

บทที่ 3

การจัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

ความนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจัดเขตพื้นที่การควบคุมจราจรทางอากาศของประเทศไทย การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างสายอากาศที่ใช้ในปัจจุบันและสายอากาศที่ได้ออกแบบใหม่ โดยปัจจุบันสายอากาศที่ใช้สำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศเป็นสายอากาศแบบแผ่พลังงานรอบตัว (omnidirectional antenna) ทำให้มีการสูญเสียกำลังส่งสัญญาณในส่วนของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผิดชอบ และมีการแทรกสอดของสัญญาณร่วมของสถานีในพื้นที่ควบคุมเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอสายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียกำลังส่งสัญญาณและการแทรกสอดของสัญญาณร่วม โดยการออกแบบสายอากาศที่ใช้งานในแต่ละสถานีให้มีความเหมาะสมกับเขตพื้นที่การควบคุมที่รับผิดชอบ

การจัดเขตพื้นที่การควบคุมจราจรทางอากาศของประเทศไทย

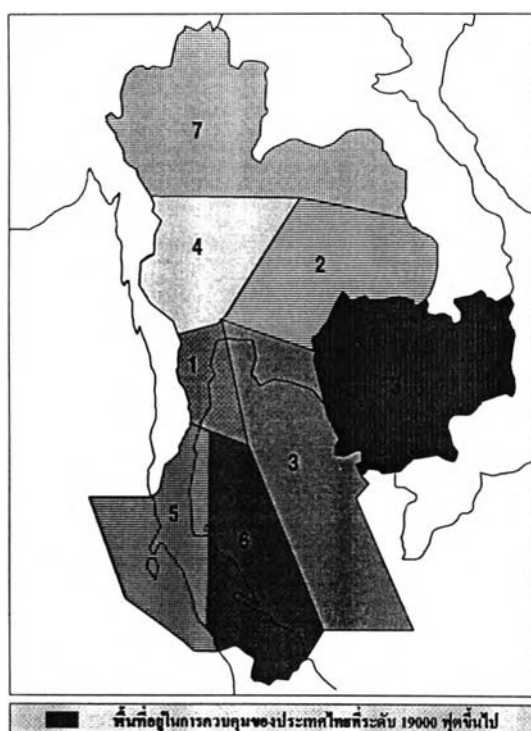
การควบคุมจราจรทางอากาศพื้นที่ในการควบคุมส่วนมากจะอยู่ในการควบคุมของเขตควบคุมพื้นที่ (area control) สำหรับประเทศไทยได้แบ่งเขตควบคุมพื้นที่ออกเป็น 7 เขต (sector) ตามที่แสดงในรูป 3.1 การแบ่งพื้นที่ออกเป็นเขตจะแบ่งตามลักษณะภูมิประเทศและความหนาแน่นของการจราจรทางอากาศในแต่ละเขตพื้นที่ โดยพื้นที่ควบคุมทั้งหมดจะอยู่ในความรับผิดชอบของเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศที่ศูนย์ควบคุมจราจรทางอากาศกรุงเทพฯ (Bangkok Air Traffic Control Center : BACC) การติดต่อสื่อสารระหว่างเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศกับนักบินในแต่ละเขตจะใช้คลื่นความถี่วิทยุตามตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 ความถี่ในพื้นที่ควบคุมของแต่ละเขต

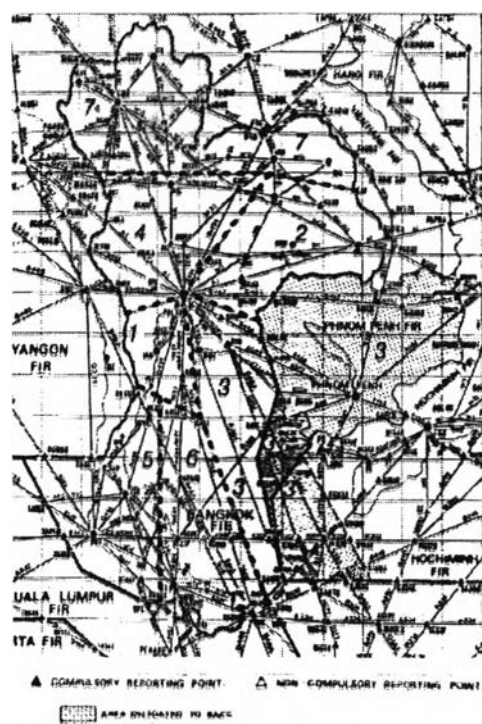
เขต	1	2	3	4	5	6	7
ความถี่	120.5	133.1	135.5	128.1	126.6	123.95	132.1
	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz

การติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นความถี่วิทยุในแต่ละส่วนควบคุมระหว่างเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศกับนักบินจะต้องสะดวกและไม่มีการรบกวนกันของสัญญาณ ดังนั้นระดับสัญญาณของคลื่นความถี่ในแต่ละส่วนควบคุมครอบคลุมตลอดเส้นทางการบินในแต่ละเขต เนื่องจากความถี่ที่ใช้งานอยู่ในย่าน VHF

คลื่นที่แพร่กระจายเป็นแบบแนวเส้นสายตา และอากาศยานที่อยู่บนท้องฟ้าจะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีภาคพื้นดินที่มีกำลังแรงพอ ดังนั้นสถานีภาคพื้นดินจำเป็นต้องติดตั้งสถานีวิทยุภาคพื้นดินสู่อากาศ (radio air/ground station) ให้ครอบคลุมทั้งพื้นที่เขตควบคุม เนื่องจากความถี่การจราจรทางอากาศในแต่ละเขตไม่สามารถครอบคลุมได้ด้วยสถานีเดียว ดังนั้นพื้นที่ที่อยู่ไกลจากศูนย์ควบคุมการจราจรทางอากาศจะต้องมีสถานีควบคุมจากพื้นดินสู่อากาศระยะไกล (Remote Control Air/Ground : RCAG ) เพื่อให้การติดต่อสื่อสารครอบคลุมพื้นที่เขตควบคุม ปัจจุบันสถานี RCAG ของประเทศไทยมี 12 แห่ง 17 สถานี ตามรูป 3.2 บางสถานีที่จะมีมากกว่า 1 สถานี โดยแต่ละสถานีมีพื้นที่ในการรับผิดชอบและใช้ความถี่ที่กำหนดไว้ในตาราง 3.1 สำหรับสถานี RCAG PHN จะรับผิดชอบน่านฟ้าประเทศกัมพูชาตั้งแตกระดับความสูง 19000 ฟุต เป็นต้นไป การตั้งสถานีวิทยุภาคพื้นดินสู่อากาศในแต่ละเขต จะเลือกสถานที่ที่มีความสูงมากกว่าพื้นที่ปกติเพื่อป้องกันสิ่งกีดขวางการแพร่กระจายคลื่น และมีการกำหนดระยะห่างระหว่างสถานีเพื่อจะให้คลื่นวิทยุในแต่ละสถานีสามารถแพร่กระจายครอบคลุมพื้นที่ให้เหมาะสมกับเส้นทางการบิน



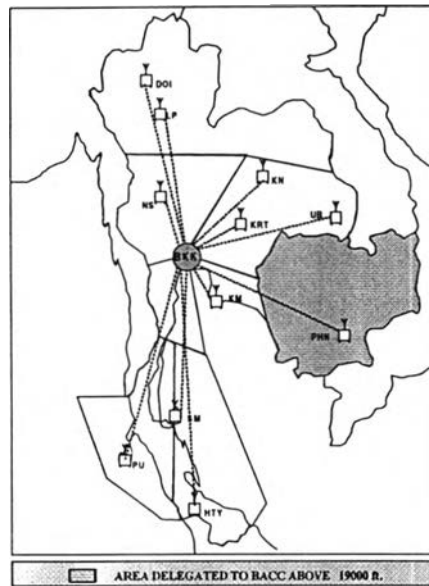
ก) การแบ่งพื้นที่เขตควบคุมพื้นที่



ข) จุดรายงานและเส้นทางการบิน

รูป 3.1 พื้นที่การควบคุมจราจรทางอากาศของประเทศไทย

ปกติในพื้นที่การควบคุมการจราจรทางอากาศของแต่ละเขตได้มีการกำหนดความสูงของระดับการบินต่ำสุดที่สามารถทำการบินได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศของแต่ละเส้นทางการบิน โดยการสื่อสารระหว่างเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศกับนักบินจะมีการติดต่อกันตามจุดรายงานในเส้นทางการบิน

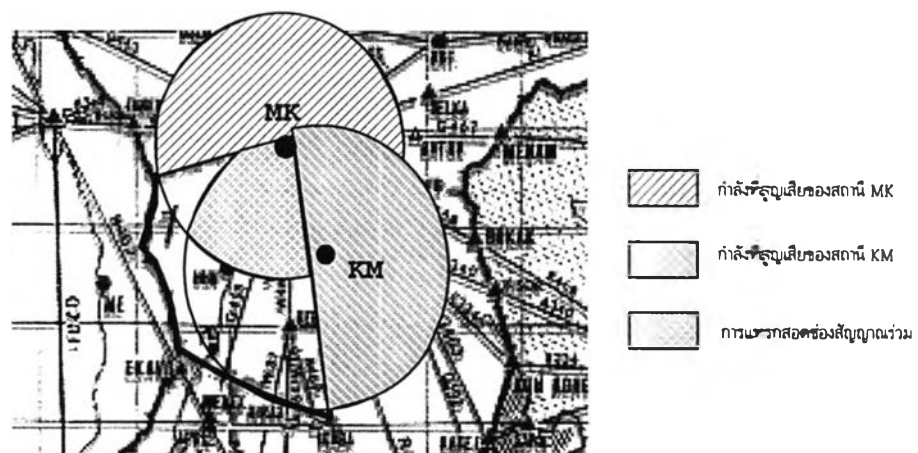


1. ดอยอินทนนท์ (DOI)
2. ลำปาง (LP)
3. นครสวรรค์ (NS)
4. ขอนแก่น (KN 4 สถานี)
5. อุบลราชธานี (UB)
6. โคราซ (KT)
7. เขามอน (KM)
8. สมุย (SM 2 สถานี)
9. ภูเก็ต (PU)
10. ทาดใหญ่ (HTY)
11. พนมเปญ (PHN)

รูป 3.2 สถานี RCAG ภายในพื้นที่ควบคุม

### การควบคุมจราจรทางอากาศที่ใช้สายอากาศแบบแผ่พลังงานรอบตัว

สำหรับการควบคุมการจราจรทางอากาศในปัจจุบัน ใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัว ดังรูป 3.3 ซึ่งเป็นพื้นที่ควบคุมของเขตที่ 1 ประกอบด้วยสถานี RCAG MK และ KM โดยที่ระดับสัญญาณของคลื่นความถี่วิทยุของแต่ละสถานีจะต้องครอบคลุมพื้นที่ของเขตที่ 1 ลักษณะของสายอากาศที่ใช้งานในปัจจุบันจะมีความกว้างลำคลื่น (beamwidth) มากทำให้ได้รับการรบกวนจากสัญญาณภายนอกง่าย



รูป 3.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 1 ซึ่งใช้สายอากาศแบบแผ่พลังงานรอบตัว

จากรูป 3.3 จะพบว่ามีกำลังสัญญาณที่นอกพื้นที่ของเขตที่ 1 โดยที่สถานี MK จะมีการสูญเสียประมาณ 78% ของกำลังส่งทั้งหมดของสถานี ขณะที่สถานี RCAG KM จะมีการ

สูญเสียกำลังส่งประมาณ 60% นอกจากนั้นยังเกิดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมที่เกิดจากสัญญาณของทั้งสองสถานีผสมกันในขณะที่ใช้งานพร้อมกันทั้งสองสถานีประมาณ 30 % ของพื้นที่ควบคุมทั้งหมด

#### การคำนวณกำลังส่งและสัญญาณที่ได้รับของสายอากาศแบบแผ่พลังงานรอบตัว

การหาค่ากำลังส่งของสายอากาศแบบรอบทิศทางจะสามารถหาได้จากสูตรการส่งผ่านกำลังของฟรีสตามสมการ (3-1) ในที่นี้จะใช้การควบคุมของเขตที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยสถานี MK และ RCAG KM การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีจะคำนวณที่ระยะทางที่ไกลที่สุดในพื้นที่ควบคุมของแต่ละสถานี ดังนั้นจะต้องทราบระยะทางที่จะควบคุม โดยปกติระยะทางในการเดินอากาศจะใช้หน่วยเป็นไมล์ทะเล (Nautical Mile : NM) ซึ่งระยะทาง 1 ไมล์ทะเลเท่ากับระยะทาง 1.8 กิโลเมตร

$$Pr(dB) = Pt + Gt + Gr - 32.45 - 20\log(R) - 20\log(f) \quad (3-1)$$

$Pt$  = กำลังส่งของเครื่องส่ง

$Gt$  = อัตราการขยายของสายอากาศส่ง

$Gr$  = อัตราการขยายของสายอากาศรับ

$R$  = ระยะทางจากสายอากาศส่งถึงตำแหน่งที่รับมีหน่วยเป็นกิโลเมตร

$f$  = ความถี่ที่ใช้งานของแต่ละสถานีมีหน่วยเป็น MHz.

#### 1) สถานี MK

การคำนวณกำลังส่งของสถานี MK กำหนดให้สายอากาศรับเป็นแบบแผ่พลังงานรอบตัวเหมือนกับสายอากาศส่งมีอัตราการขยาย 2.15 dBi  $Pr$  ที่ระยะควบคุมไกลสุดเท่ากับ  $-100dB$  ความถี่ที่ใช้งานในเขตนี้คือ 120.5 MHz. พื้นที่การควบคุมไกลสุดทางแนวราบ 85.71 ไมล์ทะเลและระดับความสูงของการควบคุมสูงสุดเท่ากับ 46000 ฟุต (7.79 ไมล์ทะเล) กำลังส่งของสถานีสามารถคำนวณจากสมการ (3-2)

$$Pt(dB) = Pr - Gt - Gr + 32.45 + 20\log(R) + 20\log(f) \quad (3-2)$$

$$R = \sqrt{85.71^2 + 7.79^2} = 86.1 \text{ NM} = 154.9 \text{ Km}$$

เมื่อแทนค่าตัวต่าง ๆ ในสมการ (3-2) จะได้ว่า

$$Pt = -100 - 2.15 - 2.15 + 32.45 + 20\log(154.9) + 20\log(120.5) = 13.57dB = 22.75W$$

ระดับสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูป 3.4 ในพื้นที่การควบคุมสามารถหาได้จากสูตรการส่งผ่านของฟรีสโดยระดับสัญญาณแต่ละจุดจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีส่งและจุดรับซึ่งค่าแต่ละตำแหน่งสามารถหาได้ดังนี้

$$Pr_{(0,-1),(-1,0),(1,0),(0,1)} = -90.42dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 51.42 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(1,-1),(-1,1),(1,1),(-1,1)} = -93.43dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 72.73 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(0,2),(2,0),(-2,0),(0,-2)} = -96.44dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 102.85 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{\substack{(-1,-2),(-1,2),(1,2),(-2,1) \\ (-2,-1),(1,-2),(2,-1),(2,1)}} = -97.3dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 113.14 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(2,-2),(-2,2),(2,2),(-2,2)} = -99.4dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 144 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

## 2) สถานี RCAG KM

กำหนดให้สายอากาศรับมีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทาง อัตราการขยายของสายอากาศส่งและรับเท่ากับ 2.15 dB กำลังที่รับได้ต่ำสุด -100dB ระยะไกลสุดของการควบคุมแนวราบเท่ากับ 97.14 NM การควบคุมแนวตั้งมีระดับการบินของสูงสุด 46000 ฟุต (7.79NM) สามารถหากำลังส่งได้ดังนี้

$$R = \sqrt{85.71^2 + 7.79^2} = 97.45 \text{ NM} = 175.41 \text{ Km.}$$

$$Pt = -100 - 2.15 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(175.41) + 20 \log(120.5) = 14.65dB = 29 \text{ W}$$

จากนั้นก็คำนวณหาค่ากำลังที่รับได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของพื้นที่การควบคุมโดยที่ค่ากำลังที่รับได้ของแต่ละตำแหน่งขึ้นอยู่กับระยะห่างของจุดส่งและจุดรับตามรูป 3.4

$$Pr_{(0,-1),(-1,0),(1,0),(0,1)} = -89.34dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 51.42 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(1,-1),(-1,1),(1,1),(-1,1)} = -92.35dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 72.73 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(0,2),(2,0),(-2,0),(0,-2)} = -95.36dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 102.85 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{\substack{(-1,-2),(-1,2),(1,2),(-2,1) \\ (-2,-1),(1,-2),(2,-1),(2,1)}} = -96.19dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 113.14 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(2,-2),(-2,2),(2,2),(-2,2)} = -98.29dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 144 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

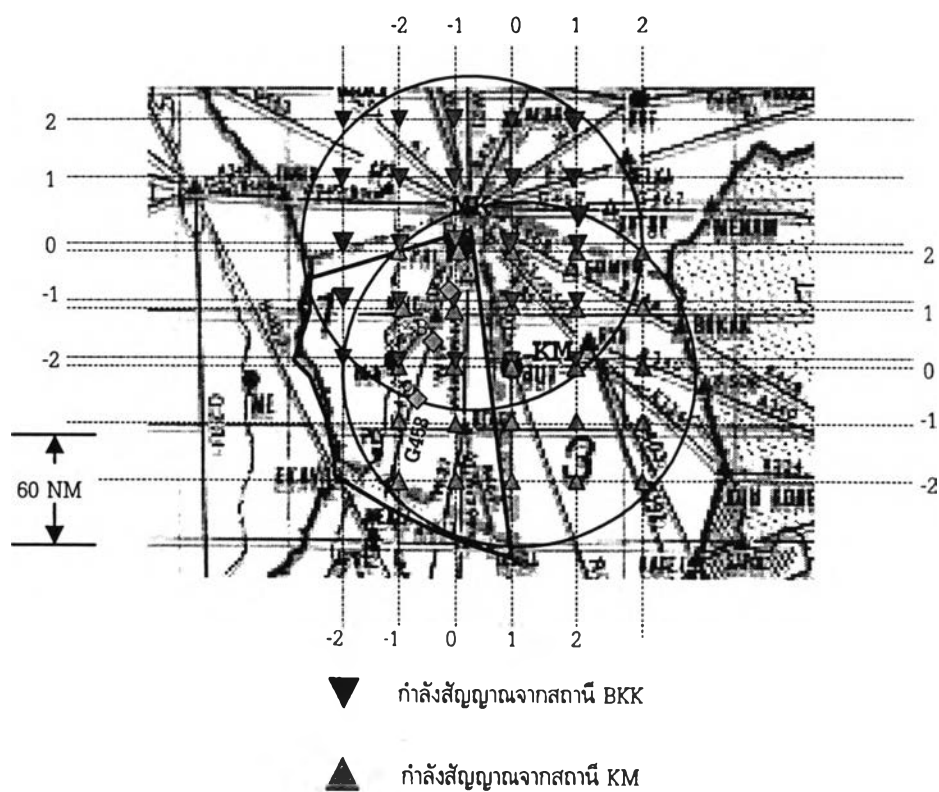
### 3) การแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมระหว่างสถานี MK และ RCAG KM

การแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมคือการรบกวนของคลื่นความถี่ที่อยู่ในพื้นที่ควบคุมเดียวกันเนื่องจากความถี่ที่ใช้งานของแต่ละสถานีเหมือนกัน สำหรับการควบคุมในเขตที่ 1 จะใช้เส้นทางการบิน G458 เป็นตัวอย่างของการรบกวนของช่วงสัญญาณซึ่งได้ผลดังนี้

ที่จุด A ความแตกต่างของคลื่นพาร์ตต่อสัญญาณรบกวน = 6.19 dB

ที่จุด B ความแตกต่างของคลื่นพาร์ตต่อสัญญาณรบกวน = 1.38 dB

ที่จุด C ความแตกต่างของคลื่นพาร์ตต่อสัญญาณรบกวน = 4 dB

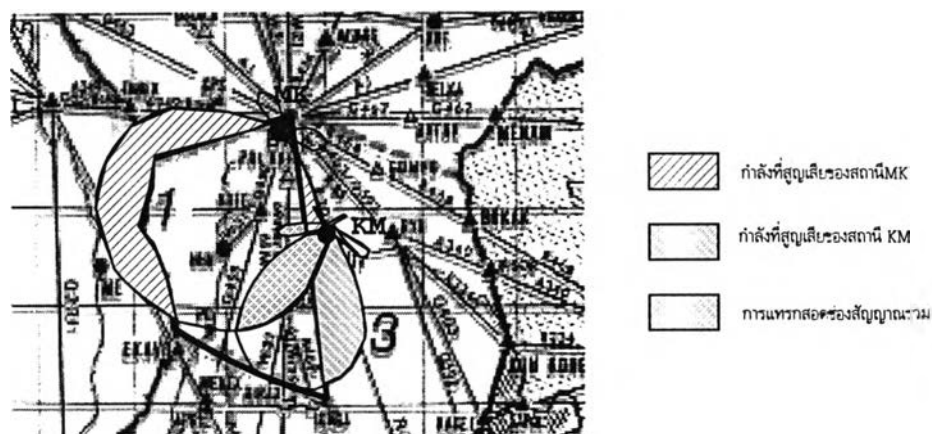


รูป 3.4 กำลังสัญญาณที่ได้รับ ณ ตำแหน่งต่างๆของสายอากาศแบบแผงพลังงานรอบตัวเขตที่ 1

### การควบคุมจราจรทางอากาศที่ใช้สายอากาศแบบยาก็-อูตะ

สำหรับการควบคุมการจราจรทางอากาศที่ใช้สายอากาศยาก็-อูตะ มีคุณสมบัติที่ดีกว่าการใช้สายอากาศแบบแผงพลังงานรอบตัวอีกอย่างหนึ่งคือมีความกว้างแถบแคบ ทำให้ลดปัญหาการรบกวนจากสัญญาณภายนอก ในที่นี่จะใช้พื้นที่การควบคุมของเขตที่ 1 เป็นตัวอย่างในการใช้งานสายอากาศดังแสดงในรูป 3.5 เมื่อทำการเปลี่ยนสายอากาศจากสายอากาศแบบแผงพลังงานรอบตัวเป็นสายอากาศยาก็-อูตะที่สถานี

สูญเสียกำลังคลื่นประมาณ 25 % ในขณะที่สถานี RCAG KM จะมีการสูญเสียกำลังประมาณ 30% และมีการแทรกสอดของสัญญาณรวมประมาณ 15% ของพื้นที่ทั้งหมดในเขตที่ 1



รูป 3.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 1 ซึ่งใช้สายอากาศยาก็-อูตะ

#### การคำนวณกำลังส่งและสัญญาณที่ได้รับของสายอากาศยาก็-อูตะ

การหาค่ากำลังส่งของสายอากาศสามารถหาได้จากสูตรการส่งผ่านกำลังของฟรีส ในที่นี่จะใช้การควบคุมของเขตที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยสถานี MK และ RCAG KM การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีจะคำนวณที่ระยะทางที่ไกลที่สุดในพื้นที่ควบคุมของแต่ละสถานี ต้องทราบระยะทางที่จะควบคุม

##### 1) สถานี MK

การคำนวณกำลังส่งของสถานี MK กำหนดให้สายอากาศรับเป็นแบบแผ่พลังงานรอบตัว สายอากาศส่งมีอัตราขยาย 9.22 dBi  $P_r$  ที่ระยะควบคุมไกลสุดเท่ากับ  $-100dB$  ความถี่ที่ใช้งานในเขตนี้คือ 120.5 MHz. พื้นการควบคุมไกลสุดทางแนวราบ 142.85 ไมล์ทะเลระดับความสูงของการควบคุมสูงสุดเท่ากับ 46000 ฟุต (7.79 ไมล์ทะเล) กำลังส่งของสถานีสามารถคำนวณจากสมการ (3-2)

$$R = \sqrt{142.85^2 + 7.79^2} = 143.06 \text{ NM} = 257.5 \text{ Km}$$

เมื่อแทนค่าตัวต่าง ๆ ในสมการ (3-2) จะได้ว่า

$$P_r = -100 - 9.22 + 2.15 + 32.45 + 20 \log(257.5) + 20 \log(120.5) = 10.98dB = 12.53 \text{ W}$$

ระดับสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูป 3.6 ในพื้นที่การควบคุมสามารถหาได้จากสูตรการส่งผ่านกำลังของฟรีส โดยระดับสัญญาณแต่ละจุดจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีส่งและจุดรับ และอัตราขยายเชิงทิศทางของสายอากาศส่งกระทำกับจุดรับ โดยค่าสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะแสดงได้ดังนี้

$$Pr_{(-2,-1)} = -95dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 63.36 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(-2,-2)} = -95.28dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 80.38 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(-2,-3)} = -97.09dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 103.15 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(-2,-4)} = -99.05dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 125.95 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(0,3)} = -99.37dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 86.07 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

## 2) สถานี RCAG KM

กำหนดให้สายอากาศรับมีแบบแผ่พลังงานรอบตัว อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 2.15 dBi  
 สานอากาศส่งมีอัตราการขยาย 15 dBi กำลังสัญญาณที่รับได้จะต้องไม่ต่ำกว่า -100dB ระยะไกลสุดของการ  
 ควบคุมแนวราบเท่ากับ 108.57 NM การควบคุมแนวตั้งมีระดับการบินของสูงสุด 46000 ฟุต (7.79NM)  
 สามารถหาค่ากำลังส่งได้ดังนี้

$$R = \sqrt{108.57^2 + 7.79^2} = 108.85 \text{ NM} = 195.92 \text{ Km.}$$

$$Pt = -100 - 15 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(195.92) + 20 \log(120.5) = 14.65dB = 1.89 \text{ W}$$

จากนั้นก็คำนวณหาค่ากำลังที่รับได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของพื้นที่การควบคุมโดยที่ค่ากำลังที่รับ  
 ได้ของแต่ละตำแหน่งขึ้นอยู่กับระยะห่างของสถานีส่งและจุดรับ และอัตราขยายเชิงทิศทางของสายอากาศที่  
 กระทำระหว่างสถานีส่งและตำแหน่งที่รับดังแสดงในรูป 3.6

$$Pr_{(-1,-1)} = -99.1dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 37.78 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(-1,-2)} = -96.3dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 63.33 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(-1,-3)} = -96.45dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 88.89 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

$$Pr_{(0,-3)} = -97.09dB \quad (\text{ระยะการควบคุม } 85.56 \text{ NM ความสูง } 46000 \text{ ฟุต})$$

## 3) การแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมระหว่างสถานี MK และ RCAG KM

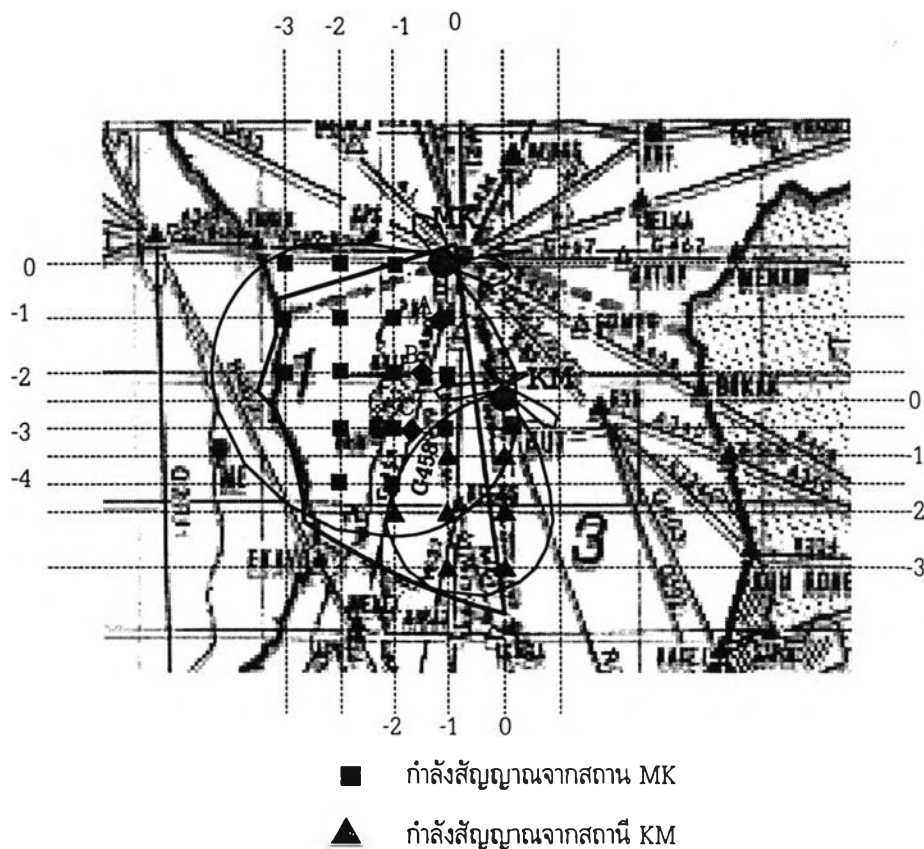
การรบกวนของคลื่นความถี่ที่อยู่ในพื้นที่ควบคุมเดียวกันเนื่องจากความถี่ที่ใช้งานของแต่ละสถานี  
 เหมือนกันของเขตที่ 1 จะใช้เส้นทางการบิน G458 เป็นตัวอย่างของการรบกวนของช่องสัญญาณซึ่งได้ผลดังนี้

$$\text{ที่จุด A ความแตกต่างของคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน} = 20.22 \text{ dB}$$

$$\text{ที่จุด B ความแตกต่างของคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน} = 13.63 \text{ dB}$$

$$\text{ที่จุด C ความแตกต่างของคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน} = 12.52 \text{ dB}$$





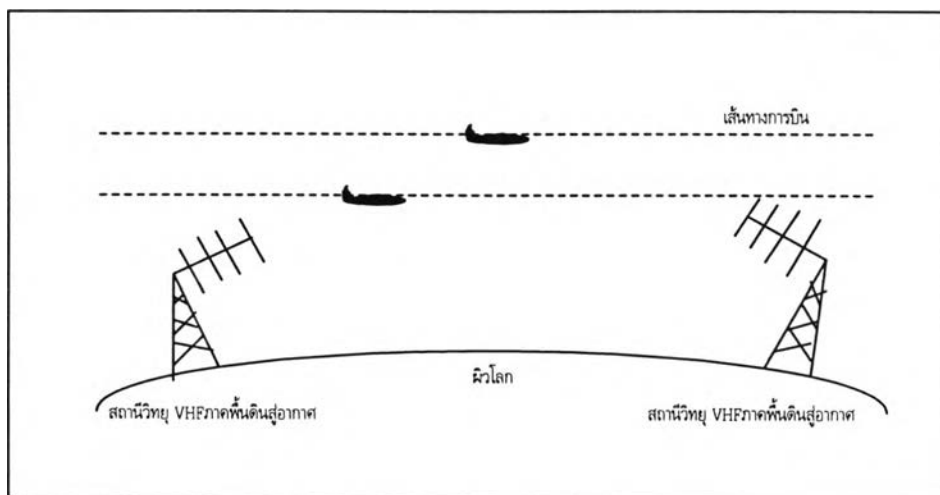
รูป 3.6 กำลังสัญญาณที่ได้รับได้ ณ ตำแหน่งต่างๆของสายอากาศยาภิ-อุตะในเขตที่ 1

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าหากเปลี่ยนสายอากาศที่ใช้ในปัจจุบันมาเป็นสายอากาศยาภิ-อุตะ จะช่วยให้ประหยัดกำลังส่งของแต่ละสถานี ลดการสูญเสียกำลังสัญญาณในพื้นที่ที่ไม่ได้ควบคุม และลดการแทรกสอดของสัญญาณร่วมที่ใช้ความถี่เดียวกันในพื้นที่ควบคุมเขตเดียวกัน

#### การจัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตพื้นที่ควบคุม

เนื่องจากบริเวณในเขตควบคุมพื้นที่มีทั้งแนวตั้งและแนวราบ ดังนั้นสายอากาศที่ออกแบบจะต้องมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ครอบคลุมทั้งแนวตั้งและแนวราบของพื้นที่ควบคุม ปกติสายอากาศที่ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคพื้นดินกับอากาศยานที่แสดงในรูป 3.7 จะมีโพลาริเซชันของคลื่นแบบแนวตั้ง ดังนั้นสายอากาศที่สถานีภาคพื้นดินจะต้องมีโพลาริเซชันแบบแนวตั้งด้วย สำหรับพื้นที่การควบคุมทางแนวราบของแต่ละสถานีจะประกอบไปด้วยเส้นทางการบินต่าง ๆ ดังนั้นจะต้องกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศให้ครอบคลุมทุกเส้นทางการบินภายในแต่ละเขต ส่วนการควบคุมทางแนวตั้งจะมีระดับการบิน

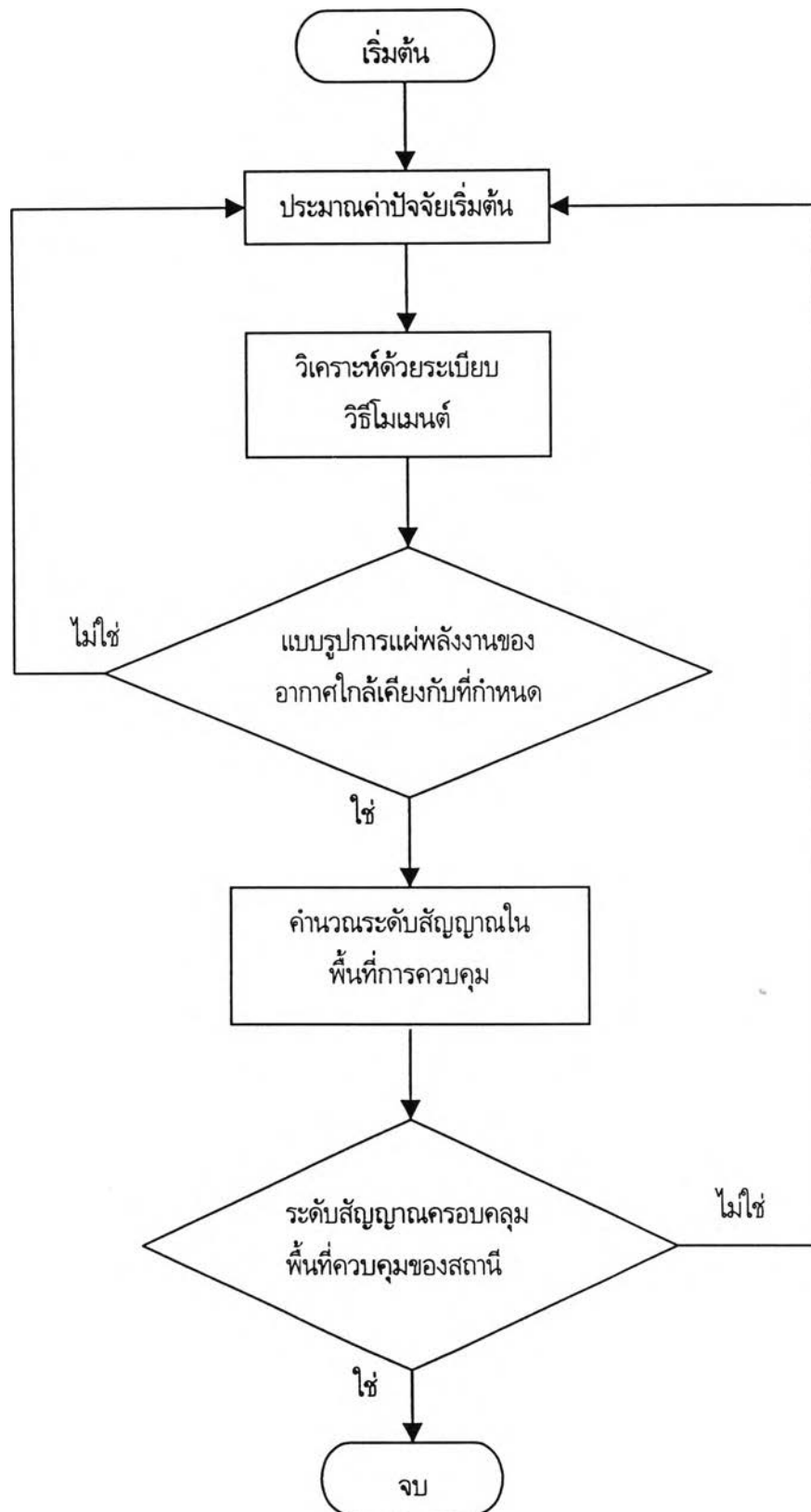
อยู่หลายระดับในแต่ละเขต ดังนั้นจะต้องปรับมุมยก (elevation angle) ของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูป-การแผ่พลังงานของสายอากาศที่ครอบคลุมทุกระดับความสูงในพื้นที่ควบคุม ค่ามุมยกของสายอากาศสามารถคำนวณได้จากส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ระดับการบินสูงสุด และระยะพื้นที่ที่ครอบคลุมของสายอากาศในแต่ละสถานี (ส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังส่งของแต่ละสถานี) ลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนดจะใช้เป็นแบบในการออกแบบสายอากาศ เพื่อจะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานครอบคลุมพื้นที่ที่รับผิดชอบในแต่ละสถานีในเขตพื้นที่ควบคุม การกำหนดแบบรูปของสายอากาศจะต้องมีพู่ชี้และพู่หลังที่ต่ำ ๆ เพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณที่อยู่ภายในเขตเดียวกัน ส่วนความกว้างลำของสายอากาศในแต่ละสถานีขึ้นอยู่กับพื้นที่ควบคุมทางแนวราบ โดยการควบคุมทางแนวนอนนี้แบบรูปที่ได้จะไม่ใช้ระนาบ H ของสายอากาศ แต่จะเป็นระนาบที่เกิดจากการตัดระนาบของแบบรูปการแผ่พลังงาน ในขณะที่สายอากาศทำมุมยก โดยระนาบที่ใช้จะเป็นระนาบที่สายอากาศทำมุมที่ระดับการบินสูงสุดของแต่ละสถานี



รูป 3.7 การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีภาคพื้นดินและอากาศยาน

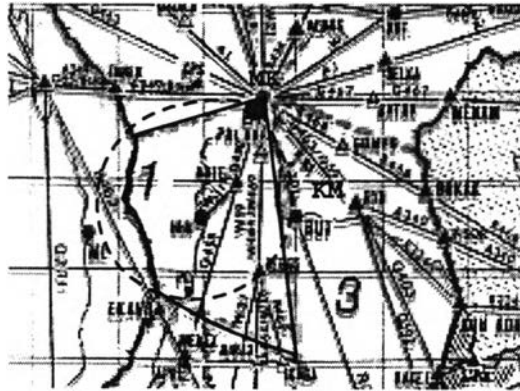
ขั้นตอนในการจัดแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละเขต

- 1) กำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละสถานี เพื่อใช้เป็นแบบในการออกแบบสายอากาศที่ใช้ในแต่ละสถานี
- 2) คำนวณหาค่ามุมยกของสายอากาศของแต่ละสถานีจากระยะของการควบคุม และระดับการควบคุมที่สูงสุดซึ่งอยู่ในภาคผนวก (ข)
- 3) ออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ระดับสูงสุดและต่ำสุดตามที่กำหนดไว้ในข้อ 1 และมีมุมยกของสายอากาศตามข้อ 2 สำหรับขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศมีลำดับขั้นตอนตามรูป 3.8



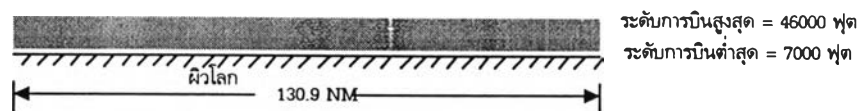
รูป 3.8 ขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศ

สำหรับการกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ จะใช้สถานี MK ของเขตที่ 1 เป็นตัวอย่าง ในการออกแบบ การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานทางแนวราบระยะการควบคุมไกลสุด 130.9 NM (ไมล์ทะเล) ดังแสดงในรูป 3.9 (ก) ส่วนการกำหนดทางแนวตั้งจะใช้ระดับการควบคุมสูงสุดและต่ำสุดเป็นตัวกำหนดดังแสดงในรูป 3.9 (ข) ปกติระดับการบินสูงสุดในแต่ละเขตของประเทศไทยอยู่ที่ระดับความสูง 46000 ฟุต (7.79 NM ) ซึ่งจะใช้ความสูงอันนี้เป็นระดับการควบคุมสูงสุด ระดับการบินต่ำสุดของเขตที่ 1 เท่ากับ 7000 ฟุต (1.18 NM) จะใช้ความสูงนี้เป็นระดับการควบคุมต่ำสุด ดังนั้นลักษณะของแบบรูปที่กำหนดของ สถานี MK ทางแนวราบและแนวตั้งแสดงดังรูป 3.9 (ค) สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละเขตสามารถแสดงได้ดังนี้



อัตราส่วน 1 ช่องเท่ากับ 60 NM

(ก) พื้นที่การควบคุมแนวราบที่กำหนด



(ข) พื้นที่การควบคุมในแนวตั้งที่กำหนด

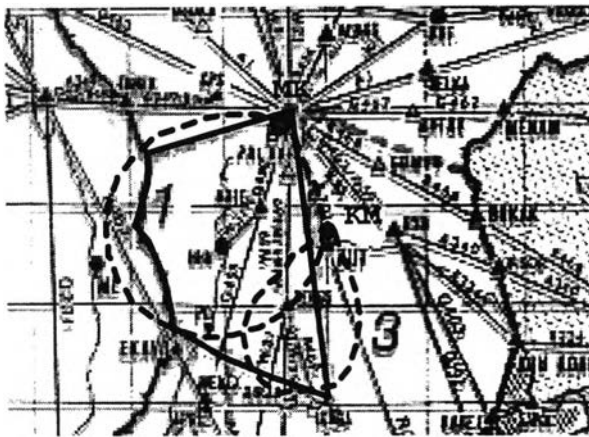


(ค) พื้นที่การควบคุมในแนวราบและแนวตั้งที่กำหนด

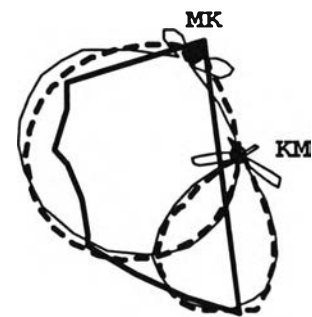
รูป 3.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่กำหนดของสถานี MK ในเขตที่ 1

### 1) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 1

สำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศของเขตที่ 1 ประกอบด้วยสถานี VHF air/ground 2 สถานีคือ สถานีทุ่งมหาเมฆ (MK) อยู่ที่กรุงเทพฯ และสถานีเขามอน (KM) อยู่ที่จังหวัดชลบุรี ความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ 120.5MHz การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 2 สถานีดังรูป 3.10 และผลของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการออกแบบแสดงดังรูป 3.11 โดยที่สถานี MK ใช้สายอากาศแบบ 5 องค์ประกอบ มุมยกของสายอากาศ 3.4 องศา ส่วนสถานี RCAG KM ใช้สายอากาศแบบ 6 องค์ประกอบ มุมยกของสายอากาศ 4.5 องศา



รูป 3.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 1 ที่กำหนดจากพื้นที่ควบคุมและเส้นทางการบิน



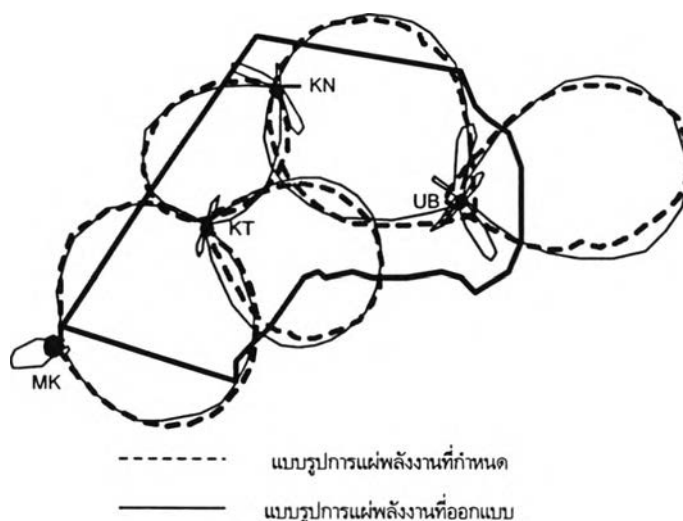
รูป 3.11 แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนดและออกแบบของเขตที่ 1

### 2) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 2

สำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศของเขตที่ 2 ประกอบด้วยสถานี VHF air/ground 4 สถานีคือ สถานีทุ่งมหาเมฆ (MK) สถานีโคราช (KT) อยู่ที่จังหวัดนครราชสีมา สถานีขอนแก่น KN และสถานีอุบล UB (ต้องใช้สายอากาศ 2 ตัวเพื่อจะได้ครอบคลุมพื้นที่การควบคุมจะที่ยกออกเป็นทางทิศตะวันตกและทางทิศตะวันออก) ความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ 133.1MHz การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 4 สถานีดังรูป 3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ออกแบบแสดงดังรูป 3.13 โดยที่สถานี MK ใช้สายอากาศแบบ 3 องค์ประกอบ มุมยกของสายอากาศ 3.7 องศา สถานี RCAG KT ใช้สายอากาศแบบ 5 องค์ประกอบ มุมยก 3.8 องศา สถานี RCAG KN ใช้สายอากาศแบบ 6 องค์ประกอบ มุมยก 4.4 องศา สถานี RCAG UB ทางทิศตะวันตกใช้สายอากาศ 5 องค์ประกอบ มุมยก 3 องศา สถานี RCAG UB ทางทิศตะวันออกใช้สายอากาศ 6 องค์ประกอบ มุมยก 2.9 องศา



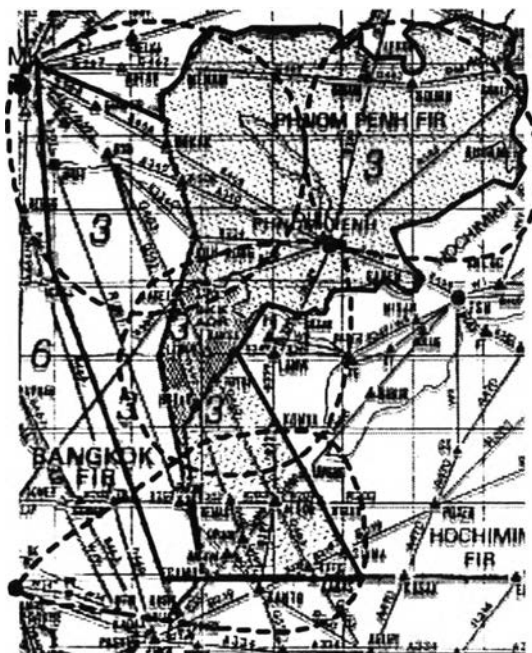
รูป 3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเขตที่ 2 ที่กำหนด  
จากพื้นที่ควบคุมและเส้นทางการบิน



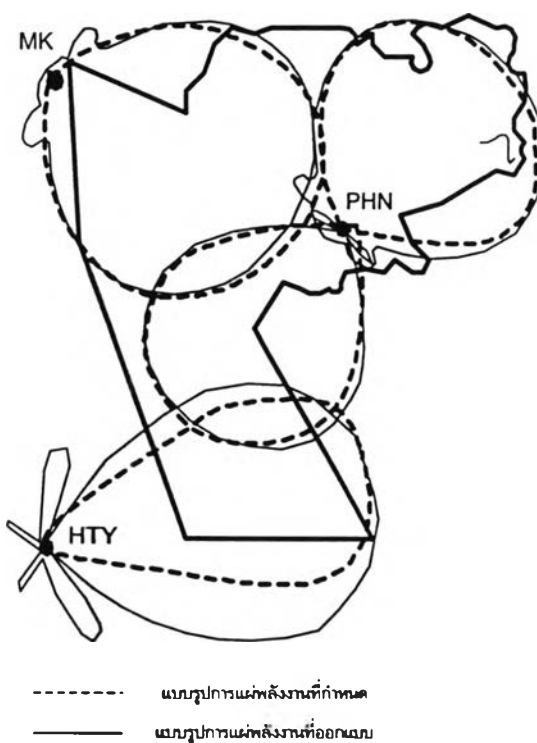
รูป 3.13 แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนดและออกแบบของเขตที่ 2

### 3) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 3

การควบคุมจราจรทางอากาศของเขตที่ 3 ประกอบด้วยสถานี VHF air/ground 3 สถานี คือ ทุ่งมหาเมฆ ทาดใหญ่ (HTY) และพนมเปญ (PHN อยู่ในประเทศกัมพูชาพื้นที่รับผิดชอบตั้งแต่ระดับ 19000 ฟุตเป็นต้นไป) ความถี่ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารคือ 135.5 MHz การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานทั้ง 3 สถานีแสดงดังรูปที่ 3.14 และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ออกแบบดังรูป 3.15 โดยที่สถานี MK ใช้สายอากาศ 4 องค์กรประกอบ มุมยก 2.2 องศา สถานี RCAG HTY ใช้สายอากาศ 6 องค์กรประกอบ มุมยก 2 องศา สถานี RCAG PHN ตะวันตกเฉียงใต้ใช้สายอากาศ 5 องค์กรประกอบมุมยก 2.5 องศา สถานี RCAG PHN ตะวันออกเฉียงเหนือใช้สายอากาศ 4 องค์กรประกอบ มุมยก 2.5 องศา



รูป 3.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 3 ที่กำหนดจากพื้นที่ควบคุมและเส้นทางการบิน

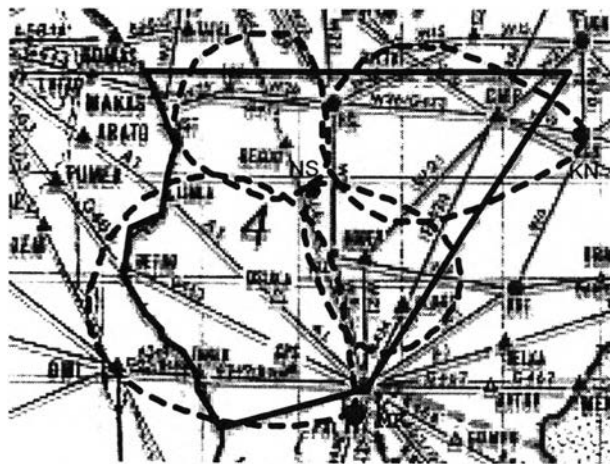


----- แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนด  
————— แบบรูปการแผ่พลังงานที่ออกแบบ

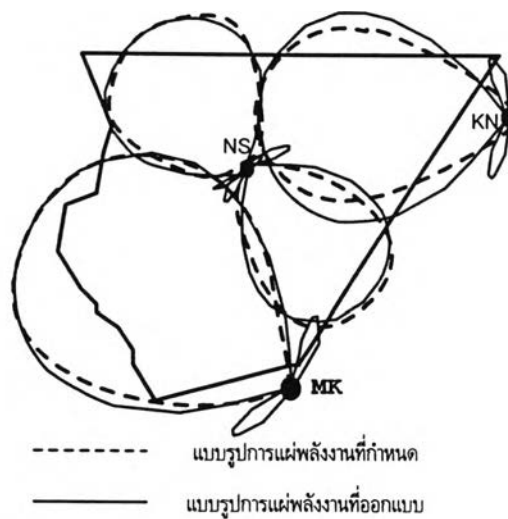
รูป 3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนด และออกแบบของเขตที่ 3

#### 4) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 4

สำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศของเขตที่ 4 ประกอบด้วยสถานี VHF air/ground 3 สถานีคือ สถานีทุ่งมหาเมฆ สถานีขอนแก่น และสถานีนครสวรรค์(NS) ความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ 128.1MHz การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 4 สถานีดังรูป 3.16 ผลที่ได้จากการออกแบบแสดงดังรูป 3.17 โดยที่สถานี MK ใช้สายอากาศ 5 องค์กรประกอบ มุมยก 2.4 องศา สถานี RCAG NS ใช้สายอากาศ 5 องค์กรประกอบ 2 ตัวมุมยก 3.7 องศาเหมือนกัน ส่วนสถานี RCAG KN ใช้สายอากาศ 6 องค์กรประกอบ มุมยก 2.7 องศา



รูป 3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 4 ที่กำหนดจากพื้นที่ควบคุมและเส้นทางการบิน

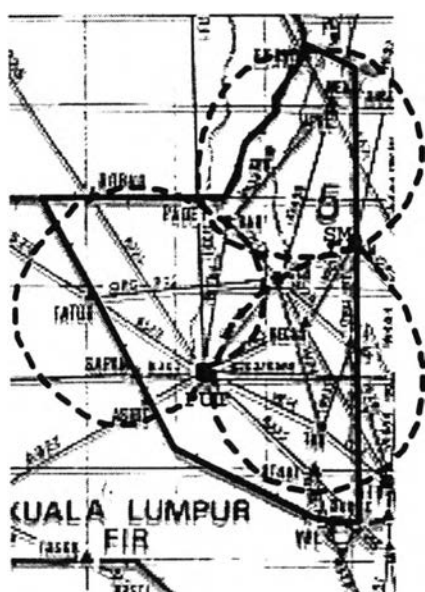


รูป 3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนดและออกแบบของเขตที่ 4

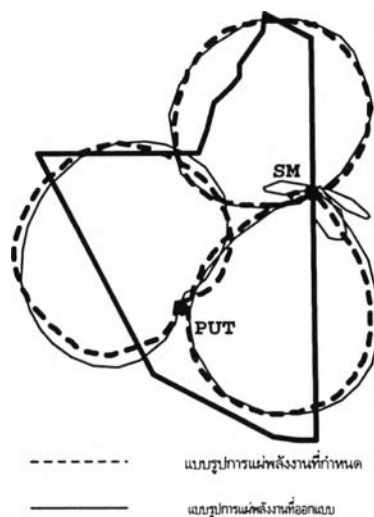


### 5) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 5

สำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศของเขตที่ 5 ประกอบด้วยสถานี VHF air/ground 2 สถานีคือ สถานีภูเก็ต (PU) สถานีสมุย (SM) อยู่ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี ความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ 126.6MHz การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 2 สถานีดังรูป 3.18 ผลที่ได้จากการออกแบบสายอากาศแสดงดังรูป 3.19 สถานี RCAG SM ทางทิศเหนือ ใช้สายอากาศ 3 องค์กรประกอบ มุมยก 3.8 องศา RCAG SM ทางทิศใต้ใช้สายอากาศ 6 องค์กรประกอบ มุมยก 3.5 องศา สถานี RCAG PU ใช้สายอากาศ 3 องค์กรประกอบ มุมยก 3.7 องศา



รูป 3.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ  
ในเขตที่ 5 ที่กำหนดจากพื้นที่ควบคุม  
และเส้นทางการบิน



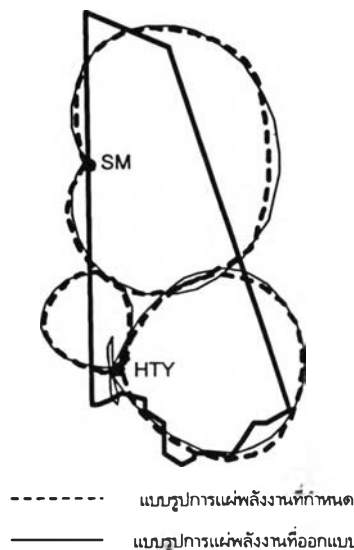
รูป 3.19 แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนด  
และออกแบบของเขตที่ 5

### 6) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 6

สำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศของเขตที่ 6 ประกอบด้วยสถานี VHF air/ground 2 สถานีคือ สถานีสมุยและสถานีหาดใหญ่ (HTY จังหวัดสงขลา) ความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ 123.95MHz การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 2 สถานีดังรูป 3.20 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการออกแบบแสดงดังรูป 3.21 สถานี RCAG SM ใช้สายอากาศแบบ 3 องค์กรประกอบ มุมยก 3.6 องศา สถานี RCAG HTY ทิศตะวันตกใช้สายอากาศ 5 องค์กรประกอบ มุมยก 5 องศา ทิศตะวันออกใช้สายอากาศ 5 องค์กรประกอบ มุมยก 4 องศา



รูป 3.20 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 6 ที่กำหนดจากพื้นที่ควบคุมและเส้นทางการบิน



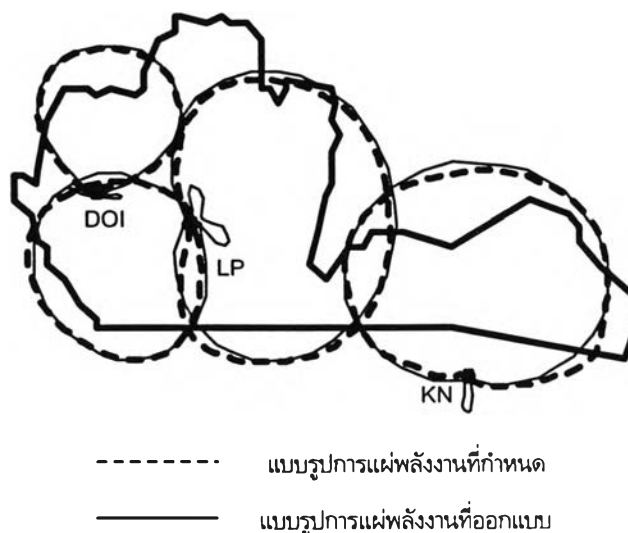
รูป 3.21 แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนดและออกแบบของเขตที่ 6

#### 7) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 7

สำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศของเขตที่ 7 ประกอบด้วยสถานี VHF air/ground 3 สถานีคือ สถานีดอยอินทนนท์ (DOI จังหวัดเชียงใหม่) สถานีขอนแก่น และสถานีลำปาง (LP) ความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ 132.1MHz การกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 3 สถานีดังรูป 3.22 และผลของการออกแบบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแสดงดังรูป 3.23 สถานี RCAG LP ทางทิศตะวันตกใช้สายอากาศ 5 องค์ประกอบ มุมยก 4 องศา ทางทิศตะวันออกใช้สายอากาศ 3 องค์ประกอบ มุมยก 3.3 องศา สถานี RCAG DOI ใช้สายอากาศ 5 องค์ประกอบ มุมยก 4.8 องศา สถานี RCAG KN ใช้สายอากาศ 3 องค์ประกอบ มุมยก 3.3 องศา



รูป 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในเขตที่ 7 ที่กำหนดจากพื้นที่ควบคุมและเส้นทางการบิน



รูป 3.23 แบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนดและออกแบบของเขตที่ 7

#### การคำนวณหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตพื้นที่การควบคุม

เนื่องจากกำลังของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละตำแหน่งในพื้นที่ควบคุมจะต้องมีระดับสัญญาณที่แรงพอที่ทำให้สถานีภาคพื้นดินกับอากาศยานติดต่อสื่อสารกันได้ซึ่งอยู่ที่ระดับ  $-100\text{ dB}$  ดังนั้นต้องมีการคำนวณหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานี โดยใช้สูตรการส่งผ่านกำลังของฟรีส ในการคำนวณจะต้องทราบระดับความสูงของการควบคุมแนวตั้ง สำหรับการควบคุมทางแนวตั้งสูงสุดของประเทศไทยอยู่ที่ระดับ 46000 ฟุต (7.79 ไมล์ทะเล) และระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบของแต่ละสถานี ความถี่ที่ใช้งานในพื้นที่ควบคุมและอัตราการขยายของสายอากาศแต่ละสถานี โดยกำหนดให้สายอากาศรับบนอากาศยานเป็นแบบแผ่กำลังรอบตัว มีอัตราการขยาย  $2.15\text{ dBi}$

#### 1. การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตที่ 1

##### 1.1 สถานี MK

ความถี่ที่ใช้งานในเขตพื้นที่คือ  $120.5\text{ MHz}$ . ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ  $142.85\text{ NM}$  อัตราการขยายของสายอากาศส่งเท่ากับ  $9.22\text{ dBi}$  จากสูตรการส่งผ่านกำลังของฟรีสตามสมการ (3-2) จะได้

$$P_t = -100 - 9.22 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(R) + 20 \log(120.5)$$

$$R = \sqrt{142.85^2 + 7.79^2} = 143.06\text{ NM} = 257.5\text{ Km}$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$P_t = -100 - 9.22 - 2.15 + 32.45 + 48.22 + 41.62$$

$$= 10.98dB = 12.53W$$

### 1.2 สถานี RCAG KM

ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 108.85 NM อัตราการขยายสายอากาศเท่ากับ

15 dBi

$$R = \sqrt{108.57^2 + 7.79^2} = 108.85NM \text{ เท่ากับ } 195.92Km.$$

$$P_t = -100 - 9.22 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(195.92) + 20 \log(120.5)$$

$$= 2.76dB = 1.89W$$

## 2. การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตที่ 2

### 2.1 สถานี MK

ความถี่ที่ใช้งานในเขตนี้คือ 133.1 MHz. ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ

117 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 8.61 dBi

$$R = \sqrt{117^2 + 7.79^2} = 117.26NM = 211.07Km.$$

$$P_t = -100 - 8.61 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(211.07) + 20 \log(133.1)$$

$$= 10.66dB = 11.65W$$

### 2.2 สถานี RCAG KT

ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 117 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ

13.23 dBi

$$R = \sqrt{117^2 + 7.79^2} = 117.26NM = 211.07Km.$$

$$P_t = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(211.07) + 20 \log(133.1)$$

$$= 6.04dB = 4.2W$$

### 2.3 สถานี RCAG KN

ระยะควบคุมไกลสุดเท่ากับ 108 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 15 dBi

$$R = \sqrt{108^2 + 7.79^2} = 108.28NM = 194.91Km.$$

$$P_t = -100 - 17 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(194.91) + 20 \log(133.1)$$

$$= 1.58dB = 1.44W$$

#### 2.4 สถานี RCAG UB

1) ทางทิศตะวันตก ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 147 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{147^2 + 7.79^2} = 147.20 \text{ NM} = 264.97 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(264.97) + 20 \log(133.1) \\ &= 8.02 \text{ dB} = 6.34 \text{ W} \end{aligned}$$

2) ทางทิศตะวันออก ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 156 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 15 dBi

$$R = \sqrt{156^2 + 7.79^2} = 156.19 \text{ NM} = 281.14 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 15 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(281.14) + 20 \log(133.1) \\ &= 6.76 \text{ dB} = 4.74 \text{ W} \end{aligned}$$

### 3. การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตที่ 3

#### 3.1 สถานี MK

ความถี่ที่ใช้งานในเขตนี้คือ 135.5 MHz. ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 256.67 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 9.14 dBi

$$R = \sqrt{256.67^2 + 7.79^2} = 256.79 \text{ NM} = 420.22 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 9.14 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(420.22) + 20 \log(135.5) \\ &= 16.26 \text{ dB} = 42.35 \text{ W} \end{aligned}$$

#### 3.2 สถานี RCAG HTY

ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 300 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 15 dBi

$$R = \sqrt{300^2 + 7.79^2} = 300.1 \text{ NM} = 540.18 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 15 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(540.18) + 20 \log(135.5) \\ &= 12.59 \text{ dB} = 18.15 \text{ W} \end{aligned}$$

#### 3.2 สถานี RCAG PHN

1) ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 226.67 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{226.67^2 + 7.79^2} = 226.8 \text{ NM} = 408.24 \text{ Km.}$$

$$P_t = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(408.24) + 20 \log(135.5)$$

$$= 11.93 \text{ dB} = 15.59 \text{ W}$$

2) ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ระยะความถี่ไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 206.67 NM  
อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 9.14 dBi

$$R = \sqrt{206.67^2 + 7.79^2} = 226.81 \text{ NM} = 372.26 \text{ Km.}$$

$$P_t = -100 - 9.14 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(372.26) + 20 \log(135.5)$$

$$= 15.21 \text{ dB} = 33.23 \text{ W}$$

#### 4. การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตที่ 4

##### 4.1 สถานี MK

ความถี่ที่ใช้คือ 128.1 MHz. ระยะความถี่ไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 180 NM  
อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{180^2 + 7.79^2} = 180.17 \text{ NM} = 324.30 \text{ Km.}$$

$$P_t = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(324.3) + 20 \log(128.1)$$

$$= 9.44 \text{ dB} = 8.79 \text{ W}$$

##### 4.2 สถานี RCAG NS

1) ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ระยะความถี่ไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 102 NM อัตรา  
การขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{102^2 + 7.79^2} = 102.3 \text{ NM} = 184.13 \text{ Km.}$$

$$P_t = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(184.13) + 20 \log(128.1)$$

$$= 4.52 \text{ dB} = 2.83 \text{ W}$$

2) ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ระยะความถี่ไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 108 NM อัตรา  
การขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{108^2 + 7.79^2} = 108.28 \text{ NM} = 194.9 \text{ Km.}$$

$$P_t = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(194.9) + 20 \log(128.1)$$

$$= 5.02 \text{ dB} = 3.17 \text{ W}$$

## 4.4 สถานี KN

ระยะควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ  $159 \text{ NM}$  อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ  $13.23 \text{ dBi}$

$$R = \sqrt{159^2 + 7.79^2} = 159.19 \text{ NM} = 286.54 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(286.54) + 20 \log(128.1) \\ &= 8.36 = 6.86 \text{ W} \end{aligned}$$

## 5. การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตที่ 5

## 5.1 สถานี RCAG SM

1) ทางทิศเหนือ ความถี่ที่ใช้ในเขตนี้คือ  $126.6 \text{ MHz}$ . ระยะควบคุมทางแนวราบไกลสุดเท่ากับ  $135.79 \text{ NM}$  อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ  $8.61 \text{ dBi}$

$$R = \sqrt{135.79^2 + 7.79^2} = 136.01 \text{ NM} = 244.82 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 8.61 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(244.82) + 20 \log(126.6) \\ &= 11.49 \text{ dB} = 14.07 \text{ W} \end{aligned}$$

2) ทางทิศใต้ ระยะควบคุมทางแนวราบไกลสุดเท่ากับ  $167.37 \text{ NM}$  อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ  $13.23 \text{ dBi}$

$$R = \sqrt{167.37^2 + 7.79^2} = 167.55 \text{ NM} = 301.59 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(301.59) + 20 \log(126.6) \\ &= 8.71 \text{ dB} = 7.43 \text{ W} \end{aligned}$$

## 5.2 สถานี RCAG PU

ระยะการควบคุมแนวราบไกลสุดเท่ากับ  $138.95 \text{ NM}$  อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ  $6.74 \text{ dBi}$

$$R = \sqrt{138.95^2 + 7.79^2} = 139.17 \text{ NM} = 251 \text{ Km.}$$

$$\begin{aligned} Pt &= -100 - 6.74 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(251) + 20 \log(126.6) \\ &= 13.6 \text{ dB} = 22.92 \text{ W} \end{aligned}$$

## 6. การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตที่ 6

## 6.1 สถานี RCAG SM

ความถี่ที่ใช้งานในเขตนี้คือ 123.95 MHz. ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 142.85 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 6.74 dBi

$$R = \sqrt{142.85^2 + 7.79^2} = 143.065 \text{ NM} = 257.51 \text{ Km.}$$

$$Pt = -100 - 6.74 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(257.51) + 20 \log(123.95) \\ = 13.64 \text{ dB} = 23.12 \text{ W}$$

## 6.2 สถานี RCAG HTY

1) ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 80 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{80^2 + 7.79^2} = 80.38 \text{ NM} = 144.68 \text{ Km.}$$

$$Pt = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(144.68) + 20 \log(123.95) \\ = 2.14 \text{ dB} = 1.64 \text{ W}$$

2) ทางทิศตะวันออก ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบเท่ากับ 142.86 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{142.86^2 + 7.79^2} = 143.07 \text{ NM} = 257.52 \text{ Km.}$$

$$Pt = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(257.52) + 20 \log(123.95) \\ = 7.15 \text{ dB} = 5.19 \text{ W}$$

## 7. การหาค่ากำลังส่งของแต่ละสถานีในเขตที่ 7

### 7.1 สถานี RCAG DOI

ความถี่ที่ใช้ในเขตนี้คือ 132.1 MHz. ระยะการควบคุมทางแนวราบไกลสุดของสถานีเท่ากับ 94.73 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.23 dBi

$$R = \sqrt{94.73^2 + 7.79^2} = 95.06 \text{ NM} = 171.1 \text{ Km.}$$

$$Pt = -100 - 13.23 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(171.1) + 20 \log(132.1) \\ = 4.15 \text{ dB} = 2.6 \text{ W}$$

### 7.2 สถานี RCAG LP

1) ทางทิศตะวันตก ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบของสถานีเท่ากับ 113.68 NM อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 9.22 dBi

$$R = \sqrt{113.68^2 + 7.79^2} = 113.95 \text{ NM} = 205.11 \text{ Km.}$$



$$P_t = -100 - 9.22 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(205.11) + 20 \log(132.1) \\ = 9.74 \text{ dB} = 9.141 \text{ W}$$

2) ทางทิศตะวันออก ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบของสถานีเท่ากับ 142.1 NM  
อัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 6.74 dBi

$$R = \sqrt{142.1^2 + 7.79^2} = 142.32 \text{ NM} = 256.17 \text{ Km.} \\ P_t = -100 - 6.74 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(256.17) + 20 \log(132.1) \\ = 14.14 \text{ dB} = 26 \text{ W}$$

### 7.3 สถานี RCAG KN

ระยะการควบคุมไกลสุดทางแนวราบของสถานีเท่ากับ 138.95 NM อัตราขยายของ  
สายอากาศเท่ากับ 8.06 dBi

$$R = \sqrt{138.95^2 + 7.79^2} = 139.17 \text{ NM} = 250.5 \text{ Km.} \\ P_t = -100 - 8.06 - 2.15 + 32.45 + 20 \log(250.5) + 20 \log(132.1) \\ = 12.63 \text{ dB} = 18.34 \text{ W}$$

สรุป

ในการควบคุมการจราจรทางอากาศแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศจะต้องเหมาะสมกับพื้นที่  
การควบคุมของแต่ละสถานี สำหรับการควบคุมการจราจรทางอากาศของประเทศไทยใช้สายอากาศแบบแผ่-  
พลังงานรอบตัวทำให้สูญเสียกำลังส่งในส่วนที่ไม่ได้ควบคุม และมีการรบกวนกันของคลื่นความถี่ในพื้นที่  
ควบคุมเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศแบบยาก็-อุตะที่ออกแบบในงานวิจัยนี้พบว่าการใช้  
สายอากาศแบบยาก็-อุตะจะช่วยลดกำลังส่งของแต่ละสถานีลง ลดการรบกวนกันของคลื่นความถี่และกำลังที่  
สูญเสียในพื้นที่ที่ไม่ได้ควบคุม สำหรับขั้นตอนการออกแบบสายอากาศสำหรับใช้งานในแต่ละสถานีขั้นตอน  
เริ่มต้นจะกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการของแต่ละสถานีในพื้นที่ควบคุม ต่อจากนั้นก็จะออกแบบ  
สายอากาศสายอากาศเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตามที่กำหนด จากการออกแบบพบว่า  
แบบรูปที่ออกแบบและกำหนดจากพื้นที่การควบคุมมีความใกล้เคียงกัน เมื่อได้แบบรูปการแผ่พลังงานของ  
สายอากาศแล้วขั้นต่อไปก็จะคำนวณกำลังส่งของแต่ละสถานีเพื่อให้ได้ระดับสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ตาม  
ต้องการ