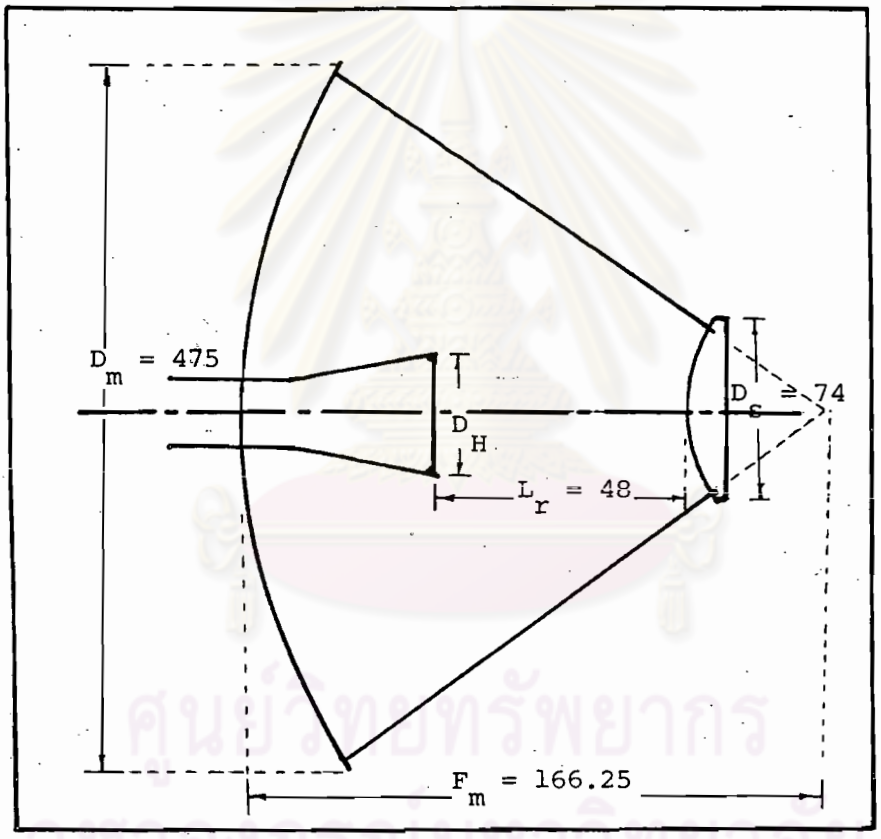
จัดให้รัศมีของปากฮอร์นยาว, R_H, ความยาวของส่วนทรานสฟอร์เมอร์มีค่า, L_T, รัศมีของส่วนทรานสฟอร์เมอร์, R_T, ดูรูปที่ 5.6 ดังนั้นจะสามารถหาความยาวของฮอร์นที่เป็นส่วนแผ่คลื่นได้โดย

