

ระบบเชื่อมโยงผ่านดาวเทียม

พงษ์ศักดิ์ สุลัมพันธ์ไพบุลย์.

ระบบสื่อสารเชื่อมโยงใดๆ ก็ตาม มีความต้องการที่จะให้สัญญาณที่ได้รับที่ปลายทางมีคุณภาพที่ยอมรับได้ด้วยกันทั้งนั้น ระบบสื่อสารดาวเทียมก็เช่นเดียวกัน ช่องสัญญาณดาวเทียมเป็นช่องสัญญาณแบนด์พาส การมอดูเลตจึงถูกนำมาใช้ในการส่งข้อมูลเบสแบนด์ในระบบดาวเทียมที่ใช้การมอดูเลตแบบอนาล็อก เช่น การมอดูเลตทางความถี่ (FM) คุณภาพของช่องสัญญาณเสียงถูกวัด โดยค่า S/N ที่ได้รับจากเอาต์พุตของดีมอดูเลเตอร์ ซึ่งค่า S/N นี้จะขึ้นอยู่กับค่า C/N ของระบบเชื่อมโยงทางดาวเทียม ส่วนในระบบดาวเทียมที่ใช้การมอดูเลตแบบดิจิทัล คุณภาพของบิตข้อมูลดิจิทัลถูกกำหนดจากค่าความเป็นไปได้ของการเกิดความผิดพลาดของข้อมูล (probability of bit error) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า C/N ของระบบเชื่อมโยง, อัตราการส่งบิตข้อมูล ($R = 1/T_b$) และแบนด์วิดท์ (B) ของช่องสัญญาณ

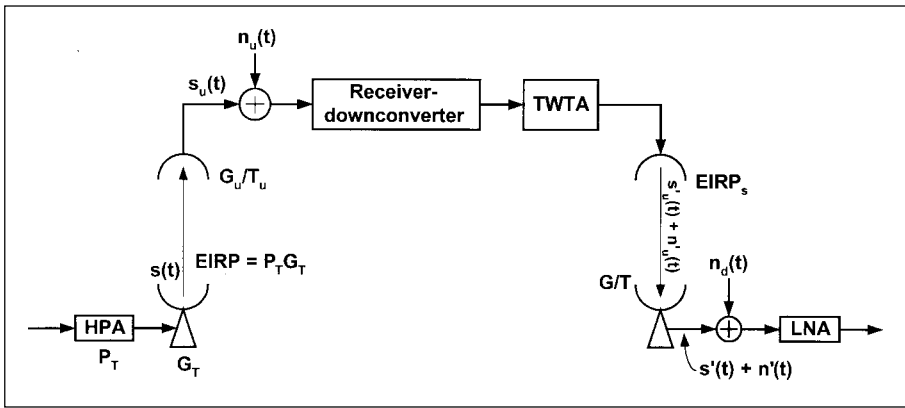
ระบบเชื่อมโยงผ่านดาวเทียมประกอบด้วย ส่วนเชื่อมโยงขาขึ้น (uplink) และส่วนเชื่อมโยงขาลง (downlink) คุณภาพของสัญญาณขาขึ้นขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณที่ส่งออกจากสถานีภาคพื้นดินและความแรงสัญญาณที่ดาวเทียมได้รับ ส่วนคุณภาพของสัญญาณขาลงนั้นขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณที่ส่งจากดาวเทียมและความ

