



การคำนวณเชิงกำลังการเชื่อมโยงสื่อสารดาวเทียม

SATELLITE LINK CALCULATION



โดย

นายเจษฎา

อภิษฐารัตน์

นายสมศักดิ์

ช่วยสกุล

วัน เดือน ปี.....	๑๑ ก.ค. ๒๕๖๐.
เลขทะเบียน.....	๐๓๖๙๘๙
เลขเรียกหนังสือ.....	T ๐๔๐๘๖ ๑ ๒๕๖๐

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีสำหรับศาสตราจารย์

สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าช. 036989 ที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริิถยานิพนธ์ การคำนวณเชิงกำลังการเชื่อมโยงสื่อสารดาวเทียม
SATELLITE LINK CALCULATION

ชื่อนักศึกษา นายเจษฎา อภิทธิพรวรวัฒน์
 นายสมศักดิ์ ช่วสสกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กนก เจนจิระพงษ์เวช

ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2538

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง อนุมัติให้รับปริิถยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรม-
ศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริิถยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

บทความนี้ เสนอวิธีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยออกแบบระบบการเชื่อมโยง การสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยใช้ภาษาปาสคาลในการคำนวณหาจานเสาอากาศหรือกำลังทาง ด้านส่ง เพื่อให้ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงสูงสุด

ABSTRACT

In this paper, Satellite Link calculation is analyzed by using Pascal Language to determine the antenna disc and transmitted power at uplink in order to meet their highest efficiency in satellite communications.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้ ได้รับความช่วยเหลือทางด้านข้อมูลอย่างดียิ่งจาก รศ.ดร. กนก เจนจิระหงส์เวช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท และเพื่อน ๆ ที่ได้ให้ข้อมูล โดยเฉพาะ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด

ทำนนี้ ผู้ทำปริญญาโทใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อมูลด้วยดีตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญภาพ	
รูปที่ 1 แสดงการเชื่อมโยงระบบสื่อสารดาวเทียม	2
รูปที่ 2 อุปกรณ์ของสถานีภาคพื้นดินทางด้านส่ง	3
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของการสื่อสารดาวเทียม	4
รูปที่ 4 สถานีภาคพื้นดินทางด้านรับ	5
รูปที่ 5 แสดงค่าสูงสุดของ EIRP ในทิศทางการกระจายคลื่นสูงสุด	6
รูปที่ 6 แบบรูปการกระจายคลื่นของเสาอากาศ	8
รูปที่ 7 อัตราการขยายของเสาอากาศในทิศทางของการแพร่กระจาย สูงสุดเป็นฟังก์ชันของความกว้างมุม θ_{3dB} สำหรับค่าของ ประสิทธิภาพ	10
รูปที่ 8 ความหนาแน่นพัลส์กำลัง	11
รูปที่ 9 รูปแสดงค่าจำกัดความของสเตอเรเดียน	12
รูปที่ 10 ระบบส่งคลื่นผ่านบรรยากาศ	13
รูปที่ 11 การลดทอนของอากาศว่าง	15
รูปที่ 12 กำลังสัญญาณที่ได้รับโดยเสาอากาศทางด้านรับ	15
รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง A_{e0} กับความถี่	18
รูปที่ 14 การสูญเสียในอุปกรณ์ปลายทาง	19
รูปที่ 15 แสดงการคลาดเคลื่อนของงานเสาอากาศในทิศทาง $T_{\alpha}-R_{\alpha}$	20
รูปที่ 16 มุมเงยและมุมกวาด	21
รูปที่ 17 โคออร์ดิเนตของสถานีรับสัญญาณดาวเทียม	22
รูปที่ 18 โคออร์ดิเนตใหม่ของสถานีรับสัญญาณดาวเทียม	23

รูปที่ 19	ความหนาแน่นของกำลังสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัม	25
รูปที่ 20	ตัวเลขสัญญาณรบกวนของระบบทางด้านรับ	26
รูปที่ 21	ระบบทางด้านรับ	28
รูปที่ 22	รูปอณุมิติสัญญาณรบกวนสายอากาศดาวเทียม	30
รูปที่ 23 (a)	อณุมิติสัญญาณรบกวนของสถานีภาคพื้นดินในกรณีที่ใช้เสาแม่ฟ้า	30
รูปที่ 23 (b)	อณุมิติสัญญาณรบกวนของสถานีภาคพื้นดินในกรณีมีฝน	31
รูปที่ 24	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมเงยของอณุมิติสัญญาณรบกวนจากท้องฟ้า	32
รูปที่ 25	ค่าของอณุมิติสัญญาณรบกวนสายอากาศ	33
รูปที่ 26	อณุมิติสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ	34
รูปที่ 27	แสดงตำแหน่งการวัดของ C/N ₀	35
รูปที่ 28	รูปแสดงการวัด C/N ₀ ทางด้านขาขึ้น	36
รูปที่ 29	รูปแสดงการวัด C/N ₀ ทางด้านขาลง	37
รูปที่ 30	ระบบการเชื่อมโยงทั้งหมดที่จุดการทำงานเชิงเส้น	39
รูปที่ 31	การเชื่อมโยงทั้งหมดที่จุดการทำงานไม่เชิงเส้นที่มีการแทรกสอดของสัญญาณจากระบบอื่น	43
รูปที่ 32	การเชื่อมโยงทั้งหมดที่จุดการทำงานไม่เชิงเส้นที่มีการแทรกสอดของสัญญาณจากระบบอื่น	45
รูปที่ 33	คุณลักษณะของไอออนกำลังของทรานส์ปอนเดอร์บนดาวเทียม	46
รูปที่ 34	การแทรกสอดสัญญาณของดาวเทียมที่อยู่ใกล้กัน	51
รูปที่ 35	แสดงข้อกำหนดของ CCIR และ FEC ต่อรูปแบบของงานสายอากาศส่งสำหรับการใช้งานที่ดาวเทียมมีระยะห่างกัน 2 องศา	51
รูปที่ 36	มโนภาพของการแทรกสอดของทรานส์ปอนเดอร์ข้างเคียง	52
รูปที่ 37	การวัดสัญญาณทางด้านรับของผู้ใช้	54
รูปที่ 38	กราฟแสดงการเปรียบเทียบ S/N ของ FSK, PSK และ ASK	58
รูปที่ 39	โครงข่ายสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ค่าพลังงานเฉลี่ยกับความถี่สำหรับเสียงพูด	60
รูปที่ 41 การทดลองหาความชัดเจนของเสียงที่ถูกกรองโดย HPF และ LPF	61
รูปที่ 42 SCANNING RASTER	63
รูปที่ 43 การนำดาวเทียมมาใช้ประโยชน์การสื่อสารข้อมูลทางด้าน เศรษฐศาสตร์	64

บทที่

1. บทนำ	1
2. การวิเคราะห์การออกแบบระบบการเชื่อมต่อดาวเทียม	2
3. โปรแกรม	70
4. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่าการนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในงานการออกแบบทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย วิชาสัญญาณนี้ก็เป็นส่วนหนึ่งของงานออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ระบบการเชื่อมโยง (Link) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของระบบดาวเทียม ซึ่งผู้ควบคุมระบบดาวเทียมจำเป็นต้องรู้ว่าพารามิเตอร์ในระบบการเชื่อมโยงสื่อสารดาวเทียมนั้น มีอะไรบ้าง มีความสัมพันธ์กันอย่างไร บางครั้งการที่บริษัทหนึ่งไปซื้อระบบดาวเทียมมา บริษัทผู้ขายเองเขาไม่ได้ให้โปรแกรมสำหรับในการวิเคราะห์ระบบการเชื่อมโยงดาวเทียมมาด้วย วัตถุประสงค์ของวิชาสัญญาณนี้ได้มีการนำเสนอพารามิเตอร์ในระบบดาวเทียมมีอะไรบ้าง มีความสัมพันธ์กันอย่างไรและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบการเชื่อมโยงระบบสื่อสารดาวเทียม

โปรแกรมที่นำเสนอในปฏิญานี้สามารถนำไปช่วยออกแบบเชื่อมโยงระบบดาวเทียม เมื่อผู้ใช้ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะใช้ในการออกแบบระบบเชื่อมโยงโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าสิ่งที่เครื่องส่งทางด้านส่งส่งมา ในกรณีที่เรต้องการคงที่ขนาดของงานสายอากาศส่งหรือคำนวณหาขนาดของงานสายอากาศส่งในกรณีที่เรต้องการคงที่กำลังส่ง ซึ่งการหาค่าสิ่งที่ส่งหรือขนาดของงานส่งก็เพื่อให้ได้อัตราผิดพลาดบิต (BER) ตามที่ผู้รับต้องการ

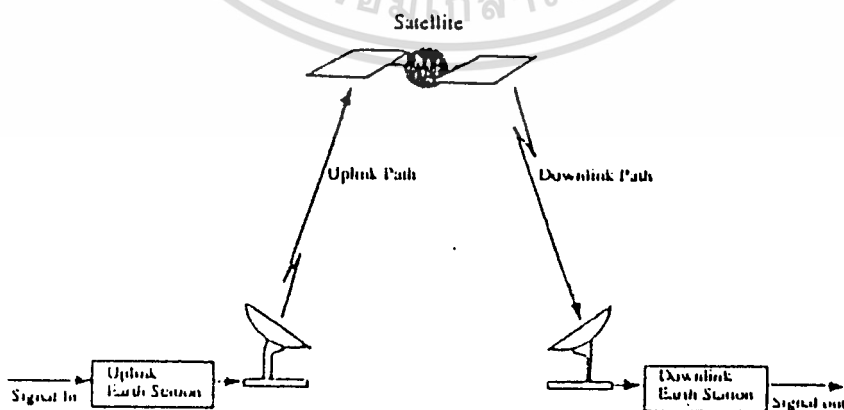
บทที่ 2

การวิเคราะห์การออกแบบระบบการเชื่อมโยงดาวเทียม

การออกแบบระบบการเชื่อมโยงระหว่างสถานีส่ง และสถานีรับในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เรามักจะใช้คำว่า Link budget ซึ่งหมายถึง การคำนวณออกแบบเพื่อให้ อัตราขยาย (gain) ของกำลังส่ง ต้องสมดุลกับการสูญเสียกำลังงานระหว่างการส่ง (transmission losses) และสัญญาณรบกวน (noise) ที่เกิดขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การเพิ่มอัตราขยายเพื่อชดเชยการสูญเสีย ซึ่งเปรียบเสมือนเงินงบประมาณ (financial budget) ที่รายได้ และรายจ่ายจะต้องสมดุลกัน อันจะทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีส่งและสถานีรับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.1 องค์ประกอบที่สำคัญในระบบการเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 1 แบ่งออกได้เป็น

- การเชื่อมโยงขาขึ้นจากสถานีภาคพื้นดิน (Uplink earth station)
- ช่วงขาขึ้นไปยังตัวดาวเทียม (Uplink path to the Satellite)
- ช่วงขาลงจากตัวดาวเทียม (Downlink path from the Satellite)
- การเชื่อมโยงขาลงเข้าสู่สถานีภาคพื้นดิน (Downlink earth Station)

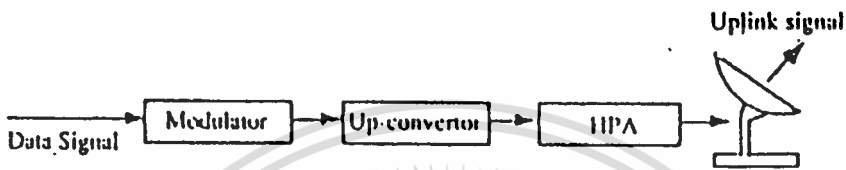


รูปที่ 1 แสดงการเชื่อมโยงระบบสื่อสารดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การเชื่อมโยงขาขึ้นจากสถานีภาคพื้นดิน

การเชื่อมโยงสถานีภาคพื้นดินประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 อุปกรณ์ของสถานีภาคพื้นดินทางด้านส่ง

โดยที่อุปกรณ์ของสถานีภาคพื้นดินหลักประกอบด้วย

ตัวมอดูเลเตอร์ (Modulator) จะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอะนาล็อก ความถี่ที่ส่งจากภาคดังกล่าวจะอยู่ในย่าน IF (Intermediate Frequency) นั่นคือ ที่ความถี่ 70 MHz หรือ 140 MHz แล้วแต่กรณี

อุปกรณ์ up-converter จะทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่จาก IF ให้เป็นความถี่ในย่าน C-band หรือ KU-band พร้อมกันนั้น ก็ขยายกำลังคลื่นพาหะความถี่สูงที่ได้ด้วยอุปกรณ์ High power Amplifier (HPA) แล้วจึงส่งออกจากจานสายอากาศไปยังดาวเทียมต่อไป

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการเชื่อมโยงขาขึ้น ได้แก่ ระดับของกำลังแรงของสัญญาณส่งที่ออกจากจานสายอากาศ เราเรียกกำลังส่งออกว่า EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) หรือกำลังส่งออกอย่างมีผล ซึ่งเป็นผลรวมของกำลังเครื่องส่ง (Signal Power) หรือขาเข้าจานสายอากาศ (P_T) กับการสูญเสียที่เกิดจากท่อนำคลื่นระหว่างเครื่องส่งถึงจานสายอากาศ (L_{F_T}) และอัตราเพิ่มกำลังของจานสายอากาศ (G_T) โดยที่อัตราเพิ่มกำลังของจานสายอากาศนี้เป็นการเปรียบเทียบกับกำลังที่ส่งจากจานสายอากาศเทียบกับกำลังที่ส่งของจานสายอากาศแบบมีทิศทางส่งรอบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนข้อมูลเพื่อการค้าเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

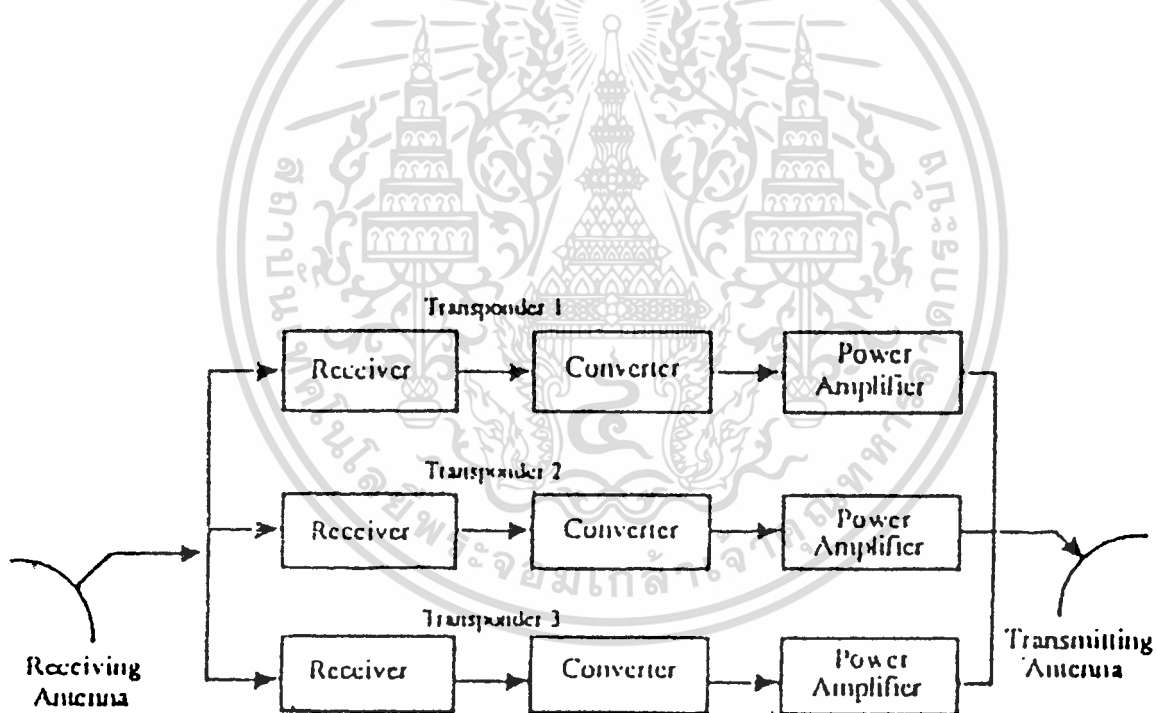
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ช่วงขาขึ้นไปยังตัวควเทียม

เป็นช่วงระหว่างทางออกของเสาอากาศของสถานีส่งกับทางเข้าของเสาอากาศทางด้านรับของควเทียม

2.1.3 ควเทียม

ควเทียมจะประกอบด้วย ทรานสปอนเดอร์หลาย ๆ ทรานสปอนเดอร์ โดย ทรานสปอนเดอร์นั้นจะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีภาคพื้นดินทางด้านขาขึ้น แล้วนำสัญญาณนั้นมาแปลงความถี่แล้วทำการขยายสัญญาณหลัก จากนั้นก็ส่งสัญญาณนั้นมาที่สถานีภาคพื้นดินทางด้านขาลง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของการสื่อสารควเทียม

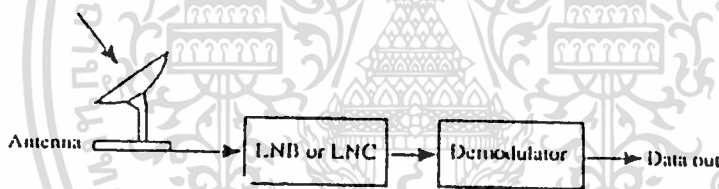
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ช่วงขาดจากดาวเทียม

เป็นช่วงระหว่างทางของสายอากาศทางด้านส่งของดาวเทียมกับทางเข้าของสายอากาศทางด้านรับของสถานีภาคพื้นดิน

2.1.5 การเชื่อมโยงขาดเข้าสถานีภาคพื้นดิน

ที่สถานีรับเราต้องทำกลับกับทางด้านส่ง กล่าวคือ เมื่อสัญญาณจากดาวเทียมรับได้ โดยจานสายอากาศรับก็จะนำคลื่นพาหะที่รับได้ผ่านเครื่องขยายสัญญาณแบบที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier) แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านอุปกรณ์ Down Converter ซึ่งจะเปลี่ยนคลื่นพาหะความถี่สูงพิเศษให้เป็นความถี่ที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป คือ 70 MHz แล้วแต่กรณี เพื่อส่งต่อไปให้อุปกรณ์ Demodulator ทำหน้าที่ดึงสัญญาณข่าวสารกลับมาจากคลื่นพาหะ



รูปที่ 4 สถานีภาคพื้นดินทางด้านรับ

2.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ระบบเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวเทียม มีดังนี้

2.2.1 กำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power :EIRP)

หมายถึง กำลังงานที่แพร่จากจานสายอากาศซึ่งเกิดจากกำลังงานส่งจริงของเครื่องส่งสัญญาณและอัตราทวีกำลังของจานสายอากาศ (Antenna Power Gain) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$EIRP = P_T G_T \tag{2.1}$$

EIRP = กำลังแผ่ประสิทธิภาพแบบไอโซทรอปิก [W]

P_T = กำลังงานของเครื่องส่งที่วัดด้านทางเข้าของสายอากาศ [W]

G_T = อัตราเพิ่มกำลังของจานสายอากาศส่ง

ถ้าเขียนอยู่ในรูปของ log จะได้

$$EIRP \text{ (dBW)} = P_T \text{ (dBW)} + G_T \text{ (dB}_i\text{)} \tag{2.2}$$

โดยที่

$$P_T = P_{TX} - L_{FT} \tag{2.3}$$

ดังนั้น

$$EIRP \text{ (dBW)} = P_{TX} - L_{FT} + G_T \tag{2.4}$$

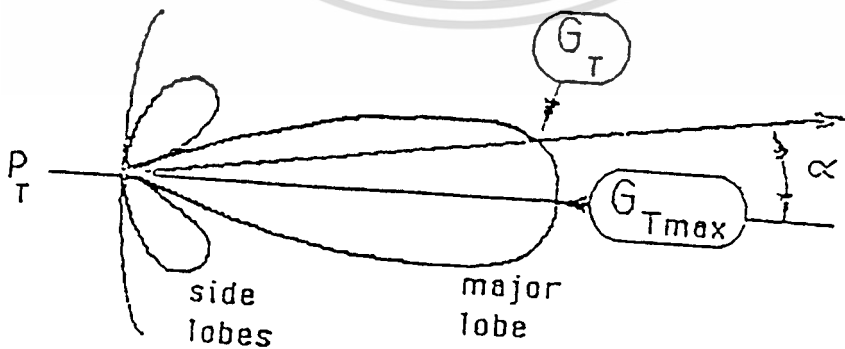
เมื่อ P_{TX} = กำลังงานทางด้านเอาต์พุตของเครื่องส่ง (dBW)

L_{FT} = ค่าการสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านส่ง (dB)

G_T = อัตราเพิ่มกำลังของจานสายอากาศส่ง (dB_i)

ค่าสูงสุดของ EIRP คือ จุดที่ทิศทางการกระจายคลื่นสูงสุด ($\alpha = 0$)

$$\text{MaxEIRP} = P_T G_{Tmax} \tag{2.5}$$



รูปที่ 5 แสดงค่าสูงสุดของ EIRP ในทิศทางการกระจายคลื่นสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ: โครงการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain : G)

มีความหมายว่า อัตราส่วนของกำลัง ต่อ 1 หน่วย สเตอเรเดียน ทางด้านรับที่แพร่กระจายโดยสายอากาศใด ๆ กับกำลังต่อ 1 หน่วย สเตอเรเดียน ทางด้านรับที่แพร่กระจายโดยสายอากาศแบบจุด ในทิศทางเดียวกัน ที่จุดเดียวกัน

ซึ่งอัตราขยายสูงสุดที่จุด boresight มีสมการ ดังนี้

$$G_{max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff} \quad (2.6)$$

เมื่อ

λ = ความยาวคลื่น ความถี่วิทยุ ($\lambda = c/f$)

A_{eff} = พื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศ

2.2.3 สายอากาศแบบตัวสะท้อน (Reflector Antenna)

$$A_{eff} = \eta A \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.8)$$

η = ประสิทธิภาพพอร์เจอร์ ($\eta = 0.6$)

ดังนั้น

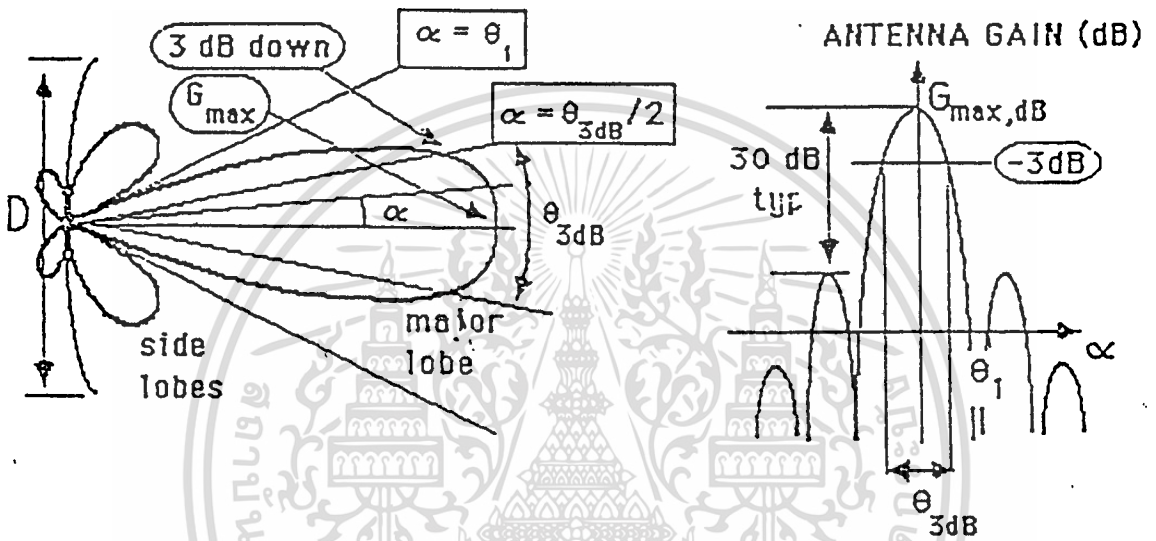
$$G_{max} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (2.9)$$

อัตราขยายในเรื่อของสายอากาศ จะหมายถึง ความสามารถในการส่ง หรือรับคลื่นของสายอากาศนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน (สายอากาศมาตรฐานที่ใช้ก็คือ สายอากาศไดโพล หรือแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด) เพราะสายอากาศเป็นอุปกรณ์พาสซีฟจึงไม่มีความสามารถในการขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศ (Antenna Radiation Pattern)

คือ อัตราการขยายที่แปรผันตามฟังก์ชันของมุม α ที่มีความสัมพันธ์กับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นกำลังสูงสุด (boresight)



รูปที่ 6 แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศ

ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half power Beamwidth) θ_{3dB} = เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโอบหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{องศา : degrees}) \quad (2.10)$$

เมื่อ λ = ความยาวคลื่น (เมตร)

D = ความกว้างของจานสายอากาศ (เมตร)

For small off-axis angle α :

$$G(\alpha)_{dB} = G_{max, dB} - 12(\alpha/\theta_{3dB})^2 \quad (2.11)$$

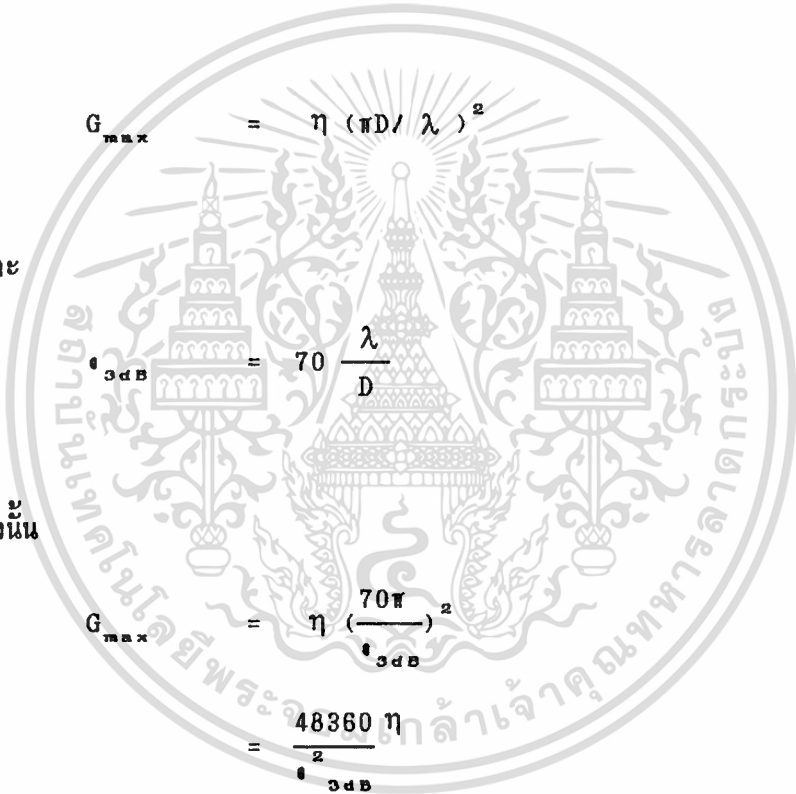
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } G_{\max, \text{dB}} &= 10 \log G_{\max} \\
 &= 10 \log [\eta (\pi D / \lambda)^2] \\
 &= 10 \log [\eta (\pi D / \lambda)^2] \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