$$L_R = (R_H - R_T)/\tan(\phi_F) \quad ; \quad R_H = D_H/2 \tag{5.6}$$

ส่วนความยาวของส่วนทรานสฟอร์เมอร์, L_T, จะมีขนาดเท่าใดขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ แต่ควรจะกำหนดให้มีขนาดค่อนข้างยาวเพื่อให้ได้สนามไฮบริดที่อยู่ตัวก่อนจะเข้าสู่ส่วนแผ่คลื่น จากนั้นก็หาความลึกของสล๊อตในสภาวะไฮบริดสมดุลย์ได้ โดยเริ่มจากความถี่ทำงานที่เรารู้ค่าอยู่แล้วสามารถหาอัตราส่วน R_T/λ_1 ได้ จากนั้นใช้กราฟรูปที่ 3.1 โดยใช้โลกัสของค่าศูนย์ครั้งที่หนึ่ง (FIRST ZERO LOCUS) จะได้ค่า h/R_T ซึ่งเรารู้ค่า R_T อยู่แล้ว ดังนั้นหาค่าความลึกของสล๊อต, h, ได้ และในขั้นสุดท้ายก็หาขนาดของคอร์รูเกตในหนึ่งรายคาบ (PERIOD) โดยอยู่ในเงื่อนไขว่าระยะพิตช์มีขนาดสั้นกว่าความยาวคลื่นของความถี่ทำงานมากๆ กล่าวคือ $D/\lambda_1 << 1$ ส่วนความหนาของครีบคอร์รูเกตพิจารณาได้จากอัตราส่วนระยะสล๊อตต่อระยะพิตช์, S/D, กล่าวคือ ขนาดของคอร์รูเกตสำหรับส่วนทรานสฟอร์เมอร์ด้านสัญญาณเข้าใช้อัตราส่วน S/D มีค่าใกล้ศูนย์ เพื่อให้ V.S.W.R. ในส่วนนี้มีค่าต่ำมากๆ โดยอัตราส่วน S/D จะค่อยๆ เข้าใกล้ค่าหนึ่งในทิศทางไปยังส่วนแผ่คลื่น โดยขนาดของคอร์รูเกตสำหรับส่วนทรานสฟอร์เมอร์ ด้านที่ต่อกับส่วนแผ่คลื่นใช้อัตราส่วน S/D มีค่าใกล้หนึ่งมากๆ และขนาดของคอร์รูเกตสำหรับส่วนแผ่คลื่นใช้อัตราส่วน S/D มีค่าใกล้หนึ่ง ดังนั้นสรุปได้ว่าการออกแบบฟีดฮอร์นในลักษณะดังกล่าว สามารถนำมาใช้ประกอบกับระบบจานสะท้อนของสายอากาศแบบแคสซีเกรนที่มีขนาดแน่นอนอยู่แล้วได้ โดยเราสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ตำแหน่งของปากฮอร์น เส้นผ่าศูนย์กลางของปากฮอร์น มุมบานของฮอร์น ขนาดความลึกของผิวคอร์รูเกต ระยะพิตช์ และขนาดความหนาของครีบคอร์รูเกต เป็นต้น เพื่อให้ได้แพทเทอร์นที่เราต้องการได้

5.5 การออกแบบฟีดฮอร์นใช้กับสายอากาศแบบแคสซีเกรนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 เมตร สำหรับระบบ 4/6 GH_Z

ในการออกแบบฟีดฮอร์นที่ผิวเป็นคอร์รูเกต จะใช้โหมด EH_{11} ของท่อนำคลื่นแบบคอร์รูเกตเป็นโหมดกระตุ้นของคอร์รูเกตเด็ดฮอร์น โดยที่คอร์รูเกตเด็ดฮอร์นนี้มีมุมบาน (FLARE ANGLE) ไม่มากนัก และออกแบบเพื่อใช้งานกับสายอากาศแบบแคสซีเกรนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 เมตร ที่ใช้กับระบบความถี่ 4/6 GH_Z เมื่อขนาดของจานสะท้อนหลักและจานสะท้อนรอง



รูปที่ 5.7 แสดงตำแหน่งและขนาดของจานสะท้อนของระบบแคสซีเกรน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.7

5.5.1 ข้อกำหนดของการออกแบบ

โดยทั่วไปข้อกำหนดสำหรับคอร์รูเกตเต็ดฮอร์นจะเป็นดังนี้

1. ความถี่ทำงานอยู่ในย่าน 4 GH_z และ 6 GH_z
2. แพทเทอร์การแผ่คลื่นมีลักษณะสมมาตรทั้งระนาบ E และระนาบ H
3. ขั้วคลื่นไขว้มีค่าน้อย
4. ระดับโลปข้างเคียงต่ำ

5.5.2 วิธีการออกแบบ

จะแสดงวิธีการเป็นขั้นตอน โดยในขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 เป็นการหาตำแหน่งและขนาดของฮอร์นที่เหมาะสม ส่วนขั้นตอนที่ 6 และ 7 เป็นการออกแบบผิวคอร์รูเกตให้ได้ตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.5.1

ขั้นตอนที่ 1 หาขนาดและพารามิเตอร์ที่สำคัญของจานสะท้อนของระบบแคสซีเกรน

จานสะท้อนของระบบแคสซีเกรนมีขนาดดังนี้

เส้นผ่าศูนย์กลางของจานสะท้อนหลัก D_m = 475 เซนติเมตร

เส้นผ่าศูนย์กลางของจานสะท้อนรอง D_s = 74 เซนติเมตร

ระยะโฟกัสของจานสะท้อนหลัก F_m = 166.25 เซนติเมตร

จุดโฟกัสจริงของระบบแคสซีเกรน F_1 อยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของจานสะท้อนรอง 48 เซนติเมตร

