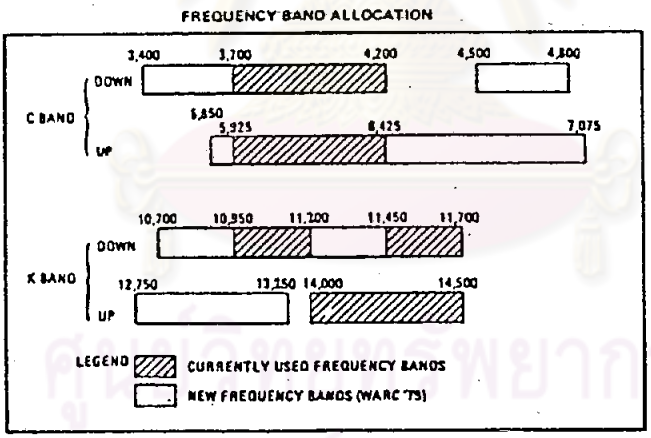
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์ของทรานสปอนเดอร์

ย่านความถี่ (Frequency Bands)

ย่านความถี่จำนวนหนึ่งที่ได้รับการจัดสรรในกิจการดาวเทียมประจำที่ (Fixed-satellite Service) ในกรรมสารสุดท้ายของที่ประชุมใหญ่ฝ่ายบริหารการวิทยุโลก ปี 1979 (Final Acts of World Administrative Radio Conference 1979) แต่ย่านความถี่ที่ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งในการสื่อสารผ่านดาวเทียมระหว่างประเทศและการสื่อสารผ่านดาวเทียมภายในประเทศ ได้แก่ ชุดความถี่ 6/4 GHz และชุดความถี่ 14/11 GHz ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



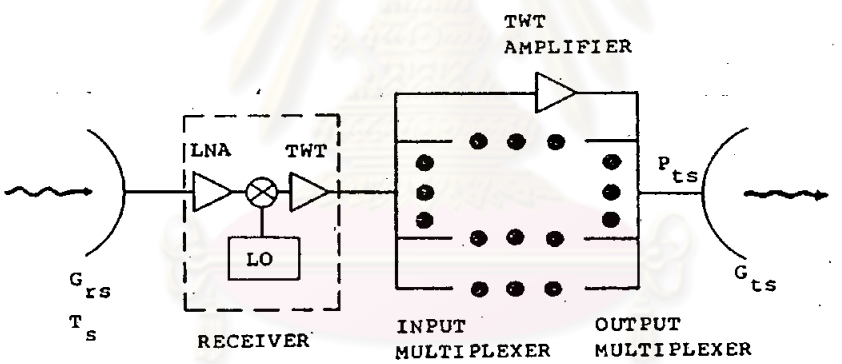
รูปที่ 3.1 การจัดสรรความถี่ย่าน C Band และ K Band

โดยที่ความถี่ด้านสูงจะใช้ส่งจากสถานีภาคพื้นดินขึ้นสู่ดาวเทียม ส่วนความถี่ด้านต่ำจะส่งจากดาวเทียมมายังสถานีภาคพื้นดิน การที่ต้องใช้ความถี่แตกต่างกันนั้น เพื่อสะดวกในการจำแนกสัญญาณป้องกันการรบกวนซึ่งกันและกัน และง่ายในการประสานงาน (Coordination) ระหว่างระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมกับระบบสื่อสารบนภาคพื้นโลกที่ใช้ความถี่ย่านเดียวกัน

ทรานส์ปอนเดอร์ (Transponder)

หน้าที่โดยพื้นฐานของดาวเทียมในการเป็นสถานีทวนสัญญาณ คือ รับคลื่นพาห์ขาขึ้นที่ส่งจากสถานีภาคพื้นดิน แล้วทำการเปลี่ยนเป็นความถี่ขาลงที่ลอดคล้องกันตามที่ได้ถูกจัดสรรไว้ และขยายคลื่นพาห์นี้แล้วส่งกลับลงมายังพื้นโลกใหม่

สำหรับดาวเทียมที่ใช้ชุดความถี่ 6/4 GHz ความกว้างของแถบความถี่สำหรับช่องสัญญาณดาวเทียม (Satellite Channel) ประมาณ 500 MHz โดยการแบ่งช่องสัญญาณดาวเทียมดังกล่าวออกเป็นส่วน ๆ ด้วยแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ประมาณ 36 MHz แต่ละส่วนเรียกว่าทรานส์ปอนเดอร์ ทั้งนี้จะได้จำนวนทรานส์ปอนเดอร์ทั้งสิ้นประมาณ 12 ทรานส์ปอนเดอร์ รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของทรานส์ปอนเดอร์ของดาวเทียม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างทรานส์ปอนเดอร์ของดาวเทียม

โดยทั่วไปภาคต้น (Front End) จะประกอบด้วย Low Noise Amplifier, Mixer และ Local Oscillator ซึ่งจะทำหน้าที่ขยายกำลังของคลื่นพาห์แล้วเปลี่ยนความถี่พาห์ใด ๆ ในย่านความถี่ 5.925 - 6.425 GHz ให้เป็นความถี่พาห์ขาลงในย่านความถี่ 3.7 - 4.2 GHz ทั้งนี้ความถี่พาห์ขาขึ้นและความถี่พาห์ขาลงจะแตกต่างกัน 2.225 GHz คลื่นพาห์ที่ได้นี้จะถูกส่งเข้าอุปกรณ์ขยาย TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) กำลังต่ำ แล้วคลื่นพาห์นั้นจะผ่าน Input Multiplexer เพื่อแยก

ไปทำการขยายกำลังด้วยอุปกรณ์ขยาย TWTA — กำลังสูงตามหมายเลขของทรานสปอนเดอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าคลื่นพาห์นั้นอยู่ในย่านความถี่ของทรานสปอนเดอร์ใด เมื่อคลื่นพาห์ถูกขยายเรียบร้อยแล้วจะผ่านฟิลเตอร์แล้วผ่าน Output Multiplexer เพื่อส่งกลับมายังพื้นโลกด้วยสายอากาศต่อไป

โดยที่แต่ละทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียมประกอบด้วยอุปกรณ์ขยายกำลัง TWTA และอุปกรณ์ขยายกำลัง TWTA นั้นมีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Characteristic) กล่าวคือเมื่ออุปกรณ์ขยายกำลัง TWTA ทำการขยายกำลังคลื่นพาห์เพียงคลื่นพาห์เดียว ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือกำลังของคลื่นพาห์ขาออกจะเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับระดับของกำลังของคลื่นพาห์ขาเข้า แต่เมื่ออุปกรณ์ขยายกำลัง TWTA ทำการขยายกำลังคลื่นพาห์หลายคลื่นพาห์ จะเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันกับการขยายกำลังเพียงคลื่นพาห์เดียว และจะเกิดปรากฏการณ์อีกแบบหนึ่ง คือ เกิด Cross-Product ระหว่างคลื่นพาห์ขาเข้าขึ้น ทำให้เกิดคลื่นพาห์ใหม่ที่ไม่ต้องการขึ้นเรียกว่า "อินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค" (Intermodulation Products) ซึ่งคลื่นพาห์ใหม่นี้จะมีความถี่พาห์แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความถี่พาห์ของคลื่นพาห์ขาเข้าที่เกิด Cross-product กัน ดังนั้นอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคอาจมีความถี่พาห์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับคลื่นพาห์ใด ๆ ซึ่งก่อให้เกิดการรบกวนต่อคลื่นพาห์นั้น โดยแสดงผลทำให้สัญญาณที่เครื่องรับมีคุณภาพต่ำลง แต่จะมีอินเตอร์มอดูเลชั่นโปดัคอีกจำนวนหนึ่งที่มีความถี่พาห์แตกต่างออกไป ซึ่งจะไม่รบกวนคลื่นพาห์ใด ๆ ในทรานสปอนเดอร์นั้น ซึ่งอาจหมายถึงมีความถี่พาห์ไม่ตกในแบนด์วิดท์ของคลื่นพาห์ทุกคลื่นพาห์ในทรานสปอนเดอร์นี้ หรือมีความถี่พาห์ซึ่งอยู่นอกทรานสปอร์เดอร์นี้ ดังนั้นจะมีผลรบกวนต่อคลื่นพาห์อื่น ๆ ในทรานสปอนเดอร์ข้างเคียง ปรากฏการณ์ที่อินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคเกิดจาก Cross-product นี้เกิดจาก Amplitude/Amplitude Nonlinearity (AM/AM)

นอกจากนั้นยังมีปรากฏการณ์อีกชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องขยายกำลัง TWTA คือ Amplitude/phase Nonlinearity หรือ AM/PM Conversion (AM/PM) ซึ่งเกิดจากคลื่นพาห์หลายคลื่นพาห์ถูกขยายด้วยเครื่องขยายกำลัง TWTA ด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเอนวิโลป (Envelope Fluctuation) ของคลื่นพาห์ขาเข้า ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitide Modulation : AM) จะถูกปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ขยายกำลัง TWTA

ทำให้คลื่นพาห์เกิดการเลื่อนของเฟส (Phase) ของคลื่นพาห์ยาออก ซึ่งจะก่อให้เกิดอิน-เตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคคล้ายกับกรณีแรก

รูปที่ 3.3 แสดง Transfer Characteristics ของทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียม ส่วนรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Back-off กับอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อเสียงรบกวน (Carrier to Intermodulation Ratio) จากความสัมพันธ์ของรูปทั้งสองจะเห็นว่าเมื่อใช้ Back-off* สูงขึ้น ทรานสปอนเดอร์จะมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้นและผลที่เกิดขึ้นจะทำให้ระดับของอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคต่ำลง นั่นคือ อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อเสียงรบกวนมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบจะต้องให้ทรานสปอนเดอร์มีจุดทำงานที่เหมาะสม (Optimum) ซึ่งก็คือเลือกค่า Back-off ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อเสียงรบกวนอยู่ภายในข้อกำหนดที่ต้องการนั่นเอง

ในการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมจะต้องพิจารณาลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์บางประการของทรานสปอนเดอร์เพิ่มเติมนอกเหนือจากลักษณะสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งมีมากมายหลายชนิดแต่จะกล่าวเฉพาะที่สำคัญและมีผลต่อการออกแบบระบบและความจุช่องสัญญาณของทรานสปอนเดอร์ (Transponder Capacity) โดยตรงคือค่า EIRP, ค่า G/T, บันวิดท์ของสายอากาศ, Transponder Saturation Flux density และ Transponder Output Filter Attenuation ของดาวเทียม เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

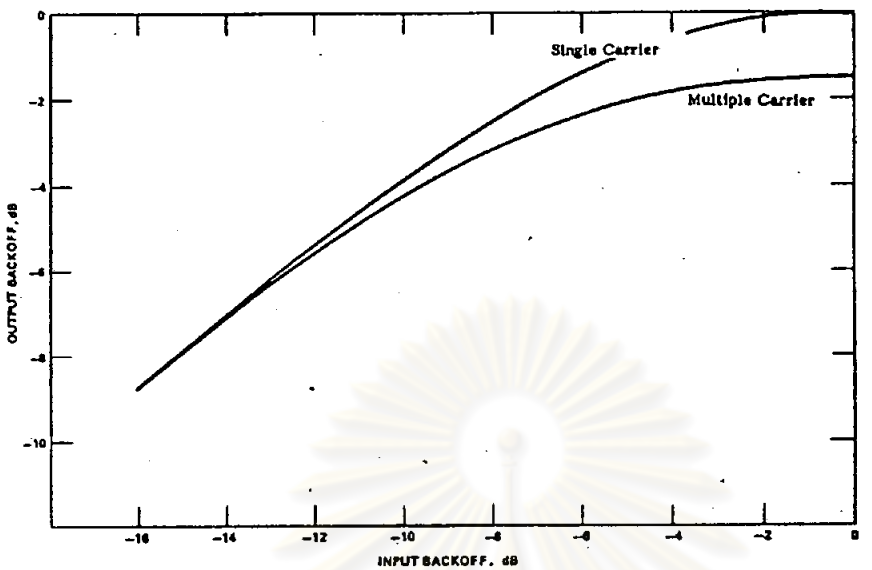
<u>ลักษณะสมบัติของดาวเทียม PALAPA</u>

ประเทศอินโดนีเซียได้ปล่อยดาวเทียม PALAPA A-1 ขึ้นสู่วงโคจรและใช้งานสื่อสารตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519** และอีกหนึ่งปีต่อมาได้ปล่อยดาวเทียม PALAPA-A2 ขึ้นไป

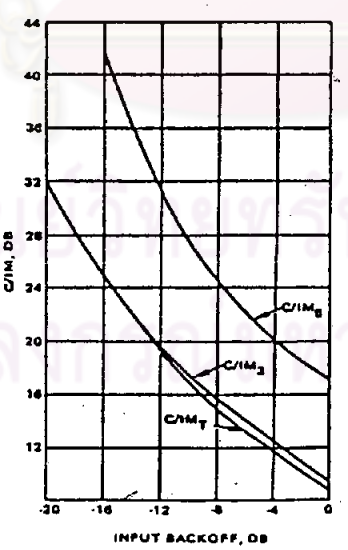
---

*Back-off คือ การลดกำลังลงจากจุดทำงานที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การออกแบบให้ทรานสปอนเดอร์มีจุดทำงานที่จุดใด ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับจุดอิ่มตัว

**ปัจจุบันดาวเทียม PALAPA A-1 หมดอายุใช้งานแล้ว ขณะนี้ใช้ดาวเทียม PALAPA B-1 แทน



รูปที่ 3.3 TWT Amplifier Transfer Characteristics



รูปที่ 3.4 Typical Third and Fifth Order Intermodulation for Infinite Carrier Case

เป็นดาวเทียมสำรองและให้กลุ่มประเทศสมาคมอาเซียน (ASEAN) เช่าเพื่อใช้ในกิจการสื่อสารภายในประเทศ สำหรับประเทศไทยได้เช่าทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียม PALAPA A-2 จำนวนสองทรานสปอนเดอร์ครึ่ง โดยใช้ในกิจการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์จำนวนสองทรานสปอนเดอร์และอีกครึ่งทรานสปอนเดอร์ใช้ในกิจการสื่อสารโทรคมนาคมด้วยระบบหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์แบบ SCPC/CFM

ลักษณะสมบัติของดาวเทียม PALAPA A-2 โดยสังเขป ดังนี้

- ตำแหน่งของดาวเทียม 77° ตะวันออก
- จำนวนทรานสปอนเดอร์ 12
- ย่านความถี่

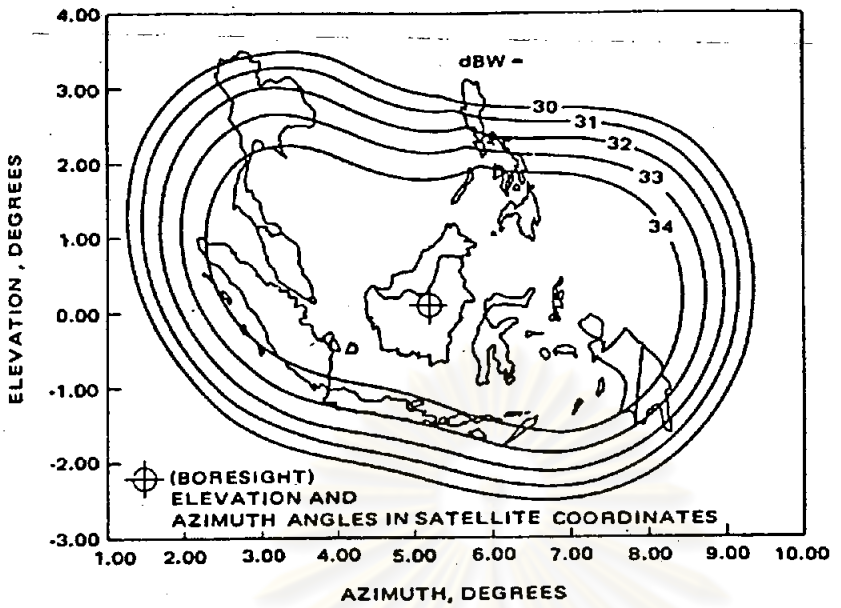
  ความถี่ส่ง 3.702 - 4.178 GHz

  ความถี่รับ 5.927 - 6.403 GHz
- ช่วงห่างระหว่างความถี่กึ่งกลางของทรานสปอนเดอร์ 40 MHz
- แบนด์วิดท์ของทรานสปอนเดอร์ 36 MHz
- แบนด์วิดท์ใช้งานของทรานสปอนเดอร์*

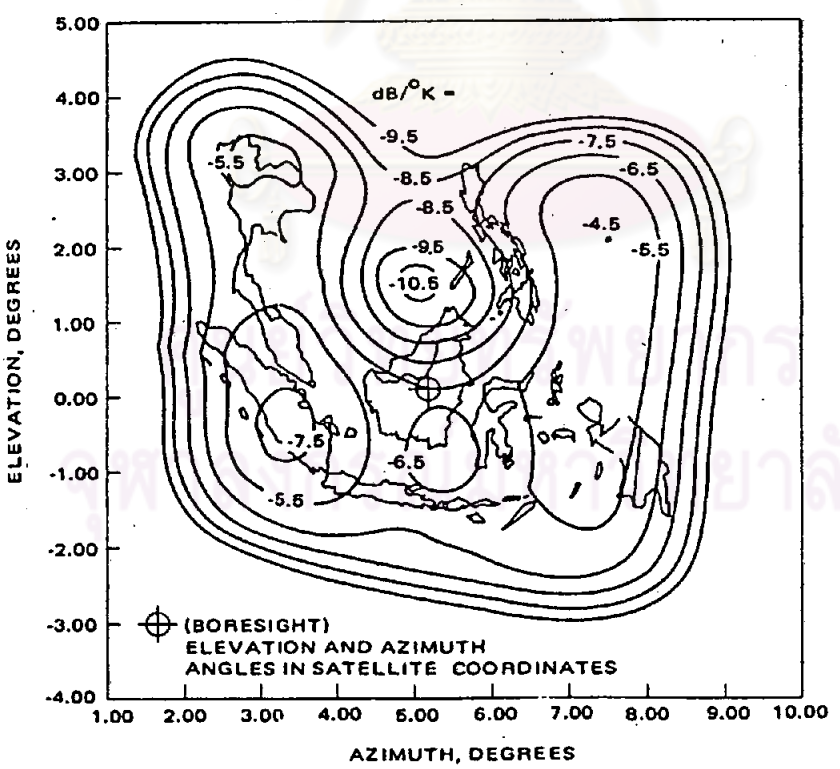
  (Usable Transponder Bandwidth) 30 MHz
- EIRP (รูป 3.5)
- G/T (รูป 3.6)
- Saturation Flux Density - 83 dBW/m^2

---

*ในกรณีใช้ระบบสื่อสารแบบหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์ (SCPC)



รูปที่ 3.5 EIRP คอนทัวร์ ของดาวเทียม PALAPA A-2



รูปที่ 3.6 G/T คอนทัวร์ ของดาวเทียม PALAPA A-2

ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของทรานสปอนเดอร์ที่มีต่อคลื่นพาห์ในระบบ SCPC/CFM โดยใช้วิธีการแทนลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของทรานสปอนเดอร์ รวมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย Complex Function[27), (28] ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นพาห์ด้านเข้ากับคลื่นพาห์ด้านออก รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นพาห์ด้านออกต่อกำลังของอินเตอร์มอดูเลชั่น (Carrier to Intermodulation) ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะทำการวิเคราะห์ใน Time Domain และเนื่องจากคลื่นพาห์ด้านเข้ามีจำนวนมาก จึงมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์ ดังนั้นได้นำหลักการประมาณค่าเข้ามาช่วย เพื่อให้การวิเคราะห์นี้ง่ายขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณออกแบบย่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นพาห์ด้านเข้ากับคลื่นพาห์ด้านออก

การวิเคราะห์ใน Time Domain จะแทนผลรวมของคลื่นพาห์ด้านเข้าของทรานสปอนเดอร์จำนวน m คลื่นพาห์ด้วย สมการดังนี้

$$e_{in}(t) = \mathrm{Re}\{\sum_{i=1}^{m} A_i(t) \exp[\, j\omega_o(t) + j\theta_i(t)]\} \qquad (3.1)$$

ในที่นี้

$$\theta_i(t) = \omega_i(t) + \phi_i(t),\ i = 1, \ldots m \qquad (3.2)$$

m คือ จำนวนคลื่นพาห์

$A_i(t)$ คือ แอมพลิจูดคลื่นพาห์คลื่นที่ i

ω_o คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นพาห์อ้างอิง โดยจะกำหนดที่ความถี่กึ่งกลางของทรานสปอนเดอร์

$\omega_o + \omega_i$ คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นพาห์ คลื่นที่ i

ϕ_i คือ เฟสของคลื่นพาห์ คลื่นที่ i

การดำเนินการขั้นต่อไปเป็นการแทนลักษณะสมบัติของทรานสปอนเดอร์คือ Transfer Characteristic ด้วย Complex envelope model[27), (28] $g(\rho) \exp[jf(\rho)]$ และ Complex envelope model นี้สามารถประมาณค่าด้วยอนุกรมเบสเซล (Bessel series) เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

$$g(\rho)\exp[jf(\rho)] \approx \sum_{s=1}^{L} b_s J_1(s\alpha\rho) \qquad (3.3)$$

ในที่นี้

ρ คือ แอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านเข้าคลื่นเดียว (Single input carrier)

$g(\rho)$ คือ ความไม่เป็นเชิงเส้นทางแอมพลิจูดด้านออก ซึ่งเป็น ฟังก์ชั่นของคลื่นพาห์ด้านเข้า (Output amplitude function)

$f(\rho)$ คือ ความไม่เป็นเชิงเส้นทางเฟสด้านออก ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของคลื่นพาห์ด้านเข้า (Output phase function)

L คือ จำนวนเทอมของอนุกรมเบสเซล

α คือ Scaling factor

b_s คือ สัมประสิทธิ์ของอนุกรมเบสเซล (Complex coefficient) s=1,...L

$J_1(\alpha s\rho)$ คือ First kind Bessel function of order 1

ทั้งนี้ พารามิเตอร์ α, L และ b_s จะหาค่าที่เหมาะสมด้วยการออปติไมส์เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมมีค่าใกล้เคียงกับค่า $g(\rho)$ และ $f(\rho)$ ที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปพารามิเตอร์ L ที่เหมาะสมเท่ากับ 10[28]

ขั้นต่อไปคือการหาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นพาห์ด้านเข้ากับคลื่นพาห์ด้านออกของทรานสปอนเดอร์ ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการ[28] ดังนี้

$$e_o(t) = \mathrm{Re}\left\{\exp(j\omega_o t) \sum_{k_1,..k_m=-\infty}^{\infty} \exp\left[j\sum_{i=1}^{m} k_i\theta_i(t)\right] \right.$$

$$(k_1 + ...k_m = 1)$$

$$\left. M(k_1, ...k_m, t)\right\} \qquad (3.4)$$

$$M(k_1,....k_m, t) = \sum_{s=1}^{L} b_s \prod_{i=1}^{m} J_{k_i}[\alpha s A_i(t)] \qquad (3.5)$$

ในที่นี้

$J_{k_i}(.)$ คือ First kind Bessel function of order k_i

$M(.)$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านออกคลื่นใด ๆ

เนื่องจากลักษณะสมบัติด้านออกของทรานสปอนเดอร์เป็นแบนด์พาสส์ การหาแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านออกจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข ดังนี้

$$\sum_{i=1}^{m} k_i = 1 \qquad (3.6)$$

ทั้งนี้ k_i, i,...m เป็นเลขจำนวนเต็มที่มีค่าเป็นลบ, ศูนย์หรือบวก ดังนั้น แอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านออกของทรานสปอนเดอร์สามารถหาได้โดยใช้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.6) คือ หากต้องการหาแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านออก คลื่นที่ r ได้โดยการกำหนดค่า k_r เท่ากับ 1 และค่า k_i ที่ i ไม่เท่ากับ r ให้เท่ากับศูนย์ ก็สามารถหาแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ที่ต้องการได้จากสมการที่ (3.5) ในทำนองเดียวกัน ถ้าต้องการหาแอมพลิจูดของอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 ณ ความถี่ใด ๆ เช่น $k_1 f_1 + k_2 f_2 + k_3 f_3$ โดยการตั้งค่า k_1 และ k_2 เท่ากับ 1 ส่วน k_3 เท่ากับ - 1 และค่า k_i, $i \neq 1,2,3$ เป็นศูนย์ ซึ่งจะได้ $(f_1 + f_2 - f_3)$ เป็นความถี่ของอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 ซึ่งสามารถหาแอมพลิจูดได้จากสมการ (3.5) เช่นเดียวกัน

สรุป $M(k_1,.....k_m,t)$ คือแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านออกของทรานสปอนเดอร์ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.5) ณ ความถี่ $k_1 f_1 + k_2 f_2 +.....k_m f_m$ ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการที่ (3.6)

<u>ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นพาห์ด้านเข้ากับคลื่นพาห์ด้านออกของระบบ SCPC/CFM</u>

เพื่อความสะดวกจะกำหนดให้คลื่นพาห์ด้านเข้ามีแอมพลิจูด แบนด์วิดท์ครอบครอง (Occupied Bandwidth) และช่วงห่างระหว่างคลื่นพาห์ (Channel Spacing) เท่ากัน ดังนั้นลักษณะการกระจายกำลังของคลื่นพาห์ในทรานสปอนเดอร์จะเป็นแบบระดับเดียว

กำหนดให้ $A_i(t) = A, \quad i = 1,.....m \qquad (3.7)$

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะทำการ normalize แอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านเข้าด้วย แอมพลิจูดของคลื่นพาห์คลื่นเดียวที่ทำให้ทรานสปอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว

ในที่นี้ Ps_i คือ กำลังของคลื่นพาห์คลื่นเดียวที่ทำให้ทรานสปอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว (Single - carrier input Saturated Power)

ดังนั้น สามารถแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านเข้าที่ถูก normalize ได้

$$\bar{A} = \frac{A}{\sqrt{Ps_i}} \qquad (3.8)$$

ในที่นี้ $\bar{A}$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นพาห์ที่ถูก normalize

เมื่อแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านเข้าถูก normalize ดังนั้นแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านออก $M(k_1,.....K_m, t)$ จะถูก normalize ด้วย

ลำดับต่อไปจะหากำลังเฉลี่ยของคลื่นพาห์ผลรวมด้านเข้าทั้งหมด ของทรานสปอนเดอร์* ซึ่งได้แก่ $E\left[e_{in}(t)\right]$ ดังนั้น

$$E\left[e_{in}(t)\right] = \frac{m\bar{A}^2}{2} \qquad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.9) จะเห็นว่านอกจากคลื่นพาห์ด้านเข้าทุกคลื่นถูก normalize แล้ว กำลังของคลื่นพาห์ผลรวมจะถูก normalize ด้วย ดังนั้น ค่าทางขวามือของสมการที่ (3.9) คือ ค่า input back-off (Bo_i)** นั่นเอง

ดังนั้น $$Bo_i = \frac{m\bar{A}^2}{2} \qquad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ด้านเข้าที่ถูก normalize กับ input back-off ได้

$$\bar{A} = \sqrt{2\ Bo_i/m} \qquad (3.11)$$

ตามขั้นตอนที่ผ่านมา เป็นการเพียงพอที่จะหาคลื่นพาห์ด้านออกของทรานสปอนเดอร์ได้ จากสมการที่ (3.4) สมการที่ (3.5) และเงื่อนไขในสมการที่ (3.6) ดังนั้นคลื่นพาห์

---

* ในขั้นตอนนี้จะละเลยเสียงรบกวน (Thermal noise) ด้านเข้าของทรานสปอนเดอร์เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์

** Input back-off คือ ผลรวมของกำลังคลื่นพาห์ด้านเข้าเมื่อเทียบกับกำลังของคลื่นพาห์คลื่นเดี่ยวที่ทำให้ทรานสปอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว

คลื่นที่ r, r = 1 , ..., m ใด ๆ สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (3.12)

$$e_o(r,t) = \mathrm{Re}\{ \exp(j\omega_o t) \exp[j\theta_r(t)] . M(r,t)\} \qquad (3.12)$$

ดังนั้น แอมพลิจูดของคลื่นพาห์ คลื่นที่ r คือ M(r,t) มีค่าเท่ากับ

$$M(r,t) = \sum_{s=1}^{L} b_s J_1(\alpha s\bar{A}) J_o^{m-1}(\alpha s\bar{A}) \qquad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) พิจารณาค่า $\alpha s\bar{A}$ จะเห็นว่า $S \leq 10$ เพราะ L คือ จำนวนเทอมสูงสุดเท่ากับ 10 และ $\alpha < 1$[28] ส่วน $\bar{A}$ คือแอมพลิจูดของคลื่นพาห์แต่ละคลื่นพาห์ที่ถูก normalize ด้วยแอมพลิจูดของคลื่นพาห์คลื่นเดี่ยวที่ทำให้ทรานส์ปอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว ในระบบ SCPC/CFM จะมีคลื่นพาห์ด้านเข้าของทรานส์ปอนเดอร์เป็นจำนวนมาก และมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของคลื่นพาห์คลื่นเดี่ยวที่ทำให้ทรานส์ปอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว ดังนั้น แอมพลิจูดของคลื่นพาห์ที่ถูก normalize จะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถอนุมานได้ว่า

$$\alpha s\bar{A} \ll 1$$

ดังนั้น จะสามารถประมาณค่าฟังก์ชั่นเบสเซลทางด้านขวามือของสมการที่ (3.13) ได้ดังนี้

$$J_o(\alpha s\bar{A}) \approx \exp[-(\alpha s\bar{A}/2)^2] \qquad (3.14)$$

$$J_1(\alpha s\bar{A}) \approx \frac{\alpha s\bar{A}}{2} \qquad (3.15)$$

โดยการแทนค่า ฟังก์ชั่นเบสเซลด้วยค่าประมาณจากสมการที่ (3.14) และ (3.15) ลงในสมการที่ (3.13) จะได้

$$M(r,t) \approx \sum_{s=1}^{L} b_s \frac{\alpha s\bar{A}}{2} . \exp[-(\alpha s\bar{A}/2)^2] \qquad (3.16)$$

แทนค่า $\bar{A}$ จากสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.16) จะได้

$$M(r,t) \approx \alpha \sqrt{\frac{Bo_i}{2m}} \sum_{s=1}^{L} sb_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \qquad (3.17)$$

ขั้นตอนต่อไป จะเป็นการหากำลังคลื่นพาห์ด้านออกดังนี้

$$P_1 = \tfrac{1}{2} |M(r,t)|^2$$

$$P_1 = \frac{\alpha^2 Bo_i}{4m} \left| \sum_{s=1}^{L} sb_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2 \qquad (3.18)$$

ในที่นี้ P_1 คือ กำลังคลื่นพาห์ด้านออกแต่ละคลื่น ซึ่งจะเป็นกำลังคลื่นพาห์ด้านออกที่ถูก normalize

ผลรวมของกำลังคลื่นพาห์ด้านออก (P_t) ที่ถูก normalize จะเท่ากับกำลังคลื่นพาห์หนึ่งคลื่นคูณด้วยจำนวนคลื่นพาห์ทั้งหมด

$$P_t = mP_1 \qquad (3.19)$$

เนื่องจากกำลังคลื่นพาห์ด้านออกแต่ละคลื่นถูก normalize ดังนั้นผลรวมของกำลังคลื่นพาห์ด้านออกจะถูก normalize ด้วยเช่นกัน ซึ่งก็คือ output back-off* นั่นเอง เพื่อความสะดวกจะแทนสัญญลักษณะ P_t ด้วย Bo_o (output back-off) แล้วแทนค่า P_1 จากสมการที่ 3.18 ลงในสมการที่ (3.19) จะได้

$$Bo_o = \frac{\alpha^2 Bo_i}{4} \left| \sum_{s=1}^{L} sb_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2 \qquad (3.20)$$

สรุปสมการที่ (3.18) จะเห็นว่ากำลังคลื่นพาห์ยาออกจะเป็นฟังก์ชั่นของ input back-off ทั้งนี้ ในสมการที่ (3.20) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง input back-off และ output back-off เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.20) จะเห็นว่าที่ค่า input back-off ใด ๆ จะสามารถหาค่า output back-off ได้

---

* output back - off คือ ผลรวมของกำลังคลื่นพาห์ด้านออกเมื่อเทียบกับกำลังของคลื่นพาห์ด้านออกคลื่นเดียวที่ทำให้ ทรานสปอนเดอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว

การหากำลังอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค

ด้วยอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคที่มีผลต่อคลื่นพาห์และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบระบบ ก็คืออินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 (Third order intermodulation product) และอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 5 (Fifth order intermodulation product) ดังนั้นขั้นตอนต่อไปต้องการหากำลังอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคทั้งสองชนิดนี้จากสมการที่ (3.4) คือสมการแสดงผลของคลื่นพาห์ด้านออกของทรานสปอนเดอร์ โดยจะพิจารณาในเทอมของอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 ก่อน ทั้งนี้อินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความถี่พาห์เชิงมุมอยู่ในรูป $\omega_o + (\omega_a + \omega_b - \omega_c)$ ในที่นี้ $k_a = 1$, $K_b = 1$ และ $k_c = -1$ ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่ (3.4) และสมการที่ (3.5) สามารถเขียนใหม่ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้แล้วข้างต้น

$$e_o(a,b,-c,t) = \mathrm{Re}\{\exp(j\omega_o t)\exp[j\theta_a(t) + j\theta_b(t) - j\theta_c(t)] \cdot M(a,b,-c,t)\} \quad (3.21)$$

$$M(a,b,-c,t) = \sum_{s=1}^{L} b_s J_1^3(\alpha s\bar{A}) J_o^{m-3}(\alpha s\bar{A}) \quad (3.22)$$

ในที่นี้ $e_o(a,b,-c,t)$ และ $M(a,b,-c,t)$ เป็นคลื่นพาห์และแอมพลิจูดอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 ณ ความถี่ใด ๆ และทำการประมาณค่าแอมพลิจูดอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 ในสมการที่ (3.22) ซึ่งได้จากการประมาณค่าฟังก์ชั่นเบสเซลตามสมการที่ (3.14) และ (3.15) นั่นเอง

$$M(a,b,-c,t) \approx \frac{\alpha^3}{8} \cdot (2\,Bo_i/m)^{3/2} \sum_{s=1}^{L} s^3 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \quad (3.23)$$

ดังนั้น จะหากำลังอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 ได้ดังนี้

$$I_3 = \tfrac{1}{2}|M(a,b,-c,t)|^2$$

$$= \frac{\alpha^6 Bo_i^3}{16\,m^3}\left|\sum_{s=1}^{L} s^3 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2)\right|^2 \quad (3.24)$$

ในทำนองเดียวกัน โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการหากำลังอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค-ลำดับที่ 3 ตามที่ได้แสดงมาแล้วข้างต้น เราสามารถหากำลังอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค ลำดับที่ 5 ได้ตามสมการที่ (3.25) ดังนี้

$$I_5 = \frac{\alpha^{10} Bo_i^5}{64\ m^5} \left| \sum_{s=1}^{L} s^5 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2 \qquad (3.25)$$

ในระบบหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งคลื่นพาห์ที่ออกแบบระบบให้มีช่วงห่างของคลื่นพาห์เท่ากัน จำนวนอินเตอร์โมดูเลชั่นโปรดัค ลำดับที่ 3 และลำดับที่ 5 จะตกที่คลื่นพาห์ตรงกลางของทรานสปอนเดอร์มีจำนวนสูงสุด ในกรณีคลื่นพาห์จำนวนมาก เช่นระบบ SCPC/CFM จำนวนอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 และลำดับที่ 5 ที่ตก ณ คลื่นพาห์ตรงกลางของทรานสปอนเดอร์จะมีจำนวนประมาณ $3\ m^2/8$[31] และ $115\ m^4/2304$[32] ตามลำดับ

ดังนั้น กำลังผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 และกำลังผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค ลำดับที่ 5 ที่ตก ณ คลื่นพาห์ตรงกลางของทรานสปอนเดอร์สามารถหาได้ตามสมการที่ (3.26) และ (3.27) ตามลำดับ ดังนี้

$$IM_3 = \frac{3\ m^2}{8} \cdot I_3$$

$$= \frac{3\alpha^6 Bo_i^3}{128\ m} \left| \sum_{s=1}^{L} s^3 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2 \qquad (3.26)$$

$$IM_5 = \frac{115 m^4}{2304} \cdot I_5$$

$$= \frac{115\ \alpha^{10} Bo_i^5}{147456\ m} \left| \sum_{s=1}^{L} s^5 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2 \qquad (3.27)$$

กำลังผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค ที่ตก ณ คลื่นพาห์ตรงกลางของทรานสปอนเดอร์ (IM_T) คือ ผลรวมของกำลังผลรวมระหว่างอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 และลำดับที่ 5 ณ คลื่นพาห์ตรงกลางของทรานสปอนเดอร์ สามารถหาได้ดังนี้

$$IM_T = IM_3 + IM_5 \qquad (3.28)$$

นอกจากนี้เราสามารถหากำลังผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 และกำลังผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 5 ณ ความถี่พาห์ (f) ใด ๆ เมื่อคลื่นพาห์ทั้งหมดอยู่ภายในย่านความถี่ที่ถูก normalize $(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ โดยแสดงด้วยนิพจน์ของการกระจายกำลังอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค ลำดับที่ 3 ซึ่งแทนด้วย $IM_3(f)$ และลำดับที่ 5 ซึ่งแทนด้วย $IM_5(f)$ เมื่อเทียบกับกำลังผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 และกำลังผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 5 ณ คลื่นพาห์ตรงกลางของย่านความถี่ที่กำหนดตามลำดับด้วยนิพจน์[32),(33)] ดังต่อไปนี้

$$\frac{IM_3(f)}{IM_3} \begin{cases} \frac{2}{3}\left|\left(\frac{3}{2}-f\right)^2 - 3\left(\frac{1}{2}-f\right)^2\right|, & |f| \le \frac{1}{2} \\ \frac{2}{3}\left(\frac{3}{2}-f\right)^2, & \frac{1}{2} < |f| \le \frac{3}{2} \\ 0, & \frac{3}{2} < |f| \end{cases} \qquad (3.29)$$

$$\frac{IM_5(f)}{IM_5} \begin{cases} \frac{8}{115}\left|\left(\frac{5}{2}-f\right)^4 - 5\left(\frac{3}{2}-f\right)^4 + 10\left(\frac{1}{2}-f\right)^4\right|, & |f| \le \frac{1}{2} \\ \frac{8}{115}\left|\left(\frac{5}{2}-f\right)^4 - 5\left(\frac{3}{2}-f\right)^4\right|, & \frac{1}{2} < |f| \le \frac{3}{2} \\ \frac{8}{115}\left(\frac{5}{2}-f\right)^4, & \frac{3}{2} < |f| \le \frac{5}{2} \\ 0, & \frac{5}{2} < |f| \end{cases} \qquad (3.30)$$

<u>อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่ออินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค</u> (Carrier to Intermodulation Products)

ในการออกแบบคำนวณข่ายการสื่อสาร ตัวแปรที่สำคัญที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณคือ อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่ออินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณ

และประกันความแน่นอนของระบบ จะนำกำลังของอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคในตำแหน่งที่มีผลต่อคลื่นพาห์มากที่สุด นั่นก็คือที่ตำแหน่งของคลื่นพาห์ตรงกลางทรานสปอนเดอร์ เหตุที่ต้องกระทำเช่นนี้เพราะจะต้องรับประกันว่าคลื่นพาห์ตรงกลางทรานสปอนเดอร์ที่ได้รับผลกระทบกระเทือนจากอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคมากที่สุดนั้น จะต้องมีคุณภาพอยู่ภายในข้อกำหนดนั่นเอง*

การหาอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่ออินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 3 และอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่ออินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคลำดับที่ 5 โดยใช้สมการที่ (3.18) หารด้วยสมการที่ (3.26) และสมการที่ (3.18) หารด้วยสมการที่ (3.27) ตามลำดับดังนี้

$$C/IM_3 = \frac{32}{3\,\alpha^4 Bo_i^2} \cdot \frac{\left| \sum_{s=1}^{L} sb_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2}{\left| \sum_{s=1}^{L} s^3 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2} \qquad (3.31)$$

$$C/IM_5 = \frac{36864}{115\,\alpha^8 Bo_i^4} \cdot \frac{\left| \sum_{s=1}^{L} sb_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2}{\left| \sum_{s=1}^{L} s^5 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2} \qquad (3.32)$$

ขั้นต่อไปคือการหาอัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ต่อผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค (C/IM_T) โดยการหารสมการที่ (3.18) ด้วย สมการที่ (3.28) แล้วแทนค่า IM_3 และ IM_5 จะได้

$$C/IM_T = \frac{\left| \sum_{s=1}^{L} sb_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2}{\frac{3\alpha^4 Bo_i^2}{32}\left| \sum_{s=1}^{L} s^3 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2 + \frac{115\alpha^8 Bo_i^4}{36864}\left| \sum_{s=1}^{L} s^5 b_s \exp(-\alpha^2 s^2 Bo_i/2) \right|^2} \qquad (3.33)$$

---

* หมายถึง สัญญาณที่รับได้จะมีคุณภาพตามที่ได้กำหนดไว้

สมการที่ (3.33) จะเป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณออกแบบย่ายการสื่อสาร ผ่านดาวเทียม จากการพิจารณาสมการนี้จะเห็นว่า C/IM_T ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนคลื่นพาห์ แต่จะเป็นฟังก์ชั่นของ input back-off นั่นคืออัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัคจะขึ้นอยู่กับจุดทำงานของทรานสปอนเดอร์นั่นเอง

ในระบบ SCPC/CFM ได้นำวิธีการประมวลสัญญาณด้วย Voice Activation มาใช้สมมุติให้มี Activity Factor เท่ากับ p, $p<1$ ดังนั้นจะทำให้อัตราส่วนกำลังคลื่นพาห์ ต่อผลรวมอินเตอร์มอดูเลชั่นโปรดัค ได้รับการปรับปรุงด้วยค่า $1/p$ [33),(34)] ดังนี้

$$(C/IM_T)_{vox} = \frac{1}{p} \cdot (C/IM_T) \qquad (3.34)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย