หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การคำนวณออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมระบบหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์

แนวทางในการออกแบบระบบ

การออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่มีประสิทธิผล ต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบการสื่อสารที่มีสมรรถนะสูงตามเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ รวมทั้งการลงทุนของระบบทั้งหมดควรจะต้องลงทุนต่ำ

ในการวิจัยครั้งนี้ จะเน้นเฉพาะกรณีเกี่ยวกับการใช้ทรานสปอนเดอร์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคำนึงถึงความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์ที่สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างของย่ายการสื่อสาร คือ ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมเพื่อชุมชน ซึ่งประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดินที่มีปริมาณการติดต่อสื่อสารต่ำที่ติดตั้งในชุมชนขนาดเล็ก กับสถานีภาคพื้นดินที่มีปริมาณการติดต่อสื่อสารปานกลางและปริมาณการติดต่อสื่อสารสูง (ที่ติดตั้งในเมืองขนาดกลางและขนาดใหญ่) ทั้งนี้จะต้องได้คุณภาพ ของการสื่อสารสอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนดไว้

ความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์จะเป็นฟังก์ชั่นพื้นฐานระหว่างพารามิเตอร์ทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ซึ่งมีพารามิเตอร์จำนวนมากมายที่เป็นองค์ประกอบที่จะต้องนำมาพิจารณาออกแบบระบบ ดังนั้นจึงค่อนข้างจะเป็นงานยากในการออกแบบระบบที่จะจัดการประสานความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยใช้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบใดรูปแบบหนึ่งหรือเพียงสมการเดียวได้ อย่างไรก็ตามแนวทางและวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบเพื่อให้ทรานสปอนเดอร์มีความจุช่องสัญญาณสูงสุดนั้น มีข้อควรพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

1. ลักษณะสมบัติของดาวเทียม
   - EIRP คอนทัวร์
   - G/T คอนทัวร์
   - ย่านความถี่
   - แบนด์วิดท์

- ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของทรานสปอนเดอร์
- เส้นโค้งการตอบสนองทางความถี่ *
- ตำแหน่งของดาวเทียม
- แพทเทอร์นสายอากาศ

2. ข้อกำหนดของสถานีภาคพื้นดิน

- EIRP
- G/T
- อัตราขยายของสายอากาศ
- ตำแหน่งที่ตั้งของสถานี

3. เทคนิคการมอดูเลชั่น

- สัญญาณแถบความถี่พื้นฐาน
- Peak frequency deviation
- IF แบนด์วิดท์ **
- ช่วงห่างระหว่างช่อง (Channel spacing)***
- อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อเสียงรบกวน (Carrier to noise power-ratio ทั้งที่จุดทำงาน และจุด Threshold
- Threshold margin ****

4. การประมวลสัญญาณแถบความถี่พื้นฐาน

- Compandor

---

* โดยคำนึงถึงการลดทอนกำลังของฟิลเตอร์ ณ ความถี่ที่อยู่นอกเหนือแบนด์วิดท์ของทรานสปอนเดอร์

** Carson's rule bandwidth

*** ช่วงห่างระหว่างคลื่นพาห์

**** คือความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อเสียงรบกวน ณ จุดทำงาน และจุด threshold

- Emphasis
- Voice activation
- Peak deviation limitter

5. คุณภาพของสัญญาณที่ต้องการ คืออัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวน (Signal to noise power ratio)

6. ข้อบังคับเกี่ยวกับการรบกวน (Interference constraints)

- Out of band intermodulation
- Out of band emission
- การรบกวนระหว่างย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ใช้ความถี่ในย่านเดียวกัน
- การรบกวนระหว่างย่ายการสื่อสารบนภาคพื้นโลกกับย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ใช้ความถี่ในย่านเดียวกัน

7. การจัดสรรวงจรการสื่อสารคือแบบ PAMA หรือ DAMA

8. การลดทอนกำลังเนื่องจากคลื่นวิทยุการแผ่กระจายผ่านตัวกลางต่าง ๆ เช่น ฝน และไอน้ำ เป็นต้น

<u>สมรรถนะของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม</u>

1. ในการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมเพื่อให้ความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์มีค่าสูงสุดนั้น ควรออกแบบให้คุณภาพของสัญญาณมีมาตรฐานสอดคล้องกับมาตรฐานที่ CCIR และ CCITT แนะนำไว้ทุกประการ ดังนั้นในการออกแบบระบบต้องให้เสียงรบกวนที่มาจากแหล่งต่าง ๆ เข้ามารบกวนสัญญาณในระบบน้อยที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เสียงรบกวนเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดสมรรถนะของระบบการสื่อสาร ดังนั้นจึงต้องนำปัญหาของเสียงรบกวนนี้มาเป็นบรรทัดฐานในการออกแบบระบบ เสียงรบกวนจากแหล่งต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบสื่อสารแบ่งออกได้ ดังนี้

1.1 เสียงรบกวนความร้อน (Thermal noise) เสียงรบกวนความร้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือมีชื่อเรียกว่า white noise ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม จึงมีการจำแนกเสียงรบกวนความร้อนตามช่วงของการ

สื่อสาร คือ

- เสียงรบกวนความร้อนขาขึ้น เป็นเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในช่วงการสื่อสารจากสถานีภาคพื้นดินไปยังดาวเทียม เสียงรบกวนส่วนใหญ่ในช่วงการสื่อสารช่วงนี้ เกิดจากอุปกรณ์ในระบบอุปกรณ์รับของดาวเทียม โดยแสดงปริมาณของเสียงรบกวนความร้อนด้วยอุณหภูมิสมมูลของเสียงรบกวนความร้อน (Equivalent thermal noise temperature) ซึ่งมีหน่วยเป็นองศาเคลวิน (Degree Kelvin) ทั้งนี้โดยทั่วไปจะแสดงในรูปอัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของสายอากาศ ต่ออุณหภูมิสมมูลของเสียงรบกวนความร้อนของดาวเทียม (G/T) มีหน่วยเป็น $dB/^{o}K$ หรืออีกนัยหนึ่ง G/T คือ Figure of merit นั่นเอง

- เสียงรบกวนความร้อนขาลง เป็นเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในช่วงการสื่อสาร จากดาวเทียมมายังสถานีภาคพื้นดิน เสียงรบกวนส่วนใหญ่ในช่วงการสื่อสารนี้ เกิดจากอุปกรณ์ในระบบรับของสถานีภาคพื้นดิน โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของสายอากาศต่ออุณหภูมิสมมูลของเสียงรบกวนความร้อนของสถานีภาคพื้นดิน เช่นกัน

นอกจากเสียงรบกวนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์สื่อสารแล้ว เสียงรบกวนความร้อนยังมีแหล่งกำเนิดจากแหล่งกำเนิดภายนอกที่เข้ามายังสายอากาศรับ ได้แก่ sky noise, ground noise และอื่น ๆ เนื่องจากเสียงรบกวนความร้อนเหล่านี้ มีเนื้อหามากมาย จึงจะไม่ขอกล่าวในรายละเอียด แต่จะนำผลการวัดกำลังเสียงรบกวนที่มุมเงยสายอากาศของสถานีภาคพื้นดิน (elevation angle) ค่าต่าง ๆ โดยใช้สายอากาศแบบ Cassegrain ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 เมตร และแสดงผลการวัดด้วยอุณหภูมิเสียงรบกวนของสายอากาศ (antenna noise temperature) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้คำนวณ จึงได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเสียงรบกวนของสายอากาศ กับมุมเงยสายอากาศของสถานีภาคพื้นดิน โดยการประมาณค่าข้อมูลที่ได้ด้วย polynomial ดังนี้

$$Ta \approx 76.22 - 4.49\ \varepsilon_s + 0.119\ \varepsilon_s^2 - 0.00106\ \varepsilon_s^3 \quad (4.1)$$