ใช้หลักการพาราโมลาสมมูลย์หาพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จำเป็นดังนี้

จากรูปที่ 5.4 และสมการ (5.3) $\frac{L_r}{L_v} = \frac{48}{18.93} = 2.536 = \frac{F_e}{F_m}$ แต่ $F_m = 166.25$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $F_e = 2.536 \times 166.25 = 421.61$ และได้ $F_e/D_m = 0.8876$ จากสมการ (5.1) หามุมที่รองรับจานสะท้อนรอง ϕ_r ได้โดย $\phi_r = 2 \arctan\left(\frac{1}{4 \times 0.8876}\right) = 62$ องศา เพราะฉะนั้นจะได้มุมการแผ่คลื่นจากช่องเปิด (Radiation Pattern Angle) $\theta' = \frac{62}{2} = 31$ องศา โดยมีศูนย์กลางเฟสอยู่ที่จุดศูนย์กลางของช่องเปิด

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากฮอร์น

พิจารณาเส้นผ่าศูนย์กลางของปากฮอร์นให้อยู่ในเงื่อนไขการกันคลื่นต่ำสุดจากสมการ (5.4) ได้ $D_H < 2(L_r + L_v)(8\ D_s\ F_m)/(16\ F_m^2 - D_s^2) = 30.165$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้นกำหนดรัศมีของปากฮอร์น R_T ให้มีค่าเท่ากับ 15, 14 และ 13 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดความถี่ทำงานและแพทเทอร์นที่ต้องการ

จากขั้นตอนที่ 1 ได้มุมการแผ่คลื่น $\theta = 31$ องศา และในขั้นตอนที่ 2 ได้รัศมีของปากฮอร์น R_T มีค่าตามขั้นตอนที่ 2 จาก $U = ka \sin\theta$ เมื่อ $a = R_H$ และความถี่ทำงาน $f_1 = 3.7\ GH_z$ ($\lambda_1 = 8.108$ เซนติเมตร) จะได้ $U = \frac{2\pi}{8.108} \times R_H \sin 31^\circ$ เมื่อแทนค่า $R_H = 15$, 14 และ 13 เซนติเมตร จะได้ค่า U เท่ากับ 5.987, 5.588 และ 5.189 ตามลำดับ โดยในการออกแบบต้องการความแรงสัญญาณ -17 dB และ -20 dB เทียบกับค่าสูงสุดของแพทเทอร์น จากแพทเทอร์นการแผ่คลื่นรูปที่ 4.11 พิจารณาหาค่า t ที่เหมาะสมได้ผลลัพธ์ดูตามตารางที่ 5.1

ขั้นตอนที่ 4 หาความยาวฮอร์นและมุมบาน

จากขั้นตอนที่ผ่านมาเรารู้ค่าความยาวคลื่น $\lambda_1 = 8.108$ เซนติเมตร รัศมีของปากฮอร์น $R_H = 1 = 15$, 14 และ 13 เซนติเมตร ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางจานสะท้อนรองมายังจุดโฟกัสจริง $L_r = 48$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้นหาความยาวฮอร์น (ℓ) ได้จากสมการ (5.5) โดย $\frac{1}{\ell} = \frac{2 \times t \times 8.108}{R_H^2} - \frac{1}{48}$ เมื่อแทนค่า R_H และ t ค่าต่างๆ (ดูตารางที่ 5.1) จะหาความยาวของฮอร์น, ℓ, และหามุมบานได้โดย $\phi_F = \arctan(R_H/\ell)$ ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งในที่นี้จะเลือกพารามิเตอร์ $t = 0.4$, $R_H = 14$, $\ell = 81.562$ เพราะให้ขนาดของฮอร์นที่เหมาะสมกับขนาดของจานสะท้อนที่มีอยู่เดิม และ t ไม่ต่ำกว่า 0.4 ซึ่งให้ความคลาดเคลื่อนเฟสไม่เปลี่ยนไปมากนักเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 4 GH_z ถึง 6 GH_z

