หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 4

หลักการและทฤษฎีของโทรทรรศน์วิทยุ

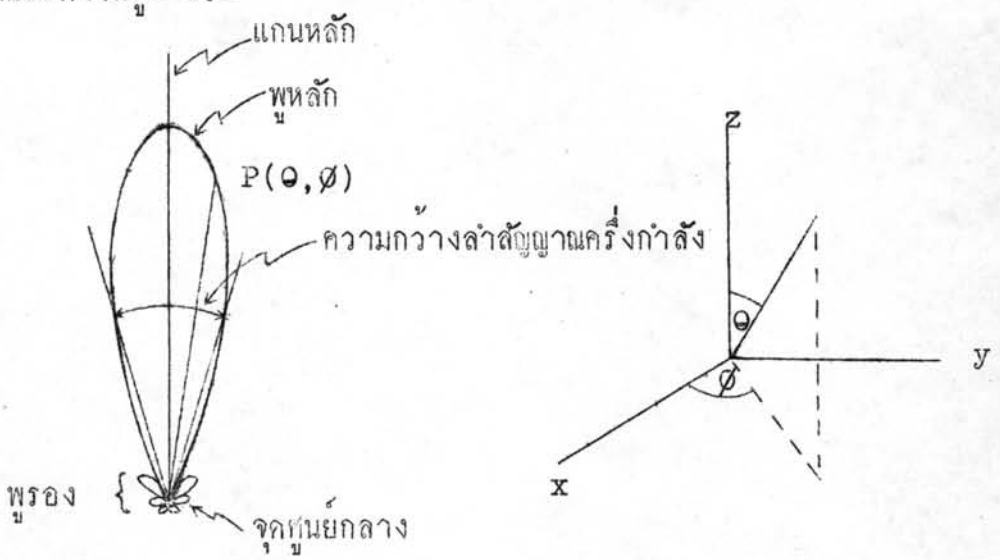
โทรทรรศน์วิทยุเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้สำหรับสังเกตการณ์ในทางดาราศาสตร์วิทยุ (radio astronomy) ทำหน้าที่รับและขยายสัญญาณวิทยุที่ปล่อยออกมาจากวัตถุนอกโลก แล้วเปลี่ยนสัญญาณนั้นให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ขับเคลื่อนแอมมิเตอร์หรือเครื่องบันทึกสัญญาณชนิดอื่นๆให้สามารถทำงานได้ โทรทรรศน์วิทยุมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนดังนี้

1. <u>สายอากาศ</u> (Antenna)

โดยทั่วไปสายอากาศทำหน้าที่รับหรือส่งคลื่นวิทยุ แต่ในทางดาราศาสตร์วิทยุมักใช้สายอากาศทำหน้าที่รวบรวมและรับคลื่นวิทยุที่ปล่อยออกมาจากวัตถุนอกโลก คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเคลื่อนที่มากระทบสายอากาศจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหรือความต่างศักย์ขึ้นในสายอากาศ สัญญาณวิทยุจึงถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วถูกส่งต่อไปยังเครื่องรับ หลักการและพารามิเตอร์ (parameter) ที่สำคัญของสายอากาศมีดังนี้

1.1 <u>แผนภูมิกำลัง</u> (Power pattern) คลื่นวิทยุที่ตกกระทบสายอากาศในทิศทางต่างๆกันจะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในสายอากาศได้ไม่เท่ากัน เฉพาะบางทิศทางเท่านั้นที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงสุด กำลัง (power) ที่เครื่องรับได้รับเมื่อมีคลื่นวิทยุตกกระทบสายอากาศในทิศทางต่างๆแสดงได้ด้วยแผนภูมิเชิงขั้ว (polar diagram) ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่าแผนภูมิกำลัง สายอากาศมีได้หลายชนิดเช่น แบบขั้วคู่ (dipole) แบบเกลียว (helix) แบบยากิ (yagi) และแบบลำโพง (horn) เป็นต้น แต่ละแบบจะมีแผนภูมิกำลังต่างกัน คลื่นวิทยุที่มาจากอวกาศมักมีความเข้มต่ำ โดยทั่วไปจะสร้างจานสะท้อนคลื่นวิทยุรูปพาราโบลา (parabola) เพื่อสะท้อนคลื่นวิทยุไปรวมกันที่จุดโฟกัสแล้วจึงรับคลื่นวิทยุนั้นด้วยสายอากาศซึ่งติดตั้งอยู่ที่จุดโฟกัสอีกทีหนึ่ง