2.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสายอากาศกับความกว้างลำ

(Antenna Gain Versus Beamwidth)

จาก



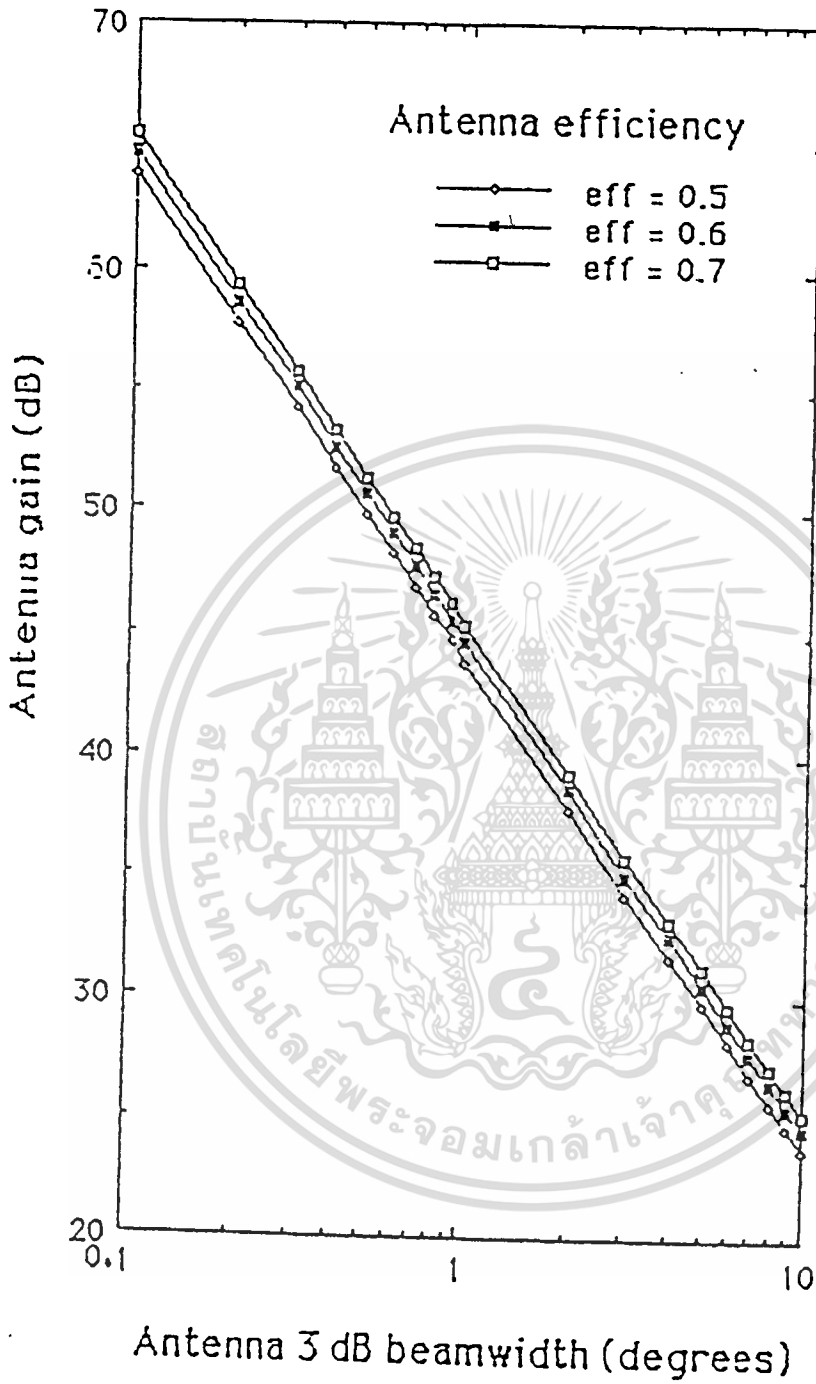
$$\begin{aligned}
 G_{\max} &= \eta (\pi D / \lambda)^2 \\
 \text{และ} & \\
 \theta_{3\text{dB}} &= 70 \frac{\lambda}{D} \\
 \text{ดังนั้น} & \\
 G_{\max} &= \eta \left(\frac{70\pi}{\theta_{3\text{dB}}} \right)^2 \\
 &= \frac{48360 \eta}{\theta_{3\text{dB}}^2} \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

2.2.6 ความหนาแน่นฟลักซ์กำลัง (Power flux density)

พื้นที่ผิวที่มีผลใช้สัญลักษณ์ คือ A ที่อยู่ห่างจากสายอากาศส่งเป็นระยะทางเท่ากับ R มีมุมตันที่มียอดอยู่ที่สายอากาศส่ง กำลังที่ได้รับ (receives a power) จะเท่ากับ

$$P_R = (P_T G_T / 4\pi) (A/R^2) = \phi A \text{ [W]} \quad (2.14)$$

ขนาด (magnitude) $\phi = P_T G_T / 4\pi R^2$ เรียกว่า Power flux density มีหน่วย W/m^2



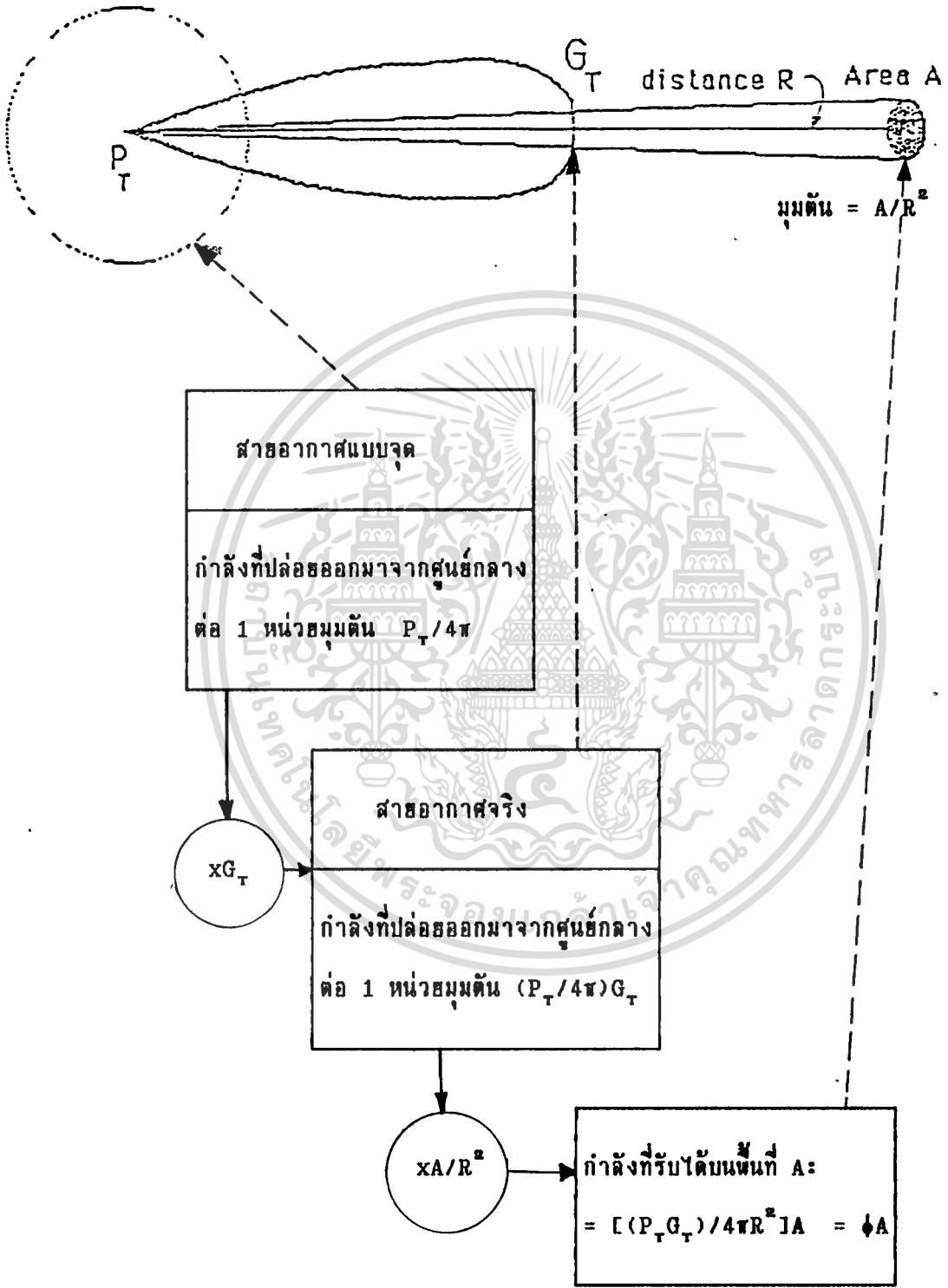
รูปที่ 7 อัตราขยายของสายอากาศในทิศทางของการแพร่กระจายสูงสุด

เป็นฟังก์ชันของความกว้างมุม θ_{3dB} สำหรับค่าของประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสาอากาศแบบจุด : $G_T = 1$

เสาอากาศในทางปฏิบัติ



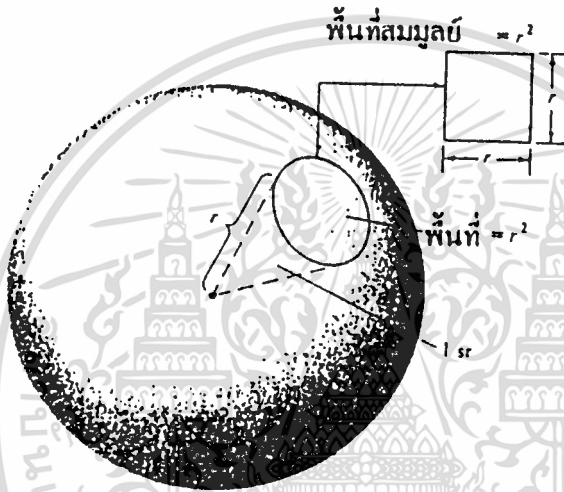
รูปที่ 8 ความหนาแน่นฟลักซ์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 สเตอเรเดียน (Steradian)

การวัดมุมตันมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี r มีค่าเท่ากับ $4\pi r^2$ ดังนั้น ตลอดทรงกลมจะมี $4\pi sr (4\pi r^2 / r^2)$

$$4\pi \text{ steradian} = 41000 \text{ (องศา)}^2$$



รูปที่ 9 รูปแสดงค่าจำกัดความของสเตอเรเดียน

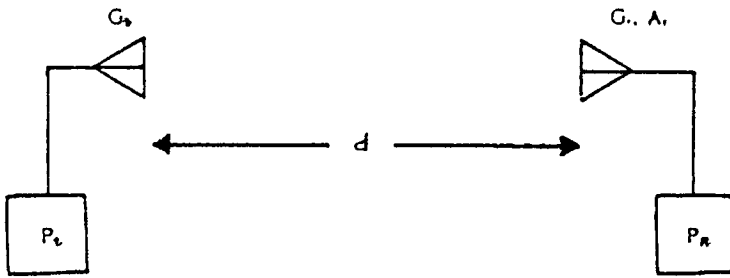
2.2.8 การสูญเสียในอวกาศว่าง (Free Space Loss)

การสูญเสียในอวกาศว่างนั้น เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นที่แพร่กระจายออกจากอวกาศ กระจายออกไปในมุมที่กว้าง ทำให้ความเข้มของกำลังคลื่นลดต่ำลงตามกฎกำลังสองผกผัน การหาค่าการสูญเสียในอวกาศว่างจะทำได้โดยการพิจารณาจากสูตรการส่งผ่านกำลังคลื่นของฟรีส (Friis transmission formula) ดังนี้ คือ ถ้าให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับมีอัตราขยายและพื้นที่ประสิทธิผลเป็น G_T, A_e และ G_R, A_e ตามลำดับ และระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองเป็น R กำลังส่งของเครื่องส่งเป็น P_T และความยาวคลื่นเป็นตามลำดับจากรูปที่ 10 เราสามารถคำนวณกำลังคลื่นที่สายอากาศรับได้ดังต่อไปนี้

ก่อนอื่นพิจารณาความเข้มของกำลังคลื่นตรงตำแหน่งสายอากาศรับ จะได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 ระบบส่งคลื่นผ่านบรรยากาศ

$$\frac{|E|^2}{Z_0} A_r = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \tag{2.15}$$

โดยที่ E เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้า ตรงตำแหน่งรับและ Z_0 เป็นอิมพีแดนซ์คลื่นในอากาศ สายอากาศรับจะสามารถรับกำลังคลื่นเข้ามาได้เท่ากับพื้นที่ประสิทธิผลคูณความเข้มของกำลังคลื่นตรงตำแหน่งนั้นและได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{|E|^2}{Z_0} A_r = \frac{|E|^2}{Z_0} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \\ &= P_T G_T \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 G_R \end{aligned} \tag{2.16}$$

ผลที่ได้จากสมการนี้ คือ สูตรการส่งผ่านกำลังคลื่นของฟรีส ซึ่งเป็นกรณีอุดมคติที่ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากสภาพสิ่งแวดล้อม ค่า $P_T G_T$ นี้มีชื่อเรียกทั่วไปว่ากำลังส่งประสิทธิผล หรือ EIRP (effective isotropically radiated power) ซึ่งหมายถึง การใช้สายอากาศที่มีอัตรายาย G_T จะเทียบเท่ากับการส่งด้วยกำลังคลื่น $P_T G_T$ ดังสายอากาศแบบไอโซทรอปิก สำหรับพจน์ $(4\pi d / \lambda)^2$ เป็นพจน์ที่เกิดจากการลู่อ้างออกของการกระจายคลื่นจากสายอากาศดังกล่าวข้างต้น พจน์นี้จะเกิดขึ้นเสมอไม่ว่าจะใช้สายอากาศที่มีอัตรายายสูงเพียงใด และจะเกิดขึ้นถึงแม้ตัวกลางที่ส่งผ่านคลื่นจะเป็นอวกาศว่าง กรณีที่สายอากาศส่ง

และสายอากาศรับมีอัตราขยายเป็น 1 เหมือนกัน เทอมนี้ก็จะแสดงอัตราส่วนระหว่าง P_r และ P_t ดังนั้นค่าการสูญเสียจากพจน์นี้จึงถูกเรียกว่าการสูญเสียในอวกาศว่าง และเขียนเป็นหน่วย dB ได้ดังนี้

$$|L_r| = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (2.17)$$

ค่าการสูญเสียในอวกาศว่างนี้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะทางไกลขึ้นและความถี่สูงขึ้น

2.2.9 การสูญเสียในอวกาศว่างกับความถี่และระยะทางสำหรับดาวเทียมแบบโคจรอยู่กับที่

(Free space loss Versus Frequency and Distanced for a geostationary Statellite)

การส่งสัญญาณไปในอวกาศนั้น จะเกิดการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการกระจายของสัญญาณในอวกาศ ซึ่งเกิดขึ้นทั้งด้านขาขึ้น (Uplink) และด้านขาลง (Down link) การสูญเสียกำลังงานนี้เรียกว่า Free Space loss ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียมากส่วนหนึ่งโดยหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L_{Frs} = (4\pi R / \lambda)^2 = (4\pi R_0 / \lambda)^2 (R/R_0)^2 \quad (2.18)$$

$$(R/R_0)^2 = 1 + 0.42 (1 - \cos l \cos L) \quad (2.19)$$

λ = ความยาวคลื่นวิทยุ มีหน่วยเป็นเมตร ซึ่งเท่ากับ c/f

R = ระยะทางจากดาวเทียมไปยังสถานีภาคพื้นดิน (๓)

R_0 = เป็นความสูงของดาวเทียม ซึ่งเท่ากับ 35,786 กิโลเมตร

l = เป็นตำแหน่ง Latitude ของสถานีภาคพื้นดิน

L = เป็นตำแหน่ง Longitude สัมพัทธ์ของสถานีภาคพื้นดินไปยังดาวเทียม

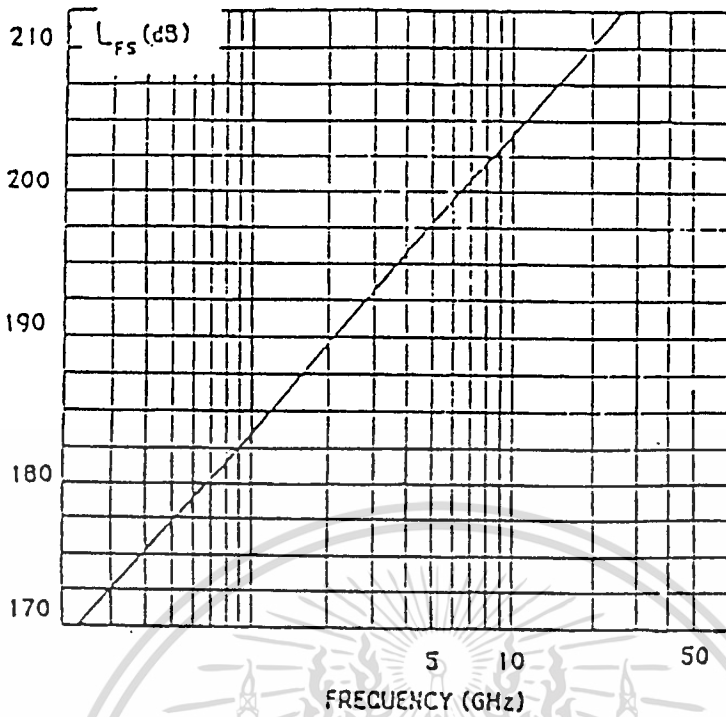
โดยทั่วไป ค่า $\left(\frac{R}{R_0} \right)^2 = 1$ ถึง 1.356 (0 ถึง 1.3 dB)

จากรูป ที่ความถี่ 6 GHz ค่าการสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านที่ว่างอิสระ

L_{Frs} (dB) มีค่าประมาณ 200 dB

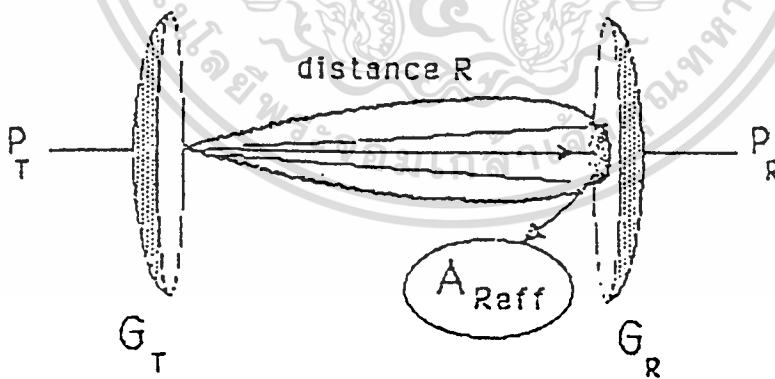
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 การลดทอนของอวกาศว่าง

2.2.10 กำลังสัญญาณที่รับได้ (Received signal Power: P_R)



รูปที่ 12 กำลังสัญญาณที่รับได้โดยสายอากาศทางด้านรับ

พื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศทางด้านรับที่ห่างจากสายอากาศทางด้านส่งเป็นระยะ

ทางเท่ากับ R จะหา กำลังที่รับได้จากสูตรดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_R = \phi A_{\text{rec}} = (P_T G_T) A_{\text{rec}} / 4\pi R^2 \quad [\text{W}] \quad (2.20)$$

P_R = กำลังที่รับได้ [W]

P_T = กำลังที่ส่งไปยังสายอากาศ [W]

G_T = อัตราขยายของสายอากาศทางด้านส่ง

A_{rec} = พื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศทางด้านรับ [m^2]

โดยที่ $A_{\text{rec}} = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi}$

ϕ = ความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ระยะทาง R [W/m^2]

โดยที่ $\phi = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2}$ (2.21)

ดังนั้น $P_R = (P_T G_T / 4\pi R^2) (\lambda^2 / 4\pi) G_R$
 $= (P_T G_T) (\lambda / 4\pi R)^2 G_R$
 $= (P_T G_T) (1/L_{FS}) G_R$ [W] (2.22)

เมื่อ L_{FS} คือ การสูญเสียในอวกาศว่าง

G_R คือ อัตราขยายของสายอากาศทางด้านรับ

R คือ ระยะทางระหว่างด้านส่งและด้านรับ

2.2.11 กำลังสัญญาณที่รับได้ในการเชื่อมโยงครั้งเดียว (One link only received power)

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหลีกเลี่ยงการสูญเสียเนื่องจากกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- การสูญเสียที่เกี่ยวเนื่องกับการลดทอนของคลื่นที่แพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศ
- การสูญเสียในเครื่องส่งและเครื่องรับ
- การสูญเสียกำลังเนื่องจากมุมติดตั้งคลาดเคลื่อนของจานสายอากาศ
- การสูญเสียจากการไม่เข้าคู่ของการโพลาริไซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.12 การสูญเสียในชั้นบรรยากาศ (Attenuation in the atmosphere)

สถานีดาวเทียมที่ติดตั้งในสถานที่ต่าง ๆ นั้น จะมีระยะทางห่างจากตัวดาวเทียมไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้การเดินทางของคลื่นต้องผ่านชั้นบรรยากาศที่ไม่เท่ากันด้วย เราอาจจะอธิบายการสูญเสียกำลังงานของสถานีแต่ละสถานีที่แตกต่างกันได้จากมุมเงยของจานสายอากาศ (Elevation Angle) ซึ่งสามารถบ่งบอกระยะทางที่คลื่นต้องเดินทางไปในบรรยากาศ ซึ่งจะส่งผลถึงการสูญเสียกำลังงานที่ไม่เท่ากันด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ความถี่ที่ใช้ในการส่งคลื่นจะมีผลต่อการสูญเสียกำลังงานในการส่งสัญญาณไปในชั้นบรรยากาศด้วยข้อมูลของการสูญเสียกำลังงานจากชั้นบรรยากาศนั้นจะเป็นข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการเก็บข้อมูลเป็นระยะ ๆ ซึ่งจะมีผลกับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ

การสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการดูดซับกำลังงานของชั้นบรรยากาศมีสาเหตุมาจาก

- โมเลกุล ของออกซิเจนในชั้นบรรยากาศ
- ไอน้ำ ในชั้นบรรยากาศ
- ฝน
- ปริมาณ เมฆและหมอก
- หิมะ
- ประจุเล็กตรอนอิสระในชั้นบรรยากาศ เป็นต้น

การสูญเสียที่เพิ่มขึ้น (Additional loss : L_A)

มีสูตรว่า

$$L_A = A_{AO} A_{rain} \quad (2.23)$$

เมื่อ

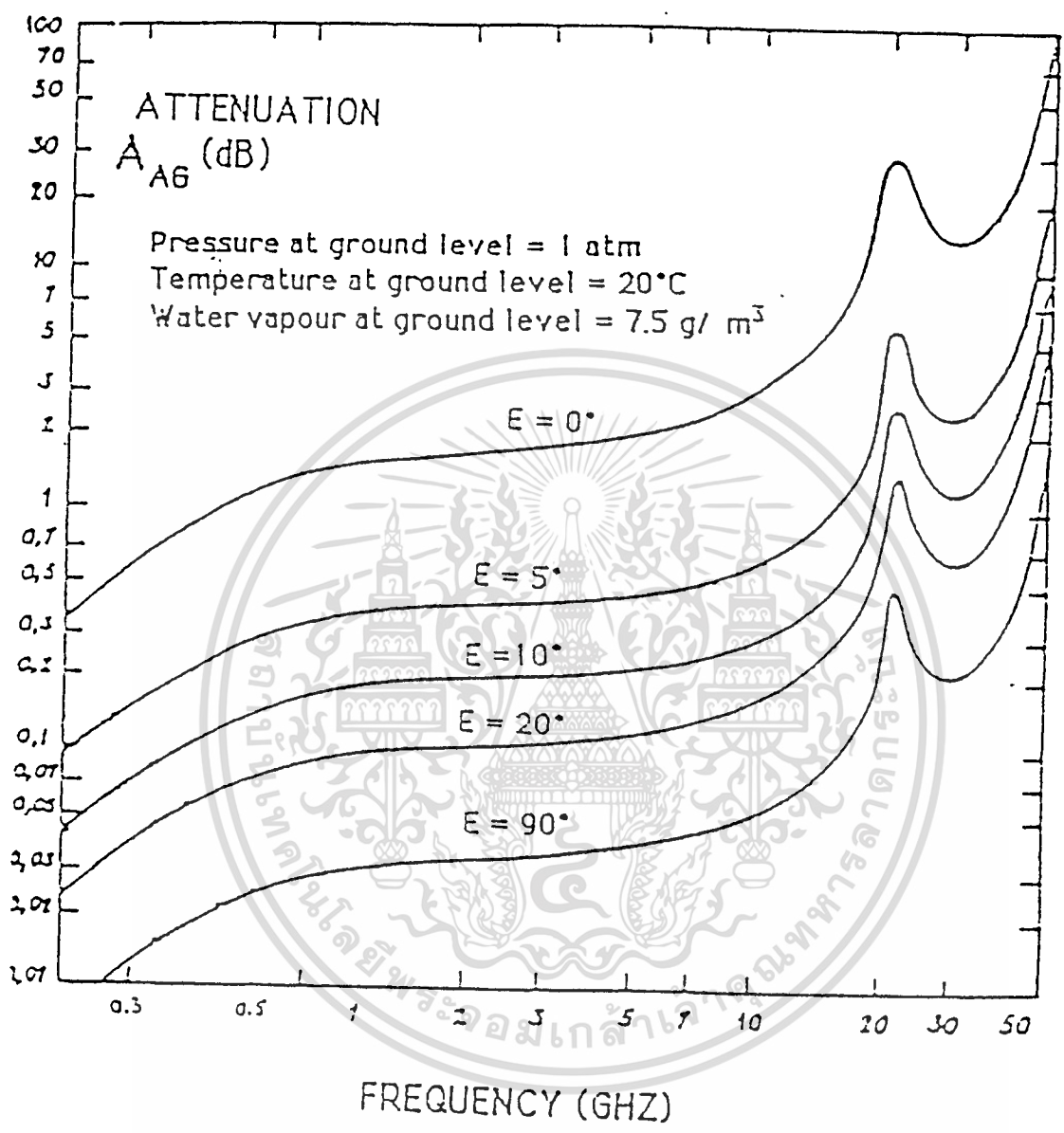
A_{AO} เป็นการลดทอน (attenuation) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแก๊ส (gases) ในชั้นบรรยากาศ

A_{rain} เป็นการลดทอนเนื่องจากฝนและเมฆ

การลดทอนเนื่องจากแก๊ส (gases) ในชั้นบรรยากาศสัมพันธ์กับความถี่และมุมเงย

ดังแสดงในรูปที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง A_{AG} กับความถี่

ซึ่งเราสามารถนำเอา L_A ไปรวมกับ L_{FS} จะได้

$$L = L_{FS} L_A \tag{2.24}$$

โดยที่ $L = \text{Path loss}$

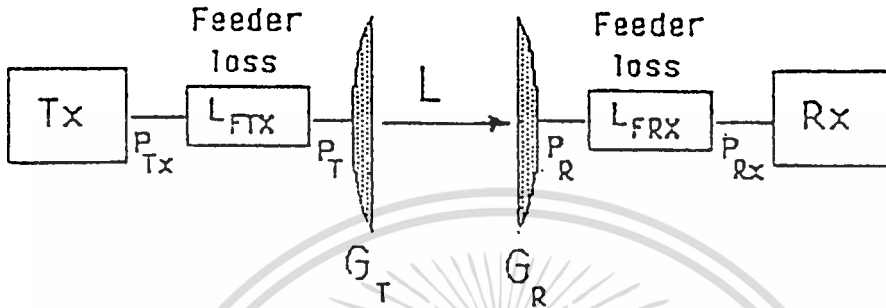
ดังนั้น $P_R = (P_T G_T) G_R / L \tag{2.25}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.2.13 การสูญเสียในเครื่องส่งและเครื่องรับ

(Loss in the transmitting and receiving equipment)



รูปที่ 14 การสูญเสียในอุปกรณ์ปลายทาง

- L_{FTX} เป็นการสูญเสียระหว่างเครื่องส่งและสายอากาศ ถ้าเราให้ P_T คือ กำลังที่ทางเข้าของสายอากาศ และ P_{TX} คือ กำลังที่ทางค่านออกของ transmission Amplifier ดังนั้น

$$P_{TX} = P_T L_{FTX} \quad [W] \quad (2.26)$$

EIRP ในเทอมกำลังของ transmission amplifier เขียนได้ดังนี้

$$EIRP = P_T G_T = (P_{TX} G_T) / L_{FTX} \quad [W] \quad (2.27)$$

- L_{FRX} เป็นการสูญเสียระหว่างสายอากาศและเครื่องรับกำลังสัญญาณ P_{RX} ที่ทางเข้าของเครื่องรับมีค่าเท่ากับ

$$P_{RX} = P_R / L_{FRX} \quad [W] \quad (2.28)$$

2.2.14 การสูญเสียกำลังเนื่องจากมุมติดตั้งคลาดเคลื่อนของจานสายอากาศ

(Losses due to imperfect alignment of the antennas)

จากรูป เป็นการแสดงการคลาดเคลื่อนของจานสายอากาศในทิศทาง $T_x - R_x$

ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการคลาดเคลื่อนของจานสายอากาศขึ้นที่อัตราภา

นของสายอากาศ ซึ่งการสูญเสียนี้เป็นฟังก์ชันของมุมคลาดเคลื่อนของการส่ง (α_T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

036989

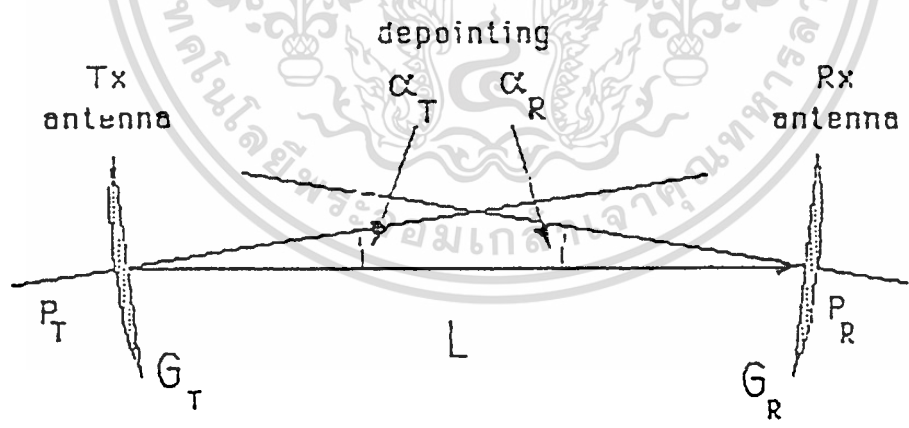
และการรับ (α_R) โดยที่การสูญเสียเนื่องจากการคลาดเคลื่อนทางด้านส่ง เราให้สัญลักษณ์ว่า L_T ส่วนการสูญเสียเนื่องจากการคลาดเคลื่อนของด้านรับ เราให้สัญลักษณ์ว่า L_R ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L_T = 12(\alpha_T / \theta_{3dB})^2 \quad [dB] \quad (2.31)$$

$$L_R = 12(\alpha_R / \theta_{3dB})^2 \quad [dB] \quad (2.32)$$

- โดยที่ L_T = การสูญเสียเนื่องจากการคลาดเคลื่อนของงานสายอากาศทางด้านส่ง
- L_R = การสูญเสียเนื่องจากการคลาดเคลื่อนของงานสายอากาศทางด้านรับ
- α_T = เป็นมุมคลาดเคลื่อนของงานสายอากาศทางด้านส่ง
- α_R = เป็นมุมคลาดเคลื่อนของงานสายอากาศทางด้านรับ
- θ_{3dB} = เป็นมุมกวาด (beam width) ของงานสายอากาศที่จุด ครึ่งกำลัง มี

หน่วยเป็นองศา



รูปที่ 15 แสดงการคลาดเคลื่อนของงานสายอากาศในทิศทาง $T_x - R_x$

พิจารณาค่าของอัตราขยายของสายอากาศในทิศทาง $T_x - R_x$ direction

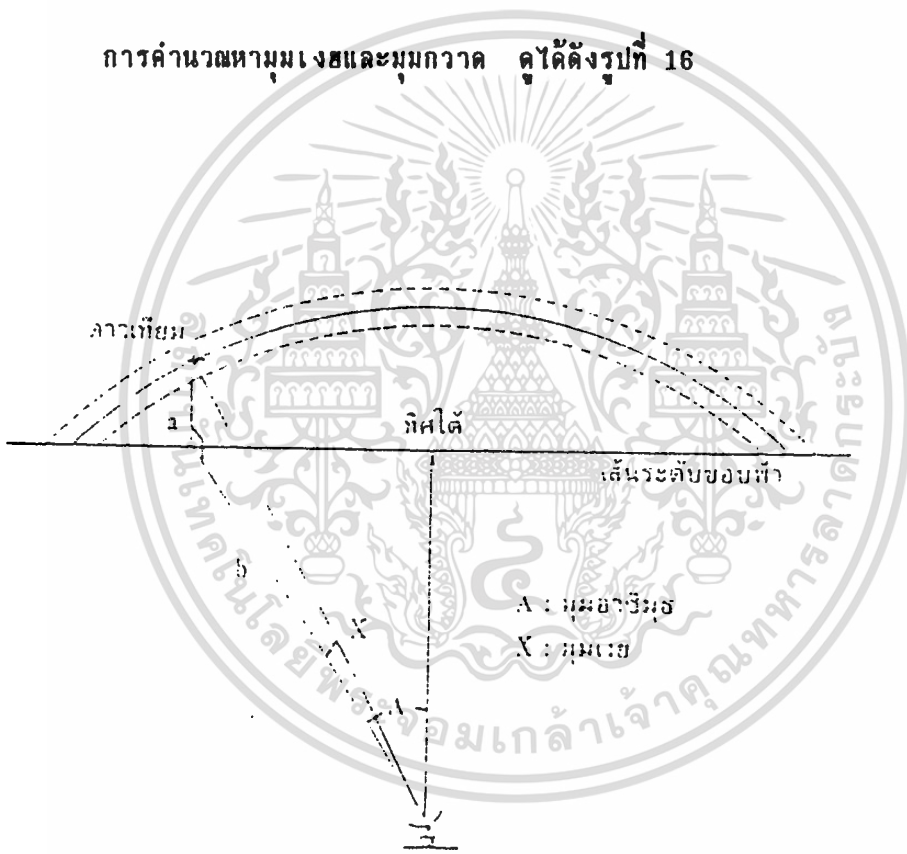
$$G_T = G_{Tmax} / L_T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.15 มุมกวาดและมุมเงย (Azimuth And Elavation Angle)

มุมกวาดหรือมุมอาซิมุท และมุมเงยหรือมุมเอลิเวชัน คือ องค์ประกอบพื้นฐานร่วมที่ใช้ในการพิจารณาตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวงที่อยู่บนท้องฟ้า โดยมีมุมกวาดเป็นตัวบอกทิศทางของดาวเทียมจากตำแหน่งของเราที่ยืนอยู่ ส่วนมุมเงยนั้นจะเป็นมุมซึ่งจากรับสัญญาณแห่งหน้าขึ้นไปหาดาวเทียม ดาวเทียมทุกดวงจะมีค่าของมุมกวาดและมุมเงยในแต่ละพื้นที่ที่จะติดตั้งจานรับสัญญาณของมันโดยเฉพาะ

การคำนวณหามุมเงยและมุมกวาด คูได้ดังรูปที่ 16



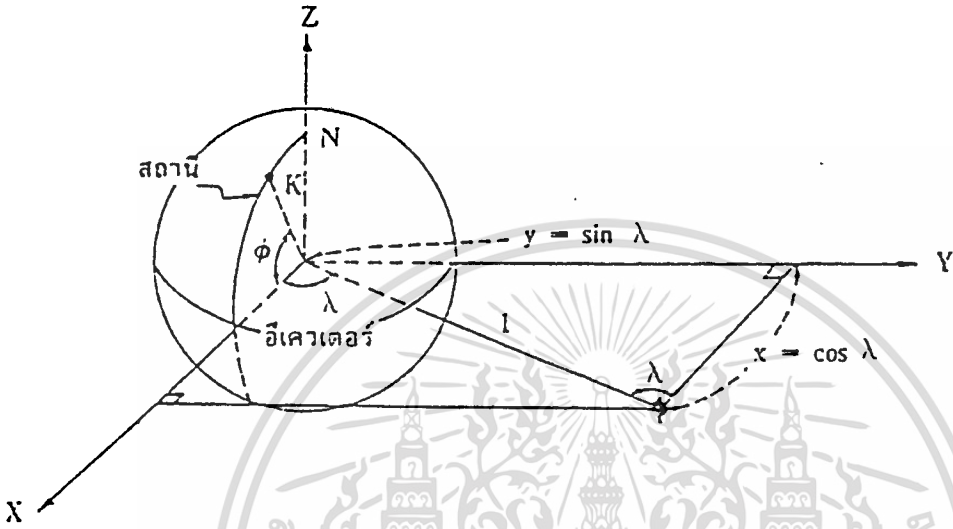
รูปที่ 16 มุมเงยและมุมกวาด

จากรูป เส้นอีโคเดออร์ และตัวดาวเทียมอยู่บนแนวระนาบ x-y ฐานเสาอากาศรับสัญญาณจากดาวเทียมอยู่แนวระนาบ x-z ค่า ϕ เป็นค่าเส้นรุ้งของตำแหน่งที่ตั้งจานเสาอากาศ ให้ K เป็นอัตราส่วนระหว่างรัศมีของโลกกับรัศมีวงโคจรของดาวเทียม ซึ่งจะได้ค่า K เท่ากับ

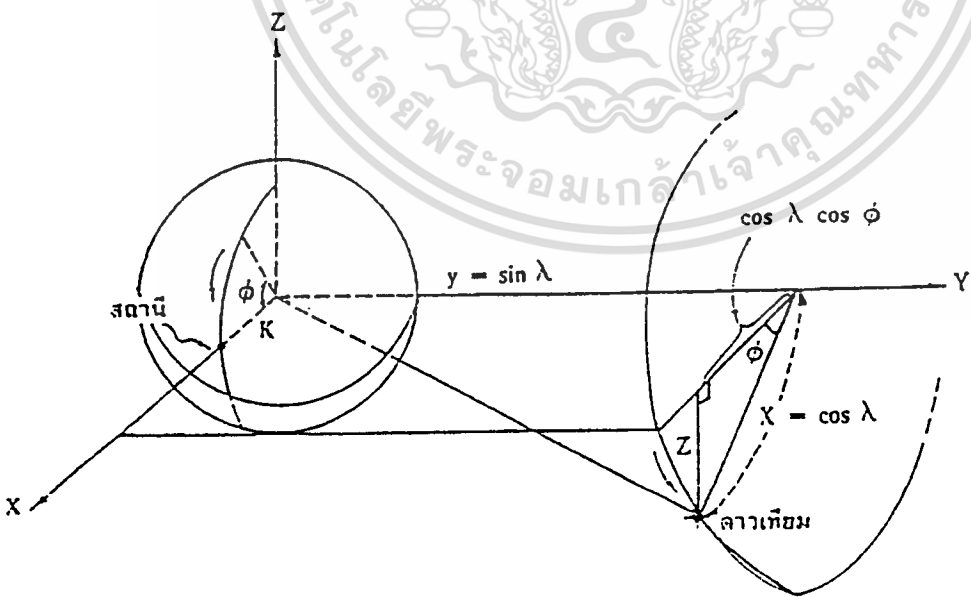
$$K = 6370 \times 10^3 / (6370 \times 35860 \times 10^3) = 0.15084$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

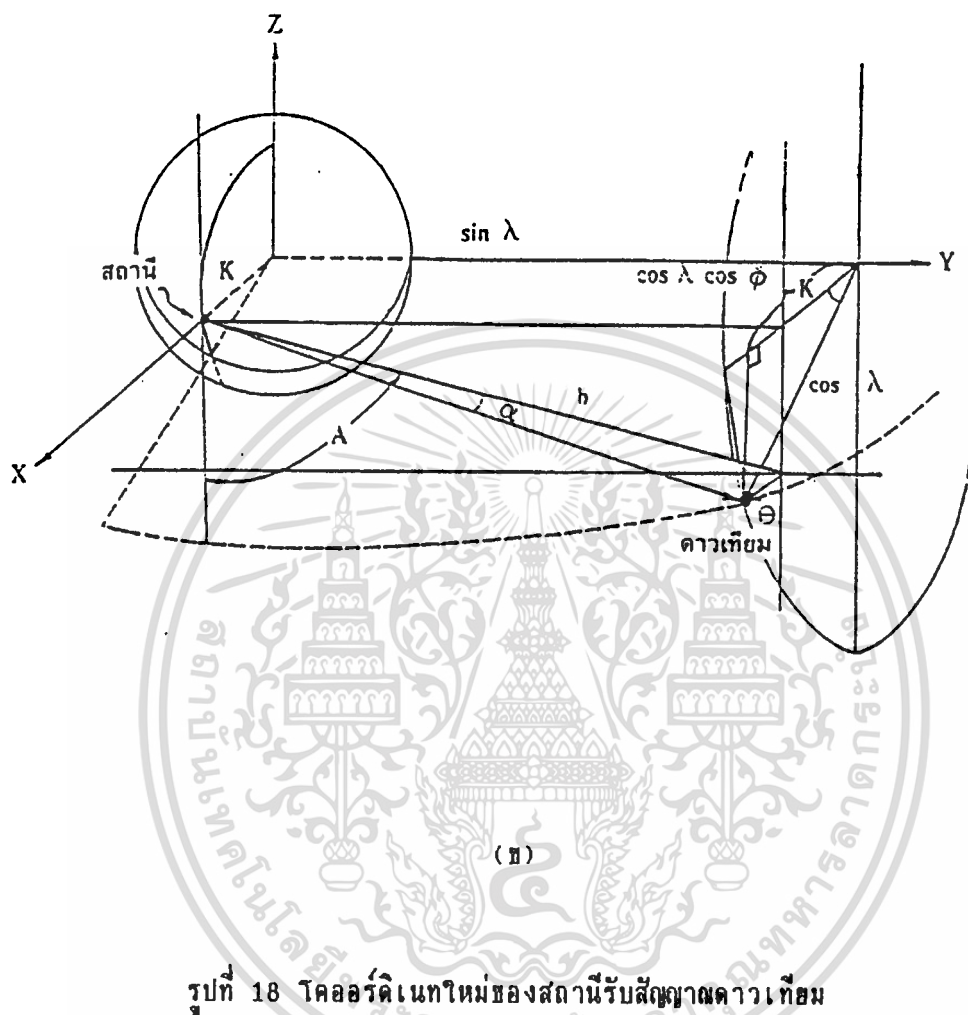
สมมติให้ระยะทางจากใจกลางของโลกไปยังดาวเทียมนี้อาจเท่ากับ 1 รัศมีของโลก จะสามารถเขียนได้ในรูปเท่ากับ K และให้ λ เป็นความแตกต่างของเส้นแวงระหว่างจุดที่ตั้งจาน สายอากาศและดาวเทียม



รูปที่ 17 โคออร์ดิเนตของสถานีรับสัญญาณดาวเทียม



(ก)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 โคออร์ดิเนตใหม่ของสถานีรับสัญญาณดาวเทียม

เราสามารถแสดงโคออร์ดิเนตของจุดที่ตั้งงานสายอากาศและดาวเทียมได้ดังนี้

โคออร์ดิเนตของจุดที่ตั้งงานสายอากาศ : $(K \cos \phi, 0, K \sin \phi)$

โคออร์ดิเนตของดาวเทียม : $(\cos \lambda, \sin \lambda, 0)$

ต่อไปถ้าเราหมุนโลกไปเป็นมุม ϕ ทางระนาบ X-Z ดังนั้นจากรูปที่ 17 เขียนได้เป็นรูปที่ 18 ซึ่งตำแหน่งที่ตั้งของงานสายอากาศจะมีโคออร์ดิเนตบนแกน X ทางเดียว

โคออร์ดิเนตใหม่ของจุดที่ตั้งงานสายอากาศ : $(k, 0, 0)$

โคออร์ดิเนตใหม่ของดาวเทียม : $(\cos \lambda \cos \phi, \sin \lambda, \cos \lambda \sin \phi)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นประโยชน์หรือประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 18 ระนาบที่สัมผัสโลกตรงจุดที่ตั้งงานสายอากาศจะขนานกับระนาบ $y-z$ ดังนั้นมุมเงยและมุมอาซิมุทจากงานสายอากาศหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มุมเงย} : \tan &= \frac{a}{b} = \frac{\cos \lambda \cos \phi - 0.1508}{\sqrt{\sin^2 \lambda + \cos^2 \lambda \sin^2 \phi}} \\ &= \frac{\cos \lambda \cos \phi - 0.1508}{\sqrt{1 - \cos^2 \lambda \cos^2 \phi}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มุมอาซิมุท} : \tan A &= \frac{Y \text{ โคออร์ดิเนทของดาวเทียม}}{- (Z \text{ โคออร์ดิเนทของดาวเทียม})} \\ &= \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda \sin \phi} \\ &= \frac{\tan \lambda}{\sin \phi} \end{aligned}$$

2.2.16 ต้นกำเนิดของสัญญาณรบกวน (Origin of noise)

สัญญาณรบกวน (noise) คือ สัญญาณที่ปราศจากการบรรจุข่าวสาร ซึ่งมันจะแทรกอยู่กับสัญญาณ (useful signal) ซึ่งจะทำให้เครื่องรับมีประสิทธิผลลดลงในการแยกเอาข่าวสารออกจากสัญญาณคลื่นพาห์

ต้นกำเนิดของสัญญาณรบกวน มีดังนี้

1. การแพร่กระจายของสัญญาณที่เราไม่ต้องการจากตัวแพร่กระจายที่เป็นแหล่งกำเนิดโคสมิครวมชาติ ซึ่งอยู่ในบริเวณที่งานสายอากาศสามารถรับสัญญาณเข้าไปได้

- สายอากาศดาวเทียม : โลก, แกะเล็กขึ้นและแหล่งกำเนิดคอสมิก
- สายอากาศภาคพื้นดิน : ก๊าซจากชั้นบรรยากาศ, ฝน, พื้นดิน (ในกรณีที่มีมุมเงยเล็ก)

2. สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องรับ
3. การแทรกสอดจากเครื่องส่งอื่น ๆ

คุณลักษณะของสัญญาณรบกวน (noise characterisation)

ความหนาแน่นของกำลังสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัม : N_o (W/Hz)

สัญญาณรบกวนในระบบดาวเทียมนั้นเราคิดว่าเป็น white noise ซึ่งมีความหนาแน่นของกำลังเท่ากับ N_o ตลอดทุก ๆ ความถี่และกำลังงานของสัญญาณรบกวนที่รับได้ที่สถานีรับนั้นจะแปรผันตรงกับแถบกว้างความถี่ (Band width) ของคลื่นพาห์ ซึ่งเรากำหนดโดยสมมติกำลังงานของสัญญาณรบกวนจะมีค่ามากหรือน้อยในรูปแบบที่เรียกว่าอุณหภูมิรบกวนได้ง่าย ๆ ในทางปฏิบัติโดยสมการ

$$N = kTB \quad [W] \quad (2.35)$$

หรือถ้าเราทำการนอร์มอลไลซ์โดยให้แบนด์วิธเท่ากับ 1 Hz จะได้

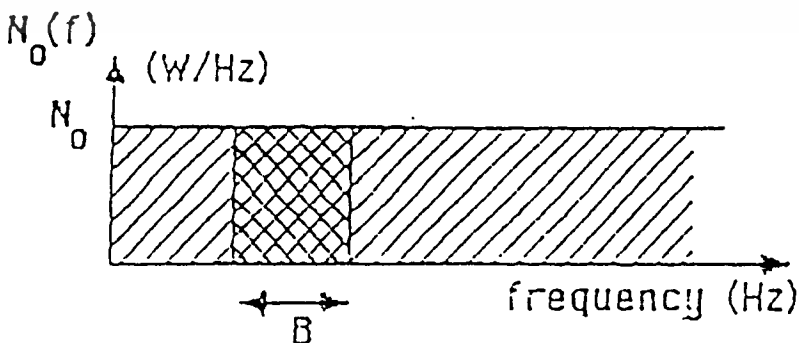
$$N_o = kT = N/B \quad [W/Hz] \quad (2.36)$$

โดย N_o = ความหนาแน่นของกำลังสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัม

N = กำลังสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัม

k = Boltzmann's constant = 1.38×10^{-23} W/HzK

T = อุณหภูมิของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 19 ความหนาแน่นของกำลังสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัม

2.2.17 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure)

ตัวต้านทาน R ซึ่งมีการสูญเสีย Ohmic loss ในตัวมันเองวางอยู่ในอุณหภูมิห้อง T_0 (K) จะผลิตกำลังสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (thermal noise power) E_n คร่อมตัวต้านทานนั้น มีสมการดังต่อไปนี้

$$E_n^2 = 4k T_0 BR \quad (2.37)$$

เมื่อ k คือ Boltzmann's constant

B คือ แบนด์วิทด์ (Hz)

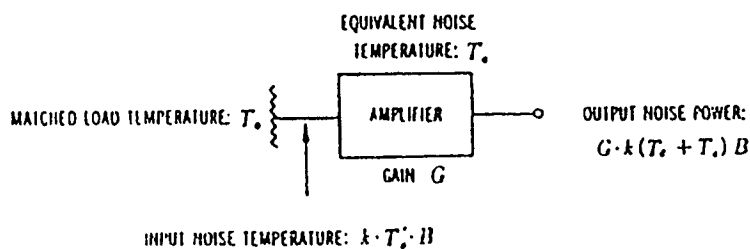
ถ้าแอมป์ซึ่งโหลดถูกต้องกับตัวต้นกำเนิดกำลังมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (e.m.f) เป็น E_n และมีอิมพีแดนซ์ภายในเป็น R ดังนั้นจะเกิดกำลังงานสูงสุด ค่า $E_n^2/4R$ เกิดขึ้นคร่อมโหลด เพราะฉะนั้นกำลังงานของเสียงรบกวนที่เกิดจากการแอมป์ซึ่งโหลดจะเป็น $k T_0 B$

เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ขยายสัญญาณปกติแล้ว จะแสดงอยู่ในรูปของตัวเลขสัญญาณรบกวน (noise figure) F ซึ่งกำหนดโดยอัตราส่วนของสัญญาณต่อเสียงรบกวนทางด้านทางเข้าต่ออัตราส่วนของสัญญาณต่อเสียงรบกวนทางด้านทางออก ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{noise figure } F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad (2.38)$$

S_i, S_o คือ สัญญาณทางด้านทางเข้า, ทางออก

N_i, N_o คือ เสียงรบกวนทางด้านทางเข้า, ทางออก



รูปที่ 20 ตัวเลขสัญญาณรบกวนของระบบทางด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 20 กำลังสัญญาณรบกวนที่ทางด้านทางออกของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ คือ ผลรวมของสัญญาณรบกวนทางด้านขาเข้า และสัญญาณรบกวนภายในในตัวอุปกรณ์ขยายสัญญาณ อย่างไรก็ตาม โดยการเปลี่ยนสัญญาณรบกวนภายในในตัวอุปกรณ์ของสัญญาณไปเป็นสัญญาณรบกวนทางขาเข้าของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ และโดยการทำให้สัญญาณรบกวนนี้มีค่าเท่ากับสัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นโดยแมชชีนโพลด์ที่อุณหภูมิห้อง T_0 ตัวเลขสัญญาณรบกวนที่สร้างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณสามารถแสดงอยู่ในเทอมของ T_0 ซึ่ง T_0 นี้เรียกว่า อุณหภูมิสมมูลแทนสัญญาณรบกวน (equivalent noise temperature) ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ดังนั้น เราสามารถเขียนตัวเลขสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิสมมูลแทนสัญญาณรบกวนได้ดังสมการต่อไปนี้

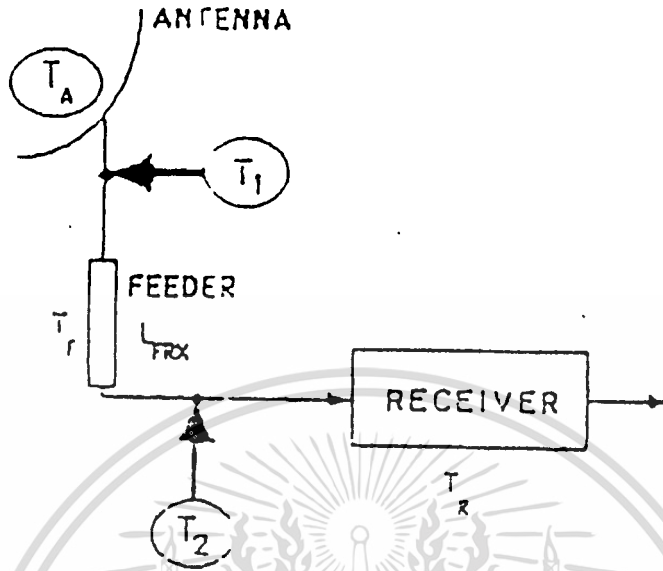
$$\begin{aligned}
 F &= \frac{S_1 / N_1}{GS_1 / (kT_0 B + kT_0 B)} \\
 &= \frac{Gk(T_0 + T_e) B}{GkT_0 B} \\
 &= 1 + \frac{T_e}{T_0}
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

2.2.18 อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบ (System noise temperature)

พิจารณาอุปกรณ์ที่ภาครับดังรูปที่ 21 อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบจะกำหนดที่จุด 2 จุด ดังนี้

1. ที่ทางออกของสายอากาศ (T_1)
2. ที่ทางเข้าของเครื่องรับ (T_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 ระบบทางด้านรับ

อุณหภูมิสัญญาณรบกวน T_1 ที่ทางออกของสายอากาศ คือ ผลรวมของอุณหภูมิสัญญาณรบกวนของสายอากาศ T_A และอุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบส่งที่ประกอบด้วยอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเชื่อมต่อ (Connection) และอุณหภูมิสัญญาณรบกวนของเครื่องรับที่ต่อในลักษณะเรียงกัน (Cascade)

สมการอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อมีดังนี้

$$T_o = (L_{FRX} - 1) T_F \quad [K] \quad (2.40)$$

และสมการของระบบส่ง คือ

$$(L_{FRX} - 1) T_F + T_R / G_{FRX} \quad [K] \quad (2.41)$$

ดังนั้น สมการอุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบที่ทางออกของสายอากาศ คือ

$$T_1 = T_A + (L_{FRX} - 1) T_F + T_R / G_{FRX} \quad [K] \quad (2.42)$$

พิจารณาที่ทางเข้าของเครื่องรับ ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้จะต้องถูกลดทอนโดยตัวประกอบ L_{FRX} ดังนั้น สมการอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่ทางเข้าของเครื่องรับ มีดังนี้

$$T_{SYS} = T_e = T_1/L_{FRX} = T_A/L_{FRX} + (1-1/L_{FRX}) + T_R \quad [K] \quad (2.43)$$

เมื่อ T_A = อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของสายอากาศ

T_e = อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบ

T_1 = อุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่ทางออกสายอากาศ

T_R = อุณหภูมิห้อง

L_{FRX} = การสูญเสียกำลังของตัวป้อน (Feeder)

T_R = อุณหภูมิประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนที่ทางเข้าของเครื่องรับ

จะเห็นได้ว่า T_{SYS} นั้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน 3 แหล่ง คือ

1. สัญญาณรบกวนจากสายอากาศ
2. สัญญาณรบกวนที่ผลิตโดยตัวป้อน (Feeder)
3. สัญญาณรบกวนที่ผลิตโดยอุปกรณ์ภายในเครื่องรับ

2.2.19 อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศ

มี 2 กรณีที่ต้องพิจารณา

1. อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศดาวเทียม (ทางด้านขาขึ้น)
2. อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศสถานีภาคพื้นดิน (ทางด้านขาลง)

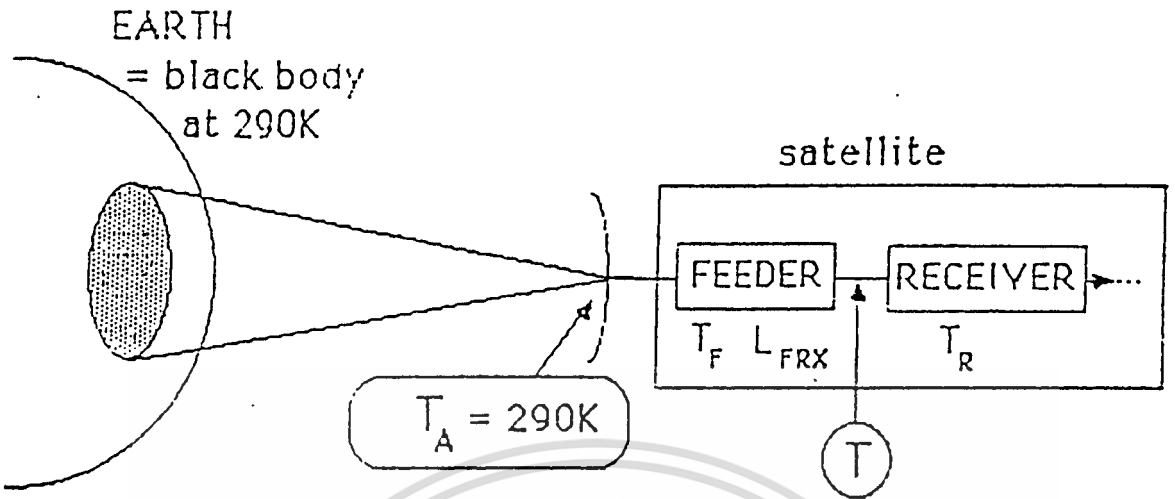
อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศดาวเทียม (T_A)_{SL}

อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศที่รับได้โดยสายอากาศของดาวเทียมนั้น เป็นสัญญาณรบกวนจากโลก และจากภายนอกอวกาศ โดยการคิดเฉลี่ยอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากโลกจะ

ประมาณ 290 K และอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากภายนอกอวกาศจะประมาณ 5K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

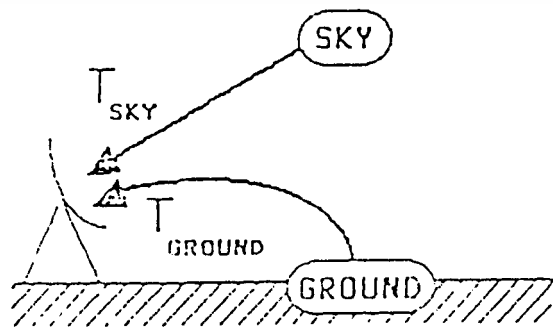
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 รูปอุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศดาวเทียม

อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศสถานีภาคพื้นดิน (T_A)_{ES}

อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศที่รับได้โดยสายอากาศของสถานีภาคพื้นดินนั้น เป็นสัญญาณรบกวนจากท้องฟ้า (Sky) และจากพื้นดิน (Ground) ดังรูปที่ 23 ในกรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใส (Clear Sky)



รูปที่ 23 (a) อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของสถานีภาคพื้นดินในกรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปไซ้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

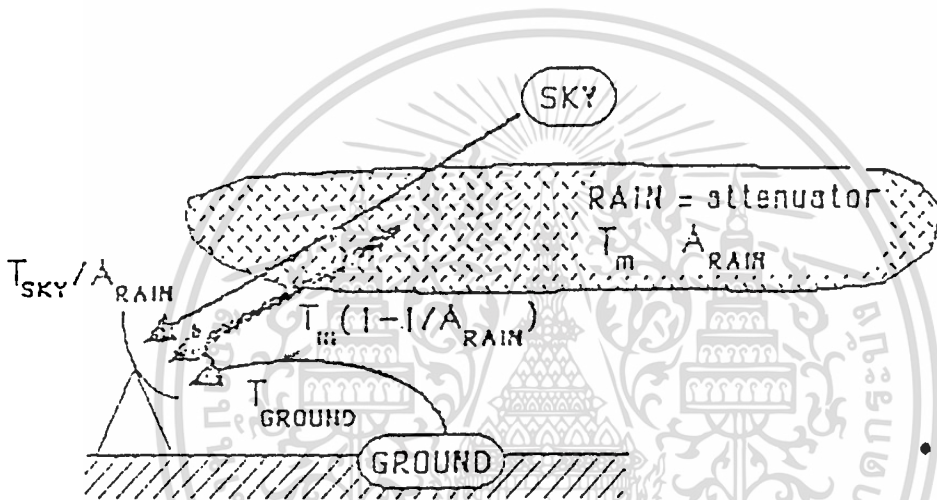
$$T_A = T_{\text{SKY}} + T_{\text{GROUND}} \quad (2.44)$$

เมื่อ

T_{SKY} = อุณหภูมิสัมพัทธ์รบกวนจากท้องฟ้าในขณะที่ท้องฟ้าแจ่มใส

T_{GROUND} = อุณหภูมิสัมพัทธ์รบกวนจากพื้นดิน

ในกรณีที่มีฝน (Rain)



รูปที่ 23 (b) อุณหภูมิสัมพัทธ์รบกวนของสถานีภาคพื้นดินในกรณีมีฝน

$$T_A = T_{\text{SKY}}/A_{\text{RAIN}} + T_m(1 - 1/A_{\text{RAIN}}) + T_{\text{GROUND}} \quad (2.45)$$

เมื่อ

A_{RAIN} = การลดทอนเนื่องจากฝน, เมฆหมอกและก๊าซจากชั้นบรรยากาศตามแกนเมเน็ิม

T_m = อุณหภูมิตัวกลางที่มีผลเนื่องจากฝน, เมฆหมอกและก๊าซจากชั้นบรรยากาศ

$= 1.12 T_{\text{AMB}}(K) - 50$; T_{AMB} คืออุณหภูมิโดยรอบของสถานีภาคพื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น, กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

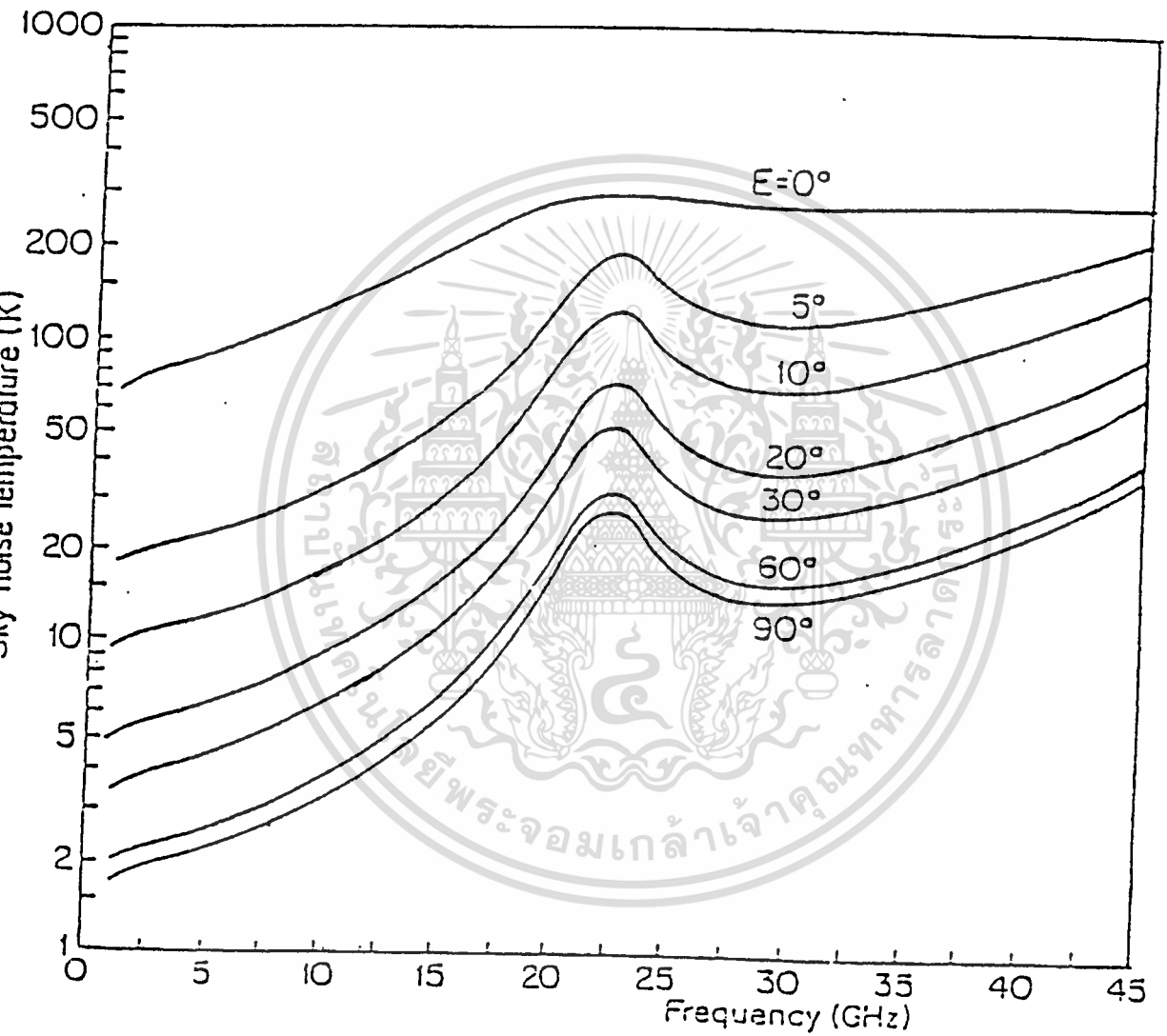
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.20 อุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากท้องฟ้าในขณะที่ท้องฟ้าแจ่มใส

(Clear sky noise temperature)

อุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากท้องฟ้าในขณะที่ท้องฟ้าแจ่มใสนั้นขึ้นอยู่กับค่าของความถี่กับ

มุมเงย ดังรูปที่ 24



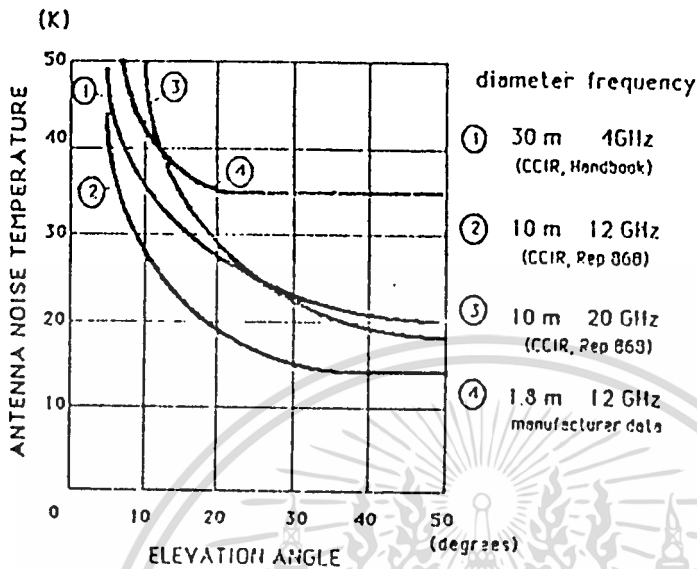
รูปที่ 24 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมเงยของอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากท้องฟ้า

รูปที่ 25 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากสสารอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับ

มุมเงยกับชนิดของสสารอากาศที่ความถี่แตกต่างกันในสภาวะท้องฟ้าแจ่มใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 25 ค่าของอุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศ T_A เป็นฟังก์ชันของมุมเงย E เส้นโค้งที่ 1: เส้นผ่าศูนย์กลาง = 30 ม ความถี่ 4 GHz เส้นโค้งที่ 2: เส้นผ่าศูนย์กลาง = 10 ม ความถี่ 12 GHz เส้นโค้งที่ 3: เส้นผ่าศูนย์กลาง = 10 ม ความถี่ = 20 GHz เส้นโค้งที่ 4: เส้นผ่าศูนย์กลาง = 1.8 ม ความถี่ = 12 GHz

ข้อสรุป อุณหภูมิสัญญาณรบกวนสายอากาศ T_A ขึ้นอยู่กับ

1. ความถี่
2. มุมเงย
3. สภาพของชั้นบรรยากาศ (ท้องฟ้าแจ่มใสหรือมีฝน)

2.2.21 อุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากพื้นดิน

(Ground Contribution to antenna noise temperature)

อุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากพื้นดินขึ้นอยู่กับ

1. ชนิดของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

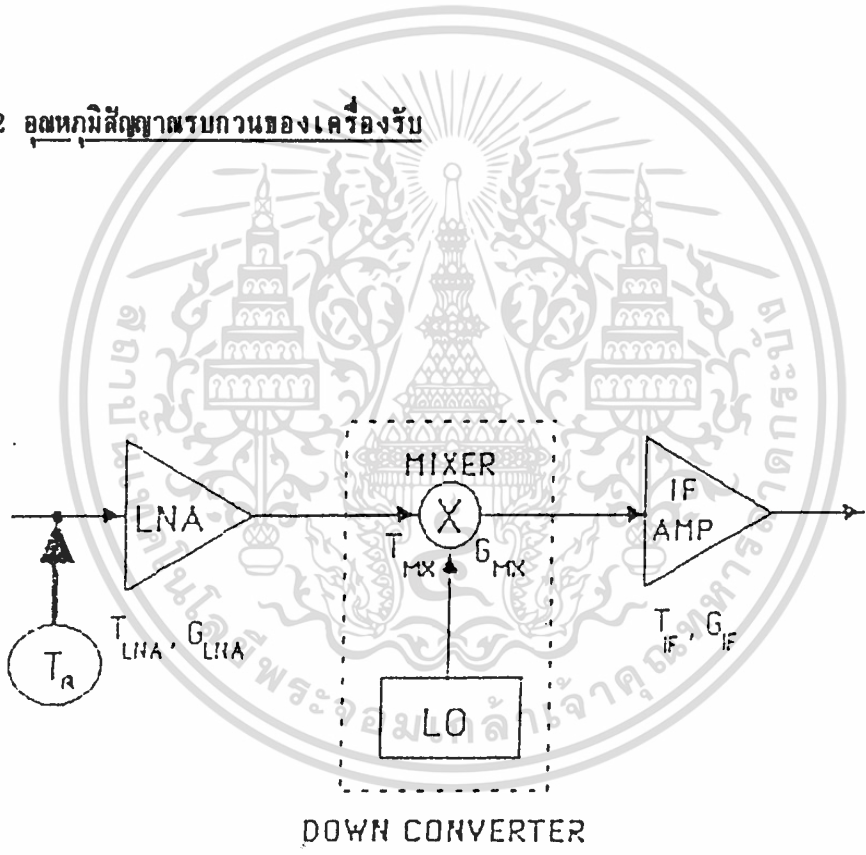
2. มุมเงยของสายอากาศ
3. รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ Side lobe
4. ความถี่

ค่าของอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากพื้นดินในทางปฏิบัติ

ประมาณ 10 K สำหรับสายอากาศแบบ Cassegrain

ประมาณ 100 K สำหรับสายอากาศแบบจาน (Dish antenna)

2.2.22 อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ



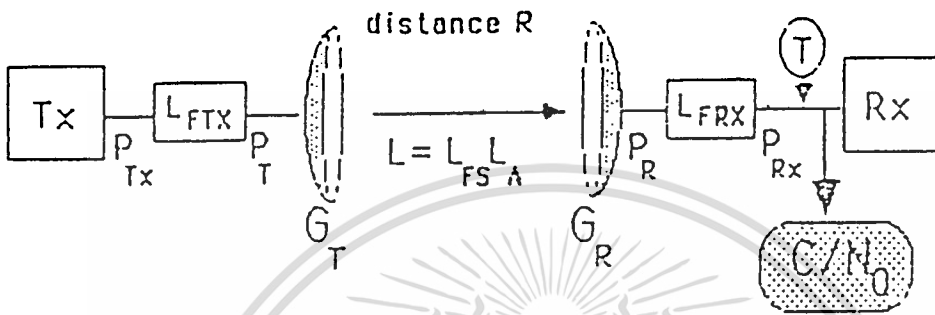
รูปที่ 26 อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ

จากรูปโดสที่ใช้สมการ $T_{\Sigma} = (L_F - 1) T_F$ จะได้สมการอุณหภูมิสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ ดังนี้

$$T_R = T_{LNA} + T_{MX} / G_{LNA} + T_{IF} / G_{LNA} G_{MX} \quad [K] \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาระดับปริญญาตรีเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.23 อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณคลื่นพาห์ต่อกำลังของสัญญาณรบกวนที่ทางเข้าของ
เครื่องรับ (CARRIER-TO-NOISE RATIO (CNR) AT RECEIVER INPUT)
 กรณีการเชื่อมโยงหนึ่งครั้ง (One link only)



รูปที่ 27 แสดงตำแหน่งการวัดของ C/N_0 .

การวัดประสิทธิภาพของวงจรสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้น สามารถวัดได้จากอัตราส่วน
 ของกำลังงานของสัญญาณต่อกำลังงานของสัญญาณรบกวนที่รับได้ที่ทางเข้าของภาครับ คือ ค่า
 C/N_0 ซึ่งกำลังของสัญญาณรับที่ทางเข้าของเครื่องรับ คือ สมการที่ 2.47 ดังนั้น $C = P_{Rx}$
 และความหนาแน่นสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัมที่ทางด้านเครื่องรับ คือ $N_0 = kT$ ดังนั้น

$$C/N_0 = (P_T G_T) (1/L) (G_R/T) (1/k) \quad [\text{Hz}] \quad (2.47)$$

$$C/N = C/N_0 B_N \quad (2.48)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} C &= \text{กำลังสัญญาณของคลื่นพาห์ที่ทางเข้าเครื่องรับ (W)} \\ &= P_{Rx} = (P_T G_T) G_R / L \end{aligned}$$

$$G_R = G_{R, \text{max}} / L_{FRX} L_R$$

$$N_0 = \text{ความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของกำลังสัญญาณรบกวนที่มีผล (W/Hz)}$$

$$= kT$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(C/N_o)_U$ เขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$(C/N_o)_U = (EIRP)_{ES} (1/L)_U (G/T)_{SL} (1/k) \quad (2.50)$$

$$(EIRP)_{ES} = (P_T G_T)_{ES} = (P_{TX}/L_{FTX})_{ES} (G_{T,max}/L_T)_{ES} \quad [W]$$

$$L_T = 12(\alpha_T/\theta_{3dB})^2 \quad [dB]$$

α_T = มุมคลาดเคลื่อนที่สถานีภาคพื้นดิน (ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบการติดตาม (Tracking))

$$(G/T)_{SL} = (G_{R,max}/L_R) (1/L_{FRX})_{SL} (1/T)_{SL} \quad [K^{-1}]$$

T = อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบดาวเทียม $\sim 290 + T_R$ [K⁻¹]

$(G/T)_{SL}$ ขึ้นอยู่กับทิศทางเส้นแนวสายตาของสถานีภาคพื้นดิน

$(C/N_o)_U$ ที่อยู่ในเทอมของความหนาแน่นฟลักซ์กำลัง

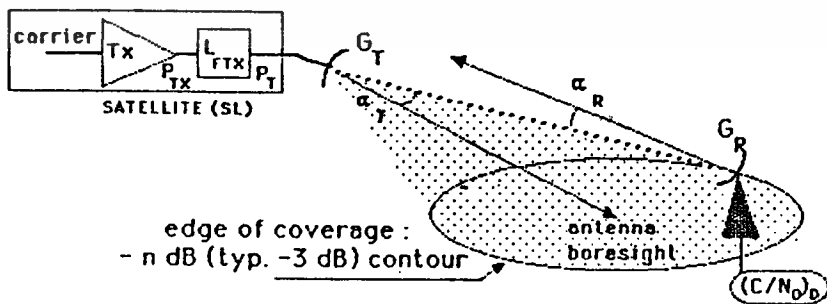
$$\phi = (EIRP)_{ES} / 4\pi R^2$$

$$C = P_{RX} = \phi A_{R,eff} (1/L_{FRX})_{SL} = \phi (G_R \lambda_U^2 / 4\pi) (1/L_{FRX})_{SL}$$

$$= \phi (G_{R,max} / L_R)_{SL} (1/L_{FRX})_{SL} (\lambda_U^2 / 4\pi) \quad [W]$$

$$(C/N_o)_U = \phi (G/T)_{SL} (\lambda_U^2 / 4\pi) (1/k) \quad [Hz] \quad (2.51)$$

2.2.25 อัตราส่วนของคลื่นพาที่ต่อความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนทางด้านขาลง



รูปที่ 29 รูปแสดงการวัด C/N_o ทางด้านขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(C/N_o)_D$ เขียนได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$(C/N_o)_D = (EIRP)_{SL} (1/L)_U (G/T)_{ES} (1/k) \quad [\text{Hz}] \quad (2.52)$$

$$(EIRP)_{SL} = (P_T G_T)_{SL} = (P_{TX}/L_{FTX})_{SL} (G_{T,max}/L_T)_{SL} \quad [\text{W}]$$

$$(G/T)_{ES} = (G_{R,max}/L_R)_{ES} (1/L_{FRX})_{ES} (1/T)_{ES} \quad [\text{K}^{-1}]$$

$$L_R = 12(\alpha_R/\epsilon_{\text{odB}})^2 \quad [\text{dB}]$$

α_T = มุมคลาดเคลื่อนที่สถานีภาคพื้นดิน (ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบการติดตาม (Tracking))

T = อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบสถานีภาคพื้นดิน รวมทั้งสัญญาณรบกวนจากส่าอากาศ (T_A) ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมเงยและปริมาณของฝน (amount of Rain)

$(C/N_o)_D$ ที่อยู่ในเทอมของความหนาแน่นกำลังกำลัง

$$\phi = (EIRP)_{SL} / 4\pi R^2 \quad [\text{W/m}^2]$$

$$C = P_{RX} = \phi A_{\text{ref}} (1/L_{FRX})_{ES} = \phi (G_R^2 / 4\pi) (1/L_{FRX})_{ES} \\ = \phi (G_{R,max} / L_R)_{ES} (1/L_{FRX})_{ES} (G_R^2 / 4\pi) \quad [\text{W}]$$

$$(C/N_o)_D = \phi (G/T)_{ES} (G_R^2 / 4\pi) (1/k) \quad [\text{Hz}] \quad (2.53)$$

2.2.26 ผลกระทบที่เกิดจากฝน (INFLUENCE OF RAIN)

ทางด้าน การเชื่อมโง่ขาขึ้น

ผลกระทบที่เกิดจากฝนทางด้าน การเชื่อมโง่ขาขึ้น มันจะทำให้ค่าอัตราส่วนของ

$(C/N_o)_U$ ลดลงโดยค่าที่ลดลงนั้นจะเป็นค่าของกำลังสัญญาณที่ได้รับ C_U นั่นคือ

$$(C/N_o)_U = C_U \quad [\text{dB}] = (A_{\text{RAIN}})_U \quad (2.54)$$

ทางด้าน การเชื่อมโง่ขาลง

ผลกระทบที่เกิดจากฝนทางด้าน การเชื่อมโง่ขาลง มันจะทำให้ค่าอัตราส่วนของ

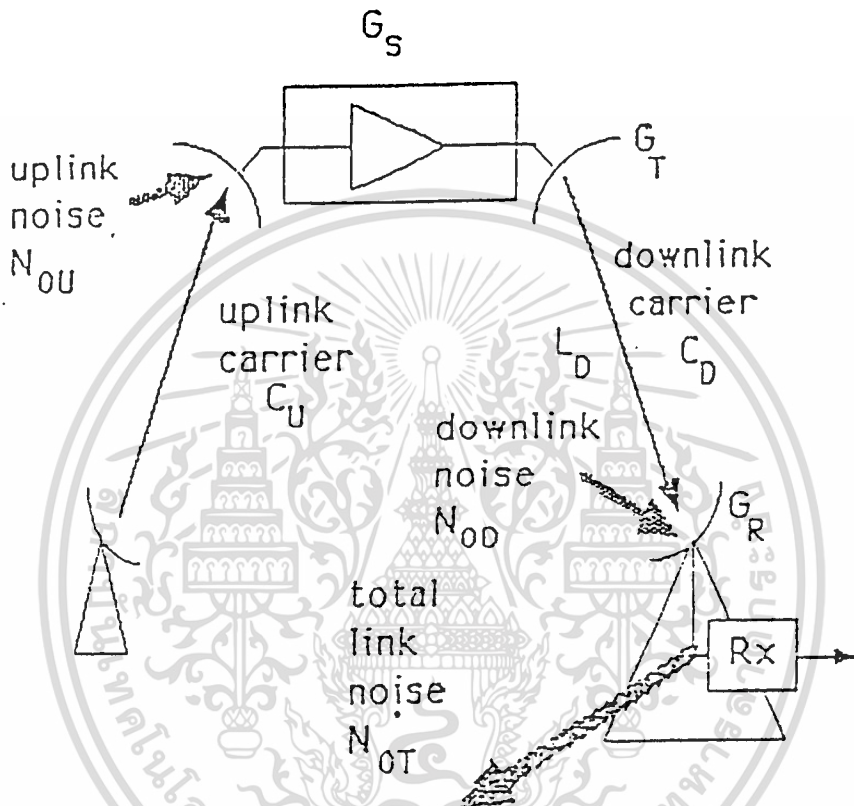
$(C/N_o)_D$ ลดลงโดยค่าที่ลดลงนั้นจะเป็นค่าของกำลังสัญญาณที่รับได้ C_D และมันจะเพิ่มค่าของ

อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบ นั่นคือ

$$(C/N_o)_D = C_D \quad [\text{dB}]$$

$$= (A_{\text{RAIN}})_D + T \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



total link noise

uplink retransmitted noise + downlink noise

รูปที่ 30 ระบบการเชื่อมโยงทั้งหมดที่จัดการทำงานเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.27 นิพจน์สำหรับ $\left(\frac{C}{N_o}\right)_T$ [Expression for $\left(\frac{C}{N_o}\right)_T$ ที่จุดการทำงานเชิงเส้น

นิพจน์สำหรับ $\left(\frac{C}{N_o}\right)_T$ ปรากฏจากการสอดคล้องจากระบบอื่น ๆ

สัญญาณรบกวนที่ทางเข้าของเครื่องรับสถานีภาคพื้นดินมีผลรวม ดังนี้

$$(N_o)_T = (N_o)_D + G(N_o)_U \quad [W/Hz] \quad (2.56)$$

$(N_o)_T$ = สัญญาณรบกวนทางด้านการเชื่อมโยงขาขึ้น

$(N_o)_U$ = สัญญาณรบกวนทางด้านการเชื่อมโยงขาลง (Down link) ในการ

พิจารณาแยกโดดเดี่ยว (isolation) [$(N_o)_D = kT_D$]

$$\text{เมื่อ } k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

T_D = อุณหภูมิสัญญาณรบกวนของระบบทางด้านรับ

$$T_D = T_A + (L_{FRX} - 1) T_F + T_R / G_{FRX} \quad [K]$$

G = อัตราขยายกำลังทั้งหมดระหว่างทางเข้าเครื่องรับดาวเทียมและทางเข้าเครื่องรับสถานีภาคพื้นดิน คำนวณได้จาก

$$G = G_{SL} G_T G_R / L_{FTX} L_D L_{FRX} \quad (2.58)$$

G_{SL} = อัตราขยายเครื่องทวนสัญญาณ

G_T / L_{FTX} = อัตราขยายของเครื่องส่งดาวเทียม

L_D = การลดทอนทางด้านการเชื่อมต่อขาลง

G_R / L_{FRX} = อัตราขยายของเครื่องรับดาวเทียม

$$\begin{aligned} \text{จาก } (C/N_o)_T^{-1} &= (N_o)_T / C_D \\ &= [(N_o)_D + G(N_o)_U] / C_D \\ &= \frac{(N_o)_D}{C_D} + \frac{(N_o)_U}{G^{-1} C_D} \quad [Hz^{-1}] \end{aligned}$$

เมื่อ $G^{-1} C_D$ = กำลังสัญญาณที่ทางเข้าเครื่องรับดาวเทียม = C_U

C_D = กำลังของสัญญาณทางด้านรับที่ทางเข้าของเครื่องรับสถานีภาคพื้นดิน

$$\text{ดังนั้น } (N_o)_U / G^{-1} C_D = (C/N_o)_U^{-1}$$

นั่นคือสรุปได้ว่า

$$(C/N_o)_T^{-1} = (C/N_o)_U^{-1} + (C/N_o)_D^{-1} \quad [\text{Hz}^{-1}] \quad (2.59)$$

จากรูปที่ 33 เราสามารถเขียน $(C/N_o)_U$ ให้อยู่ในรูปของ IBO และ $(C/N_o)_{U, \text{SAT}}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (C/N_o)_U &= (P_t^1) / (N_o)_U = \text{IBO} (P_t^1)_{\text{sat}} / (N_o)_U \\ &= \text{IBO} (P_o^1)_{\text{sat}} / (G_{\text{sat}})_{\text{SL}} (N_o)_U \\ &= \text{IBO} (C/N_o)_{U, \text{sat}} \quad [\text{Hz}] \end{aligned} \quad (2.60)$$

ทำนองเดียวกัน เราสามารถเขียน $(C/N_o)_D$ ให้อยู่ในรูปของ OBO และ $(C/N)_{D, \text{sat}}$ ได้ดังนี้

$$(C/N_o)_D = (\text{EIRP})_{\text{SL}} (1/L_D) (G_T)_{\text{ES}} (1/k)$$

จาก

$$\begin{aligned} (G)_{\text{SL}} &= \frac{(P_o^1)}{P_t^1} = \frac{\text{OBO} (P_o^1)_{\text{sat}}}{P_t^1} = \frac{\text{OBO} (P_o^1)_{\text{sat}}}{\text{IBO} (P_t^1)_{\text{sat}}} \\ &= \frac{\text{OBO}}{\text{IBO}} (G_{\text{sat}})_{\text{SL}} \end{aligned}$$

$$(\text{EIRP}_{\text{sat}})_{\text{SL}} = (P_o^1)_{\text{sat}} G_{T, \text{max}} / L_T L_{\text{FTX}} \quad (2.61)$$

$$(\text{EIRP})_{\text{SL}} = P_{\text{TX}} G_{T, \text{max}} / L_T L_{\text{FTX}} \quad (2.62)$$

นำ (2.61) / (2.62) จะได้

$$\frac{(\text{EIRP}_{\text{sat}})_{\text{SL}}}{(\text{EIRP})_{\text{SL}}} = \frac{(P_o^1)_{\text{sat}}}{P_{\text{TX}}}$$

จาก

$$\text{OBO} = P_o^1 / (P_o^1)_{\text{sat}} = P_{\text{TX}} / (P_o^1)_{\text{sat}}$$

และ

$$(\text{EIRP})_{\text{SL}} = [\text{OBO}] [\text{EIRP}_{\text{sat}}]_{\text{SL}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\frac{(EIRP_{max})_{SL}}{(EIRP)_{SL}} = \frac{1}{OBO}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} (C/N_o)_D &= (OBO)(EIRP_{max})_{SL} (1/L_D)(G/T)_{ES} (1/k) \\ &= (OBO)(C/N_o)_{D,max} \end{aligned} \quad (2.63)$$

เมื่อ

$(C/N_o)_{D,max}$ = เป็นค่าของ C/N_o สำหรับทางด้านการเชื่อมโยงขาลงเมื่อ
เครื่องทวนสัญญาณทำงานที่จุดอิ่มตัว
 $(G/T)_{ES}$ = ตัวเลขคุณค่า (Figure of merit) ของสถานีพื้นดิน

นิพจน์สำหรับ $(C/N_o)_T$ เมื่อมีการสอดแทรกจากระบบอื่น ๆ ที่จุดการทำงาน

เชิงเส้น

การสอดแทรกสัญญาณจากระบบสามารถที่จะเข้ามาในระบบได้ 2 จุด คือ

1. ที่ทางเข้าของเครื่องทวนสัญญาณทางด้านการเชื่อมโยงขาขึ้น
2. ที่ทางเข้าของเครื่องรับทางด้านการเชื่อมโยงขาลง

ผลที่เกิดจากการสอดแทรก คือ ทำให้สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (thermal noise) ทางด้านการเชื่อมโยงเกิดผลกระทบขึ้น ซึ่งสามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$N_o = (N_o)_{\text{without interference}} + (N_o)_i \quad [W/Hz] \quad (2.64)$$

เมื่อ $(N_o)_i$ = ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของกำลังสัญญาณรบกวน
(noise power spectral density) เนื่องจากการสอดแทรก

จาก $(C/N_o)_T = (C/N_o)_U^{-1} + (C/N_o)_D^{-1}$ เราจะได้

$$(C/N_o)_U^{-1} = [(C/N_o)_U^{-1}]_{\text{without interference}} + (C/N_o)_i \quad [Hz^{-1}]$$

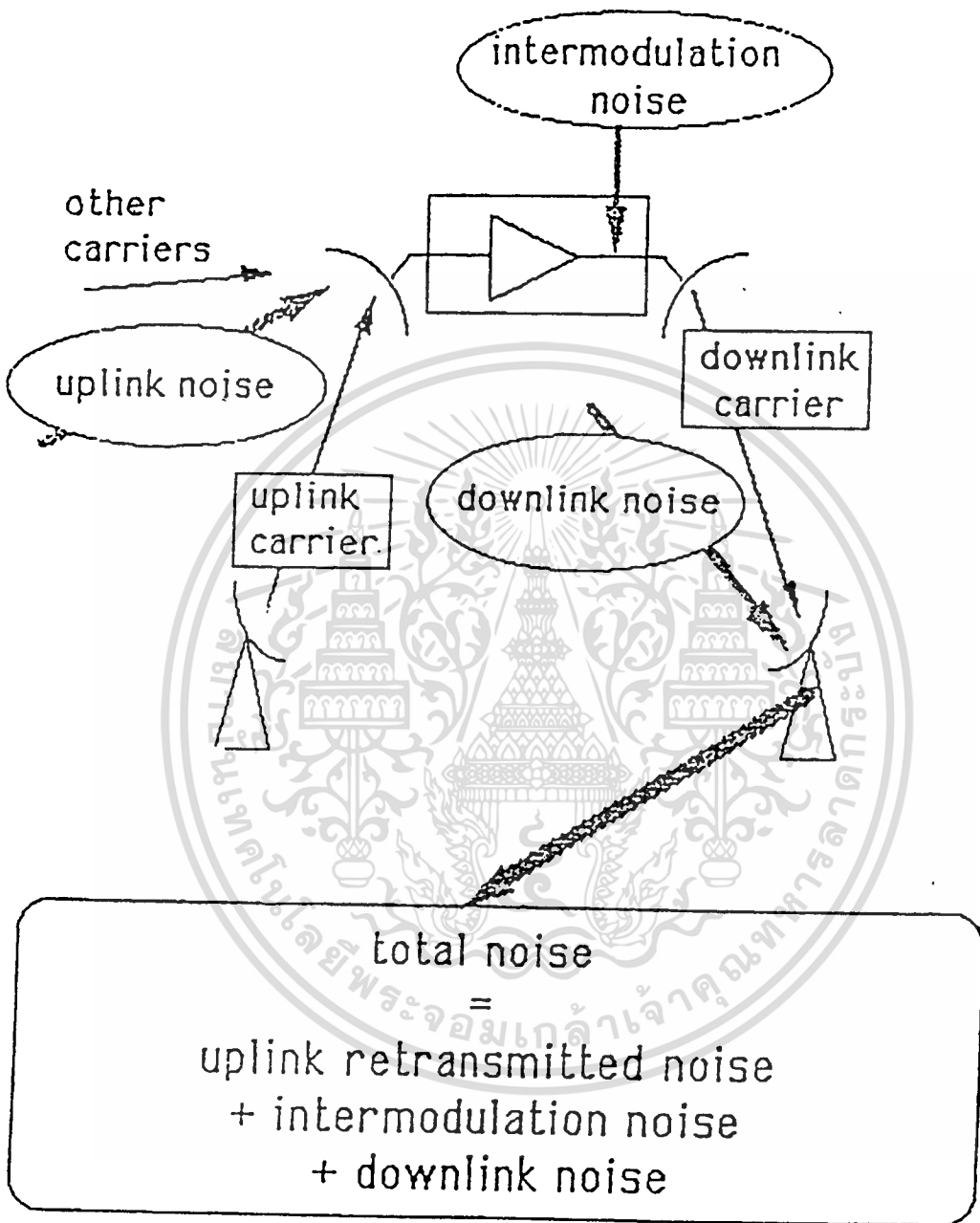
ดังนั้น

$$(C/N_o)_T^{-1} = (C/N_o)_U^{-1} + (C/N_o)_D^{-1} + (C/N_o)_i^{-1} \quad [Hz^{-1}] \quad (2.65)$$

$$(C/N_o)_i^{-1} = (C/N_o)_{i,U}^{-1} + (C/N_o)_{i,D}^{-1} \quad [Hz^{-1}] \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 การเชื่อมโยงทั้งหมดที่จุดการทำงานไม่เชิงเส้นปราศจากการแทรกสอดของสัญญาณ
รบกวนจากระบบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.28 นิพจน์สำหรับ $(C/N_o)_T$ ที่จุดการทำงานไม่เชิงเส้น

นิพจน์สำหรับ $(C/N_o)_T$ ปรากฏจากการแทรกสอดสัญญาณจากระบบอื่น ๆ

เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$(C/N_o)^{-1}_T = (C/N_o)^{-1}_u + (C/N_o)^{-1}_D + (C/N_o)^{-1}_{IH} \quad (2.67)$$

โดยที่

- $(N_o)_T$ = สัญญาณรบกวนที่ทางเข้าของเครื่องรับสถานีภาคพื้นดิน
- $(N_o)_u$ = สัญญาณรบกวนทางด้านการเชื่อมโยงขาขึ้นที่รับเข้ามาโดยสายอากาศของดาวเทียม
- $(N_o)_D$ = สัญญาณรบกวนทางด้านการเชื่อมโยงขาลงที่รับเข้ามาโดยสายอากาศของสถานีภาคพื้นดินทางด้านรับ

นิพจน์สำหรับ $(C/N_o)_T$ เมื่อมีการแทรกสอดจากระบบอื่น ๆ ที่จุดการทำงานไม่เชิงเส้น

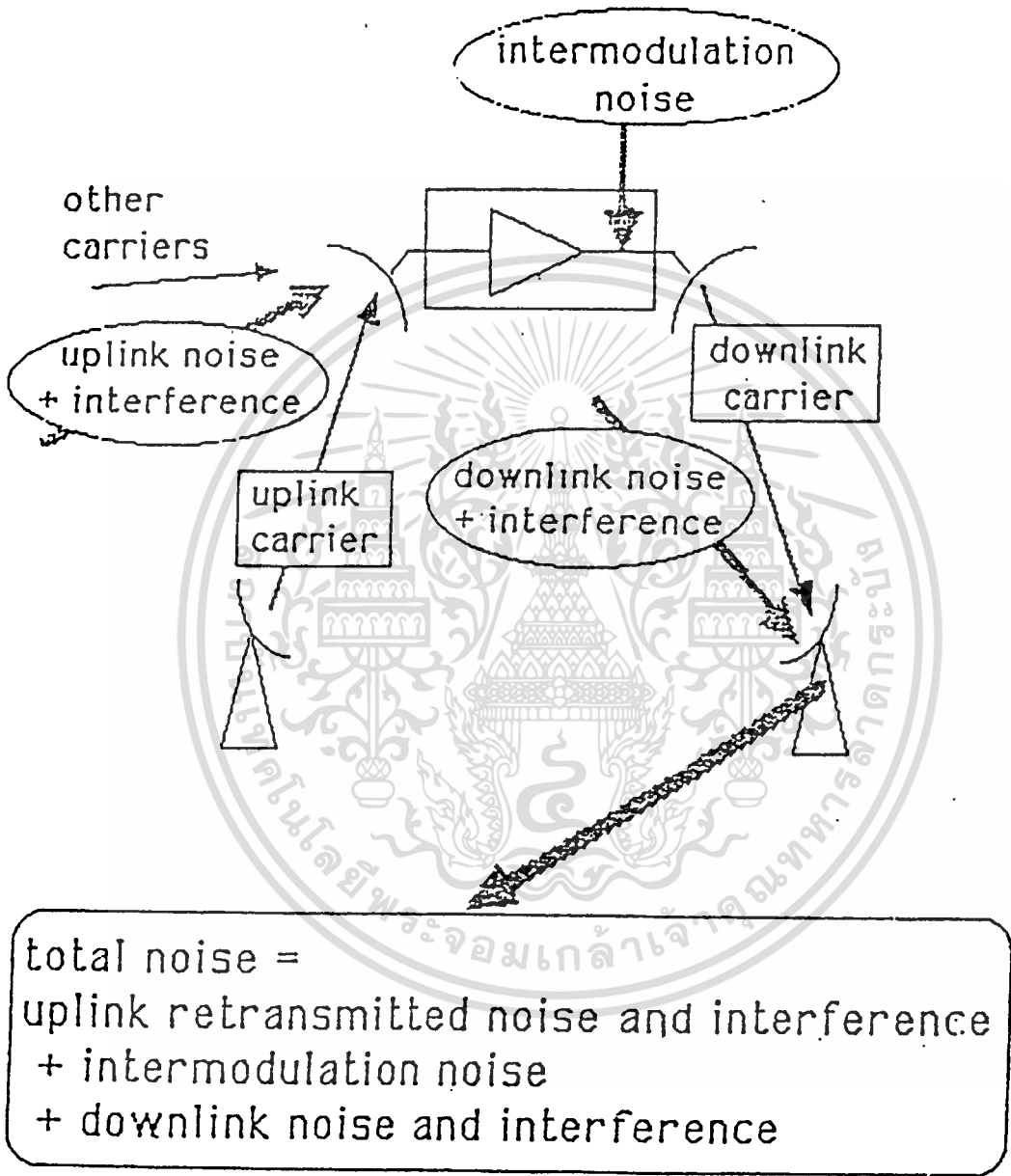
เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$(C/N_o)^{-1}_T = (C/N_o)^{-1}_u + (C/N_o)^{-1}_D + (C/N_o)^{-1}_{IH} + (C/N_o)^{-1}_I \quad (2.68)$$

โดยที่

$$(C/N_o)^{-1}_T = (C/N_o)^{-1}_u + (C/N_o)^{-1}_D + (C/N_o)^{-1}_{IH} + (C/N_o)^{-1}_I \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

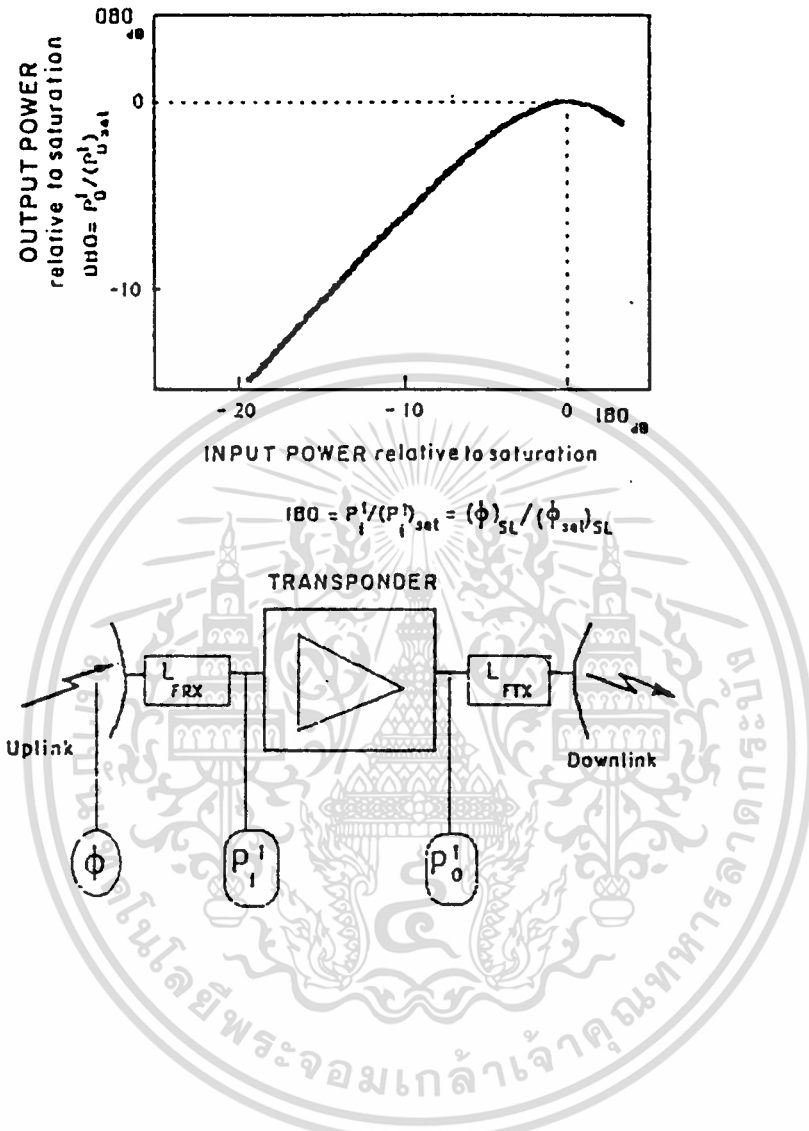


รูปที่ 32 การเชื่อมโยงทั้งหมดที่จุดการทำงานไม่เชิงเส้นที่มีการแทรกสอดของสัญญาณ

จากระบบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.29 Transponder Backoff



รูปที่ 33 คุณสมบัติถ่วงโวลต์กำลังของทรานสปอนเดอร์บนดาวเทียม

จากรูป

$P'_i = P_{rx}$ เป็นกำลังที่อินพุตของเครื่องบนดาวเทียม

$P'_o = P_{tx}$ เป็นกำลังที่เอาต์พุตของเครื่องขยายสัญญาณทางด้านส่ง

โดย ตัวห้อย i มีความหมายว่า อินพุต (Input)

ตัวห้อย o มีความหมายว่า เอาต์พุต (Output)

ตัวยก 1 มีความหมายว่า คลื่นพาห์ 1 คลื่นพาห์ที่จุดการทำงาน (Single Carrier Operation Input and Output Back off)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเรานำกำลังด้านเข้ามาทำการนอร์มอลไลซ์ด้วยกำลังด้านเข้าที่จุดอิมิตัว เราเรียกค่าที่ได้ใหม่นี้ว่า Input Back off เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$IBO = \frac{(P_i^1)}{(P_i^1)_{sat}} \quad (2.70)$$

IBO = Input Back off

$(P_i^1)_{sat}$ = เป็นกำลังที่อินพุตของเครื่องรับบนดาวเทียมที่จุดอิมิตัว

ตัวห้อย sat = Saturation

ทำนองเดียวกัน

ถ้าเรานำกำลังด้านออกมาทำการนอร์มอลไลซ์ด้วยกำลังด้านออกที่จุดอิมิตัว เราเรียกค่าที่ได้ใหม่นี้ว่า Output Back off เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$OBO = \frac{(P_o^1)}{(P_o^1)_{sat}} \quad (2.71)$$

OBO = Output Back off

$(P_o^1)_{sat}$ = เป็นกำลังที่เอาต์พุตของเครื่องขยายสัญญาณทางด้านส่งที่จุดอิมิตัว

ตัวห้อย sat = Saturation

2.2.30 Power Gain (อัตราขยายกำลัง)

อัตราขยายกำลังที่จุดอิมิตัว $(G_{sat})_{SL}$ ของเครื่องทวนสัญญาณมีนิยาม ดังนี้

$$(G_{sat}) = \frac{(P_o^1)_{sat}}{(P_i^1)_{sat}} \quad (2.72)$$

ดังนั้น การทำงานที่จุดใดๆ ของอัตราขยายกำลัง G_{SL} ของเครื่องทวนสัญญาณ มีค่าดังนี้

$$G_{SL} = \frac{(P_o^1)}{(P_i^1)} = \frac{OBO}{IBO} \left[\frac{(P_o^1)_{sat}}{(P_i^1)_{sat}} \right] = \frac{OBO}{IBO} (G_{sat})_{SL} \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยาย, EIRP และความหนาแน่นของฟลักซ์ที่จุดอิมิตัว

- EIRP ที่จุดอิมิตัวในการทำงานคลื่นพาห์เดี่ยว (EIRP_{sat})_{SL} มีความหมายดังนี้

$$(EIRP_{sat})_{SL} = \frac{(P_o^1)_{sat} G_{Tmax}}{L_T L_{FTX}} \quad [W] \quad (2.74)$$

- ความหนาแน่นฟลักซ์กำลังที่จุดอิมิตัวของเครื่องทวนสัญญาณ (ϕ_{sat})_{SL} มีความหมายดังนี้

$$(\phi_{sat})_{SL} = \frac{P_R}{A_{Rref}} = (P_i^1)_{sat} L_{FRX} L_R L_{POL} (4\pi / \dots)$$

- อัตราขยายที่จุดอิมิตัวของเครื่องทวนสัญญาณ มีความหมายดังนี้

$$G_{satSL} = \frac{(P_o^1)_{sat}}{(P_i^1)_{sat}} = (L_T L_{FTX} L_R L_{POL} / G_{T,max} G_{R,max}) (4\pi / \dots) [(EIRP_{sat})_{SL} / (\phi_{sat})_{SL}] \quad (2.76)$$

หมายเหตุ Input Back off นอกจากจะมีความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่าง P_i^1 และ $(P_i^1)_{sat}$ แล้ว เรายังสามารถนิยามให้อยู่ในรูปของ Power flux density ได้ดังนี้

$$IBO = \frac{(\phi)_{SL}}{(\phi_{sat})_{SL}} = \frac{(P_i^1)}{(P_i^1)_{sat}} \quad (2.77)$$

ดังนั้น คุณลักษณะการแปลงสำหรับการทำงานคลื่นพาห์เดี่ยวดังรูป สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I/P ที่ถูกนอร์มอลไลซ์และกำลังที่ O/P และระหว่าง I/P ที่ถูกนอร์มอลไลซ์ และความหนาแน่นฟลักซ์กำลังที่ด้านออก

2.2.32 อัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของงานสาขอากาศต่ออณูหมีสัญญาณรบกวน

อัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของงานสาขอากาศต่ออณูหมีสัญญาณรบกวน คือ ตัวเลขคุณค่า (figure of merit) ที่ใช้แสดงสมรรถภาพของงานสาขอากาศของสถานีภาคพื้นดินกับวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise amplifier) ในการรับสัญญาณคลื่นพาห์ที่มาจากดาวเทียม พารามิเตอร์ G คือ อัตราขยายของสาขอากาศทางด้านรับที่จุดทางเข้า

ของวงจรถ่ายสัญญาณรบกวนต่ำ ส่วนพารามิเตอร์ T คือ อุณหภูมิของสัญญาณรบกวนระบบของ สถานีภาคพื้นดินที่จุดทางเข้าของวงจรถ่ายสัญญาณรบกวนต่ำ

2.2.33 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบดาวเทียมที่มีตำแหน่งวงโคจรใกล้กัน

การที่ดาวเทียมจากระบบหนึ่งได้รับสัญญาณจากสถานีภาคพื้นดินอีกระบบหนึ่ง โดย สัญญาณนั้นได้เข้ามาทาง Side lobe เราเรียกว่า adjacent Satellite interference

จากรูปที่ 34 ซึ่งเป็นระบบดาวเทียม 2 ระบบ คือ ระบบ A และระบบ B โดยที่ เราให้ระบบ A เป็นระบบที่เราจะพิจารณา (existing Satellite system) ส่วน ระบบ B เป็นระบบข้างเคียง (proposed Satellite system) จากระบบ A เราให้ A_e เป็นสถานีภาคพื้นดินทางด้านส่ง ส่วน A_r เป็นสถานีภาคพื้นดินทางด้านรับ จากรูปจะเห็น ได้ว่าการแทรกสอดทางด้านขาขึ้น (uplink interference) นั้นเกิดจากสถานีภาคพื้นดิน ของระบบ B ทั้งสถานีทางด้านรับและสถานีทางด้านส่ง ส่วนการแทรกสอดทางด้านขาลง (Downlink Interference) นั้นเกิดจากดาวเทียมของระบบ B

ในการใช้งานของสถานีภาคพื้นดินที่มีขนาดจานสายอากาศเล็ก จะต้องใช้ค่ากำลัง ส่งออกที่สูงขึ้น เพื่อให้ได้ค่า EIRP ตามต้องการ ซึ่งการใช้งานจานสายอากาศขนาดเล็กก็ อาจจะก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนกับสัญญาณของดาวเทียมดวงอื่นที่อยู่ในแนวมุมเงยที่ใกล้เคียง กันเนื่องจากตามธรรมชาติของจานสายอากาศขนาดเล็กจะมีบีม (Beam) ที่กว้างกว่าจานสาย อากาศขนาดใหญ่ ดังนั้นสถาบัน CCIR จึงได้กำหนดมาตรฐาน pattern ของสายอากาศ สำหรับภาคพื้นดิน เพื่อลดปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนกันโดยกำหนดค่าสูงสุดของอัตราขยายที่ มุมต่าง ๆ เทียบกับมุมที่ให้ค่าอัตราขยายสูงสุด ดังนี้คือ

$$G(\theta) = 32 - 25 \log \theta \quad \text{เมื่อ } 1 \leq \theta \leq 48 \quad (2.78a)$$

$$G(\theta) = -10\text{dB} \quad \text{เมื่อ } 48 \leq \theta \leq 180 \quad (2.78b)$$

สำหรับช่วงห่างระหว่างดาวเทียม 3 และ θ มีหน่วยเป็น องศา

เมื่อ θ คือ มุมนอกแกนหลักสายอากาศ (Antenna off-axis angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 35 เมื่อพารามิเตอร์ มีนิยามดังนี้

θ = มุมระหว่างดาวเทียม 2 ดวง ที่มีขอดมุมอยู่ที่สถานีภาคพื้นดิน

β = มุมระหว่างดาวเทียม 2 ดวง ที่มีขอดมุมอยู่ที่ใจกลางของโลก

$\beta = \left| \theta_{s.A} - \theta_{s.B} \right|$ เมื่อ $\theta_{s.A}$ และ $\theta_{s.B}$ คือ ลองจิจูด (longitude) ของดาวเทียม A และ B ตามลำดับ

d_i = ระยะเฉียง (Slant range) ระหว่างสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียม i ($i = A, B$)

r = รัศมีวงโคจรค้างฟ้า = 42,164.2 km

d = ระยะทางระหว่างดาวเทียมทั้งสอง

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ d ในฟังก์ชันของ θ และ β ได้ดังนี้

$$d^2 = d_A^2 + d_B^2 - 2d_A d_B \cos \theta$$

$$d^2 = 2r^2 - 2r^2 \cos \beta$$

$$= 2r^2 (1 - \cos \beta)$$

จากการเปรียบเทียบสมการทั้งสองจะได้

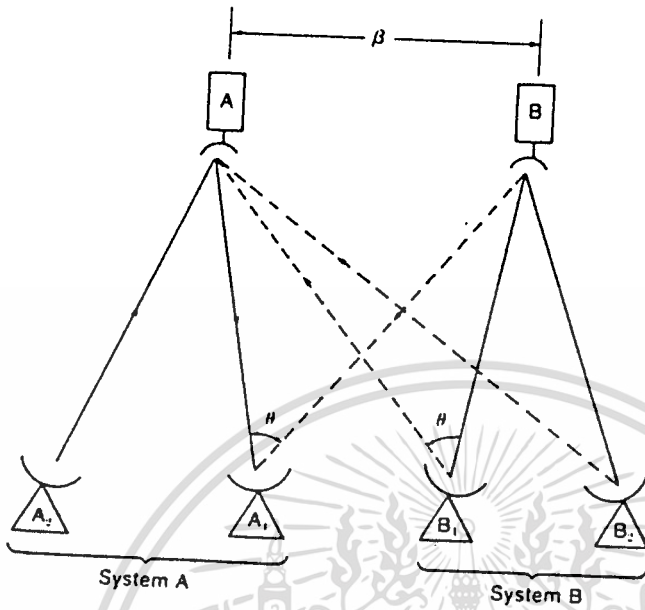
$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{d_A^2 + d_B^2 - 2r^2 (1 - \cos \beta)}{2d_A d_B} \right] \quad (2.79)$$

ในปัจจุบัน เนื่องจากได้มีการใช้งานดาวเทียมสื่อสารเพิ่มมากขึ้นเป็นจำนวนมาก สถาบัน FCC จึงได้ออกข้อกำหนดใหม่ เพื่อให้ตัวดาวเทียมอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กันได้มากขึ้นคือ 2 องศา ดังแสดงในรูปที่ 35 จึงได้กำหนดค่าอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศพื้นดินไว้ดังนี้

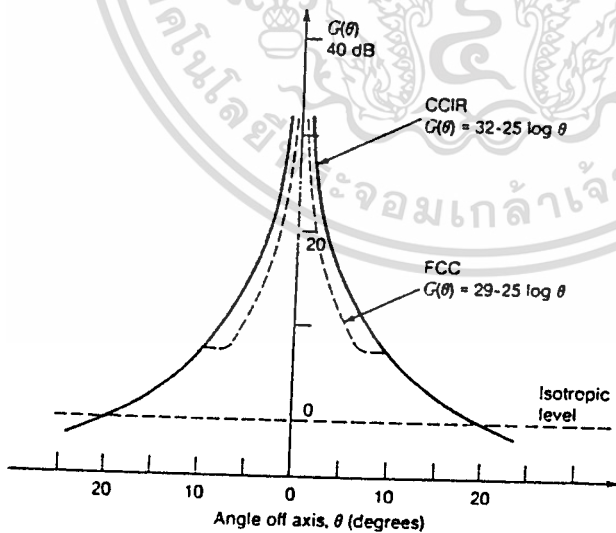
$$G(\theta) = 29 - 25 \log \theta \quad \text{เมื่อ } 1 < \theta < 7 \quad (2.80a)$$

$$G(\theta) = 32 - 25 \log \theta \quad \text{เมื่อ } 7 < \theta \quad (2.80b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 การแทรกสอดสัญญาณของดาวเทียมที่อยู่ใกล้กัน



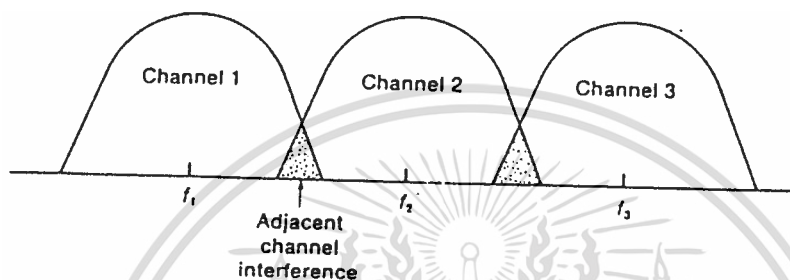
รูปที่ 35 แสดงข้อกำหนดของ CCIR และ FEC ต่อแบบรูปของงานสายอากาศส่งสำหรับการ

การใช้งานที่ดาวเทียมมีระยะห่างกัน 2 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.34 Adjacent Channel Interference

การแทรกสอดของสัญญาณข้างเคียง (Adjacent Channel Interference or adjacent transponder interference) เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังงานบางส่วนของ band-limited Signal เกิดไปทับ (falls into) กับช่องสัญญาณข้างเคียง



รูปที่ 36 มโนภาพของการแทรกสอดของทรานสปอนเดอร์ข้างเคียง

2.2.35 Terrestrial Interference

เป็นการรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างดาวเทียมกับระบบส่งสัญญาณทางพื้นดิน เช่น ระบบส่งสัญญาณไมโครเวฟ ซึ่งมีการใช้ความถี่ในช่วง C-Band (6/4 GHz) ซึ่งเป็นความถี่เดียวกับความถี่ที่ใช้งานในระบบดาวเทียม C-Band เช่นกัน

2.2.36 Cross - Polarization Interference

ระบบดาวเทียมที่ใช้งานกันมากอยู่ในปัจจุบัน มีการใช้เทคนิคการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency Reuse) โดยการส่งสัญญาณที่มี Polarization ต่างกัน เช่น แบบ Linear Polarization (Vertical & Horizontal) หรือ Circular polarization (Left hand & Right hand) การรบกวนสัญญาณซึ่งกันและกันระหว่าง Polarization สามารถกระทำได้โดยการติดตั้งจานเสาอากาศที่มีการปรับปรุงแต่งมุมของตัวแห่ง Feed เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ถูกต้อง โดยการวัด Cross-polarization Discrimination ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างคู่ของสัญญาณในแต่ละด้านของ Polarization โดย Discrimination จะมีค่าโดยทั่วไป 27-40 dB

2.2.37 Intermodulation Interference

เกิดจาก Interference Product ที่เกิดขึ้นภายใน Transponder ที่มีสัญญาณคลื่นหลาย ๆ สัญญาณอยู่ภายในการป้องกันปัญหา Intermodulation สัญญาณแรงเกินไปและให้มีช่องว่างระหว่างสัญญาณย่อย (Guard Band) ที่เหมาะสม

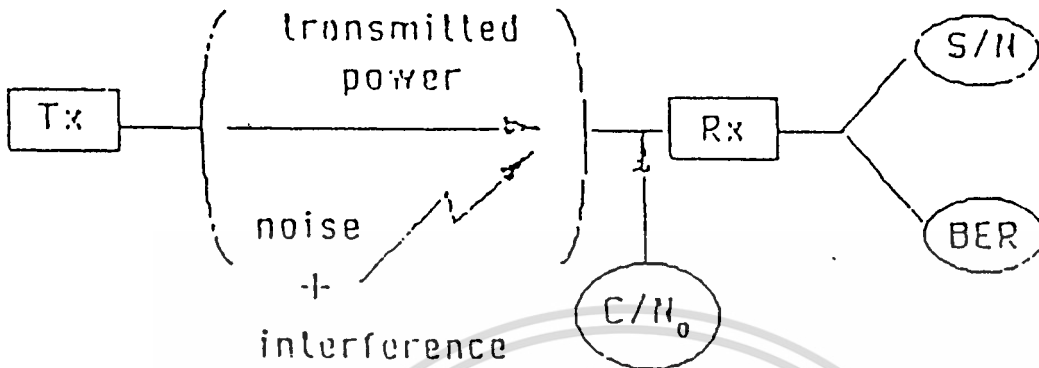
2.2.38 Intersymbol Interference

เกิดจากภายในระบบของดาวเทียมเองเป็นผลมาจาก filtering และ Nonlinear Characteristic ของเครื่องขยาย TWT บนดาวเทียมที่กำลังขยายสูงจนใกล้ถึงจุดอิ่มตัว

2.3 การวัดสัญญาณทางด้านรับของผู้ใช้ (Performance Measurement at User's End)

ในการวัดคุณภาพของสัญญาณที่ภาครับในระบบนาล็อกจะวัดในรูปของ signal ต่อ noise หรือ S/N ที่ภาค Demodulator ส่วนในระบบดิจิทัลนิยมวัดในรูปของ ความน่าจะเป็นของการผิดพลาดของข้อมูลบิต (Bit Error Probability) หรือ ตัวย่อว่า BEP ซึ่งบางครั้งเรานิยมเรียกว่า อัตราความผิดพลาดของข้อมูล (Bit Error rate) หรือ BER โดยค่าดังกล่าวเป็นตัวชี้ถึง คุณภาพของการสื่อสารโดยความผิดพลาดของข้อมูลเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน เช่น Thermal noise ให้เฟสเปลี่ยนไป ทำให้ข้อมูลที่รับเข้ามาไม่ถูกต้อง ตัวอย่างเช่น 1 อาจอ่านเป็น 0 หรือกลับกัน สำหรับ BER ถ้าอ่านได้ 1×10^{-4} แสดงว่า ข้อมูลที่ส่ง 10,000 บิต ผิดไป 1 ตัว ฉะนั้น BER จะมีบทบาทอย่างมากในการแสดงถึงคุณภาพของการสื่อสารในระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 37 การวัดสัญญาณทางด้านรับของผู้ใช้.

ความสัมพันธ์ระหว่าง S/N กับ BER ในการ มอดูเลตแบบ ASK หรือ On-Off Keying (OOK)

สูตรทั่วไปในการคำนวณหาความน่าจะเป็นของการผิดพลาดของข้อมูลบิต คือ

$$P_e = Q \left[\sqrt{\frac{E_s}{2N_0}} \right] \quad (2.81)$$

โดยที่ $Q(Z)$ เป็น complementary Error Function (รายละเอียดดูได้

จาก ภาคผนวก)

E_s เป็นพลังงานซึ่งเป็นผลต่างของสัญญาณที่อินพุทของวงจรกรองความถี่

$$E_s = \int_0^T [S_1(t) - S_2(t)]^2 dt \quad (2.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $S_1(t)$ และ $S_2(t)$ อาจเท่ากับค่าคงที่ A , 0 หรือ $-A$ ในคาบเวลา $t=T$ และ N_0 เป็นความหนาแน่นของน็อยส์ (noise density) มีหน่วยเป็น watts/Hz ตัวอย่างการหาอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังของน็อยส์ หรือ S/N กับความน่าจะเป็นของการผิดพลาดของข้อมูลบิต (BEP) สำหรับ On-off keying หรือ ASK

Amplitude Shift Keying (ASK)

จากรูปคลื่นของ OOK มีสมการทั่วไปเขียนได้ว่า

$$S_1(t) = A \sin \frac{\pi t}{T} \quad \text{แทนค่า symbol 1} \quad (2.83)$$

$$S_2(t) = 0 \quad \text{แทนค่า symbol 0}$$

แทนค่า (2.83) ลงใน (2.82) จะได้

$$E_d = \int_0^T [S_1(t) - S_2(t)]^2 dt = \frac{2}{2} A^2 T \quad (2.84)$$

แทนค่า (2.84) ลงใน (2.81) จะได้

$$P_e(\text{OOK}) = Q \left[\sqrt{\frac{2}{4N_0} A^2 T} \right] \quad (2.85)$$

Frequency Shift Keying (FSK)

$$S_1(t) = A \cos \omega_1 t \text{ แทน Symbol 1}$$

จากรูปคลื่นของสัญญาณ $S_1(t) =$

$$S_2(t) = A \cos \omega_2 t \text{ แทน Symbol 0}$$

$$\text{ทำนองเดียวกัน } P_{\text{avg}} \text{ (FSK)} = Q \left[\frac{2}{A T} \right] \quad (2.86)$$

Phase Shift Keying (PSK)

$$S_1(t) = A \cos \omega t$$

จากรูปคลื่นของสัญญาณ $S_1(t) =$ (2.87)

$$\begin{aligned} S_2(t) &= A \cos (\omega t + \pi) \\ &= -A \cos \omega t \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันความน่าจะเป็นของการผิดพลาดของข้อมูล

$$P_{\text{avg}} \text{ (PSK)} = Q \left[\frac{2}{A T} \right] \quad (2.88)$$

ตัวอย่างการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของการผิดพลาดของข้อมูล โดยสมมติว่า ขนาดของสัญญาณในสมการเป็น $A = 0.2 \text{ mV}$ และช่วงเวลาของบิต $T = 2 \mu\text{s}$ และความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน (Power spectral density) $N_0 = 2 \times 10^{-15} \text{ W/Hz}$ แทนค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลงในสมการจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(ก) P_{\text{OOK}} = Q \left[\frac{2}{4N_0} \right] = Q \left[\frac{(2 \times 10^{-4})^2 (2 \times 10^{-6})}{4(2 \times 10^{-15})} \right] = \sqrt{10}$$

$$\text{จากตาราง } Q \sqrt{10} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{10} = 7.83 \times 10^{-4}$$

$$\text{ดังนั้น } P_{\text{OOK}} = 7.83 \times 10^{-4}$$

$$\text{สำหรับ (ข) } P_{\text{FSK}} = Q \left[\frac{2}{2N_0} \right] = Q \sqrt{20} = 3.88 \times 10^{-6}$$

$$\text{และ (ค) } P_{\text{PSK}} = Q \sqrt{40} = Q(6.32) = 10^{-9}$$

สูตรของ $(S/N)_d$ จากภาค Demodulator

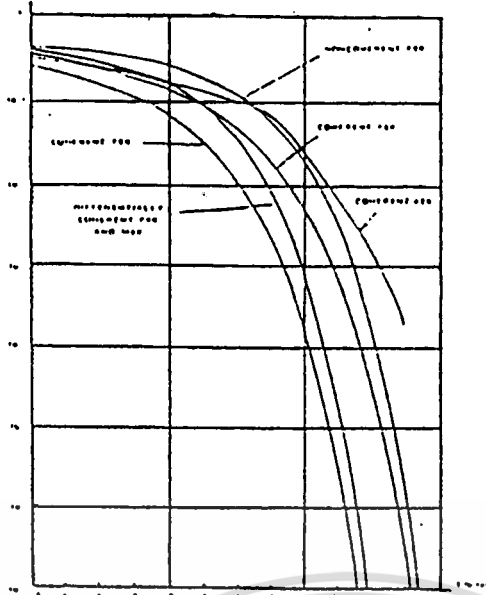
$$E_d = 2 \int_0^T [S_1(t) - S_2(t)]^2 dt \quad (2.89)$$

$$\text{สำหรับ } (S/N)_{\text{OOK}} = \left[\frac{2}{N} \right] \quad (2.90)$$

$$(S/N)_{\text{FSK}} = \left[\frac{2A^2}{N} \right] \quad (2.91)$$

$$(S/N)_{\text{PSK}} = \left[\frac{2A^2}{N} \right] \quad (2.92)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ S/N ของ FSK, PSK และ ASK

โดยการเปรียบเทียบ (S/N) ทั้ง 3 สมการจะเห็นได้ว่า อัตราส่วน S/N ของ FSK ดีกว่า OOK อยู่ 3 dB และ S/N ของ PSK ดีกว่า FSK อยู่ 3 dB

จากสมการดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า PSK ให้ (S/N) ดีที่สุดสำหรับการมอดคูลเลท ทั้ง 3 แบบ

จากสมการ (2.90) กำลังเฉลี่ยของสัญญาณ $(S)_{OOK} = A^2$ (2.93)

ส่วนพลังงานต่อบิตสำหรับการมอดแบบ OOK คือ $(E_b)_{OOK} = A^2 T_b$

โดยที่ T_b เป็นคาบเวลาของ 1 บิต

แทนค่า (2.93) ลงใน (2.85) จะได้

$$(P_e)_{OOK} = Q \left[\sqrt{\frac{E_b}{4N_0}} \right] \tag{2.94}$$

ทำนองเดียวกัน $(P_e)_{FSK} = Q \left[\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right]$ (2.95)

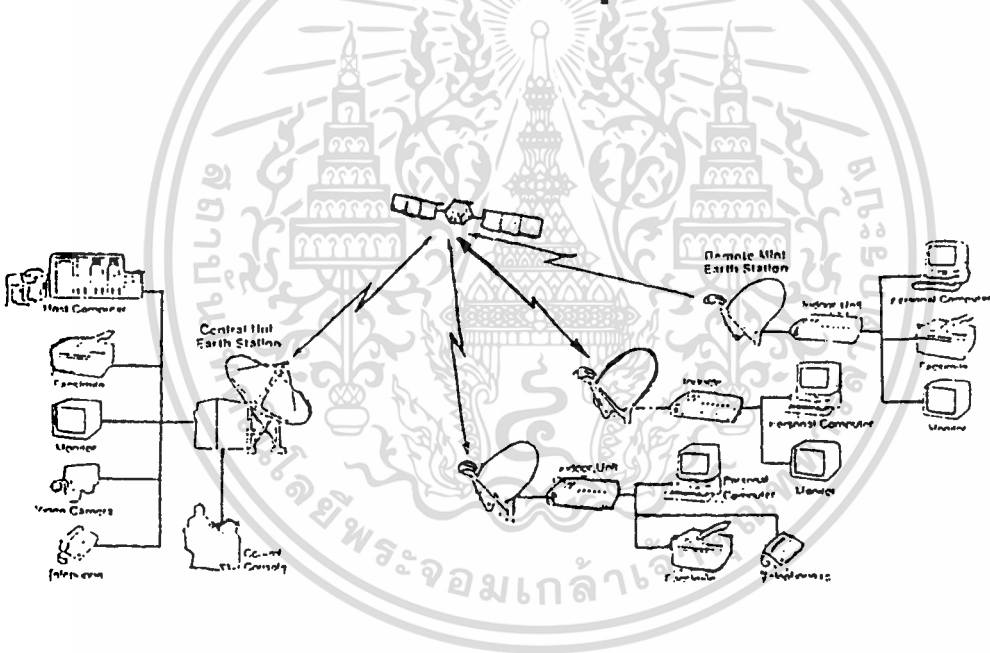
และ $(P_e)_{PSK} = Q \left[\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right]$ (2.96)

2.4 ลักษณะของข่าวสารส่วนใหญ่ที่มนุษย์ต้องการ รับ-ส่ง ด้วยระบบสื่อสารนั้น

แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

- เสียง (Voice) ได้แก่ เสียงพูดโทรศัพท์ เสียงรายการวิทยุกระจายเสียง
- ภาพ (Video) ได้แก่ ภาพโทรทัศน์ ภาพเครื่องแฟกซ์ (เป็นภาพแบบแปลนหรือลายมือเขียน)
- ข้อมูล (Data) ได้แก่ สัญญาณจากเครื่องคอมพิวเตอร์ สัญญาณไบนารี หรือสัญญาณสองระดับต่าง ๆ สัญญาณ Digitized Voice หรือสัญญาณ PCM และสัญญาณโทรเลข เทเล็กซ์ เป็นต้น

(ในกรณีพิเศษนี้จะเรียกข่าวสารที่เป็นข้อมูลว่า สัญญาณค้ำ)



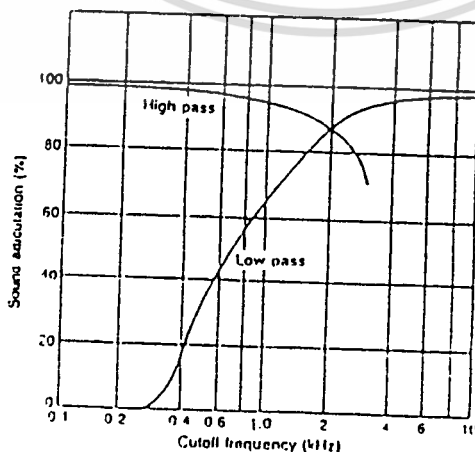
รูปที่ 39 โครงข่ายสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก

วิธีการส่งข่าวสารในเชิงวิศวกรรมสื่อสารในปัจจุบัน

วิธีการสื่อสารข่าวสารทั้ง 3 รูปแบบที่ใช้กันในปัจจุบันก็คือ ส่งผ่านระบบสื่อสารประเภทต่าง ๆ ข่าวสารทั้ง 3 รูปแบบ จะถูกแปลงเป็น "สัญญาณไฟฟ้า" แล้วนำไปบรรทุกหรือค้ำ (modulate) ลงในคลื่นพาห์ (Carrier) ซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีกำลังงานส่งเอกสารเป็นเอกสารทงสวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติหนาไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความถี่สูงที่ต้องทำเช่นนี้เพราะเมื่อแปลงรูปข่าวสารที่มนุษย์ต้องการส่งมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือที่เรียกว่าสัญญาณข่าวสารนั้น มันมีความถี่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก ตัวข่าวสารทั้ง 3 รูปแบบ เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งมีการเคลื่อนไหวช้ากว่าอเล็กตรอน

นอกจากสัญญาณข่าวสารจะมีความถี่ต่ำแล้วยังมีกำลังงาน (power) ต่ำอีกด้วย ดังนั้น หากจะนำสัญญาณข่าวสารส่งไปตรงๆ ก็จะไปไม่ได้ไกล อีกประการหนึ่งสัญญาณข่าวสารนั้นเกิดจากมนุษย์ ซึ่งทำอะไรได้เหมือน ๆ กัน ทำให้แถบความถี่ของสัญญาณข่าวสารที่เกิดจากมนุษย์ทุกผู้ทุกเหล่า นั้น มักจะมีแถบความถี่ที่เท่ากันหรือทับกันนั่นเอง เป็นผลให้เมื่อเราใช้สัญญาณข่าวสารส่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในตัวกลาง (medium) เดียวกัน และทิศทาง (direction) เดียวกัน สัญญาณข่าวสารที่ส่งออกจากคนหลาย ๆ คนนั้นจะรบกวนกันจนไม่รู้เรื่อง หรือผู้รับจะรับอะไรไม่ได้เลย จึงจำเป็นต้องนำสัญญาณข่าวสารบรรทุกให้นำพาไปโดยคลื่นพาห์ ซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีความถี่ในย่านต่างๆ กัน ที่เราพบว่าเหมาะสมกับการส่งผ่านตัวกลางชนิดต่าง ๆ เช่น ในระบบดาวเทียมเราพบว่า ความถี่ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1000 MHz ถึง 15,000 MHz เพราะช่วงความถี่นี้จะสามารถผ่านทะลุชั้นบรรยากาศที่ห่อโลกของเรา และเดินทางไปถึงตัวดาวเทียมได้อย่างดีโดยไม่มีการสะท้อนกลับมายังพื้นโลกเหมือนกับคลื่นในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่านี้ นอกจากนี้คลื่นพาห์ยังถูกเพิ่มกำลังงานให้มีกำลังสูงมากพอที่จะเดินทางไปได้ไกล ๆ ได้ ตั้งแต่ 10 กิโลเมตร จนบางครั้งระยะทางถึง 40,000 กิโลเมตร ได้ด้วย



รูปที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ค่าพลังงานเฉลี่ยกับความถี่สำหรับเสียงพูด

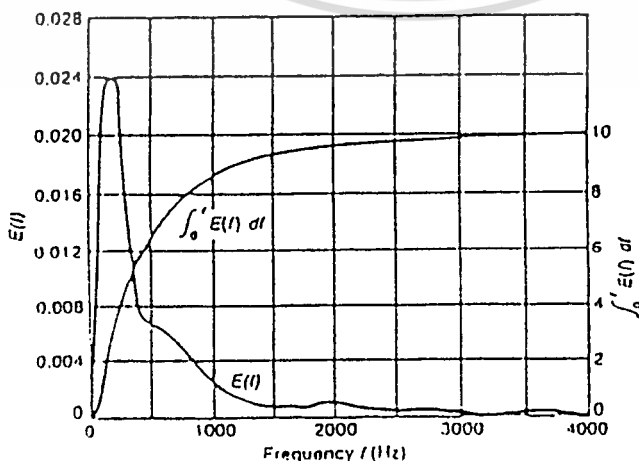
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของสัญญาณข่าวสารประเภทเสียงพูด (Voice)

เราเปลี่ยนเสียงพูดเป็นสัญญาณข่าวสารโดยใช้ไมโครโฟน ผู้พูดแต่ละคนจะมีสเปกตรัมของสัญญาณเสียงพูดแตกต่างกันไป รูปที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเฉลี่ยที่ความถี่ค่าต่าง ซึ่งเราจะเรียกว่า สเปกตรัม จะเห็นได้ว่ากำลังงานจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ที่ความถี่ต่ำถี่ศูนย์ และจะเริ่มมีค่าสูงขึ้นจนสูงที่สุดที่ความถี่ประมาณ 200 Hz และจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งความถี่ประมาณ 400 Hz แล้วจากนั้นจะลดทอนลงอย่างช้าจนถึงความถี่หลายพันเฮิรตซ์ แต่เวลามนุษย์ฟังเสียงพูดแล้ว ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเข้าใจในเสียงที่ได้ยินก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของสเปกตรัมในรูปที่ 41 นี้เสียทั้งหมด เพราะเราพบว่าถึงแม้เราจะตัดความถี่ต่ำ ๆ ทิ้งไปก็ไม่ทำให้เสียงพูดนั้นถูกลดความเข้าใจได้ลงไปแต่อย่างใด

การจะสรุปว่าสัญญาณเสียงพูดจะมีองค์ประกอบของความถี่อย่างไร หรือแค่ไหนที่ยังทำให้ผู้ฟังเข้าใจได้โดยไม่มีสับสนนั้น ทำได้โดยที่ อาสาสมัครมาทดลองฟังเสียงจากเทป แล้วสอบถามความเข้าใจหรือความพอใจที่ยังฟังได้รู้เรื่อง ซึ่งพบว่า หากเราตัดหรือตัดความถี่ต่ำกว่า 300 เฮิรตซ์ทิ้งไป มันจะไม่มีผลกระทบต่อความเข้าใจได้ในเสียงพูดที่ถูกตัดนั้นเลย และทำนองเดียวกันหากเราตัดหรือตัดความถี่สูงที่สูงกว่า 3,500 เฮิรตซ์ ออกไปมันก็ยังฟังได้เข้าใจอย่างดี

เราสรุปได้ว่าการทดลองที่ใช้คนเป็นเครื่องมือ และยอมรับว่าสัญญาณข่าวที่เป็นเสียงพูดโทรศัพท์จะมีสเปกตรัมที่ต้องคิดคำนึงในการออกแบบเพื่อสร้างเครื่องมือสื่อสารนั้น มีนิสสัยเป็นแถบกว้างความถี่เพียง 300-3,500 เฮิรตซ์ เท่านั้น



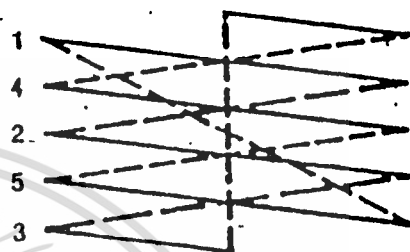
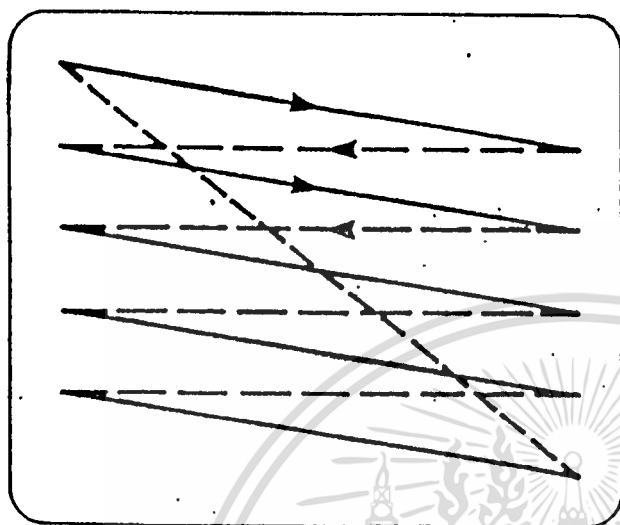
รูปที่ 41 การทดลองหาความชัดเจนของเสียงที่ถูกกรองโดย HPF และ LPF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของสัญญาณข่าวสารโทรทัศน (Video)

สัญญาณโทรทัศนได้จากการกวาดภาพที่ปรากฏบนกล้องถ่ายภาพด้วยสัญญาณไฟฟ้าโดยกวาดไปที่ละเส้น แล้วเปลี่ยนความสว่างของแสงของจุดแต่ละจุดบนจอภาพเป็นสัญญาณไฟฟ้าในระบบ 525 เส้น จะมีการกวาดไปตามแนวนอนของจอภาพเป็นจำนวน 525 เส้น ต่อ 1 ภาพ และภาพจะเปลี่ยนไป 30 ภาพต่อวินาที ดังนั้น ความถี่ของสายเส้นที่กวาดบนจอโทรทัศน ซึ่งเรียกว่า Line Frequency จึงมีค่า $525 \times 30 = 15,750$ เฮิรตซ์ สเปคตรัมของสัญญาณสายเส้นจึงมีลักษณะเป็นกลุ่มของความถี่ 15,750 เฮิรตซ์ ซึ่งแยกกลุ่มด้วยความถี่ 30 เฮิรตซ์ และเนื่องจากเราต้องการให้ความชัดของภาพซึ่งเกิดจากจุดเล็ก ๆ บนจอภาพนั้น มีความชัดเท่ากันทั้งในด้านตั้งและด้านนอน ซึ่งจำนวนจุดหรือจำนวนเส้นในด้านตั้งของจอภาพจะเป็น $525/2b$ (b คือความสูงของจอภาพ) ดังนั้น เพื่อให้ความชัดของภาพด้านตั้งเท่ากับด้านนอน ความถี่ของสัญญาณจุดที่เกิดในการกวาดแต่ละเส้น หรือความถี่ของจุดบนจอภาพจึงมีค่าเท่ากับ $(525 a/2b) \times 15,750$ หรือเท่ากับ $4.1 \times (a/b)$ เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งจอโทรทัศนทั่วไป a/b มีค่า $4 : 3$ นั่นคือ ความถี่สูงสุดของสัญญาณภาพโทรทัศนจะมีค่าสูงสุดประมาณ 5.6 เมกกะเฮิรตซ์ แต่ในทางปฏิบัติเราอาจใช้ความถี่สัญญาณโทรทัศนเพื่อการรับส่งประมาณ 4.5 เมกกะเฮิรตซ์ ก็เพียงพอเนื่องจากการกวาดของเส้นบนจอโทรทัศน เมื่อกวาดจากด้านหนึ่งไปสิ้นสุดอีกด้านหนึ่งนั้น ตอนจะกลับมากวาดอีกต้องปล่อยสัญญาณให้ว่าง (สีขาว) ทำให้ความถี่ระหว่างจุดของภาพด้านตั้งนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยได้

เราจึงสรุปว่าในการรับส่งสัญญาณภาพโทรทัศนผ่านระบบไฟฟ้าสื่อสารนั้น ความถี่ที่ต้องนำมาคำนึงในการออกแบบจะใช้แถบกว้างประมาณ 5 เมกกะเฮิรตซ์ และมีความถี่สายเส้นของภาพประกอบ 15.75 กิโลเฮิรตซ์



SCANNING RASTER

รูปที่ 42 SCANNING RASTER

คุณสมบัติสัญญาณคาตา (data)

สัญญาณคาตา คือ สัญญาณสองระดับหรือไบนารี ซึ่งใช้งานในเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องโทรเลข เครื่องเทเล็กซ์ สัญญาณเหล่านี้มี 2 ระดับ เช่น 0 กับ 5 โวลต์, 0 กับ 12 โวลต์, -12 กับ +12 โวลต์ และมีความเร็วต่าง ๆ กัน เช่น 16 kbps, 32 kbps, 64 kbps จนกระทั่งเป็นความเร็วขนาดกลาง 2,048 Mbps เป็นต้น ระบบสื่อสารในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะเป็นไปในลักษณะใช้สัญญาณข่าวสารในการรับส่งเป็นสัญญาณ 2 ระดับทั้งหมด ซึ่งทำได้โดยเปลี่ยนสัญญาณเสียงพูดและสัญญาณภาพสองระดับ (Binary) แล้วบรรทุกให้นำพาไปโดยใช้คลื่นพาห์ แบบดิจิทัล เทคนิคนี้กำลังเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เพราะมีข้อดีเนื่องจากการรับส่งสัญญาณสองระดับเราไม่ต้องกังวลมากในเรื่องรูปร่างของสัญญาณ เพราะเราจะตรวจจับแต่เพียงว่าสัญญาณสองระดับที่รับได้มีระดับสูงหรือต่ำเท่านั้น ถึงแม้รูปร่างของสัญญาณ 2 ระดับที่รับได้ที่เครื่องรับจะผิดเพี้ยนบิดเบี้ยวไปบ้างก็ไม่มีผลกระทบทำให้สัญญาณข่าวสารที่รับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ผิดเพี้ยนไปแต่ประการใดไม่ ยิ่งหากมีการต้องทบทวนสัญญาณกันในระหว่างทางหลาย ๆ ครั้ง เราสามารถปรับแต่งให้สัญญาณสองระดับที่รับได้มีรูปร่างสวย ๆ ก่อนส่งต่อไปได้ นอกจากนั้น ในการทำสัญญาณเสียงและสัญญาณภาพหรือสัญญาณข่าวสารรูปอื่นใดมาเป็นสัญญาณสองระดับนั้น มักจะมีการ "เข้ารหัส" ควบคู่ไปด้วยในตัว ซึ่งการเข้ารหัสนี้จะทำให้การตรวจรับสัญญาณสองระดับที่เครื่องรับลดความคลาดเคลื่อน (Error) ลงไปได้เพราะการเข้ารหัสบางอย่างจะทำให้เราทราบเมื่อมีการคลาดเคลื่อนจากที่ควรจะเป็นของสัญญาณที่รับได้เกิดขึ้น อีกทั้งการเข้ารหัสจะทำให้เราสามารถรักษาความลับข่าวสารได้อย่างดีเยี่ยม จึงทำให้สัญญาณค่าตัว หรือสัญญาณสองระดับจะกลายเป็นสัญญาณตัวแทนของสัญญาณข่าวสารที่ครอบคลุมในเวลาอนาคต



รูปที่ 43 การนำดาวเทียมมาใช้ประโยชน์การสื่อสารข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวิชาหกรบการรงงานเพอการศกษาแทนน นนุญาตหนาไปเชประโยชนดานการคา
ไมวากรณีใดๆทงสิ้น อกทงห้ามมิใหัดดแปลงเนือหา และตองอั่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง การออกแบบการคำนวณการเชื่อมโยง (Link budget Calculation)

กำหนดค่า

Required E_b/N_o (BER = 10^{-7})	= 6.2 dB
Margin	= 3 dB
Data rate	= 64 kbps
FEC Coding rate	= 1/2
Modulation type	= QPSK
BT Product	= 1.4

วิธีทำ

1. คำนวณ IF Noise Band width : NBW

$$NBW = BT \text{ Product} \times \text{Symbol Rate}$$

เมื่อ $\text{Symbol Rate} = \text{Data rate} / (\text{FEC} \times N)$

กรณี QPSK $N = 2$

BPSK $N = 1$

ดังนั้น $\text{Symbol Rate} = 64 \times 10^3 / (1/2 \times 2)$

$$= 64 \times 10^3 \text{ bps}$$

$$NBW = 1.4 \times 64 \times 10^3$$

$$= 89.6 \text{ kHz}$$

2. คำนวณ Required C/N : $(C/N)_{\text{req}}$

$$\text{Required C/N} = \text{Required } E_b/N_o - 10 \log [NBW / \text{Data rate}]$$

$$= 6.2 - 10 \log [89.6 \times 10^3 / 64 \times 10^3]$$

$$= 4.74 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คำนวณ Total C/N+I : $(C/N+I)_T$

$$\begin{aligned} \text{Total C/N+I} &= \text{Required C/N} + \text{Margin} \\ &= 4.74 + 3 \\ &= 7.74 \text{ dB} \end{aligned}$$

4. คำนวณ Downlink EIRP/CRX : $(\text{EIRP/crx})_{DN}$

$$\begin{aligned} (\text{EIRP/crx})_{DN} &= \text{Satellit Sat EIRP} + \text{carrier output Backoff/crx} \\ &= 35.5 - 29.32 \\ &= 6.18 \text{ dBW} \end{aligned}$$

5. การคำนวณหา Down link Free space loss

$$\begin{aligned} L_{FS, DN} &= 92.44 + 20 \log f_{DN} \text{ (GHz)} + 20 \log R \text{ (km)} \\ &= 92.44 + 20 \log 4.2 + 20 \log 36420 \\ &= 196.13 \text{ dB} \end{aligned}$$

6. คำนวณ Downlink Path loss : $L_{P, DN}$

$$\begin{aligned} L_{P, DN} &= L_{FS, DN} + \text{rain loss} + \text{atmospheric loss} \\ &= 196.13 + 2 + 0.5 \\ &= 198.63 \text{ dB} \end{aligned}$$

7. คำนวณ Downlink antenna gain : $G_{R, max}$

$$\begin{aligned} G_{R, max} &= 10 \log \left[\eta \left(\pi D_r / \lambda_D \right)^2 \right] \\ &= 10 \log \left[0.58 \left(3.8 \pi / (0.3 / 4.2) \right)^2 \right] \\ &= 42.10 \text{ dB}_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_R &= G_{R, max} - \text{Pointing loss} \\ &= 42.10 - 0.5 \\ &= 41.6 \text{ dB}_i \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. คำนวณ System noise temperature : T_{sys}

$$\begin{aligned} T_{sys} &= T_n/L + T_o (1-1/L) + T_{LNA} + T_{RX}/G_{LNA} \\ &= 10/10^{0.02} + 300 (1-1/10^{0.02}) + 45 \\ &= 68.05 \text{ K หรือ } 18.33 \text{ dBK} \end{aligned}$$

9. คำนวณ Downlink Figure of merit : (G/T)

$$\begin{aligned} (G/T)_{ES} &= G_R - T_{sys} \\ &= 41.6 - 18.33 \\ &= 23.27 \text{ dBK}^{-1} \end{aligned}$$

10. คำนวณ Downlink C/N : $(C/N)_{DN}$

$$\begin{aligned} (C/N)_{DN} &= (EIRP/crx)_{DN} - \text{Path loss} + (G/T)_{ES} - K \\ &\quad - \text{Noise Bandwidth} \\ &= 6.18 - 198.63 + 23.27 + 228.6 - 49.52 \\ &= 9.9 \text{ dB} \end{aligned}$$

11. คำนวณ Downlink interferences : $(C/I)_{IF, DN}$

$$\begin{aligned} (C/N)_{IF, DN}^{-1} &= (C/I)_{CO, DN}^{-1} + (C/I)_{OBE, DN}^{-1} \\ &= (10^{2.7})^{-1} + (10^{2.4})^{-1} \\ &= 0.006 \end{aligned}$$

12. คำนวณ Downlink C/N+I : $(C/N+I)_{DN}$

$$\begin{aligned} (C/N+I)_{DN}^{-1} &= (C/N)_{DN}^{-1} + (C/I)_{IF, DN}^{-1} \\ &= (10^{0.00})^{-1} + 0.006 \\ &= 0.108 \end{aligned}$$

$$(C/N+I)_{DN} = 9.65 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. คำนวณ Uplink interferences : $(C/I)_{IF,UP}$

$$\begin{aligned}(C/I)^{-1}_{IF,UP} &= (C/I)^{-1}_{CO,UP} + (C/I)^{-1}_{OBE,UP} \\ &= (10^{2.7})^{-1} + (10^{2.4})^{-1} \\ &= 0.006\end{aligned}$$

14. คำนวณ Uplink $C/N+I$: $(C/N+I)_{UP}$

$$\begin{aligned}(C/N+I)^{-1}_T &= (C/N+I)^{-1}_{UP} + (C/N+I)^{-1}_{DN} + (C/I)^{-1}_{IM} \\ (10^{0.774})^{-1} &= (C/N+I)^{-1}_{UP} + 0.108 + (10^{1.4})^{-1} \\ (C/N+I)^{-1}_{UP} &= 0.02 \\ (C/N+I)_{UP} &= 17 \text{ dB}\end{aligned}$$

15. คำนวณ Uplink C/N : $(C/N)_{UP}$

$$\begin{aligned}(C/N+I)^{-1}_{UP} &= (C/N)^{-1}_{UP} + (C/I)^{-1}_{IF,UP} \\ 0.02 &= (C/N)^{-1}_{UP} + 0.006 \\ (C/N)_{UP} &= 18.54 \text{ dB}\end{aligned}$$

16. คำนวณ Uplink Freespace loss : $L_{FS,UP}$

$$\begin{aligned}L_{FS,UP} &= 92.44 + 20 \log f_{UP} \text{ (GHz)} + 20 \log R \text{ (km)} \\ &= 92.44 + 20 \log 6.425 + 20 \log 36420 \\ &= 199.82 \text{ dB}\end{aligned}$$

17. คำนวณ Uplink Path loss : $L_{P,UP}$

$$\begin{aligned}L_{P,UP} &= L_{FS,UP} + \text{Uplink Rain loss} \\ &\quad + \text{Uplink atmospheric loss} \\ &= 199.82 + 0 + 0 \\ &= 199.82\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18 คำนวณ Earthstation EIRP : $(EIRP)_{ES}$

$$(C/N)_{UP} = (EIRP)_{ES} - L_{P,UP} + (G/T)_{SL} - \text{Boltzmann's constant} - \text{NBW}$$

$$18.54 = (EIRP)_{ES} - 199.82 + 1 + 228.6 + 49.52$$

$$(EIRP)_{ES} = 38.28 \text{ dBW}$$

19. หาคำนวณ Uplink antenna again : $G_{T,max}$

$$\begin{aligned} (G_{T,max}) &= 10 \log [\eta (D_u / \lambda_u)^2] \\ &= 10 \log [0.6 (3.8\pi / (0.3/6.425))^2] \\ &= 46 \text{ dB}_i \end{aligned}$$

$$G_T = G_{T,max} - \text{Uplink pointing loss}$$

$$= 46 - 0.5$$

$$= 45.5 \text{ dB}_i$$

20. คำนวณ Power for transmitter : P_T

$$P_T = (EIRP)_{ES} - G_T$$

$$= 38.28 - 45.55$$

$$= -7.22 \text{ dBW หรือ } 0.19 \text{ W}$$

โปรแกรม

```
{
    LINK,PAS
link budget for satellite and microwave for unknown values
}
```

PROGRAM LINK_BUDGET;

USES Crt,Graph;

CONST

K = -228.6;

DEC = 2;

CI = 92.44;

CJ = 0.3;

CK = 2.302585093;

VAR

```
SL,MW,AFLAG,VFLAG : BOOLEAN;
SELECT,HELP,RERUN,CHANGE,START,PSK,ARE : CHAR;
I,CHOICE,AA,GraphError,edd,VMAX,VMIN,d_max : INTEGER;
GraphDriver,GraphMode,xMax,yMax,DA,CA,NA,XC : INTEGER;
DIF : INTEGER;
BA,EA,CB,VA,VB,VC,VD,VE,VF,VG,VH,VI,VJ,VK : LONGINT;
YA,YB,YC,YD,YE,YF,YG,YH,YI,YJ,YK,WB,RANGMIN : INTEGER;
WA,WC,WD,WE,WF,WG,WH,WI,WJ,WK : REAL;
DATAR,EB,NBW,MAR,BT,FEC,GG,EF,EI,HH : REAL;
LNB,FEED,TT,TA,LNA : REAL;
UFREQ,DNFREQ,CIBO,COBO,SSEIRP,SGT,IM,DIST : REAL;
EFFD,DANTS,DNPOINT,DNRAIN,DNATMOS,DNCO,DNOBE : REAL;
EFFU,UPOINT,URAIN,UATMOS,UCO,UOBE : REAL;
L,B,TSYS : REAL;
RCN,TCNI : REAL;
Z,DLFS,Y,DLPN,DCN,A,C,DNIF,D,EE,DCNIF : REAL;
LL,MM,NN,UCNIF,O,ULFS,ULPN,P,Q,R,UCN,ESEIRP : REAL;
SS,T,U,DANG,EGT : REAL;
DATA1,DATA2,DATA3 : REAL;
TXPOWS,UANTS : REAL;
W,X,JY,UANG,JZ,JX,JW,JV,JU,JT : REAL;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PROCEDURE INIT;
BEGIN
  GraphDriver := Detect;
  InitGraph(GraphDriver, GraphMode, '');
  GraphError := GraphResult;
  IF GraphError <> GrOk
  THEN WriteLn('Graphics error !', GraphErrorMsg(GrError));
END;

PROCEDURE SKIP(LINES: INTEGER);
BEGIN
  FOR I:= 1 TO LINES DO
    WRITELN;
  END;

PROCEDURE ANTILOG(DATA1: REAL);
BEGIN
  DATA3 := DATA1*CK/10;
  DATA2 := EXP(DATA3);
END;

PROCEDURE INTRO;
BEGIN

  ClrScr;
  SKIP(4);
  GOTOXY(20,2);
  WRITELN('LINK_BUDGET FOR SATELLITE OR MICROWAVE');
  GOTOXY(15,4);
  WRITE('transmitter power or disc antenna');
  WRITELN(' size calculator');
END;

PROCEDURE INSTR;
BEGIN
  GOTOXY(15,10);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WRITE('This program computes linkbudget');
WRITELN(' for satellite or microwave');
GOTOXY(12,11);
WRITE('values of disc antenna size');
WRITELN(' or transmitter power. ');
GOTOXY(15,12);
WRITE('Enter known values or 999');
WRITELN(' for an unknow value. ');
GOTOXY(15,13);
WRITE('The program will the calculate');
WRITELN(' the unknow value. ');
GOTOXY(30,20);
WRITE('TYPE B TO BEGIN!');
READ(START);
SKIP(1);
END;

PROCEDURE CTRANS_PARA;
BEGIN
  clrScr;
  GOTOXY(25,7);
  WRITELN('CARRIER TRANSMISSION PARAMETERS');
  {repeat}
  GOTOXY(30,9);
  WRITE('Data rate (kbps): ');
  READLN(DATAR);
  {if datar <= 0 then
  gotoxy(30,10);
  writeln('datar > 0');
  until datar > 0};
  GOTOXY(30,10);
  WRITE('Required Eb/No (dB): ');
  READLN(EB);
  GOTOXY(30,11);
  WRITE('Margin (dB): ');
  READLN(MAR);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

repeat
GOTOXY(30,12);
WRITE('FEC coding rate:');
READLN(FEC);
if fec <= 0 then
writeln('FEC = 0.5,0.75,0.875');
until FEC > 0;
REPEAT
    GOTOXY(30,13);
    WRITE('Modulation type (BPSK OR QPSK):');
    READLN(PSK);
    UNTIL PSK IN ['B','b','Q','q'];
    IF PSK IN ['B','b'] THEN
        GG := 1
    ELSE
        GG := 2;
repeat
GOTOXY(30,14);
WRITE('BT PRODUCT:');
READLN(BT);
if bt <= 0 then
writeln('BT PRODUCT > 0');
until bt > 0;
NBW := BT*DATAR/(FEC*GG);
END;

```

```

PROCEDURE SYSN_PARA;
BEGIN
    ClrScr;
    GOTOXY(25,5);
    WRITELN('SYSTEM NOISE TEMPERATURE PARAMETER');
    GOTOXY(27,7);
    WRITE('LN(A/B/C) temperature (K):');
    READLN(LNB);
    GOTOXY(27,8);
    WRITE('Feed loss (dB):'); READLN(FEED);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GOTOXY(27,9);
WRITE('Ambient temperature (K)');
READLN(TT);
GOTOXY(27,10);
WRITE('LNA gain (dB)');
READLN(LNA);
GOTOXY(27,11);
WRITE('Antenna noise temperature (K)');
READLN(TA);
END;

```

```

PROCEDURE SATELLITE_PARA;
BEGIN
  ClrScr;
  GOTOXY(25,7);
  WRITELN('SATELLITE PARAMETERS');
  repeat
    GOTOXY(25,9);
    WRITE('Frequency up (GHz)');
    READLN(UFREQ);
    if ufreq <= 0 then
      begin
        writeln('frequency up = 6 GHz [C - Band]');
        writeln('          = 14 GHz [Ku - Band]');
      end;
    until ufreq > 0;
  repeat
    GOTOXY(25,10);
    WRITE('Frequency down (GHz)');
    READLN(DNFREQ);
    if dnfreq <= 0 then
      begin
        writeln('frequency down = 4 GHz [C - Band]');
        writeln('          = 12 GHz [Ku - Band]');
      end;
    until dnfreq > 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GOTOXY(25,11);
WRITE('Carrier input backoff/crx (dB)!');
READLN(CIBO);
GOTOXY(25,12);
WRITE('Carrier output backoff/crx (dB)!');
READLN(COBO);
GOTOXY(25,13);
WRITE('Satellite Sat. EIRP (dB)!');
READLN(SSEIRP);
GOTOXY(25,14);
WRITE('Satellite G/T (dB/K)!');
READLN(SGT);
GOTOXY(25,15);
WRITE('C/I Intermodulation (dB)!');
READLN(IM);
repeat
GOTOXY(25,16);
WRITE('Distance (km)!');
READLN(DIST);
if dist <= 0 then
writeln('distance = 35,786 km');
until DIST > 0;
YI = 20*LN(DIST)/CK;
END;

```

```

PROCEDURE DNLINK_PARA;
BEGIN
  ClrScr;
  GOTOXY(25,7);
  WRITELN('DOWNLINK PARAMETER');
  GOTOXY(25,9);
  WRITE('eff. sperture area!');
  READLN(EFFD);
  repeat
  GOTOXY(25,10);
  WRITE('Disc antenna size (m)!');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

READLN(DANTS);
if dants <= 0 then
writeln('Disc antenna size > 0');
until DANTS > 0;
GOTOXY(25,11);
WRITE('Dnlink pointing loss (dB):');
READLN(DNPOINT);
GOTOXY(25,12);
WRITE('Dnlink rain loss (dB):');
READLN(DNRAIN);
GOTOXY(25,13);
WRITE('Dnlink atmospheric loss (dB):');
READLN(DNATMOS);
GOTOXY(25,14);
WRITE('Dnlink C/Isa (dB):');
READLN(DNCO);
GOTOXY(25,15);
WRITE('Dnlink C/lobe (dB):');
READLN(DNOBE);
END;

PROCEDURE UPLINK_PARA;
BEGIN
  ClrScr;
  GOTOXY(25,7);
  WRITELN('UPLINK PARAMETER');
  GOTOXY(25,9);
  WRITE('eff. aperture area');
  READLN(EFFU);
  GOTOXY(25,10);
  WRITE('Uplink pointing loss (dB):');
  READLN(UPOINT);
  GOTOXY(25,11);
  WRITE('Uplink rain loss (dB):');
  READLN(URAIN);
  GOTOXY(25,12);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WRITE('Uplink atmospheric loss (dB)');
READLN(UATMOS);
GOTOXY(25,13);
WRITE('Uplink C/leo (dB)');
READLN(UCO);
GOTOXY(25,14);
WRITE('Uplink C/lobe (dB)');
READLN(UOBE);
END;
PROCEDURE TOTALCN_CAL;
BEGIN
  RCN := EB - (10*(LN(NBW) - LN(DATAR))/LN(10));
  TCN := RCN + MAR;
END;
PROCEDURE TSYS_CAL;
BEGIN
  DATA1 := FEED; ANTILOG(DATA1); L := DATA2;
  B := TA/L + TT*(1 - 1/L) + LNB;
  TSYS := 10*(LN(B)/LN(10)); END;
PROCEDURE ESGT_CAL;
BEGIN
  SS := (PI*DANTS)*(DNFREQ/CJ); T := SQR(SS);
  U := EFFD*T; DANG := 10*(LN(U)/CK);
  EGT := DANG - TSYS; END;
PROCEDURE DNLINK_CAL;
BEGIN
  Z := 20*(LN(DNFREQ)/CK); DLFS := CI + Z + Y;
  DLPN := DLFS + DNPOINT + DNRAIN + DNATMOS;
  DCN := -COBO + SSEIRP - DLPN + EGT - K
        - 10*(LN(NBW)/LN(10)) - 30;
  DATA1 := DNCO; ANTILOG(DATA1); A := DATA2;
  DATA1 := DNOBE; ANTILOG(DATA1);
  C := DATA2; DNIF := 1/A + 1/C; DATA1 := DCN;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ANTILOG(DATA1);D := DATA2;{ Downlink C/N }
EE := 1/D + DNIF;{ Downlink C/N+1 }
DCNIF := -10*(LN(EE)/CK);{ Downlink C/N+1 (dB) }
END;
PROCEDURE UPLINK_CAL;
BEGIN
  DATA1 := TCNI;ANTILOG(DATA1);
  LL := DATA2;{ Total C/N+1 }DATA1 := 1M;
  ANTILOG(DATA1);MM := DATA2;{ C/I Intermodulation }
  NN := 1/LL - 1/MM - EE;UCNIF := -10*(LN(NN)/CK);
  O := 20*(LN(UFREQ)/CK);ULFS := CI + O + Y;
  ULPN := ULFS + UPOINT + URAIN + UATMOS;
  DATA1 := UCO;ANTILOG(DATA1);P := DATA2;
  DATA1 := UOBE;ANTILOG(DATA1);Q := DATA2;
  R := NN - 1/P - 1/Q;UCN := -10*(LN(R)/CK);
  ESEIRP := UCN + ULPN - SGT + K +
    10*(LN(NBW)/LN(10))+30;END;
PROCEDURE GET_VAL;
BEGIN
  REPEAT
    VFLAG := FALSE;SKIP(1);
    WRITE('power for transmitter (dB)');
    WRITE(' or 999 if unknown'); READLN(TXPOWS);
    IF TXPOWS = 999 THEN
      VFLAG := TRUE;AFLAG := FALSE;
    WRITE('Disc antenna size (m) or 999 if unknown');
    READLN(UANTS);
    IF UANTS = 999 THEN
      AFLAG := TRUE;
    IF NOT(VFLAG XOR AFLAG) THEN
      WRITELN;WRITELN;WRITELN;
  UNTIL VFLAG XOR AFLAG;GOTOXY(50,23);
  WRITE('ENTER TO CONTINUE');
END;
PROCEDURE COMPUTE;
BEGIN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IF TXPOWS = 999 THEN
BEGIN
  W := PI*UFREQ*UANTS/CJ; X := SQR(W); JY := EFFU*X;
  UANG := 10*(LN(JY)/CK);
  JZ := ESEIRP - UANG; { Power transmitter (dB) }
  TXPOWS := JZ; EF := JZ/10; EI := EF*ln(10);
  HH := Exp(EI); READLN;
END

```

```
ELSE
```

```
  BEGIN
```

```

    JX := ESEIRP - TXPOWS; DATA1 := JX;
    ANTILOG(DATA1); JW := DATAZ; JV := JW/EFFU;
    JU := SQR(JV); JT := JU*CJ/PI/UFREQ; UANTS := JT;

```

```
  END; END;
```

```
PROCEDURE MENU_SEL;
```

```
BEGIN
```

```
  ClrScr;
```

```
  REPEAT
```

```

    GOTOXY(7,40); WRITELN('FILE PROCESSING');
    GOTOXY(8,40); WRITELN('-----');
    GOTOXY(9,40);
    WRITELN('1..SATELLITE LINK BUDGET');
    GOTOXY(10,40);
    WRITELN('2..MICROWAVE LINK BUDGET');
    GOTOXY(11,40); WRITELN('0..EXIT'); GOTOXY(12,40);
    WRITELN('-----'); WRITELN;
    WRITE('SELECT <1> OR <2> OR <0> ');
    READLN(CHOICE);

```

```
  UNTIL (CHOICE = 1) OR (CHOICE = 2) OR (CHOICE = 0);
```

```
END;
```

```
PROCEDURE DISPLAY;
```

```
BEGIN
```

```

  clrscr; GOTOXY(25,7);
  WRITELN('CARRIER TRANSMISSION PARAMERTERS');
  GOTOXY(30,9);
  WRITELN('Data rate (kbps):', DATAR:4:2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GOTOXY(30,10);
WRITELN('Required Eb/No (dB):',EBI2I2);
GOTOXY(30,11);
WRITELN('Margin (dB):',MARI2I2);GOTOXY(30,12);
WRITELN('FEC coding rate:',FECI1I4);
GOTOXY(30,13);
WRITELN('BT product:',BTI1I1);GOTOXY(30,14);
WRITELN('Modulation type:',PSK);GOTOXY(50,23);
WRITE('ENTER TO CONTINUE');
READLN|clrscr|
GOTOXY(25,5);
WRITELN('SYSTEM NOISE TEMPERATURE PARAMETER');
GOTOXY(27,7);
WRITELN('LN(A/B/C) temperature (K):',LNB1I3I2);
GOTOXY(27,8);
WRITELN('Feed loss (dB):',FEEDI2I2);GOTOXY(27,9);
WRITELN('Ambient temperature (K):',TTI3I2);
GOTOXY(27,10);
WRITELN('Antenna noise temperature (K):',TAI3I2);
GOTOXY(27,11);
WRITE('LNA gain (dB):',LNAI3I2);GOTOXY(50,23);
WRITE('ENTER TO CONTINUE');
READLN|clrscr|GOTOXY(25,7);
WRITELN('SATELLITE PARAMATERS');GOTOXY(25,9);
WRITELN('Frequency up (GHz):',UFREQI2I3);
GOTOXY(25,10);
WRITELN('Frequency down (GHz):',DNFREQI2I3);
GOTOXY(25,11);
WRITELN('Carrier input backoff/crx (dB):',CIBOI3I2);
GOTOXY(25,12);
WRITELN('Carrier output backoff/crx (dB):',COBOI3I2);
GOTOXY(25,13);
WRITELN('Satellite G/T (dB/K):',SGTI3I2);
GOTOXY(25,14);
WRITELN('Satellite sat. EIRP (dB):',SSEIRPI3I2);
GOTOXY(25,15);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WRITELN('C/I Intermodulation (dB):',IM:3:2);
GOTOXY(25,15);
WRITELN('Distance (km):',DIST:5:2);GOTOXY(50,23);
WRITE('ENTER TO CONTINUE');READLN|clreer|
GOTOXY(25,7);WRITELN('DOWNLINK PARAMETER');
GOTOXY(25,9);
WRITELN('eff. aperture area:',EFFD:1:2);
GOTOXY(25,10);
WRITELN('Disc antenna size (m):',DANTS:3:2);
GOTOXY(25,11);
WRITELN('Dnlink pointing loss (dB):',DNPOINT:3:2);
GOTOXY(25,12);
WRITELN('Dnlink rain loss (dB):',DNRAIN:3:2);
GOTOXY(25,13);
WRITELN('Dnlink atmospheric loss (dB):',DNATMOS:3:2);
GOTOXY(25,14);
WRITELN('Dnlink C/Ico (dB):',DNCO:3:2);
GOTOXY(25,15);
WRITELN('Dnlink C/Iobe (dB):',DNOBE:3:2);
GOTOXY(50,23);
WRITE('ENTER TO CONTINUE');clreer|GOTOXY(25,2);
WRITELN('UPLINK PARAMETER');
GOTOXY(25,4);
WRITELN('eff.aperture area:',EFFU:1:2);
GOTOXY(25,5);
WRITELN('Uplink pointing loss (dB):',UPOINT:1:2);
GOTOXY(25,6);
WRITELN('Uplink rain loss (dB):',URAIN:1:2);
GOTOXY(25,7);
WRITELN('Uplink atmospheric loss (dB):',UATMOS:1:2);
GOTOXY(25,8);
WRITELN('Uplink C/Ico (dB):',UCO:3:2);
GOTOXY(25,9);
WRITELN('Uplink C/Iobe (dB):',UOBE:3:2);
GOTOXY(25,10);
WRITELN('Free space loss (dB):',ULFS:4:2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GOTOXY(25,11);
WRITELN('Uplink loss (dB):',ULPN:4:2);
GOTOXY(25,12);
WRITELN('Uplink C/N (dB):',UCN:3:2);
GOTOXY(25,13);
WRITELN('Uplink C/(N+1) (dB):',UCNIF:3:2);
GOTOXY(25,14);
WRITELN('Disc antenna size (m):',UANTS:3:2);
GOTOXY(22,15);
WRITELN('_____');
GOTOXY(25,16);
WRITELN('Uplink EIRP/crx (dB):',ESEIRP:3:2);
GOTOXY(25,17);
WRITELN('Power for transmitter (dB):',TXPOWS:3:2);
GOTOXY(60,17);WRITELN('or ',HH:2:2);GOTOXY(69,17);
WRITELN('watts');GOTOXY(25,18);
WRITELN('Dowlink EIRP/crx (dB):',SSEIRP:3:2);
GOTOXY(25,19);
WRITELN('Total C/(N+1) (dB):',TCN:3:2);
GOTOXY(50,23);WRITE('ENTER TO CONTINUE');
READLN;END;

```

```
PROCEDURE CAL_PICTURE;
```

```
CONST yMax = 349;
```

```
BEGIN
```

```
WB := 33*yMax DIV 64;
```

```
VA := Trunc(TXPOWS);
```

```
YA := WB - 3*VA*yMax DIV 1280;
```

```
VB := Trunc(ESEIRP);
```

```
YB := WB - 3*VB*yMax DIV 1280;
```

```
WC := ESEIRP - UPOINT;
```

```
VC := Trunc(WC);
```

```
YC := WB - 3*VC*yMax DIV 1280;
```

```
WD := WC - ULPN ;
```

```
VD := Trunc(WD);
```

```
YD := WB - 3*VD*yMax DIV 1280;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WE := WD + SGT;
VE := Trunc(WE);
YE := WB - 3*VE*yMax DIV 1280;
VF := Trunc(UCN);
YF := WB - 3*VF*yMax DIV 1280;
WG := SSEIRP - DNPOINT ;
VG := Trunc(WG);
YG := WB - 3*VG*yMax DIV 1280;
WH := SSEIRP - DLPN - COBO;
VH := Trunc(WH);
YH := WB - 3*VH*yMax DIV 1280;
WI := WH + EGT;
VI := Trunc(WI);
YI := WB - 3*VI*yMax DIV 1280;
VJ := Trunc(RCN);
YJ := WB - 3*VJ*yMax DIV 1280;
VK := Trunc(EB);
YK := WB - 3*VK*yMax DIV 1280;
readln;
END;

PROCEDURE DATA_CH;
BEGIN
OutTextXY(21*xMax DIV 64,14*yMax DIV 64,'Tx.Earth');
OutTextXY(7*xMax DIV 16,14*yMax DIV 64 , 'Satellite');
OutTextXY(37*xMax DIV 64,14*yMax DIV 64 , 'Rx.Earth');
END;

PROCEDURE PICTURE;
VAR LOOP,TRAN_RANG      : INTEGER;
    WATTPOINT,dBPOINT   : STRING;
BEGIN
    xMax := GetMaxx;yMax := GetMaxy;
    AA := 5*xMax DIV 16;
    BA := 11*xMax DIV 16;
    CA := 15;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DA := 5*xMax DIV 16+245;
EA := CA+165;
Rectangle(xMax DIV 4,3*yMax DIV 16
          ,3*xMax DIV 4,63*yMax DIV 64);
Rectangle(5*xMax DIV 16,17*yMax DIV 64
          ,11*xMax DIV 16,61*yMax DIV 64);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,1);
SetUserCharSize(1,1,1,1);
TRAN_RANG := RANGMIN+280;

FOR LOOP := 1 TO 15 DO
BEGIN
  STR(TRAN_RANG,DBPOINT);
  STR(TRAN_RANG DIV 10,WATTPPOINT);
  TRAN_RANG := TRAN_RANG - 20;
  OUTTEXTXY(DA,(CA-1+3*LOOP)*YMAX DIV 64,DBPOINT);
  OUTTEXTXY(EA,(CA-2+3*LOOP)*YMAX DIV 64,WATTPPOINT);
  DATA_CH;
END;

For NA := 1 TO 15 DO

Begin
  Line(AA,(CA+3*NA)*yMax DIV 64,BA,(CA+3*NA)*yMax DIV 64);
  OutTextXY((CA+163),(CA+3*NA-1)*yMax DIV 64,'10');
END;

SetTextStyle(triplexFont, HorizDir,1);
SetUserCharSize(3,5,3,5);
OutTextXY(EA-10,(CA-10)*yMax DIV 64,
'SATELLITE LINK BUDGET PROFILE');
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,1);
SetUserCharSize(1,1,1,1);
OutTextXY(EA-10,(CA-1)*yMax DIV 64,'Watts');
OutTextXY(EA+265,(CA-1)*yMax DIV 64,'dB');

END;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PROCEDURE TO_EXPLAIN;
BEGIN
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,20*yMax DIV 64,'A |Tx.Power');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,23*yMax DIV 64,'B |Max.EIRP');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,26*yMax DIV 64,'C |EeEIRP');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,29*yMax DIV 64,'D |EeEIRP - Lu');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,32*yMax DIV 64,'E |Uplink C/T');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,35*yMax DIV 64,'F |Uplink C/N');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,38*yMax DIV 64,'G |Dnlink EIRP');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,41*yMax DIV 64,'H |DnEIRP - Ld');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,44*yMax DIV 64,'I |Dnlink C/T');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,47*yMax DIV 64,'J |Total C/N');
  OutTextXY(50*xMax DIV 64,50*yMax DIV 64,'K |Total Eb/No');
END;

```

```

PROCEDURE DATA_GR;
BEGIN
  OutTextXY(11*xMax DIV 32, YA-DIF-15, 'A');
  OutTextXY(3*xMax DIV 8, YB-DIF-14, 'B');
  OutTextXY(13*xMax DIV 32, YC-DIF-28, 'C');
  OutTextXY(7*xMax DIV 16, YD-DIF-12, 'D');
  OutTextXY(15*xMax DIV 32, YE-DIF-12, 'E');
  OutTextXY(xMax DIV 2, YF-DIF-30, 'F');
  OutTextXY(17*xMax DIV 32, YG-DIF-30, 'G');
  OutTextXY(35*xMax DIV 64, YH-DIF-20, 'H');
  OutTextXY(39*xMax DIV 64, YI-DIF-20, 'I');
  OutTextXY(5*xMax DIV 8, YJ-DIF-30, 'J');
  OutTextXY(21*xMax DIV 32, YK-DIF-30, 'K');
END;

```

```

PROCEDURE DRAW_GRAPH;
VAR DIF : INTEGER;
BEGIN
  PICTURE;
  DIF := (((-180 - RANGMIN) DIV 20) * 3*YMAX DIV 64);
  MoveTo(5*xMax DIV 16, YA-DIF);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LineTo(11*xMax DIV 32,YA-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(11*xMax DIV 32,YA-DIF,0,360,3);
LineTo(3*xMax DIV 8,YB-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(3*xMax DIV 8,Yb-DIF,0,360,3);
LineTo(13*xMax DIV 32,YC-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(13*xMax DIV 32,Yc-DIF,0,360,3);
SetLineStyle(SolidLn,0,ThickWidth);
LineTo(7*xMax DIV 16,YD-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(7*xMax DIV 16,Yd-DIF,0,360,3);
SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
LineTo(15*xMax DIV 32,YE-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(15*xMax DIV 32,Ye-DIF,0,360,3);
LineTo(xMax DIV 2,YF-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(xMax DIV 2,Yf-DIF,0,360,3);
LineTo(17*xMax DIV 32,YG-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(17*xMax DIV 32,Yg-DIF,0,360,3);
SetLineStyle(SolidLn,0,ThickWidth);
LineTo(9*xMax DIV 16,YH-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(9*xMax DIV 16,Yh-DIF,0,360,3);
SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
LineTo(19*xMax DIV 32,YI-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(19*xMax DIV 32,Yi-DIF,0,360,3);
LineTo(5*xMax DIV 8,YJ-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(5*xMax DIV 8,Yj-DIF,0,360,3);
LineTo(21*xMax DIV 32,YK-DIF);
setfillstyle(2,15);pieslice(21*xMax DIV 32,Yk-DIF,0,360,3);
LineTo(11*xMax DIV 16,YK-DIF);TO_EXPLAIN;
DATA_GR;
READLN;
CLOSEGRAPH;
END;

```

```
PROCEDURE DATA_ERROR;
```

```
BEGIN
```

```
SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,1);
```

```
SetUserCharSize(1,1,1,1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
OutTextXY(18*xMax DIV 54,yMax DIV 2,'GRAPH OVER RANG');
END;
```

```
PROCEDURE VMAX_VMIN(var d_max : integer);
VAR VMAX,VMIN : INTEGER;
    FRA      : INTEGER;
BEGIN
    VMAX := VA;
    VMIN := VA;
    IF VMAX < VB THEN VMAX := VB;
    IF VMAX < VC THEN VMAX := VC;
    IF VMAX < VD THEN VMAX := VD;
    IF VMAX < VE THEN VMAX := VE;
    IF VMAX < VF THEN VMAX := VF;
    IF VMAX < VG THEN VMAX := VG;
    IF VMAX < VH THEN VMAX := VH;
    IF VMAX < VI THEN VMAX := VI;
    IF VMAX < VJ THEN VMAX := VJ;
    IF VMAX < VK THEN VMAX := VK;
    IF VMIN > VB THEN VMIN := VB;
    IF VMIN > VC THEN VMIN := VC;
    IF VMIN > VD THEN VMIN := VD;
    IF VMIN > VE THEN VMIN := VE;
    IF VMIN > VF THEN VMIN := VF;
    IF VMIN > VG THEN VMIN := VG;
    IF VMIN > VH THEN VMIN := VH;
    IF VMIN > VI THEN VMIN := VI;
    IF VMIN > VJ THEN VMIN := VJ;
    IF VMIN > VK THEN VMIN := VK;
    d_max := vmax-vmin;
    RANGMIN := (VMIN DIV 10) * 10;
    FRA      := VMIN MOD 10;
    IF FRA <> 0 THEN RANGMIN := RANGMIN - 10;
    WRITELN(' RANGMIN = ',RANGMIN);
END;
```

```
BEGIN
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clrscr;
INTRO; INSTR;
REPEAT
  clrscr; MENU_SEL;
  CASE CHOICE OF
    1: BEGIN
      CTRANS_PARA; SYSN_PARA; SATELLITE_PARA;
      DNLINK_PARA; UPLINK_PARA; TOTALCN_CAL;
      TSYS_CAL; ESGT_CAL; DNLINK_CAL; UPLINK_CAL;
      GET_VAL; COMPUTE; DISPLAY; CAL_PICTURE; VMAX_VMIN(d_max);
      BEGIN
        IF d_max < 280 THEN
          BEGIN
            INIT; DRAW_GRAPH;
          END
        ELSE
          BEGIN
            INIT;
            PICTURE; DATA_ERROR;
            READLN; CLOSEGRAPH;
          END
        END; END;
    2: BEGIN
      WRITELN('MICROWAVE COMMUNICATION');
      END;
      ELSE
        BEGIN
          WRITE('ARE YOU SURE { <Y>es or <N>o } ?');
          READLN(ARE);
          IF ARE IN ['Y', 'y'] THEN
            EXIT; END; END; {CASE}
        UNTIL FALSE;
      END.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Entry Area

Customer:	บ้านโป่ง	Receives from	กรุงเทพฯ
Model:	CM401		
Modulation type:	QPSK	Mod. Index	2.00
Data rate, R (kbps):	64.00	IF Freq.:	84.800
FEC Coding:	0.50		
Req. Eb/N0 for BER of 10 ⁻⁷ (dB):	6.20		
Margin (dBW):	3.00		

Satellite parameters	Longitude, ls. (deg.):	118.00
EIRP (dBW):		35.50
Saturated Flux Density, SFD (dBW/m ²)		-91.10
G/T (dB/K)		1.00
Output backoff (dB):		3.00
Input backoff (dB):		7.00
C/I (dB)		14.00

Down-link	Location:	บ้านโป่ง	Latitude (deg. N):	13.80
Frequency (MHz):	4,200.00		Longitude, ls. (deg. E):	99.80
Antenna Model:	Prodelin	Size (m.):	3.80	
Antenna Gain (dB):	42.10			
Ant. Elevation, El (deg.)				
Ant. Temperature, Ta (K):	10.00	(corresponding to El.)		
Ambient Temp., To (K):	300.00			
LNB Noise Temp. (K):	45.00	Gain (dB):	60.00	
1 m ² ant. gain (dBW):	37.10			
Feed loss		0.20 dB		
Down-link rain margin		2.00 dB		
Pointing loss		0.50 dB		
Atmospheric loss		0.50 dB		
Miscellaneous losses		0.00 dB		
Boltzmann's constant		-228.60 dBW/K/Hz		
C/Ico		27.00		
C/llobe		24.00		

Up-link	Location:	กรุงเทพฯ	Latitude (deg. N):	13.75
Frequency (MHz):	6,425.00		Longitude, ls. (deg. E):	100.50
Antenna Model:	Prodelin	Size (m.):	3.80	
Antenna Gain (dB):	46.00			
Pointing loss (dB):		0.50 dB		
Uplink rain margin (dB):		0.00 dB		
Atmospheric loss (dB):		0.00 dB		
C/Ico (dB):		27.00 dB		
C/llobe (dB):		24.00 dB		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Up-link Location: นฤมิตร

Frequency (MHz):	6,425.00		
Antenna Model:	Prodelin	Size (m.):	3.80
Antenna Gain (dB):	46.00	Type:	prime focus / offset
		Dist (km):	36,420.00
1. Saturation flux density, SFD			-91.10 dB/m ²
2. Input backoff for the req. output backoff			7.00 dB
3. Operating flux density, OFD			-98.10 dB/m ²
4. Beam spreading loss, BSL			162.22 dB
5. Atmospheric loss			0.00 dB
6. EIRP of the earth station			64.12 dB
7. Free-space loss			199.83 dB
8. Pointing loss			0.50 dB
9. Uplink rain margin			0.00 dB
10. Satellite G/T			-1.00 dB/K
11. C/Ico (dB):			27.00 dB
12. C/lobe (dB):			24.00 dB
13. Uplink losses (7. +8. +9. - 5.)			200.35 dB
14. Uplink interferences (C/Ico - C/lobe)			0.005976334
15. Uplink factor (-UL losses + Sat. G/T - k - B)			-20.25 dB
16. Up-link carrier-to-noise density ratio, C/N0			-68.08 dB-Hz
17. Up-link carrier-to-noise ratio, C/N			18.56 dB
18. C/T at repeater input			-160.52 dB/K
19. C/(N+I)			17.01 dB
20. Eb/No at repeater input			20.02 dB

System factor	8.92	
C/I links	8.91	
Uplink EIRP/crx (dB)	8.81	
Power for transmitter	-7.19 dB (or)	0.19 Watts
input B.O./crx (dB)	33.32 dB	
Output B.O./crx (dB)	29.32 dB	
Downlink EIRP/crx (dB)	6.18 dB	
Total C/(N+I), (dB)	7.74	
Total C/(N0+I0), (dB)	57.26	
Eb/(N0+I0), (dB)	9.20	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โปรแกรมที่นำเสนอในที่นี้ เป็นเพียงรุ่นทดลองที่พัฒนาขึ้นมาจากแนวคิดที่จะศึกษาระบบการเชื่อมโยงดาวเทียม

จากผลการทดสอบโปรแกรมที่นำมาเสนอในที่นี้จะพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง และสามารถนำโปรแกรมนี้ไปใช้งานจริงได้ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรทำต่อไปเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของโปรแกรมนั้นคือ

- เพิ่มโปรแกรมที่คำนวณในไมโครเวฟ
- เพิ่มส่วนที่ทำการกราฟิกของโปรแกรมเพื่อให้อธิบายแต่ละส่วน

หากสามารถพัฒนาโปรแกรม ให้มีความสามารถครบดังกล่าวข้างต้นแล้วจะทำให้สามารถปรับแต่งให้เป็นโปรแกรมช่วยการเขียนการสอนได้ด้วย

หนังสืออ้างอิง

Tri T. Ha, Digital Satellite Communications. Singapore : McGraw-Hill,
1990

Timothy Pratt and Charles W. Bostian, Satellite Communications.
New York : John Wiley & Sons, 1986

G. Maral and M. Bousquet, Satellite Communications Systems. Chichester:
John Wiley & Sons, 1993

ดร.ประสิทธิ์ ทิมพุลิม การสื่อสารดาวเทียม. กรุงเทพฯ : ว.ส.ท.ม 2536

ณรงค์ เหมกรรม การสื่อสารดาวเทียม. กรุงเทพฯ : ศ.จ.ด., 2533

สามารถ คอร์เปอร์เรชั่น, เปิดโลกทัศน์สู่การสื่อสารผ่านดาวเทียม. กรุงเทพฯ

The Complementary Error Function $Q(z)$

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{-\lambda^2/2} d\lambda$$

$$Q(0) = \frac{1}{2} \quad Q(-z) = 1 - Q(z) \quad z \geq 0$$

$$Q(z) = \frac{1}{2} - \text{erf}(z)$$

$$\text{erf}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\lambda^2/2} d\lambda$$

$$Q(z) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}z} e^{-z^2/2} \quad z \gg 1 \quad (z > 4)$$

Table C-1 $Q(z)$

z	$Q(z)$	z	$Q(z)$	z	$Q(z)$	z	$Q(z)$
0.00	0.5000	1.00	0.1587	2.00	0.0228	3.00	0.00135
0.05	0.4801	1.05	0.1469	2.05	0.0202	3.05	0.00114
0.10	0.4602	1.10	0.1357	2.10	0.0179	3.10	0.00097
0.15	0.4404	1.15	0.1251	2.15	0.0158	3.15	0.00082
0.20	0.4207	1.20	0.1151	2.20	0.0139	3.20	0.00069
0.25	0.4013	1.25	0.1056	2.25	0.0122	3.25	0.00058
0.30	0.3821	1.30	0.0968	2.30	0.0107	3.30	0.00048
0.35	0.3632	1.35	0.0885	2.35	0.0094	3.35	0.00040
0.40	0.3446	1.40	0.0808	2.40	0.0082	3.40	0.00034
0.45	0.3264	1.45	0.0735	2.45	0.0071	3.45	0.00028
0.50	0.3085	1.50	0.0668	2.50	0.0062	3.50	0.00023
0.55	0.2912	1.55	0.0606	2.55	0.0054	3.55	0.00019
0.60	0.2743	1.60	0.0548	2.60	0.0047	3.60	0.00016
0.65	0.2578	1.65	0.0495	2.65	0.0040	3.65	0.00013
0.70	0.2420	1.70	0.0446	2.70	0.0035	3.70	0.00011
0.75	0.2266	1.75	0.0401	2.75	0.0030	3.75	0.00009
0.80	0.2169	1.80	0.0359	2.80	0.0026	3.80	0.00007
0.85	0.1977	1.85	0.0322	2.85	0.0022	3.85	0.00006
0.90	0.1841	1.90	0.0287	2.90	0.0019	3.90	0.00005
0.95	0.1711	1.95	0.0256	2.95	0.0016	3.95	0.00004
4.00	0.00003						
4.25	10^{-5}						
4.75	10^{-6}						
5.20	10^{-7}						
5.60	10^{-8}						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้