ตารางที่ 5.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของฟีดฮอร์นสำหรับแพทเทอร์นที่ต้องการ

รัศมีปากฮอร์น (เซนติเมตร)	U (ไม่มีมิติ)	ที่ระดับความแรงสัญญาณ -17 dB			ที่ระดับความแรงสัญญาณ -20 dB		
		ค่าtที่เหมาะสม (ไม่มีมิติ)	ความยาวฮอร์น ℓ (เซนติเมตร)	มุมบาน ϕ_F (องศา)	ค่าtที่เหมาะสม (ไม่มีมิติ)	ความยาวฮอร์น ℓ (เซนติเมตร)	มุมบาน ϕ_F (องศา)
13	5.189	0.3	125.747	5.102	0.2	608.717	1.223
14	5.588	0.4	81.562	9.739	0.3	250.810	3.195
15	5.987	0.4	125.076	6.839	0.3	1269.036	0.677

ขั้นตอนที่ 5 จัดรูปร่างของฟีดฮอร์น

แบ่งฮอร์นออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแผ่คลื่น ส่วนทรานสฟอร์เมอร์ และท่อนำคลื่นเทเปอร์ โดยที่เมื่อเรารู้รัศมีของปากฮอร์น R_H = 14 เซนติเมตร และกำหนดให้รัศมีของส่วนทรานสฟอร์เมอร์ R_T = 4 เซนติเมตร ดังนั้นหาความยาวของส่วนแผ่คลื่นได้จากสมการ (5.6) $L_R = (14 - 4)/\tan(9.739) = 58.264$ เซนติเมตร ในที่นี้กำหนดให้ส่วนทรานสฟอร์เมอร์ยาว 24 เซนติเมตร และท่อนำคลื่นเทเปอร์ยาว 15 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 6 หาความลึกของสล๊อต

จากขั้นตอนที่ 3 รู้ความยาวคลื่นของความถี่ทำงาน λ_1 = 8.108 เซนติเมตร และจากขั้นตอนที่ 5 รู้รัศมีของส่วนทรานสฟอร์เมอร์ R_T = 4 เซนติเมตร ดังนั้น R_T/λ_1 = 0.493 จากกราฟรูป 3.1 ใช้โลกัสของค่าศูนย์ครั้งที่หนึ่งจะได้ค่า h/R_T = 0.56 เพราะฉะนั้นได้ความลึกของสล๊อต h = 2.24 เซนติเมตร และรัศมีของปากฮอร์นเท่ากับ 14 เซนติเมตร ดังนั้น R_H/λ_1 = 1.727 จากกราฟรูป 3.1 ใช้โลกัสของค่าศูนย์ครั้งที่หนึ่งจะได้ค่า h/R_H = 0.145 = 2.027

ดังนั้นในส่วนทรานสฟอร์เมอร์จะมีความลึก 2.24 เซนติเมตร และในส่วนแผ่คลื่นจะค่อยๆ ตื้นขึ้นจนมีขนาดความลึก 2.027 เซนติเมตร ในทิศทางที่ไปสู่ปากฮอร์น