ความเข้มของคลื่นวิทยุที่แต่ละจุดบนระนาบโฟกัสของจานสายอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะเกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) ของคลื่นวิทยุที่จานสายอากาศ แผนภูมิกำลังของจานสายอากาศรูปพาราโบลาเขียนในระบบแกนโพลาร์ (polar coordinate) มีลักษณะดังในรูป 4.1



รูป 4.1 แสดงแผนภูมิกำลังของจานสายอากาศรูปพาราโบลา แกน z แกนทับแกนหลัก ซึ่งเป็นแกนสมมาตรของจาน

แผนภูมิกำลังของจานสายอากาศมีลักษณะเป็นพู (lobe) โดยมีพูหลัก (main lobe) อยู่ตรงกลาง 1 พูและพูรอง (minor lobe) ขนาดเล็ก ๆ หลายพูอยู่รอบ ๆ พูเหล่านี้มีรูปร่างเป็น 3 มิติ ตามทฤษฎีแต่ละพูมีลักษณะสมมาตรรอบแกนสมมาตรของจานพาราโบลา ดังนั้นลักษณะของพูใน 3 มิติก็คือรูปทรงที่ได้จากการหมุนแผนภูมิกำลังในรูป 4.1 ไปรอบแกนหลัก แผนภูมิกำลังมีความสำคัญต่อกำลังแยกของจานสายอากาศ ถ้าพูหลักของแผนภูมิกำลังมีขนาดเชิงมุมแคบ จานสายอากาศจะมีกำลังแยกสูง ขนาดของพูหลักบอกได้หลายวิธี เช่น บอกเป็นความกว้างเชิงมุม (angular width) ของพูหลักตรงตำแหน่งที่ทำให้กำลังของคลื่นวิทยุลดลงครึ่งหนึ่งจากกำลังสูงสุดที่สายอากาศสามารถรับได้ เรียกความกว้างเชิงมุมตรงตำแหน่งนี้ว่า ความกว้างลำสัญญาณครึ่งกำลัง (half-power beam width) ดังที่แสดงไว้ในรูป 4.1 ความกว้างลำสัญญาณครึ่งกำลังมีความสัมพันธ์กับขนาดของจาน

สายอากาศและความยาวคลื่นวิทยุที่รับโดยประมาณดังนี้

$$\Theta \simeq \frac{\lambda}{D} \qquad \text{(Kundu, 1965)} \qquad (4.1)$$

เมื่อ Θ = ความกว้างลำสัญญาณครึ่งกำลัง (เรเดียน)

λ = ความยาวคลื่นวิทยุที่จานสายอากาศรับ (เซนติเมตร)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของจานสายอากาศ (เซนติเมตร)

สำหรับพูรองมีความสำคัญน้อย เพราะกำลังสูงสุดที่พูรองรับได้น้อยกว่ากำลังสูงสุดของพูหลักมาก ดังนั้นจึงพิจารณาแต่พูหลักเป็นสำคัญ (Kundu, 1965)

เนื่องจากแผนภูมิกำลังของจานสายอากาศมีทั้งพูหลักและพูรอง แต่ละพูมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน ในการบอกกำลังแยกของจานสายอากาศใน 2 มิติ จึงอาจบอกเป็นขนาดของมุมตันที่รองรับผลรวมของพูหลักและพูรองได้ เรียกมุมตันนี้ว่า มุมตันของลำสัญญาณรวม (beam solid angle) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} \frac{P(\Theta,\phi)\,d\Omega}{P(\Theta,\phi)_{max}} \qquad (4.2)$$

เมื่อ Ω_A = มุมตันของลำสัญญาณรวม (สเตอเรเดียน)

$P(\Theta,\phi)$ = กำลังที่จานสายอากาศรับได้ในทิศทาง Θ และ ϕ ใด ๆ (วัตต์ต่อสเตอเรเดียน)