แรงสัญญาณที่สถานีภาคพื้นดินปลายทางได้รับ เนื่องจากระยะทางที่มากระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน รวมทั้งกำลังสัญญาณที่ลดลงตามกำลังสองของระยะทาง ทำให้สัญญาณขาขึ้นที่ได้รับบนดาวเทียมและสัญญาณขาลงที่ได้รับ โดยสถานีภาคพื้นดินมีกำลังอ่อนมากและถูกรบกวนโดยง่ายจากสัญญาณรบกวน นอกจากนี้สัญญาณขาขึ้นที่ดาวเทียมได้รับอาจมาจากการแทรกแซงของสถานีภาคพื้นดินใกล้เคียง และสัญญาณขาลงที่สถานีภาคพื้นดินได้รับก็อาจมาจากการแทรกแซงของดาวเทียมใกล้เคียงเช่นเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นฝนที่ตกสามารถลดทอนสัญญาณดาวเทียมที่ความถี่เกิน 10 GHz ได้อย่างมาก และยังลดค่าการแยกของสัญญาณ (isolation) ระหว่างสัญญาณที่โพลาริไรซ์ตั้งฉากกันในระบบที่นำความถี่กลับมาใช้ใหม่อีกด้วย

การวิเคราะห์การเชื่อมโยง

พิจารณาระบบเชื่อมโยงในรูปที่ 1 สถานีภาคพื้นดินด้านส่งจะส่งคลื่นพาหะ $s(t)$ ที่มีกำลังส่ง (EIRP : Effective Isotropic Radiated Power) เท่ากับ

$$EIRP = P_T G_T \quad (1)$$



รูปที่ 1 : ระบบเชื่อมโยงผ่านดาวเทียม

โดย P_T = กำลังคลื่นพาห์ที่พีดของสายอากาศ และ G_T = เกนสายอากาศด้านส่ง ในช่วงเริ่มต้นนี้จะสมมติว่าการสื่อสารสัญญาณอยู่ในสภาพท้องฟ้าแจ่มใส (clear-sky) และการลดทอนสัญญาณมาจากความสูญเสียจากอวกาศ (free-space loss), การลดทอนจากบรรยากาศ (atmospheric attenuation) และความสูญเสียจากการติดตามดาวเทียมของจานสายอากาศ (antenna tracking loss) เมื่อพิจารณาเส้นทางขาขึ้น ความสูญเสียจากอวกาศในช่วงขาขึ้น ถูกกำหนดจาก

$$L_u = (4pd_u/1u)^2 = (4pf_u d_u/c)^2 \quad (2)$$

โดย d_u = ระยะทางขาขึ้น (m)
 $1u$ = ความยาวคลื่นของสัญญาณขาขึ้น (m)
 f_u = ความถี่คลื่นพาห์ขาขึ้น (Hz)
 c = อัตราเร็วแสง = 2.997925×10^8 m/s
 ถ้า $s_u(t)$ เป็นคลื่นพาห์ที่ได้รับบนดาวเทียม และ $n_u(t)$ เป็นสัญญาณรบกวน (additive white Gaussian noise (with zero mean)) ของ $s_u(t)$ ดังนั้นกำลังของคลื่นพาห์ขาขึ้นจะเท่ากับ

$$C_u = [(EIRP)G_u]/[L_u L] = [(EIRP)/L][c/(4pf_u d_u)]^2 G_u \quad (3)$$

โดย G_u = เกนสายอากาศของดาวเทียม และ L = ผลรวมของความสูญเสียจากการติดตามดาวเทียมของจานสายอากาศ และความสูญเสียของการลดทอนจากบรรยากาศ ส่วนกำลังสัญญาณรบกวนรวมกันจะเท่ากับ

$$N_u = kT_u B \quad (4)$$

โดย T_u = อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบดาวเทียม (K) ที่คำนวณจากอุณหภูมิสัญญาณรบกวนของสายอากาศดาวเทียม (ซึ่งประมาณ 290 K เพราะสายอากาศจะเลี้ยงไปยังโลกที่ร้อน) และอุณหภูมิสัญญาณรบกวนเทียบเท่าของอุปกรณ์สื่อสารบนดาวเทียม

B = แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ (Hz)
 k = ค่าคงที่โบลซ์มันน์ = 1.38×10^{-23} J/K

พารามิเตอร์ G_u/T_u คืออัตราส่วนของเกนสายอากาศต่ออุณหภูมิสัญญาณรบกวนดาวเทียม จากสมการ (3) และ (4) ค่า C/N ของคลื่นพาห์ขาขึ้นคือ

$$(C/N)_u = C_u/N_u = [(EIRP)/(L_u L)][G_u/T_u][1/(kB)] = [(EIRP)/L][c/(4pf_u d_u)]^2 [G_u/T_u][1/(kB)] \quad (5)$$

ค่า $EIRP/(4pd_u^2 L)$ คือความหนาแน่นฟลักซ์กำลังของคลื่นพาห์ (power flux density (W/m^2) ที่ดาวเทียม

$$W = (EIRP)/(4pd_u^2 L) \quad (6)$$

เทอม $4pf_u^2/c^2$ คือเกนของสายอากาศอุดมคติ ($h = 1$) ที่มีพื้นที่อะเปอร์เจอร์เท่ากับ 1 m^2 ($A = 1$) นั่นคือ

$$G_{1m2} = h(4pA/1^2) = h(4pAf^2/c^2) = 4pf_u^2/c^2 \quad (7)$$

แทนสมการ (6) ใน (5) จะได้

$$(C/N)_u = W [c^2/(4pf_u^2)][G_u/T_u][1/(kB)] \quad (8)$$

โดยสรุปแล้ว ค่า C/N ของคลื่นพาห์ขาขึ้นสามารถคำนวณจาก (5) ถ้ารู้ค่า $EIRP$ ของคลื่นพาห์ หรือคำนวณจาก (8) ถ้ารู้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์กำลังที่ดาวเทียม

คลื่นพาห์ขาขึ้นและสัญญาณรบกวนที่ได้รับ $[s_u(t) + n_u(t)]$ จะถูกขยายและถูกลดระดับความถี่โดยส่วนของเครื่องรับและอุปกรณ์ลดระดับความถี่ และจากนั้นจะถูกขยายอีก โดย TWTA และถูกส่งกลับไปยังโลกผ่านทางสายอากาศของดาวเทียม คลื่นพาห์และสัญญาณรบกวนที่ส่งลงมาจาดาวเทียมคือ $s_d(t) + n_d(t)$ ถือได้ว่ามีค่า C/N เช่นเดียวกับคลื่นพาห์และสัญญาณรบกวนที่รับมาตอนขาขึ้น $[s_u(t)+n_u(t)]$ ทั้งนี้เพราะถือว่าดาวเทียมคือสถานีทวนสัญญาณที่แปลงความถี่อย่างเดียวเท่านั้น ส่วนคลื่นพาห์และสัญญาณรบกวนที่สถานีภาคพื้นดินด้านรับได้รับนั้น $[s_d(t)+n_d(t)+n_d(t)]$ จะประกอบด้วยส่วนที่ต่อเนื่องมาจากตอนขาขึ้น $[s_d(t)+n_d(t)]$ และส่วนที่ได้รับเพิ่มเติมมาตอนขาลง $[n_d(t)]$
 ถ้า $EIRP_s$ = กำลังคลื่นพาห์ที่ดาว-

เทียมส่งลงมา

L_d = ความสูญเสียจากอวกาศ

L_ϕ = ความสูญเสียจากการติดตามดาวเทียมของจานสายอากาศและความสูญเสียจากบรรยากาศ

G = เกนจากสายอากาศด้านรับของสถานีภาคพื้นดินปลายทาง

ดังนั้น กำลังคลื่นพาร์ที่สถานีภาคพื้นดินได้รับ คือ

$$C = [(EIRP_s)G]/[L_d L_\phi] = [(EIRP_s)/L_\phi][c/(4\pi f_d d_d)]^2 G \quad (9)$$

โดย d_d = ระยะทางขาลงของสัญญาณ (m)

f_d = ความถี่คลื่นพาร์ขาลง (Hz)

และกำลังสัญญาณรวมกวนที่สถานีภาคพื้นดินได้รับคือ

N = ส่วนที่ต่อเนื่องมาจากตอนขาขึ้น + ส่วนที่ได้รับเพิ่มเติมมาตอนขาลง

$$= [(EIRP_s)G]/[L_\phi (C/N)_u] + kTB = [(EIRP_s)/L_\phi][c/(4\pi f_d d_d)]^2 (C/N)_u^{-1} G + kTB \quad (10)$$

ดังนั้น

$$C/N = [(C/N)_u^{-1} + (C/N)_d^{-1}]^{-1} \quad (11)$$

โดย $(C/N)_d = [(EIRP_s)/L_\phi][c/(4\pi f_d d_d)]^2 (G/T)[1/(kB)] \quad (12)$

ค่า G/T คืออัตราส่วนของเกนสายอากาศต่ออุณหภูมิสัญญาณรบกวนของสถานีภาคพื้นดินด้านรับ และค่า E_b/N_0 (คือพลังงานของบิตต่อความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน) สามารถคำนวณจากค่า C/N ที่ได้รับจากสมการ (11) โดย

$$E_b/N_0 = (CT_b)/(N/B) = T_b B(C/N) \quad (13)$$

ถ้า $(C/N)_u \gg (C/N)_d$ ดังนั้น $C/N \gg (C/N)_d$ และการเชื่อมโยงจะถูกจำกัดทางด้านขาลง (downlink-limited) ซึ่งเป็นกรณี

ที่พบโดยทั่วไป แต่หาก $(C/N)_u \ll (C/N)_d$ ดังนั้น $C/N \approx (C/N)_u$ และการเชื่อมโยงจะถูกจำกัดทางด้านขาขึ้น (uplink limited)

ในการวิเคราะห์การเชื่อมโยง ค่า EIRP (หรือจะเป็นค่าความหนาแน่นพลักซ์กำลัง W) ของคลื่นพาร์ที่ดาวเทียม และค่า EIRPs ที่ดาวเทียมส่งลงมา จะถูกกำหนดตามจุดปฏิบัติการของ TWTA ของทรานสปอนเดอร์ ในรูปที่ 2 แสดงคุณสมบัติของการขยายกำลังของ TWTA จุดปฏิบัติการที่ทำให้กำลังสัญญาณขาออกสูงสุดเรียกว่าจุดอิ่มตัว (saturation point) และถ้าหากเพิ่มกำลังสัญญาณขาเข้ามากขึ้นอีก จะทำให้กำลังสัญญาณขาออกลดลง ดังนั้นโดยปกติจะกำหนดจุดปฏิบัติการของ TWTA ให้ต่ำกว่าจุดอิ่มตัวเพื่อหลีกเลี่ยงการบิดเบือนไม่เชิงเส้น โดยเฉพาะเมื่อมีหลายคลื่นพาร์ ซึ่งเป็นการลดกำลังอินเทอร์มอดูเลชันที่เกิดขึ้น ถ้า BO_i และ BO_o คือ back-offs ขาเข้าและขาออก TWTA ตามลำดับ

$$BO_i = EIRP_{sat}/EIRP > 1 \quad (14)$$

$$BO_i = W_{sat}/W > 1 \quad (15)$$

$$BO_o = EIRP_{s,sat}/EIRP_s > 1 \quad (16)$$

โดย $EIRP_{sat} = EIRP$ ของคลื่นพาร์ที่ทำให้ TWTA อิ่มตัว

W_{sat} = ความหนาแน่นพลักซ์กำลังที่ทำให้ TWTA อิ่มตัว

$EIRP_{s,sat} = EIRP$ สูงสุดที่ดาวเทียมสามารถส่งลงมา

$BO_o = f(BO_i)$ คือเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของ BO_i

แทน (14) ใน (5), (15) ใน (8) และ (16) ใน (12) จะได้

$$(C/N)_u = (EIRP_{sat})[c/(4\pi f_u d_u)]^2 (G_u/T_u)(1/kB)BO_i^{-1}L^{-1} \quad (17)$$

$$(C/N)_u = (W_{sat})[c^2/(4\pi f_u^2)](G_u/T_u)(1/kB)BO_i^{-1} \quad (18)$$

$$(C/N)_d = (EIRP_{s,sat})[c/(4\pi f_d d_d)]^2 (G/T)(1/kB)BO_o^{-1}L_\phi^{-1} \quad (19)$$

หรือค่าเป็น dB

$$(C/N)_u = (EIRP_{sat})(dBW) - 20\log[(4\pi f_u d_u)/c] + (G_u/T_u)(dB/K) - 10\log k - 10\log B - BO_i(dB) - L(dB) \quad (20)$$

$$(C/N)_u = W_{sat}(dBW/m^2) - 10\log[(4\pi f_u^2)/c^2] + (G_u/T_u)(dB/K) - 10\log k - 10\log B - BO_i(dB) \quad (21)$$

$$(C/N)_d = EIRP_{s,sat}(dBW) - 20\log[(4\pi f_d d_d)/c] + (G/T)(dB/K) - 10\log k - 10\log B - BO_o(dB) - L_\phi(dB) \quad (22)$$

ตัวอย่างที่ 1 จะแสดงการหาค่า C/N รวมของระบบเชื่อมโยงดาวเทียม โดยจะพิจารณาระบบดาวเทียม Ku-Band (14/12 GHz) ที่ทำงานในโหมด TDMA แบบ 1 คลื่นพาร์ต่อทรานสปอนเดอร์ พารามิเตอร์ของระบบเป็นดังนี้

พารามิเตอร์ของการมอดูเลตคลื่นพาร์

Bit rate: 60 Mbps

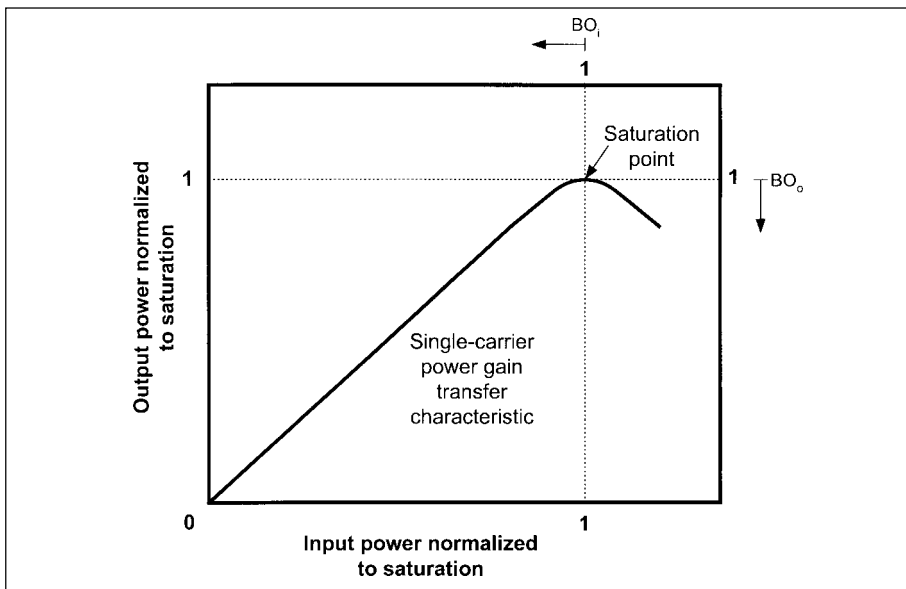
Bit duration-bandwidth product: 0.6

Noise bandwidth: 36 MHz

พารามิเตอร์ของดาวเทียม

Antenna gain-to-noise temperature ratio: 1.6 dB/K

Satellite saturation EIRP: 44 dBW



รูปที่ 2 : คุณลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้นของ TWTA บนดาวเทียม

TWTW input back-off: 0 dB	Bit rate: 64 kbps
TWTA output back-off: 0 dB	Bit duration-bandwidth product: 0.625
พารามิเตอร์ของสถานีภาคพื้นดิน	Noise bandwidth: 40 MHz
Antenna diameter: 7 m	พารามิเตอร์ของดาวเทียม
Transmit antenna gain at 14 GHz: 57.6 dB	Antenna gain-to-noise temperature ratio: -7 dB/K
Receive antenna gain at 12 GHz: 56.3 dB	Satellite saturation EIRP: 36 dBW
Carrier power into antenna: 174 W	TWTW input back-off: 11 dB
Maximum uplink and downlink slant range: 37,506 km	TWTA output back-off: 6 dB
Tracking loss: 1.2 dB (uplink) and 0.9 dB (downlink)	Number of carriers per transponder: 200
System noise temperature: 160 K	Power flux density at satellite for transponder saturation: -80 dBW/m ²
การคำนวณการเชื่อมโยงโดยใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1	พารามิเตอร์ของสถานีภาคพื้นดิน
ตัวอย่างที่ 2 จะพิจารณากรณีของระบบที่ทำางานแบบหลายคลื่นพาห่ต่อทรานสปอนเดอร์ของระบบดาวเทียม C-Band (6/4 GHz) ที่ทำางานในโหมด FDMA และใช้การมอดูเลตแบบ QPSK พารามิเตอร์ของระบบเป็นดังนี้	Saturation power flux density per carrier: -80 -10log 200 = -103 dBW/m ²
พารามิเตอร์ของการมอดูเลตคลื่นพาห่	Transmit antenna gain: 47 dB
	Receive antenna gain: 44.5 dB
	Antenna gain-to-noise temperature ratio: 22 dB/K
	Maximum downlink slant range: 37,506 km

การคำนวณการเชื่อมโยงของระบบเป็นดังในตารางที่ 2 ซึ่งจะพบว่าการเชื่อมโยงนั้นจะถูกจำกัดทางด้านขาลง (downlink-limited) แต่ในตัวอย่างที่ 1 ที่ผ่านมานี้ไม่ถูกจำกัดทั้งทางด้านขาขึ้นและขาลง.

Uplink (14.25 GHz)	
Carrier EIRP	80 dBW
Free space loss	206.9 dB
Antenna tracking loss	1.2 dB
Satellite G/T	1.6 dB/K
Boltzmann's constant	-228.6 dBW/KHz
Noise bandwidth	75.6 dB-Hz
(C/N) _u	26.5 dB
Downlink (11.95 GHz)	
Satellite EIRP	44 dBW
Free space loss	205.5 dB
Antenna tracking loss	0.9 dB
Earth station G/T	34.3 dB/K
Boltzmann's constant	-228.6 dBW/K-Hz
Noise bandwidth	75.6 dB-Hz
(C/N) _d	24.9 dB
Total carrier-to-noise ratio	22.6 dB
Link E _b /N _o	20.4 dB

ตารางที่ 1 : การคำนวณการเชื่อมโยงของระบบ 1 คลื่นพาห่ต่อทรานสปอนเดอร์

Uplink (6 GHz)	
Saturation power flux density per carrier	-103 dBW/m ²
Gain of an ideal 1-m ² antenna	37 dB
Satellite G/T	-7 dB/K
Boltzmann's constant	-228.6 dBW/K-Hz
Noise bandwidth	46 dB-Hz
TWTA input back-off	11 dB
(C/N) _u	24.6 dB
Downlink (4 GHz)	
Satellite EIRP per carrier	13 dBW (36 - 10log 200)
Free space loss	196 dB
Earth station G/T	22 dB/K
Boltzmann's constant	-228.6 dBW/K-Hz
Noise bandwidth	46 dB-Hz
TWTA output back-off	6 dB
(C/N) _d	15.6 dB
Total carrier-to-noise ratio	15 dB
Link E _b /N _o	12.96 dB

ตารางที่ 2 : การคำนวณการเชื่อมโยงของระบบหลายคลื่นพาห่ต่อทรานสปอนเดอร์