ขั้นตอนที่ 7 หาขนาดของคอร์รูเกตในหนึ่งรายคาบ

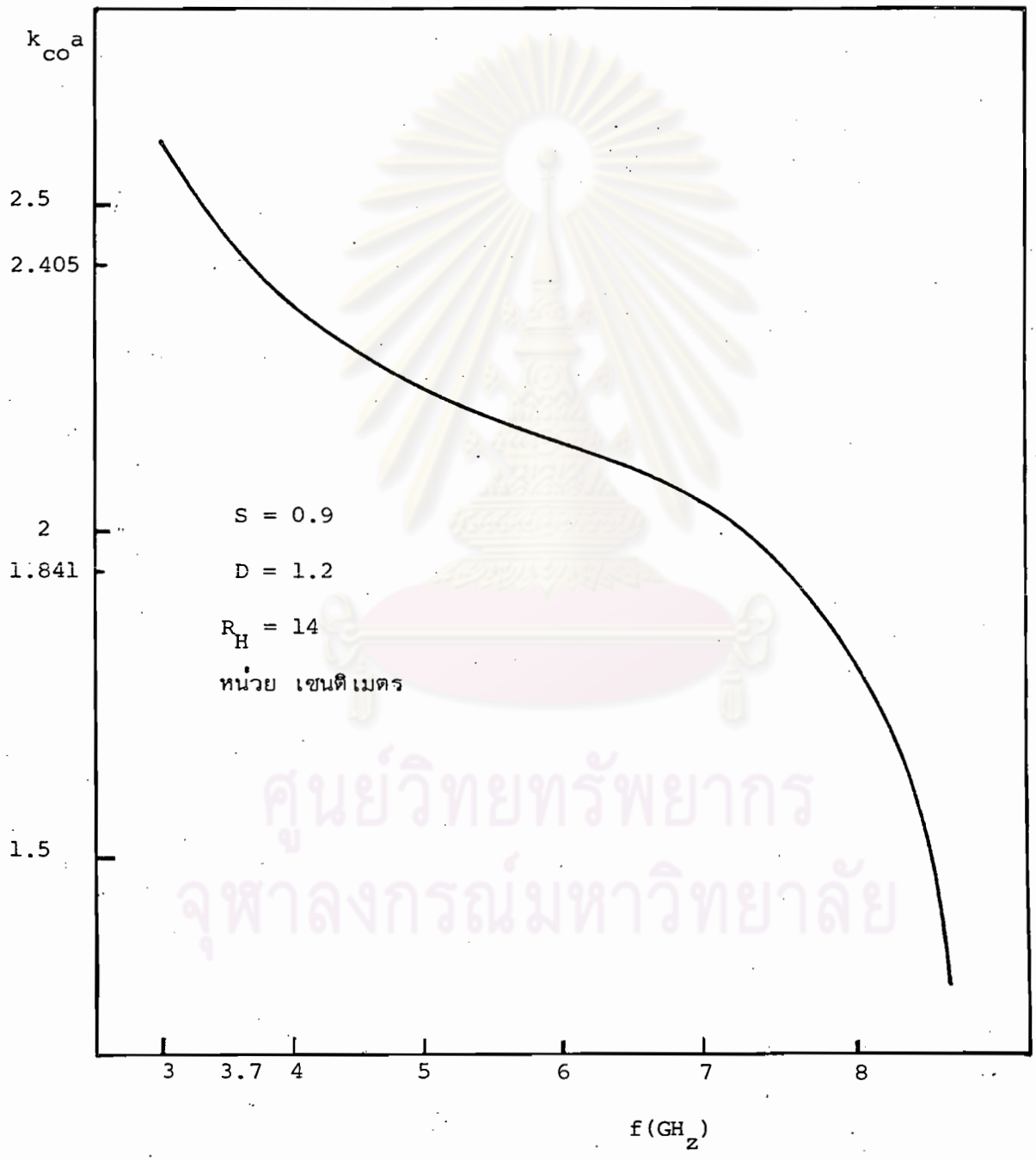
จากคุณสมบัติของผิวคอร์รูเกตที่ต้องคำนึงถึงเวลาออกแบบ คือ ระยะพิตช์ต้องมีขนาดน้อยกว่าความยาวคลื่นของความถี่ทำงานมากๆ กล่าวคือ $D/\lambda_1 << 1$ ในที่นี้ถ้าให้ $D = 1.2$ เซนติเมตร จะได้ $D/\lambda_1 = 0.148 << 1$ ซึ่งถือว่าใช้ได้เพราะถ้าหากให้ D มีค่าน้อยกว่านี้จะทำได้ยากในทางปฏิบัติ และกำหนดความหนาของครีบในส่วนต่างๆ ดังนี้

$S/D = 0.3/1.2$ ที่บริเวณด้านสัญญาณเข้าของส่วนทรานสฟอร์เมอร์

$S/D = 0.9/1.2$ ที่บริเวณด้านต่อกับส่วนแผ่คลื่น และส่วนแผ่คลื่นทั้งหมด

โดยผลลัพธ์การคำนวณแสดงการตอบสนองต่อความถี่ที่เปลี่ยนไปในย่าน 4 GH_z ถึง 6 GH_z แสดงดังรูปที่ 5.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของฟิดฮอร์นที่ออกแบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย