

การสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศ

วิเศษ ศักดิ์ศิริ*

บทนำ

การออกแบบระบบสื่อสาร สิ่งที่ต้องพิจารณาให้ครบถ้วนอย่างหนึ่งคือ การสูญเสียของพลังงานคลื่นวิทยุในอากาศ การสูญเสียดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการรับส่งลดลง ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยง การสูญเสียดังกล่าวได้ หากแต่มีความจำเป็นที่จะต้องทราบ ถึงผลกระทบของการที่สัญญาณลดทอน ซึ่งในขั้นตอนแรกต้องทราบว่า การลดทอนนั้นมีค่าเท่าใด ในบทความฉบับนี้จะอธิบายพร้อมยกตัวอย่าง การคำนวณการลดทอนโดยสังเขป เพื่อที่จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าการลดทอนจากปัจจัยอื่น ๆ ต่อไปได้

1. การแพร่กระจายคลื่นในอากาศ

การแพร่กระจายพลังงานของคลื่นวิทยุจะเกิดการสูญเสียในอากาศ ขณะที่แผ่กระจายไปในอากาศปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ความหนาแน่นกำลัง ($P_t / 4\pi R^2$) สำหรับกรณีนี้ยกตัวอย่าง สายอากาศไอโซทรอปิกซึ่งพลังงานลดลงเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของระยะทาง $1/R^2$ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น กำหนดให้สายอากาศไอโซทรอปิก เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับ แสดงดังภาพที่ 1 เมื่อจะอธิบายลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นสามารถเขียนได้เป็น

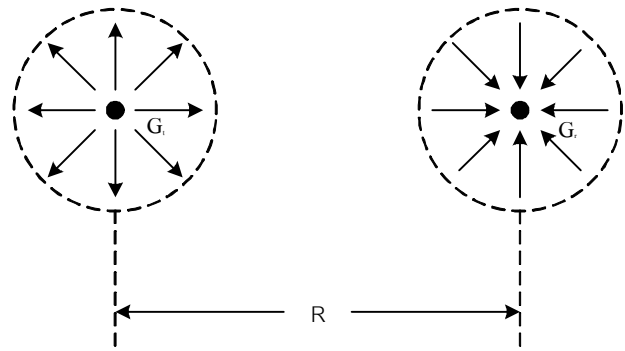
$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

เมื่อ $G_r = G_t = 1$ สำหรับสายอากาศไอโซทรอปิก ในเทอมของการสูญเสียในอากาศ (SL) นิยามได้เป็น SL ในอัตราส่วน

$$\frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right)^2 \quad (2)$$

$$SL \text{ in dB} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right) \quad (3)$$

เราสามารถที่จะยกตัวอย่างได้ตามตัวอย่างที่ 1 ซึ่งจะแสดงการคำนวณค่าการสูญเสีย ของคลื่นวิทยุในอากาศได้ทั้งในหน่วยของกำลังงานและหน่วยของ เดซิเบล



ภาพที่ 1 สายอากาศไอโซทรอปิกสองตัววางห่างกันระยะทางเท่ากับ R

ตัวอย่างที่ 1 คำนวณการสูญเสียในอากาศที่ 4 GHz ระยะทาง 35,860 km

วิธีทำ จากสมการที่ 2

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^9} = 0.075$$

$$SL = \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right)^2 = \left(\frac{4\pi \times 3.586 \times 10^7}{0.075} \right)^2 = 3.61 \times 10^{19} \text{ หรือ } 19 \text{ dB}$$

2. สมการเชื่อมต่อ และการสร้างตารางรวมการเชื่อมต่อ

สำหรับการเชื่อมต่อระบบสื่อสาร สมการกำลังส่งผ่านสามารถคำนวณหา กำลังที่รับ เขียนได้เป็น

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{L_{sys}} \quad (4)$$

นี้เรียกสมการเชื่อมต่อด้วย การสูญเสียของระบบ L_{sys} ชนิดต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย สำหรับตัวอย่าง สายอากาศที่ไม่แมตช์ ค่าคลาดเคลื่อนจากตำแหน่ง การสูญเสียในชั้นบรรยากาศ และการสูญเสีย

ในทางกลับกันสมการ (4) ในหน่วยเดซิเบลหาได้เป็น

$$\begin{aligned} 10 \log P_r &= 10 \log P_t + 10 \log G_t \\ &+ 10 \log G_r - 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right) \\ &- 10 \log L_{sys} \end{aligned} \quad (5a)$$

* อาจารย์ระดับ 7 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ รองคณบดีฝ่ายกิจการพิเศษ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หรือ

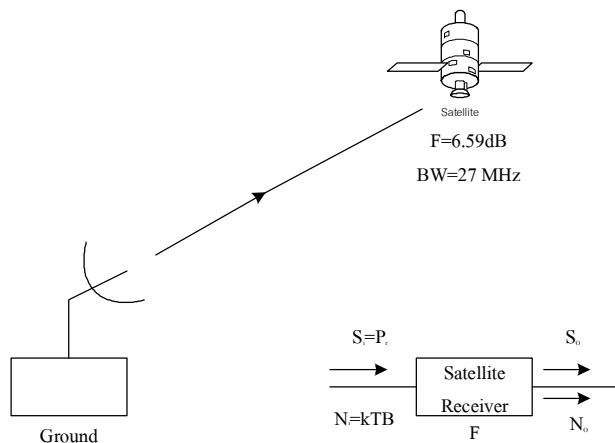
$$P_r = P_t + G_t + G_r - SL - L_{sys} \quad (\text{ใน dB}) \quad (5\text{ข})$$

สำหรับสมการ (5) สามารถจัดลงตารางได้เรียกว่า รวบรวม การเชื่อมต่อ การคำนวณกำลังที่รับได้จากกำลังส่งผ่าน เป็นอัตราขยายของสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับ และการหักล้างกันของการสูญเสียในอากาศ และการเปลี่ยนแปลงการสูญเสีย

ตัวอย่างการคำนวณการสูญเสียพลังงานคลื่นวิทยุในอากาศ

พิจารณาตัวอย่างของ การเชื่อมต่อระบบสื่อสารภาคพื้นดิน ถึงดาวเทียม (uplink) ทำงานที่ 14.2 GHz แสดงดังภาพที่ 2 [1] สถานีภาคพื้นดินส่งกำลังออก 1250 วัตต์ ระยะทางการส่ง 23,074 ไมล์ หรือ 37,134 กิโลเมตร (1 ไมล์เท่ากับ 1.609347219 กิโลเมตร) ที่เครื่องรับที่ดาวเทียมมี noise figure 6.59 dB และความกว้างต่อช่อง 27 MHz ที่ความถี่ ทำงาน 14.2 GHz ในอากาศว่างมีความยาวคลื่น 0.0211 m การสูญเสียในอากาศสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$SL \text{ in dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right) = 207.22 \text{ dB}$$



ภาพที่ 2 การเชื่อมต่อระบบสื่อสารภาคพื้นดินถึงดาวเทียม

แผนผังรวบรวมการเชื่อมต่อเป็นดังนี้

Ground transmit power (P_t)	+30.97 dBW (1250W)
Ground antenna feed loss	-2 dB
Ground antenna gain (G_t)	+54.53 dB
Ground antenna pointing error	-0.26 dB
Margin	-3 dB
Space loss	-207.22 dB

Atmospheric loss	-2.23 dB
Polarization loss	-0.25 dB
Satellite antenna feed loss	0 dB
Satellite antenna gain (G_r)	+37.68 dB
Satellite antenna pointing error	-0.31 dB
Satellite received power (P_r)	-92.09 dB

หรือ -62.09 dBm

อย่างเดียวกัน P_r สามารถหาได้ โดยใช้สมการ 4 ใช้ L_{sys} ซึ่งเป็นการสูญเสียภายใน ของสายอากาศ feed สายอากาศ pointing error การสูญเสียของชั้นบรรยากาศ การสูญเสียจากการโพลาไรซ์ของคลื่น จากตาราง L_{sys} ให้เป็น

$$\begin{aligned} L_{sys} &= -2 \text{ dB} - 0.26 \text{ dB} - 3 \text{ dB} \\ &= -2.23 \text{ dB} - 0.25 \text{ dB} - 0.31 \text{ dB} \\ &= -8.05 \text{ dB} \end{aligned}$$

กำลังที่เครื่องรับ P_r ที่อินพุตของเครื่องรับดาวเทียม สามารถคำนวณเอาต์พุตของเครื่องรับ SNR จากความแตกต่างของตัวประกอบสัญญาณรบกวนเป็น

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \quad (6)$$

ที่เอาต์พุตของ SNR ให้เป็น

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i}{N_i} \frac{1}{F} = \frac{S_i}{kTBF} = \frac{P_r}{kTBF} \quad (7)$$

สำหรับเครื่องรับดาวเทียมมี noise figure 6.59 dB และความกว้างต่อช่อง 27 MHz อัตราส่วนที่อุณหภูมิห้อง (290K) การคำนวณกำลังสัญญาณรบกวนมาตรฐานเป็น

$$\begin{aligned} \frac{S_o}{N_o} \text{ in dB} &= 10 \log \frac{S_o}{N_o} = 10 \log \frac{P_r}{kTBF} \\ &= 10 \log P_r - 10 \log kTBF \\ &= -92.09 \text{ dBW} - (-123.10 \text{ dBW}) \\ &= 31.01 \text{ dB หรือ } 1262 \end{aligned} \quad (8)$$

ค่าดังกล่าวเป็นเอาต์พุต SNR ที่ดี SNR ที่สูงจะเกิดขึ้นในสภาวะอากาศที่เลว และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่กว้าง การสูญเสียในชั้นบรรยากาศ เกิดขึ้นในกรณีของฝนฟ้าคะนอง



และเครื่องรับดาวเทียมจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอากาศ

ตัวอย่างที่ 2 ที่ 10 GHz สถานีภาคพื้นดินส่ง 128 W ไปยังดาวเทียมที่อยู่ห่าง 2000 km สายอากาศภาคพื้นดินมีอัตราขยาย 36 dB มีค่าการสูญเสีย pointing error 0.5 dB สายอากาศดาวเทียม มีอัตราขยาย 38 dB ค่าการสูญเสีย pointing error 0.5 dB สมมติมีการสูญเสียในชั้นบรรยากาศเป็น 2 dB และการสูญเสียขั้วคลื่น เป็น 1 dB คำนวณระดับกำลังอินพุตที่เครื่องรับและเอาต์พุต SNR เครื่องรับดาวเทียมมี noise figure 6 dB ที่อุณหภูมิห้อง ต้องการความกว้าง 5MHz ต่อช่อง และ ขอบ 5 dB ใช้ในการคำนวณ

วิธีทำ ขั้นแรก คำนวณการสูญเสียในอากาศ

$$\lambda_0 = c / f = 0.03m \quad R = 2000 \text{ km}$$

$$\text{Space loss in dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right) = 178.5 \text{ dB}$$

แผนผังรวบรวมการเชื่อมต่อเป็นดังนี้

Ground transmit power (P_t) +21.1 dBW (128W)	
Ground antenna gain	+36 dB
Ground antenna pointing error	-0.5 dB
Margin	-5 dB
Space loss	-2 dB
Atmospheric loss	-2 dB
Polarization loss	-1 dB
Satellite antenna gain (G_r)	+38 dB
Satellite antenna pointing error	-0.5 dB
Received signal power (P_r)	-92.4 dB
	หรือ -62.4 dBm

ที่เอาต์พุต S_o / N_o ในหน่วยเดซิเบล จากสมการที่ 8

$$\begin{aligned} \frac{S_o}{N_o} \text{ in dB} &= 10 \log \frac{P_r}{kTBF} \\ &= 10 \log P_r - 10 \log kTBF \\ &= -92.4 \text{ dBW} - (-130.99 \text{ dBW}) \\ &= 38.59 \text{ dB} \end{aligned}$$

เช่นเดียวกับผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ 4 เขียนใหม่ได้เป็น

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{L_{sys}}$$

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{P_t G_t G_r}{kTBF L_{sys}} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2$$

ในตอนนี้จะได้ข้อมูลพร้อมที่จะคำนวณคือ

$$\begin{aligned} P_t &= 128 \text{ W} \\ G_t &= 36 \text{ dB} = 3981 \\ G_r &= 38 \text{ dB} = 6310 \\ \lambda_0 &= 0.03 \text{ m} \\ k &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \\ T &= 290 \text{ K} \\ B &= 5 \text{ MHz} = 5 \times 10^6 \text{ Hz} \\ F &= 6 \text{ dB} = 3.98 \\ L_{sys} &= 0.5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} + 1 \text{ dB} + 0.5 \text{ dB} + 5 \text{ dB} \\ &= 9 \text{ dB} = 7.94 \text{ dBm} \\ R &= 2000 \text{ km} = 2 \times 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_r &= 128 \text{ W} \times 3981 \times 6310 \times \left(\frac{0.03 \text{ m}}{4\pi \times 2 \times 10^6 \text{ m}} \right)^2 \frac{1}{7.94} \\ &= 5.770 \times 10^{-10} \text{ W} \\ &= -92.39 \text{ dBW} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{S_o}{N_o} \right) = 7245 \text{ หรือ } 38.60 \text{ dB}$$

สรุป

การคำนวณค่าการลดทอนพลังงาน ของคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายในอากาศเป็นสิ่งแรกที่ต้องกระทำเพื่อนำค่าที่ได้เหล่านั้น ไปวิเคราะห์หาผลกระทบ หรือออกแบบระบบให้สามารถรองรับระบบสื่อสารดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบทความ ได้ยกตัวอย่างระบบสื่อสารกันระหว่างดาวเทียมและสมมติสภาวะที่จะเกิดการสูญเสียจากผลกระทบในด้านต่าง ๆ นอกจากนั้นแล้ววิธีตามกระบวนการข้างต้นยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการคำนวณในลักษณะอื่น ที่ใช้การแพร่กระจายคลื่นในอากาศเช่นระบบข่ายงานไร้สายได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] I. A. Getting, "The Global Positioning System," IEEE Spectrum, Dec. 1993, pp 36-47



- [2] E. A. Wolff and R. Kaul, Microwave Engineering and system Application, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [3] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, New York, 1988.

