ปีการศึกษา 2533

การควบคุมระยะทางไกล
REMOTE CONTROL

โดย

นายประวิทย์ โคมทองชูสกุล

นายปรีชา ชัยศรีสุขอำพร

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027840

12 ก.ค. 2534

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2533

ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องควบคุมระยะไกล (REMOTE CONTROL)

ผู้จัดทำ

1. นาย ประวิทย์ โคมทองชูสกุล 301143
2. นาย ปรีชา ชัยศรีสุขอำพร 301152

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027840

เครื่องควบคุมระยะไกล

ประวิทย์ โคมทองชูสกุล 301143
ปรีชา ชัยศรีสุขอำพร 301152
อาจารย์ที่ปรึกษา สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเครื่องควบคุมระยะไกล ซึ่งใช้การส่งสัญญาณควบคุมด้วยคลื่นวิทยุ โดยอาศัยการส่งสัญญาณแบบเอเอ็ม ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนส่งและส่วนรับ โดยผู้ควบคุมจะเป็นผู้ถือส่วนส่งไว้ และติดตั้งส่วนรับไว้กับอุปกรณ์ที่จะควบคุม เมื่อผู้ควบคุมต้องการที่จะควบคุม ก็เพียงแต่กดสวิทซ์ที่ส่วนส่ง แล้วส่วนส่งจะทำการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นคลื่นวิทยุ และส่วนรับจะทำการแปลงคลื่นวิทยุที่รับได้ ให้กลับเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าอีก เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปทำการควบคุมอุปกรณ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

remote control

pravit khomthngchusakul 301143

preecha chaisrisukumporn 301152

adviser singthong pattanasettanon

abstract

The objective of Remote control is to control the device ormachine from the long distance, by sending the signal that be the radio frequency and have the amplitude moddulation.

The remote control is composed of two part.One is the transmittion part that send the signal. The other is the receiving part that receive the signal from the transmittion part and to control the device or machine.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการ	2
	2.1 ระบบสื่อสาร	2
	2.2 การมอดดูเลท	4
	2.3 วงจรขยายกำลัง	10
	2.4 ออสซิเลเตอร์	27
	2.5 ตัวกรองสัญญาณ	35
	2.6 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	43
บทที่ 3	การคำนวณและการสร้าง	46
	3.1 ส่วนส่ง	46
	3.2 ส่วนรับ	48
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	51
	4.1 ส่วนส่ง	51
	4.2 ส่วนรับ	54
บทที่ 5	สรุปและวิจารณ์	67
ภาคผนวก		68
หนังสืออ้างอิง		69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

ในโครงงานนี้ (project) เป็นการทำ รี โมทคอนโทรล แบบไร้สายและใช้คลื่นวิทยุเป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุม ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมได้ในระยะไกลมาก ประมาณ 100 เมตร โดยจะผลิตสัญญาณควบคุมไว้ 8 ช่องโดยรีโมทคอนโทรล นี้ จะประกอบด้วยส่วนรับ ซึ่งติดอยู่กับอุปกรณ์ที่จะควบคุม และส่วนส่ง ซึ่งจะอยู่ที่ผู้ควบคุม ยังในตอนแรกจะกล่าวถึงหลักการเกี่ยวกับการส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ และต่อไปจะกล่าวถึงหลักการคำนวณ และการสร้างและออกแบบวงจร จนถึงการนำไปติดตั้งกับอุปกรณ์ที่จะควบคุม

ผู้จัดทำหวังว่า รายงานฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ และแนวทางแก่ผู้ที่สนใจการควบคุมระยะไกลด้วย รีโมทคอนโทรล แบบคลื่นวิทยุ เพื่อที่จะประยุกต์และใช้งานต่อไป

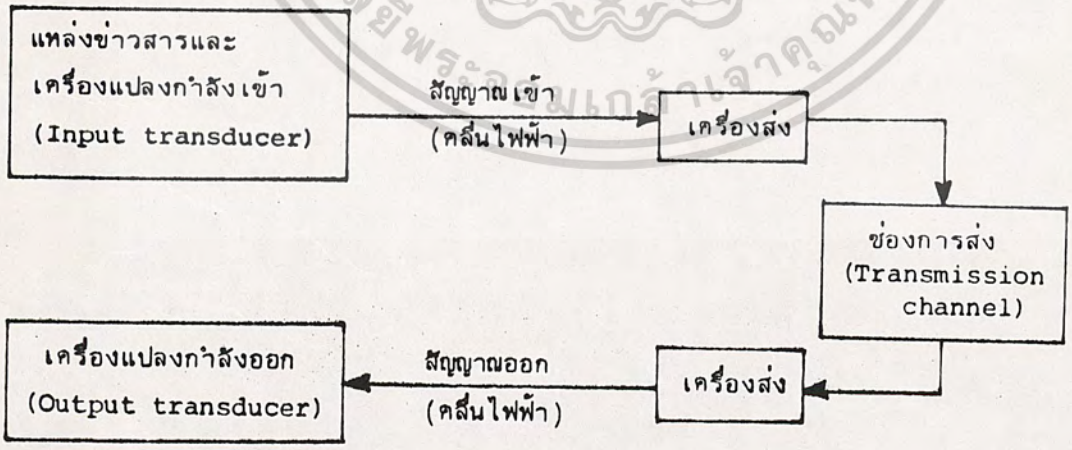
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี และ หลักการ

2.1 ระบบการสื่อสาร

สิ่งที่สำคัญสิ่งหนึ่งในระบบการสื่อสารคือ ความถี่ ซึ่งแน่นอนที่สุดคือความหมายของช่วงกว้าง (Banwidth) ของความถี่จะต้องเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ช่วงกว้างความถี่นี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

สิ่งที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งคือ กำลัง (Power) เครื่องส่งวิทยุอาจจะมีกำลังเป็นร้อยกิโลวัตต์ (Kilowatts) ในขณะที่กำลังในสายส่งโทรศัพท์มีหน่วยแค่ มิลลิวัตต์ (Milliwatts) ในระบบสื่อสารดาวเทียม สัญญาณที่รับเข้าเครื่องรับมีหน่วยเป็นไมโครวัตต์ (Microwatts) ในกรณีที่สัญญาณมีกำลังอ่อนมาก ๆ นั้นการออกแบบวงจรก็จะยุ่งยากขึ้น โดยเฉพาะการถ่ายเทพลังงานจากวงจรต่อวงจรแมทช์ (Match) กันจึงเป็นสิ่งสำคัญ การลดทอน (Attenuation) หรือการสูญเสีย (Loss) ในวงจรก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบวงจร อีกทั้งอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N ratio) ด้วย



รูป 2.1 รูปแบบของการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2.1 เป็นการสื่อสารแบบง่าย ๆ จุดประสงค์ในระบบนี้ คือ การส่งข่าวสารจากจุดหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า แหล่งข่าวสาร (Information source) ไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งเรียกว่าจุดปลายทาง (Destination) โดยทั่วไปข่าวสารที่จะส่งยังไม่อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า เราต้องเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดย เครื่องแปลงกำลัง (Transducer) ให้มีปริมาณของสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อถึงจุดปลายทางก็เปลี่ยนกลับจากสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นบข่าวสารอีกทีหนึ่ง โดยใช้เครื่องแปลงกำลังออก (Out Transducer)

โดยปกติแหล่งข่าวสารและจุดปลายทางจะอยู่ห่างกัน จึงต้องมีการส่งให้ถึงกันโดยสายส่งหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยวิธีการเหล่านี้จะทำให้สัญญาณที่ส่งเกิดการผิดเพี้ยน (distortion) และมีสัญญาณรบกวนรวมเข้ามาด้วย สัญญาณรบกวนและการผิดเพี้ยนของสัญญาณเป็นปัญหาหลักของการสื่อสาร สำหรับในเครื่องส่งและเครื่องรับนั้นปัญหานี้จะน้อยมาก เนื่องจากการออกแบบ วงจรและคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในวงจรถูกปรับปรุงขึ้นอย่างมาก ในบางครั้งเราสามารถส่งสัญญาณจากเครื่องส่งก็คือ การขยายสัญญาณ (Amplification) การกรองสัญญาณ (Filtering) และการมอดดูเลท (Modulation) ในการส่งสัญญาณจะมีคลื่นพาหะ (Carrier Wave) เป็นตัวพาสัญญาณไป

การโมดูเลชั่นก็คือ การเปลี่ยนแปลงความสูง (Amplitude) เฟส (Phase) ความถี่ (Frequency) ของสัญญาณพาหะตามสัญญาณที่จะส่ง การโมดูเลทสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ การโมดูเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous carrier wave modulation) และ พัลซ์โมดูเลชั่น (Pulse Modulation) การโมดูเลทในระบบสื่อสารเป็นการแมทช์ (Matching) ระหว่างสัญญาณกับคุณสมบัติของช่อง (Channel Characteristic) เพื่อลดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ในการส่งหลาย ๆ สัญญาณเข้ากับช่องส่งเดียว ความสำเร็จของระบบการสื่อสารก็คือการออกแบบการโมดูเลทได้อย่างเหมาะสม ในที่จะกล่าวถึงการโมดูเลชั่นแบบความสูง แบบความสูง ซึ่งเป็นการโมดูเลชั่นแบบต่อเนื่อง

หน้าที่หลักของเครื่องรับ (Receiver) ก็คือ แปลงสัญญาณ ที่รับมาได้จากทางส่งเรียกว่า การดีโมดูเลชั่น (Demodulation) เป็นวิธีการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงกันข้ามกับเครื่องส่ง ซึ่งใช้วิธีการโมดูเลชั่นในเครื่องรับก็ต้องมีการขยายสัญญาณและการกรองสัญญาณด้วย

2.2 การมอดดูเลทแบบความสูง (Amplitude Modulation)

การมอดดูเลทมีความจำเป็นต่อการส่งคลื่นวิทยุสัญญาแความถี่ต่ำ เช่น สัญญาณเสียง การที่จะให้การกระจายคลื่น (Rediation) ได้ดีที่สุดนั้น ความยาวของสายอากาศ จะต้องมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของสัญญาณนั้น ความถี่และความยาวคลื่น มีความสัมพันธ์กับความเร็วเฟส คือ

$$f = V_p$$

สัญญาณความถี่ต่ำส่วนมากจะมีความถี่ประมาณ 1 KHz และเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางเท่ากับความเร็วแสง ดังนั้น ความยาวคลื่นจะเท่ากับ

$$3*10^8/1*10^3 = 300 \text{ Km}$$

ในทางปฏิบัติ จะยากมากในการสร้างสายอากาศสำหรับใช้ในความถี่นี้จึงต้องเอาความถี่นี้ไปรวมกับความถี่สูง (ความยาวคลื่นสั้น) เรียกว่า ความถี่พาหะ (Carrier wave) โดยปกติคลื่นพาหะจะเป็นคลื่นรูปไซน์ ซึ่งโวลเตจจะเปลี่ยนไปตามเวลา จากสมการ

$$E_c = E_{c(MAX)} SIN(W_c t+e) \qquad (2.1)$$

พารามิเตอร์ของคลื่นนี้ที่จะมอดดูเลทคือ (1) $E_{c(max)}$ ใช้สำหรับการมอดดูเลทแบบความสูง (Amplitude Modulation) (2) f_c (หรือ $W_c = 2 \pi f_c$) ใช้สำหรับการมอดดูเลทแบบความถี่ (Frequency Modulation) การมอดดูเลทแบบความถี่และเฟสเรียกรวมกันว่าการมอดดูเลทเชิงมุม (Angle Modulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาวิธีการมอดดูเลทแบบความสูงนี้ สามารถใช้สัญญาณไซน์แทนสัญญาณที่ต้องการส่งได้ จากสมการ

$$e_m = E_{m(MAX)} SIN\ W_m t \qquad (2.2)$$

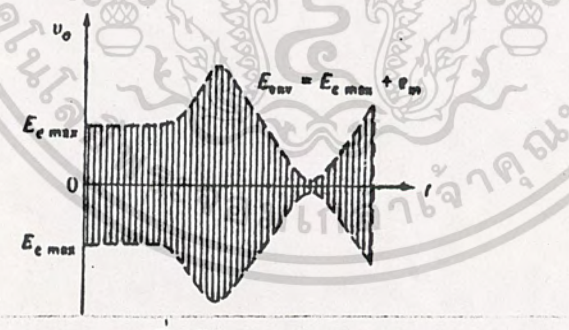
กำหนดให้

$$W_m = 2\pi f_m$$

เมื่อคลื่นพาหะถูกมอดดูเลทแบบความสูง กับสัญญาณที่จะส่งโวลเตจของคลื่นพาหะก็จะถูกเปลี่ยนไปตามสัญญาณที่ส่ง ดังนั้น

$$e = (E_{c(MAX)} + e_m) SIN\ W_c t \qquad (2.3)$$

โดย e คือโวลเตจของสัญญาณมอดดูเลท E_c คือ ความสูงของคลื่นพาหะที่ยังไม่ได้มอดดูเลท และ E_m คือ โวลเตจที่เข้าไปมอดดูเลท



รูป 2.2 รูปคลื่นสัญญาณมอดดูเลทางความสูง

รูป 2.2 แสดงถึงสัญญาณที่มอดดูเลทต่อหนึ่งคาบ สมมติสัญญาณทั้งสองเป็นคลื่นรูปไซน์ จุดยอด (Peak) ทั้งหมดของคลื่นพาหะอาจเขียนเป็นเอนวิโลป (Envelope) ได้จากสมการ

$$e_{env} = E_{c(MAX)} + e_m \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

e_{env} คือค่าของรูปคลื่นเอนวิโลป

แทนค่า e_m จากสมการ (2.2) ในสมการ (2.4) จะได้โวลเตจมอดดูเลท คือ

$$e = e_{env} \sin W_c t$$

$$= (E_{c(MAX)} + E_{m(MAX)} \sin W_m t) \sin W_c t \qquad (2.5)$$

การวัดที่มีประโยชน์ คือการวัดองศาของการมอดดูเลทซึ่งเรียกว่าดัวชี้การมอดดูเลท (Modulation Index) m, คือ

$$m = E_{m(MAX)} / E_{c(MAX)} \qquad (2.6)$$

ดังนั้นสมการ (2.5) จะได้

$$e = E_{c(MAX)} (1+m+\sin W_m t) \qquad (2.7)$$

ถ้าไม่มีการสูญเสียเลย กำหนดให้ความสูงของคลื่นพาหะเท่ากับ IV นั่นคือ จากสมการ (2.7) จะได้

$$e = (1+m+\sin W_m t) \sin W_c t \qquad (2.8)$$

สมการ (2.8) นี้สามารถเขียนเป็นรูปคลื่นที่มีค่า ของ m ต่างไป 3 ค่า เพื่อดูความแตกต่างของความหมาย m ตามรูป (2.3)

จะเห็นได้ว่าถ้า $m>1$ ค่าสูงสุด (Peak) ของเอนวิโลปจะถูกตัดออกไป และคลื่นพาหะจะหายไปด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการเพี้ยนในการมอดดูเลท ค่าต่ำสุดของ m เท่ากับ ศูนย์ ($E_{m(min)} = 0$) ดังนั้นในทางปฏิบัติ m ควรมีค่า $0 < m < 1$

เปอร์เซนต์การมอดดูเลท (Percent Modulation) เท่ากับ

$$\text{percent Modulation} = M*100\% \qquad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $E_m = (E_{m(MAX)} - E_{m(MIN)}) / 2$

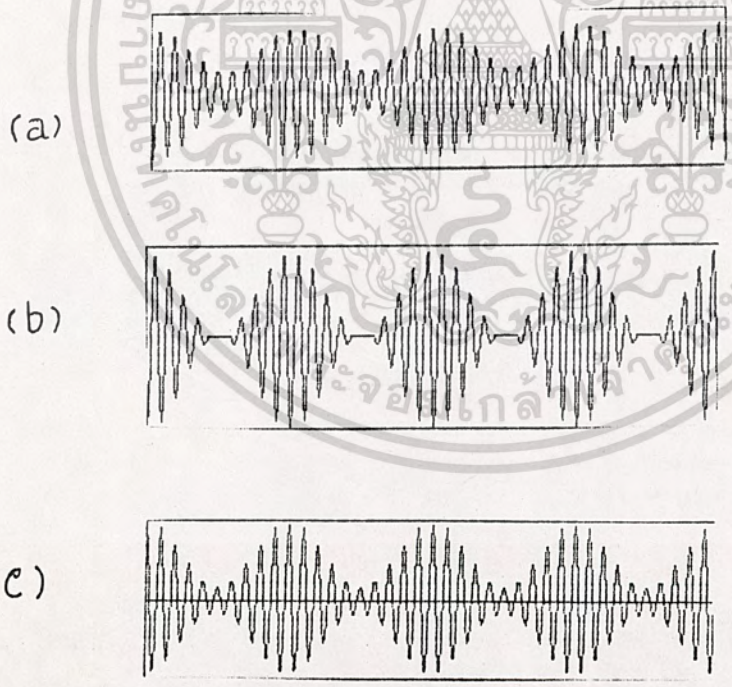
$E_c = (E_{c(MAX)} - E_{c(MIN)}) / 2$

ดังนั้น

$$M = (E_{m(MAX)} - E_{m(MIN)}) / (E_{c(MAX)} - E_{c(MIN)}) \quad (2.10$$

percent Modulation จะมีค่าเท่ากับ

$$= (E_{m(MAX)} - E_{m(MIN)}) * 100\% / (E_{c(MAX)} - E_{c(MIN)}) \quad (2.11$$



รูป 2.3 รูปคลื่นมอดดูเลทเมื่อ (a) m = 0.5 (Undermodulat
(b) m = 1 (Fully modulated (c) m >1.0 (overmodulated)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สเปคตรัมความถี่