ในที่นี้

Ta คือ อุณหภูมิเสียงรบกวนของสายอากาศ องศาเคลวิน (^{o}K)

ε_s คือ มุมเงยสายอากาศของสถานีภาคพื้นดิน, องศา

1.2 เสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น (Intermodulation noise) เป็นเสียงรบกวนที่เกิดจากลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ขยายกำลัง ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

1.3 เสียงรบกวนล่อดแทรก (Interference noise) เป็นเสียงรบกวนที่เกิดจากการรับคลื่นพาห์ที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งมีความถี่พาห์ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกันกับคลื่นพาห์ที่ต้องการ เสียงรบกวนล่อดแทรกที่เกิดขึ้น มีสาเหตุดังนี้

- เสียงรบกวนล่อดแทรกที่เกิดจากคลื่นพาห์ข้างเคียงที่มี แบนด์วิดท์กว้างเกินกว่าข้อกำหนด เข้ามาทับแบนด์วิดท์ของคลื่นพาห์ที่ต้องการ (adjacent channel interference)

- เสียงรบกวนล่อดแทรกที่เกิดจากย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียมย่ายอื่นที่อยู่ใกล้เคียง และใช้ความถี่ในย่านเดียวกัน

- เสียงรบกวนล่อดแทรกที่เกิดจากย่ายการสื่อสารบนภาคพื้นโลก ที่ใช้ความถี่ในย่านเดียวกัน

2. การจำแนกกำลังของเสียงรบกวน

มาตรฐานที่สำคัญของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม คือ มาตรฐานของกำลังของเสียงรบกวน ดังนั้นในการคำนวณออกแบบย่ายการสื่อสารควรยึดถือมาตรฐานของเสียงรบกวน ตามคำแนะนำของ CCIR Rec. 353 - 4[35] ดังนี้

กำลังของเสียงรบกวน ที่ point of zero relative level ในวงจรอ้างอิง โดยสมมติ * (hypothetical reference circuit)[36] นั้น ไม่ควรจะเกินข้อกำหนด ดังนี้

---

* คือ การกำหนดวงจรการสื่อสารของสัญญาณแถบความถี่พื้นฐาน ณ ตำแหน่งก่อนอุปกรณ์มอดูเลตและหลังอุปกรณ์ดีมอดูเลต ของสถานีภาคพื้นดินด้านส่งและด้านรับ ตามลำดับ ทั้งนี้ไม่รวมถึงอุปกรณ์เชื่อมต่อใด ๆ ระหว่างสถานีภาคพื้นดินกับย่ายการสื่อสารบนภาคพื้นโลก

- 10,000 pWOp psophometrically-weighted* one-minute mean power for more than 20 % of any month

- 50,000 pWOp psophometrically-weighted one-minute mean power for more than 0.3 % of any month

- 1,000,000 pWO unweighted (with an integrating time of 5 ms), for more than 0.01 % of any year

ในการคำนวณออกแบบย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม จะใช้ค่า 10,000 pWOp เป็นค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตามคำแนะนำของ CCIR Rec. 353-4 ยังเป็นคำแนะนำอย่างกว้าง ๆ ดังนั้นจำเป็นจะต้องจำแนกกำลังของเสียงรบกวน ตามชนิดของเสียงรบกวนเพื่อสะดวกในการคำนวณ ดังนี้

2.1	เสียงรบกวนความร้อนขาขึ้น เสียงรบกวนความร้อนขาลง และเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่นในทรานส์ปอนเดอร์	5500	pWOp *
2.2	Out of band intermodulation ของสถานีภาคพื้นดิน[26]	500	pWOp
2.3	เสียงรบกวนในอุปกรณ์ของสถานีภาคพื้นดิน[26]	1000	pWOp

---

* คือ การใช้ Weighting network ที่มีลักษณะล่มปัติใกล้เคียงกับหูของคน (กรณีของโทรศัพท์) เพื่อแก้ไขความแตกต่างระหว่างความไวต่อเสียงรบกวนของหูคนกับเครื่องมือวัด จึงได้การปรับปรุง S/N ประมาณ 2.5 dB สำหรับการใช้ psophometric weighting

** ความเห็นของผู้วิจัย เพราะกำลังผลรวมของสัญญาณรบกวนตามคำแนะนำของ CCIR เท่ากับ 10,000 pWOp ส่วนผลรวมกำลังของสัญญาณรบกวนตามข้อ 2.2-2.5 เท่ากับ 4,500 pWOp ดังนั้นผลรวมกำลังของเสียงรบกวนตามข้อ 2.1 ควรเท่ากับ 5,500 pWOp

2.4	เสียงรบกวนล่อดแทรกจาก ย่ายการสื่อสารบนภาคพื้นโลก[37]	1000	pWOp
2.5	เสียงรบกวนล่อดแทรกจากย่าย การสื่อสารผ่านดาวเทียมย่ายอื่น[38]	2000	pWOp
	ผลรวมของกำลังเสียงรบกวน	10,000	pWOp

ตามข้อ 2.1-2.5 จะเป็นการกำหนดกำลังของสัญญาณรบกวนแต่ละชนิด ในการออกแบบจะต้องไม่ให้เกินข้อกำหนดดังกล่าว ดังนั้นในการคำนวณออกแบบย่ายการสื่อสารดาวเทียม ในขั้นแรกควรพิจารณาแยกเป็นประเด็นแต่ละประเด็น แล้วจึงนำประเด็นทั้งหมดมารวมกัน ในการวิจัยครั้งนี้จะนำข้อ 2.1 มาพิจารณาออกแบบเท่านั้น และทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับข้อจำกัดอื่น ๆ อีก ซึ่งจะกล่าวในภายหลัง

3. อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวน

บรรทัดฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม คืออัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนแบบ psophometrically weighted (S/N) ที่วงจรด้านออกของหน่วยช่องสัญญาณของย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม ดังนั้นอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนที่ถูก weighted $(S/N)_T$ จะกำหนดด้วย

$$\frac{1}{(S/N)_T} = \frac{1}{(S/N)_U} + \frac{1}{(S/N)_D} + \frac{1}{(S/N)_I} \qquad (4.2)$$

ในที่นี้

$(S/N)_U$ คือ อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนที่ถูก weighted ขาขึ้น

$(S/N)_D$ คือ อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนที่ถูก weighted ขาลง

$(S/N)_I$ คือ อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น ที่เกิดขึ้นในทรานส์ปอนเดอร์

โดยทั่วไปในการออกแบบระบบการสื่อสาร จะกำหนดระดับกำลังของสัญญาณที่เป็นมาตรฐาน คือ ระดับกำลังของ test tone ที่ 0 dBmO ในแต่ละช่องสัญญาณโทรศัพท์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการจำแนกกำลังของเสียงรบกวนว่า จะพิจารณาออกแบบโดยกำหนดผลรวมของกำลังของเสียงรบกวน ที่ประกอบด้วย กำลังเสียงรบกวนความร้อนขาขึ้น กำลังเสียงรบกวนความร้อนขาลง และกำลังเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5,500 pWOp ดังนั้น อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อต่อเสียงรบกวน (S/N) จะมีค่าเท่ากับ 52.6 dB ซึ่งหาได้จากสมการที่ (4.3) ดังนี้

$$(S/N) = 90 - 10 \log (N_T) \qquad (4.3)$$

ในที่นี้

(S/N) คือ อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวน, dB

N_T คือ กำลังของเสียงรบกวน, pWOp

ในขั้นตอนต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน กำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวน (S/N) และอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวน (carrier power to noise power density ratio), (C/N_o) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง (S/N) และ (C/N_o) ขึ้นอยู่กับเทคนิคการมอดูเลต ลักษณะสมบัติ และพารามิเตอร์ของระบบที่เกี่ยวข้อง ในระบบ SCPC/CFM ความสัมพันธ์ระหว่าง (S/N) และ (C/N_o) สอดคล้องกับทฤษฎีของการมอดูเลตทางความถี่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (S/N) และ (C/N_o) ได้ดังนี้

$$(S/N) = (C/N_o) + 10 \log \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{f_p^2}{f_u^3 - f_L^3}\right] + P + C + W \qquad (4.4)$$

ในที่นี้

(S/N) คือ อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวน, dB

(C/N_o) คือ อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวน, dBW - Hz

f_p คือ peak deviation ของสัญญาณ, Hz

f_u คือ ความถี่สูงสุดของสัญญาณแถบความถี่พื้นฐาน, 3400 Hz

f_L คือ ความถี่ต่ำสุดของสัญญาณแถบความถี่พื้นฐาน, 300 Hz

P คือ emphasis improvement, 5.8 dB หากใช้ emphasis แบบค่าคงที่ของเวลา 265 µs

C คือ compandor improvement, 17 dB

W คือ psophometrically weighting factor, 2.5 dB

เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.4) แล้ว จะเห็นว่า (S/N) ขึ้นอยู่กับค่า (C/N_o) หากพารามิเตอร์อื่น ๆ ถูกกำหนดให้คงที่ หรืออีกนัยหนึ่งในระบบการสื่อสารระบบเดียวกัน หากเปลี่ยนแปลง (C/N_o) แล้ว (S/N) ก็จะเปลี่ยนแปลงตามอย่างเป็นสัดส่วนตรงเมื่อใดก็ตาม หากกำลังคลื่นพาห์ลดต่ำลงจนกระทั่งเกือบเท่ากับระดับของเสียงรบกวน หรือค่ายอดยั่วยณะของเสียงรบกวนเท่ากับระดับของคลื่นพาห์แล้ว (S/N) และ (C/N_o) จะไม่สามารถรักษาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นได้อีกต่อไป และ S/N จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว จึงให้นิยามจุดนี้ว่าจุด threshold ในระบบ SCPC/CFM ใช้หลักการดีมอดูเลตแบบ Threshold extension demodulator แบบ phase locked loop โดยกำหนดให้จุด threshold อยู่ ณ ตำแหน่งที่ค่า (S/N) ต่ำลงประมาณ 1 dB เมื่อเทียบกับจุดต่ำสุดที่ (S/N) และ (C/N_o) ยังคงรักษาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นไว้ได้ ดังนั้น สามารถหาค่า (C/N_o) ณ ตำแหน่ง threshold[39] ได้ดังนี้

$$(C/N_o)_{th} = 10 \log 35 \sqrt{f_u f_a m_p} \qquad (4.5)$$

$$m_p = \frac{f_p}{f_u} \qquad (4.6)$$

ในที่นี้

$(C/N_o)_{th}$ คือ (C/N_o) ณ ตำแหน่ง threshold, dB

m_p คือ modulation index

f_a คือ ความถี่ของ test tone เท่ากับ 1000 Hz ซึ่งความถี่ของ test tone นี้จะกำหนด loop bandwidth ของวงจร phase lock loop

ในการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม การกำหนดจุดทำงานของระบบคือกำหนดค่า (C/N_o) จึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะของระบบเป็นอย่างมาก ดังนั้นควรจะต้องทราบตำแหน่งของจุด threshold คือค่า $(C/N_o)_{th}$ ก่อนแล้วจึงกำหนดค่า (C/N_o) ที่ใช้งานจริงนั่นคือออกแบบระบบให้มีค่า (C/N_o) สูงกว่า $(C/N_o)_{th}$ นั่นเอง ความแตกต่างระหว่าง (C/N_o) ที่ใช้งานและ $(C/N_o)_{th}$ เรียกว่า threshold magin ข้อควรพิจารณาในการกำหนด threshold margin คือ จะต้องมีข้อมูลทางสถิติ เพื่อรับประกันให้ระบบสามารถทำงานได้โดย

มีค่า (S/N) อยู่ภายในมาตรฐานตลอดเวลา แม้ว่าสภาพของตัวกลางที่คลื่นวิทยุแผ่กระจายผ่านจะมีความแปรปรวนอย่างไรก็ตาม

4. การหาจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ (Transponder operating point)

ด้วยกำลังผลรวมของเสียงรบกวนภายในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจาก เสียงรบกวนความร้อนขาขึ้น เสียงรบกวนความร้อนขาลง และเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น ดังนั้นเสียงรบกวนทั้งสามประเภทนี้ จะมีผลกระทบอย่างใหญ่หลวง ในด้านสมรรถนะและคุณภาพของระบบ ในการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ประเด็นหลักที่จะต้องดำเนินการพิจารณา คือ การจัดการกับเสียงรบกวนเหล่านี้ให้มีผลกระทบกระเทือนต่อการทำงานของระบบน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่เพียงไร โดยจะพิจารณาจากคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งคุณภาพของสัญญาณที่รับได้นั้นจะแสดงด้วยความสูงต่ำของอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวน (S/N) อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวน จะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวน (C/N_o) อีกนัยหนึ่ง (S/N) จะเป็นฟังก์ชั่นของ (C/N_o) ดังนั้น เพื่อจะพิจารณาในรายละเอียดต่อไป จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังของคลื่นพาห์กับความเข้มข้นของกำลังของเสียงรบกวนของระบบการสื่อสารในช่วงต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\frac{1}{(C/N_o)_T} = \frac{1}{(C/N_o)_U} + \frac{1}{(C/N_o)_D} + \frac{1}{(C/N_o)_I} \qquad (4.7)$$

ในที่นี้

$(C/N_o)_T$ คือ ผลรวมอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวน (Total carrier to noise power density ratio)

$(C/N_o)_U$ คือ อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนขาขึ้น (up-link carrier to noise power density ratio)

$(C/N_o)_D$ คือ อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนขาลง (down-link carrier to noise power density ratio)

$(C/N_o)_I$ คือ อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น (carrier to intermodulation noise density ratio)

ขั้นต่อไปจะแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่มีต่อ $(C/N_o)_U$, $(C/N_o)_D$ และ $(C/N_o)_I$ ตามลำดับดังนี้

อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนขาขึ้น มีหน่วยเป็น dBW-Hz

$$(C/N_o)_U = W_s + (G/T)_s - 10 \log (4\pi/\lambda_u^2) - 10 \log k - Bo_i \quad (4.8)$$

ในที่นี้

W_s คือ Saturation flux density, dBW/m^2

$(G/T)_s$ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของสายอากาศต่ออุณหภูมิสัมมูลของเสียงรบกวนความร้อนของดาวเทียม, dB

$10 \log(4\pi/\lambda_u^2)$ คือ อัตราขยายของสายอากาศ ที่มีพื้นที่ช่องเปิด (aperture area) 1 ตารางเมตร ที่ความถี่กึ่งกลางของทรานส์polอนเดอร์ที่ใช้งาน

$10 \log k$ คือ Boltzmann's constant, -228.6 $dBW/^oK$-Hz

Bo_i คือ input back-off ของทรานส์polอนเดอร์ เมื่อเทียบกับกำลังของคลื่นพาห์คลื่นเดี่ยวที่ทำให้ทรานส์polอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว, dB

อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนขาลง มีหน่วยเป็น dBW-Hz

$$(C/N_o)_D = (EIRP)_{st} - L_d + (G/T)_e - Per - 10 \log k - Bo_o \quad (4.9)$$

ในที่นี้

$(EIRP)_{st}$ คือ Single carrier saturation EIRP, dBW

L_d คือ free space path loss ช่วงขาลง, dB

$(G/T)_e$ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของสายอากาศต่ออุณหภูมิสัมมูลของเสียงรบกวนความร้อนของสถานีภาคพื้นดิน, dB

Per คือ receive earth station pointing error ประมาณ 0.3 dB

Bo_o คือ output back-off ของทรานส์polอนเดอร์ เมื่อเทียบกับกำลังของคลื่นพาห์ด้านออกคลื่นเดี่ยว เมื่อทรานส์polอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว, dB

ขั้นต่อไป คือการพิจารณาอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น, $(C/N_o)_I$, การคำนวณหาเทอมนี้ค่อนข้างจะมีความยุ่งยาก จึงต้องใช้เครื่องคำนวณเข้ามาช่วยในการคำนวณ จากสมการที่ (3.3) จะเห็นว่า C/IM_T เป็นฟังก์ชั่นของ input back-off ของทรานส์polอนเดอร์ ในการคำนวณออกแบบระบบ จะสะดวกยิ่งขึ้นหากจะหาผลกระทบที่เกิดจากอินเตอร์มอดูเลชั่น ให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยสมมูลของความเข้มข้นของกำลังของอินเตอร์มอดูเลชั่น (equivalent average intermodulation noise density) เมื่อเทียบกับกำลังของคลื่นพาห์ค่าใดค่าหนึ่งที่เหมาะสม เนื่องจากในระบบ SCPC ประกอบด้วยคลื่นพาห์จำนวนมาก และการกระจายของคลื่นพาห์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดแบนด์วิดท์ของทรานส์polอนเดอร์ ดังนั้นจึงจะคำนวณ อัตราส่วนสมมูลของกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของอินเตอร์มอดูเลชั่น (equivalent carrier to noise density) ได้ดังนี้

$$(C/N_o)_I = C/IM_T + 10 \log B \qquad (4.10)$$

ในที่นี้

$(C/N_o)_I$ คือ อัตราส่วนสมมูลของกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของอินเตอร์มอดูเลชั่น, dB - Hz

(C/IM_T) คือ ผลรวมของ C/IM_3 และ C/IM_5 ณ คลื่นพาห์ตรงกลางของทรานส์polอนเดอร์ ณ จุดทำงาน (input back-off) ใด ๆ ของทรานส์polอนเดอร์, dB

B คือ แบนด์วิดท์ที่ใช้งานของทรานส์polอนเดอร์, Hz

จากสมการที่ (4.10) สามารถหาความเข้มข้นของกำลังเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น (intermodulation noise density) ได้ ด้วยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$IM = (EIRP)_{st} - Bo_o - (C/N_o)_I \qquad (4.11)$$

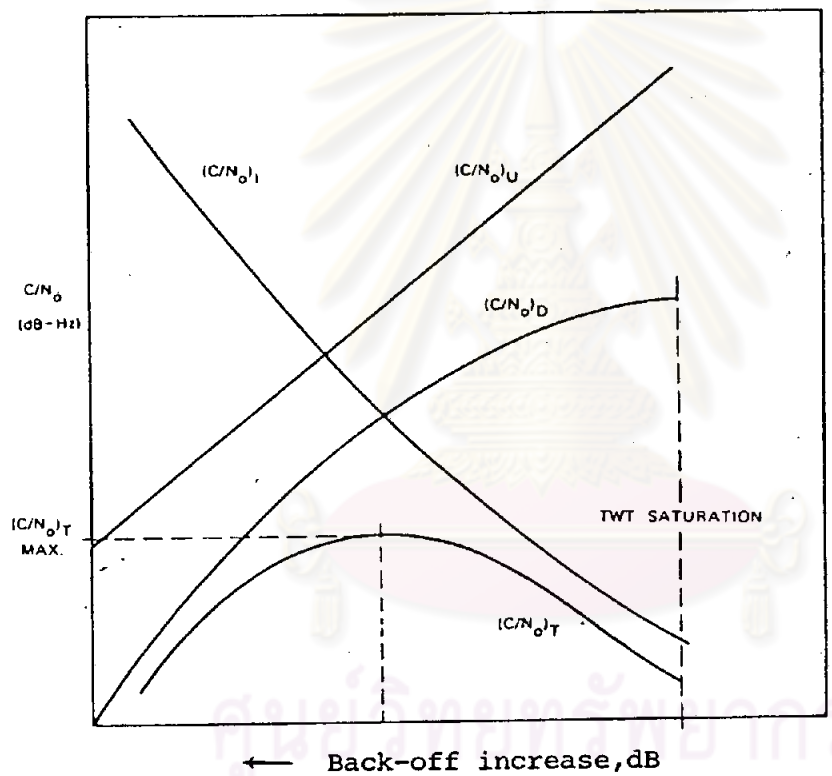
ในที่นี้

IM คือ ความเข้มข้นของกำลังอินเตอร์มอดูเลชั่น ในทรานส์polอนเดอร์ ณ output back-off ที่สอดคล้องกับ input back-off ใด ๆ ของทรานส์polอนเดอร์, dBW/Hz

$(EIRP)_{st}$ คือ EIRP ของคลื่นพาห์คลื่นเดี่ยวที่ทรานส์polอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว (single carrier saturation EIRP), dBW

Bo_o คือ output back-off ของทรานส์polอนเดอร์, dB

ขั้นต่อไปคือการพิจารณาหาจุดทำงานของทรานส์polอนเดอร์ โดยการพิจารณา $(C/N_o)_T$ ในสมการที่ (4.7)* ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความสัมพันธ์ของ $(C/N_o)_U$, $(C/N_o)_D$ และ $(C/N_o)_I$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ (4.1)



รูปที่ 4.1 Optimum TWT Operating Point

---

* ในการคำนวณสมการที่ (4.7) เทอมทุกเทอมในสมการนี้จะเป็นตัวเลขธรรมดา (numeric) ดังนั้นการนำเทอมดังกล่าวที่ได้มาจากสมการที่ (4.8), (4.9) และ (4.10) ซึ่งใช้หน่วย dB จะต้องแปลงเทอมเหล่านั้นให้เป็นตัวเลขธรรมดาเสียก่อนแล้วจึงค่อยแปลงกลับเป็นหน่วย dB ใหม่