$P(\Theta,\phi)_{max}$ = กำลังสูงสุดที่จานสายอากาศรับได้ (วัตต์ต่อสเตอเรเดียน)

$d\Omega$ = $\sin\Theta d\Theta d\phi$ Θ และ ϕ เป็นมุมตามรูป 4.1 มีหน่วยเป็นเรเดียน

ในกรณีที่พิจารณาเฉพาะพูหลักของแผนภูมิกำลังเท่านั้น จะได้ว่า

$$\Omega_M = \iint_{\text{พูหลัก}} \frac{P(\Theta,\phi)\,d\Omega}{P(\Theta,\phi)_{max}} \qquad (4.3)$$

เมื่อ Ω_M = มุมตันของลำสัญญาณพูหลัก (main-beam solid angle) (สเตอเรเดียน)

ถ้ามีแหล่งกำเนิดสัญญาณกระจายอย่างสม่ำเสมอบนท้องฟ้า จำนวนของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (N_r) ที่สายอากาศสามารถแยก (resolve) ได้มีความสัมพันธ์โดยประมาณกับมุมตันของลำสัญญาณพูหลัก ตามสมการ

$$N_r = \frac{4\pi}{\Omega_M} \qquad \text{(Kraus , 1966) (4.4)}$$

1.2 <u>ความสามารถกำหนดทิศทาง</u> (Directivity) เนื่องจากสายอากาศมีความสามารถในการส่งคลื่นวิทยุเหมือนกับการรับคลื่นวิทยุ ความสามารถดังกล่าวในทิศทางต่างๆ มีไม่เท่ากัน ในกรณีที่ใช้สายอากาศทำหน้าที่ส่งคลื่นวิทยุ ความเข้มของคลื่นวิทยุที่ส่งออกไปในทิศทางต่างๆจะเป็นไปตามแผนภูมิกำลังของสายอากาศนั้น โดยจะมีค่าสูงสุดในทิศทางหนึ่งเท่านั้น โดยปกติความเข้มนี้จะมีค่าสูงกว่าความเข้มของคลื่นวิทยุเฉลี่ยทุกทิศทางรอบสายอากาศ อัตราส่วนระหว่างความเข้มสูงสุดกับความเข้มเฉลี่ยนี้เรียกว่า ความสามารถกำหนดทิศทางหรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D = \frac{U(\theta,\phi)_{max}}{U_{ave}} \qquad (4.5)$$

เมื่อ D = ความสามารถกำหนดทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

$U(\theta,\phi)_{max}$ = ความเข้มของคลื่นวิทยุสูงสุด (วัตต์ต่อสเตอเรเดียน)

U_{ave} = ความเข้มของคลื่นวิทยุโดยเฉลี่ยทุกทิศทางรอบสายอากาศ (วัตต์ต่อสเตอเรเดียน)

จากสมการ 4.3 จะเห็นว่ายิ่ง $U(\theta,\phi)_{max}$ มีค่ามากกว่า U_{ave} ค่า D ยิ่งมีค่าสูงขึ้นด้วย แสดงว่าถ้าสายอากาศมีความสามารถกำหนดทิศทางสูง คลื่นวิทยุจะถูกส่งออกไปเป็นลำแคบๆ ในทิศทางหนึ่งมากด้วย ดังนั้นความสามารถกำหนดทิศทางจึงมีความสัมพันธ์กับมุมตันลำสัญญาณรวมซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \qquad (4.6)$$

ถ้าใช้จานสายอากาศรับคลื่นวิทยุ เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุอยู่ในแนวที่จานส่งกำลังออกได้มากที่สุด ($U(\theta,\phi)$ มีค่าสูงสุด) จานสายอากาศจะรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดนั้นได้แรงที่สุดเช่นกัน และถ้าเลื่อนจานให้แหล่งกำเนิดไปอยู่ในแนวที่จานสายอากาศส่งกำลังออกได้อ่อนๆ ($U(\theta,\phi)$ มีค่าน้อยๆ) จานสายอากาศก็จะรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดได้เพียงอ่อนๆเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบ Ω_M และ Ω_A จากสมการ 4.2 และ 4.3 จะได้ว่า

$$\Omega_M \leq \Omega_A$$

ฉะนั้น $N_r \geq D$

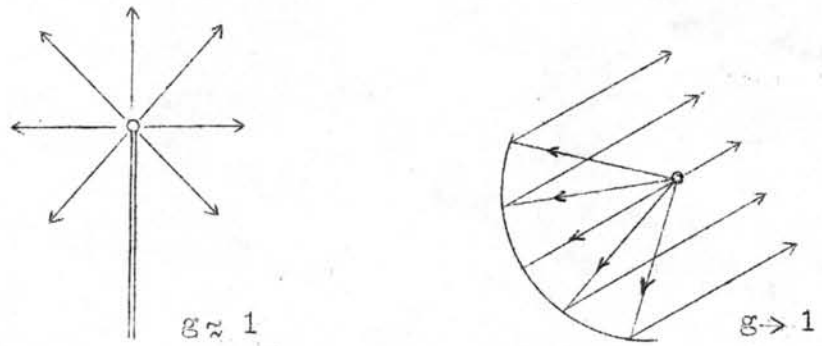
หรืออาจประมาณว่า $N_r \simeq D$ (4.7)

ดังนั้น ความสามารถกำหนดทิศทางจึงใช้บอกกำลังแยกใน 2 มิติของจานสายอากาศได้เช่นกัน (Kraus ,1966)

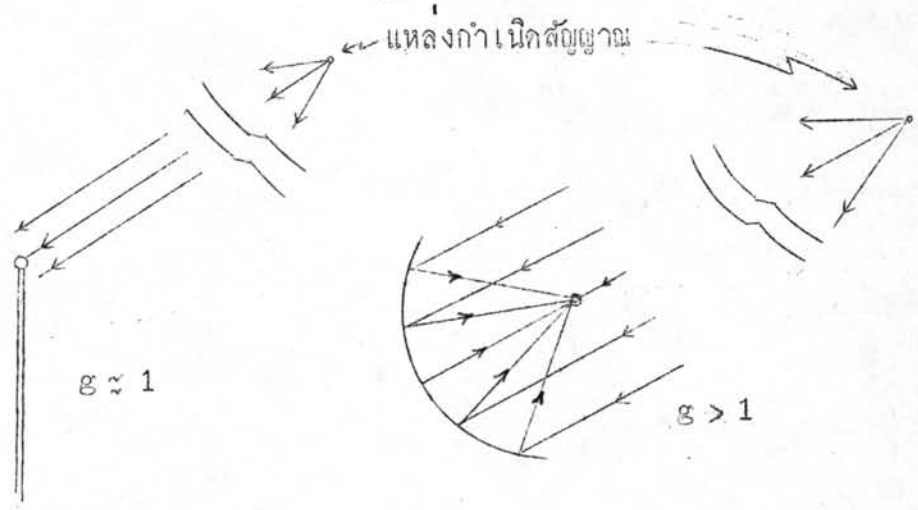
1.3 <u>กำลังขยายของสายอากาศ</u> (Antenna gain)ในกรณีที่สายอากาศทำหน้าที่ส่งคลื่นวิทยุ เมื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศจำนวนหนึ่ง พลังงานจะถูกส่งออกไปจากสายอากาศ ความสามารถในการส่งพลังงานออกไปตามทิศทางที่ต้องการของสายอากาศนี้เรียกว่ากำลังขยายของสายอากาศ ซึ่งกำหนดดังนี้ ถ้าความแรงเฉลี่ยของคลื่นวิทยุที่ส่งออกไปจากสายอากาศในทุกทิศทางเป็น 1 วัตต์ต่อสเตอเรเดียน กำลังรวมของคลื่นวิทยุที่ส่งออกไปจึงมีค่าเป็น 4π วัตต์ เมื่อป้อนกำลัง 4π วัตต์ให้กับสายอากาศ สายอากาศจะส่งคลื่นวิทยุออกมาในทิศทางต่างๆตามแผนภูมิกำลังของจานสายอากาศ โดยที่ความแรงของคลื่นวิทยุในแนวแกนหลักของสายอากาศมีค่าเป็น $W(0,0)$ วัตต์ต่อสเตอเรเดียน($\theta=0$, $\phi=0$) กำหนดกำลังขยายของสายอากาศ (g) เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$g = \frac{W}{\bar{W}}(0,0) \qquad (4.8)$$

เมื่อใช้จานสายอากาศนี้รับคลื่นวิทยุจากท้องฟ้า จานจะรับคลื่นจากทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น ถ้าจานมีกำลังขยาย (g) สูง คลื่นวิทยุที่รับได้จากทิศทางใดทิศทางหนึ่งนั้นก็จะแรงตามกำลังขยายด้วย



ก.



ข.

รูป 4.2 แสดงกำลังขยายของสายอากาศ ก. เมื่อสายอากาศทำหน้าที่ส่งคลื่นวิทยุ
ข. เมื่อสายอากาศทำหน้าที่รับคลื่นวิทยุ

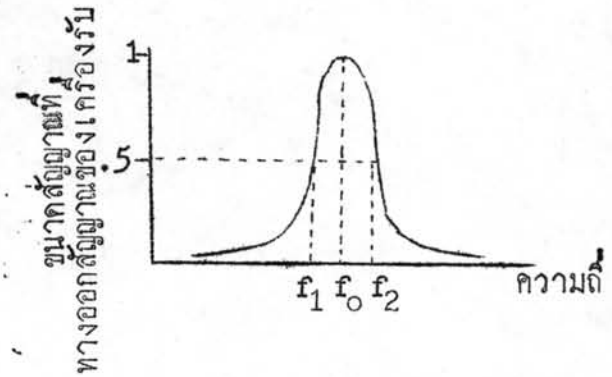
จานสายอากาศจึงทำหน้าที่รวบรวมคลื่นวิทยุ จากทิศทางหนึ่งส่งไปที่ขั้วสายอากาศหรือลำโพงรับสัญญาณ (โปรดดูภาพประกอบที่ 4.2) ซึ่งคล้ายกับว่าคลื่นวิทยุจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่เข้าหาขั้วสายอากาศหรือลำโพงรับสัญญาณหลายทิศทาง

2. <u>เครื่องรับ</u> (Receiver)

คืออุปกรณ์ทางอิเลกโทรนิคทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าความถี่สูงที่รับมาจากสายอากาศให้เป็นความถี่ต่ำ และขยายสัญญาณนั้นให้มีกำลังเพียงพอที่จะทำให้เครื่องแสดงผล (indicating instrument) ชนิดต่าง ๆ เช่น แอมมิเตอร์หรือ

เครื่องบันทึกสัญญาณลงบนกระดาษกราฟทำงานได้ นอกจากนี้เครื่องรับยังทำหน้าที่กำหนดความถี่และช่วงกว้างของความถี่ของคลื่นวิทยุที่จะรับด้วย เครื่องรับที่ใช้ในทางดาราศาสตร์วิทยุมีหน้าที่และหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องรับที่ใช้ในงานอื่นๆ สำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องรับมีดังนี้

2.1 <u>ช่วงกว้างความถี่</u> (Bandwidth) เมื่อคลื่นหลายๆความถี่ต่อเนื่องกันตกกระทบสายอากาศ คลื่นวิทยุเฉพาะช่วงความถี่แคบๆช่วงหนึ่งเท่านั้นที่สามารถผ่านเข้าเครื่องรับได้ โดยเครื่องรับจะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดช่วงความถี่นี้ เครื่องรับจะขยายสัญญาณคลื่นวิทยุที่ความถี่หนึ่งสูงสุด ส่วนความถี่ข้างเคียงจะได้รับการขยายน้อยลง เมื่อเขียนกราฟระหว่างขนาดของสัญญาณที่ทางออกสัญญาณ (output) กับความถี่ของคลื่นวิทยุจะได้กราฟตามรูป 4.3



รูป 4.3 แสดงช่วงกว้างความถี่ของเครื่องรับ

การกำหนดช่วงกว้างความถี่ กำหนดดังนี้ ถ้ามีสัญญาณเข้าเครื่องรับโดยแต่ละความถี่มีความแรงเท่ากัน ขนาดของสัญญาณที่ออกจากเครื่องรับจะโตที่สุดที่ความถี่ f_o ส่วนความถี่อื่นๆที่มากกว่าและน้อยกว่า จะมีขนาดลดลง ช่วงกว้างความถี่ของเครื่องรับ (Δf) คือช่วงความถี่ระหว่างความถี่ที่ขนาดของสัญญาณซึ่งออกจากเครื่องรับลดลงเป็น ครึ่งหนึ่งของขนาดสัญญาณที่ความถี่ f_o จากรูป 4.3 จะได้ว่า $\Delta f = f_2 - f_1$

2.2 <u>กำลังขยายของเครื่องรับ</u> (Receiver gain) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกความสามารถในการขยายสัญญาณของเครื่องรับ โดยกำหนดว่ากำลังขยายเท่ากับอัตราส่วน

ระหว่างกำลังที่ทางออกสัญญาณ (output) กับกำลังที่ทางเข้าสัญญาณ (input) ของเครื่องรับหรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad (4.9)$$

เมื่อ G = กำลังขยายของเครื่องรับ (ไม่มีหน่วย)

P_{in} = กำลังที่ทางเข้าสัญญาณของเครื่องรับ (วัตต์)

P_{out} = กำลังที่ทางออกสัญญาณของเครื่องรับ (วัตต์)

2.3 อุณหภูมิสัญญาณรบกวน (Noise temperature) เมื่อไม่มีสัญญาณจากภายนอกเข้าเครื่องรับที่ทางออกสัญญาณยังคงมีสัญญาณรบกวน (noise) ออกมาอยู่ สัญญาณรบกวนนี้เกิดจากสาเหตุต่างๆภายในเครื่องรับ เช่นความปั่นป่วนของอิเลกตรอนในตัวนำของส่วนต่างๆของเครื่องรับและความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอของอิเลกตรอนซึ่งวิ่งระหว่างขั้วไฟฟ้าในหลอดสูญญากาศเป็นต้น กำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องรับสามารถแทนได้ด้วยกำลังสัญญาณรบกวน (P_r) ซึ่งป้อนเข้าที่ทางเข้าสัญญาณของเครื่องรับ (สมมติเครื่องรับไม่มีสัญญาณรบกวนภายใน) แล้วมีกำลังของสัญญาณที่ทางออกสัญญาณของเครื่องรับเท่ากับกำลังสัญญาณที่เกิดจากสัญญาณรบกวนภายในเครื่องรับ จากทฤษฎีของไนย์ควิส (Nyguist's theory) ซึ่งกล่าวว่าขณะที่ตัวต้านทาน (resistor) มีอุณหภูมิ T_r องศาเคลวิน จะให้สัญญาณรบกวนออกมาในช่วงความถี่ Δf เฮิทซ์ มีกำลัง P_r วัตต์ โดยที่

$$P_r = k\, T_r \Delta f \quad \text{(Bracewell, 1962)} \qquad (4.10)$$

อุณหภูมิ T_r นี้เรียกว่า อุณหภูมิสัญญาณรบกวน (noise temperature) ดังนั้นในการบอกกำลังของสัญญาณรบกวน จึงสามารถบอกได้ในรูปของอุณหภูมิ

โดยทฤษฎีของไนย์ควิส ตัวต้านทานที่มีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องคือ T_o องศาเคลวิน จะให้กำลังในช่วงความถี่ Δf เฮิทซ์ เท่ากับ P_o วัตต์

$$P_o = k\, T_o \Delta f \qquad (4.11)$$

ในทางดาราศาสตร์วิทยุ มักนิยมบอกขนาดของสัญญาณรบกวนในรูปของอุณหภูมิห้วง นั่นคือ

$$P_R = (N-1)\,P_o \qquad (4.12)$$

$$= (N-1)\,K\,T_o\,\Delta f$$

หรือ

$$T_R = (N-1)T_o \qquad (4.13)$$

เมื่อ N = ตัวเลขสัญญาณรบกวน (noise factor) (Bracewell ,1962)