จากสมการ 2.8 นี้สามารถกระจายออกไปได้อีก คือ

$$e = (1+m+\sin W_c t)*\sin W_c t$$

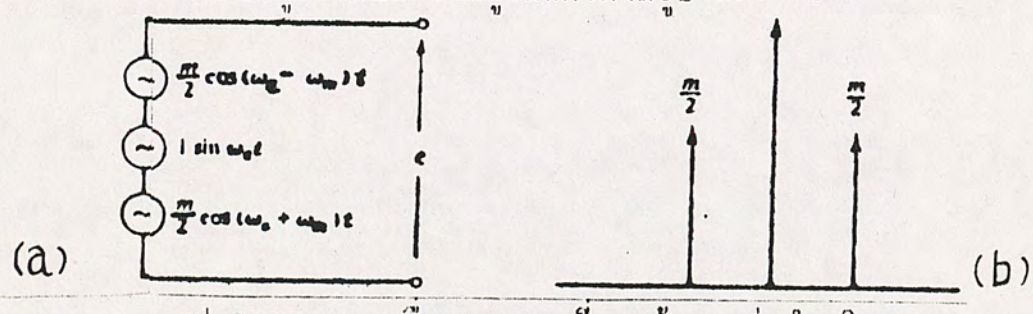
$$= \sin W_c t + m\sin W_m t*\sin W_c t$$

$$= \sin W_c t + m/2(\cos(W_c - W_m)t - \cos(W_c + W_m)t \quad (2.12$$

จากสมการนี้สามารถคำนวณต่อไปได้โดยใช้

$$\cos(A+B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$$

สมการ (2.12) ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 อย่าง ซึ่งเปรียบเสมือนแหล่งสัญญาณไซน์ 3 วงจรต่ออนุกรมกัน ตามรูป 2.4 (a) ด้านขวามือคือคลื่นพาหะที่มีความสูง 1 โวลต์ และความถี่ f_c เทอมต่อมาคือคลื่นโคไซน์ (Cosine wave) ที่มีความสูง 1/2 m และความถี่ $f_c - f_m$ ซึ่งเรียกว่าความถี่ด้านต่ำ (Lower Side Frequency) เทอมสุดท้าย คือ คลื่นโคไซน์ที่มีความสูง 1/2 m และความถี่ $f_c + f_m$ ซึ่งเรียกว่าความถี่ด้านสูง (Upper Side Frequency) สเปคตรัมที่แสดงถึงคลื่นมอดดูเลทแบบความสูงแสดงตามรูป 2.4 (b)



รูป 2.4 (a) คลื่นมอดดูเลทที่แทนด้วยแหล่งกำเนิด
(b) สเปคตรัมของคลื่นมอดดูเลท 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการมอดดูเลท จะได้รูปคลื่นที่มีความถี่ด้านต่ำ และความถี่ด้านสูง ซึ่งจะได้ว่าแบนวิทของคลื่นสัญญาณ

bandwidth = f highest - f lowest

โดย

f highest = f carrier + f information

f lowest = f carrier - f information

ดังนั้น

bandwidth = (f carrier + f information)

(f carrier - f information)

= 2 f information

จะได้ว่า bandwidth ของคลื่นวิทยุ AM. เท่ากับ 2 เท่าของความถี่ของ information รอบ ๆ สัญญาณคลื่นวิทยุ

จำนวนพลังงานที่สูญเสียในเสาอากาศ มีค่า

$$P_c = E_c^2/R_R$$

E_c คือ โวลท์เตจของ carrier เป็น (rms) และ Q_R radiation resistance of Antenna

จาก

$$e = E_c(1+m\,SIN\,W_m t)\;\; SIN\,W_c t$$

$$P_{usf} = V^2_{usf}/R_R$$

$$= (mE_c/2)^2/R_R$$

$$= M^2P_c/4 \qquad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027840

$$P_{inf} = V^2_{usf}/R_R$$

$$= (mE_c/2)^2/R_R$$

$$= M^2P_c/4 \qquad (2.14)$$

พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการส่งผ่านต่อไปยังเสาอากาศมีค่า

$$P_{total} = P_c+P_{inf}+P_{usf} = P_c+M^2P_c/4+M^2P_c/4 \qquad (2.15)$$

2.3 วงจรขยายกำลัง

2.3.1 เส้นโหลดไฟสลับของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม (CE)

ทุกวงจรขยายจะมีโหลดอยู่ 2 อย่าง คือ โหลดไฟตรง (DC) และโหลดไฟสลับ (AC)จำเป็นต้องวิเคราะห์วงจรสมมูลย์ไฟตรง (DC EQUIVALENT CIRCUIT) เพื่อที่จะหาจุดอิ่มตัว (SATURATION) และจุดคัทออฟ (CUT OFF) บนเส้นโหลดไฟตรง และถ้าหากต้องการหาจุดอิ่มตัวและจุดคัทออฟบนเส้นโหลดไฟสลับ ก็ต้องวิเคราะห์วงจรสมมูลย์ไฟสลับ (AC EQUIVALENT CIRCUIT)

จุด Q

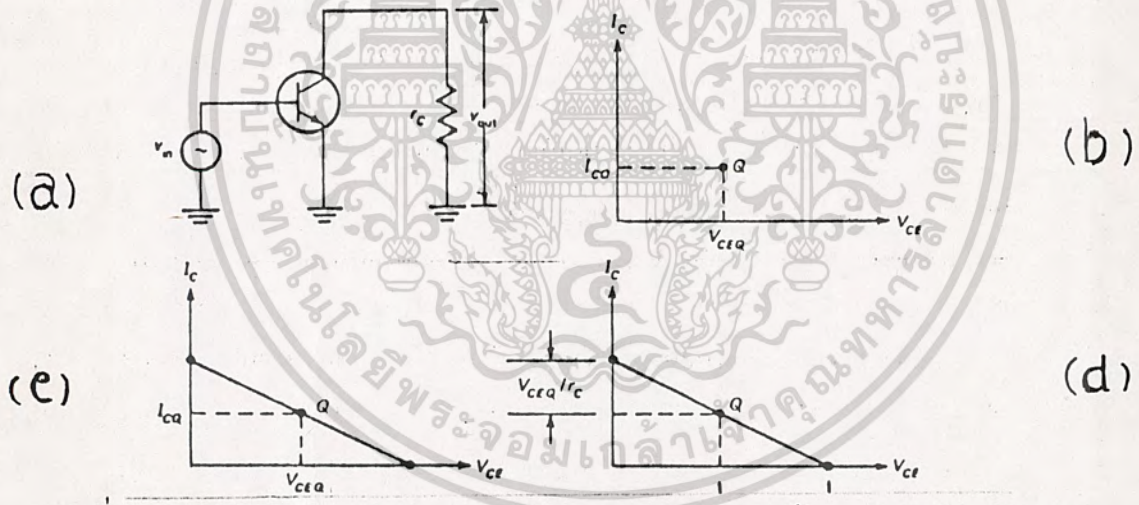
สามารถคำนวณค่า I_c และ V_{CE} ซึ่งเป็นกระแส และแรงดันไฟตรงที่ขาคอลเลคเตอร์ได้จากวงจรสมมูลย์ไฟตรง แล้วลงจุด (plot) Q ด้วยการให้แกนกระแส I_c เป็นแกนตั้ง และแกนแรงดัน V_{CE} เป็นแกนนอน ลากจุดตุด จุดตัดนี้ คือ จุด Q ไม่ว่าจะเป็นการไบอัสแบบใดก็ตาม วิธีการหาจุด Q นั้นใช้วิธีเดียวกันเพื่อไม่ให้สับสนจะขอแทน กระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ I_c ที่หาได้จากวงจรสมมูลย์ไฟตรง ด้วย I_{cq} และแทนแรงดันคร่อมขาคอลเลคเตอร์ และขาอิมิตเตอร์ ที่หาได้จากวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเมื่อมีการนำไปใช้

สมมูลย์ไฟตรง ด้วย V_{CEQ} (I_{CQ} และ V_{CEQ} หมายถึง กระแสที่ขาคอลเลคเตอร์และแรงดันคร่อมขาคอลเลคเตอร์ - อิมิตเตอร์ขณะที่มีเฉพาะไฟตรงในการไฟอัสไม่อินพุทไฟสลับ)

การอิ่มตัว (SATURATION) และ คัทออฟ (CUT OFF)

รูป 2.5 (a) แสดงให้เห็นวงจรสมมูลย์ไฟสลับของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม ขาอิมิตเตอร์ต่อลงกราวนด์ และ ขาคอลเลคเตอร์ผ่านตัวต้านทาน r_c แล้วลงกราวนด์เมื่อไม่มีสัญญาณอินพุททรานซิสเตอร์จะทำงานด้วยค่าที่จุด Q ดังรูป 2.5 (b) แต่เมื่อมีสัญญาณอินพุทซึ่งเป็นไฟสลับเข้ามา ค่า I_c และ V_{CE} ขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานเหวี่ยงขึ้นบนและล่างจุด Q ไปตามเส้นโหลดดังรูป 2.5 (c) ถ้าสัญญาณอินพุทไฟสลับมีขนาดใหญ่พอที่จะเหวี่ยงให้จุดในกราฟ ถึงจุดอิ่มตัว (SATURATE) และจุด (CUT OFF) ได้



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลการทำงานของทรานซิสเตอร์ และเส้นโหลดไฟสลับ

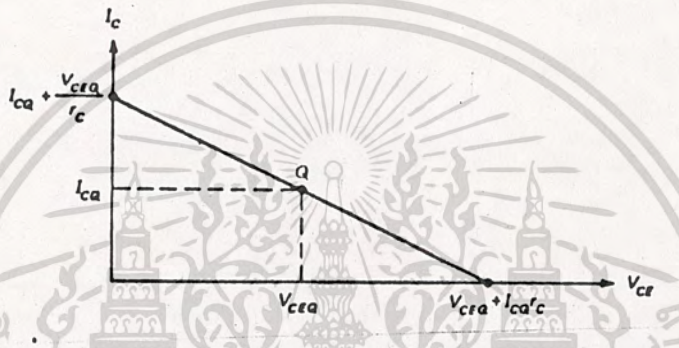
เมื่อทรานซิสเตอร์ถึงจุดอิ่มตัว V_{CE} จะมีค่าประมาณศูนย์ (ในกราฟ) ช่วงของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจากจุด Q ถึงจุดอิ่มตัวจึงมีค่าเท่ากับ V_{CEQ} นั่นเอง และช่วงของกระแสที่เปลี่ยนแปลงที่ขาคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$I_{CQ} = V_{CEQ}/R_c \qquad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทรานซิสเตอร์ถึงจุดคัทออฟ ค่ากระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ (I_c) มีค่าเท่ากับศูนย์ ช่วงของกระแสที่เปลี่ยนแปลงจากจุด Q ถึงคัทออฟ มีค่าเท่ากับ I_{cq} และช่วงแรงดันที่เปลี่ยนแปลงคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับขาอามิตเตอร์กับขาอามิตเตอร์มีค่าเป็น

$$V_{ceq} = I_{cq}/R_c \qquad (2.17$$



รูปที่ 2.6 เส้นโหลดไฟสลับของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

รูปที่ 2.6 แสดงเส้นโหลดไฟสลับของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมจุด Q ในกราฟมีตำแหน่งเป็น (V_{CEQ} , I_{CQ}) กระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ ณ จุดอิ่มตัวมีค่าเป็น

$$I_{c(SAT)} = I_{CQ} + V_{CEQ}/r_c \qquad (2.18)$$

แรงดันตกคร่อมขาคอลเลคเตอร์ และขาอิมิตเตอร์ ณ จุดคัทออฟ มีค่าเป็น

$$V_{CE(cut\ off)} = V_{CEQ} + I_{CQ}\, r_c \qquad (2.19)$$

ค่าอัตราสูงสุด

แรงดันพังทลาย (BREAK-DOWN VOLTAGE) ของขาคอลเลคเตอร์ขึ้นอยู่กับว่าที่ขาเบสมีการป้อนแหล่งกำเนิดแรงดัน หรือ แหล่งกำเนิดกระแส ถ้าเป็นแหล่งกำเนิดแรงดัน ขาเบสจะเสมือนลัดวงจรกับขาอิมิตเตอร์ เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดคัทออฟ ในกรณีนี้ แรงดันคัทออฟแทนด้วย V_{CES} คือแรงดันตกคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ เมื่อขาเบสลัดวงจรกับขาอิมิตเตอร์

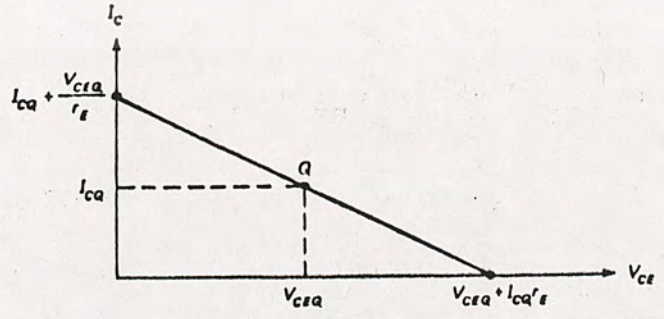
ถ้าป้อนขาเบสด้วยแหล่งกำเนิดกระแส ขาเบสจะเสมือนเปิดวงจร เมื่อทรานซิสเตอร์เกิดคัทออฟ แรงดันคัทออฟกรณีนี้แทนด้วย V_{CEO} เป็นแรงดันตกคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ เมื่อขาเบสเปิดวงจร

เมื่อมีการบอกค่าในใบกำกับข้อมูล จะบอกค่าทั้ง 2 ค่าที่กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเช่น ใบกำกับข้อมูลของ D42C (ทรานซิสเตอร์กำลังขนาด 12.5 วัตต์) จะเขียนไว้ว่า V_{CES} = 40 V และ V_{CEO} = 30 V หมายความว่า ทรานซิสเตอร์ตัวนี้สามารถทนแรงดันระหว่างขาคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์และอิมิตเตอร์สูงสุด 40 โวลต์ เมื่อขาเบสมีการป้อนแหล่งกำเนิดแรงดัน แต่ถ้าป้อนด้วยแหล่งกำเนิดกระแส จะทนได้สูงสุด 30 โวลต์ ในทางปฏิบัติ ถ้าไม่แน่ใจเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดควรใช้แรงดันพังทลายที่มีค่าต่ำกว่า เป็นค่าอัตราสูงสุดจะเป็นการปลอดภัยกว่า

2.3.2 เส้นโหลดไฟสลับของวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นเส้นโหลดไฟสลับของวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ จุด Q มีตำแหน่ง (V_{CEQ} , I_{CQ}) ค่ากระแส I_c อิ่มตัวไฟสลับ คือ

$$I_{c(SAT)} = I_{CQ} + V_{CEQ}/r_E \qquad (2.20)$$



รูปที่ 2.7 เส้นโหลดไฟสลับของวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดัน V_{CE} คัทออฟเป็น

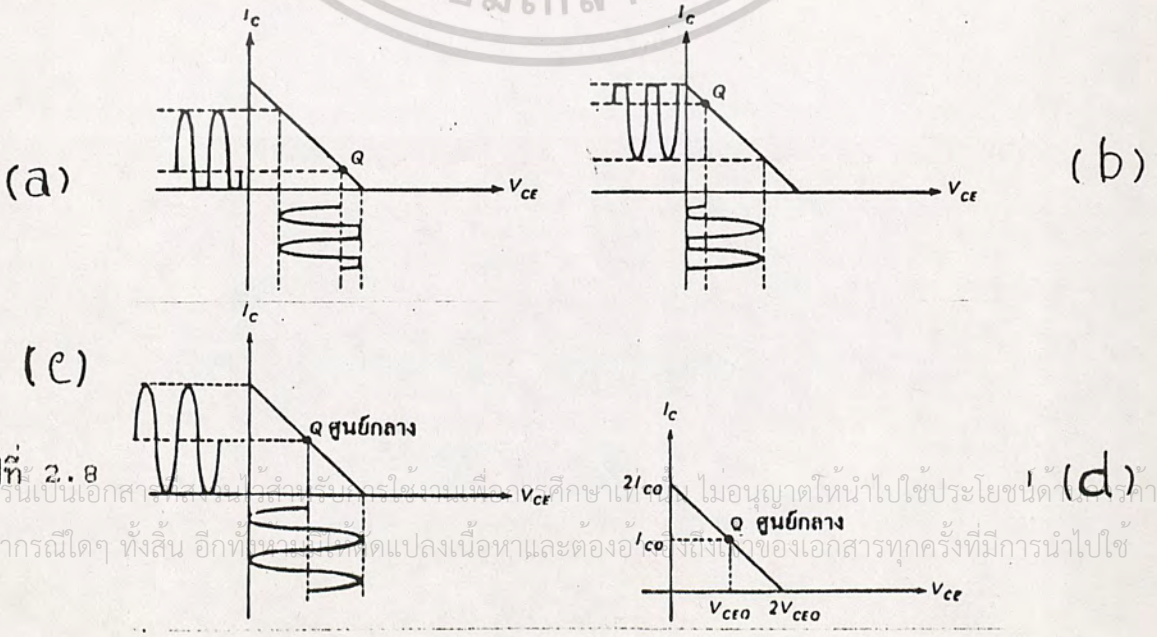
$$V_{CE(cut\ off)} = V_{CEQ} + I_{CQ} r_E \qquad (2.20)$$

เช่นเดียวกันกับวงจรวิมิตเตอร์ร่วม ค่ากระแส I_C อิ่มตัว จะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าอัตรากระแส I_C สูงสุดของทรานซิสเตอร์ และค่าแรงดัน V_{CE} คัทออฟ ต้องน้อยกว่าค่าแรงดัน V_{CEO} หรือ V_{CES} ตามแต่กรณี แต่ถ้าไม่แน่ใจควรใช้ค่าที่ต่ำกว่าเป็นค่าอัตราสูงสุด

2.2.3 จุด Q ที่เหมาะสม

รูปที่ 2.8 (a) แสดงให้เห็นถึงการที่สัญญาณไฟสลับถูกตัดหายไปหรือถูกขลิบไปนิดหลบเนื่องจากจุด Q อยู่ใกล้กับจุดคัทออฟมากเกินไป เมื่อมีสัญญาณไฟสลับเข้ามา ค่า I_C และ V_{CE} จะเปลี่ยนแปลงเหวี่ยงขึ้นหรือลงจากจุด Q ไปตามเส้นโหลดไฟสลับโดยที่สัญญาณในซีกหลบของไฟสลับยังไม่ถึงจุดยอดแต่ค่า V_{CE} เกินค่าแรงดันคัทออฟเสียแล้ว จึงทำให้สัญญาณถูกขลิบไป เรียกว่า การขลิบเนื่องจากคัทออฟ (CUTOFF CLIPPING)

ถ้าจุด Q อยู่สูงเกินไปก็จะใกล้จุดอิ่มตัวเกินไป จะทำให้เกิดการขลิบเนื่องจากอิ่มตัว (SATURATION CLIPPING) ดังแสดงในรูป 2.8 (b) ซึ่งสัญญาณไฟสลับซีกบวกจะถูกขลิบหายไป



รูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่จะให้ได้สัญญาณมีขนาดใหญ่ที่สุด แต่ไม่โดนขลิบ ทำได้โดยการกำหนด Q ที่เหมาะสม คือ จุดกึ่งกลาง ศูนย์กลางของสมการไฟสลับดังรูป 2.8 (c)

คลาสเอ (A)