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ (4.1) แล้ว จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของ $(C/N_o)_T$ ขึ้นอยู่กับ back-off ของทรานสปอนเดอร์ ดังนั้นการหาจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ที่เหมาะสมคือ การหาค่า back-off ที่ทำให้ $(C/N_o)_T$ มีค่าเหมาะสมนั่นเอง หรืออีกนัยหนึ่งคือ $(C/N_o)_T$ มีค่าสูงสุด การหาค่า back-off ที่เหมาะสมจะต้องใช้เครื่องคำนวณเข้ามาช่วยในการคำนวณ ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ (4.8) , (4.9) และ (4.10) จะเห็นว่าเทอมที่จะมีผลกระทบต่อความสูงต่ำของ $(C/N_o)_T$ ที่จุด optimum มากที่สุดคือ $(C/N_o)_D$ ซึ่ง $(C/N_o)_D$ นี้เป็นฟังก์ชั่นของ G/T ของสถานีภาคพื้นดินนั่นเอง อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่า $(C/N_o)_T$ ขึ้นอยู่กับการ back-off ของทรานสปอนเดอร์ และค่า back-off นี้จะขึ้นอยู่กับค่า G/T ของสถานีภาคพื้นดินนั่นเอง

ข้อบังคับเรื่องจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์

ในการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมในการเลือกจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์นั้น ยังมีข้อจำกัดประเด็นหนึ่ง คือ ข้อบังคับเกี่ยวกับ out of band intermodulation emission* ต้องไม่ให้เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่ง out of band intermodulation emission นี้ ก็ขึ้นอยู่กับจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ด้วย ดังนั้นแม้ว่าที่จุดทำงานที่ทำให้ $(C/N_o)_T$ มีค่าสูงสุดก็ตาม หาก out of band intermodulation emission สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานแล้ว จุดทำงานนั้นจะไม่ใช่จุดทำงานที่เหมาะสมอีกต่อไป ดังนั้นในการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของทรานสปอนเดอร์ จะต้องพิจารณาควบคู่กับ out of band intermodulation emission และจะต้องถือมาตรฐานเป็นสำคัญ เช่นในการใช้ดาวเทียม PALAPA ผู้ออกแบบระบบ จะต้องยึดถือและปฏิบัติตามข้อบังคับเกี่ยวกับ out of band intermodulation emission ดังนี้

Designating the center frequency of the transponder being used as f_o, the total intermodulation products per 4 kHz generated in the satellite transponder by two or more accessing carriers shall not

---

* คือ ผลรวมกำลังของเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น ในแบนด์วิดท์ 4 kHz ที่อยู่นอกเหนือแบนด์วิดท์ของทรานสปอนเดอร์ที่ใช้งาน หลังจากถูกลดทอนกำลังด้วยฟิลเตอร์ด้านออกแล้ว

exceed + 70 dB below reference single carrier at saturation outside of band $f_o \pm 20$ MHz

ดังนั้นจะเห็นว่าข้อบังคับของ out of band intermodulation emission ของระบบการสื่อสารด้วยดาวเทียม PALAPA กำหนดไว้ไม่ให้เกิน - 38 dBW/ 4 kHz เมื่อ EIRP ที่จุดอิ่มตัวมีค่าเท่ากับ 32 dBW

<u>การออกแบบระบบหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์ที่มีการกระจายกำลังของคลื่นพาห์แบบระดับเดียว</u> (Single level SCPC)

การกระจายกำลังของคลื่นพาห์แบบระดับเดียวคือการออกแบบให้มีการกระจายกำลังของคลื่นพาห์ทุกคลื่นพาห์ในทรานสปอนเดอร์ ให้มีระดับเท่ากัน ไม่ว่าภายในย่ายการสื่อสารจะประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดินที่มีขนาดแตกต่างกันอย่างไรก็ตาม ซึ่งความแตกต่างนั้นก็คือ G/T ของสถานีภาคพื้นดินแตกต่างกันนั่นเอง ดังนั้นในการคำนวณออกแบบระบบการสื่อสารในระบบนี้จึงต้องยึดสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก คือมีค่า G/T ต่ำสุดเป็นบันทัดฐานในการพิจารณา โดยให้มีคุณภาพของสัญญาณสอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนดไว้

1. สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบ

1.1 อัตราขยายของดาวเทียม (satellite gain)

ในการคำนวณออกแบบจะให้นิยามของอัตราขยายของดาวเทียม ด้วยสมการดังนี้

$$(GA)_s = (EIRP)_{st} - Bo_o - W_s + Bo_i \qquad (4.12)$$

ในที่นี้

$(GA)_s$ คือ อัตราขยายของดาวเทียม, $dB.m^2$

1.2 ผลรวมของ EIRP ของดาวเทียมที่ใช้งาน (available EIRP)

ผลรวมของ EIRP ของดาวเทียมที่ใช้งาน คือ ผลรวมของ EIRP ที่ทรานสปอนเดอร์ สามารถจ่ายให้แก่คลื่นพาห์ที่ใช้ทรานสปอนเดอร์นั้นร่วมกัน ณ จุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ที่เหมาะสม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ $(EIRP)_{st}$ และ Bo_o ดังนี้

$$(EIRP)_{sa} = (EIRP)_{st} - Bo_o \qquad (4.13)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในที่นี้

$(EIRP)_{sa}$ คือ EIRP ของดาวเทียมที่ใช้งาน, dBW

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C/N_o)_u$ และ EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์แต่ละคลื่น

ในหัวข้อนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(C/N_o)_u$ และ EIRP ของคลื่นพาห์ที่ส่งจากดาวเทียมแต่ละคลื่น ดังนี้

$$(C/N_o)_u = (EIRP)_s - (GA)_s + (G/T)_s - 10 \log (4\pi/\lambda_u^2) - 10 \log k \qquad (4.14)$$

ในที่นี้

$(C/N_o)_u$ คือ (C/N_o) ของคลื่นพาห์ขาขึ้นแต่ละคลื่น, dBW - Hz

$(EIRP)_s$ คือ EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์แต่ละคลื่น, dBW

1.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C/N_o)_d$ และ EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์แต่ละคลื่น

ความสัมพันธ์ต่อไปนี้จะใช้ในการคำนวณหา $(C/N_o)_d$ ของคลื่นพาห์ที่เป็นฟังก์ชั่นของ $(EIRP)_s$ และ $(G/T)_e$ ของสถานีภาคพื้นดิน ดังนี้

$$(C/N_o)_d = (EIRP)_s - L_d - Per + (G/T)_e - 10 \log k \qquad (4.15)$$

ในที่นี้

$(C/N_o)_d$ คือ (C/N_o) ของคลื่นพาห์ขาลงแต่ละคลื่น, dBW - H_z

1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น, $(C/N_o)_{IM}$ และ $(EIRP)_s$ ของดาวเทียม ของคลื่นพาห์แต่ละคลื่น

เมื่อดำเนินการหาจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ ที่เหมาะสมได้แล้ว ก็สามารถทราบความเข้มข้นของกำลังเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น (IM) ได้ตามสมการ (4.11) ดังนั้น

$$(C/N_o)_{IM} = (EIRP)_s - IM \qquad (4.16)$$

1.6 การหาค่า EIRP ของคลื่นพาห์แต่ละคลื่นที่ส่งจากสถานีภาคพื้นดิน

การหาค่า EIRP ของคลื่นพาห์แต่ละคลื่นที่ส่งจากสถานีภาคพื้นดิน $(EIRP)_e$ ที่สอดคล้องกับ EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์แต่ละคลื่น, $(EIRP)_s$ แสดงได้ดังนี้

$$(EIRP)_e = (EIRP)_s - (GA)_s - 10 \log (4\pi/\lambda_u^2) + L_u + Pet \quad (4.17)$$

