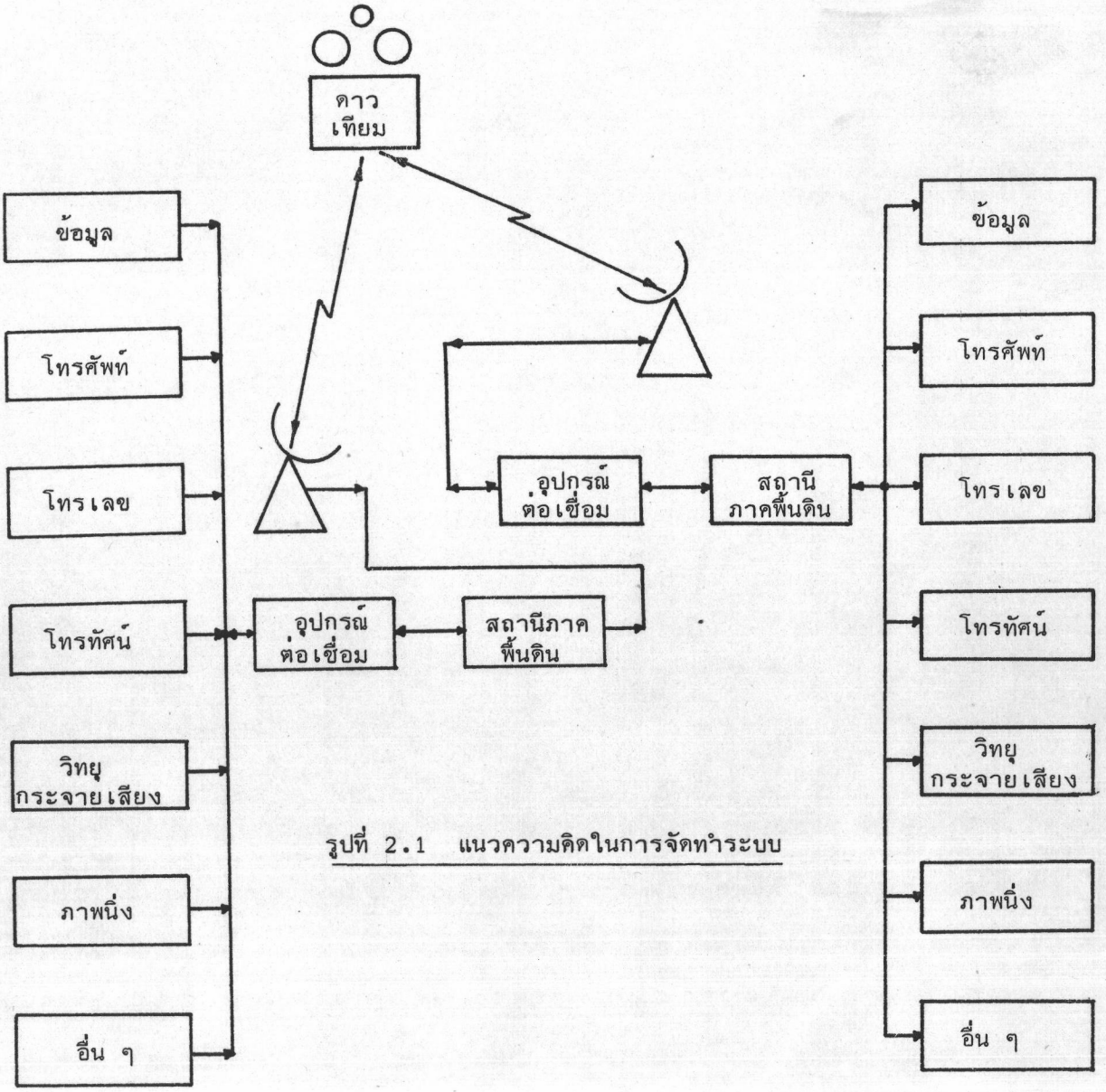
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แนวความคิดในการจัดทำระบบ

แนวความคิดในการจัดทำระบบการสื่อสารดาวเทียม มีความมุ่งหวังที่จะใช้ประโยชน์ในการสื่อสารให้ได้ทุกรูปแบบโดยสามารถส่งข่าวสารจากแห่งหนึ่งไปยังอีกแห่งหนึ่งได้ โดยการส่งข่าวสารนี้เป็นแบบอันนาลอค (analog) หรือ แบบดิจิตอล



รูปที่ 2.1 แนวความคิดในการจัดทำระบบ

(digital) ก็ได้ หรือบางครั้งใช้ส่งเป็นแบบข้อมูล (data), โทรศัพท์ (telephone), โทรเลข, โทรทัศน์, โทรภาพ (facsimile) หรือจะด้วยวิธีอื่นใดก็ตาม แต่ทั้งหมดนี้ ก็ต้องอาศัยการส่งในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic)

ในด้านผู้ใช้งานอาจจะขยายขอบข่ายของการใช้ออกไปอย่างกว้างขวางตามความต้องการของธุรกิจต่าง ๆ อาจใช้การเชื่อมโยงจากระบบสื่อสารดาวเทียมโดยวิธีวางโครงข่ายไมโครเวฟ, สายไฟเบอร์ออฟติค (Fibre-Optic) หรืออุปกรณ์อย่างอื่นที่จะเหมาะสมกับระบบ เพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

สำหรับในระบบการสื่อสารดาวเทียมทุกชนิด จำเป็นจะต้องมีระเบียบในการปฏิบัติงานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสร้างสถานีภาคพื้นดิน ทั้งนี้อยู่ในความควบคุมของ ICSC (INTERIM COMMUNICATIONS SATELLITE COMMITTEE) โดยกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของสถานีภาคพื้นดินไว้อย่างครบถ้วน สำหรับ

มาตรฐาน A อยู่ในเอกสารหมายเลข BG - 28 - 72*
" B " BG - 28 - 74*
" C " BG - 28 - 73*

CCIR จะเป็นตัวกำหนดมาตรฐานอ้างอิงตลอดข่ายของดาวเทียม อาทิเช่น กำหนดให้ สัญญาณรบกวนโดยเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงไม่ควรเกิน 10,000 pw โดยจำแนกพวกของสัญญาณรบกวนไว้ ดังนี้.-

Thermal up-path noise Satellite intermodulation noise Thermal down-path noise	}	7,500 pW

---

* Operation Memorandom OM 3.1.001
Satellite System Operation Guide, Volume 1
Revision 23, 24 October 1977

Interference noise	1,000	pW
Earth station transmit and receive noise	1,500	pW
Total	10,000	pW

จะเห็นได้ว่า สัญญาณรบกวนมีผลต่อระบบสื่อสารดาวเทียมมากถึง 7,500pW ซึ่งจำแนกออกได้.-

Thermal up-path noise :-

up-path loss, Gain to noise temperature ratio, loading level ของ transponder ในดาวเทียม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องฯ

Satellite intermodulation noise :-

การจัดเรียงความถี่ของคลื่นพาห์ในทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียม, EIRP ของคลื่นพาห์ของดาวเทียม

Thermal down-path noise:-

down-path loss, G/T ของสถานีรับภาคพื้นดิน

ดังนั้น ICSC จึงได้กำหนดมาตรฐานสำหรับระบบการสื่อสารดาวเทียมไว้ดังนี้.-

1. ได้กำหนดมาตรฐานของคลื่นพาห์ของสถานีภาคพื้นดินไว้ตามขนาดต่าง ๆ แล้วแต่ความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity)

2. กำหนด EIRP ตามลักษณะของคลื่นพาห์

3. กำหนด G/T ของสถานีภาคพื้นดิน

4. ข้อกำหนดทั้งหมดนี้ อยู่ภายใต้สภาพอากาศที่มีท้องฟ้าแจ่มใส มีลมบ้างเล็กน้อย

<u>หมายเหตุ</u> CCIR ได้เสนอให้มีการสำรองค่าของเสียงรบกวนไว้ 1,000 pW สำหรับเป็นค่าการรบกวนอันจะเกิดจากระบบไมโครเวฟภาคพื้นดิน ที่ใช้ในย่านความถี่เดียวกันกับระบบดาวเทียม โดยกำหนดไว้ในมาตรฐานข้อที่ 2. และการรบกวนเนื่องจากคลื่นพาห์หลาย ๆ สถานีภาคพื้นดิน และ group delay ในระบบนั้น ๆ

ค่าที่สำคัญในการนำเอามาคิดออกแบบระบบการทำงานของสถานีภาคพื้นดิน คือ ค่า EIRP และ ค่า G/T และการที่จะคิดค่าทั้งสองนี้ได้นั้น ยังประกอบด้วย factor สำคัญอีก คือ ความสามารถของเครื่องส่งที่จะให้กำลังทางด้านออก (Power Output) โดยมีความผิดเพี้ยนน้อย, ระบบจานสายอากาศ (ซึ่งรวมทั้งอุปกรณ์สายส่งด้วย), กำลังส่งของคลื่นที่แพร่กระจายออกไปในอวกาศ จะต้องไม่มีการรบกวนสถานีข้างเคียง และอื่น ๆ

การวิเคราะห์ระบบการรับ-ส่งสัญญาณโดยใช้มาตรฐานของ INTELSAT

จำแนกการวิเคราะห์ระบบออกได้เป็น 2 แบบ คือ

- การรับ-ส่งสัญญาณโทรศัพท์
- การรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์

2.1 การรับ-ส่งสัญญาณโทรศัพท์ในระบบของ INTELSAT

2.1.1 SPACE SEGMENT UP-LINK

จากเอกสารของ INTELSAT หมายเลข BG - 28 - 72 กำลังสูงสุดของเครื่องส่ง (HPA) ของสถานีภาคพื้นดินที่จะใช้ส่งไปยังดาวเทียมที่จะใช้ Carrier 60 ช่องสัญญาณ โดยใช้ความถี่แถบกว้าง (bandwidth) 5.0 แม็กกะเฮิทซ์ ค่า EIRP = 77.8 dBW, แต่ถ้าสถานีส่งใช้มุมเงย (elevation) 10 องศา ดังนั้นค่า EIRP นี้จะต้องรวมค่าของ power margin 1.0 dB อยู่ด้วย นั่นคือในสภาวะปกติกำลังสูงสุดของ EIRP ที่มุมเงย 10 องศา ควรจะเป็น 76.8 dBW (มุมเงย 10 องศา

จะเป็นมุมที่อยู่ปลายสุดของ global beam receiver) นั่นคือ เมื่อเปรียบเทียบกับสถานีภาคพื้นดินอื่น ๆ ที่อยู่ที่จุด sub satellite point จะต้องใช้กำลังส่งสูงกว่า (ทั้งนี้เพราะว่า การ attenuated สูงกว่า) แต่ถ้าสถานีภาคพื้นดินใด ๆ ที่มีมุมเงยเกินกว่า 10 องศา จะมีผลต่อ geographical advantage โดยมี factor เพื่อเป็นตัวกำหนดกำลังส่งให้น้อยลงกว่าใน BG - 28 - 72 เมื่อเป็น global beam ดังนี้.-

$$\text{geographical advantage factor} = -0.06\,(EL-10) \quad \text{dB} \quad (1)$$

EL : มุมเงยของสถานีภาคพื้นดิน degree

ดังนั้น จะเห็นว่าในกรณีทั่ว ๆ ไป กำลังส่ง ของสถานีภาคพื้นดินอาจจะใช้น้อยลงไปอีก (ทั้งนี้ยังมี factor อื่น ๆ อีก ที่จะช่วยลดกำลังส่งลง เช่น สภาวะของดาวเทียมต่าง ๆ, จำนวน intermodulation noise ในดาวเทียม หรือการใช้กับจำนวนสถานีภาคพื้นดินเป็นจำนวนมาก เป็นต้น) เมื่ออยู่ในสภาวะดังกล่าวข้างบนจะส่งกำลังเพียง 76.8 - geographical advantage factor = 76.8 - 1.6 = 75.2 dB ซึ่งสภาวะนี้อยู่ในสภาวะ Worse located received earth station ที่ beam edge เท่านั้น และมี G/T = 40.7 dB/°K โดยจานมีมุมเงยอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 องศา แต่ในความเป็นจริงแล้วเราจะส่งเพียง 73.9 dBW เท่านั้น

ในการที่จะหากำลังส่งออกของเครื่องขยายกำลังสูง (HPA) ว่าจะใช้เป็นจำนวนเท่าไรจึงจะพอเพียงนั้น จะต้องรู้อัตราการขยายของจานสายอากาศเสียก่อน ซึ่งอัตราการขยายของจานสายอากาศนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเปิด (aperture area) และความถี่ของจานสายอากาศนั้น ๆ เช่น

$$G = 10 \log \frac{4\pi A(EF)}{\lambda^2} \quad \text{dB} \quad (2)$$

A : aperture area of antenna

EF : overall efficiency of antenna

λ : wavelength of operating frequency

ปกติแล้ว efficiency factor ของจานสายอากาศพวกนี้จะมีประมาณ 0.54 (54%) แต่ถ้าให้ทำงานที่ความถี่ 6,142.5 เมกกะเฮิทซ์ หรือ 0.0488 เมตร จานสายอากาศมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เมตร (พื้นที่ผิวเปิดทั้งหมด 706.86 $ม^2$) เมื่อแทนค่าในสมการข้างบนแล้วจะได้อัตราการขยาย 63.0 เดซิเบล เป็นต้น

ในการส่งกำลังไปยังดาวเทียมนี้ จะต้องมีกำลังส่งที่สูงพอ ดังนั้นจานสายอากาศจะต้องมี Beamwidth ที่แคบ ๆ มาก จึงจะมีการรวมกำลังส่งได้อย่างเต็มที่ ซึ่ง (ค่า Beamwidth นี้จะวัดที่ -3 dB)

$$\text{Beamwidth} = \frac{65\lambda}{D} \quad \text{degree} \qquad (3)$$

λ : เป็นความยาวคลื่นของความถี่ส่ง

D : เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของจานสายอากาศ

ดังนั้น จากสภาวะข้างบนนี้ จะพบว่าที่ beamwidth มีค่าเพียง 0.11 องศาเท่านั้น ซึ่งขณะที่เล็งไปยังดาวเทียมถูกต้องอย่างมากด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความแคบมากของ beamwidth ของจานสายอากาศ ซึ่งปกติจะใช้การ tracking แบบอัตโนมัติตามการเคลื่อนที่ของดาวเทียมเอง โดยอ้างอิงสัญญาณ radio - bacon ของดาวเทียม

จากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า EIRP = 73.9 dBW อัตราการขยายของจานสายอากาศ = 63.0 dB ดังนั้นเครื่องขยายกำลังสูง (HPA) จะต้องทำการขยายกำลังเพียง 10.9 dBW เท่านั้น หรือมีค่า 12.3 วัตต์ และกำลังส่งที่ได้มานี้จะต้องครอบคลุมการสูญเสียในวงจรด้วย ซึ่งการสูญเสียนี้จะจัดแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การสูญเสียในสายส่ง (wave guide loss) และการสูญเสียตรงจุดรวมสัญญาณ (Combiner loss) ของสัญญาณเสียงและสัญญาณภาพโทรทัศน์ ปกติการสูญเสียในสายส่งจะวัดได้ประมาณ 1.1 dB แต่การสูญเสียที่จุดรวมสัญญาณขึ้นอยู่กับ อัตราของกำลังส่งของทั้งสองสัญญาณ (สัญญาณเสียงและสัญญาณภาพโทรทัศน์) ถ้า power combiner มีค่า

1 :1 จะทำให้สัญญาณแต่ละอันเกิดการสูญเสียสัญญาณ 3dB เมื่อวัดที่กำลังหลังจุดรวมสัญญาณ (แต่ Combiner นี้อาจจะมีอีกหลายชนิดไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน) ถ้าเครื่องขยายกำลังสูงของโทรศัพท์ใช้ TWT ดังนั้น การสูญเสียจากที่ได้กล่าวมาข้างบนแล้วนั้น TWT จะต้องครอบคลุมถึงอีกสาเหตุหนึ่งที่อาจจะเกิดขึ้นในขณะส่งสัญญาณหลาย ๆ อัน คือ Intermodulation product อีกประการหนึ่งด้วย ในการวิเคราะห์นี้ Combiner จะมีการสูญเสียในวงจรเสียง 1.2 dB แต่มีการสูญเสียในวงจรภาพ 7.0 dB ดังนั้นการสูญเสียทั้งหมดระหว่าง O/P ของ HPA และจุดป้อนสัญญาณ (feeding input) จะมีค่า 1.2 + 1.1 = 2.3 dB นั่นคือ HPA ต้องขยายกำลัง 10.9+ 2.3 = 13.2dBW (20.9W) และถ้าส่งหลาย ๆ สัญญาณแล้ว ค่ากำลังขยายของ HPA จะต้องมากกว่านี้เพื่อให้ครอบคลุมถึงค่า Intermodulation product ด้วย

กำลังส่งที่จะส่งไปยังดาวเทียมจะต้องผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางไกลก่อนที่จะถึงดาวเทียม ซึ่งจะทำให้เกิดการลดถอยของสัญญาณ (attennation) ต่อระยะทางอันนี้ หรือที่เรียกว่า Free Space loss (FSL) หรือ path loss มีการคำนวณหาค่าได้ดังนี้.-

$$FSL = 20 \log \frac{4\pi R}{\lambda} \quad dB \quad (4)$$

R : ระยะห่างจากสถานีภาคพื้นดินถึงดาวเทียม

λ : ความยาวคลื่นของความถี่ส่ง

ซึ่งค่าปกติที่คำนวณหาได้ประมาณ 200 dB เป็นต้น.

ถ้าในกรณีที่สถานีส่งภาคพื้นดินมีมุมเงยมากกว่า 10 องศา จะทำให้อัตราการขยายของสายอากาศของดาวเทียมสูงขึ้นไปด้วย ค่าอัตรา antenna correction factor (ACF)

$$ACF = 0.04 (EL - 10) \quad dB \quad (5)$$

EL : เป็นค่ามุมเงยของจานสายอากาศส่ง องศา

ถ้าอัตราการรับของจานสายอากาศดาวเทียมมีค่า 17.3 dB และค่า ACF = 1.1 dB นั่นคือ อัตราการขยายของจานสายอากาศดาวเทียมจะมีค่า 18.4 dB และ Received power level (RPL) ของดาวเทียมจะมีค่า.-

$$RPL = \text{Tes EIRP} - FSL + SAG \quad dB \quad (6)$$

Tes EIRP : Transmitting earth station EIRP dBW

FSL : Free Space Loss dB

SAG : Satellite Antenna Gain dB

เมื่อนำเอาตัวเลขจากที่ได้ยกตัวอย่างข้างต้น แทนลงในสมการนี้แล้ว จะได้

$$RPL = -107.7 \quad dBW$$

$$= -77.7 \quad dBm$$

นั่นคือ RPL ค่านี้จะครอบคลุมตลอดย่านแถบความถี่กว้าง (Bandwidth) 4 เมกกะเฮิทซ์ โดยใช้สมมุติฐานตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ให้มี modulated baseband 60 ช่อง

ส่วนที่สำคัญที่จะต้องนำมากล่าวในระบบการสื่อสารดาวเทียมนอกเหนือไปจากค่า RPL คือค่า power flux density (PFD) ซึ่งเกิดขึ้นจากการส่งกำลังของสถานีภาคพื้นดินไปยังดาวเทียม แต่การที่จะหาค่า PFD มีความจำเป็นต้องทราบค่า Unit gain ของสายอากาศรับดาวเทียมก่อน

$$UG = 10 \log \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad dB \quad (7)$$

A : one area unit squared (1 m^2)

λ : ความยาวคลื่นของความถี่ที่จะใช้ส่ง

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้ว UG = 37.2 dB

ดังนั้นจะหาค่าของ PFD ได้ดังนี้.-

PFD = Tes EIRP - FSL + UG $dBW/_m^2$ (8)

PFD = -88.9 $dBW/_m^2$

ในกรณีที่มีค่าต่าง ๆ ของสถานีภาคพื้นดินแตกต่างกันไปนั้น อาจได้รับผลต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ดังเช่น.-

	Carr. A	Carr. B	Carr. C	Carr. D	Carr. E	
Transmitting Station Elevation	24.5	36.3	30.4	19.3	11.7	deg.
Max. EIRP	80.8	76.8	76.7	81.2	81.8	dBW
Geographical Adv. Factor	0.9	1.6	1.2	0.6	0.1	dB
Norminal EIRP	79.9	75.2	75.5	80.6	81.7	dBW
Actual Transmitted EIRP	78.0	73.9	74.8	79.2	80.1	dBW
Range	39942	38732	39322	40504	41342	km.
Free Space Loss	200.2	200.0	200.1	200.4	200.6	dB
Unit Gain	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	dB
Power Flux Density	-85.0	-88.9	-88.1	-84.0	-83.3	$dBW/_m^2$

ซึ่งได้กำหนดค่าต่าง ๆ ไว้ ดังนี้.-

	Carr. A	Carr. B	Carr. C	Carr. D	Carr. E	
Transmitting Freq.	6136.25	6142.5	6146.25	6150.0	6160.0	MH_z
Capacity	132	60	36	96	252	ch.
Allocated Bandwidth	7.5	5.0	2.5	5.0	15.0	MH_z
Occupied Bandwidth	6.75	4.0	2.25	4.5	12.4	MH_z
Rx. Freq.	3911.25	3917.5	3921.25	3925.0	3935.0	MH_z
G/T	42.5	42.0	41.9	42.1	42.4	$dB/^\circ K$
Top Baseband Freq.	552	252	156	408	1052	KH_z

Satellite

East Longitude Location	335° 30' 00"	
Saturated PFD at beam edge	-67.1	dBW/m^2
Beam mode	global	
Max. EIRP at beam edge	22.0	dBW
G/T at beam edge	-17.9	$dB/^\circ K$
Rx. and Tx. antenna gain at beam edge	17.3	dB

เมื่อพิจารณาจากค่า Saturated PFD และค่า Max. EIRP แล้ว จะเห็นว่าหลอด TWT จะต้องทำงานจนกระทั่งถึงจุด Saturation จึงจะทำให้ได้กำลังส่งออก (Out-put) สูงสุด แต่เมื่อเราได้นำมาใช้งานกับหลาย ๆ คลื่นพาห์แล้ว จะทำให้ TWT ทำงานที่จุด Saturation ไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการรบกวนของ Intermodulation product ที่เกิดขึ้นในทรานสปอนเดอร์และยังมีผลไปรบกวนข้างเคียงอีกด้วย ดังนั้น จุดทำงานของ TWT จะต้องลดลงมาอีก หรือ input power จะต้องลดลง (Boi)

ซึ่งค่า Boi นี้ เกิดจากผลต่างระหว่าง Saturated PFD และค่า PFD ที่แท้จริงของคลื่นพาห์ทั้งหมด การที่จะหาค่า Correction Factorที่จะมาใช้กับ Saturated PFD สำหรับคลื่นพาห์หลาย ๆ อัน โดยใช้ค่า ACF* = 0.04 (EL - 10) นั้น จากค่า Saturated PFD = -67.1 + ACF = -67.1 - 0.6 = -67.7 $dBW/_m^2$

$$1/_p \text{ back off} = +78.34-67.7 = 10.6 \quad dB$$

ดังนั้น เมื่อ 1/p ถูก back-off ทำให้ Output จะต้อง back-off ไปด้วย เพราะจำนวน power ของ output back-off จะมีความสัมพันธ์กับจำนวน 1/p power ทั้งนี้เมื่อสัญญาณ 1/p มีระดับต่ำ ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear) และจำนวน Intermodulation จะต่ำด้วย แต่ถ้าระดับของสัญญาณ 1/p ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุด Saturation จะทำให้ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) และ Intermodulation ที่เกิดขึ้นจะมากกว่าจำนวน o/p ทั้งนี้เพราะถ้า TWT ทำงานในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว Intermodulation product เป็นจำนวน 2 dB ต่อ การเพิ่มของ 1/p power ทุก ๆ 1 dB ซึ่งจะหาได้จาก.-

$$Boo = e^{x/7} \quad dB \quad (9)$$

x : เป็น 1/p back-off dB

เช่นเมื่อ 1/p back-off = 10.6 dB นั่นคือ output back-off (Boo) จะมีค่า 4.6 dB ทำให้กำลังส่งที่ส่งจากดาวเทียมลงมายังพื้นโลกที่บริเวณ beam edge มีค่าน้อยลง 22 - 4.6 = 17.4 dBW

ส่วนการหาค่า Up-Link Thermal Carrier to Temperature ratio $(C/T)_u$ หาได้จาก.-

$$(C/T)_u = \text{Tes EIRP} - \text{FSL} + G/T \quad dBW/\mathring{K} \quad (10)$$

ACF : Antenna Correction Factor

Tes EIRP	:	Transmit Earth Station EIRP	dBW
FSL	:	Free Space Loss	dB
G/T	:	Satellite G/T	dB/$^{\circ}$K

และค่า Carrier to noise Density Ratio $(C/N)_o$ per 1 H_z Bandwidth (dB-H_z) หาได้จาก.-

$$(C/N)_o = C/T - k \qquad dB\text{-}H_z \qquad (11)$$

k : Boltzmann' s constant -228.6 dBW

Carrier to noise (C/N) ratio หาได้จาก.-

$$C/N = (C/N)_o - BW \qquad dB \qquad (12)$$

BW : เป็นค่าของ Bandwidth เดซิเบล

ส่วนค่า noise power (N_p) ในวงจรขยายต่าง ๆ จะหาได้ ดังนี้.-

$$N_p = k + T + BW \qquad dBW \qquad (13)$$

k	:	Boltzmann' s constant	dBW
T	:	Satellite System Noise Temperature	dB (10 log$^{\circ}$K)
BW	:	Occupied Bandwidth	dB (10 log H_z)

2.1.2 SPACE SEGMENT DOWN-LINK

เมื่อใดก็ตามที่สถานีภาคพื้นดินมีมุมเงยไปยังดาวเทียมไม่เท่ากัน จะทำให้ค่า Correction Factor ไม่เท่ากัน และบางสถานีค่า G/T ก็ไม่เท่ากันด้วย ดังนั้น เมื่อค่า EIRP ลดลงเนื่องจากค่า back-off เช่นเมื่อใช้

EIRP Carrier B = 17.4 dBW

l/p back-off = 10.6 dB

∴ EIRP Carrier B = 6.8 dBW

down link antenna correction factor 0.3 dB

Satellite EIRP = 6.8 + 0.3 dBW

= 7.1 dBW

ค่า factor อื่น ๆ สำหรับ Down-Link มีการคำนวณเหมือนค่า Up-Link ทุกประการ ยกเว้นค่า Atmospheric Attennation ซึ่งเป็นค่าพิเศษที่มีความสำคัญสำหรับ down-link ทั้งนี้เพราะว่า ยิ่งสถานีภาคพื้นดินมีมุมเงยน้อย ค่า Attennation นี้จะยิ่งมากขึ้น เพราะจะต้องผ่านชั้นของบรรยากาศเป็นระยะทางยาว แต่ปกติค่านี้จะไม่สูงมากจนเกินไป ขณะที่อากาศดี ซึ่งหาค่าได้จาก.-

$$\text{Atmospheric Attennation} = \frac{0.036}{\sin EL} \quad \text{dB} \qquad (14)$$

EL : Receiver Earth Station Elevation Angle degree

(ค่านี้ต้องนำเอาไปรวมกับค่า Free Space Loss เวลาคำนวณด้วย)

การคำนวณหา Carrier to Temperature Ratio (C/T_s)

$$C/T_s = 10 \log \frac{1}{\frac{1}{\text{antilog } \frac{C/T_{up}}{10}} + \frac{1}{\text{antilog } \frac{C/Tim}{10}} + \frac{1}{\text{antilog } \frac{C/T_{down}}{10}}} \quad \text{..... dBW/}^{\circ}\text{K} \qquad (15)$$

C/T_{up} : up-link thermal carrier to temperature ratio dBW/°K

C/Tim : เป็นผลรวมจาก Carrier to temperature ratio of

satellite intermodulation noise and transmit earth station out-of-band emission dBW/°K

C/T_{down} : down-link thermal carrier to temperature ratio dBW/°K

การคำนวณหา Carrier to noise density (C/N_{os})

$$C/N_{os} = 10 \log \frac{1}{\frac{1}{\text{antilog } \frac{C/N_{oup}}{10}} + \frac{1}{\text{antilog } \frac{C/N_{im}}{10}} + \frac{1}{\text{antilog } \frac{C/N_{o\,down}}{10}}} \quad \ldots$$

$$\ldots \text{ dB-H}_z \qquad (16)$$

C/N_{oup} : thermal carrier to noise density ratio dB-H_z

C/N_{oim} : carrier to noise density ratio of combined satellite intermodulation noise and the transmit earth station out-of-band emission dB-H_z

$C/N_{o\,down}$: thermal carrier to noise density ratio dB-H_z

การคำนวณหา Carrier to noise ratio (C/N_s)

$$C/N_s = 10 \log \frac{1}{\frac{1}{\text{antilog } \frac{C/N_{up}}{10}} + \frac{1}{\text{antilog } \frac{C/N_{im}}{10}} + \frac{1}{\text{antilog } \frac{C/N_{down}}{10}}} \quad \ldots$$

$$\ldots \text{ dB} \qquad (17)$$

C/N_{up} : up-link thermal carrier to noise ratio dB

C/N_{im} : carrier to noise ratio of the combined satellite intermodulation noise and the transmitter earth station out-of-band emission dB

C/N_{down} : down-link thermal carrier to noise ratio dB

ค่าต่าง ๆ ของ down-link หาได้ ดังนี้.-

	Carr. A	Carr. B	Carr. C	Carr. D	Carr. E	
Satellite EIRP	11.4	7.1	7.8	11.8	12.9	dBW
Total Satellite gain	133.6	133.2	133.1	133.0	133.4	dB
Down-link antenna correction factor	0.7	0.3	0.1	0.1	0.5	dB
Range	39645	40609	41375	41131	40243	Km
Free space loss atmospheric att.	196.3	196.6	196.8	196.8	196.5	dB
C/T_{down}	-142.4	-147.5	-147.1	-142.9	-141.2	dBW/°K
$C/N_{o\ down}$	86.2	81.1	81.5	85.7	87.4	dB-H_z
C/N_{down}	17.9	15.1	18.0	19.2	16.5	dB
C/T_s	-145.9	-149.9	-150.0	-145.6	-144.2	dBW/°K
C/N_{os}	82.7	78.7	78.6	83.0	84.4	dB-H_z
C/N_s	14.4	12.7	15.1	16.6	13.6	dB

หมายเหตุ ค่า C/T จะเห็นว่าสำคัญมากกว่าค่า C/N ใน space segment เพราะว่าจะช่วยกำจัด (eliminate) bandwidth factorของสถานีรับภาคพื้นดิน เช่น ถ้าสถานีรับภาคพื้นดินต้องการให้ได้ C/N_s = 12.7 dB ที่ IF Filter จะต้องมี noise bandwidth 4.0 MH_z พอดี จึงจะได้ C/N = 12.7 dB แต่ถ้า filter มี bandwidth 4.7 MH_z แล้ว C/N = 12.0 dB นั่นคือ ถ้าไปใช้กับโทรศัพท์ ทำให้มีสัญญาณรบกวนมากขึ้น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งจะมีวิธีแก้สาเหตุนี้ได้โดยเพิ่มกำลังส่งของดาวเทียมขึ้นไปอีก เพื่อชดเชยวงจรที่ไม่ถูก

การหาค่า Signal to noise ratio (S/N)

โดยใช้สมการของ FM Equation

$$S/N = C/N + 10 \log BW/_{bw} + 20 \log (FD_{ttrms}/fm) + PEF + WF \quad (18)$$

C/N : carrier to noise ratio at demod. input dB

BW : RF noise bandwidth (occupied)

bw : bandwidth ของสัญญาณโทรศัพท์หนึ่งช่อง (3.1 KH_Z)

FD_{ttrms} : RMS 0 dBmo test tone deviation

fm : modulation frequency under investigation (top base band frequency)

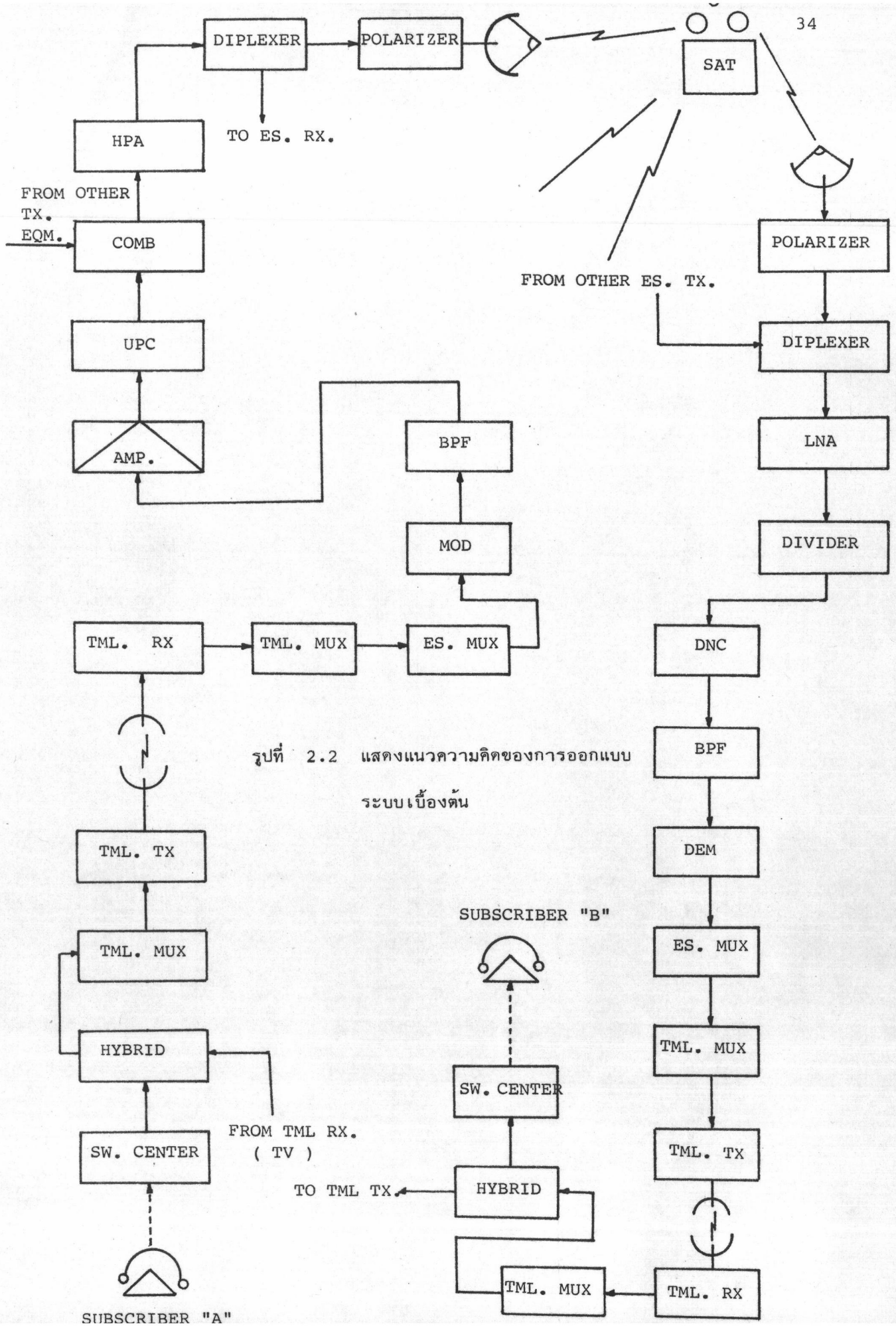
PEF : Pre-Emphasis Improvement Network (4 dB) dB

WF : weighting factor (2.5 dB) dB

การหาค่า Noise Power (NP)

$$NP = \text{antilog} \frac{90 - S/N}{10} \quad pW \quad (19)$$

S/N : Signal to noise ratio



รูปที่ 2.2 แสดงแนวความคิดของการออกแบบระบบเบื้องต้น

ความหมายของอักษรย่อ จากรูปที่ 2.2

AMP	:	AMPLIFIER
BPF	:	BAND PASS FILTER
COMB	:	COMBINER
DEM	:	DEMODULATOR
DNC	:	DOWN CONVERTER
LNA	:	LOW NOISE AMPLIFER
MOD	:	MODULATOR
MUX	:	MULTIPLEXER
RX	:	RECEIVER
UPC	:	UP CONVERTER

1174 13679

2.2 การรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ในระบบของ INTELSAT

ในเอกสาร CCIR HYPOTHETICAL REFERENCE CIRCUIT* สำหรับสัญญาณภาพโทรทัศน์นั้น อาศัย Recommendations 352-3, 354-2, 421-3 และ 451-2 ซึ่งใช้ตั้งแต่ระยะทางใกล้ ๆ จนถึง 2,500 กม.(ในระบบไมโครเวฟภาคพื้นดิน) โดยมี modulator และ demodulator อย่างละ 1 ตัว โดยระบบนี้ไม่รวมถึงวงจรติดต่อระหว่างสถานีส่งกับสถานีรับ

ก่อนที่จะกล่าวถึงการส่งสัญญาณโทรทัศน์ ควรที่จะได้ทราบมาตรฐานของการส่ง-รับสัญญาณโทรทัศน์แต่ละระบบว่ามีคุณสมบัติอย่างไรบ้างก่อน ดังตารางที่แสดงไว้ข้างล่างนี้

MAIN TV SYSTEM DEST.	LINE/ PICTURE	FIELD FREQ.	TOP VIDEO FREQ.	REQUIRED S/N 99% OF TIME	MAINLY USED IN
M	525	60	4.2	56.0	USA, JAPAN, LATIN AMERICA, ASIA
N	625	50	4.2	-	SOME LATIN AMERICA COUNTRY
B, G	625	50	5.0	52.0	WESTERN EUROPE, ASIA, AFRICA
H	625	50	5.0	52.0	SOME ARUB COUNTRY
I	625	50	5.5	52.0	FORMER U.K. TERRITORIES
D, K	625	50	6.0	57.0	USSR, ESTERN EUROPE
Ki	625	50	6.0	-	FORMER FRENCH TERRITORIES (AFRICA)
L	625	50	6.0	57.0	FRANCE

* CCIR RECOMMENDATION 352-3, HYPOTHETICAL REFERENCE CIRCUITS FOR TELEPHONY AND TELEVISION IN THE FIXED SATELLITE SERVICE (Question 2-3/4), (1963-1970-1974)

หมายเหตุ - ระบบ G,H, K และ L จะใช้ส่งในย่านความถี่ UHF (ULTRA-HIGH FREQUENCY ความถี่ตั้งแต่ 300 MH_Z ถึง 3,000 MH_Z) ส่วนที่เหลือนอกเหนือจากนี้ ส่วนมากส่งความถี่ VHF (VERY HIGH FREQUENCY ความถี่ตั้งแต่ 30 MH_Z ถึง 300 MH_Z) หรือไม่ก็ส่งทั้ง VHF และ UHF ส่วนในการส่งโทรทัศน์สี แบ่งออกได้เป็น 4 ระบบ คือ NTSC, PAL, PAL-M และ SECAM ซึ่งระบบ M จะใช้การส่งแบบ NTSC, ระบบ B, G, H, I ใช้ PAL, ระบบ B, D, G, H, KL และ L ใช้การส่งแบบ SECAM

- สัญญาณที่ใช้ 1 V_{pp} (0.7 V_{pp} เป็นสัญญาณภาพ 0.3 V_{pp} เป็น synchronous pulse) ส่วนระบบ M จะแตกต่างกว่านี้เล็กน้อย

ในการวิเคราะห์การส่งสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม จะทำการเปรียบเทียบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ผ่านทาง INTELSAT STANDARD A, รับโดย STANDARD A กับ STANDARD B ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติดังต่อไปนี้.-

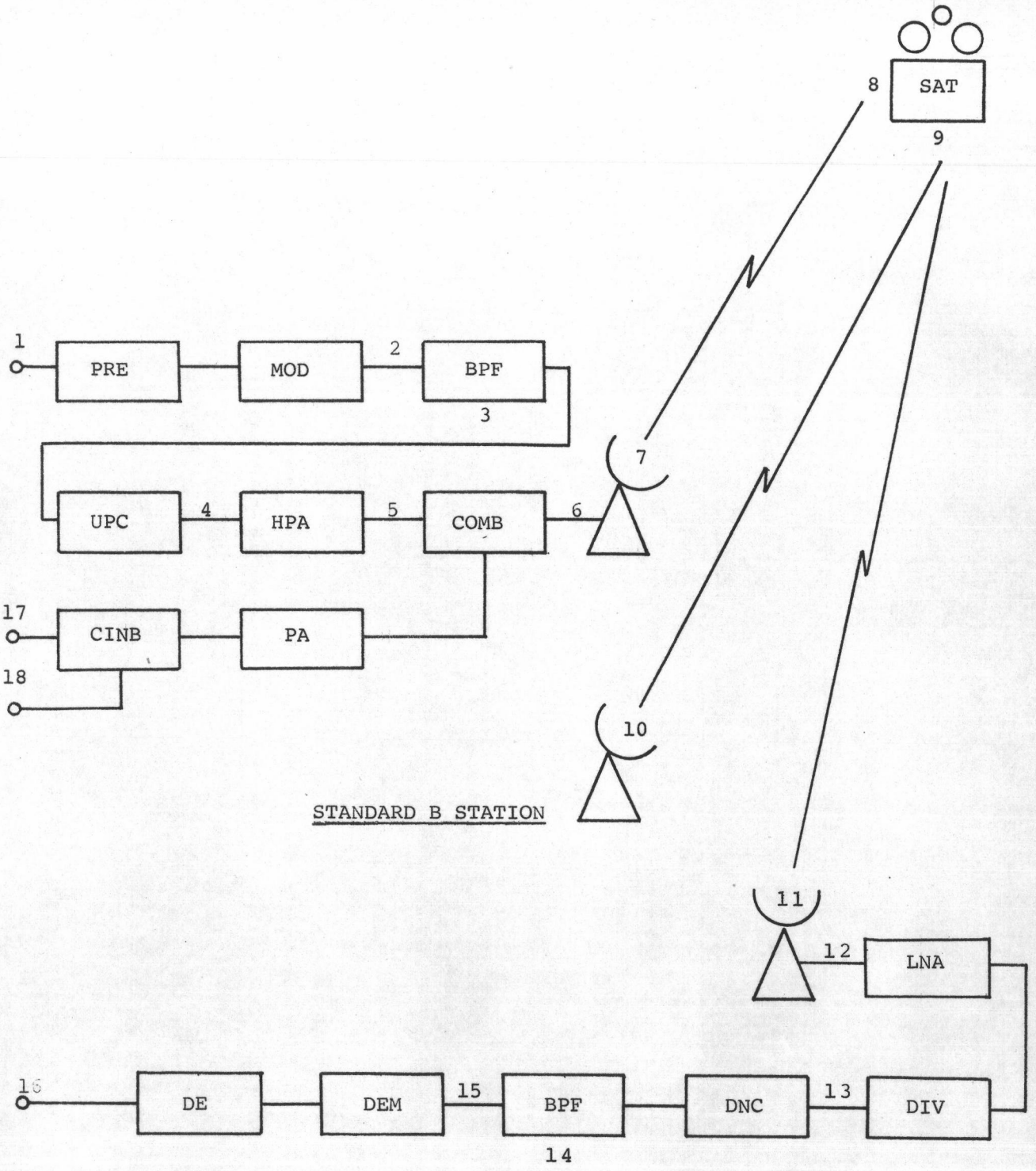
TRANSMIT EARTH STATION

เส้นผ่าศูนย์กลางของจานสายอากาศ	30.0	เมตร
ความถี่ด้านส่ง	6390.75	เมกกะเฮิทซ์
มุมเงยของจานสายอากาศ	36.3	องศา
MODULATION MODE	FM	
ส่งสัญญาณโทรทัศน์	1	สัญญาณ
ระบบ	B	
Allocated bandwidth	17.5	MH_Z
Occupied bandwidth	15.75	MH_Z
Video Top Frequency	5.0	MH_Z
Peak to Peak Low Frequency (15 KH_Z)		
Deviation of Pre-emphasized Video Signal	4.22	MH_Z

สถานีรับ	STANDARD A	STANDARD B	
ขนาดของจานสายอากาศ	32.0	11.0	เมตร
G/T	42.4	32.1	dB/°K
มุมเงย	18.3	10.2	องศา
ความถี่รับ	4165.75	4165.75	MH_z

ดาวเทียม

Saturated power flux density at beam edge	-67.1	$dBW/_{m^2}$
Beam mode	Global	
Maximum EIRP at beam edge	22.0	dBW
Transponder Lower Frequency Limit	6382.0	MH_z
Transponder Upper Frequency Limit	6418.0	dB/°K
G/T at beam edge	-17.9	dB/°K
Rx and Tx antenna gain at beam edge	17.3	dB



รูปที่ 2.3 TRANSMISSION PATH AND HYPOTHETICAL REFERENCE CIRCUIT OF TELEVISION SIGNAL HALF TRANSPONDER

รายละเอียดตามหมายเลข ในรูปที่ 2.3

1. CAPACITY : 1 VIDEO CH.
   BASEBAND : 50 H_z - 5.0 MH_z
   INPUT LEVEL : 1 V_{pp} (0 dBV)

2. LOW FREQ. 15 KH_z
   p-p FREQ. DEV. 4.2 MH_z
   LEVEL 0 dBm

3. FILTER BANDWIDTH 15.75 MH_z
   FREQ. BAND 62.13 - 77.88 MH_z

4. TX. FREQ. : 6390.75 MH_z
   MOD. FREQ. BAND : 6382.88 - 6398.63 MH_z

5. OUTPUT LEVEL : 33.8 dBW

6. ANT. GAIN 63.3 dB
   FEED $I/_p$ LEVEL 23.1 dBW

7. ANT. ϕ 30 M.
   EL. 36.3°
   EIRP : 86.4 dBW

8. UP-LINK RANGE 38732 KM.
   FSL : 200.3 dB
   PFD : -76.3 $dBW/_{m^2}$

9. SATELLITE POSITION : 335.5° E
   BEAM MODE : GLOBAL
   FREQ. TRANSLATION : 2225 MH_z
   G/T : -16.8 dB/° K

ALLOCATED BW. 17.5 MH_z

U/L C/T : -130.7 dBW/° K

C/T : 25.9 dB

10. DOWN LINK RANGE 41512 KM.

FSL : 197.4 dB, C/T : -147.1 dBW/° K

ANT. ϕ 11 M., C/N : 9.5 dB

G/T : 32.1 dB/° K

EL. : 10.2°

11. DOWN-LINK RANGE 40609 KM.

FSL. : 197.1 dB

ANT. ϕ 32 M.

EL. : 18.3°

PFD : -140.9 $dBW/_m2$

12. FREQ. : 4165.75 MH_z

ANT. GAIN : 61.4 dB

ANT. TEMP.: 29.0° K

RX. TEMP : 50.4° K

G/T : 42.4 dB/° K

C/T : -137.2 dBW/° K

C/N : 19.4 dB

RX LEVEL : -117.1 dBW

13. -45 dBm

14. NOISE BW. 15.75 MH_z

15. LEVEL : 0 dBm

C/T : -138.3 dBW/° K

C/N : 18.3 dB

16. CAPACITY : 1 VIDEO CH.

BASEBAND : 50 H_z - 5.0 MH_z

O/P LEVEL : 1.0 V_{pp} (0 dBV)

S/N : 50.9 dB

17. FROM AUDIO
TX. EQM.

18. FROM TP.
TX. EQM.

ความหมายของอักษรย่อ จากรูป 2.3

BPF	:	Band Pass Filter
COMB	:	Combiner
DE	:	De-Emphasis
DEM	:	Demodulator
DIV	:	Divider
DNC	:	Downconverter
LNA	:	Low Noise Amp.
MOD	:	Modulator
HPA	:	High Power Amp.
PA	:	Power Amp.
PFD	:	Power Flux Density
PRE	:	Pre-emphasis
RX	:	Receiver
Tp	:	Telephone
Tx	:	Transmitter
UPC	:	Up Converter

จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมานั้น เป็นผลซึ่งคาดว่าจะได้ แต่ในทางปฏิบัตินอกเหนือจากเทคนิคดังกล่าวมาแล้ว ยังมี factor อื่น ๆ ที่จะต้องนำมาพิจารณาในการที่จะหาระบบที่ดีที่สุด และเหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะนำมาใช้งานต่อไป.

2.3 การเพิ่มปริมาณความต้องการ

อาจทำได้ 2 วิธี คือ

2.3.1 เพิ่มจำนวนทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียมขึ้นไปอีก ถ้าทรานสปอนเดอร์ของดาวเทียมเพิ่มขึ้นจะทำให้ต้องใช้พลังงานของดาวเทียมเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งทั้งสองอย่างนี้จะมีความสัมพันธ์กัน

2.3.2 โดยส่งสัญญาณแต่ละอันให้มีขั้วของสัญญาณต่างกัน (difference polarized beam) และแยก spot beam โดยยังคงใช้ความถี่เดิม แต่ได้จำนวนข้อมูลที่จะส่งไปใช้งานได้มากขึ้น การใช้ spot beam ยังมีผลเสียคือ ต้องใช้จานสายอากาศของดาวเทียมใหญ่ขึ้น จะมีจุดส่งสัญญาณ (Multiple feed) มากขึ้น, น้ำหนักมาก, กินกำลังไฟมาก ซึ่งอาจไม่เหมาะกับระบบที่จะนำมาใช้

2.4 จำนวนราคา ต่อ ช่องสัญญาณ ต่อปี

เป็นการหามาได้โดยคิดจากประสิทธิภาพของดาวเทียมที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการใช้งานของไมโครเวฟจะใช้ได้นานกว่า ทำให้ราคาของระบบหลังนี้ถูกกว่า แต่เนื่องจากดาวเทียมมีอายุการใช้งานจำกัด จึงทำให้การประเมินราคาต่อปีสูงกว่า แต่ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและดัดแปลงให้มีอายุการใช้งานได้นานกว่าเก่าแล้ว

2.5 การสิ้นสุดอายุการใช้งานของดาวเทียม

มีผู้สนใจมากเกี่ยวกับการสิ้นสุด อายุการใช้งานของดาวเทียม เพราะว่าดาวเทียมอยู่ในวงโคจรและอาจเกิดเหตุวิบัติขึ้นในวินาทีใดก็ได้ เช่น การขับเคลื่อนของระบบเกิด

ขัดข้องไม่ทำงาน ทำให้ไม่สามารถรักษาตำแหน่งที่ถูกต้องได้ ต้องปล่อยให้หมดอายุไปก่อนเวลา ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการคาดคะเนอายุการใช้งานของดาวเทียมเป็นค่าซึ่งประเมินผลเอาเท่านั้นทั้งสิ้น ซึ่งข้อนี้ มีส่วนสำคัญมากในการคิดสร้างระบบดาวเทียมเพื่อนำเอามาใช้ในการสื่อสาร

หมายเหตุ ดาวเทียมลูกที่ปล่อยในปี 1968 ยังคงใช้งานอยู่ได้ถึงทุกวันนี้ หรือ SYNCOM, ATS-1, ATS-3, INTELSAT - 1, 2, 3 และ TACSAT-1 เป็นต้น แต่การใช้งานไม่ได้ใช้ตลอดเวลา เพียงแค่ใช้เป็นครั้งคราว หรือเป็นศูนย์ติดต่อทางคอมพิวเตอร์

2.6 การประหยัดการใช้พลังงานบนดาวเทียมเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้งานได้ยาวนาน

สามารถทำได้ 2 ทาง คือ

1. ทางด้านดาวเทียม
2. ทางด้านสถานีภาคพื้นดิน

การศึกษาทางด้านดาวเทียม เพื่อให้ใช้งานได้คุ้มค่าที่สุดและเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ได้อาศัยแนวทางการคิดของระบบ BELL (BELL SYSTEM)*

การศึกษาทางด้านสถานีภาคพื้นดิน จะทำให้ได้ผลและมีประสิทธิภาพมาก ๆ นั้นจะต้องอาศัยกรรมวิธีทางด้านเทคนิค ที่ยังคงสามารถทำให้ผู้ใช้งานได้อย่างเป็นอิสระเหมือนเดิม โดยวิธีมัลติเพล็กซ์ (Multeplex)

2.7 การปรับปรุงการใช้งานของทรานสปอนเดอร์บนดาวเทียมเพื่อให้ใช้ประโยชน์ได้สูงสุด

ทำได้โดย .-

1. เมื่อใช้ทรานสปอนเดอร์กับสัญญาณ analog จะต้องทำการ encode ให้ได้จำนวน bit rate ต่ำที่สุด

---

* "A model of a Domestic Satellite Communication System"
Bell System Tech. J. Dec. 1968, Leroy C. Tellotson.

2. ใช้เทคนิคของการ modulation และระบบ multiple access จะช่วยทำให้การใช้ทรานสปอนเดอร์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

3. พยายามแบ่งการใช้งานในทรานสปอนเดอร์ให้ทำงานอย่างเต็มที่ แต่ต้องไม่มีผลให้เกิดการรบกวน (intermodulation) มากเกินไป

2.8 การปรับปรุงพารามิเตอร์บางอย่างเพื่อให้ระบบการสื่อสารมีประสิทธิภาพสูง โดยการปรับปรุงค่าของ - Carrier to thermal noise ratio และ

- Signal to noise ratio

จากความสัมพันธ์ของ Carrier to noise power ratio (C/N) จะนำเอามาหาค่าของ Carrier to thermal noise ratio ได้

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{T} \cdot \frac{1}{k} \qquad (20)$$

กำหนดให้ absolute temperature เป็น T เคลวิน กำเนิด kT วัตต์ noise ต่อ 1 เฮิทซ์, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ W/H_z

ดังนั้น equivalent noise bandwidth ควรจะเป็น B H_z

จากสมการ (20) $\frac{C}{T} = k B \frac{C}{N}$ (21)

แต่กรณี การสื่อสารผ่านดาวเทียมใช้ระบบ FDM-FM ถ้าป้อน test signal เป็น test tone เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราของ noise power จะได้.-

$$\frac{S}{N} = \frac{C}{T} \frac{1}{k} \frac{1}{B} \left(\frac{\Delta f}{fch}\right)^2 \qquad (22)$$

จากสมการ (22) จะสรุปได้ว่า.-

1. ค่าของ Signal to noise ratio สำหรับ frequency modulation ในวงจรโทรศัพท์จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนต่อกำลังสองของ fch ซึ่งจะทำให้ค่าของ

S/N ไม่ค่อยดีในช่องสัญญาณช่องสูง ๆ

2. ถ้าจะกำหนดให้ค่าของ C/T มีค่าคงที่ แต่ต้องการให้ค่า S/N ดีขึ้นจะทำได้โดยการเพิ่มค่าของ rms frequency deviation ของ frequency modulation

ฉนั้น จะเห็นว่าถ้าต้องการให้ระบบการสื่อสารมีประสิทธิภาพสูงและคุณภาพดี โดยสามารถปรับปรุงได้ จะสามารถปรับปรุงค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้.-

1. กำหนดค่าของ psophometric correction

2. กำหนดค่าของ emphasis correction

3. กำหนดค่า bandwidth ของระบบ และปรับค่า rms frequency deviation ของระบบ

4. ถ้าไม่กำหนดค่าของ bandwidth ค่าของ C/T ที่จุด threshold level จะเป็นตัวกำหนดค่า bandwidth โดยอัตโนมัติ

5. ถ้าค่า S/N ที่ demodulator ต่ำลงมาจนกระทั่งถึง 10 dB ซึ่งเรียกว่าจุด threshold level แล้ว จะทำให้คำนวณหาค่าของ bandwidth ที่ต่ำสุด รวมทั้งค่า margin ได้ เพื่อเป็นตัวกำหนดที่ต่ำที่สุดของระบบในการใช้งาน (แต่ค่าของ rms frequency deviation จะต้องกำหนดไว้ก่อน)

$$\log B = \log \frac{C}{T} + 218.6 \quad H_z \quad (23)$$

สรุป ในระบบ frequency modulation การที่จะให้ได้ค่า Signal to noise ratio สูงที่สุดนั้น จะต้องกำหนดค่าของ carrier to thermal noise และจำนวนช่องโทรศัพท์ที่จะใช้งานอย่างแน่นอนก่อน

ในทำนองเดียวกันกับการส่งโทรทัศน์ ค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะต้องกำหนดเสียก่อนจากการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ แล้วจึงหาค่า signal to noise ratio ที่สูงที่สุดได้