ทรานซิสเตอร์ตัวเดียวที่สามารถทำงานตลอดช่วงไซเคิลไฟสลับ โดยไม่เกิดการถูกขลิบของสัญญาณเกิดขึ้น การทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า การทำงานในคลาส A

ในวงจรขยายคลาส A จุด Q จะอยู่ ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเส้นโหลดไฟสลับ ดังแสดงใน รูป 2.8 (c) เมื่อเป็นเช่นนี้ จึงทำให้ได้ขนาดของสัญญาณใหญ่ที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยที่สัญญาณไม่ถูกขลิบเลย

จุด Q ศูนย์กลางของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

รูปที่ 2.8 (d) แสดงให้เห็นจุด Q ศูนย์กลาง จะเห็นได้ง่าย ๆ ว่ากระแสอิ่มตัวต้องเป็น 2 เท่าของกระแส I_{CQ} และแรงดันคัทออฟเป็น 2 เท่าของ V_{CEQ} มิเช่นนั้น จุด Q จะไม่เป็นจุด Q ศูนย์กลาง

$$I_{C(SAT)} = 2I_{CQ}$$

$$V_{CE(cut\ off)} = 2V_{CEQ}$$

ในวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

$$I_{C(SAT)} = I_{CQ} + V_{CEQ}/r_c$$

เมื่อจุด Q เป็นจุด Q ศูนย์กลางจะได้ว่า

$$2I_{CQ} = I_{CQ} + V_{CEQ}/r_c$$

จะได้ว่า $$r_c = V_{CEQ} / I_{CQ} \qquad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจุด Q เป็นจุด Q ศูนย์กลาง

r_c คือ ความต้านทานที่ขาคอลเลคเตอร์ในวงจรสมมูลย์ไฟสลับของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม สมการที่ 2.21 นี้มีความสำคัญมาก เพราะว่าใช้ทดสอบว่า จุด Q เป็นจุด Q ศูนย์กลางหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า จุด Q จะเป็นจุด Q ศูนย์กลางในเฉพาะวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม เมื่อมีความต้านทานที่ขาคอลเลคเตอร์ในวงจรสมมูลย์ไฟสลับเท่ากับค่าอัตราส่วนของ V_{CEQ} ต่อ I_{CQ} เราจะเห็นถึงประโยชน์ของสมการนี้ในการวิเคราะห์วงจรขยายกำลัง

จุด Q ศูนย์กลางของวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์

ด้วยวิธีการเดียวกันจะได้ว่าเมื่อจุด Q เป็นจุด Q ศูนย์กลางในวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์

$$r_e = V_{CEQ} / I_{CQ} \qquad (2.22)$$

r_e คือ ความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์ในวงจรสมมูลย์ไฟสลับของวงจรขยายอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์

2.3.4 สูตรกำลัง

กำลังที่สูญเสียไปขณะไม่มีสัญญาณไฟสลับที่อินพุท

รูปที่ 2.9 (a) แสดงให้เห็นจุด Q ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมขณะที่ไม่มีสัญญาณไฟสลับเข้าที่อินพุท ทรานซิสเตอร์จะมีกำลังสูญเสียเป็น

$$P_{DQ} = V_{CEQ} I_{CQ} \qquad (2.23$$

จุด Q ที่ไม่ได้อยู่ ณ จุด Q ศูนย์กลาง

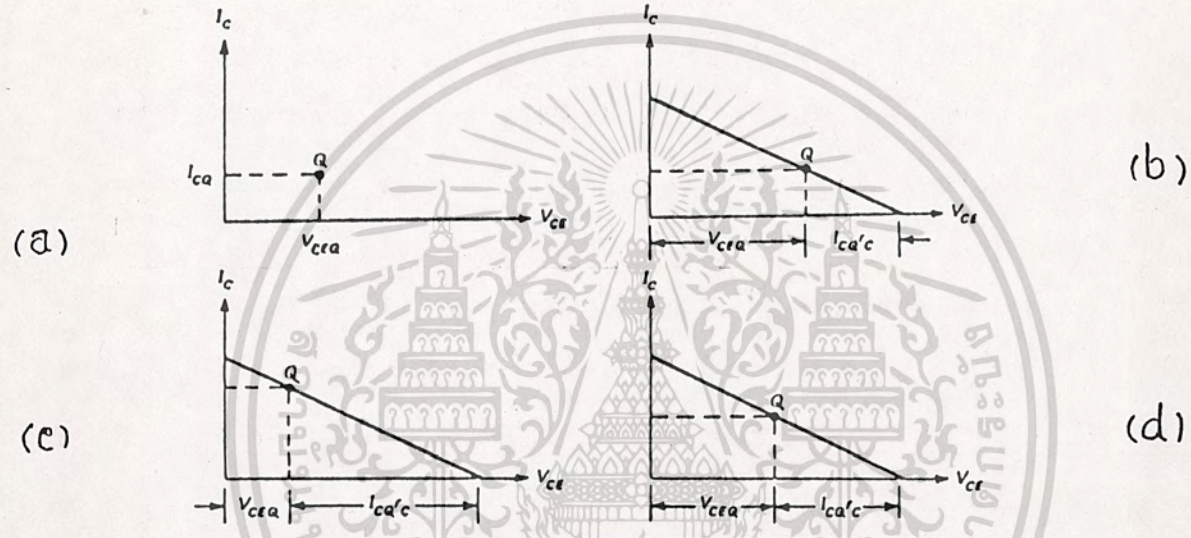
รูปที่ 2.9 (b) จุด Q อยู่ใกล้จุดคัทออฟ ซึ่งจะเกิดการขลิป เนื่องจากคัทออฟเป็นสิ่งแรก สัญญาณขนาดใหญ่ที่สุดที่จะไม่ถูกขลิป วัดจากระดับจุด Q จนถึงจุดยอดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_p = I_{cq} r_c$$

รูปที่ 2.9 (c) จุด Q อยู่ใกล้จุดอิ่มตัว สัญญาณเอาท์พุทที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่ไม่ถูกขลิบ คือ

$$V_p = V_{ceq}$$



รูปที่ 2.9 (a) จุด Q (b) จุด Q ที่อยู่ต่ำกว่าจุด Q ศูนย์กลาง
(c) จุด Q ที่อยู่สูงกว่าจุด Q ศูนย์กลาง
(d) จุด Q ที่จุด Q ศูนย์กลาง

เมื่อจุด Q ไม่ได้เป็นจุด Q ศูนย์กลาง กำลังเอาท์พุทมีค่ามากที่สุดโดยที่สัญญาณไม่ถูกขลิบมีค่าเป็น

$$P_o = (V_{rms})^2 / r_c = (V_p/2)^2 / r_c$$

$$P_o = V_p / 2r_c \qquad (2.24$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_p = I_{CQ}R_c$ หรือ V_{CEQ} นั้น

ให้ถือเอาตัวที่มีค่าน้อยกว่า เนื่องจากเราไม่ต้องการให้สัญญาณถูกขลิบไป

จุด Q ศูนย์กลาง

ในรูปที่ 2.9 (d) จุด Q เป็นจุด Q ศูนย์กลาง ฉะนั้นจุดยอดของสัญญาณสามารถเหวี่ยงขึ้นไปข้างบนและล่างจุด Q ได้เท่ากัน

$$V_p = V_{CEQ} = I_{CQ}R_c$$

ถ้าแทนลงในสมการ 2.16 จะได้

$$P_o = V_p^2 / R_c = V_{CEQ} I_{CQ} R_c / 2R_c$$

$$= V_{CEQ} I_{CQ} /2$$

$$P_o = P_{DQ} / 2 \qquad (2.25)$$

สมการ 2.25 เป็นสมการที่สำคัญ แสดงให้เห็นว่า กำลังเอาท์พุทสูงสุดของไฟสลับที่ให้แก่ความต้านทาน r_c มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูญเสีย เมื่อไม่มีสัญญาณไฟสลับเข้าที่อินพุท วงจรขยายกำลังคลาส A จะถูกออกแบบให้จุด Q อยู่จุดศูนย์กลางบนสมการเส้นโหลดไฟสลับเสมอ

ดังนั้นถ้าทรานซิสเตอร์สูญเสียกำลัง 3 W เมื่อไม่มีสัญญาณอินพุทจะได้กำลังเอาท์พุทของไฟสลับสูงสุด 1.5 W ในทางกลับกัน ถ้าต้องการวงจรขยายกำลังคลาส A ที่ให้กำลังเอาท์พุทไฟสลับ 30 W จะต้องทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถสูญเสียกำลังอย่างน้อย 60 W ที่จุด Q

อิมิตเตอร์ฟอลโลวเวอร์

สูตรหากำลังสำหรับวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลวเวอร์ คล้าย ๆ กับของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{DQ} = V_{CEQ} I_{CQ}$$

สำหรับจุด Q ที่ไม่ได้อยู่ ณ จด Q ศูนย์กลาง บนสมการเส้นโหลดไฟสลับแรงดันสูงสุดที่จะเหวี่ยงได้โดยไม่ถูกขลิบเป็น

$$V_P = V_{CEQ} \text{ หรือ } I_{CQ} R_E$$

โดยจะเป็น V_{CEQ} หรือ $I_{CQ} R_E$ ให้เอาตัวที่มีค่าน้อยกว่า เพื่อที่สัญญาณจะได้ไม่ถูกขลิบ กำลังเอาท์พุทไฟสลับสูงสุดมีค่าเป็น

$$P_o = V_P^2 / 2R_E$$

เมื่อจุด Q เป็นจุด Q ศูนย์กลางกำลังเอาท์พุทไฟสลับสูงสุดจะเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูญเสียขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุทไฟสลับของทรานซิสเตอร์

$$P_o = P_{DQ} / 2$$

คลาส B

ในวงจรขยายคลาส B ทรานซิสเตอร์จะทำงานเพียงครึ่งเดียวของรอบจะทำให้ทรานซิสเตอร์คัทออฟ (กระแส IC=0) กระแสคอลเลคเตอร์จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 180 องศา โดยปกติแล้วจะมีทรานซิสเตอร์ 2 ตัวในวงจรเพื่อที่จะทำงานในแต่ละครึ่งรอบซึ่งเรียกว่า วงจรขยายคลาส B พุช-พูล ทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งทำงานในครึ่งรอบด้านบวกอีกตัวทำงานในครึ่งรอบลบ

การไบอัสแรงดัน

รูป 2.10 (a) แสดงการไบอัสแรงดันในวงจรขยายคลาส B ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว จะเป็นตัวช่วยกันทำให้รูปสัญญาณสมบูรณ์ซึ่งต้องมีเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้งทรานคอนดักแตนซ์อัตราสูงสุด และ อื่น ๆ ที่เหมือนกันทั้งสองตัว เช่น 2N3906 เรียกว่าทั้งสองช่วยกันทำให้สมบูรณ์ ตัวแรกเป็น NPN ตัวหลังเป็น PNP ซึ่งทั้งสองตัวมีอัตราก้ำลังเส้นโค้งทรานซ์คอนดัคแตนซ์ และ อื่น ๆ ที่เหมือนกัน

จะเห็นในรูป 2.10 (a) ว่า กระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ และอิมิตเตอร์มีทิศทางเดียวกัน ในทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวแต่ละตัวจะเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันที่จ่ายให้

เพื่อที่จะให้คลาส B ทำงาน จะต้องไบอัสอิมิตเตอร์ไดโอดแต่ละตัวที่แรงดันหักมุมที่ซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำ นั่นคือ แรงดันคร่อม R_2 แต่ละตัวมีค่าประมาณ 0.7 V ค่า V_{BE} ที่ถูกต้องอาจจะสูงหรือต่ำกว่าเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับว่าเป็นทรานซิสเตอร์แบบใด อุณหภูมิเท่าไร

เนื่องจาก เส้นโค้งทรานคอนดักแตนซ์จะชันมากในช่วงหักมุม การผิดพลาด 0.1 V อาจทำให้กระแส I_C เปลี่ยนแปลงไปมากมาย ดังนั้นการไบอัสแรงดันที่ถูกต้องควรใช้การปรับค่า R_1 และ R_2

การไบอัสแรงดัน รูปที่ 2.10 (a) เป็นวิธีที่ไม่ดี การไบอัสวงจรขยายคลาส B พุช-พูล ในทางปฏิบัติจะต้องป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอยต่อ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นศักย์ไฟฟ้าขวางกั้นของไดโอดมิเตอร์จะลดลง 2.5 mV ทุก ๆ 1 องศาของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้นแรงดันคร่อม R_2 ที่คงที่สำหรับไบอัสไดโอดอิมิเตอร์ ก็จะมีค่ามากเกินไป และกระแสคอลเลคเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก

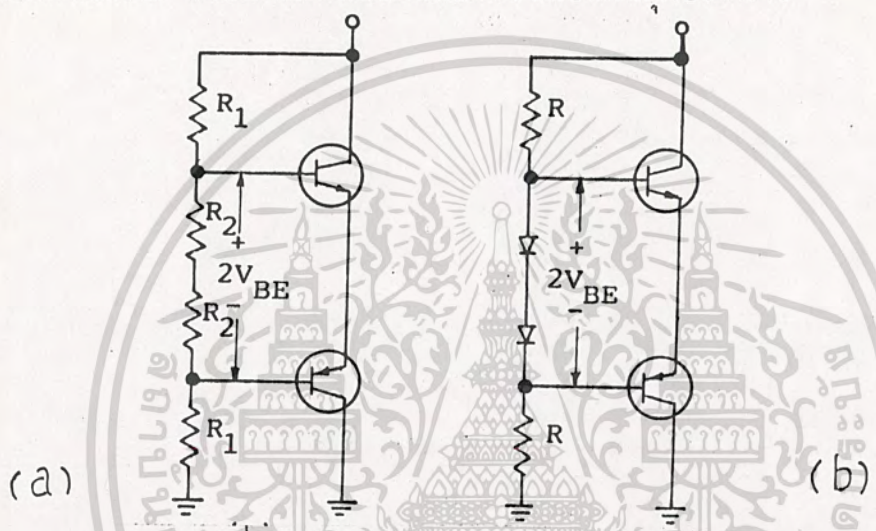
การไบอัสแบบย้อนกระแส

รูปที่ 2.10 (b) แสดงการไบอัสแบบสะท้อนกระแส ซึ่งเป็นการไบอัสที่ใช้ในวงจรขยายคลาส B พุช-พูล ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัวช่วยกันทำให้สมบูรณ์ และเส้นโค้งของลักษณะสมบัติของไดโอดชดเชยที่ตำแหน่ง แทนที่ความต้านทานจะต้องตรงกันกับเส้นโค้งทรานซคอนดัคแตนซ์ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นซีกบนของวงจรจะเป็นแบบ NPN และซีกล่างเป็น PNP สังเกตได้ว่า กระแสคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว มีค่าเท่ากัน ซึ่งเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ใช้ไบอัส

การไบอัสแบบสะท้อนกระแสในการทำงานที่เหมาะสม เส้นโค้งลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของไดโอดชดเชย จะต้องตรงกันกับเส้นโค้งทรานซ์คอนดัคแตนซ์ของทรานซิสเตอร์ในช่วงของอุณหภูมิที่กว้าง ในวงจรที่อุปกรณ์ต่าง ๆ แยกออกจากกัน การกระทำดังกล่าวนั้นกระทำได้ยาก เนื่องจากลักษณะสมบัติของไดโอดและทรานซิสเตอร์อาจแตกต่างกันบ้าง แต่การไบอัสแบบนี้เป็นที่นิยมมากในการผลิตไอซี เนื่องจากไดโอดชดเชยและอิมิตเตอร์ไดโอดถูกสร้างขึ้นบนแผ่นชิพเดียวกัน จึงมีลักษณะสมบัติแทบจะเหมือนกันทุกประการ



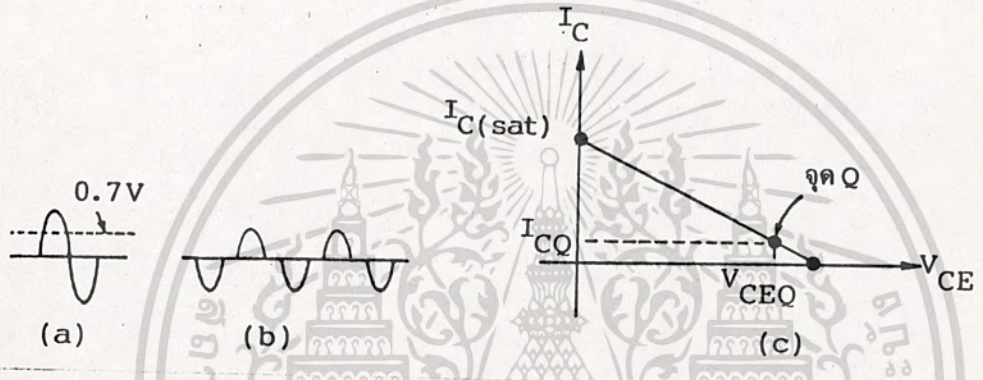
รูป 2.10 วงจรขยายคลาส B พุช-พูล
(a) การไบอัสแบ่งแรงดัน (b) การไบอัสแบบสะท้อน

การผิดเพี้ยน ครอสโอเวอร์ (CROSSOVER DISTORTION)

ในขณะที่ไม่มีสัญญาณไฟสลับจะต้องมีกระแสคอลเลคเตอร์ น้อย ๆ ค่าหนึ่ง ไม่เช่นนั้นแล้วโอกาสที่จะเกิดการผิดเพี้ยน ครอสโอเวอร์ มีสูงมาก สมมติว่า ไม่มีการไบอัสที่อิมิตเตอร์ไดโอดเลย เมื่อมีสัญญาณไฟสลับเข้ามาระดับสัญญาณจำเป็นต้องเพิ่มขึ้น 0.7 V ก่อนจึงจะมีแรงดันมากกว่าศักย์ไฟฟ้าขวางกั้น ดูรูป 2.11 (a) จึงทำให้ไม่มีกระแสคอลเลคเตอร์ เมื่อสัญญาณมีขนาดน้อยกว่า 0.7 V และจะเกิดเหตุการณ์ลักษณะนี้เช่นกันในอีกซีกหนึ่งของรอบของสัญญาณในทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง (แรงดัน-0.7V) ดังนั้น ถ้าไม่มีไบอัสแก่อิมิตเตอร์ไดโอด สัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายคลาส B พุช-พูล จะมีลักษณะดังรูป 2.11 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาท์พุทที่ผิดเพี้ยนไป ทำให้ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากถูกขลิบหายไป ในช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งกำลังหยุดทำงาน และทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งกำลังจะทำงาน เรียกว่า การผิดเพี้ยน ครอสโอเวอร์



รูปที่ 2.11 (a) แรงดันต้องมากกว่าแรงดันขวางกั้น
(b) การผิดเพี้ยน ครอสโอเวอร์
(c) การไบอัสตรงด้วยค่าต่ำ

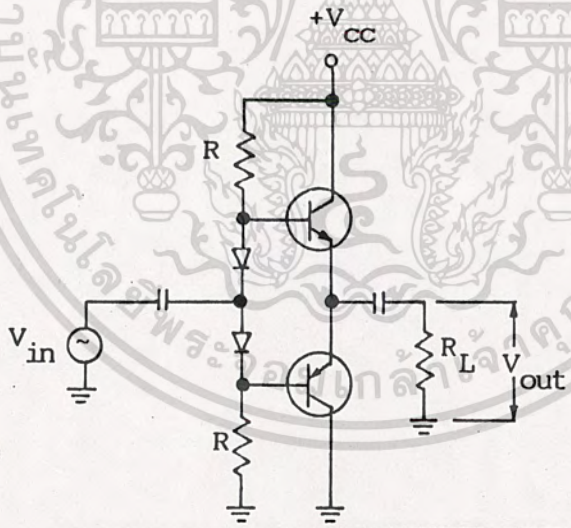
การกำจัดการผิดเพี้ยน ครอสโอเวอร์ จะต้องไบอัสตรงด้วยค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่งที่อิมิตเตอร์ไดโอดแต่ละตัว นั่นคือ จุด Q จะอยู่เหนือจุดคัทออฟไปบนเส้นโหลดไฟสลับเล็กน้อยดังรูปที่ 2.11 (c) กระแส I_{CQ} มีค่าประประมาณ 1-5 เปอร์เซนต์ของ $I_{C(SAT)}$ ก็เพียงพอที่จะกำจัดการผิดเพี้ยนครอสโอเวอร์และเนื่องจาก I_{CQ} มีขนาดเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ใช้ในการไบอัส ซึ่งค่าของ I_{CQ} มีขนาดเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ใช้ในการไบอัส ซึ่งค่าของ I_{CQ} ในรูปที่ 2.10 (b) ควรเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{CQ} = (V_{CC} - 2V_{BE}) / 2R$$

วงจรขยายคลาส B พุช-พูล อิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์

รูปที่ 2.12 คือวงจรขยายคลาส B พุช-พูล มีการไบอัสกลับแบบสะท้อนกระแสโดยกำหนดซีกบวกของแรงดัน (ไฟสลับ) อินพุท ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ไดโอดไปยังขาเบส ทรานซิสเตอร์ตัวบนจะทำงาน (on) เนื่องจากแรงดันไฟสลับอินพุทซีกบวก ทำให้แรงดันที่ไบอัสไดโอดลดลง กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจึงลดลงด้วย (ตามกราฟลักษณะสมบัติของไดโอด) กระแสที่ไหลผ่าน R ตัวบน จึงไหลเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนมากขึ้น แรงดันอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวบนจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันเบสสัญญาณเอาท์พุทซีกบวกก็จะตกคร่อมความต้านทาน R_L ขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวล่างไม่ทำงาน (off)



รูปที่ 2.12 วงจรขยายคลาส B พุช-พูล

สัญญาณเอาท์พุทจะครบรอบสมบูรณ์เมื่อสัญญาณอินพุทซีกลบ เข้าทรานซิสเตอร์ตัวบนจะ off ทรานซิสเตอร์ตัวล่างจะ on ทำหน้าที่เป็นวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ สัญญาณเอาท์พุทซีกลบก็จะตกคร่อมความต้านทาน R_L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรหาอิมพิแดนซ์ (Impedance) และอัตราขยาย (Gain)

อินพุทอิมพิแดนซ์ เมื่อมองเข้าไปในขาเบสของทรานซิสเตอร์ขณะที่กำลังทำงานอยู่

$$Z_{in(base)} = \beta_{dc}(R_L + R_e')$$

อัตราขยายแรงดัน

$$A_v = R_L / (R_L + R_e')$$

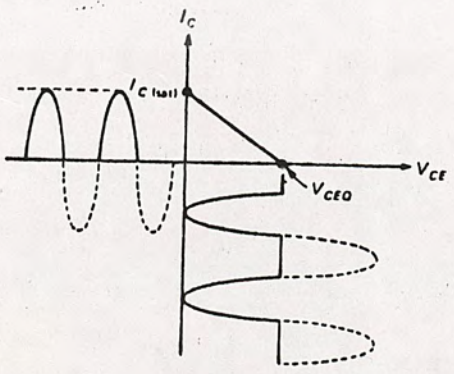
อัตรากำลังขยายมีค่าเท่ากับผลคูณของอัตราขยายแรงดันกับอัตราขยายกระแส (β_{DC})

$$A_p = \beta_{dc} R_L / (R_L + R_e')$$

กำลังเอาท์พุท (Output Power)

รูปที่ 2.13 แสดงเส้นโหลดไฟสลับของวงจรขยายคลาส B พุช-พูล ในอุดมคติในวงจรขยายจริง ๆ จุดอิ่มตัว จะไม่ติดกับแกน I_c เลยทีเดียวและจุด Q ก็จะอยู่เหนือแกนนอน V_{CE} เล็กน้อย

แต่รูปที่ 2.13 เป็นแนวทางทำให้เกิดภาพพจน์ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสมีขนาดใหญ่ที่สุด ที่สามารถได้รับจากทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งในวงจรขยายคลาส B พุช-พูล ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง ก็จะทำให้เกิดอีกครึ่งรอบที่เป็นเส้นประ



รูป 2.13 การเหวี่ยงหรือการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในวงจรคลาส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น แรงดันไฟสลับเอาท์พุทจะมีขนาดของยอด หรือขนาดสูงสุดเท่ากับ V_{CEQ} และกระแสไฟสลับเอาท์พุทจะมีขนาดเท่ากับ $I_{C(SAT)}$ ดังนั้น กำลังเอาท์พุทสูงสุด คือ

$$P_o = V_{rms} I_{rms}$$

$$= (V_{CEQ} / 2) * (I_{C(SAT)} / 2)$$

$$= (V_{CEQ} / I_{C(SAT)}) / 2 \qquad (2.26)$$

กำลังสูญเสีย (POWER DISSIPATION)

เมื่อไม่มีสัญญาณอินพุท ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายคลาส B พุช-พูล จะอยู่ในสถานะอยู่เฉย ๆ เพราะว่ามีเพียงกระแสเล็กน้อยไหลผ่านเท่านั้น กำลังสูญเสียของทรานซิสเตอร์แต่ละตัว ในกรณีนี้สามารถละทิ้งได้ แต่เมื่อมีสัญญาณอินพุทเข้ามา จะมีกระแสจำนวนมากในทรานซิสเตอร์แต่ละตัว จึงทำให้กำลังสูญเสียไม่สามารถละทิ้งได้

$$\text{กำลังสูญเสีย } P_D = V_{CEQ} I_{C(SAT)} / 10$$

จากสมการ 2.26

$$P_D = P_o / 5$$

นั่นหมายถึงว่า อัตรากำลังของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวในวงจรขยายคลาส B พุช-พูลจะต้องมากกว่า 1 ใน 5 ของกำลังเอาท์พุท (ไฟสลับ) สูงสุด เช่น หากมีกำลังเอาท์พุท (ไฟสลับ) 100 W ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะต้องมีกำลังอย่างน้อย

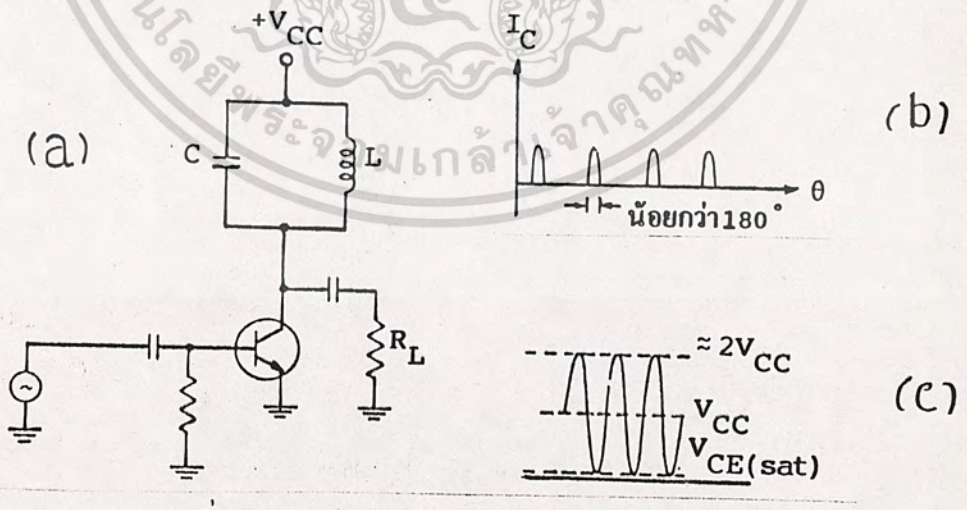
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายกำลังคลาส C

รูปที่ 2.14 เป็นตัวอย่างของวงจรขยายคลาส C ตัวเก็บประจุที่อินพุท ตัวต้านทานที่ขาเบส และอิมิตเตอร์ไดโอดทำหน้าที่เป็นวงจรแคลมเปอร์ด้านลบ ดังนั้นแระแสเบสจะมีเฉพาะยอดของสัญญาณอินพุทไฟสลับ จึงทำให้กระแส I_c เป็นขบวนของพัลส์แคบ ๆ ดังรูปที่ 2.14 (b)

ลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 2.14 (b) ประกอบด้วยความถี่พื้นฐานรวมกับความถี่ฮาร์โมนิคจำนวนมาก

มีพัลส์แคบ ๆ ของกระแส ผ่านเข้าวงจรเรโซแนนซ์ ที่ขาคอลเลคเตอร์ ฮาร์โมนิคที่มีลำดับสูง ๆ ทั้งหมดจะถูกกรองทิ้งไป จะเหลือเพียงความถี่พื้นฐาน นั่นคือ แรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.14 (c) เนื่องจากแรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์ ขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุท มีค่าเท่ากับ V_{cc} ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงหรือการเหวี่ยงของสัญญาณสูงสุดคือจาก $V_{CE(SAT)}$ ถึง 2 V_{cc}



รูปที่ 2.14 วงจรขยายคลาส C

วงจรขยายคลาส C ประสิทธิภาพสูงกว่าคลาส A และ คลาส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่าวงจรขยายคลาส C สามารถให้กำลังเอาท์พุท (ไฟสลับ) ได้มากกว่า ด้วยกำลังสูญเสียของทรานซิสเตอร์เท่ากัน แต่วงจรขยายคลาส C จำเป็นต้องใช้วงจรเรโซแนนซ์ จึงถูกจำกัดขอบเขตของการใช้งาน

2.4 ออสซิเลเตอร์

ระบบการสื่อสารโดยทั่ว ๆ ไป มีความจำเป็นที่จะต้องใช้คลื่นรูปไซน์ในการทำงานเป็นอย่างมาก หรืออาจจะพูดอีกนัยหนึ่งได้ว่า ระบบการสื่อสารแทบจะไม่ได้ ถ้าขาดแหล่งผลิตคลื่นรูปไซน์ มีวงจรหลายชนิดที่ใช้ผลิตคลื่นรูปไซน์เหล่านี้ เช่น วงจรออสซิเลเตอร์แบบป้อนกลับ (Feedback Oscillator) วงจร RC และวงจรจูน LC ความถี่ที่ผลิตนี้เริ่มตั้ง

แต่ความถี่เสียงถึงความถี่ VHF ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่าร์ (BipolarTransistor)และ Fieldeffect หรือ FET สำหรับวงจรออสซิเลเตอร์ที่ใช้คริสตอล (Crystal) ควบคุมนั้นจะจุดอยู่ในประเภทวงจรจูน LC

2.4.1 ความถี่ของการออสซิเลต

วงจรออสซิเลตเป็นวงจรผลิตการออกซิเลตทางไฟฟ้า โดยมีความถี่ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำ (L) และความจุ (C) วงจรออสซิเลเตอร์มีความจุ C และความเหนี่ยวนำ L ที่ต่อร่วมกันได้ความถี่จากการออสซิเลตตามสูตร

$$f = 1 / 2\pi LC$$

ความถี่นี้เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (resonant) หรือความถี่ธรรมชาติ (natural) ของวงจร LC ความถี่จะเป็น Hz ถ้า L เป็นเฮนรีและ C เป็นฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การป้อนกลับเข้าวงจรออสซิเลเตอร์

เนื่องจากในขดลวดมีความสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดซึ่งเป็นความต้านทานกระแสตรงจึงใช้ตัวย่อ R ขณะมีขดลวดมีกระแสไหล I จะเกิดกำลังไฟสูญเสียในขดลวดเป็น I^2R วงจรออสซิเลเตอร์ที่ออสซิเลตแบบไม่ค่อย ๆ ลดลงจึงต้องมีการชดเชยการสูญเสียนี้โดยการป้อนพลังงานให้มีความถี่เดียวกับการออสซิเลต ซึ่งมีความเร็วสูงมากใช้วัสดุที่เป็นกลไกไม่ได้ ต้องใช้วัสดุแอคตีฟ เช่น หลอดหรือทรานซิสเตอร์ช่วยและการป้อนพลังงานให้มีความถี่เดียวกับการออสซิเลตนี้ต้องมีทิศทางเสริมหรือทางเดียวกับการออสซิเลตด้วย

องค์ประกอบของวงจรออสซิเลตเตอร์

2.4.3 ออสซิเลเตอร์แบบจูนคอลเลคเตอร์ (tuned-collector osc)

วงจรนี้มีวงจรจูนที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ คือ L_c C_L ความถี่วงจรนี้หาได้จากสูตร

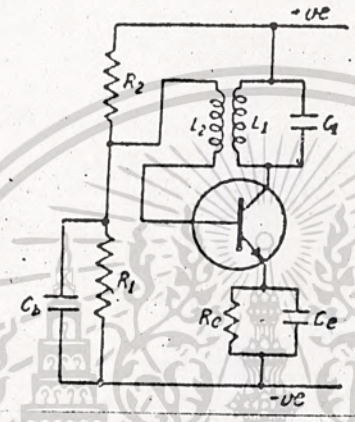
$$f = 1 / 2\pi\sqrt{L_1 C_1}$$

ส่วนของลวด L_2 ในวงจรเบสคับปลิ้งมาจาก L_1 แบบหม้อแปลง และมี R เป็นตัวต้านทานป้อนไฟไปให้วงจร และคาปาซิเตอร์ C_1 มีค่ารีแอคแตนซ์ ต่ำเพื่อเป็นทางให้ออสซิเลต

เมื่อสวิตช์ K ตัดไฟให้วงจรไม่ทำงาน แต่ถ้าสวิทช์ K ต่อจะมีกระแสคอลเลคเตอร์ไหลให้ C_1 เก็บประจุสูงขึ้น ๆ จนถึงจุดหนึ่ง มันจะคายผ่านขดลวด L_1 ทำให้เกิดการออสซิเลตตามความถี่ของสูตรข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

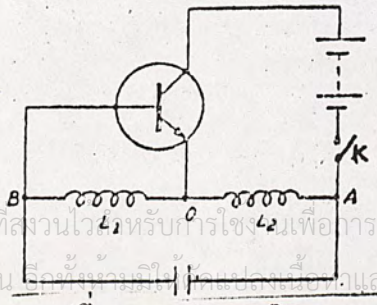
การออสซิเลตจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดไฟคร่อม L_2 ซึ่งมีความถี่เดียวกับวงจรออสซิเลเตอร์ แต่จะทำให้ขนาดเปลี่ยนไปตามค่า L_2 และ L_1 เกิดไฟเข้าขาเบส-อิมิตเตอร์ซึ่งจะขยายให้เกิดกระแสคอลเลคเตอร์สูงขึ้นเพื่อรักษาขนาดของการออสซิเลตให้มีขนาดคงเดิม ไม่ค่อย ๆ ลดลงอย่างที่มีแค่ L และ C เท่านั้น



รูปที่ 2.15 วงจร CE แบ่งโวลเตจและจูนคอลเลคเตอร์

2.4.4 ออสซิเลเตอร์แบบฮาร์ตเลย์ (hartley osc.)

วงจรนี้นิยมใช้กันมากโดยทั่วไปในเครื่องรับวิทยุด้วย เพราะทำงานง่ายและการเริ่มต้นออสซิเลตไม่ต้องกระตุ้นก่อน ซึ่งการทำงานของวงจรฮาร์ตเลย์เหมือนกับวงจรจูนคอลเลคเตอร์ที่กล่าวไปแล้ว คือมีคดลวดสองชุด คือ L_1 และ L_2 พันอยู่บนแกนเดียวกันหรืออาจจะใช้ขดเดียวกันแต่ต่อแทป (tap) แยกออกมาก็ได้เพื่อให้มีความเหนี่ยวนำร่วมกันระหว่าง L_1 และ L_2 คาปาซิเตอร์ C ใช้ต่อคร่อมทั้ง L_1 และ L_2 ให้อยู่ในรูปวงจร LC ความถี่ของการออสซิเลตจึงขึ้นอยู่กับค่า L_1 , L_2 และ C



รูปที่ 2.16 ออสซิเลเตอร์แบบฮาร์ตเลย์

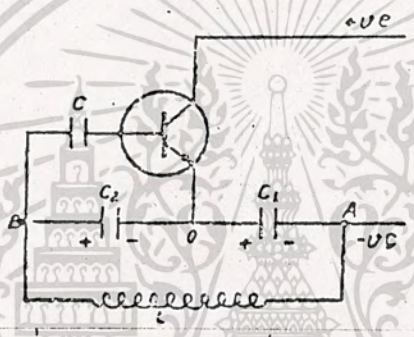
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 โคลพิตต์ออสซิเลเตอร์ (colpits osc.)

ออสซิเลเตอร์แบบนี้คล้ายการทำงานแบบฮาร์ตเลย์ เพียงแต่การคับปลิ้งเปลี่ยนไปใช้ความจุแทนการเหนี่ยวนำอย่างฮาร์ตเลย์

วงจรแทงค์ของโคลพิตต์มีขดลวดเหนี่ยวนำ L ต่อขนานกับปาซิเตอร์ C_1 และ C_2 ที่ต่ออนุกรมกัน ซึ่งจำทำให้เกิดความถี่ตามสูตร

$$f = (1 / 2\pi)\sqrt{(1 / LC_1 + 1 / LC_2)}$$



รูปที่ 2.17 โคลพิตต์ออสซอเลเตอร์

2.4.7 ขีดจำกัดของวงจรออสซิเลเตอร์

ขีดจำกัดของวงจรออสซิเลเตอร์ คือ ให้ความถี่ไม่คงที่ เนื่องจากค่าของความต้านทานความจุ และความเหนี่ยวนำเปลี่ยนตามปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิเป็นต้น

เพื่อให้ได้ความถี่คงที่ตลอดต้องใช้คริสตอล (crystal) มาควบคุมการออสซิเลตเพราะความถี่จะคลาดเคลื่อนตามอุณหภูมิหรือปัจจัยอื่น ๆ ได้น้อยกว่า 0.1% ซึ่งถือได้ว่าเที่ยงตรงมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับเครื่องส่งทั้งในวิทยุ โทรทัศน์ และเครื่องมือสื่อสารทั่วไป เพื่อไม่ให้เกิดความถี่ซ้อนกันของแต่ละสถานี

2.4.8 พลิกพีโซ-อีเลคตริค (piezo electric crystal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบางอย่าง เช่น ควอตซ์ (quartz), เกลือโรเชลล์

(rochelle salt) เป็นผลึกที่เมื่อมีการกดในทิศทางหนึ่งแล้ว จะเกิดประจุไฟฟ้าอีกทางหนึ่ง ซึ่งผลึกชนิดนี้เราเรียกว่า พีโซอีเลคตริคคริสตอล (piezo electric crystal) เพราะ piozo เป็นภาษากรีกแปลว่ากด

คริสตอลหรือผลึกแต่ละชนิดจะมีความถี่ประจำตัวความถี่หนึ่ง เหมือนกับลูกตุ้มนาฬิกา แต่ความถี่ของคริสตอลจะขึ้นอยู่กับความหนาถ้าหากใช้ผลึกบางจะได้ความถี่สูง โดยทั่วไปคริสตอลจะใช้ในช่วงความถี่ 25 KHz ถึง MHz ถ้าจะใช้เทคนิคพิเศษเข้าช่วย โดยทั่วไปเรานิยมใช้ ควอตซ์ เพราะทนต่อแรงบีบหรือกดและยังผลิตได้ง่าย และยิ่งไปกว่านั้นยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ เช่น ความชื้นน้อยมาก และ ยังมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความถี่ต่ำจึงทำให้การเปลี่ยนอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงความถี่ได้น้อย

ในธรรมชาติ ผลึกควอตซ์มีหกหน้าหรือ เรียกว่าเป็นเฮกซาโกนอล (hexagonal) มีแกน Z เรียกว่าแกนสายตา (optical) ของผลึก คือเป็นเส้นของจุดปลายผลึกควอตซ์ ดังนั้นผลึกควอตซ์จึงสมมาตรหรือเหมือนกันเมื่อเราเทียบกับแกนสายตา ถ้าเราตัดผลึกนี้ให้ตั้งฉากกับแกนสายตา เส้นที่ลากมุมข้างหนึ่งไปด้านตรงข้าม เราเรียกแกนไฟฟ้า (electrical axis) หรือแกน X อย่างในรูปคือ X_1 X_1 , X_2 X_2 , X_3 X_3 ส่วนเส้นที่ลากจากจุดกึ่งกลางของหน้าผลึก เราเรียกว่า แกนกลไก (mechanical axis) หรือ แกน Y ซึ่งเราก็ใช้แทนเป็น Y_1 Y_1 , Y_2 Y_2 , Y_3 Y_3 ผลึกที่ตัดตั้งฉากกับแกน X เรียกว่าผลึกตัด X บางครั้งเราเรียกว่าเป็นผลึกตัดคูรี (curiecut) เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้ค้นพบนี้ ถ้าผลึกตัดตั้งฉากกับแกน Y เราก็เรียกว่าผลึกตัด Y หรืออาจจะเรียกว่าผลึกตัด 30 องศา ก็ได้เพราะ Y_2 Y_2 ทำมุม 30 องศากับแกน X_3 X_3

ความถี่ประจำตัวการสั่นของผลึก จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาและขึ้นอยู่กับชนิดของการตัด เช่น ผลึกตัด Y หนา 1 มม. จะให้ความถี่เรโซแนนซ์ 2 MHz แต่ถ้าใช้ผลึกชนิดเดียวกันมีความหนาเท่ากัน แต่เป็นผลึกตัด X จะได้ความถี่เรโซแนนซ์เป็น 3 MHz ผลึกที่ตัด Y จะมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความถี่เป็นบวก คือ ความถี่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่ม ซึ่งความถี่ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่ม ซึ่งความถี่ที่เพิ่มนี้อยู่ในช่วง 25-100 ส่วนในล้านต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหนึ่งองศาเซลเซียส จึงถือได้ว่าน้อยมากคือน้อยกว่า 0.1 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นเอง ส่วนผลึกตัด X มีสัมประสิทธิ์เป็นลบทำให้ความถี่ประจำตัวลดลงถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยคือ 10-20 ส่วนในล้านต่อองศาเซลเซียส

การทำงานของผลึกควอตซ์

เมื่อเอาผลึกตัด X หรือผลึกตัด Y นำไปใส่ไว้ระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่นที่ขนานกันให้ผลึกทำหน้าที่เป็นไดอิเลคตริคแบบคาปาซิเตอร์ และป้อนโวลเตจสลับภายนอกเข้าไปที่แผ่นโลหะผลึกก็จะเริ่มสั่นตามโวลเตจที่ป้อน ถ้าโวลเตจที่ป้อนมีความถี่เท่ากับความถี่ประจำตัวของผลึก ผลึกก็จะเกิดเรโซแนซ์ให้ความถี่มีขนาดสูงสุด

2.4.9 ออสซิเลเตอร์ใช้คริสตอล

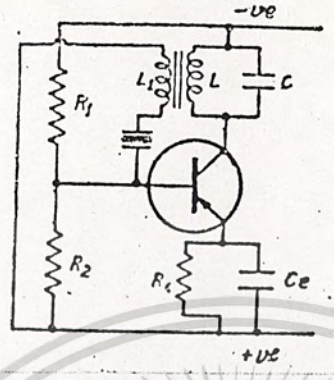
เป็นวงจรจูนคอลเลคเตอร์ LC มีความถี่ประจำตัวของวงจร LC เท่ากับคริสตอลป้อนกลับโดยหม้อแปลงที่ต่อขนานระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบส มีคริสตอลต่ออนุกรมกับขดที่ป้อนกลับ

ที่เบสมี R_1 และ R_2 ทำหน้าที่แบ่งโวลเตจและมีความต้านทานอิมิตเตอร์ R_E เพื่อให้เกิดความเสถียรภาพ

เมื่อป้อนไฟเข้าวงจรจะเกิดกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งจะค่อย ๆ เพิ่มเนื่องจากโวลเตจที่ได้จากการเหนี่ยวนำในขด L_1 เสริมให้เบสจนถึงจุดหนึ่งจึงเริ่มหยุดการเหนี่ยวนำป้อนกลับเพราะขด LC มีความถี่ประจำตัว ซึ่งเราจะให้คริสตอลควบคุมเพื่อให้ความถี่คงที่ไม่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ การป้อนกลับผ่านคริสตอลควบคุมได้ ซึ่งช่วงเราที่ใช้ควบคุมความถี่สูงนี้เราควบคุมได้ช่วงจาก 400 KHz ถึง 20 MHz หรือสูงกว่า

ถ้าหากความถี่ประจำตัวของวงจรLC เป็น 25.1 MHz แล้วคริสตอลจะสั่นด้วยความถี่ประจำของตัวเอง คือ 25 MHz เมื่อคริสตอลอยู่ที่วงจรเบสจึงมีอิทธิพลต่อวงจรคอลเลคเตอร์มากกว่าวงจร LC ดังนั้นคอลเลคเตอร์จึงไปกดวงจรLC ให้สั่นที่ความถี่ 25 MHz นี้เป็นวิธีการควบคุมความถี่ของคริสตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

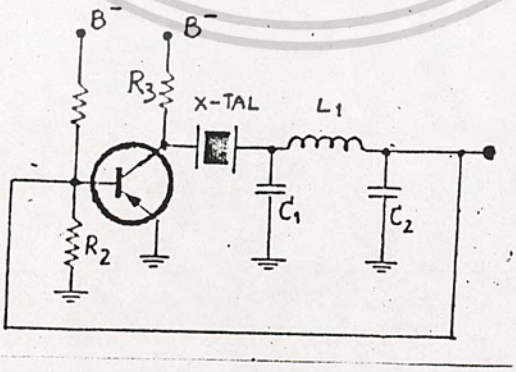


รูปที่ 2.18 วงจรออสซิเลเตอร์ที่มีคริสตอลควบคุม

2.4.10 คริสตอลควบคุมออสซิเลเตอร์

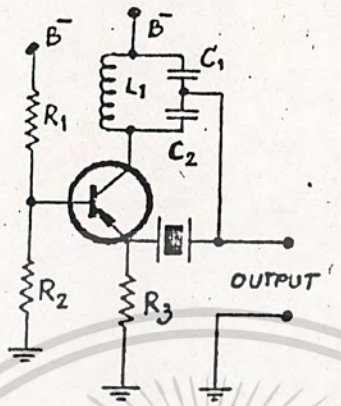
คริสตอลเป็นวงจรที่มีค่า Q สูง ซึ่งจะทำให้ความถี่ออกมาคงที่

คริสตอลออสซิเลเตอร์มี 2 แบบ คือ แบบอนุกรม และ แบบขนาน เหมาะกับความถี่วิทยุในช่วงความถี่ต่ำ เพราะมีคาปาซิเตอร์ต่อกับดินทำหน้าที่กรองความถี่สูง ถ้าค่าความจุสูงจะใช้กับความถี่ต่ำได้ด้วย วงจรทั้งสองนี้เป็นวงจรโคงพิตต์ ซึ่งจะใช้วงจรฮาวต์เลย์แทนก็ได้มีแต่ความยุ่งยากมากกว่า เพราะในตลาดส่วนมากมีขายเฉพาะขดลวดไม่มีเทป



รูปที่ 2.19 คริสตอลออสซิเลเตอร์แบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 คริสตอลออสซิเลเตอร์แบบขนาน

แม้ว่าคริสตอลมีค่า Q สูงความถี่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยก็ตาม ความถี่เล็กน้อยนี้ปรับด้วยแกน ของขดลวด หรือจะปรับวงจร LC ให้สูงกว่าเป็นจำนวนเท่าของความถี่คริสตอลก็ได้

2.4.12 เสถียรภาพของออสซิเลเตอร์

เสถียรภาพ (Stability) ของออสซิเลเตอร์นั้น อาจจะมองได้จากความสามารถในการผลิตความถี่ได้ตามที่ต้องการหรือไม่ การออสซิเลทโดยตัวของมันเอง และสามารถรักษาการออสซิเลทได้ตลอดสภาวะ หรือไม่ หรือรักษาระดับของการออสซิเลทได้ทุกสภาวะหรือไม่

ในทางปฏิบัติ วัสดุที่ใช้ในวงจรออสซิเลเตอร์มีผลต่อการออสซิความถี่ เช่น ความถี่ของวงจรจูนออสซิเลเตอร์ขึ้นอยู่กับอนุกรมอิมพีแดนซ์ของ $Z_1 + Z_2 + Z_3$ ในการคำนวณคำนึงถึงเฉพาะค่ารีแอคแตนซ์ โดยคิดค่าความต้านทานเป็นศูนย์ ซึ่งไม่เป็นจริงเสมอไปค่าเอ้าพุทและอินพุทของวงจรขยายและค่าความต้านทานต่าง ๆ ภายในวงจรจะทำให้ Q ลดไป ทำให้ส่วนโค้งในขณะรีโซแนนซ์กว้างขึ้น นอกจากนั้นยังมีค่าคาแพซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นเอง (Parasitic capacitance) ขนานกับ Z_1 และ Z_2 ค่านี้จะมีช่วงกว้างในการเปลี่ยนแปรมาก ขึ้นอยู่กับโวลเตจที่ให้กับวงจรขยายอุณหภูมิ และค่าตัวภาระ อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิก็มีทางป้องกันให้น้อยได้โดยลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับกำลังงานที่ใช้กับวงจร และไม่ให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิรอบข้าง หรือคัดเลือกวัสดุที่นำมาใช้ให้มีคุณสมบัติลบล้างกันในวงจรเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปหรือเอาวงจรไปไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ วัสดุที่ใช้ในวงจรแท้งค์ก็จะต้องแข็งแรงทนทานต่อการสั่นสะเทือนจากภายนอก ถ้าขดลวดที่ใช้เปลี่ยนรูปร่างไปก็จะทำให้ความถี่ที่สร้างขึ้นมาเปลี่ยนไปด้วย

2.5 ตัวกรองสัญญาณ (FILTER)

2.5.1 ตัวกรองผ่านความถี่สูง (HIGH-PASS FILTER

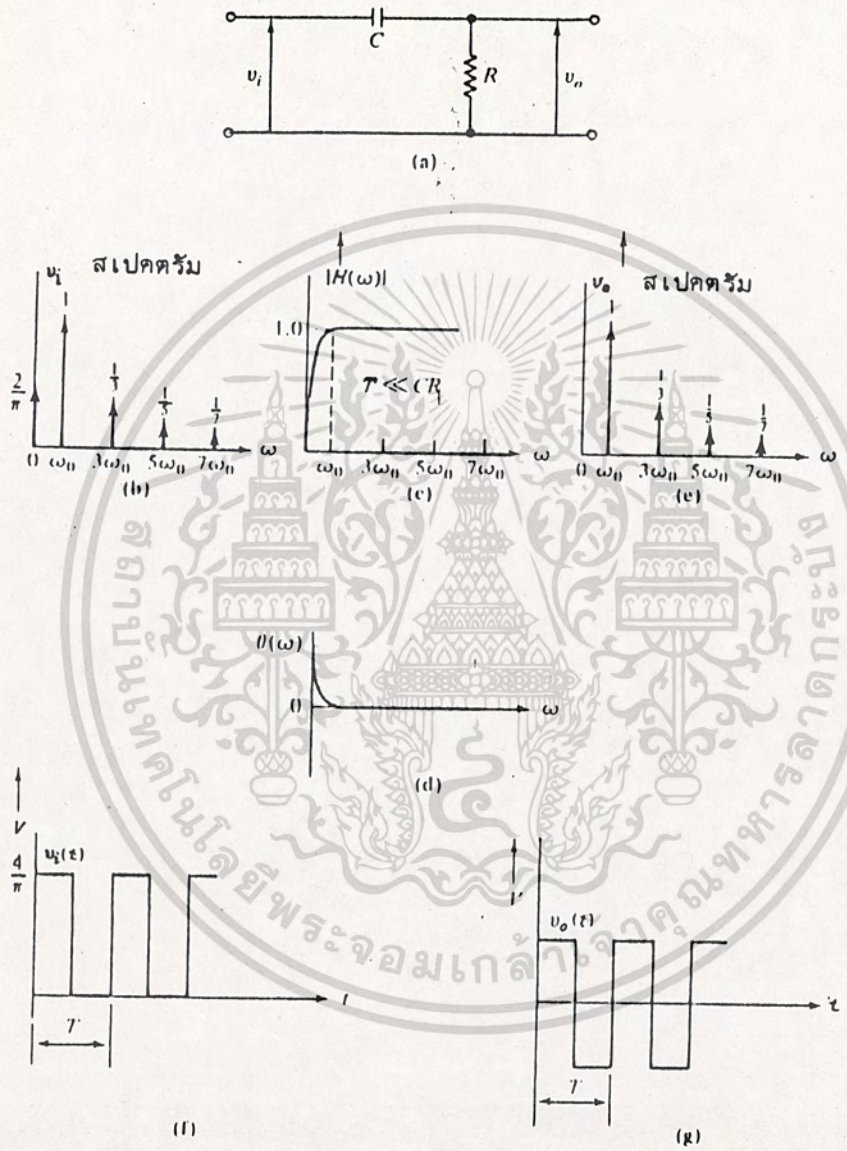
ตัวกรองผ่านความถี่สูง (HPF) คือตัวกรองความถี่ที่ยอมให้สเปคตรัมความถี่สูงผ่านไปได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงความผิดเพี้ยนทางความสูง หรือ เฟส ตัวอย่างง่าย ๆ คือ การใช้คอนเดนเซอร์กั้นไฟตรงไม่ให้ผ่านตามรูป 2.21 ในวงจร R เป็นความต้านเข้าของวงจรต่อไป สมมติให้ป้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจตุรัส (Square wave) ตามรูป 2.21 (f) เข้าไป และเวลาคงที่ (Time constant) RC ของตัวกรองมีค่ามากกว่าคาบเวลา (periodic time) T ของสัญญาณมาก ๆ

สเปคตรัมของสัญญาณเข้า(inputspectrum) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามรูป 2.21 (b) และทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นความสูงกับเฟสที่เปลี่ยนไป

(phase ship) ตามรูป 2.21 (c) กับ (d)

จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่คำนึงถึงความผิดเพี้ยนของความสูงหรือเฟสแล้วสเปคตรัมที่ออกมาจะไม่เปลี่ยน สำหรับส่วนกระแสสลับ อย่างไรก็ตามตัวกรองก็จะตัดกระแสตรงออกไปด้วย และคลื่นจะมีความสามารถกันตามแกนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.21 ตัวกรองผ่านความถี่สูง (a) วงจร (b) สเปคตรัมความถี่สัญญาณเข้า (c) ทรานเฟอร์ฟังชั่นความสูง (d) ทรานเฟอร์ฟังชั่นเฟส (e) สเปค (f) รูปคลื่นสัญญาณเข้า (g) รูปคลื่นสัญญาณออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้เวลาคงที่ของตัวกรองน้อยกว่าคาบเวลาของคลื่นมาก ๆ ตามรูป 2.22 กำหนดให้ T = 440cr การลดทอน (Attenuation) และเฟสที่เปลี่ยนไปจะทำให้รูปคลื่นเปลี่ยนไปตามรูป 2.19 (g) การตัดกระแสตรงออกได้ทำให้รูปคลื่นสมมาตรกันตามแกนเวลาจะเห็นได้ว่า วงจรนี้คือ วงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์ (Differential) ซึ่งจะต้องมีข้อแม้ว่า T >> CR

โวลเตจ V_c ตกคร่อม C จะมากกว่าโวลเตจ V_o ตกคร่อม R ดังขึ้น

$$V_c \gg V_o$$

ดังนั้น

$$V_i = V_c$$

$$dV_i / dt = dV_c / dt$$

$$= 1/C * dQ / dt$$

$$= 1 / C$$

ดังนั้น

$$i = CdVi / dt$$

$$V_o = iR$$

$$= RC * di / dt$$

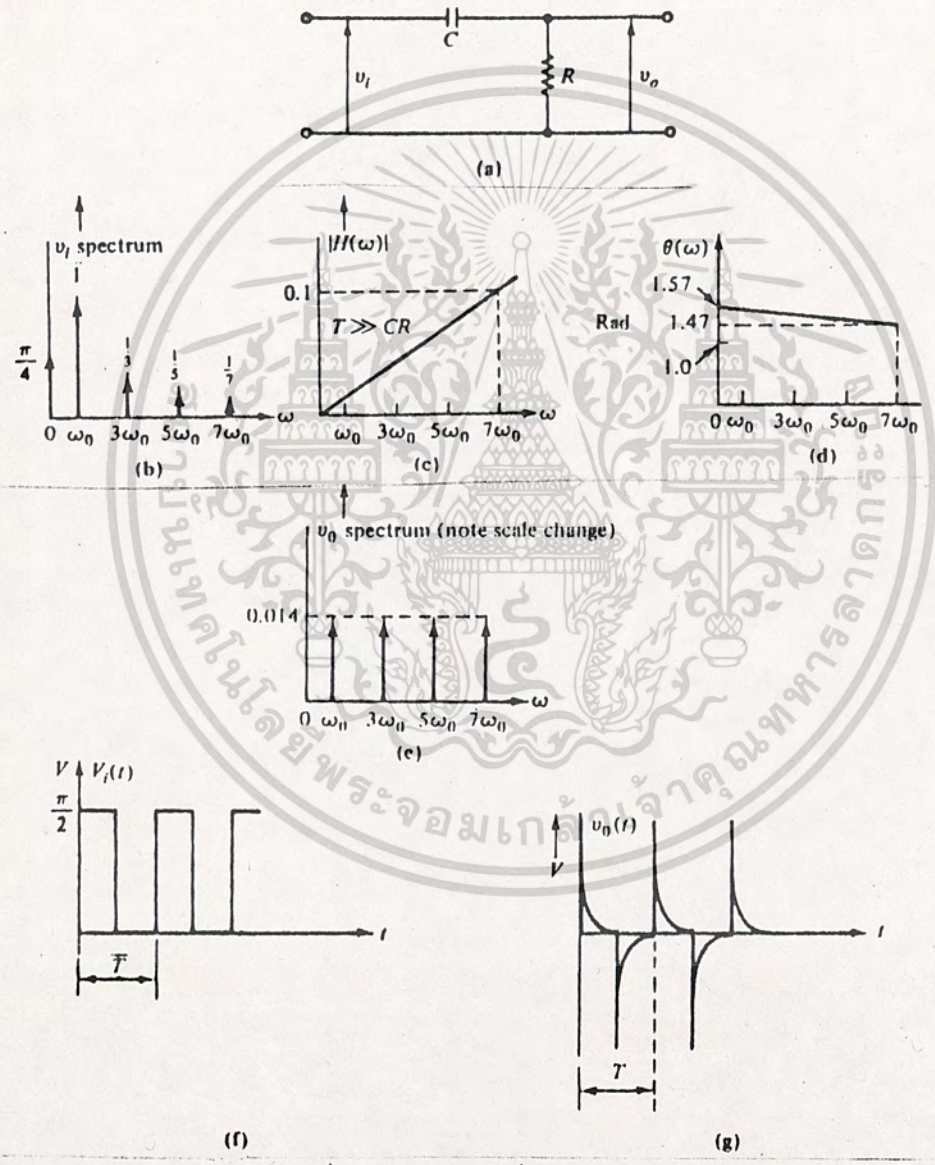
และ

$$V_o = iR$$

$$= RC * di / dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น โวลเตจของสัญญาณออกจะแปรตามอัตราการเปลี่ยนของสัญญาณเข้าและจะน้อยกว่า V_o อัตราการเปลี่ยนแปลงของการขึ้น (Rise) และการตก (Fall) ของ V_o จะเป็นทางบวกและทางลบตามรูป 2.22 (g) ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) เป็นศูนย์



รูป 2.22 วงจรดิฟเฟอร์เรนทิเอเตอร์ (a) วงจร (b) สเปคตรัมความถี่สัญญาณเข้า (c) ทรานเฟอร์ฟังชั่นความสูง (d) ทรานเฟอร์ฟังชั่นเฟส (e) สเปคตรัมความถี่สัญญาณออก (f) รูปคลื่นสัญญาณเข้า (g) รูปคลื่นสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

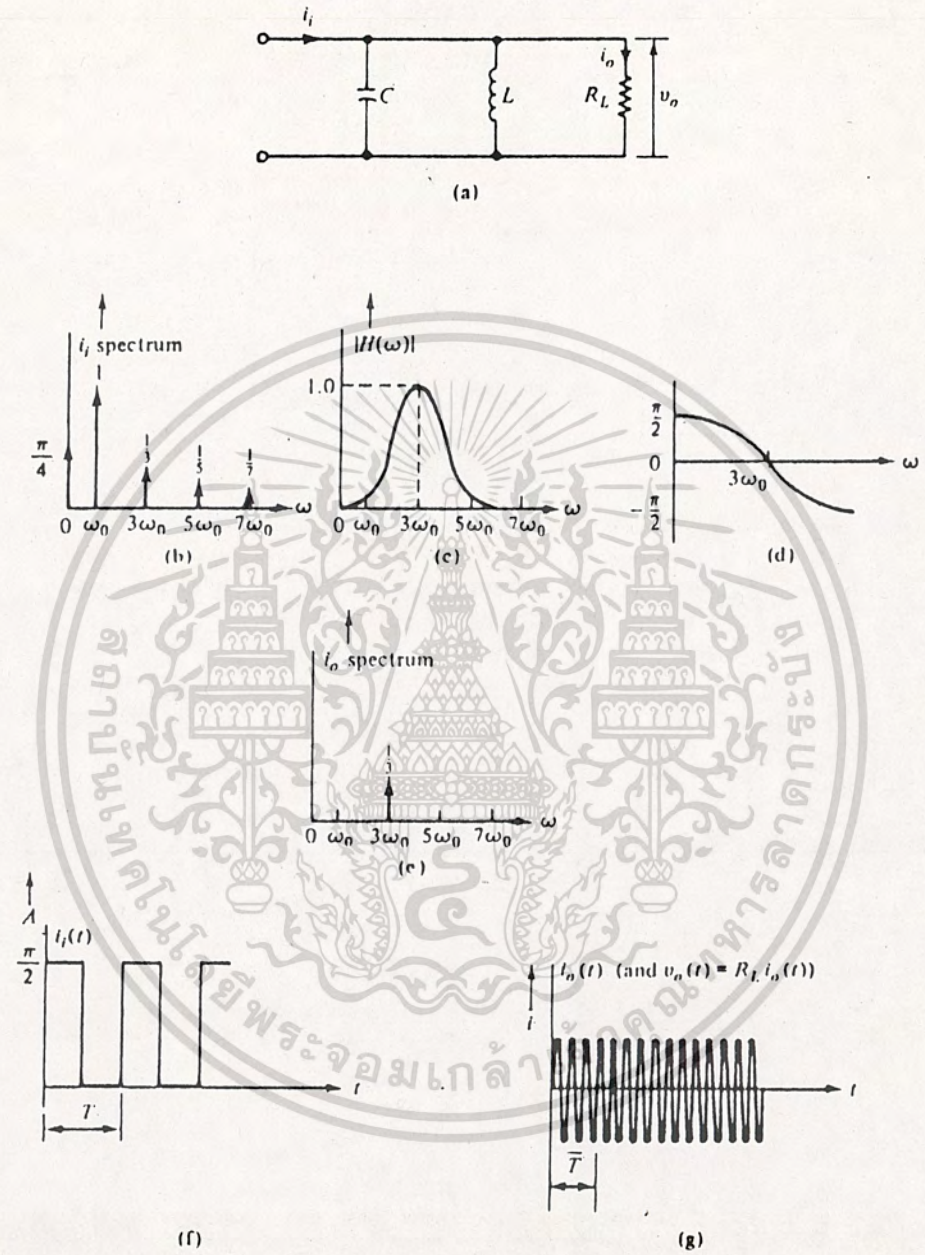
2.5.2 ตัวกรองผ่านความถี่เป็นช่วง (Band-Pass Filter)

ตัวอย่างง่าย ๆ ของตัวกรองผ่านความถี่เป็นช่วง (BPF) คือ วงจรรีโซแนนซ์ ขนานตามรูป 2.23 (a) ซึ่งเราต้องใช้ทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นแบบกระแสเนื่องจากโวลเตจของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกเท่ากันจะได้

$$H(W) = I_o / I_i \qquad (2.23)$$

สำหรับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจตุรัสตามรูป 2.23 (f) มีสเปคตรัมของสัญญาณตามรูป 2.23 (b) จะได้สเปคตรัมสัญญาณออกเมื่อวงจรรีโซแนนซ์ที่ฮาร์โมนิคที่สามตามรูป 2.23 (e) กระแสตรงก็จะถูกตัดออกโดย L ซึ่งทำหน้าที่ลัดวงจรไม่ออกไปที่ตัวภาระ (Load) R และเฟสก็มีค่าเป็นศูนย์ที่ความถี่รีโซแนนซ์ กระแสและโวลเตจออกจะเป็นคลื่นไซน์ที่ความถี่ $3f_o$ กำหนดให้ $f_o = 1/T$ หลักการนี้ใช้ในวงจรเพิ่มความถี่ (Frequency Multiplier) ซึ่งความถี่จะเป็นสามเท่าของความถี่เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.23 ตัวกรองผ่านความถี่เป็นช่วง (a) วงจร (b) สเปคตรัมความถี่สัญญาณเข้า (c) ทรานเฟอร์ฟังชั่นความสูง (d) ทรานเฟอร์ฟังชั่นเฟส (e) สเปคตรัมความถี่สัญญาณออก (f) รูปคลื่นสัญญาณเข้า (g) รูปคลื่นสัญญาณออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter)

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (LPF) ตามรูป 2.24 (a) ทรานสเฟนร์ฟังก์ชั่นในลักษณะของความถี่แสดงตามรูป 2.24 (b) ถึง (e) แน่นอนกระแสไฟตรงจะผ่านไปได้โดยตัวกรองนี้

สำหรับกรณีที่ CR << Tรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจตุรัสที่ส่งไปจะไม่เปลี่ยนแปลงตามรูป 2.21 (b),(d),(f) และ (h) สำหรับกรณีที่ CR >> T วงจรจะอินทิเกรต สัญญาณสี่เหลี่ยมจตุรัสให้มีค่าที่ระดับเฉลี่ยจากรูป2.24 (c) และ (e) ถ้า CR = 100/2 ที่ความถี่แรก (Fundamental frequency) จะได้

$$V_R \gg V_c$$

ดังนั้น

$$i = V_i / R$$

$$dq / dt = V_i / R$$

ดังนั้น

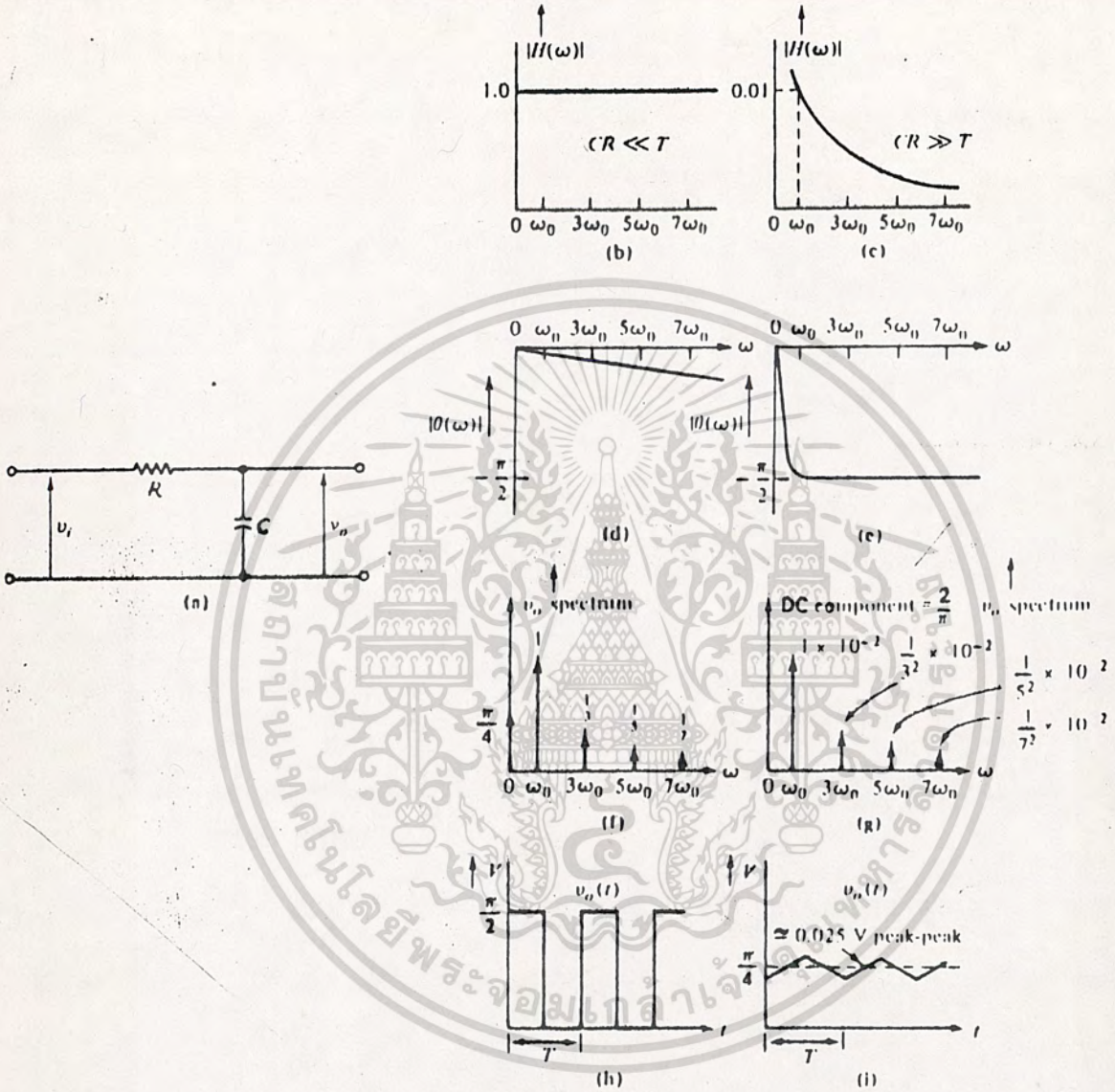
$$CdV_c / dt = V_i / R$$

และถ้า $V_c = V_o$ จะได้

$$V_o = (1 / RC) * V_i\, dt$$

จะเห็นได้ว่าตัวกรองผ่านความถี่ต่ำทำหน้าที่เหมือนวงจรอินทิเกรต และ ตัวกรองผ่านความถี่สูงเหมือนวงจรดิฟเฟอร์เรนทิเอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.24 ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (a) วงจร (b) ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นความสูงสำหรับ CR<<T (c) ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นความสูงสำหรับ CR>>T (d) ทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นของเฟสสำหรับCR<<T (e) ทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นของเฟสสำหรับ CR>>T (f) สเปคตรัมความถี่ของสัญญาณออก เมื่อ CR<<T (g) สเปคตรัมความถี่ของสัญญาณออกเมื่อ CR>>T (h) สเปคตรัมความถี่ของสัญญาณออกเมื่อ CR<<T (i) รูปคลื่นสัญญาณออกเมื่อ CR>>T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ

การสื่อสารวิทยุ นั้นจะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวแพร่การกระจายไปในบรรยากาศ หรือ อวกาศ เพื่อนำข่าวสารไปโดยไม่ต้องใช้สาย คลื่นวิทยุที่ใช้ในการสื่อสารจะมีความถี่ตั้งแต่ 100 Hz ใน ELF แบนด์ ขึ้นไปถึง 300 GHz ใน EHF แบนด์

อากาศจะมีความหนาแน่นมากที่พื้นผิวของโลกใกล้ ๆ พื้นดินและเมื่อสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ อากาศก็จะมีความหนาแน่นน้อยลง หรือบางลง จากผลของดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นโลก ทำให้โมเลกุลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นชั้นของบรรยากาศขึ้นมา ชั้นของบรรยากาศนี้ทำให้คลื่นวิทยุเดินทางได้เร็วขึ้นกว่าชั้นของบรรยากาศที่อยู่ติดกับพื้นโลกซึ่งมีความหนาแน่นมาก

คลื่นที่มีความถี่ยิ่งต่ำเท่าไร ก็ยิ่งไม่สามารถทะลุชั้นบรรยากาศไปได้ ซึ่งในบางครั้งก็จะสะท้อนกลับลงมาอีก คลื่นที่มีความถี่ยิ่งสูงเท่าไร ก็ยิ่งสามารถทะลุชั้นบรรยากาศไปได้ คลื่นที่มีความถี่ระหว่าง 2 ถึง 50 MHz อาจจะสะท้อนกลับหรือทะลุผ่านชั้น IONOSEPHERE ไปได้ ขึ้นอยู่กับเวลาในวันนั้น และมุมของคลื่นที่จะเข้าไปในชั้นบรรยากาศ กับความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศในขณะนั้น คลื่นที่ส่งขึ้นไปทำมุม 90 องศา กับพื้นโลกจะมีโอกาสทะลุชั้นของบรรยากาศมากกว่าคลื่นที่ทำมุมน้อยกว่า คลื่นบนพื้นดิน (GROUND WAVE) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งกลางวันและกลางคืน แต่คลื่นบนท้องฟ้า (SKY WAVE) นั้นจะเปลี่ยนไปในเวลากลางวันกับกลางคืน

ในตอนกลางคืน ดวงอาทิตย์จะไม่มีผลต่อโมเลกุลของบรรยากาศในด้านซีกโลกมืด ดังนั้น ชั้นของบรรยากาศจะสูงขึ้น ทำให้คลื่นบนท้องฟ้ากลับมายังพื้นโลกด้วยมุมที่กว้าง คลื่นก็จะไปได้ไกลกว่าในตอนกลางวัน ในกรณีที่เป็นความถี่ต่ำจะไม่ค่อยมีผลเท่าไรนัก เนื่องจากเป็นคลื่นบนพื้นดินเสียส่วนมาก ถ้าเป็นความถี่สูง เช่น จาก 3 ถึง 10 MHz ในเวลากลางวันคลื่นที่สะท้อนกลับมาส่งได้ไกลประมาณ 300 ถึงหลาย ๆ พันกิโลเมตร

คลื่นที่มีความถี่สูงมาก ๆ เช่น 100 MHz ไม่สามารถสะท้อนในชั้นของบรรยากาศได้ จะทะลุออกไปเหมือนคลื่นแสง ดังนั้น จะต้องส่งคลื่นโดยวิธีบนพื้นดินหรือวิธีเศษอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายคลื่นในบรรยากาศ

สมมติให้กำลังงานเฉลี่ย P_T กระจายคลื่นออกเท่ากันในรอบทิศทาง ที่ระยะทาง d จะมีความหนาแน่นของกำลังงาน (power density) เท่ากับ

$$P_{D1} = P_T / 4\pi d^2$$

ค่าของ $4\pi d^2$ คือพื้นที่ของการกระจายคลื่นซึ่งเป็นรูปทรงกลม และรัศมี d

ในทางปฏิบัติสายอากาศจะมีคุณสมบัติของทิศทางในการรับ หรือแพร่กระจายคลื่นซึ่งหมายถึง จะกระจายคลื่นได้มากในทิศทางหนึ่ง และน้อยในอีกทิศทางหนึ่ง อัตราขยายกำลังของสายอากาศ คือ อัตราส่วนความหนาแน่นของกำลังงาน ตามแกนการแพร่กระจายของสายอากศต่อกำลังงานของสายอากาศที่กระจายรอบทิศทางในระยะทางที่เท่ากัน และมีกำลังงานอินพุทเท่ากัน สมมติให้ G_T คืออัตราขยายกำลังสูงสุด ของสายอากาศของเครื่องส่ง ดังนั้น ความหนาแน่นกำลังงานในทิศทางของการแพร่กระจายสูงสุด คือ

$$P_D = P_{D1} G_T$$

$$= (P_T G_T) / 4\pi d^2$$

สายอากาศของเครื่องรับ ก็จะต้องตั้งในทิศทางที่สามารถรับสัญญาณเข้าได้สูงสุด สมมติให้ P_R คือกำลังงานที่สายอากาศของเครื่องรับถ่ายทอดให้กับตัวภาระ (เครื่องรับ) ในสภาวะที่แมชชิ่งกัน ในกรณีเช่นนี้ สายอากาศจะมีพื้นที่ Effective คือ A_{eff} จะได้

$$P_R = P_D A_{eff}$$

$$= P_T G_T A_{eff} / 4\pi d^2$$

ในสายอากาศใด ๆ ก็ตาม อัตราส่วนของการขยายสูงสุดต่อพื้นที่ Effective คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{eff} / G = \lambda^2 / 4\pi$$

กำหนดให้ λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นที่แพร่กระจายถ้า G_r คือ อัตราขยายสูงสุดในทิศทาง (Maximum Directivity Gain) ของสายอากาศเครื่องรับจากสมการ

$$P_R/P_T = G_R G_T / (\pi 4d^2)$$

สมการนี้เป็นสมการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น ในบรรยากาศโดยปกติความถี่ f จะมีหน่วยเป็น MHz และระยะทาง d เป็นกิโลเมตร จากความสัมพันธ์ของ $f = c$ แทนค่าในสมการจะได้

$$P_R/P_T = G_R G_T * 0.57 * 10^{-3} / (df)^2$$

จากสมการใหม่สามารถเขียนใหม่เป็นรูปเดซิเบล คือ

$$(P_R/P_T)_{dB} = (G_T)_{dB} + (G_R)_{dB} - (32.5+20\log_{10} d+20\log_{10} f)$$

ในสมการนี้ วงเล็บสุดท้ายหมายถึงการสูญเสีย (loss) ในขณะที่คลื่นเดินทางไป เรียกว่า path loss : L นั่นคือ

$$L = (32.5+20\log_{10} d+20\log_{10} f)_{dB}$$

กำหนดให้ d มีหน่วยเป็นกิโลเมตร และ f มีหน่วยเป็น MHz ดังนั้นจะได้

$$(P_R/P_T)_{dB} = (G_T)_{dB} + (G_R)_{dB} - (L)_{dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง

การคำนวณในส่วนส่ง

ในส่วนส่งนี้จะมีการคำนวณเพียงพื้นฐานง่าย ๆ ซึ่งได้แก่

ในส่วนของ VCO

ซึ่งเป็นส่วนแรกที่ต้องมีการคำนวณความถี่ตั้งแต่ 1-8 KHz ซึ่งหาได้จากค่า C ที่ขา 5,6 ของไอซี XR-2206 กับค่าของตัวต้านทานที่ขา 7 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$f_o = 1/RC \text{ Hz}$$

ซึ่งจะเห็นว่าความถี่ที่ได้เป็นค่าส่วนกับของค่า R กับค่า C ซึ่งในส่วนต่อไปก็เป็นส่วนของ ออสซิเลเตอร์ ซึ่งความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิเลเตอร์ หาได้จากค่าความถี่ของ คริสตัล (CRYSTAL) ซึ่งค่าความถี่ที่ใช้มีค่าความถี่พื้นฐาน 12 MHz

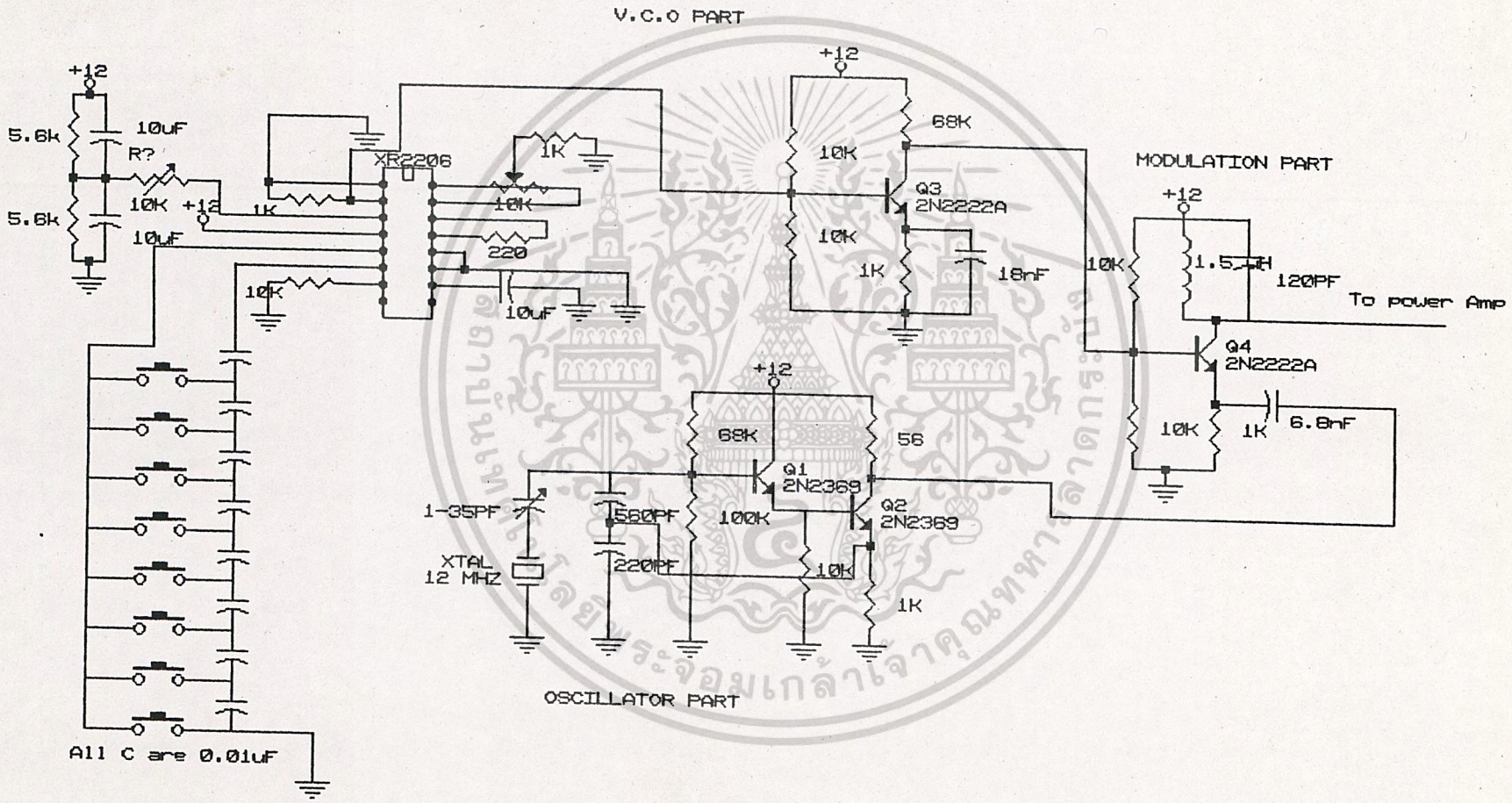
ฉะนั้นจะได้ว่าค่าความถี่ของคลื่นพาหะมีค่าเท่ากับ 12 MHz ซึ่งได้มาจากคริสตัล และค่าความถี่ของสัญญาณมอดดูเลทมีค่าเท่ากับ 1-8 KHz ซึ่งได้มาจากค่า C ที่ขา 5,6 ของไอซี XR-2206

ในส่วนของการ มอดดูเลท

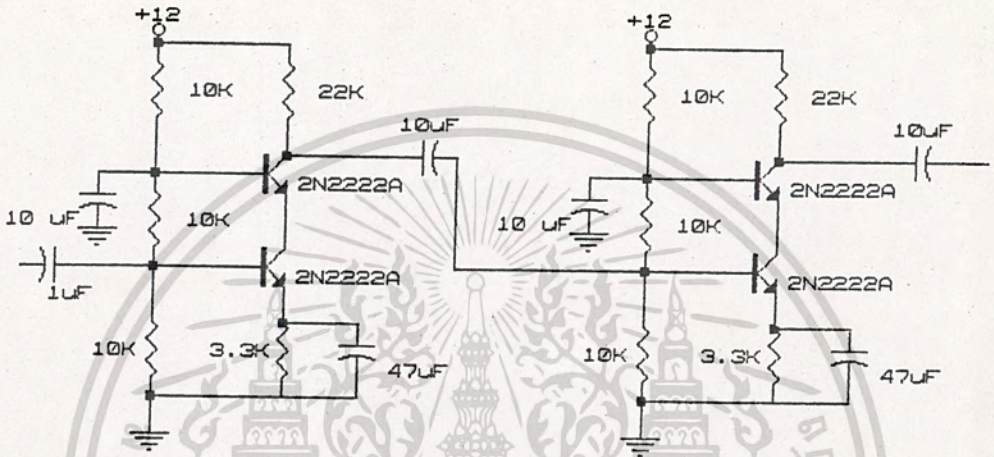
การมอดดูเลทจะใช้ไอซี XR-2206 ไม่ได้เพราะว่า ไอซีตัวนี้ไม่สามารถทำการมอดดูเลทที่ความถี่เกิน 2 MHz ฉะนั้นในการมอดดูเลทเราจะใช้การมอดดูเลทด้วย ทรานซิสเตอร์ และมีส่วนที่สำคัญคือวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งค่าความถี่ในการเรโซแนนซ์หาได้จาก

$$f = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


V.C.O PART
+12
5.6k
10uF
R?
5.6k
10K
+12
10uF
XR2206
1K
10K
1K
220
10K
10uF
+12
68K
10K
Q3
2N2222A
10K
1K
18nF
MODULATION PART
+12
10K
1.5uH
120PF
To power Amp
Q4
2N2222A
10K
1K
6.8nF
+12
68K
56
Q1
2N2369
Q2
2N2369
1-35PF
560PF
100K
XTAL
12 MHZ
220PF
10K
1K
OSCILLATOR PART
All C are 0.01uF

ส่วนรับ
วงจรขยายความถี่วิทยุ



เราสามารถหาความถี่ ตอบสนอง(frequency response)ที่ต้องการได้จาก

$$w_1 = 1/R'_s (C_{s1} + 2C_{n1})$$

ค่า R'_s มีค่า = $(r_{s1}//(r_{x'}+(r_3//r_2//r_1)))$

ค่า C_s+C_n นั้นหาได้จาก g_m/w_t

ค่า C_n , W_t นี้หาได้จากคู่มือทรานซิสเตอร์

ค่า g_m ได้จากการคำนวณ โดย จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_m = 1/r_e \quad ma/v$$

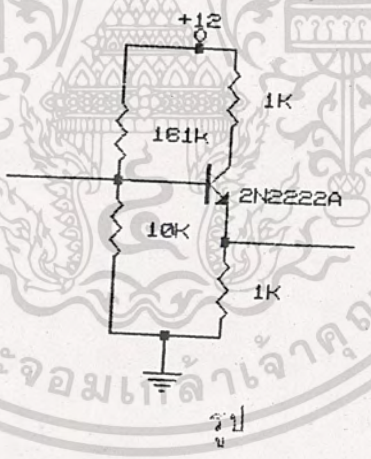
$r_e = 0.0025/I$ โอห์ม

$r_\pi = \beta r_e$ โอห์ม

ซึ่งค่า w ที่ได้นี้ จะเป็นค่าความถี่ที่ขยายได้สูงสุด โดยอัตราการขยายยังคงที่ ซึ่งอัตราการขยายแสดงได้ดังนี้

$$A_m = \frac{-g_m (R_L // R_C)(R_2 // R_3)}{(R_2 // R_3) + R_S} * \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + (R_2 // R_3 // R_5)}$$

จากส่วนของ RFAmp ก็มาถึงส่วนของ ดีเทคเตอร์ ซึ่งเราจะใช้วงจรขยาย คลาส B ดังรูปต่อไปนี้

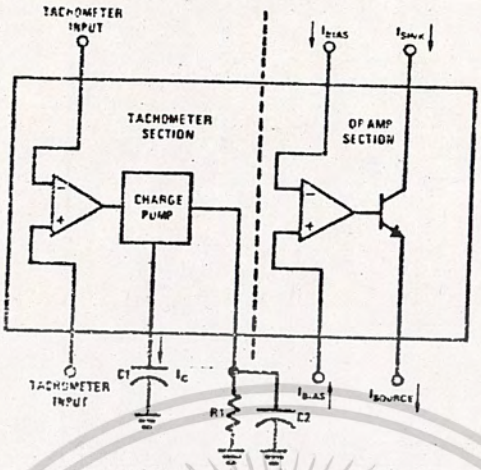


การคำนวณหาค่าที่ได้นั้นคำนวนได้ดังทฤษฎีที่ได้กล่าว ไว้ในตอนต้นซึ่งจะไม่ขอกล่าวอีก

ซึ่งจะไม่ขอกล่าว ในส่วนของ วงจรขยายกำลังด้วย เพราะว่าในบทที่ 2 นั้นได้กล่าวมามากแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน ค่าของแรงดันที่ได้มาสูตรดังนี้



$$V_o = Vcc * f_{in} * C1 * R1$$

สำหรับในส่วนอื่น ๆ นั้นก็เป็นการคำนวณเล็ก ๆ น้อย ไม่มีอะไรยุ่งยากมากนัก

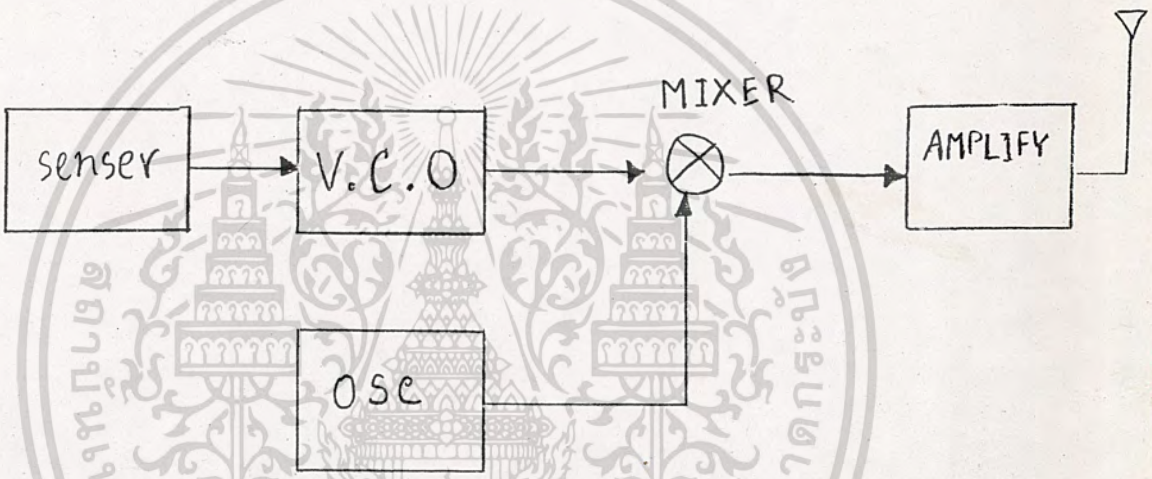
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองในงานชิ้นนี้ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

ส่วนส่ง (transmitter)

ขั้นตอนการทำงานของส่วนนี้สามารถเขียนเป็นบลอกการทำงานได้ดังนี้



รูป 4.1

จากบลอกการทำงานของส่วนส่งสามารถแยกแต่ละส่วนได้ดังนี้

เซ็นเซอร์ (SENSOR)

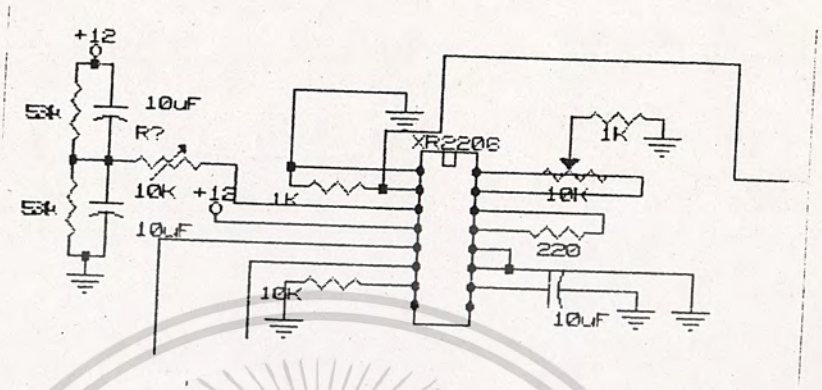
ส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณการควบคุมจากผู้ควบคุมเพื่อที่จะส่งต่อไปยังส่วน แรงดันควบคุมความถี่ (VCO:voltage control oscillator) ซึ่งเราจะใช้เพียงสวิทซ์กดติด ปล่อยดับ (PUSH BOTTON SWITCH) เป็นตัวเลือก