L_u คือ free space path loss ย่านขาลง, dB

Pet คือ transmit earth station pointing error,, ประมาณ 0.5 dB

2. ความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์ของระบบ SCPC แบบจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์ในทรานสปอนเดอร์แบบระดับเดียว

การดำเนินการหาความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์ คือการหาจำนวนของคลื่นพาห์ที่ใช้ทรานสปอนเดอร์ร่วมกันนั่นเอง หรืออีกนัยหนึ่งทรานสปอนเดอร์สามารถจ่ายกำลังให้แก่คลื่นพาห์ได้เป็นจำนวนเท่าใด โดยทรานสปอนเดอร์นั้นยังคงมีจุดทำงานที่เหมาะสมอยู่ ดังนั้นสามารถหาความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์ได้ด้วยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\bar{N} = \text{antilog} \left[\frac{(EIRP)_{sa} - (EIRP)_s}{10} \right] \quad (4.18)$$

ในที่นี้

$\bar{N}$ คือ จำนวนคลื่นพาห์ที่ใช้งานในทรานสปอนเดอร์ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ

$(EIRP)_{sa}$ คือ EIRP ของดาวเทียมที่ใช้งาน ซึ่งหาได้จากสมการที่ (4.13), dBW

$(EIRP)_s$ คือ EIRP ของดาวเทียมของแต่ละคลื่นพาห์, dBW

โดยทั่วไป ในการส่งสัญญาณโทรศัพท์ด้วยระบบ SCPC จะใช้เทคนิค voice activation ซึ่งมี activity factor เท่ากับ p ดังนั้น ความจุช่องสัญญาณของดาวเทียมเมื่อใช้เทคนิค voice activation สามารถหาได้ดังนี้

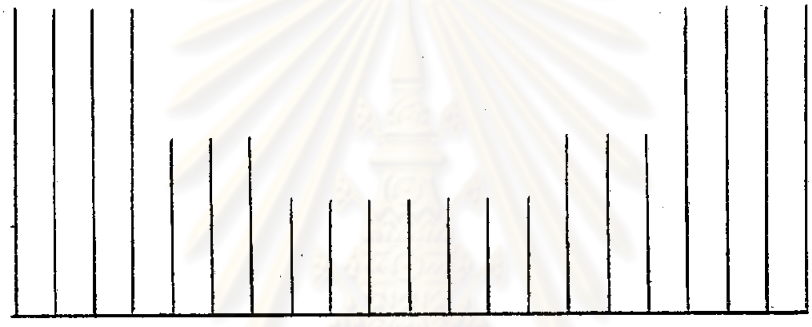
$$N = \bar{N}/P \quad (4.19)$$

ในที่นี้

N คือ ความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์

การออกแบบระบบหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์แบบจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์ในทรานส์ปอนเดอร์แบบหลายระดับ (Multilevel SCPC)

การประยุกต์ใช้ระบบหนึ่งสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์ ในย่ายการสื่อสารที่มีขนาดของสถานีภาคพื้นดินแตกต่างกัน * เพื่อให้การใช้กำลังงานของดาวเทียมอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ระดับกำลังของคลื่นพาห์ในทรานส์ปอนเดอร์จะต้องได้รับการปรับปรุงระดับให้เหมาะสมกับขนาดของค่า G/T ของสถานีภาคพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงวิธีการจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์ในทรานส์ปอนเดอร์แบบหลายระดับ

สาเหตุที่ต้องทำการจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์แบบหลายระดับ เพราะหากจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์แบบระดับเดียวแล้ว จะทำให้ดาวเทียมสูญเสียกำลังงานโดยไม่จำเป็น ถ้าในย่ายการสื่อสารประกอบด้วย สถานีภาคพื้นดินที่มีขนาดไม่เท่ากัน ดังนั้น EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์แต่ละคลื่น จะถูกกำหนดด้วยสถานีภาคพื้นดินที่มีขนาดเล็กที่สุด ดังนั้นกำลังของคลื่นพาห์ที่รับได้ ณ สถานีภาคพื้นดินขนาดใหญ่ จะสูงเกินความจำเป็น และความจุช่องสัญญาณของทรานส์ปอนเดอร์จะถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขทางกำลัง (power limited)

หลักการออกแบบการจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์ในทรานส์ปอนเดอร์แบบหลายระดับคือ ในการหาจุดทำงานของทรานส์ปอนเดอร์จะใช้วิธีการของการจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์แบบระดับเดียว โดยการใช้ค่า G/T ร่วม (Common G/T) ซึ่งหาได้จากการ

---

* ขนาดของสถานีภาคพื้นดินกำหนดด้วย ค่า G/T

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เฉลี่ยน้ำหนัก (weighted average) ของ G/T ทั้งหมดในย่ายการสื่อสาร เมื่อหาจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ที่เหมาะสมได้แล้ว ระดับกำลังของคลื่นพาห์แต่ละประเภทจะถูกกำหนดด้วยค่า G/T ที่แท้จริงของสถานีภาคพื้นดินแต่ละสถานี ดังนั้นต่อไปนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์และวิธีการในการจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์แบบหลายระดับ

ให้ s เป็นจำนวนประเภทของสถานีภาคพื้นดินในย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียมในระบบหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์ วิธีการกำหนดประเภทของสถานีภาคพื้นดิน คือ สถานีภาคพื้นดินที่มีค่า G/T เท่ากัน กำหนดให้อยู่ในประเภทเดียวกัน

กำหนดให้

$$T = (T_{ij}) \qquad 1 \leq i \leq s, \quad 1 \leq j \leq s \qquad (4.20)$$

$$T_{ij} = T_{ji} \qquad 1 \leq i \leq s, \quad 1 \leq j \leq s \qquad (4.21)$$

ในที่นี้

T คือ เมตทริกซ์ของจำนวนคลื่นพาห์*ระหว่างสถานีประเภทต่าง ๆ

T_{ij} คือ จำนวนคลื่นพาห์ที่ส่งจากสถานีภาคพื้นดินประเภท i ไปยังสถานีภาคพื้นดินประเภท j

ในย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีประเภทเดียวกันและต่างประเภทกัน และจำนวนคลื่นพาห์ที่ส่งจากสถานีภาคพื้นดินประเภท i ไปยังสถานีภาคพื้นดินประเภท j จะเท่ากับจำนวนคลื่นพาห์ที่ส่งจากสถานีภาคพื้นดินประเภท j ส่งมายังสถานีภาคพื้นดินประเภท i

ในขั้นต่อไปจะกำหนดผลรวมทั้งหมดของคลื่นพาห์ในย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยกำหนดให้

$$n_j = \sum_{j=1}^{s} T_{ij}, \qquad 1 \leq j \leq s \qquad (4.22)$$

$$n_t = \sum_{j=1}^{s} n_j, \qquad 1 \leq j \leq s \qquad (4.23)$$

---

* หนึ่งคลื่นพาห์หมายถึง 1 ช่องสัญญาณการสื่อสารแบบทางเดียว

ในที่นี้

n_j คือ ผลรวมของจำนวนคลื่นพาห์ที่รับ โดยสถานีประเภท j หรือจำนวนคลื่นพาห์ที่จัดอยู่ในคลื่นพาห์ประเภท j นั่นเอง

n_t คือ จำนวนของคลื่นพาห์ทั้งหมดในย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ในขั้นต่อไปจะหาความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของคลื่นพาห์ที่รับโดยสถานีภาคพื้นดินประเภท j กับผลรวมของคลื่นพาห์ทั้งหมดในย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม ดังนี้

$$R_j = \frac{n_j}{n_t} \qquad (4.24)$$

ในที่นี้

R_j คือ fractional number ของคลื่นพาห์ประเภท j

ในทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียมในระบบหนึ่งย่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์ประกอบด้วยคลื่นพาห์เป็นจำนวนมาก และในการออกแบบจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ จะให้จุดทำงานอยู่ในย่านที่ค่อนข้างเป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการ back-off และจะอนุมานว่าอัตราขยายของทรานสปอนเดอร์จะมีผลกระทบต่อคลื่นพาห์ทุกคลื่นเช่นเดียวกัน แม้ว่าคลื่นพาห์เหล่านั้นจะมีกำลังต่างกันก็ตาม ดังนั้นจะกำหนดความสัมพันธ์ระหว่าง flux density และ EIRP ของคลื่นพาห์ประเภท j, j = 1, .,s กับคลื่นพาห์ประเภท 1 ตามลำดับ ดังนี้

$$r_j = C_j/C_1 \quad , \quad j = 1,....,s \qquad (4.25)$$

$$r_j = P_j/P_1 \quad , \quad j = 1,....,s \qquad (4.26)$$

ในที่นี้

r_j คือ อัตราส่วนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นพาห์ประเภท j และ 1 ทั้งความสัมพันธ์ระหว่าง EIRP และ flux density ตามลำดับ

C_j คือ EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์ประเภท j

C_1 คือ EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์ประเภท 1

P_j คือ flux density ที่สายอากาศรับของดาวเทียมของคลื่นพาห์ประเภท j

P_1 คือ flux density ที่สายอากาศรับของดาวเทียมของคลื่นพาห์ประเภท 1

การดำเนินการขั้นต่อไปจะหา EIRP เฉลี่ยของดาวเทียมของคลื่นพาห์ทั้งหมด ได้ดังนี้

$$C_a = \sum_{j=1}^{s} R_j C_j \quad , \quad j = 1,....s \qquad (4.27)$$

ในที่นี้

C_a คือ EIRP เฉลี่ยของดาวเทียมของคลื่นพาห์ทุกประเภท

แทนค่า C_j จากสมการที่ (4.25) ลงในสมการที่ (4.27) ดังนั้น

$$C_a = C_1 \sum_{j=1}^{s} r_j . R_j, \; j = 1...,s \qquad (4.28)$$

ในการออกแบบย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม จำเป็นจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นพาห์ และความเข้มข้นของเสียงรบกวน ดังนั้นในการดำเนินการขั้นต่อไป จะทำการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ ดังนี้

การหาอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนขาขึ้น ของคลื่นพาห์ประเภท j, $(C/N_o)_{uj}$, จากสมการ (4.14) ทำการเปลี่ยนความสัมพันธ์แบบลอการิทึม* มาเป็นเลขธรรมดา ดังนั้น

$$(C/N_o)_{uj} = \frac{C_j . (G/T)_s . \lambda_u^2}{4\pi . k . G_s} \qquad (4.29)$$

การหาอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนขาลง ของคลื่นพาห์ประเภท j, $(C/N_o)_{dj}$, จากสมการที่ (4.15) โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับสมการ (4.29) ดังนั้น

$$(C/N_o)_{dj} = \frac{C_j . (G/T)_{ej}}{k . L_d . Per} \qquad (4.30)$$

---

* สามารถเปลี่ยนตัวแปร A ที่มีหน่วยเป็น dB เป็นเลขธรรมดาได้ดังนี้

A = antilog (A/10) และผลบวกของลอการิทึมจะเท่ากับผลคูณ และผลลบของลอการิทึมจะเป็นผลหารของเลขธรรมดาตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในที่นี้

$(G/T)_{ej}$ คือ (G/T) ของสถานีภาคพื้นดินประเภท j

การหาอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนอินเตอร์มอดูเลชั่น, $(C/N_o)_{IM}$, จากสมการที่ (4.16) โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับสมการที่ (4.29) ดังนั้น

$$(C/N_o)_{IM} = \frac{C_j}{IM} \qquad (4.31)$$

ดังนั้นเมื่อรู้ค่า $(C/N_o)_{uj}$, $(C/N_o)_{dj}$ และ $(C/N_o)_{IM}$ แล้วเราสามารถหาผลรวมอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อความเข้มข้นของเสียงรบกวนของคลื่นพาห์ประเภท j, $(C/N_o)_{Tj}$, โดยการแทนค่า $(C/N_o)_{uj}$, $(C/N_o)_{dj}$ และ $(C/N_o)_{IM}$ จากสมการที่ (4.29), (4.30) และ (4.31) ลงในสมการที่ (4.7) ดังนั้น

$$(C/N_o)_{Tj} = \frac{C_j}{k.G_s.G_a.(G/T)_s^{-1} + k.L_d.Per.(G/T)_{ej}^{-1} + IM} \qquad (4.32)$$

ในที่นี้

$$G_a = \frac{4\pi}{\lambda_u^2}$$

แทนค่า C_j จากสมการที่ (4.25) ลงใน สมการที่ (4.32)

แล้วแทนค่า C_1 จากสมการที่ (4.28) ตามลำดับ ดังนั้น

$$(C/N_o)_{Tj} = \frac{r_j.X_j}{\sum_{i=1}^{s} r_i.R_i}, \quad j = 1,2...,s \qquad (4.33)$$

ในที่นี้

$$X_j = \frac{C_a}{k.G_s.G_a.(G/T)_s^{-1} + k.L_d.Per.(G/T)_{ej}^{-1} + IM} \qquad (4.34)$$

เมื่อพิจารณาค่า X_j ในสมการที่ (4.34) จะเห็นว่า X_j เป็นฟังก์ชั่นของ back-off ของทรานสปอนเดอร์เพราะตัวแปร C_a, G_s และ IM ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นฟังก์ชั่นของ back-off ของทรานสปอนเดอร์นั่นเอง

เนื่องจาก G/T ของสถานีภาคพื้นดินแต่ละสถานีไม่เท่ากัน ทำให้ $(C/N_o)_{Tj}$ ของสถานี j ใด ๆ ไม่เท่ากัน ทำให้สัญญาณที่รับได้มีคุณภาพสูงและต่ำต่างกัน จึงต้องมีตัวประกอบ

ให้น้ำหนัก (weighting factor), B_j

ให้ B_j, $j = 1,2,\ldots,s$ เป็นเซตของตัวประกอบน้ำหนักที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(C/N_o)_{Tj}$ ของคลื่นพาห์ ประเภท j ที่รับ ณ สถานีภาคพื้นดินประเภท j กับ $(C/N_o)_{T1}$ ของคลื่นพาห์ประเภท 1 ที่รับ ณ สถานีภาคพื้นดินประเภท 1 ดังนี้

$$(C/N_o)_{Tj} = \frac{1}{B_j} \cdot (C/N_o)_{T1}, \quad j = 2,3,\ldots,s \qquad (4.35)$$

ในการสร้าง Objective function เราพยายามจะหาชุดออปติมัม (optimum set) ของระดับคลื่นพาห์ โดยการทำให้ $(C/N_o)_{T1}$ ในสมการที่ (4.35) มีค่ามากที่สุด หรือเท่ากับว่าเราต้องการให้ objective function ต่อไปนี้มีค่ามากที่สุดด้วย

$$F(Bo_i, r_2,..,r_s,\lambda_2,..,\lambda_s) \triangleq (C/N_o)_{T1} + \sum_{j=2}^{s} \lambda_j\{(C/N_o)_{T1} - B_j(C/N_o)_{Tj}\} \qquad (4.36)$$

ในที่นี้

F(.)* คือ objective function

Bo_i คือ input back-off ของทรานสปอนเดอร์

$\lambda_2..,\lambda_s$ คือ เซตของ s-1 Lagrange multipliers

ขั้นต่อไปจะดำเนินการหาอนุพันธ์ย่อย (partial derivative) ของ F(.) ในสมการที่ (4.36) เทียบกับ λ_j

$$\frac{\delta F(.)}{\delta \lambda_j} = (C/N_o)_{T1} - B_j(C/N_o)_{Tj}, \quad j = 2,\ldots,s \qquad (4.37)$$

ให้ $\frac{\delta F(.)}{\delta \lambda_j} = 0$

แทนค่า $(C/N_o)_{Tj}$ จากสมการที่ (4.33) ลงในสมการที่ (4.37) ดังนั้นสามารถหา r_j ได้

$$r_j = \frac{X_1}{B_j \cdot X_j}, \quad j = 2,\ldots,s \qquad (4.38)$$

---

* กำหนดสัญญลักษณ์ F(.) แทน $F(Bo_i, r_2\ldots,r_s,\lambda_2\ldots,\lambda_s)$

แทนค่า $(C/N_o)_{Tj}$ จากสมการที่ (4.33) ลงในสมการที่ (4.36)

$$F(.) = \frac{X_1}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} + \sum_{j=2}^{s} \lambda_j \{ \frac{X_1}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} - \frac{B_j r_j X_j}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} \} \qquad (4.39)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ F(.) ในสมการที่ (4.39) เทียบกับ r_j

$$\frac{\delta F(.)}{\delta r_j} = - \frac{R_j}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} \left[\frac{X_1}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} + \sum_{k=2}^{s} \lambda_k \{ \frac{X_1}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} - \frac{B_k r_k X_k}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} \} \right]$$

$$- \frac{\lambda_j B_j X_j}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} \qquad (4.40)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.40) จะเห็นว่าเทอมใน [.] ด้านขวามือจะเท่ากับ F(.) ในสมการที่ (4.39) ดังนั้นสมการที่ (4.40) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\frac{\delta F(.)}{\delta r_j} = - \frac{R_j F(.)}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} - \frac{\lambda_j B_j X_j}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} \qquad (4.41)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมการที่ (4.36) และสมการที่ (4.35) ที่ล้อคคล้องกัน ดังนั้น $F(.) = (C/N_o)_{T1}$ แล้วแทนค่า F(.) และ $(C/N_o)_{T1}$ จากสมการที่ (4.33) ลงในสมการที่ (4.41) ดังนั้น

$$\frac{\delta F(.)}{\delta r_j} = - \frac{R_j X_1}{(\sum_{i=1}^{s} r_i R_i)^2} - \frac{\lambda_j B_j X_j}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i}, \quad j = 2, \ldots s \qquad (4.42)$$

ให้ $\frac{\delta F(.)}{\delta r_j} = 0$

จะหา λ_j ได้ดังนี้

$$\lambda_j = - \frac{R_j X_1}{B_j X_j \sum_{i=1}^{s} r_i R_i}, \quad j = 2, \ldots . s \qquad (4.43)$$

แทนค่า X_1 จากสมการที่ (4.38) ลงในสมการที่ (4.43)

$$\lambda_j = - \frac{r_j R_j}{\sum_{i=1}^{s} r_i R_i} \quad , j = 2, \ldots, s \tag{4.44}$$

แทนค่า r_j และ λ_j จากสมการที่ (4.38) และ (4.44) ลงในสมการที่ (4.39) ตามลำดับ จะได้

$$F(.) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{s} \frac{R_i}{B_i X_i}} \tag{4.45}$$

หาอนุพันธ์ของ $F(.)$ ในสมการที่ (4.45) เทียบกับ Bo_i ดังนั้น

$$\frac{dF(.)}{dBo_i} = -\left[\sum_{i=1}^{s} \frac{R_i}{B_i X_i}\right]^{-2} \cdot \frac{d}{dBo_i} \left[\sum_{i=1}^{s} \frac{R_i}{B_i X_i}\right] \tag{4.46}$$

ให้ $\frac{d F(.)}{d Bo_i} = 0$ ดังนั้น

$$\frac{d}{d Bo_i} \left[\sum_{i=1}^{s} \frac{R_i}{B_i X_i}\right] = 0 \tag{4.47}$$

แทนค่า $X_1, X_2 \ldots\ldots, X_s$ จากสมการที่ (4.34) ลงในสมการที่ (4.47) ดังนั้น

$$\frac{d}{dBo_i} \left\{ \frac{k G_s G_a (G/T)_s^{-1} + k L_d Per (G/T)_{eq}^{-1} + IM}{C_a} \right\} = 0 \tag{4.48}$$

ในที่นี้

$$(G/T)_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{s} R_i/B_i}{\sum_{i=1}^{s} R_i/(G/T)_{ei} B_i} \tag{4.49}$$

$(G/T)_{eq}$ ในสมการที่ (4.48) เป็น (G/T) รวมของ (G/T) ของสถานีภาคพื้นดินทุกประเภทนั่นเอง โดยหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.49)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.48) เห็นว่าเป็นสมการที่ใช้ในการออปติไมซ์ ในการหาค่า input back-off ของทรานสปอนเดอร์ ที่มีการจัดการกระจายกำลังของคลื่นพาห์แบบระดับเดียว โดย C_a คือค่า EIRP เฉลี่ยของดาวเทียมของคลื่นพาห์ทุกประเภท และ $(G/T)_{eq}$ เป็น (G/T) รวมของ (G/T) ของสถานีภาคพื้นดินทุกประเภท

ดังนั้นสามารถหาจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์ที่เหมาะสมได้ โดยวิธีการใช้เทคนิคในการหาค่าออปติมัมด้วยเครื่องคำนวณ เมื่อได้จุดทำงานที่เหมาะสมแล้ว สามารถหาค่า C_a และ IM ได้ หลังจากนั้นจึงนำค่า C_a และ IM ที่ได้ดำเนินการหาค่า X_j, $j = 1,..,s$ ตามสมการที่ (4.34)

การดำเนินการขั้นต่อไปคือ การหาค่า x_j ได้จากสมการที่ (4.38) เมื่อได้ค่า x_j แล้ว สามารถดำเนินการหาค่า C_1 จนกระทั่ง C_j ได้จากสมการที่ (4.28) และ (4.25) ตามลำดับ

ดังนั้น เมื่อทราบค่า EIRP ของดาวเทียมของคลื่นพาห์ แต่ละประเภทแล้ว การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น EIRP ของสถานีภาคพื้นดิน หรืออัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อเสียงรบกวนช่วงใด ๆ ก็สามารถหาได้ ตามสมการพื้นฐานที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรคำนึงในการออกแบบระบบคือ ต้องกำหนดให้คุณภาพของสัญญาณที่รับได้ ณ สถานีประเภทต่าง ๆ นั้น ควรจะเท่ากัน กล่าวคือควรกำหนดให้ ตัวประกอบให้น้ำหนัก B_j, $j = 1,...,s$ ควรมีค่าเท่ากับ 1 นั่นเอง