

การติดตามคลื่นวิทยุ
RADIO WAVE TRACKING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปีการศึกษา 2536

การติดตามคลื่นวิทยุ
RADIO WAVE TRACKING

โดย

นายโกวิทย์ โทธิประสาท
นายวิทย์ยุทธ ทิพย์ใส
นายอัศวิน จันทนยิ่งยง

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

ปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับการติดตามคลื่นวิทยุ ในกรณีเครื่องส่ง อยู่ในน้ำทะเลและเครื่องรับอยู่ในอากาศ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดเกี่ยวกับการแพร่กระจาย คลื่นจากเครื่องส่งในช่วงต่าง ๆ ช่วงที่คลื่นเดินทางในน้ำทะเล ช่วงที่คลื่นเดินทางในอากาศ รายละเอียดการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดเครื่องส่ง และ ความถี่ที่ใช้ งานกำลังงานคลื่น และ แพทเทิร์นที่รับได้การจัดสร้างเครื่องส่ง และ ผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี ซึ่งจากการศึกษาสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการติดตามสิ่งมีชีวิต หรือ วัตถุ ได้ทะเลโดยอาศัยคลื่นวิทยุได้

ABSTRACT

This thesis is presented about tracking radio wave propagation of transmitter in the sea, that transmitted through the air to the receiver at the coast station. It consists of the wave propagation from transmitter in any range such as when the wave propagation in the sea, between the sea and the air junction, and when it propagated in the air we must to design the transmitter, frequency that used, it's power and study about the pattern that we received. From this thesis, we can apply to used for following the wildlife of the sea.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี (0)33406

สารบัญ

บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	หลักการและทฤษฎี	2
2.1	ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อคลื่นระนาบเดินทางในตัวนำ	2
2.2	เงื่อนไขรอยต่อเมื่อคลื่นระนาบตกกระทบทำมุมใดกับผิวของรอยต่อ	4
2.3	ค่าการสูญเสียเมื่อคลื่นเดินทางในฟรีสเปซ (free space)	7
2.4	ทฤษฎีสายอากาศ และ แพทเทิร์นของสายอากาศ	7
บทที่ 3	การแพร่กระจายคลื่นจากเครื่องส่งได้ทะลุมายังเครื่องรับบนฝั่ง	11
3.1	ช่วงที่คลื่นเดินทางในน้ำทะเล	11
3.2	ช่วงรอยต่อระหว่างน้ำทะเลกับอากาศ	13
3.3	ช่วงที่คลื่นเดินทางในอากาศไปยังสายอากาศรับ	14
3.4	สรุปหลักการคำนวณ และ แพทเทิร์นของสายอากาศ	14
3.5	สรุปหลักการเดินทางของคลื่น	18
บทที่ 4	การหน่วงเวลาของคลื่นที่เดินทางในน้ำทะเล	25
4.1	บทนำ	25
4.2	การหน่วงเวลาของการแพร่กระจายคลื่น	28
บทที่ 5	เครื่องส่ง ภาครับ และ สายอากาศ	27
5.1	เครื่องกำหนดสัญญาณความถี่ 27 MHz	27
5.2	ภาครับ และ สายอากาศ	47
บทที่ 6	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี	48
6.1	วัตถุประสงค์ และ ขั้นตอนการทดลอง	48
6.2	แพทเทิร์นในแนวระนาบทางทฤษฎี	51
บทที่ 7	การประยุกต์ใช้งานกับวิทยุติดตามปลาพะยูน	58
7.1	ที่มาของโครงการ	58
7.2	ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับปลาพะยูน	58
7.3	การกำหนดขนาดของกำลังเครื่องส่งที่จะนำไปใช้งาน	58
7.4	การนำไปใช้งานและการกำหนดตำแหน่ง	59
บทที่ 8	ปัญหา และ แนวทางการพัฒนาต่อ	62
8.1	ปัญหา	62
8.2	แนวทางการพัฒนาต่อ	62
กิตติกรรมประกาศ		
บรรณานุกรม		

บทที่ 1

บทนำ

การที่เราจะทราบตำแหน่งหรือติดตามพฤติกรรมของวัตถุ หรือ สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในทะเลได้ วิธีการหนึ่งที่เหมาะสมก็คือ การนำเครื่องส่งสัญญาณไปติดไว้ที่วัตถุ หรือ สิ่งมีชีวิตนั้น ๆ ทำให้เราสามารถรับสัญญาณ และ ทำการคำนวณ เพื่อหาตำแหน่งของวัตถุหรือสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ ได้ แต่การที่จะสร้างเครื่องส่งเพื่อให้ส่งคลื่นผ่าน น้ำทะเลมายังเครื่องรับที่ชายฝั่งได้นั้น จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบในหลาย ๆ ด้าน เพราะว่า การแพร่กระจายคลื่นในน้ำทะเลนั้น แตกต่างจากในน้ำจืด หรือ ในอากาศ เนื่องจาก ว่าน้ำทะเลมีสภาพเป็นตัวนำทางไฟฟ้า ทำให้ค่าของการลดทอนของการแพร่กระจายคลื่นมีมากกว่าในอากาศ และ ค่าของการลดทอนนี้จะสัมพันธ์ กับค่าของความถี่ด้วย คือ ยิ่งใช้ความถี่สูงค่าการลดทอนของการแพร่กระจายคลื่น ก็จะมีค่ามากขึ้นแต่ก็มีข้อดีตรงที่ยิ่งมีความถี่สูงความยาวคลื่นก็จะมีค่าน้อย ทำให้ความยาวของสายอากาศส่งมีค่าน้อยไปด้วย จึงก่อให้เกิดความสะดวกในการนำไปติดที่วัตถุหรือสิ่งมีชีวิตนั้นๆ และ ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ความถี่ต่ำ ค่าของ การลดทอนก็จะมีค่าน้อย แต่ความยาวคลื่นจะมากทำให้ความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น จึงไม่สะดวกที่จะนำไปติดกับสิ่งมีชีวิตที่ต้องการ ดังนั้นเราจึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ใช้ ความยาวคลื่น และ ค่าอื่น ๆ ที่จำเป็น เพื่อที่จะ ทำให้ทราบว่าคุณสมบัติช่วงใดที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน ในการรับสัญญาณที่ชายฝั่งเราอาจตั้งจุดรับสัญญาณ 2 จุด หรือ 3 จุด เพื่อที่จะนำค่าที่รับได้มาคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุหรือ สิ่งมีชีวิตที่เราติดตาม ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทต่อ ๆ ไป

บทที่ 2

หลักการ และ ทฤษฎี

หลักการและทฤษฎี ที่ใช้ในการพิจารณากการแพร่กระจายคลื่น จากเครื่องส่งที่อยู่ใต้น้ำทะเล ไปยังเครื่องรับที่อยู่บนฝั่ง ประกอบด้วย ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นระนาบเดินทางในตัวนำ, เงื่อนไขรอยต่อ (Boundary condition) เมื่อคลื่นระนาบเดินทางจากตัวนำตกกระทบ ตั้งฉากกับรอยต่อไปยังอากาศ , หลักการของไฮเกนส์ และ ฟิสิกส์ ออปติคส์ (Physical Optics) และ ค่าการสูญเสีย เมื่อคลื่นเดินทางไปใน free space

2.1 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นระนาบเดินทางในตัวนำ

2.1.1 ตัวนำ และ ไดอิเล็กตริก

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เดินทางไปในตัวกลางใดๆ เราสามารถแยกประเภทของตัวกลางนั้นได้โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของค่า $\sigma / \omega\epsilon$ ดังนี้

$$\text{ตัวกลางไดอิเล็กตริก} \quad \frac{\sigma}{\omega\epsilon} < \frac{1}{100}$$

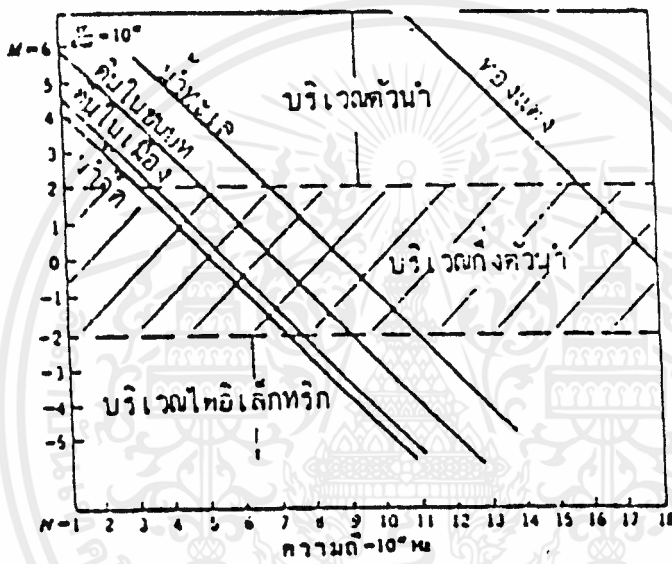
$$\text{ตัวกลางที่เป็นกึ่งตัวนำ} \quad \frac{1}{100} < \frac{\sigma}{\omega\epsilon} < 100$$

$$\text{ตัวกลางที่เป็นตัวนำ} \quad 100 < \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$$

โดยเราจะนิยามค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะใช้ต่อไป ดังต่อไปนี้

ϵ	: ค่า dielectric constant ของตัวกลางการแพร่กระจายคลื่น	(Fm^{-1})
σ	: ค่า conductivity ของตัวกลางการแพร่กระจายคลื่น	(Sm^{-1})
μ	: ค่า permeability ของตัวกลางการแพร่กระจายคลื่น	(Hm^{-1})
f	: ความถี่ที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่น	(Hz)
$\alpha(f)$: ค่าการลดทอนของคลื่น	(dB/m)
$v(f)$: ความเร็วกลุ่มในการแพร่กระจายคลื่น	(m/s)
λ	: ความยาวคลื่น	(m)
Z	: ค่า impedance ของตัวกลางการแพร่กระจายคลื่น	(Ω)
ω	: ความเร็วเชิงมุมของคลื่น มีค่า = $2\pi f$	(rad/s)

โดยเราสามารถพล็อตอัตราส่วนของ $\sigma / \omega\epsilon$ ในรูปของฟังก์ชันของความถี่ สำหรับตัวกลางจำนวนหนึ่งได้ดังในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 อัตราส่วนของ $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ ในรูปฟังก์ชันของความถี่สำหรับตัวกลางที่พบโดยทั่วไป
(พลีเอทแบบ ล็อก-ล็อก)

จากรูป 2.1 จะเห็นว่าที่ความถี่สูงกว่าความถี่ประมาณ 10 MHz น้ำทะเลจะมีค่า $\epsilon_r = 80$ และ ค่าความนำ (σ) = 4 Sm^{-1} ซึ่งอยู่ในบริเวณที่เป็นตัวนำ

2.1.2 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำ และ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้งาน

จากการพิสูจน์ โดยใช้สมการของแมกซ์เวลล์ จะได้ว่า

$$E_y = E_0 \exp\left(-\frac{\omega\mu\sigma}{2}x\right)\exp\left(-j\frac{\omega\mu\sigma}{2}x\right)$$

จากสมการนี้ แฟคเตอร์ของการลดทอนขนาด คือ

$$\exp\left(-\frac{\omega\mu\sigma}{2}x\right)$$

และ ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ความยาวคลื่น } \lambda_c = \frac{4\pi}{f\sigma\mu_0} \quad (\text{m})$$

$$\text{ดัชนีการหักเห } (\eta) = \frac{\sigma}{2\omega\epsilon_0}$$

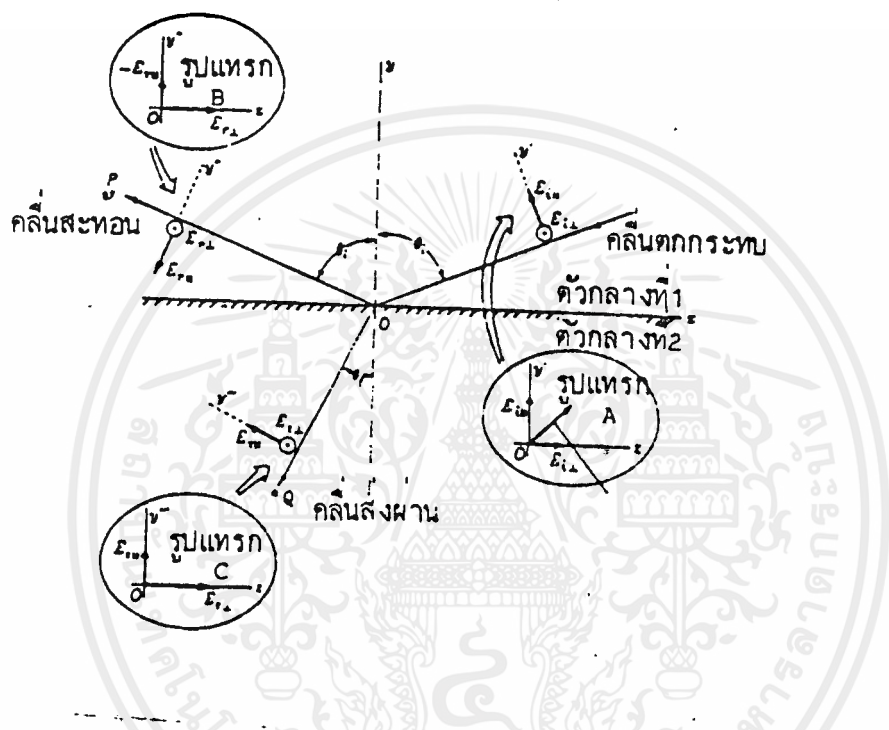
$$\text{อิมพีแดนซ์ } Z_c = \frac{\omega\mu}{\sigma} i \quad \Omega$$

รายละเอียดของการพิสูจน์สมการต่าง ๆ สามารถหาได้จาก [3]

2.2 เงื่อนไขรอยต่อเมื่อคลื่นระนาบตกกระทบตั้งฉาก

กับผิวรอยต่อ จากตัวนำไปยังอากาศ

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาเกี่ยวกับคลื่นระนาบที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น ที่ตกกระทบในทิศทำมุมใดๆ บนรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด ดังรูปที่ 2.2 ในหน้าถัดไป



รูปที่ 2.2 รูปทางเรขาคณิตแสดงระนาบของการตกกระทบ (ระนาบ xy) สำหรับคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นที่เดินทางตกกระทบในทิศทางทำมุมใด ๆ บนรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด สำหรับในรูปเป็นกรณีของโพลาไรเซชันตั้งฉาก

พิจารณาเงื่อนไขรอยต่อเราสามารถแสดงสมการคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ เมื่อโพลาไรเซชันของคลื่นตั้งฉากกับผิวรอยต่อ และกรณีที่โพลาไรเซชันของคลื่นขนานกับผิวรอยต่อ ดังนี้

2.2.1 กรณีโพลาไรเซชันของคลื่นตั้งฉากกับผิวของรอยต่อ

- ถ้าให้ τ_{\perp} : สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นตั้งฉาก
 ρ_{\perp} : สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นตั้งฉาก
 Z_1 : อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 1
 Z_2 : อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 2
 θ_i : มุมตกกระทบที่ผิวของรอยต่อ
 θ_t : มุมส่งผ่านที่ผิวของรอยต่อ
 η_1 : สัมประสิทธิ์การหักเหของตัวกลางที่ 1
 η_2 : สัมประสิทธิ์การหักเหของตัวกลางที่ 2

เราจะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\tau_{\perp} = \frac{2Z_2 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}$$

$$\rho_{\perp} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}$$

$$\theta_t = \sin^{-1} \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right) \sin \theta_t$$

2.2.2 กรณีโพลาไรเซชันของคลื่นขนานกับผิวของรอยต่อ

- ถ้าให้ ρ_{\parallel} : สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นขนาน
 τ_{\parallel} : สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นขนาน
 θ_{ib} : มุมบรูสเตอร์ (ส่งผ่านหมด)

เราจะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\rho_{\Pi} = \frac{Z_2 \cos \theta_1 - Z_1 \cos \theta_2}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2}$$

$$\tau_{\Pi} = \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} (1 + \rho_{\Pi})$$

$$\theta_{c1} = \tan^{-1} \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

2.3 ค่าการสูญเสียเมื่อคลื่นเดินทางใน free space

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในตัวกลางที่เป็น free space และ ไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ เรา จะได้สมการค่าการสูญเสียกำลังงานที่เป็นฟังก์ชันของ ระยะทาง กับ ความยาวคลื่น คือ

$$L_s = 20 \log \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)$$

เมื่อ L_s : Free space loss (dB)

D : ระยะทางที่คลื่นเดินทาง (m)

λ : ความยาวคลื่นในตัวกลาง (m)

2.4 ทฤษฎีสายอากาศ และ แพทเทิร์น ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งเป็นสายอากาศอย่างง่าย และ เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งาน และ ในการพิจารณา จะพิจารณาที่ เฉพาะ สนาม ระยะไกลเท่านั้น

2.4.1 สายอากาศแบบไดโพล

2.4.1.1 ไดโพลจิ๋ว ($l \ll \lambda$)

แม้ว่าไดโพลจิ๋วไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานจริง ๆ แต่ในบางกรณีเนื่องจาก ข้อกำหนดอื่น ๆ จึงทำให้เราจำเป็นต้องใช้ และ เราจะใช้การวิเคราะห์สายอากาศ ไดโพลจิ๋ว เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศแบบอื่น ๆ ต่อไป

ที่บริเวณสนามระยะไกล ($k_r \gg 1$) จะได้ว่า

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ระยะห่างจากสายอากาศในทิศทางทรงกระบอก

$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 : \text{ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น}$$

ในทิศทางทรงกระบอกก็จะได้

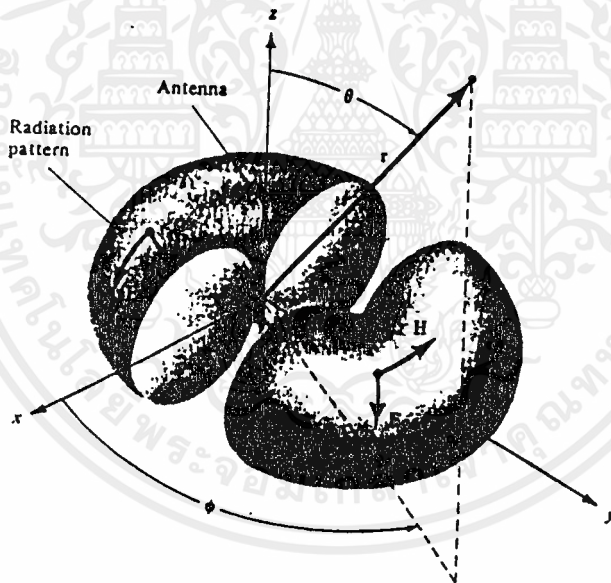
$$E_\theta \approx \frac{j\eta k l_0 I_0 e^{-jk r} \sin \theta}{4\pi r}$$

$$E_r \approx E_\phi = H_r = H_\theta = 0$$

$$H_\phi \approx \frac{j k l_0 I_0 e^{-jk r} \sin \theta}{4\pi r}$$

เมื่อ $\eta \approx Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi}$

และจะมีแพทเทิร์นของการแผ่กระจายคลื่นเป็นดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แพทเทิร์นการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไดโพลจิว



2.4.1.2 ไตโพลขนาดเล็ก ($l \leq \frac{\lambda}{50}$)

ที่สนามระยะไกล เราจะได้

$$E_\theta \approx \frac{jnkI_0 l e^{-jkr} \sin \theta}{8\pi}$$

$$E_r \approx E_\phi = H_r = H_\theta = 0$$

$$H_\phi \approx \frac{jkI_0 l e^{-jkr} \sin \theta}{8\pi}$$

$$R_r = 20\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$$

2.4.1.3 ไตโพลครึ่งความยาวคลื่น

ที่สนามระยะไกล เราจะได้

$$E_{\theta} = \frac{j\eta I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]$$

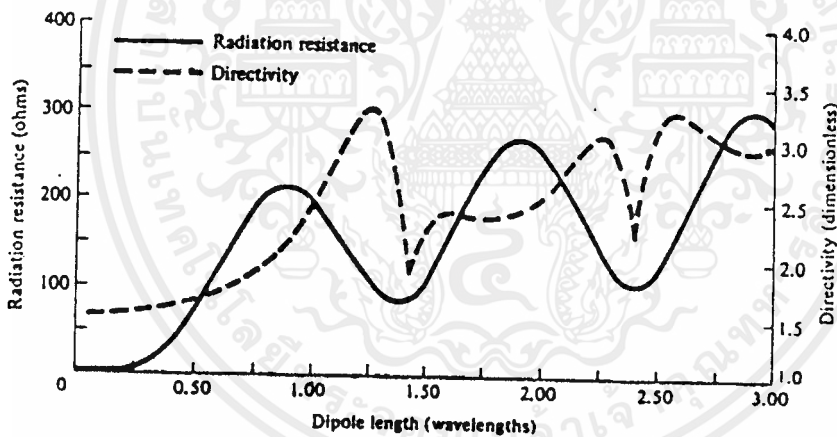
$$H_{\phi} = \frac{jI_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]$$

$$R_r \approx 73\Omega$$

$$D_0 \approx 1.643$$

2.4.1.4 การเลือกใช้สายอากาศไดโพล

ในการเลือกใช้สายอากาศโดยทั่วไป เราจะพิจารณาจากความต้านทาน การแพร่กระจาย คลื่นให้เรโซแนนซ์ กับเอานท์พหุอิมพีแดนซ์ของวงจรที่จะต่อกับ สายอากาศ และไดเรกทิวิตี ซึ่งค่าทั้งสองดังกล่าว มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน ความยาวของสายอากาศ ต่อความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.4



บทที่ 3

การแพร่กระจายคลื่นจากเครื่องส่งใต้ทะเลมายังเครื่องรับบนฝั่ง

จากหลักการ และ ทฤษฎีในบทที่แล้ว เราสามารถสร้างสมการ และ เงื่อนไขต่าง ๆ เมื่อคลื่นเดินทางจากเครื่องส่งซึ่งอยู่ใต้ทะเลมายังเครื่องรับซึ่งอยู่บนฝั่งจะประกอบด้วยการเดินทางของคลื่น 3 ช่วง คือ

- 1) ช่วงที่คลื่นเดินทางในน้ำทะเล
 - 2) ช่วงรอยต่อระหว่างน้ำทะเล กับ อากาศ
 - 3) ช่วงที่คลื่นเดินทางในอากาศ ไปยังสายอากาศรับ
- โดยจะทำการพิจารณารายละเอียดในแต่ละช่วงดังนี้

3.1) ช่วงที่คลื่นเดินทางในน้ำทะเล

เราจะหาค่าการลดทอนของคลื่นที่เดินทางในน้ำทะเล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ที่ใช้งาน ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$\alpha(f) = 54.58 \left\{ \frac{1}{2} \mu \sigma \left[\left(1 + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับในน้ำทะเลจะได้ :

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$

$$\epsilon = 80\epsilon_0 \approx 7.08 \cdot 10^{-10} \text{ Fm}^{-1}$$

$$\sigma \approx 4 \text{ Sm}^{-1}$$

จะได้สมการประมาณ สำหรับ $0 < f < 1 \text{ GHz}$ เป็น

$$\alpha(f) = 0.0345 \sqrt{f} \frac{\text{dB}}{\text{m}}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของน้ำทะเล ลงในกรณีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหัวข้อ

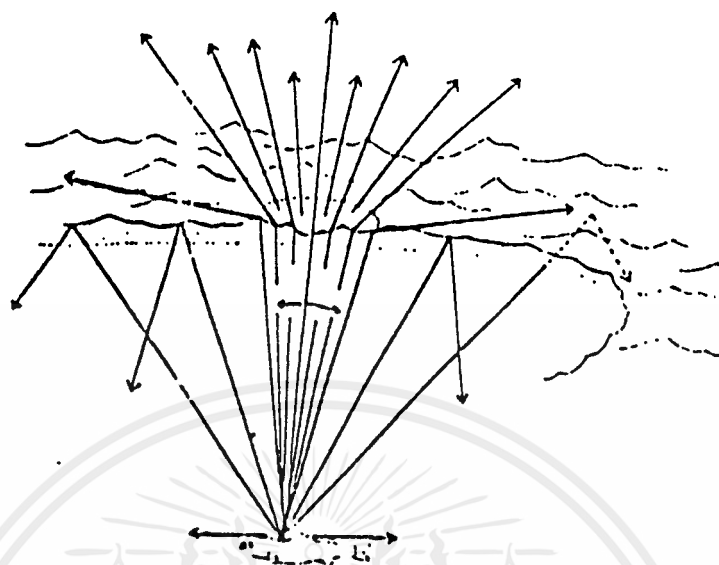
2.1.2 จะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\text{ความยาวคลื่น } \lambda_w \approx \frac{1581}{\sqrt{f}} \text{ m}$$

$$\text{ดัชนีการหักเห } n_w \approx \frac{1.897 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{f}}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์ } Z_w \approx 0.0014 \sqrt{f} \sqrt{i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 คลื่นวิทยุจากเครื่องส่งที่ตัวปลา ซึ่งบางส่วนจะสะท้อนกลับหมด และ บางส่วนจะส่งผ่าน

3.2 ช่วงรอยต่อระหว่างน้ำทะเล กับ อากาศ

เนื่องจากน้ำทะเลมี $\epsilon > \epsilon_0$ ดังนั้น จะมีคลื่นบางส่วนที่ส่งผ่านได้แรงที่สุด ดังแสดงในรูป 3.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า คลื่นจากเครื่องส่งจะถูกส่งผ่านผิวรอยต่อได้มากน้อยเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับบีมวิดท์ (beamwidth) ของสายอากาศ และ ความถี่จากผิวหน้าของเครื่องส่ง เราจะทำการพิจารณา คลื่นที่ตกกระทบตั้งฉากกับผิวของรอยต่อระหว่าง น้ำทะเลและ อากาศ โดยจะนำพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของน้ำทะเล มาแทนลงในทฤษฎีในหัวข้อ 2.2 โดยติดค่าของความถี่ (f) ที่ใช้งานเอาไว้ และเราจะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

ถ้าให้ E_w เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าในน้ำ

E_a เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศ

หากเราพิจารณาว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากตัวนำไปยังอากาศ โดยพิจารณาเงื่อนไข รอยต่อ (Boundary Condition) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$E_a = \frac{(2E_w Z_0)}{Z_w + Z_0} \approx 2E_w$$

$$H_a = \frac{2H_w Z_w}{Z_w + Z_0} \approx 7.45 \cdot 10^{-5} \sqrt{f} \sqrt{i}$$

เมื่อพิจารณากำลังงานที่สูญเสียจะได้ว่า

$$\frac{E_a H_a}{E_w H_w} = \frac{4 Z_w}{Z_0} \approx 1.49 \cdot 10^{-5} \sqrt{f}$$

ดังนั้น จะมีการสูญเสียที่รอยต่อเป็น

$$10 \log(1.49 \cdot 10^{-5} \sqrt{f}) \text{ dB}$$

เราจะได้การสูญเสียต่ำสุดที่ผิวรอยต่อโดยเป็นฟังก์ชันของความถี่ที่ใช้งานคือ

$$10 \log(1.49 \cdot 10^{-5} \sqrt{f}) \text{ dB}$$

3.2.1 กรณีโพลาริเซชันของคลื่นตั้งฉากกับผิวของรอยต่อ

โดยค่าต่าง ๆ ในสมการคือค่านิยามไว้ก่อนหน้านี้อแล้ว เราจะได้สมการของ ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\rho_{\perp} = \frac{377 \cos \theta_i - 1.4049 \cdot 10^{-3} \sqrt{f} \cos \beta}{377 \cos \theta_i + 1.4049 \cdot 10^{-3} \sqrt{f} \cos \beta}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{754 \cos \theta_i}{377 \cos \theta_i + 1.4049 \cdot 10^{-3} \sqrt{f} \cos \beta}$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{8.48 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f}} \cos \theta_i \right)$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{f}}{8.48 \cdot 10^3} \right)$$

3.2.2 กรณีโพลาริเซชันของคลื่นขนานกับผิวของรอยต่อ

$$\rho_{\parallel} = \frac{377 \cos \beta - 1.4049 \cdot 10^{-3} \sqrt{f} \cos \theta_i}{377 \cos \beta + 1.4049 \cdot 10^{-3} \sqrt{f} \cos \theta_i}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \beta} (1 + \rho_{\parallel})$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \left(\frac{8.48 \cdot 10^3}{\sqrt{f}} \right)$$

3.3 ช่วงที่คลื่นเดินทางในอากาศไปยังสายอากาศรับ

ในกรณีที่คลื่นเดินทางไปในอากาศเหนือผิวน้ำไปยังสายอากาศรับที่อยู่บนฝั่งเราสามารถ

ใช้สูตรของ free space loss จากหัวข้อ 2.3 ได้เลย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ บนผิวน้ำ

$$\text{จาก } L_s = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ dB}$$

เมื่อความยาวคลื่นที่ใช้เป็นความยาวคลื่นในอากาศเป็น λ_0 ดังนั้น จะได้ free space loss เป็นฟังก์ชันของระยะทาง (d) และ ความถี่ที่ใช้งาน (f) ดังนี้

$$L_s = 20 \log \left(\frac{4\pi f d}{3 \cdot 10^8} \right) \text{ dB}$$

3.4 สรุปหลักการคำนวณและแพทเทิร์นของสายอากาศ

การคำนวณในเรื่องของการแพร่กระจายคลื่นจากเครื่องส่งได้นำมายังสายอากาศรับบนฝั่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

3.4.1 การคำนวณหากำลังงานของคลื่นที่รับได้

การคำนวณกำลังงานของคลื่นที่รับได้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_r = P_t + G_r - L_w - L_b - L_s + G_r$$

โดยแทนค่า G_r และ G_r ด้วยค่าสูงสุด และ ต่ำสุดของแกนสายอากาศทางด้านส่ง และ ด้านรับตามลำดับ

การคำนวณหากำลังงานที่รับได้นี้ จะใช้เป็นขั้นตอนแรกเพื่อหาขนาดของ เครื่องส่งและความถี่ที่ใช้งานต่อไป โดยมีวิธีการดังนี้

1) กำหนดค่าความลึก ระยะทางที่ใช้งาน และกำลังงานของเครื่องส่ง ซึ่ง ขนาดของเครื่องส่ง สามารถประยุกต์ใช้กับงานได้

2) แทนค่าของ L_b (การสูญเสียที่รอยต่อ) ด้วยค่าที่สูงที่สุด

3) พล็อตกราฟระหว่างกำลังงานที่รับได้ กับ ความถี่ที่ใช้งาน ในกรณีที่ G_r และ G_r มีค่าสูงสุด และ ต่ำสุด

4) จากกราฟ พิจารณาเลือกค่าความถี่ที่ใช้งานที่ให้ค่ากำลังงานที่รับได้สูงสุด ภายใต้เงื่อนไขของ ความถี่ที่ใช้งาน จะต้องสามารถสร้างเครื่องส่งที่มีขนาดเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานได้

การคำนวณหาขนาดของเครื่องส่งทำได้โดยการแทนค่าความถี่ที่ใช้งานลงในสูตร จากนั้นกำหนดค่า P_r ด้วยค่ากำลังงานต่ำสุดที่เครื่องรับสามารถรับได้ แล้วคำนวณหา ค่า P_t โดยแทนค่าการสูญเสียต่าง ๆ ด้วยค่าสูงสุด และ แทนค่าแกนต่าง ๆ ด้วยค่าต่ำสุด

3.4.2 การคำนวณหาแพทเทิร์นในแนวตั้ง

การคำนวณหาแพทเทิร์นในแนวตั้ง ใช้เพื่อหาว่าเมื่อกำหนดระยะห่างจาก ผิวหน้าจนถึง สายอากาศรับคงที่ เราควรใช้สายอากาศรับสูงเท่าใดจึงจะรับสัญญาณ ได้ดีที่สุด และ ใช้พิจารณาว่าค่าความแตกต่างของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศรับ 2 ตัว ซึ่งมีมุม ที่คลื่น เดินทางมายังสายอากาศรับกระทำกับผิวหน้าไม่เท่ากัน

ในการคำนวณเราจะใช้สูตรเดิม แต่แทน G_r ด้วยสมการเพาเวอร์แพทเทิร์น ของ สายอากาศส่ง แทน G_r ด้วยค่าแกนสูงสุดของสายอากาศรับ , แทน L_b ด้วยสมการของ การสูญเสียที่รอยต่อซึ่งขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของคลื่น , แทน L_w ตามระยะทางที่ คลื่น เดินทางในน้ำ , แทน P_t และ L_s ด้วยค่าปกติ คำนวณหา P_r ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุม ที่คลื่นที่เดินทางไปยังสายอากาศรับกระทำกับผิวหน้า

เราจะได้สมการต่าง ๆ ดังนี้

1) สมการเฟสแอมพลิจูดของไดโพลครึ่งความยาวคลื่น

$$U = \frac{\eta |I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos(\pi \cos \theta_1) + 1}{\sin \theta_1} \right]^2$$

2) สมการการสูญเสียที่ผิวรอยต่อ

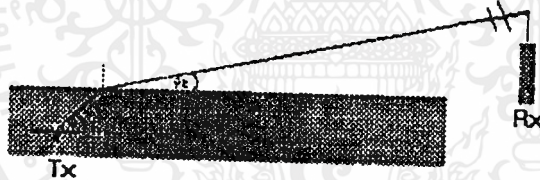
$$L_b = 20 \log(\tau_{\Pi})$$

$$\tau_{\Pi} = \frac{\cos \theta_1}{\cos \beta} (1 + \rho_{\Pi})$$

3) สมการความสัมพันธ์ระหว่าง θ_1 θ_2 และ θ_3

$$\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$$

$$\sin \theta_3 = \frac{\eta_2}{\eta_1} \sin \theta_2$$



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ_1 θ_2 และ θ_3

4) สมการของการสูญเสียในน้ำ

$$L_w = \frac{D}{\cos \theta_2}$$

เมื่อนำสมการ P_r ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ θ_3 มาใช้เครื่องคำนวณโพลาร์พล็อต (polar plot) จะได้แพทเทิร์นในแนวตั้ง

3.4.3 การคำนวณหาแพทเทิร์นในแนวระนาบ

หัวข้อนี้เน้นเป็นการคำนวณที่สำคัญที่สุดในเรื่องของการกำหนดตำแหน่งเครื่องส่ง เนื่องจากการคำนวณค่าของแพทเทิร์นแนวระนาบจะเป็นตัวชี้บอกว่าถ้าเราหมุนสายอากาศรับไปเป็นมุม θ ค่ากำลังงานของคลื่นรับได้ ควรจะเปลี่ยนไปเท่าใด ขั้นตอนในการคำนวณจะคล้ายกับในหัวข้อ 3.4.2 แต่เราจะเปลี่ยน G_r , L_b และ L_w เป็นค่าคงที่โดยการแทนค่ามุมที่คลื่นเดินทางมายังสายอากาศรับกระทำกับผิวหน้า และแทนค่า G_r ด้วยเพาเวอร์แพทเทิร์นของสายอากาศรับ จะได้สมการต่าง ๆ ดังนี้

1) เพาเวอร์แพทเทิร์นของไดโพลครึ่งความยาวคลื่น

$$U = \frac{\eta |I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos(\pi \cos \theta) + 1}{\sin \theta} \right]^2$$

2) มุมที่คลื่นเดินทางกระทำกับผิวหน้า

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{h}{d}\right)$$

3) กำหนดค่าของ G_r , L_b และ L_w โดยการแทนค่า θ_3 ลง ในสมการใน หัวข้อที่แล้วโดยความสัมพันธ์ ระหว่าง θ_1 , θ_2 และ θ_3 ยังคงเหมือนเดิม จากสมการ P_r ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ θ แนวระนาบ โดยใช้เครื่องคำนวณทำโพลาไรซ์พล็อต เราก็จะได้แพทเทิร์นออกมาตามต้องการ

3.4.4 ข้อสังเกต

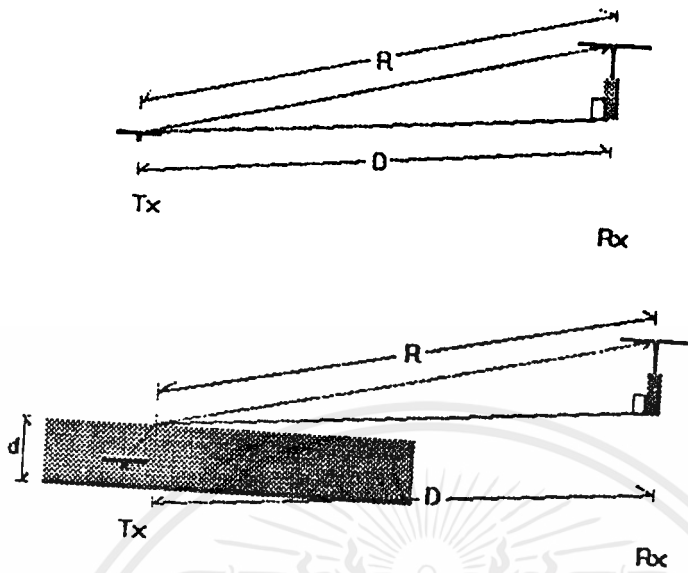
ในการคำนวณในแต่ละหัวข้อ สามารถสรุปข้อสังเกตได้ดังนี้

1) การคำนวณในหัวข้อ 3.4.1 สิ่งที่เราต้องทราบ และ ต้องพิจารณา ก็คือ ขนาดของเครื่องที่สร้างขึ้น จะต้องประยุกต์ใช้กับงานของเราได้ และ ปัจจัยอื่น ๆ เช่น แหล่งจ่ายไฟแก่เครื่องส่งเป็นอย่างไร ซึ่งอายุการใช้งานของเครื่องส่งนั้นจะขึ้นอยู่กับ การใช้กระแส ของวงจรเครื่องส่ง เป็นต้น

- 2) การคำนวณในหัวข้อ 3.4.2 จำเป็นจะต้องพิจารณาค่าของ L_b ด้วยเสมอว่า คลื่นที่ตกกระทบรอยต่อมีโพลาไรเซชันอย่างไร และมีมุมวิกฤต (มุมที่คลื่น สะท้อน กลับหมด) และ มุมบรูสเตอร์ (มุมที่คลื่นส่งผ่านหมด) เป็นอย่างไร
- 3) การคำนวณในหัวข้อ 3.4.3 จะเห็นว่ารูปร่างของแพทเทิร์นที่ได้ขึ้นอยู่กับ ค่าคงที่อื่น ๆ ในสมการ $P_r = P_i + G_r - L_w - L_b - L_r + G_r$ ซึ่งค่าที่เราสามารถควบคุมได้ คือ θ_3 โดยจะ สามารถกำหนดค่าของ h และ d ได้

3.5 สรุปหลักการเดินทางของคลื่น

กรณีของเครื่องส่งที่อยู่ใต้น้ำทะเลกับเครื่องส่งที่อยู่ในอากาศ จะได้ว่าเครื่องส่งที่อยู่ใต้น้ำทะเลจะมีการสูญเสียมากกว่าในช่วงที่คลื่นเดินทางในน้ำทะเลและยังมีการ สูญเสียที่เงื่อนไขรอยต่อเพิ่มเข้ามาอีกด้วย และ จากหัวข้อต่าง ๆ ก่อนหน้านี้ เราสามารถสรุปหลักการเดินทางของคลื่น จากเครื่องส่งที่อยู่ใต้น้ำทะเล มายังเครื่องรับที่อยู่บนฝั่ง ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คลื่นวิทยุที่เดินทางจากเครื่องส่งที่อยู่ในอากาศ และ จากเครื่องส่งที่อยู่ใต้น้ำ

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าคลื่นที่เดินทางจากเครื่องส่งที่อยู่ใต้น้ำทะเลจะมีการสูญเสียมากกว่า คลื่นที่เดินทางจากเครื่องส่งในอากาศ เนื่องจากมีการสูญเสียจากเงื่อนไขรอยต่อที่เพิ่มเข้ามา และการลดทอนคลื่นของน้ำทะเล

จากหัวข้อก่อนหน้านี้ ค่าของการสูญเสียที่รอยต่อ และการลดทอนเนื่องจากน้ำทะเล เมื่อไม่คิดทิศทางของคลื่นที่ตกกระทบกับรอยต่อ จะเห็นได้ว่า ค่า การสูญเสียรวมเป็นฟังก์ชันของความถี่ และความลึกที่ใช้งาน

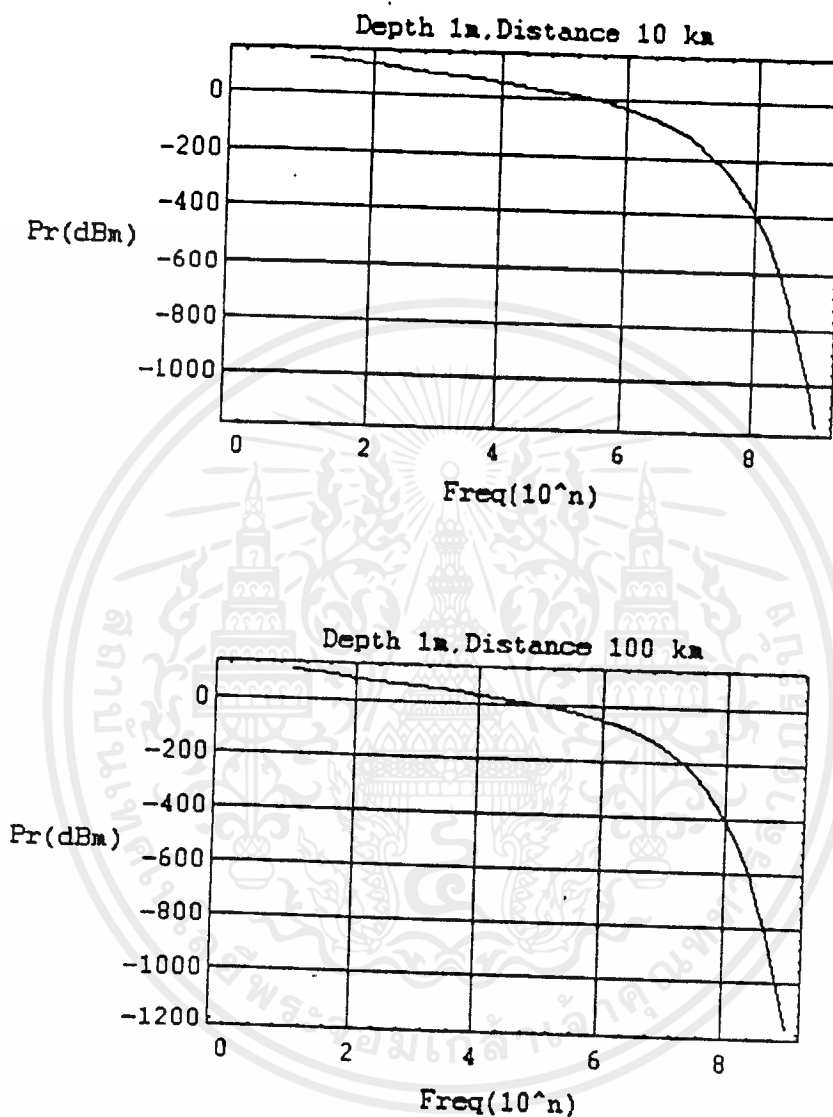
ในการนำมาประยุกต์ใช้งาน เราจะกำหนดความลึกที่ใช้งาน และ ค่ากำลังของสัญญาณที่ต่ำ ที่สุด ที่เครื่องรับสามารถใช้งานได้ แล้วจึงทำการเลือกความถี่ที่ใช้งาน และ ขนาดกำลังของ เครื่องส่ง ซึ่งจากสมการที่ผ่านมา เมื่อเราไม่คิดทิศทาง ตกกระทบ รอยต่อ โดยให้สายอากาศส่ง มีเกน 3 dB และ สายอากาศรับมีเกน 10 dB และ ความลึกมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับระยะทาง ในอากาศเราจะได้สมการสุดท้ายดังนี้

$$P_r = P_t - 0.0345 \sqrt{f} d - 10 \log(1.49 \cdot 10^{-5}) - 20 \log(41.888 \cdot 10^{-9} \sqrt{f} R) + G_t + G_r$$

เมื่อ P_r :	กำลังงานที่รับได้	(mW)
P_t :	กำลังงานของเครื่องส่ง	(mW)
f :	ความถี่ที่ใช้งาน	(Hz)
d :	ความลึกที่ใช้งาน	(m)
R :	ระยะทางจากผิวหน้าจนถึงเครื่องรับ	(m)

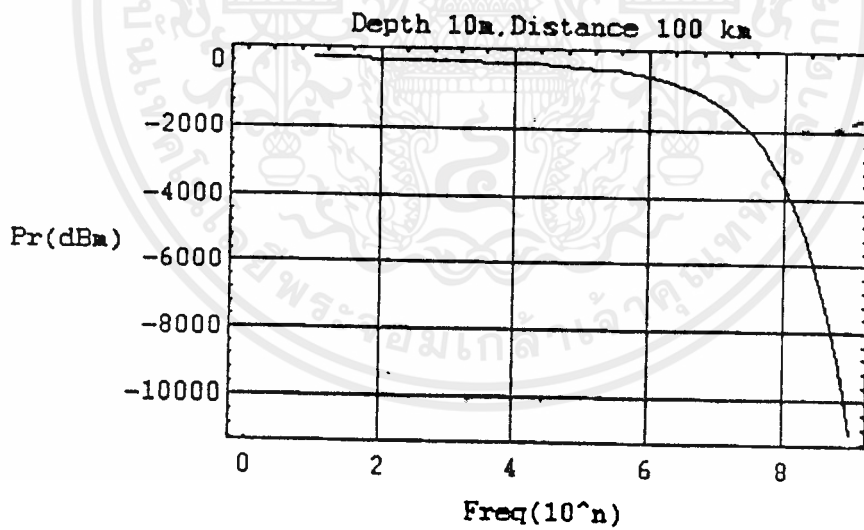
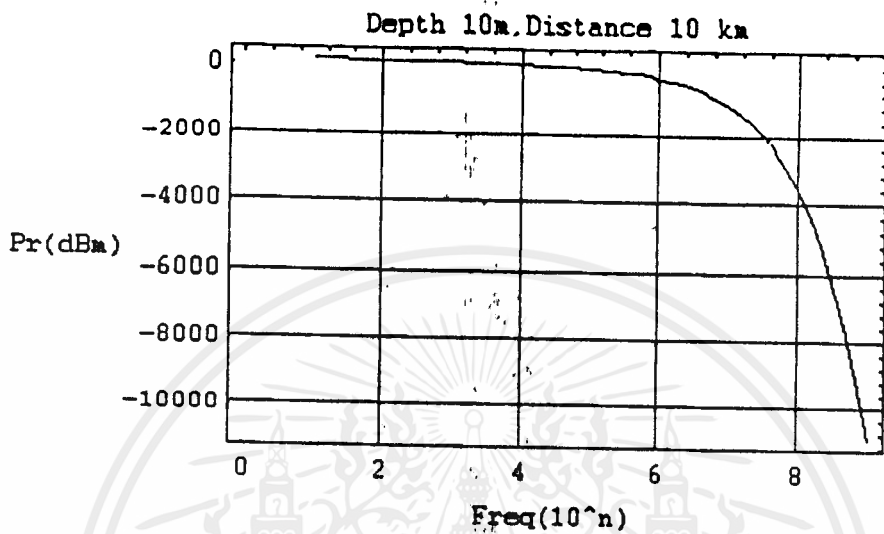
จากสมการที่ได้ เราจะกำหนดค่ากำลังงานเครื่องส่ง ระยะทางจากผิวหน้าถึงเครื่องรับ และ ความลึกที่ใช้งาน แล้วนำมาพล็อตกราฟ ระหว่างความถี่ที่ใช้งาน กับ กำลังงานที่รับได้ เพื่อทำการเลือกความถี่ที่จะใช้งาน ในกรณีที่กำลังงานที่รับได้มีค่าต่ำเกินไปอาจแก้ไขโดยการเพิ่ม กำลังงานเครื่องส่ง ด้วยการเพิ่มภาคขยาย สัญญาณให้มากขึ้นอีก

ในตัวอย่างนี้เราจะลองสมมติว่า จะใช้งานที่ความลึก 1 เมตร และ ระยะทาง 10 กิโลเมตร และ 100 กิโลเมตร กำลังงานของเครื่องส่ง 250 มิลลิวัตต์ เพื่อนำมาพล็อตกราฟเลือกความถี่ที่จะใช้งาน ซึ่งจะได้กราฟดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟระหว่างกำลังงานที่รับได้ กับ ความถี่ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการสุดท้ายที่ใช้งาน เรานำมาเปรียบเทียบกับ การแพร่กระจายคลื่น จาก เครื่องส่งในอากาศ มายังเครื่องรับที่ระยะห่าง $R+d$ (ซึ่งโดยปกติแล้ว $R \gg d$) เราจะได้ว่า

-ในกรณีการแพร่คลื่นจากเครื่องส่งใต้น้ำทะเล

$$P_{rw} = P_t - 0.0345\sqrt{fd} - 10\log(1.49 \times 10^{-5}\sqrt{f}) - 20\log(41.888 \times 10^{-9}\sqrt{R}) + G_t + G_r$$

-ในกรณีการแพร่คลื่นจากเครื่องส่งในอากาศ

$$P_{rw} = P_t - 20\log(41.888 \times 10^{-9}\sqrt{R}) + G_t + G_r$$

หรือ

$$P_{ra} - P_{rw} = 0.0345\sqrt{fd} - 10\log(1.49 \times 10^{-5}\sqrt{f}) - 20\log\left(\frac{R+d}{R}\right)$$

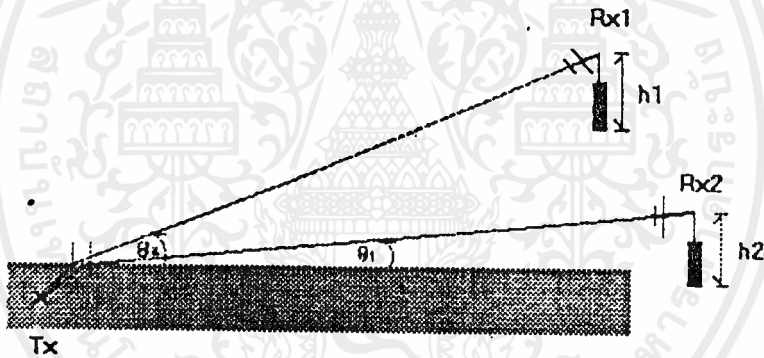
$$P_{ra} - P_{rw} \approx 0.0345\sqrt{fd} - 10\log(1.49 \times 10^{-5}\sqrt{f})$$

นั่นคือ ในกรณีที่เราจะนำไปประยุกต์ใช้ เมื่อเราทราบการใช้งาน ของเครื่องส่ง และ เครื่องรับในอากาศอยู่ก่อนแล้ว เราจะสามารถทำการคำนวณว่า จะนำเครื่องส่ง ไปใช้งานใต้น้ำทะเล ที่ระดับความลึก d ได้หรือไม่ โดยการหาค่าการสูญเสีย $P_{ra} - P_{rw}$ ที่คำนวณได้ออกจากค่าของ ระดับสัญญาณที่รับได้จากเครื่องส่งในอากาศ

บทที่ 4 การหน่วงเวลาของคลื่นในน้ำทะเล

4.1 บทนำ

สำหรับการเดินทางของคลื่นในน้ำทะเลนั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษก็คือ เรื่องของการหน่วงเวลา (delay time) เราจะพิจารณาการตรวจสอบตำแหน่งของเครื่องส่ง โดยใช้สายอากาศรับ 2 ตัว ซึ่งมีความสูงเท่ากัน แต่มีระยะห่างจากผิวน้ำมายังสายอากาศไม่เท่ากัน หรือ ในกรณีกลับกัน คือ ระยะห่างเท่ากัน แต่ความสูงต่างกัน กรณีทั้งสองจะทำให้สายอากาศรับทั้ง 2 ตัวรับคลื่นที่เดินทางมาตกกระทบผิวรอยต่อ ด้วยมุมที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การตรวจสอบตำแหน่งของเครื่องส่ง โดยใช้สายอากาศรับ 2 ตัว ซึ่งมีความสูงเท่ากัน แต่มีระยะห่างจากผิวน้ำมายังสายอากาศรับไม่เท่ากัน และสายอากาศที่มีระยะห่างเท่ากัน แต่ความสูงต่างกัน

จากรูป จะเห็นว่า คลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศรับที่ 1 เดินทางผ่าน น้ำทะเลเป็น

ระยะทาง $\frac{d}{\cos \theta_1}$ และ คลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศรับที่ 2 เดินทางเป็นระยะทาง

$$\frac{d}{\cos \theta_2}$$

4.2 Delay of propagation

จากสูตรการหาความเร็วของคลื่นที่เดินทางในน้ำทะเล

$$v(f) = \left(\frac{4\pi f}{\sigma\mu} \right)^{\frac{1}{2}} = 1581 \sqrt{f} \quad (\text{m/s})$$

ถ้าให้ r : ระยะทางที่คลื่นเดินทางในน้ำทะเล

จะได้ว่า

$$t_p = \frac{r}{v} = \frac{r}{1581 \sqrt{f}} \quad (\text{s})$$

$$\Delta T_\theta = \frac{d}{1581 \sqrt{f}} \left(\frac{1}{\cos \theta_1} \right) - \left(\frac{1}{\cos \theta_2} \right)$$

เมื่อ ΔT_θ คือ ค่าเวลาที่ต่างกันที่คลื่นทั้งสองเดินทางถึงสายอากาศรับทั้งสองตัว

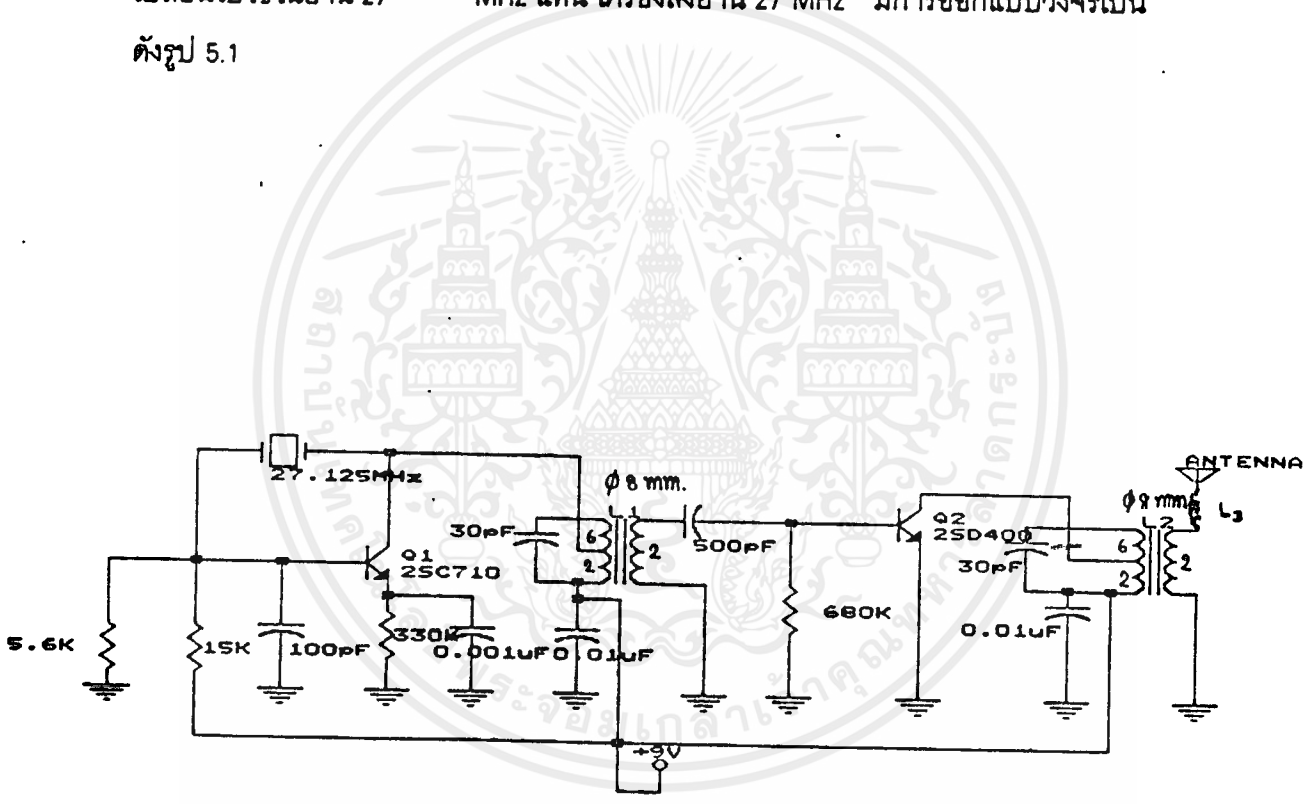
จากสมการของ ΔT_θ จะเห็นได้ว่ามีค่าแปรผันกับความลึกที่ใช้งานในขณะนั้น, ความถี่ที่ใช้งานและ ค่าของมุมตกกระทบทั้งสองค่า ในกรณีที่เรานำเรื่องของการเดินทางของคลื่นผ่านน้ำทะเลมาพิจารณาหาตำแหน่งเครื่องส่ง โดยการใส่สายอากาศรับแบบมีทิศทาง 2 ตัว เมื่อกำหนดตำแหน่งเครื่องส่งโดยการหาจุดตัดนั้น เราไม่จำเป็นต้องนำค่าการหน่วงเวลานี้มา พิจารณา แต่ในกรณีที่เรานำเรื่องของการเดินทางของคลื่นผ่านน้ำทะเล การคำนวณเกี่ยวกับกำลังงานที่ได้รับระหว่างสายอากาศรับทั้ง 2 ตัว การส่งคลื่นน้ำทะเลหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่จะมีค่าการหน่วงเวลาไม่เท่ากันจึงเกิดการผิดเพี้ยน(distortion) เราจำเป็นต้องนำค่า ΔT_θ นี้มาพิจารณาด้วยเสมอ

บทที่ 5

เครื่องส่ง ภาครับ และ สายอากาศ

5.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ 27 MHz

สำหรับเครื่องกำเนิดสัญญาณ เราสามารถเลือกใช้ที่ช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งก็ได้ แต่เหตุผลที่ใช้ความถี่ย่าน 27 MHz ก็เพราะว่าเป็นย่านความถี่ที่ทางราชการอนุญาตให้ใช้กันได้โดยเสรีอยู่แล้วส่วนความถี่ที่กรมป่าไม้ขออนุญาตมาได้นั้นมีค่า 150 MHz แต่เมื่อทำการพิจารณา ค่าลดทอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความถี่ดังกล่าวซึ่งเป็นความถี่สูงนั้น จึงได้เปลี่ยนไปใช้ย่าน 27 MHz แทน เครื่องส่งย่าน 27 MHz มีการออกแบบวงจรเป็นดังรูป 5.1



TRANSMITTER 27MHz

รูปที่ 5.1

จากรูปวงจร จะได้ว่า Q_1 เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) จะผลิต ความถี่ ออกมาตามค่าของคริสตอล คือ 27.125 MHz ความถี่นี้จะถูกขยายด้วย Q_2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขยายกำลัง (Power Amplifier) จะมีกำลังส่งออกประมาณ 250 Mw และสัญญาณก็จะถูกส่งออกไปยังสายอากาศโดยผ่าน L_3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหลดตั้งคอลลี (Loading Coil) ช่วยทำให้ สายอากาศเรโซแนนซ์ (Resonance) กับเอาต์พุตของวงจร และความถี่ที่ย่าน 27 MHz

จากวงจร จะเห็นว่าวงจรในส่วนของ Q_1 จะเป็นวงจรกำเนิดความถี่ และ Q_2 เป็นวงจรขยายสัญญาณ เมื่อพิจารณา L_1 และ L_2 แล้วจะเห็นว่า วงจร ในส่วนนั้นเป็นโหลดของวงจร ซึ่งเป็นวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งถ้าพิจารณาแล้วจะพบว่า โหลด มีค่าความต้านทานต่ำมาก ดังนั้นจึงต้องต่อเพื่อให้แมทช์ได้กับอินพุตของวงจร ในภาคต่อไป ซึ่งเราต้องทำการปรับแกนเฟอริไรท์ ให้มีค่าที่เหมาะสมทั้งของ L_1 และ L_2 เพื่อเอาต์พุตที่ส่งผ่านจะได้มีค่ามากที่สุด การปรับจะต้องปรับที่ แกนเฟอริไรท์ ของ L_1 ก่อน แล้วทำการวัดค่าโวลต์เตจเอาต์พุต ให้ได้ค่าที่มากที่สุด

5.1.1 หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์เป็นวงจรขยายชนิดป้อนกลับ (Feedback Amplifier) โดยจะ ป้อนกลับในลักษณะเป็นลบ สมการอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายป้อนกลับ มีค่าดังนี้

$$A_v = \frac{A_v}{1 - \beta}$$

$$A_v = \frac{A_v}{1 - \beta A_v}$$

จะได้ว่าอัตราขยายหลังการป้อนกลับจะมีค่าลดลงไป และ ถ้าทำการพิจารณาใน ส่วนของเทอม $A_v \beta$ หากเทอม $A_v \beta$ มีค่าเป็นบวก จะหมายถึงการป้อนกลับแบบบวก อัตราขยายวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้น และ จะทำให้เสถียรภาพของวงจรเลวลงมาก หากเทอม $A_v \beta$ มีค่าเป็น 1 จะเป็นผลให้ อัตราการขยายวงจรเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ นั่นก็คือการเกิด ออสซิลเลชันนั่นเอง

สมการป้อนกลับแบบบวกการพิจารณาในรูปของเฟสกับการป้อนกลับสัญญาณป้อนกลับจากเอาต์พุตจะกลับเฟส 180 องศา แล้วป้อนผ่านเข้ามาทางอินพุต อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นสัญญาณที่เข้ามา จะมีทิศทางเสริมกับสัญญาณป้อนกลับหากเฟส ที่ป้อนกลับเข้ามาไม่ตรงกับวงจรรขยาย ก็จะไม่ออสซิลเลต

ออสซิลเลเตอร์สามารถทำงานได้ดังนี้หากป้อนสัญญาณขนาดเล็ก ๆ เข้ามาทางอินพุตของวงจรรขยายสัญญาณ เอาต์พุตที่ได้จะกลับเฟส แล้วมาเสริมกับอินพุตของวงจรรขยาย ทำให้อินพุต มีขนาดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ได้เอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่ยิ่งขึ้นด้วยเมื่อป้อนกลับเข้ามาเสริมอีกจะทำให้ได้เอาต์พุตขนาดใหญ่ขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุด แต่ในความเป็นจริงการเพิ่มขึ้นของ สัญญาณจะถูกจำกัดที่แรงดันค่าหนึ่ง เหมือนการป้อนกลับด้วยค่าแรงดันคงที่วงจรรจึงให้ เอาต์พุตที่ระดับแรงดันเสมือนกับว่าคงที่ นั่นคือการออสซิลเลตนั่นเอง การออสซิลเลตเป็น การเปลี่ยนแปลง ค่าแรงดัน เอาต์พุต จากค่าต่ำสุดไปถึงค่าสูงสุด มักเปลี่ยนในลักษณะคลื่นรูปไซน์ ความถี่ของ ลูกคลื่นสามารถคำนวณหาได้จากค่าคงที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจร

วงจรรออสซิลเลเตอร์โดยทั่วไป มักออสซิลเลตได้ด้วยตัวมันเอง โดยไม่ต้องป้อนสัญญาณ อินพุตเข้าไปเลยแม้แต่น้อย ทั้งนี้เพราะสัญญาณที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดการออสซิลเลต ในขณะที่เริ่มต้นก็คือ สัญญาณรบกวนที่มีอยู่ภายในตัวอุปกรณ์นั่นเอง การออสซิลเลตจะเกิดขึ้น เองตลอดเวลา เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟตรงเลี้ยงวงจร

วงจรรออสซิลเลเตอร์ โดยทั่วไปมักมีการออสซิลเลตที่ความถี่เดียว ทั้งนี้เพราะวงจรรป้อนกลับสัญญาณจากเอาต์พุตมายังอินพุต มักเป็นวงจรที่ประกอบด้วย อุปกรณ์ จำพวก R,L และ C ดังนั้น L และ C ย่อมให้ผลทางด้านเฟส จะมีความถี่ที่เป็นผลทำให้ เฟสที่ได้ กลับมาเสริมกับอินพุต เกิดการออสซิลเลตขึ้นอีกนัยหนึ่งก็คือ สัญญาณ เอาต์พุตที่ผ่านวงจรรป้อนกลับแล้ว จะเป็นผลให้ผลคูณของ A_v เดิม กับค่า β ของวงจรร ป้อนกลับมีค่าเป็น 1 พอดี

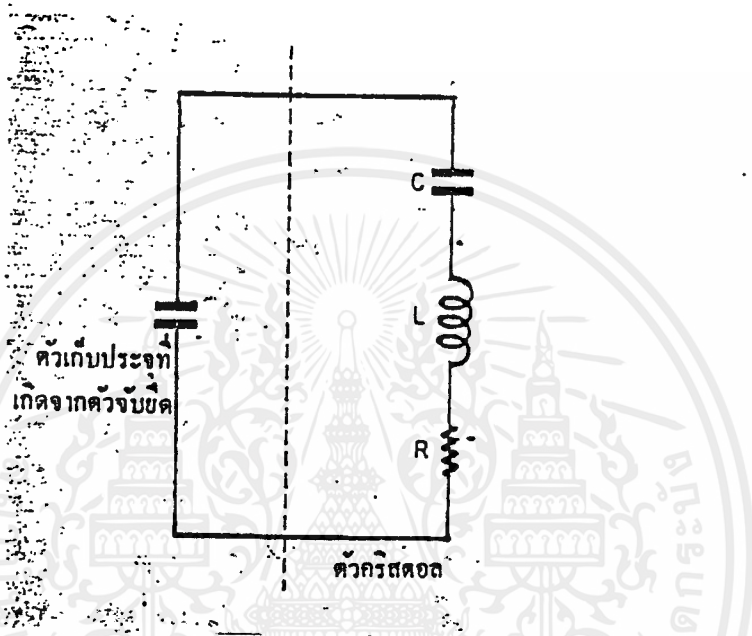
5.1.2 วงจรรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ผลึกควออร์ซ หรือ คริสตอล

วงจรเครื่องส่งที่ต้องการให้เสถียรภาพทางความถี่ของการส่งมีค่าสูงหรือ ความถี่มีค่าคงที่ตลอดเวลา ก็เพื่อให้เครื่องรับสามารถจูนรับสถานีได้ถูกต้อง วงจรรออสซิลเลเตอร์เสถียร ภาพทางความถี่สูง ได้แก่วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ ซึ่งมักใช้เป็นตัวสร้างสัญญาณ ที่มีความถี่มาตรฐานสำหรับตรวจสอบเครื่องมีอบางชนิด หรือสร้างเวลามาตรฐาน ใช้กับ อุปกรณ์ที่ต้องการความเที่ยงตรง เช่นนาฬิกาอิเล็กทรอนิกส์ คริสตอล

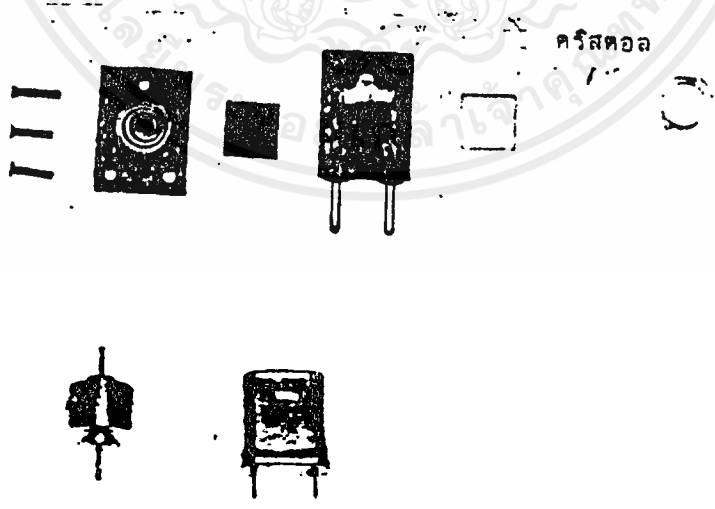
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ผลึกของวัสดุ ซึ่งรวมเรียกว่า เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) มีคุณสมบัติคือจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเมื่อบิดงอ หรือออกแรงกดมัน คริสตอลที่ใช้งานอยู่ทั่วไปมักใช้ ผลึกควออตซ์ เมื่อมีแรงดันตกคร่อม ผลึกควออตซ์จะเกิดการสั่น ความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีค่า เกือบคงที่ ขึ้นอยู่กับความหนาของผลึกนั้น และอาจเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยจากอุณหภูมิรอบ ๆ

คุณลักษณะของคริสตอล คล้ายคลึงกับวงจรเรโซแนนซ์ สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูป 5.2



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของผลึกคริสตอล

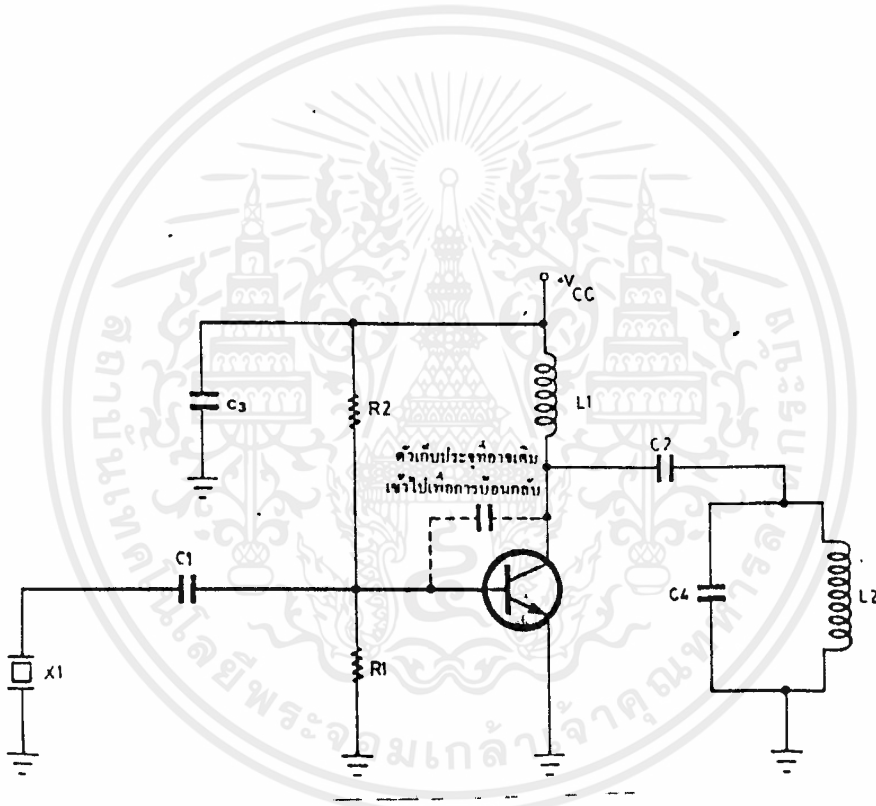


รูปที่ 5.3 โครงสร้าง และ ตัวอย่างรูปร่างของคริสตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

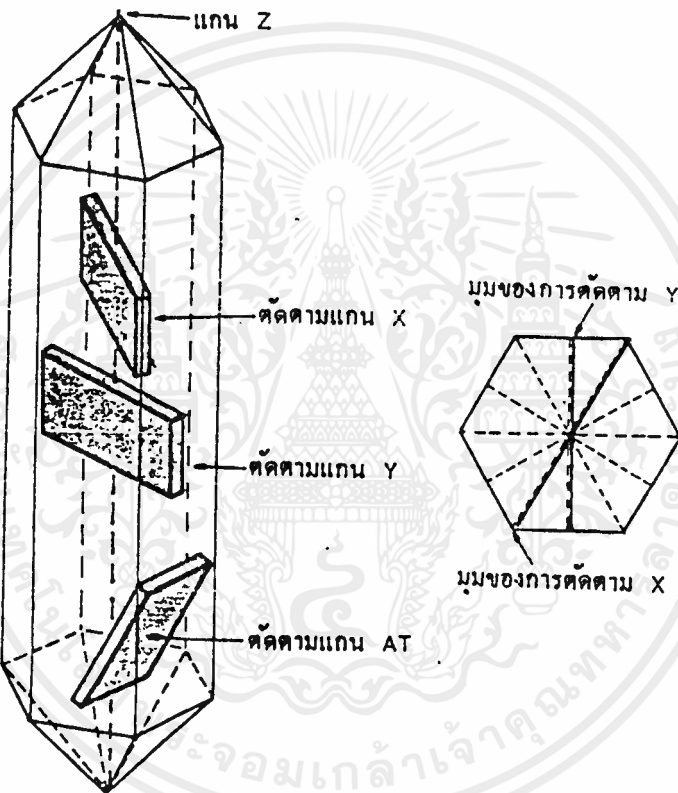
ตัวคริสตอลเป็นเพียงผลึกควอร์ตซ์ที่ต้องอาศัยตัวจับยึดเข้ากับกล่องโลหะ ดังนั้น ในส่วนของตัวจับยึดคริสตอล จึงเกิดลักษณะเหมือนเป็นตัวเก็บประจุที่ขนาดอยู่อีก 1 ตัว ดังวงจร สมมูลในรูป 5.2 แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุ ในผลึกคริสตอลที่ ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ภายนอก จึงมีอิทธิพล ต่อการออสซิลเลตของสัญญาณน้อยมาก

วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้คริสตอลประกอบแสดงดังรูป 5.4 วงจรนี้จะมีลักษณะ เหมือนกับวงจรออสซิลเลเตอร์ชนิดจูนอินพุท-จูนเอาต์พุท แต่แตกต่างกันตรงส่วน อินพุท ที่เพิ่มอุป กรณ์แทนจูนอินพุท ก็คือตัวคริสตอลนั่นเอง



รูปที่ 5.4 วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ (วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน)

วงจรมอดูลออสซิลเลเตอร์มีคุณสมบัติเด่นคือ จะให้เก็ยรภาพทางความถี่สูง จากรูป 5.4 จะเห็นว่าส่วนของเอาท์พุทก็ยังคงเป็นวงจรรุ่น ซึ่งอาศัยตัวคริสตอลเป็นตัวกระตุ้นให้ ขาเบสทำงาน ในบางวงจร ค่าตัวเก็บประจุระหว่างเบส-คอลเลคเตอร์ที่อยู่ภายในตัว ทรานซิสเตอร์ ไม่มีผลต่อการออสซิลเลตเลย ผลึกควออตซ์เป็นวัสดุจำพวกซิลิกอนไดออกไซด์ที่มี ลักษณะเหมือนแก้ว ผลึกจะมีลักษณะเป็น 6 ด้านเหมือนปริซึม ผลึกควออตซ์ที่ใช้งานจะถูกตัด ด้วยแกน 3 แกน ดังรูป 5.5



รูปที่ 5.5 ผลึกควออตซ์ และการตัดผลึก

จากรูปแกน X เป็นแกนที่ลากระหว่างมุม 2 มุมของแท่งปริซึม ส่วนแกน Y เป็นแกนที่ลากตั้งฉากกับผิวหน้า ของตัวคริสตอล นั่นคือหากตัดคริสตอลตาม แนวผลึก จากมุมหนึ่งไปยัง อีกมุมหนึ่งที่อยู่ตรงข้าม ก็เรียกว่าการตัดแบบ X (X-cut) ผลของการตัดแบบนี้จะทำให้ ความถี่ที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความถี่จะลดลง แต่หากตัดในแนวแกน Y จะทำให้ความถี่ในการสั่นสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะตัดในแนวแกน X หรือแกน Y ก็จะมีผลทำให้ความถี่ของการสั่นของคริสตอลขณะเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิได้มาก ดังนั้นเราจึง ต้องหาทางตัด ในแนวแกนใดแกนหนึ่ง ที่ทำให้ผลของการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิน้อยที่สุด แกนที่ใช้ในการตัด คือแกน AT ดังในรูป 5.5 หรือ เราอาจตัดในแนวแกนอื่น ๆ ก็ได้ ในแต่ละระนาบของการตัดจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงช่วงความถี่ต่ออุณหภูมิ ตลอดจนความถี่ ฮาร์โมนิคที่ใช้งานแตกต่างกัน

ส่วนความหนาของแผ่นคริสตอล จะเป็นตัวกำหนดความถี่ของการเรโซแนนซ์ยิ่งแผ่นคริสตอลบางความถี่ของการเรโซแนนซ์ยิ่งมีค่าสูง คริสตอลให้ความถี่ได้สูงประมาณ 15 MHz - 50 MHz หากต้องการความถี่สูงกว่านี้ ก็มักใช้ฮาร์โมนิกของสัญญาณนั่นเอง

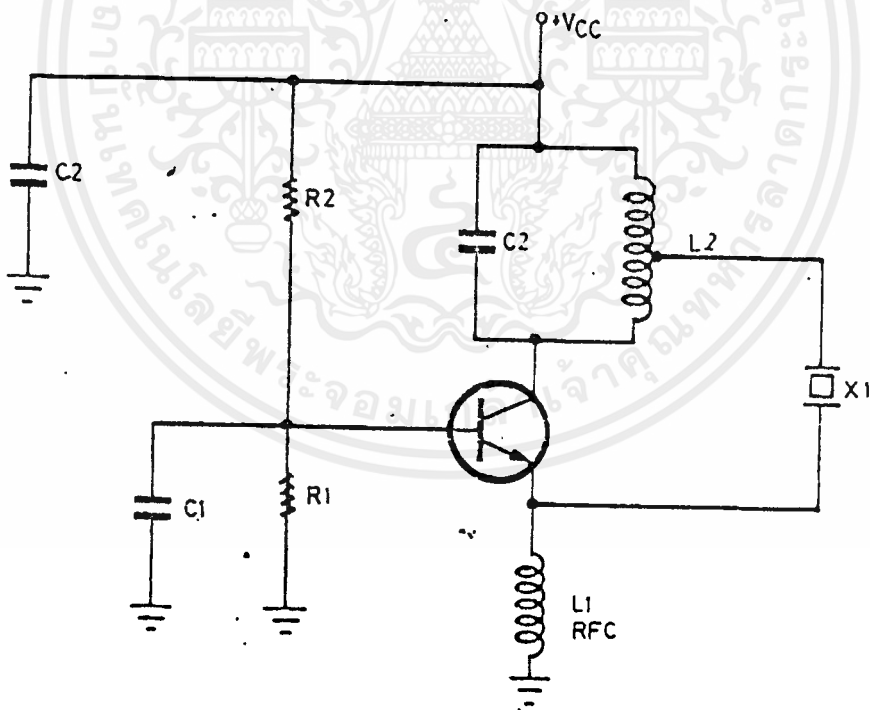
คริสตอลจะทำงานที่ระดับพลังงานต่ำ หากขณะใช้งานเป็นตัวกระตุ้น เมื่อป้อนกลับระหว่างอินพุทกับเอาต์พุทจะต้องไม่ให้ระดับแรงดันตกคร่อมตัวมัน มีค่ามากเกินไป คริสตอลจะให้ค่าความถี่ผิดพลาดและ จะเกิดความร้อนกับตัวมันมากเกินไปซึ่งอาจก่อให้เกิดความ เสียหายได้

การที่เราใช้คริสตอลกระตุ้นวงจรออสซิลเลเตอร์มีเหตุผลคือ เพื่อให้ได้ความถี่ที่มีค่าเสถียรภาพสูงซึ่งสามารถหาได้จากการกำหนดค่า Q ของตัวคริสตอล และสัมประสิทธิ์การแปรผันตามความถี่กับอุณหภูมิ ค่า Q ของคริสตอลมักมีค่าสูงกว่าค่า Q ของวงจรจูน ที่ประกอบด้วย RLC ถึง 100-1000 เท่า คริสตอลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีค่า Q ประมาณ 5000-30000

ตัวอย่างของวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์จากรูป 5.4 เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์แบบหนึ่งซึ่งทำงานในลักษณะวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ตัวคริสตอลจะต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตัวคริสตอลที่ใช้มีหน้าที่ควบคุมความถี่ แต่ในวงจรดังรูป 5.6 ตัวคริสตอลจะทำงาน ในลักษณะต่ออนุกรม

ดังนั้นการเรโซแนนซ์จึงเกิดในสภาวะเรโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ผ่านตัว คริสตอลป้อนกลับไปยังภาคอินพุท (วงจรด้านเบสอิมิตเตอร์) ที่ความถี่อื่นซึ่งไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวคริสตอลจะมีค่าสูงมาก ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุทจึงไม่อาจ ป้อนกลับมายังอินพุทได้ แต่เมื่อสัญญาณที่ความถี่เรโซแนนซ์เกิดขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของ ตัวคริสตอลจะลดต่ำลงมาก ทำให้สัญญาณที่ความถี่นี้สามารถป้อนกลับไปยังอินพุทได้

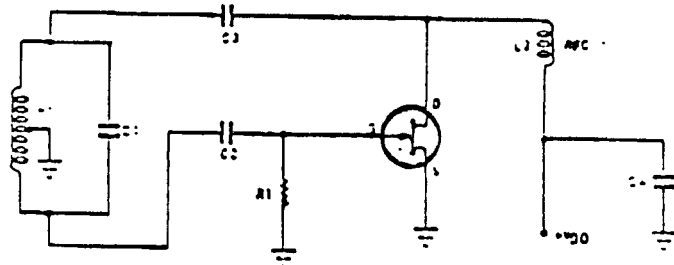
วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ที่นิยมใช้กันอีกแบบหนึ่งแสดงดังรูป 5.7 ลักษณะของวงจร นี้จะให้ค่าเอาต์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรต่ำกว่าวงจรใน นอกจากนี้ยังใช้ในวงจรเครื่องส่ง บางชนิดอีกด้วย การต่อวงจรในรูป 5.7 นี้ จะเหมือนกับ วงจรโคลพิทท์ออสซิลเลเตอร์ (Colpitt Oscillator) โดยมีตัวเก็บประจุที่เป็นวงจรสมมูลคือ C_x และ C_{1n} โดย C_x เป็นตัวเก็บ ประจุที่เกิดจากตัวคริสตอล ส่วน C_{1n} คือตัวเก็บประจุอินพุทของวงจรทรานซิสเตอร์ เอาต์พุทที่ซาคอลเลคเตอร์จะต่อกับตัวเหนี่ยวนำเป็นโหลด หรือจะใช้ตัวต้านทานเป็นโหลดก็ได้



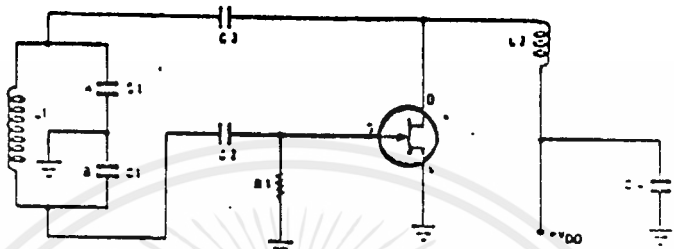
รูปที่ 5.6 วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ (วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม)

5.1.3 วงจรขยาย

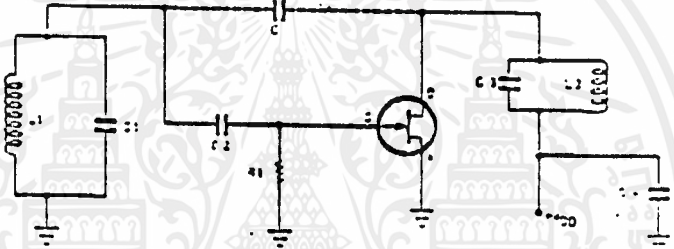
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. วงจรที่แบ่งอัตร่างบวกร

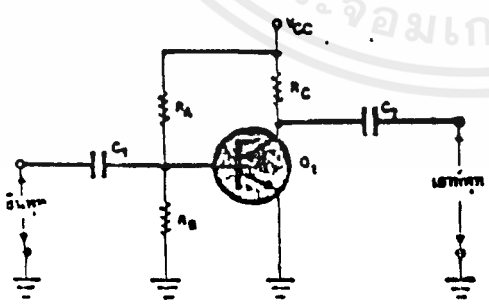


2. วงจรที่แบ่งอัตร่างบวกร

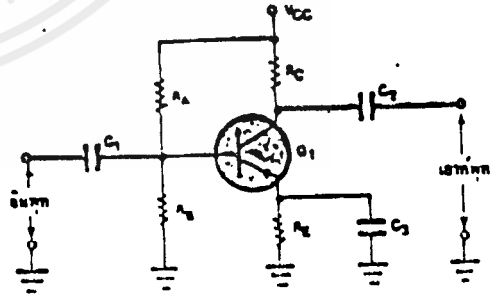


3. วงจรที่แบ่งอัตร่างบวกร

รูปที่ 5.7



รูปที่ 5.8 วงจรขยายเบื้องต้น



รูปที่ 5.9 วงจรขยายเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูป 5.1 นั้น เป็นวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมโดยมีโหลดเป็นวงจรเรโซแนนซ์ C_6 มีหน้าที่ป้องกันกระแสไฟตรงจากวงจรขยายไหลออกไปยังวงจรภาคข้างเคียง และในทางกลับกัน ก็จะเป็น ตัวกันกระแสไฟตรงจากวงจรข้างเคียงไหลเข้ามารบกวนการทำงานของวงจรขยาย สัญญาณอินพุตจะถูกป้อนเข้าระหว่างเบส และ กราวด์คร่อมตัวต้านทาน R_4 ส่วนสัญญาณเอาต์พุตจะออกที่ขาคอลเลคเตอร์และกราวด์ ซึ่งจะพิจารณาวงจรขยาย แบบอิมิตเตอร์ร่วมต่อไป

5.1.3.1 การหาค่าแรงดันสัญญาณเอาต์พุต

วิธีการวิเคราะห์วงจรขยายแบบง่าย ๆ แบบหนึ่งก็คือ การเขียนกราฟแล้วคำนวณหาสัญญาณเอาต์พุตเพื่อดูขนาดของสัญญาณซึ่ง ยังสามารถบอกค่าความเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณได้อีกด้วย แต่สัญญาณอินพุตที่นำมาใช้จะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะเขียนกราฟได้

จากวงจรขยายดังรูป 5.8 ค่าความสัมพันธ์ของแรงดัน V_{CE} กับกระแส I_C สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$V_{CE} = V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{CE} กับกระแส I_C ซึ่งหาจากสมการ ข้างบน เป็นสมการเชิงเส้นจึงเขียนกราฟในลักษณะคุณสมบัติทางคอลเลคเตอร์ ($I_C V_{CE} I_B$) ได้ดังนั้นเพื่อให้ง่าย ต่อการพิจารณาคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ขณะอิมิตต์ และที่คัทออฟ จากกราฟ เมื่อทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะคัทออฟ จะทำได้ดังนี้

$$I_C \approx 0$$

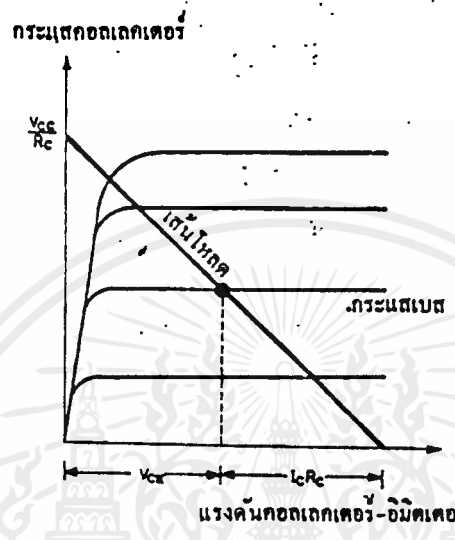
$$V_{CE} \approx V_{CC}$$

เมื่อทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิมิตต์ จะได้ดังนี้

$$V_{CE} \approx 0$$

$$I_C \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$$

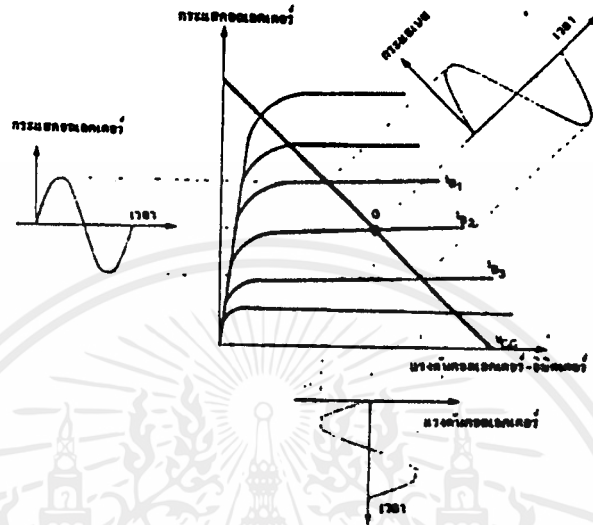
เมื่อเขียนกราฟของ V_{CE} และ I_C โดยคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์จะ ได้กราฟเส้นตรง ซึ่งเรียกว่าเส้นสมการโหลด



รูปที่ 5.10 การเขียนเส้นสมการโหลดของวงจรรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

จากรูป 5.10 ค่าของ V_{CE} และ I_c ต้องถูกหามาก่อน เมื่อเขียนเส้น สมการ โหลดนี้จะได้เส้นสมการโหลดตัดกับเส้นสมการของค่ากระแส I_B ต่าง ๆ ซึ่งเมื่อทราบค่า I_B ก็สามารถหาค่า I_c และแรงดัน V_{CE} ได้

ในขณะที่ I_{B2} เป็นกระแสเบส ในภาวะไม่มีสัญญาณ กระแสนี้จะมีค่าเท่ากับ $\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$ แอมป์ จุดตัดของเส้น I_{B2} กับสมการโหลด จะเป็นจุดทำงานของวงจรขยาย เมื่อป้อนสัญญาณ ไฟสลับเข้า จะเกิดการแกว่งของสัญญาณเอาต์พุตดังรูป 5.11

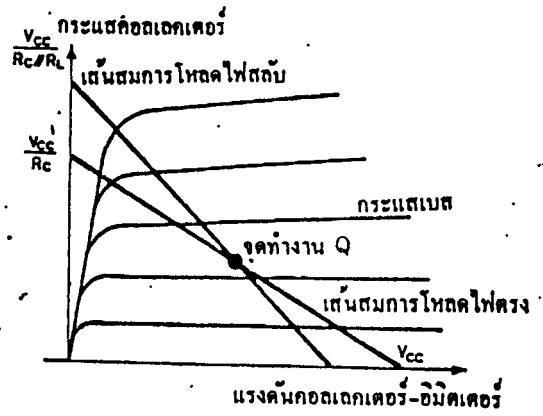
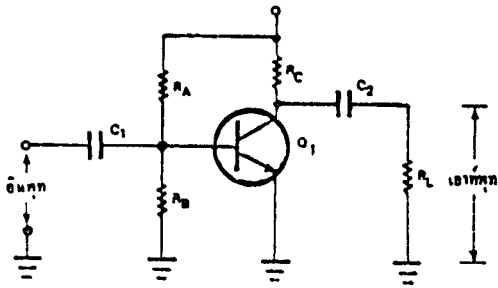


รูปที่ 5.11 การหาค่าสัญญาณเอาต์พุตโดยวิธีกราฟ

เส้นสมการโหลดเมื่อต่อตัวต้านทานโหลด (R_L) กับสัญญาณไฟสลับจะเปลี่ยนไปจากเส้นเดิมขณะที่มีสัญญาณไฟสลับ ตัวเก็บประจุจะมีค่ารีแอกแตนซ์ต่ำมากเมื่อเทียบกับตัวต้านทานโหลด (R_L) ดังนั้นความต้านทานโหลดที่คอลเลคเตอร์จึงมีค่าเป็นผลรวมแบบขนานของตัวต้านทาน R_C กับ R_L ดังนั้นความชันเส้นกราฟของสมการโหลด จึงมีค่ามากกว่าเดิม เนื่องจาก I_C และ V_{CE} มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C \parallel R_L)$$

นั่นคือเส้นกราฟสมการโหลดจะเป็นเส้นที่บอกความเปลี่ยนแปลงด้านกระแสไฟสลับนั่นเอง

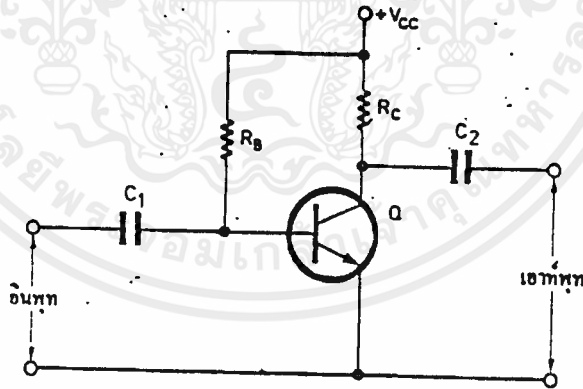


รูปที่ 5.12 ความแตกต่างของเส้นโหลดทางด้านไฟตรง และไฟสลับ

5.1.3.2 การแกว่งของแรงดันเอาต์พุตในวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

เมื่อไม่มีตัวต้านทานอิมิตเตอร์

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขั้วอินพุตของวงจรขยาย จะทำให้แรงดันที่ขั้วเบสของทรานซิสเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับขั้วอิมิตเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบส เนื่องจากสัญญาณอินพุตอาจมีค่าเสริมหรือหักล้างกับกระแส I_B ที่มาจากการไบอัสดังรูป 5.13



รูปที่ 5.13 วงจรขยายเมื่อไม่มี RE

เมื่อกระแสเบสเกิดการเปลี่ยนแปลง (i_b) จะเป็นผลให้กระแสคอลเลกเตอร์ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นแรงดันขั้วขณะ v_C ที่คอลเลกเตอร์ จึงสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$v_c = V_{CC} - i_c R_c$$

เมื่อ i_c เป็นกระแสชั่วขณะที่คอลเลคเตอร์

กระแสคอลเลคเตอร์ที่มีค่าต่ำสุดจะมีค่าเกือบเป็น 0 (ซึ่งจะถือว่าเป็น 0 เมื่อทรานซิสเตอร์ อยู่ในช่วงคัทออฟ) นั่นคือในขณะที่กระแส i_c มีค่าต่ำสุด แรงดัน v_c จะมีค่าเท่ากับ V_{CC} หรือเป็นค่าสูงสุดนั่นเอง

จะเห็นได้ว่า v_c รูปลักษณะสัญญาณ V_{CC} จะมีทิศต่างเฟสกับกระแส 180 องศา และจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีจุดตัดของแรงดันไฟตรง เป็นจุดกึ่งกลาง เนื่องจากเกิดจากแรงดันไบอัส ครั้นเมื่อผ่านจากตัวเก็บประจุออกไป จะได้สัญญาณเป็นสัญญาณ

ไฟสลับที่เทียบกับแกนศูนย์

นั่นคือตัวเก็บประจุจะกันสัญญาณไฟตรงไว้ นั่นเองค่าต่ำสุด ของ แรงดัน v_c

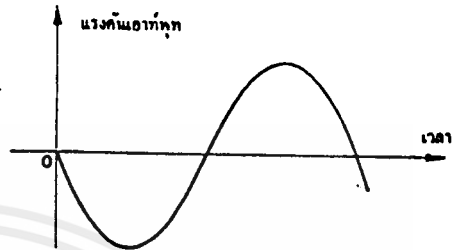
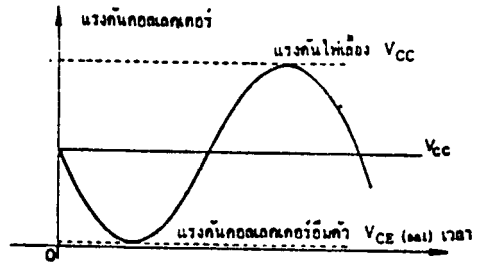
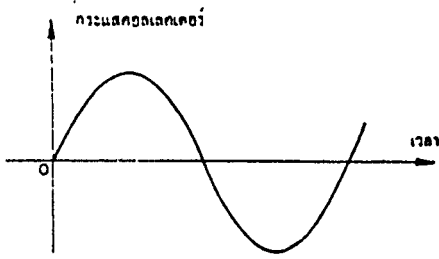
จะเกิดขึ้นเมื่อทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัว นั่นคือแรงดันต่ำสุด $v_{c(\min)}$ มีค่าเท่ากับ $v_{CE(\text{sat})}$ ซึ่งมีค่าน้อยมากประมาณ 0.2 โวลต์ ดังนั้นค่าแรงดัน ออกของสัญญาณจะมีค่าประมาณเกือบ 0 โวลต์นั่นเอง ค่าสูงสุดของการแกว่งของสัญญาณ จากจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดของแรงดันออก V_o จะขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน v_c ซึ่งสามารถ หาค่าโดยประมาณได้จาก

$$v_o(p-p) = v_{c(\max)} - v_{c(\min)}$$

$$\approx V_{CC} \text{ (โดยประมาณ)}$$

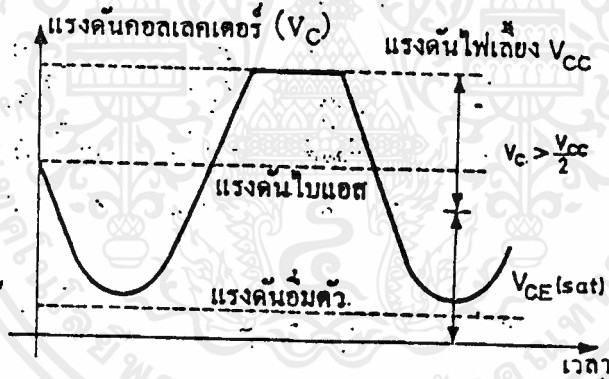
ดังนั้นการไบอัสทรานซิสเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงผลของเอ๊าท์พุทที่ปรากฏออกมาด้วยการไบอัสให้ได้สัญญาณเอ๊าท์พุทสูง ต้องไบอัสค่าแรงดัน v_c ให้มีค่าเป็น $V_{CC}/2$ นั่นเอง

ถ้าแรงดันเข้ามีค่าที่ทำให้แรงดันออกมีค่าอยู่ในช่วงที่แสดงไว้ดังรูป 5.14 แล้วแรงดันออกจะไม่มีที่ขึ้นแต่ถ้าเพิ่มแรงดันของสัญญาณอินพุทให้สูงขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยจะเป็นผลให้ แรงดันออก ถูกขลิบดังแสดงในรูป 5.14



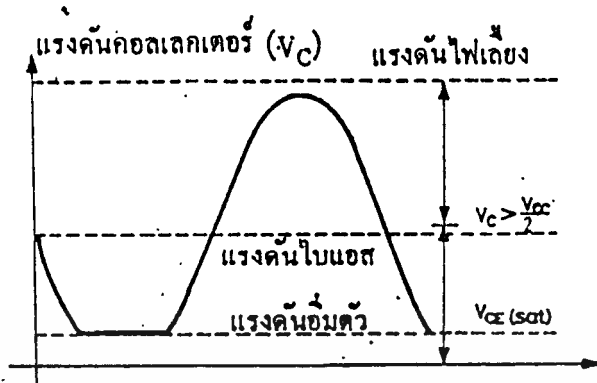
รูปที่ 5.14 สัญญาณเอาต์พุตจะถูกจำกัดด้วยค่าแรงดันสูงสุด V_{CC}

ถ้าเราทำการไบอัสให้แรงดัน V_C มีค่ามากกว่า $V_{CC}/2$ ถ้าให้สัญญาณ อินพุตเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตส่วนสูงสุดจะมีค่าถึงค่า V_{CC} ก่อนที่ส่วนล่างจะถึงค่า $V_{CE(sat)}$ ดังนั้นถ้าแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นอีก ส่วนบนจะเป็นส่วนที่โดนขลิบก่อน ดังแสดงในรูป 5.15



รูปที่ 5.15 การขลิบส่วนยอดของสัญญาณของสัญญาณเนื่องจากการไบอัสให้ $V_C > V_{CC}/2$

แต่ถ้าให้ V_C มีค่าน้อยกว่าแรงดัน $V_{CC}/2$ เมื่อสัญญาณอินพุตเพิ่มจนกระทั่งแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงสุดโดยไม่มี การเพี้ยน แรงดันเอาต์พุตส่วนล่างก็จะถึงจุดต่ำสุดที่ค่า $V_{CE(sat)}$ ก่อนที่ส่วนบนจะถึงค่า V_{CC} ดังนั้นถ้าเพิ่มสัญญาณอินพุตขึ้นอีก ส่วนล่างก็จะถูกขลิบออกก่อน ดังแสดงในรูป 5.16



รูปที่ 5.16 การขลิบส่วนล่างของสัญญาณเอาต์พุต เนื่องจากการไบแอสให้

$$V_c < V_{cc}/2$$

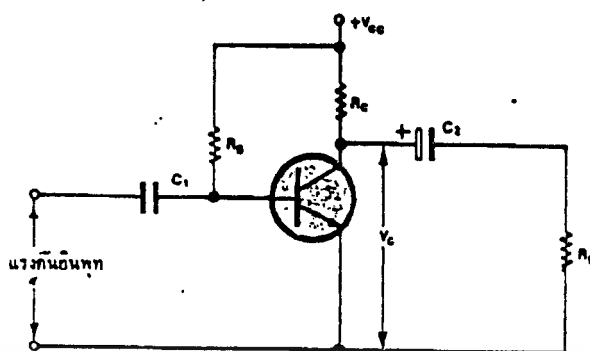
ส่วนในรูป

5.17

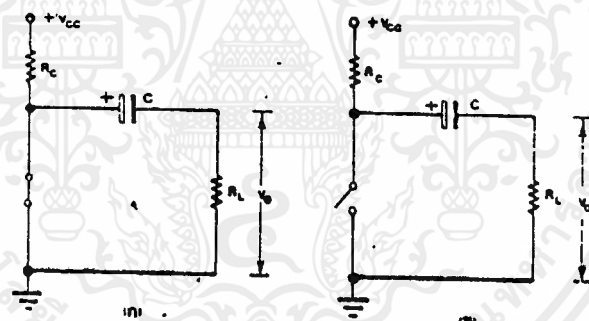
แสดงวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม

เมื่อมีการต่อตัวต้านทานโหลดภายนอก R_L เข้ากับวงจรซึ่งตัวต้านทานนี้จะเป็นผลให้ค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตลดลง เมื่อไม่มีสัญญาณใดๆ ในวงจรแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดทำงาน (V_c) หากเราใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูง

จะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับตัวต้านทาน R_L แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ จึงเสมือนว่าไม่มีผลใดๆ กับสัญญาณออก ที่เป็นไฟสลับ ค่าสูงสุด และ ต่ำสุดสำหรับแรงดันเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ ขึ้นอยู่กับค่าทรานซิสเตอร์อิมิตตัว และ คัทออฟ ดังนั้นการจำกัดของแรงดันเอาต์พุตในวงจรขยาย หาได้จากวงจรสมมูลดังรูป 5.18 ในหน้าถัดไป โดยรูป 5.18(ก) เป็นวงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ในช่วงอิมิตตัว ส่วนรูป 5.18(ข) เป็นวงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ในสภาวะคัทออฟ



รูปที่ 5.17 วงจรขยายโดยเพิ่มตัวต้านทานโหลด R_L ในวงจร



รูปที่ 5.18 วงจรสมมูลย์ของทรานซิสเตอร์

ในวงจรสมมูลย์ทั้งสองรูปค่าแรงดัน $V_{CE(sat)}$ ถือว่ามีค่าน้อยมาก จนถือได้ว่าตัวทรานซิสเตอร์เกิดการลัดวงจรระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ และ ในขณะที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในช่วงคัทออฟ ถือว่าไม่มีกระแสไหล นั่นคือ ระหว่างคอลเลคเตอร์ และอิมิตเตอร์เปิดวงจร เมื่อทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะอิ่มตัว ดังในรูป 5.18(ก) ตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีแรงดันตกคร่อม V_C และ V_C ต่อกับตัวต้านทาน R_L ซึ่งขั้วบวกต่อกับกราวด์ จะมีค่านั้นคือ เป็นค่าแรงดันสูงสุดทางลบของแรงดันออก V_O เมื่อค่าแรงดัน คือ V_C แรงดันที่ใช้ โบท V_{CE} ของทรานซิสเตอร์ แรงดันทางลบสูงสุดของ $V_O = V_C$ โวลต์ จากจุด 0 โวลต์ลงมาทางลบ ถึงค่า V_C

5.1.3.3 ข้อพิจารณาเกี่ยวกับวงจรขยายทรานซิสเตอร์

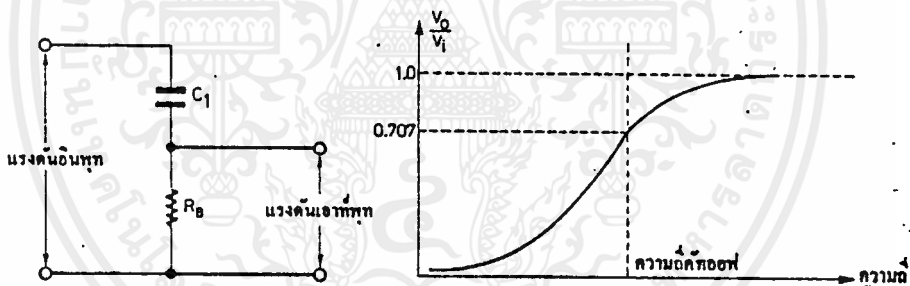
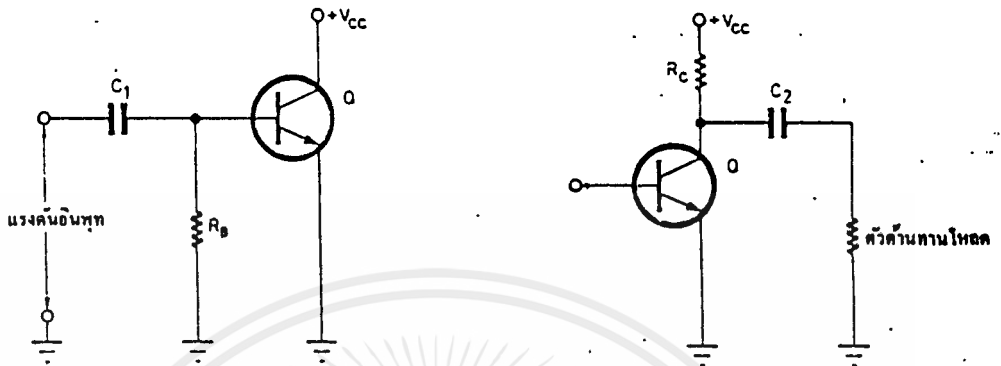
การที่ทรานซิสเตอร์จะทำงานได้เป็นปกติโดยไม่มีอาการบิดของสัญญาณและวงจรสามารถ ขยายสัญญาณได้อย่างเต็มประสิทธิภาพนั้น มีข้อควรคำนึง และ พิจารณาในการสร้างวงจรมันนี้

ในกรณีที่มีการกำหนดค่าแรงดัน V_{CC} แรงดันจะเป็นตัวกำหนด ค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณเอาต์พุตจากขอตคลื่นบวกถึงขอตคลื่นลบ (V_{pp}) ถ้าวงจรทำงานในคลาส-เอ เราต้องให้แรงดันที่คอลเลคเตอร์มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟเลี้ยง V_{CC} ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้ว ซึ่งจะเป็นผลให้แรงดันของสัญญาณจากขอตบวกถึงขอตลบ มีค่าสูงสุด แต่สัญญาณก็จะเพี้ยนมากถ้าให้สัญญาณเอาต์พุตแอมพลิจูดเต็มที่ดังนั้นเพื่อลดการเพี้ยนของวงจรขยาย เราจะให้สัญญาณเอาต์พุตแอมพลิจูดจากขอตบวกถึงขอตลบ มีค่าอยู่ระหว่าง $1/2 V_{CC}$ ถึง $1/3 V_{CC}$ เท่านั้น

ในกรณีที่แรงดันสูงสุดของการจ่ายไฟไม่จำกัดค่าสำคัญที่ควรพิจารณาเลือกใช้ ค่าแรงดัน V_{oc} หรือ แรงดันพัลส์ระหว่างคอลเลคเตอร์ กับ อิมิตเตอร์เมื่อเปิดวงจรเบส โดยจะต้องไม่ให้แรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์ กับ อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เกินกว่าค่าแรงดันนี้โดยทั่วไปเราจะต้องให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าแรงดันพัลส์ ไม่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อความปลอดภัย

การเลือกค่าตัวเก็บ ประจุ C_1 และ C_2 ซึ่งใช้เชื่อมโยงกับภาคอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับความถี่ต่ำสุดที่ต้องการ และความต้านทานที่ต่ออยู่กับตัวเก็บประจุนั้น ถ้าความถี่สูงขึ้นค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุจะลดลง ถ้าความถี่สูงพอ ตัวเก็บประจุจะทำตัว เหมือนลวดลัดวงจรทั้งสองจุดเข้าหากัน (ลัดเฉพาะสัญญาณ ความถี่สูงเท่านั้น)

สำหรับวงจรทางภาคอินพุตซึ่งมี C_1 และ R_B ต่อกันอยู่ ถ้าเราตัดมาเฉพาะ C_1 และ R_B จะได้ดังรูป 5.19 ในหน้าถัดไป



รูปที่ 5.19 ผลของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ต่อวงจรรขยาย.

เนื่องจากสัญญาณที่จะเข้าไปยัง R_B และ เบสของทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำการขยายจะต้องผ่านตัวเก็บประจุ C_1 เสมอ จึงเกิดแรงดันส่วนหนึ่งตกคร่อม C_1 แรงดันนี้จะมีค่ามากขึ้น หากความถี่ลดลงดังนั้นถ้าความถี่ต่ำๆ R_B จะเหลือสัญญาณไปตกคร่อม และเข้าเบสน้อยลง และ R_B จะมีสัญญาณไปยัง เบสของ

ทรานซิสเตอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่สูงขึ้น ดังกราฟในรูป 5.19 เราจึงเรียกลักษณะการจัด R และ C แบบนี้ว่าวงจรผ่านเฉพาะความถี่สูง (high pass-filter)

โดยทั่วไปจะกำหนดค่าความถี่คัทออฟ เป็นความถี่ที่แรงดันเอาต์พุต เหลือเพียง 70.7% ของแรงดันอินพุต ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อม C เท่ากับแรงดันตกคร่อม R แต่การที่ยังคงมีแรงดันออกที่ R ถึง 70.7 % ของแรงดันเข้า แทนที่จะเป็น 50 % ก็เพราะการรวมแรงดันคร่อม R และ C ไม่ได้คิดผลรวมแบบเลขคณิต แต่จะคิดผลรวมแบบเวกเตอร์

เฉพาะการหาค่า C ในการออกแบบนี้ เราให้ความถี่คัทออฟ เป็นความถี่ที่แรงดันตกคร่อม R เป็น 90% ของแรงดันอินพุต ซึ่งหมายถึงแรงดัน เอาต์พุต จะลดต่ำลงจากแรงดันอินพุตประมาณ 1 dB และแรงดันที่ตกคร่อม C จะเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดัน ตกคร่อม R เราสามารถคำนวณหาค่า C ได้เป็น

$$C = 1/3.2fr$$

โดยที่ C : ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (farad)

f : ความถี่ต่ำสุดที่ต้องการให้ผ่านไปขยาย (Hz)

R : ความต้านทาน (ohm)

ในการเลือกทรานซิสเตอร์ ค่าของทรานซิสเตอร์ที่ต่ำที่สุด ควรจะมากกว่าอัตราขยายกระแสที่ต้องการ ถึงแม้ว่าอัตราขยายกระแสจะถูกกำหนดด้วยค่า R ก็ตาม

5.2 ภาครับ และสายอากาศ

ในส่วนของภาครับลักษณะสำคัญของภาครับคือ จะต้องสามารถแสดงค่า ขนาด กำลังงานของเครื่องที่รับได้ในช่วงความถี่ที่กำหนด ในกรณีใช้งานที่เครื่องส่ง อยู่ใน ระยะทางไกล ๆ ภาครับจำเป็นจะต้องให้ค่าของกำลังงานของคลื่นที่รับได้ที่ตำแหน่งนั้น ๆ ให้มีความละเอียดสูง ซึ่งในกรณีนี้การสร้างภาครับเอง จะเป็นการยุ่งยาก และ สิ้นเปลือง มากกว่าการจัดซื้อเครื่อง field strength meter มาใช้งาน ดังนั้นจึงไม่แนะนำ ให้ จัดสร้างอุปกรณ์ในภาครับ

ในส่วนของสายอากาศ สายอากาศที่เลือกใช้งาน เป็นสายอากาศภาครับ มีลักษณะ สำคัญคือ ต้องเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) ได้แก่ สายอากาศ ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น สายอากาศแบบยาถิ เป็นต้น การเลือกใช้งานสายอากาศ ภาครับต้องพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศที่จะประยุกต์ใช้งาน ใน 2 คุณลักษณะ คือ ความถี่ที่จะประยุกต์ใช้งาน และ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะต้อง แมทช์ (match) กับ วงจรที่จะมาต่อกับสายอากาศ คุณลักษณะอีกประการหนึ่งคือ ค่าไดเรกติวิตี (directivity) และค่าเกน (gain) เราควรเลือกใช้สายอากาศที่มีค่าไดเรกติวิตี และ ค่าเกน ซึ่ง มีค่าสูง

ในส่วนของภาครับ และ สายอากาศรับที่ใช้ในการทดลอง ภาครับจะใช้น่านความถี่ 25-40 MHz และ ใช้สายอากาศรับแบบไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ในการทดลอง ที่ได้ออกไปทำการทดลองในภาคสนาม

บทที่ 6

ผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี

6.1 วัดอุปสรรค และ ขั้นตอนการทดลอง

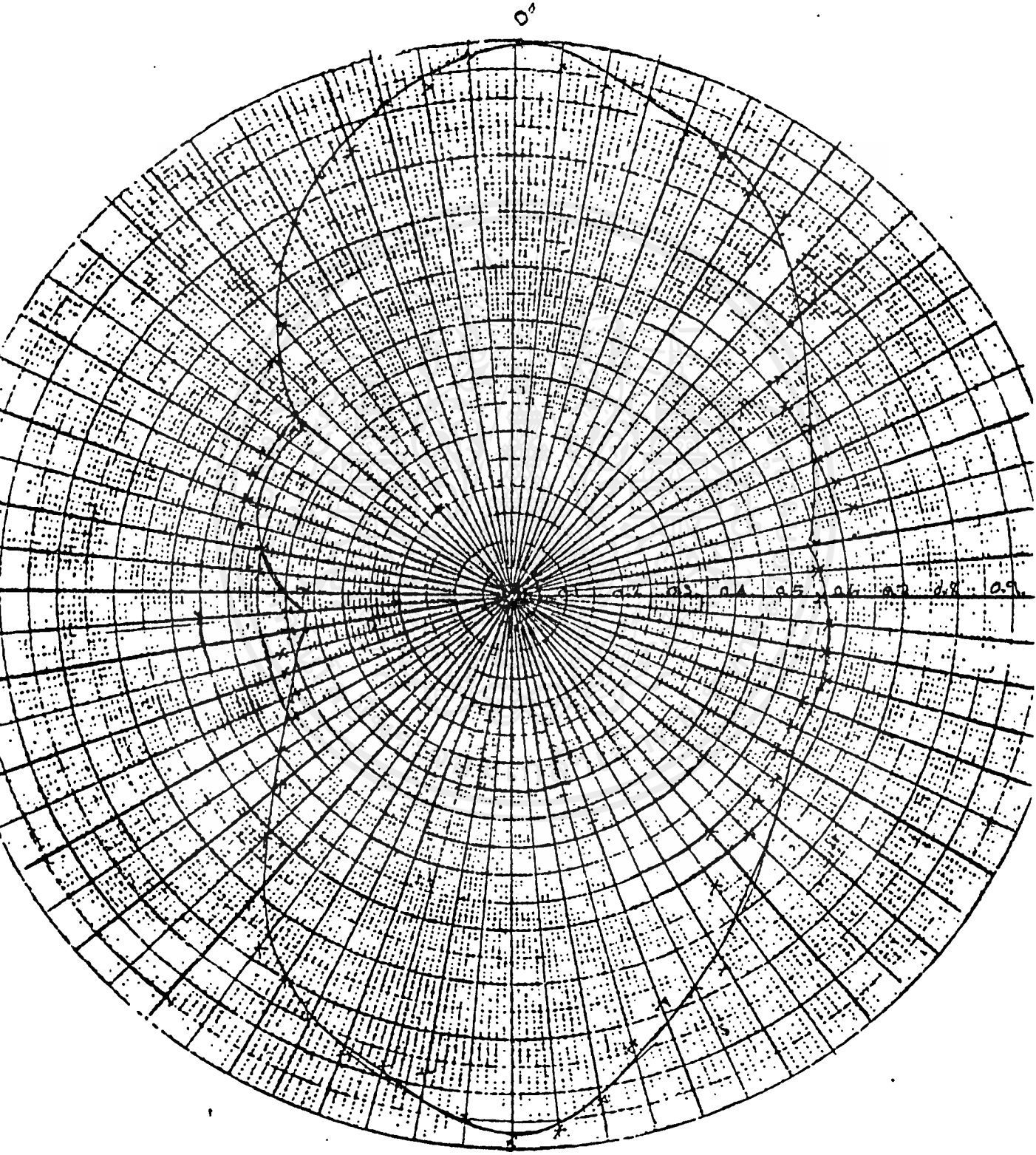
วัดอุปสรรคในการทำการทดลองก็เพื่อทำการวัดค่าของสัญญาณที่ได้รับได้ แล้วนำค่ามาพล็อตแพทเทอร์นในแนวระนาบ เปรียบเทียบกับแพทเทอร์นซึ่งได้จากการคำนวณ สำหรับขั้นตอนการทดลองเพื่อความสะดวก จะทำการทดลองในน้ำจืด ซึ่งจะแตกต่าง จากน้ำทะเลตรงค่าความนำไฟฟ้าเท่านั้น เราจะแบ่งขั้นตอนการทดลองได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) วางเครื่องส่งที่ระยะห่างจากสายอากาศรับไดโพลครึ่งความยาวคลื่น 30 เมตร โดยสายอากาศรับสูง 1 เมตร แล้ววัดค่าที่ได้จากทุก ๆ การหมุนสายอากาศไป ๑ องศา

2) ให้เครื่องส่งอยู่ในน้ำจืดลึก 0.3 เมตร ห่างจากสายอากาศรับ 30 เมตร และสายอากาศรับสูง 1 เมตร แล้ววัดค่าที่ได้จากทุก ๆ การหมุนสายอากาศไป ๑ องศา จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการพล็อตแพทเทอร์นในแนวระนาบ จะได้ดังรูป

ANTENNA TYPE ... Halfwave Dipole ... DATE

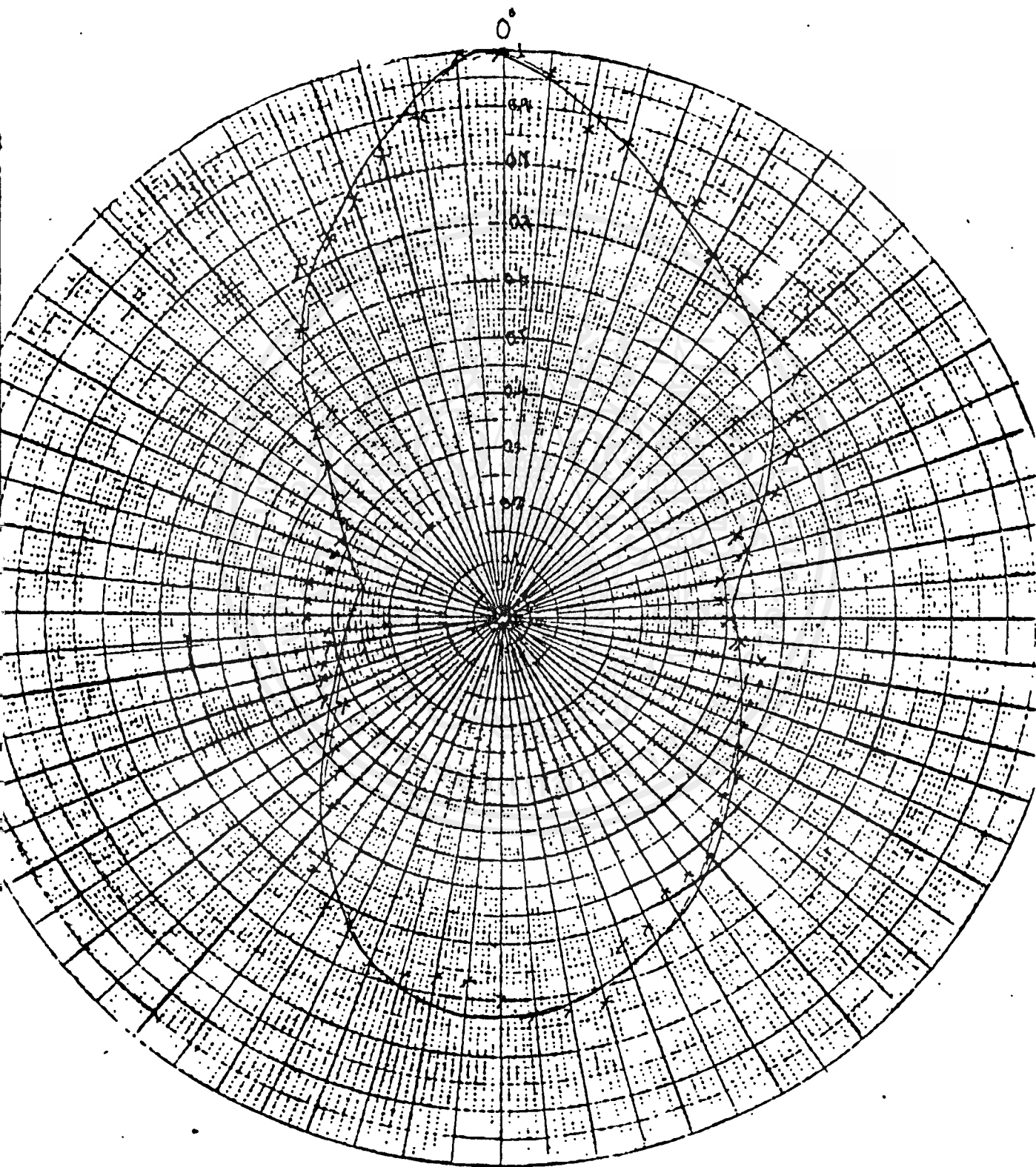
FREQUENCY ... 27 MHz ... PLANE OF PATTERN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ทรนเครื่องสอบในอากาศ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANTENNA TYPE ... *Halfwave Dipole* ... DATE 7

FREQUENCY *27 MHz* PLANE OF PATTERN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้ง **กรณีเครื่องส่งอยู่ใต้วงนำ** ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 แพทเทอร์นแนวระนาบในทางทฤษฎี

เมื่อทำการคำนวณตามวิธีการในหัวข้อ 3.4.3 โดยการแทนค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$

$$\epsilon = 80\epsilon_0 \approx 7.08 \cdot 10^{-10} \text{ Fm}^{-1}$$

$$\sigma \approx 0 \text{ Sm}^{-1}$$

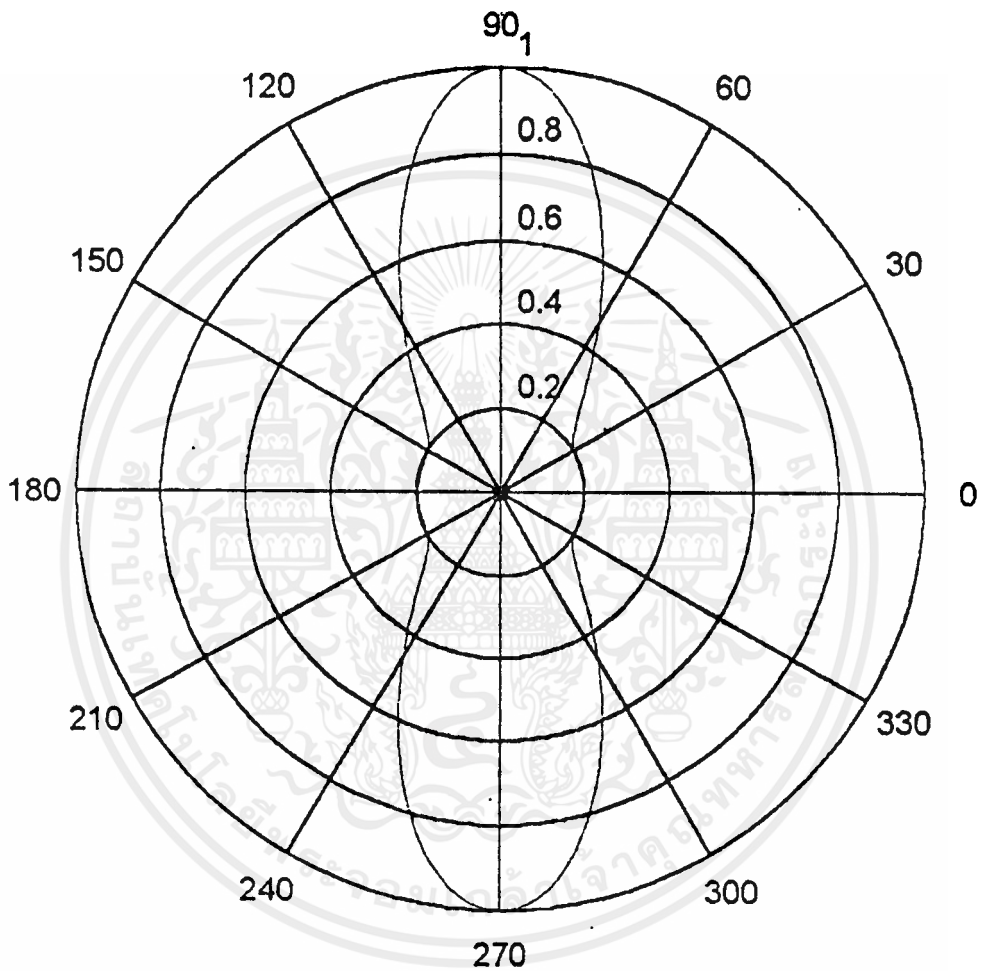
ระยะทาง $R = 30$ เมตร

ความสูงของสายอากาศรับ $h = 1$ เมตร

ความลึก $d = 0.3$ เมตร

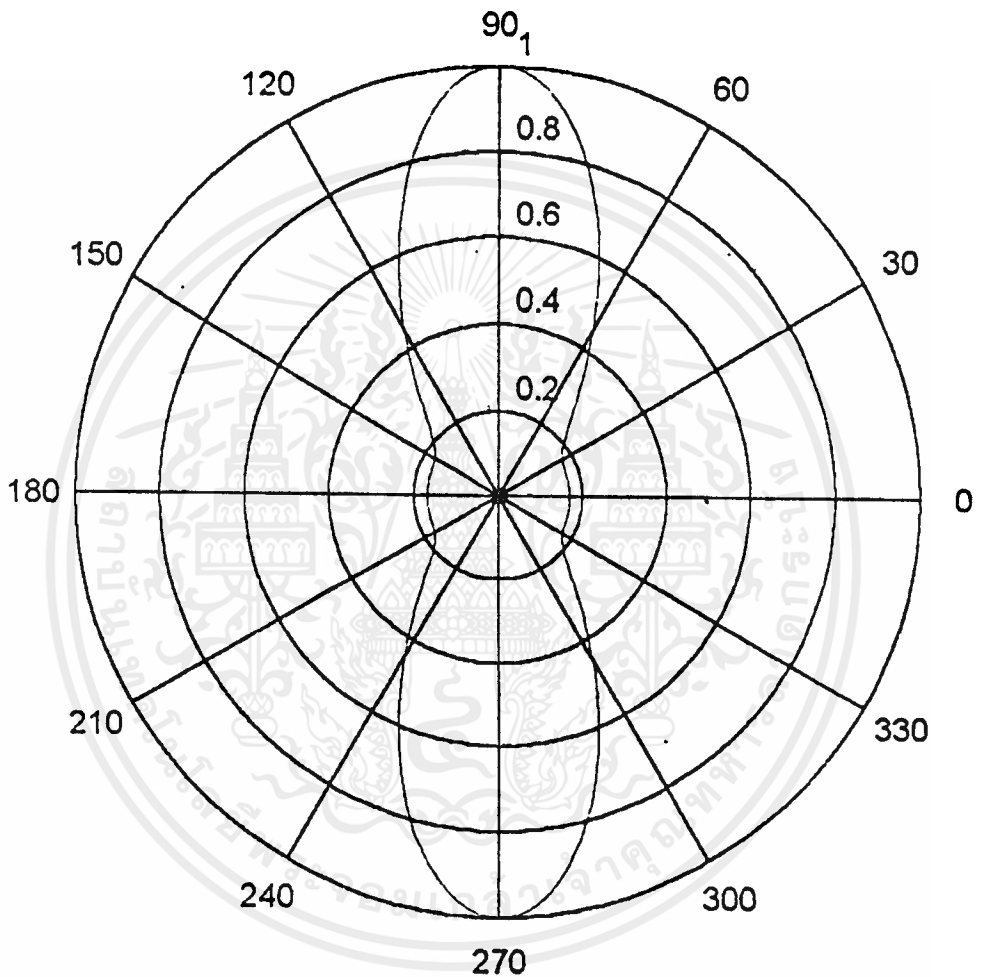
ความถี่ที่ใช้งาน = 27.125 MHz

จากค่าที่ได้ นำมาพล็อตแพทเทอร์นในแนวระนาบได้ดังนี้



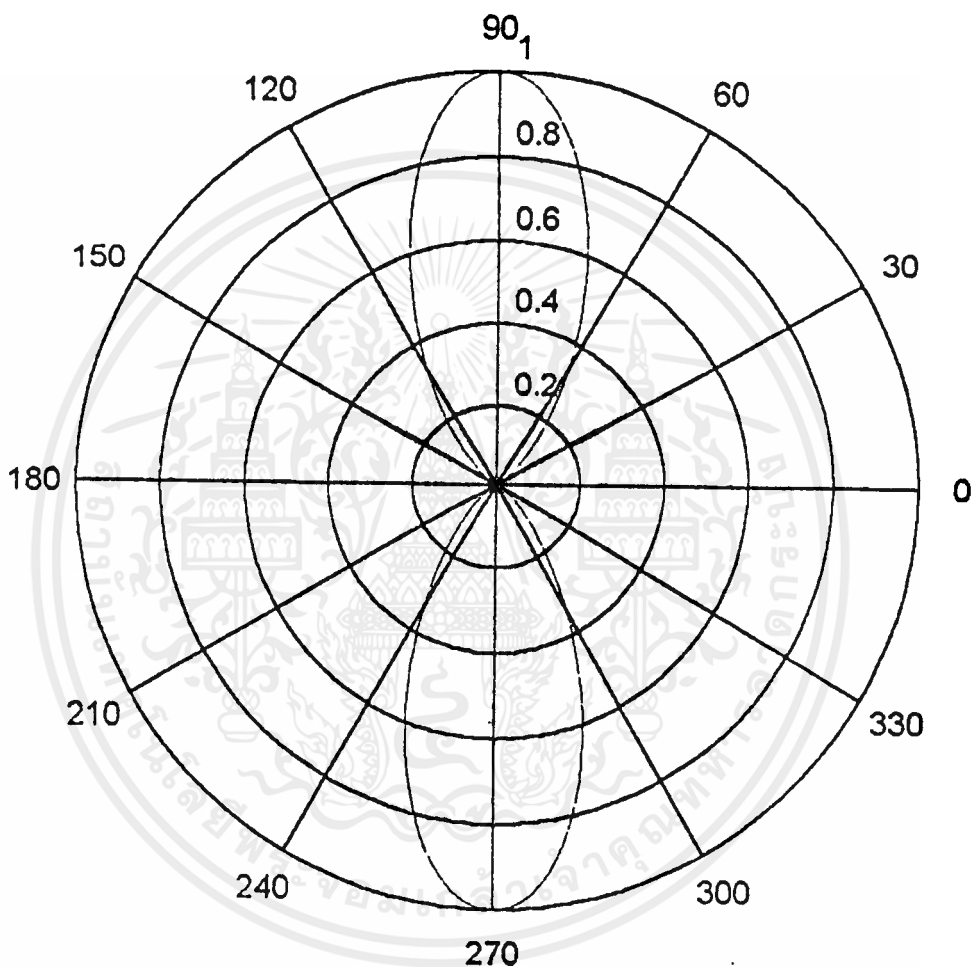
กราฟเครื่องส่งอยู่ในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรณีเครื่องลมอยู่ที่ตัวน้ำ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แพทเทิร์นของสายอากาศ Halfwave Dipole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบผลการทดลอง และ รูปร่างของแพทเทอร์นที่ได้จากการคำนวณ จะพบว่าค่าที่วัดได้ให้แพทเทอร์นที่แย่กว่าเนื่องจากขณะที่วัดมีสัญญาณรบกวนมาก จึงใช้ วิธีการใช้ค่าที่ต่ำสุดในแต่ละการหมุนสายอากาศเป็นมุม θ อย่างไรก็ตาม แพทเทอร์นที่ได้จากการวัด จะยังคงใช้ได้กับการชี้ทิศทางเครื่องส่ง



บทที่ 7

การประยุกต์ใช้งานกับวิทยุติดตามปลาพะยูน

7.1 ที่มาของโครงการ

จากบทความ ‘พะยูนฝูงสุดท้าย:คำพิพากษาไฟฝันนักสำรวจ’ ของ คุณสุวรรณ แซ่ซึ้ง และ ‘ทำความเข้าใจ และ อนุรักษ์เงือกน้อย’พะยูน’ของ ศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิยะกาญจน์ ทำให้ทราบว่ามีการพบพะยูนที่มาจากนางเงือกในวรรณคดี ซึ่งเดิมทีเข้าใจกันว่า ได้สูญพันธุ์ไปจากประเทศไทยหมดแล้ว มีการทำการบินสำรวจทำให้ค้นพบพะยูน ซึ่งเชื่อกันว่าเป็นฝูงสุดท้ายของประเทศไทยที่ จ.ตรัง ปัญหาของทีมงานสำรวจในการอนุรักษ์พะยูนฝูงสุดท้ายนี้ไว้ให้ลูกหลานได้เห็น คือ พวกเขาไม่สามารถติดตามพฤติกรรมของพะยูนได้ตลอด เวลา จึงไม่ทราบถึงบริเวณที่จะกำหนดเป็นเขตอนุรักษ์ที่แน่นอน ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการสร้างวิทยุติดตามตัว (radio tagging) สำหรับติดตามปลาพะยูนขึ้น

7.2 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับพะยูน

ลักษณะที่น่าสนใจประการหนึ่งคือ พะยูนดื่มน้ำได้ไม่ลึกมากนัก และ อยู่ใต้น้ำได้ไม่นาน มีการประมาณว่าอย่างมากที่สุดคงไม่เกิน 10-15 นาที ข้อจำกัดเหล่านี้ อาจเกิดจาก อวัยวะเกี่ยวกับระบบหายใจเช่น รูจมูก หลอดลม และ ปอด ไม่เหมาะสมสำหรับการดำน้ำนาน ๆ หรือ อาจเป็นผลจากสรีระตามธรรมชาติของมัน รวมทั้งองค์ประกอบของเลือดที่ไม่สามารถกักออกซิเจนไว้ได้นาน และ มากพอ

การที่พะยูนมีข้อจำกัดเช่นนี้ ทำให้พะยูนต้องหากินแต่ในบริเวณน้ำตื้น และ มันยังกินหญ้าทะเลที่ขึ้นอยู่ในแถบน้ำตื้นอีกด้วย เนื่องจาก หญ้าทะเลต้องการแสงในการสังเคราะห์แสง ซึ่งลักษณะเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการจัดสร้างเครื่องส่งต่อไป

7.3 การกำหนดขนาดของกำลังเครื่องส่งที่จะนำไปใช้งาน

เมื่อเราพิจารณาค่าการสูญเสียจากคลื่นที่เดินทางทั้ง 3 ช่วงแล้ว จะเห็นว่าช่วงที่มีการสูญเสียมากคือ ช่วงที่คลื่นเดินทางในน้ำทะเล ดังนั้นในการกำหนดขนาดของเครื่องส่ง เราจะทำการกำหนดขนาดของเครื่องส่งเริ่มต้น , ความถี่ที่ใช้งาน , ระยะทางที่คลื่นเดินทางในอากาศ , เหนสายอากาศส่งและ สายอากาศรับ และ ขนาดของสัญญาณต่ำสุดที่รับได้ที่เครื่องรับ จากนั้นจะทำการคำนวณว่าจะ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของเครื่องส่งที่ติดกับตัวพะยูนนี้เราจะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

-กำลังของเครื่องส่ง 250 มิลลิวัตต์ ซึ่งเป็นกำลังเครื่องส่งที่มีขนาดของเครื่องส่งไม่ใหญ่เกินไป

-ความถี่ที่ใช้งาน 27 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในงานวิทยุสมัครเล่นและมีขนาดเครื่องส่งไม่ใหญ่เกินไป

-ระยะทางที่คลื่นเดินทางในอากาศ 20 กิโลเมตร โดยการประมาณจากแผนที่ที่มีการบินสำรวจพบพะยูน

-กำลังงานต่ำสุดที่รับได้ -140 dBm ซึ่งเป็นขนาดของเครื่องรับที่ใช้งานทั่วไปในอเมริกาและยุโรป

-เกนของสายอากาศส่ง 3 dB

-เกนสายอากาศรับ 10 dB

เมื่อทำการคำนวณตามเงื่อนไขต่าง ๆ จะได้ว่า ถ้าให้

l_w เป็นการลดทอนในน้ำทะเล

l_b เป็นการสูญเสียต่ำสุดที่รอยต่อ

l_f เป็น free space loss

จากสมการของกำลังที่รับได้ที่เครื่องรับจะได้ว่า

$$P_r = P_t - l_w - l_b - l_f + G_t + G_r$$

โดยแทนค่าดังนี้

$$l_w = \alpha(f) = 179.267(d)$$

$$l_b = 10 \log(1.49 \times 10^{-11} \sqrt{f}) = 11.1$$

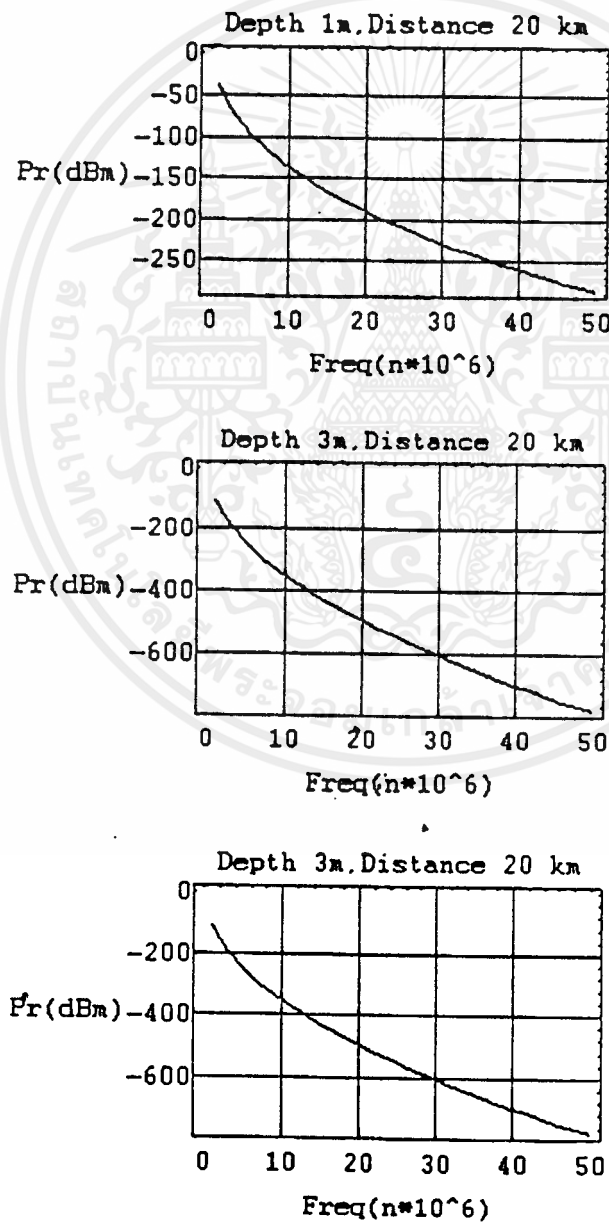
$$l_f = 20 \log\left(\frac{4\pi(21 \times 10^{-3})(27 \times 10^6)}{3 \times 10^8}\right) = 87.089$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$-140 = 10\log(250) - 179.267(d) - 11.1 - 87.089 + 10 + 3$$

$$d = 0.44$$

นั่นคือสามารถรับสัญญาณได้ เมื่อเครื่องส่งอยู่ลึกจากผิวน้ำไม่เกิน 0.44 เมตร
จากการทดลองใช้โปรแกรมทำการคำนวณตามสูตร และ พล็อตกราฟ
ระหว่างกำลังงานที่รับได้กับความถี่ที่ใช้งาน จะได้ดังรูป 7.2

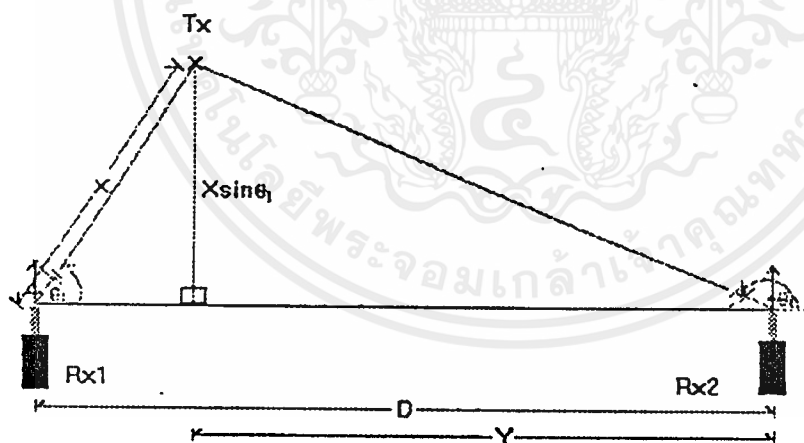


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 7.2 ที่ภาพแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังงานที่รับได้ กับความถี่ที่ใช้งาน โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 การนำไปใช้งานและการกำหนดตำแหน่ง

จากขนาดของเครื่องส่งที่กำหนด และ ระดับความลึกที่สุดที่รับได้ เมื่อนำมาใช้กับปลาพะยูนจะเห็นว่า แม้เราจะไม่สามารถติดตามสัญญาณจากเครื่องส่งได้ เมื่อปลาอยู่ในระดับน้ำลึก แต่โดยข้อเท็จจริงที่ว่าพะยูนจำเป็นต้องขึ้นมาหายใจเหนือผิวน้ำ ทุกๆ 2-3 นาที ดังนั้นโดยใช้ระบบเซนเซอร์ความดัน ซึ่งจะทำการวัดระดับความดันจากผิวน้ำ เมื่อมีค่าความดันต่ำกว่าค่า ๆ หนึ่ง ให้เปิดสวิทซ์ให้เครื่องส่งทำงาน โดยวิธีนั้นนอกจากเราจะสามารถกำหนดตำแหน่งคร่าว ๆ ของพะยูนได้ตลอดเวลาแล้ว ยังสามารถยืดอายุการใช้งาน ของแบตเตอรี่ที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับเครื่องส่งอีกด้วย

การกำหนดตำแหน่งของเครื่องส่งทำได้โดยใช้เครื่องรับที่มีสายอากาศแบบมีทิศทางเช่น ยากิไดโพล 3 อิลิเมนต์ (element) 2 เครื่อง ทำการรับสัญญาณพร้อมกันเพื่อวัดหาทิศทางที่รับสัญญาณได้แรงที่สุด จากนั้นลากเส้นจากเครื่องรับทั้งสองเพื่อหาจุดตัด ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 การกำหนดตำแหน่งของวัตถุ โดยใช้เครื่องรับ 2 เครื่อง

หมายเหตุ ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำในการคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องส่ง
เพิ่มขึ้นสามารถทำได้ โดยการเพิ่มตำแหน่งของเครื่องรับเป็น 3 จุด หรือ
มากกว่านี้ แล้วจึงทำการคำนวณเช่นเดียวกับแบบ 2 จุด

-การคำนวณหาระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับสายอากาศรับตัวที่ 1

ในกรณีที่เราทราบค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองตัวที่แน่นอน และ ค่า
มุมระหว่างสายอากาศรับแต่ละตัว ที่กระทำกับทิศตะวันออก วัดไปทางทิศเหนือ
เมื่อสายอากาศทั้งสองชี้ไปยังเครื่องส่ง(θ_1, θ_2) ดังรูปที่ 7.4 เราสามารถคำนวณหา
ค่าระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับสายอากาศรับตัวที่ 1 ได้โดยใช้วิธีการทางตรีโกณ
มิติ ซึ่งในที่นี้จะแสดงเป็นสูตรสำเร็จ เพื่อจะนำไปใช้งาน ซึ่งจะสะดวกกว่าการนำไป
พล็อตลงในแผนที่



$$Y = X \sin \theta_1 \tan(\theta_2 - 90^\circ)$$

$$Y = D - X \cos \theta_1$$

$$\frac{Y}{X \sin \theta_1} = \tan(\theta_2 - 90^\circ)$$

$$X \sin \theta_1 \tan(\theta_2 - 90^\circ) = D - X \cos \theta_1$$

$$X = \frac{D}{(\sin \theta_1 \tan(\theta_2 - 90^\circ) + \cos \theta_1)}$$

จากสมการสุดท้าย เมื่อเราทราบค่ามุมทั้งสองมุม และ ระยะห่างระหว่าง
สายอากาศรับ จะสามารถกำหนดตำแหน่งเครื่องส่งได้ทันที สะดวกกว่า
การพล็อตลงในแผนที่



บทที่ 8

ปัญหา และ แนวทางการพัฒนาต่อ

8.1 ปัญหา

ปัญหาที่พบในขั้นต้นก็คือความถี่ที่ใช้งาน เนื่องจากในการใช้ความถี่คลื่นวิทยุ จำเป็นจะต้องได้รับอนุญาตจากทางราชการก่อน สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับ วิทยุติดตามปลาพะยูน คำนวนได้ว่า ควรใช้ความถี่ในช่วง 27 MHz แต่กรมป่าไม้จะนำไปใช้งานได้รับอนุญาตให้ใช้ความถี่ในช่วง 150 MHz นอกจากนี้ ความถี่ที่เลือกได้จากการคำนวณ อาจมีการรบกวนสูง เช่นในย่าน 27 MHz เป็นย่าน ความถี่ของวิทยุสมัครเล่นด้วย

ปัญหาในขั้นตอนการทดลอง เนื่องจากเป็นการทดลองภาคสนาม จึงทำให้เรา ไม่สามารถควบคุมตัวแปรอื่น ๆ เช่น ความถี่ที่เข้ามารบกวนได้ และ ยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น สิ่งกีดขวางเส้นทางเดินของคลื่นที่ควบคุมไม่ได้

ปัญหาในส่วนของ การคำนวณค่า ตัวแปรต่าง ๆ ของน้ำทะเล (เช่น ϵ, μ, σ) ซึ่ง ต้องใช้ในการคำนวณนั้นเป็นค่าโดยประมาณ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความลึก ของน้ำทะเล นอกจากนี้ค่าที่ใช้ ยังไม่ใช่ค่าของน้ำทะเลในบริเวณที่จะประยุกต์ใช้ งาน

8.2 แนวทางการพัฒนาต่อ

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการกำหนดตำแหน่งของเครื่องส่งเพียง คร่าว ๆ ในแนวระนาบซึ่งในการพัฒนาต่อ อาจเพิ่มความถูกต้องแม่นยำ ในการ คำนวน และ การทดลองให้มากขึ้น หรือ อาจพัฒนาไปถึงการกำหนดตำแหน่ง ความลึกของเครื่องส่งจากผิวน้ำ ซึ่งอาจทำได้โดยการคำนวณจากขนาดของกำลัง งานคลื่นที่รับได้ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการหน่วงเวลาของน้ำทะเล และอาจใช้การ คำนวน cross correlation ระหว่างสายอากาศรับทั้ง 2 ตัว เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมาก ขึ้น หรืออาจพัฒนาเป็นการส่งสัญญาณจาก เครื่องส่งใต้น้ำ ซึ่งเป็นสัญญาณข้อมูล (data) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่าต่าง ๆ ในการคำนวณทั้งหมดนั้น เป็นฟังก์ชันของ ความถี่ ดังนั้นถ้าจะส่งข้อมูลด้วยสัญญาณหลายความถี่อาจจะต้องพิจารณาถึง Attenuation Distortion และ Time distortion ด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Harmuth ,HenningF., "Nonsinusoidalwave for radar and radio communication"
 . P. 338-353 , Academic press , 1981.
- [2] Robert Kenward , "Wildlife Radio Tagging" , Academic press , 1987.
- [3] Gay C. White , Robert A. Garott , "Analysis of Wildlife Radio- Tracking
 data" , Academic press , 1990.
- [4] Barrows , M. L. , "Surface impedance and the efficiency of horizontal -
 dipole extremely low frequency (ELF) antenna arrays" , IEEE Trans.
 Commun. 22 ,399-401.
- [5] Constantine A. Balanis, "Antenna theory analysis and design" , John
 Wiley & Sons, Inc ,1982
- [6] ผศ. ดร. จเร สุวัฒน์ปัญญา , "วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า"
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2532.
- [7] "พายุฝนสุดท้าย" สารคดีฉบับที่ 85 ปีที่ 8 , หน้า 80-106 ,
 บริษัทวิริยะธุรกิจ จำกัด , 2535.
- [8] รศ. ยืน ภูววรรณ , "ทฤษฎี และการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 1.2"
 ,บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด ,2521
- [9] บรรเจิด ตันติภักยาภรณ์ , เครื่องรับส่ง หลักการ และ แนวทางปฏิบัติ
 ,หน้า 19-32

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านการให้ความรู้ ประสบการณ์ และ ช่วยเป็นที่ปรึกษา ให้คำแนะนำ และ วิธีแก้ปัญหาต่าง ๆ รวมทั้งยังคอยให้กำลังใจในการทำงาน ด้วยดี ตลอดมา ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์ กอบชัย เดชหาญ ที่กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้แก่พวกเรา และ อาจารย์ทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ เกี่ยวกับข้อสงสัยต่างๆ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า คงจะได้รับความกรุณาในการทำงาน ครั้งต่อ ๆ ไปจากบุคคลทุก ๆ ท่าน ด้วยดีเช่นเดิม ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