แรงดันควบคุมความถี่

ส่วนนี้เป็นส่วนที่ ผลิตสัญญาณที่ต้องการจะส่งออกมา ถ้าจะเปรียบกับวิทยุก็เป็น สัญญาณเสียงพูด ในส่วนนี้ได้ใช้ xr2206 เป็นตัวผลิตสัญญาณ ซึ่งสัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ตั้งแต่ 1-8KHz โดยความถี่ที่ได้มาจาก ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุที่ขา 5,6,7 ของไอซี

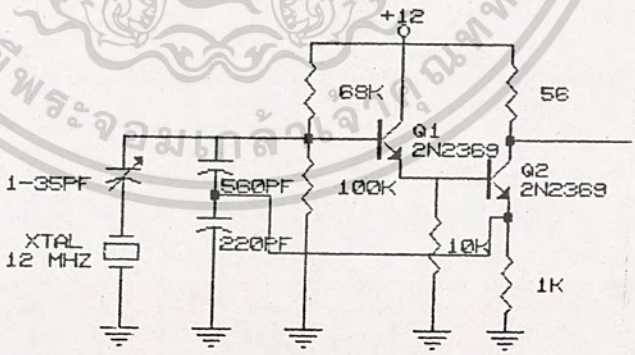


รูปที่ 4.3 แสดงวงจรของส่วนแรงดันควบคุมความถี่

ออสซิลเลเตอร์

ส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญในระบบการรับส่งมากเพราะจะเป็นตัวผลิตสัญญาณพาหะ ถ้าขาดส่วนนี้แล้วสัญญาณที่ผลิตขึ้นมาจากส่วนแรกจะไม่สามารถส่งไปได้ไกลได้

ในการทดลองนี้เป็นการใช้คริสตอลเพื่อควบคุมความถี่เพื่อให้ได้ความถี่ที่เป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ค่อนข้างจะคงที่ ค่าความถี่ที่ได้จะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ของคริสตอล ขนาดที่ได้จะมีขนาดประมาณ 0.6 โวลท์



รูปที่ 4.4 วงจรออสซิลเลเตอร์

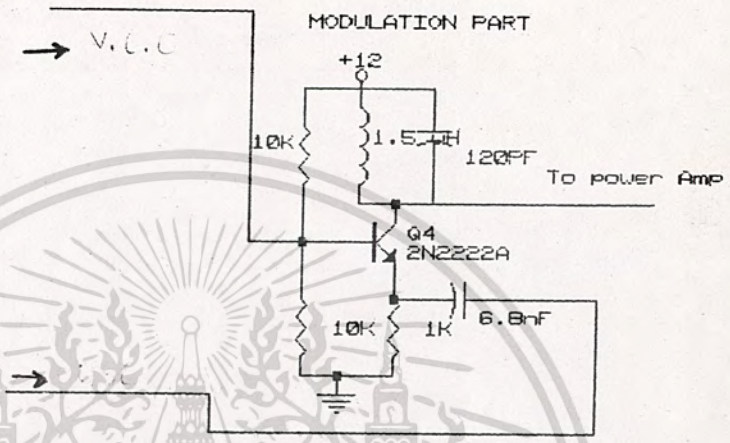
วงจรมอดดูเลชั่น

สำหรับส่วนนี้เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการรวมเอาสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณคลื่นพาหะเข้าด้วยกันในลักษณะการมอดดูเลชั่นแบบความถี่สูง โดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรการมอดแบบ คอลเลคเตอร์มอดดูเลชั่น ซึ่งสัญญาณที่ต้องการจะเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์และสัญญาณพาหะจะเข้าที่ขาอิมิเตอร์ สัญญาณที่ได้นั้นจะถูกเหนี่ยวนำที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณที่ต้องการที่ขาคอลเลคเตอร์

วงจรที่ได้ดังต่อไปนี้

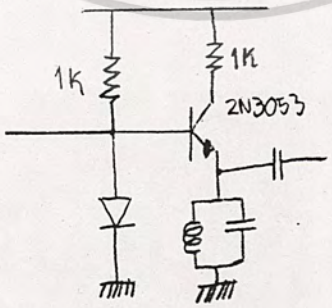


รูปที่4.5 วงจรมอดดูเลชั่นแบบ คอลเลคเตอร์มอดดูเลชั่น

เปอร์เซนต์การมอดที่ได้จะมีค่าประมาณ 70% เท่านั้นเอง

วงจรขยายแรงดัน

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นส่วนที่ทำการขยายสัญญาณที่ได้ให้มีพลังงานที่สูงมากขึ้น เพื่อที่จะส่งออกไปให้ได้ไกลมากยิ่งขึ้น จากการทดลองได้ใช้วงจรขยายคลาส B ดังรูปต่อไปนี้

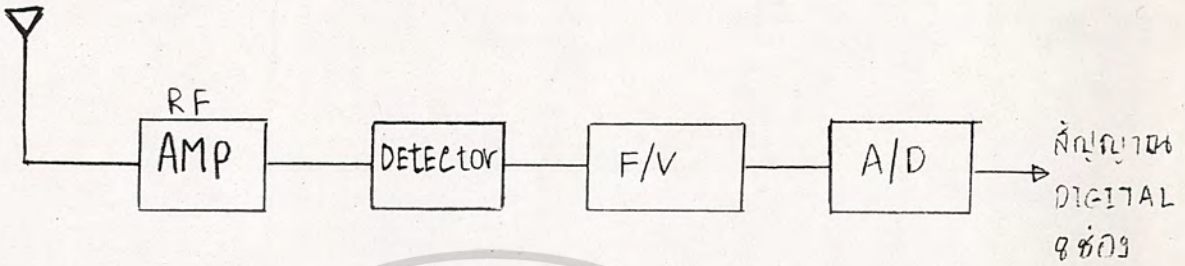


รูป 4.6 วงจรขยายแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรับ

ในส่วนรับประกอบด้วยหลายส่วนรวมกันดังบล็อคไดอะแกรมดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดง block diagram แสดงส่วนรับ

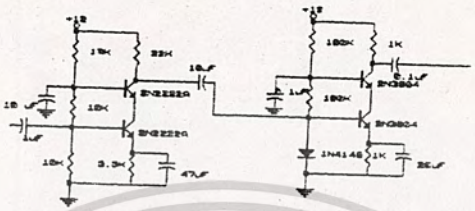
ซึ่งแต่ละส่วนรับนั้นได้อธิบายไว้แล้วตอนต้น ในที่นี้จะอธิบายแต่การทดลองและทฤษฎีอันดับหน่อยกับผลการทดลอง ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ส่วนวงจรขยายความถี่วิทยุ

ส่วนนี้เป็นส่วนที่เป็นส่วนแรกที่สุดในการรับความถี่วิทยุเข้ามา ทำหน้าที่ในการขยายและรับสัญญาณเข้ามา ในการทดลองนี้ได้ใช้ วงจรขยายความถี่วิทยุโดยใช้วงจรทรานซิสเตอร์ที่มีขายอยู่โดยทั่วไป ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความถี่ที่วงจรขยายจะสามารถขยายได้ด้วย เนื่องจากว่า ความถี่ที่ใช้นั้นมีความถี่ที่สูงพอสมควรซึ่งถ้าใช้วงจรขยายไม่ดีอาจจะทำให้อัตราการขยายที่นั้นไม่ดี วงจรขยายชนิดที่เป็นคอมมอนอิมิตเตอร์จะมีปัญหามากเพราะว่า ในวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์นั้นมีอัตราขยายค่อนข้างจำกัดในความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งหมายความว่า ตัวขยายชนิดนี้จะให้อัตราขยายที่ต่ำลงเมื่อความถี่ที่ใช้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งวงจรขยายแบบอื่น ได้แก่ แบบ คอมมอนคอลเลคเตอร์ และคอมมอนเบส ซึ่งคอมมอนอิมิเตอร์นั้นมีอัตราการตอบสนองต่อความถี่ที่ดีกว่าแบบแรก แต่อัตราการขยายนั้นมีค่าต่ำประมาณหนึ่งเท่านั้น ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในวงจรขยายความถี่ และสำหรับวงจรขยายความถี่แบบคอมมอนเบสนั้นเนื่องจากอินพุทอิมพีแดนท์มีค่าต่ำจึงไม่นำมาใช้ ในการทดลองนี้ได้ใช้ การผสมเอาวงจรขยายแบบคอมมอนอิมิตเตอร์กับวงจรขยายแบบคอมมอนเบสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวงจรขยายแทน ซึ่งทำให้ได้อัตราการขยายที่มีมากซึ่งใช้งานได้ ซึ่งในการทดลองได้ใช้วงจรขยายความถี่สูง 2 สเตจดังได้แสดงไว้ในรูปดังต่อไปนี้

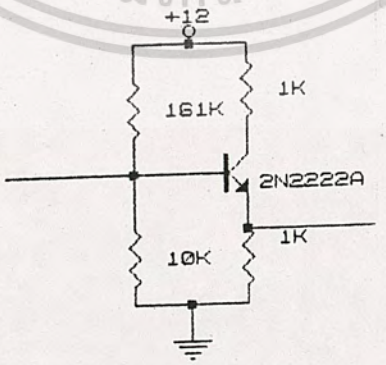


รูปแสดงวงจรขยาย 2 สเตจ

ผลที่ได้นั้นค่อนข้างจะมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก ซึ่งต้องทำการกำจัดโดยใช้วงจรกรอง

ส่วนดีเทคเตอร์

ส่วนดีเทคเตอร์นี้จะเป็นการนำเอาข้อได้เปรียบของวงจรขยายแบบคอมมอนคอลเลคเตอร์ซึ่งตอบสนองต่อความถี่ได้ดีกับสภาวะการคัตออฟของทรานซิสเตอร์มาใช้ในการดีเทคเตอร์ สัญญาณ A.M ที่ผ่านมายังส่วนนี้จะถูกดีเทคให้เหลือเพียงครึ่งเดียวซึ่งจะได้สัญญาณที่ต้องการออกมา ซึ่งวงจรที่ใช้กันสภาวะการณ์คัตออฟนี้ เรียกว่า วงจรขยายคลาส B

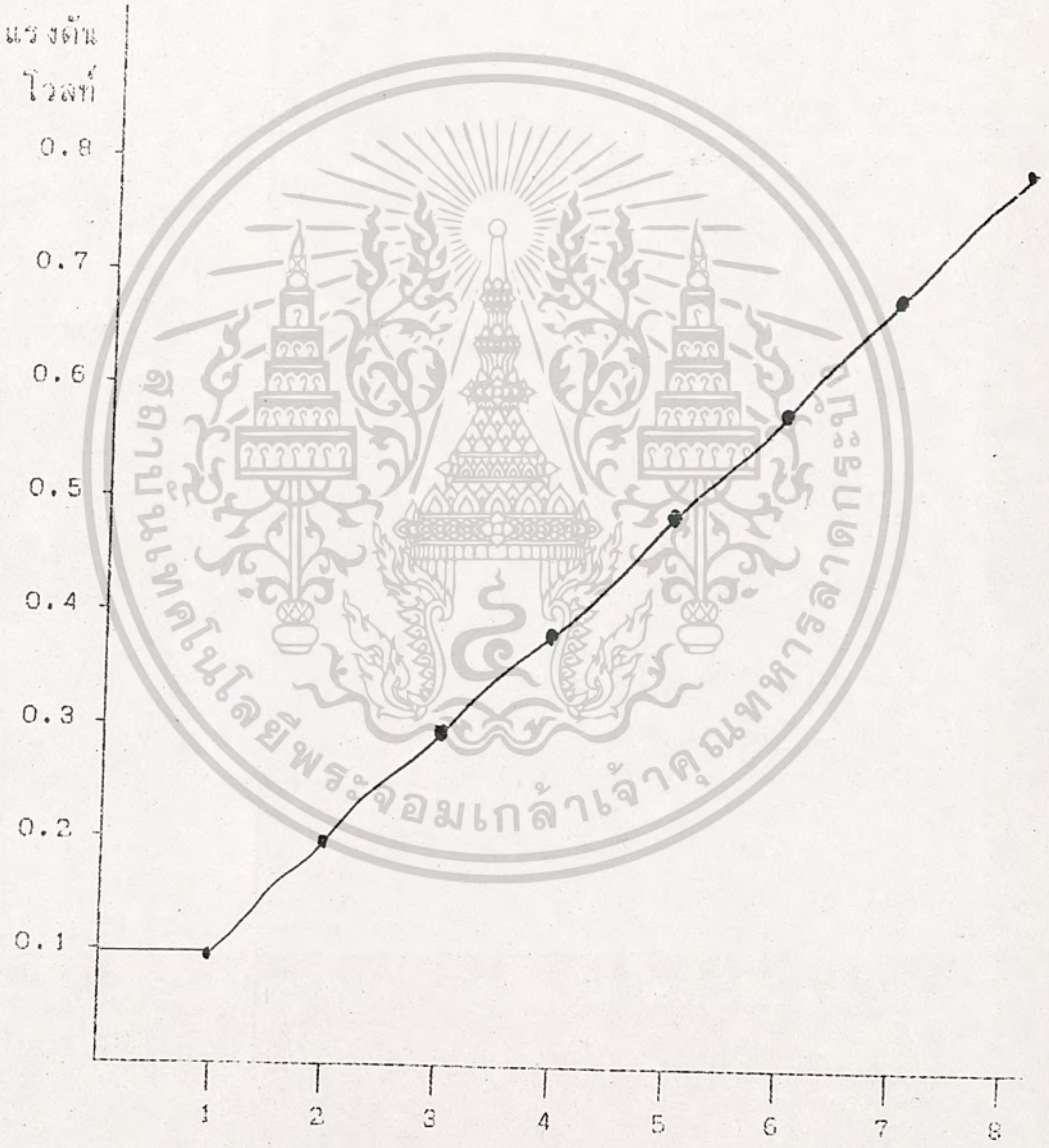


รูปแสดงค่าแผงวงจรดีเทคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า

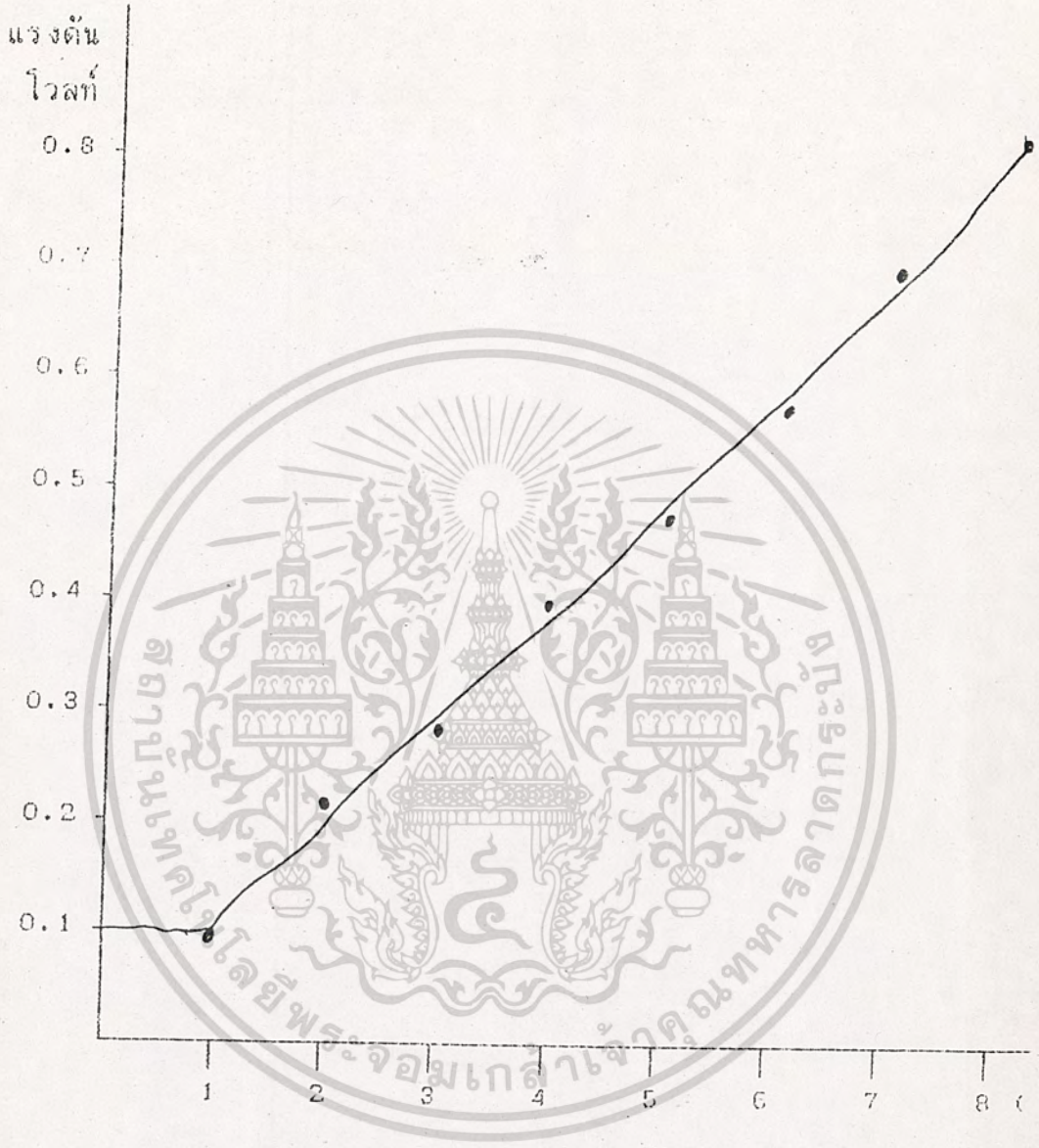
หน้าที่ของส่วนนี้ก็คงจะรู้ดีว่า เป็นส่วนที่เปลี่ยนความถี่ที่ได้จากส่วนดีเทคเตอร์ที่ได้ให้กลับกลายมาเป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าตั้งแต่ 1-8 KHz ซึ่งในการทดลองที่ได้นั้น ได้ใช้ไอซีเบอร์ 2917 ซึ่งเป็นไอซีที่เปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันตัวหนึ่งซึ่งมีค่าความเป็นเชิงเส้นดี ซึ่งตามคู่มือที่ได้นั้นจะแสดงให้เห็นเป็นกราฟดังต่อไปนี้



รูปกราฟที่ได้ เป็นการแสดงการตอบสนองของความถี่กับแรงดันที่ได้จากไอซี 2917 ที่ได้ตามในคู่มือ ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบให้เห็นได้ชัดเจนที่

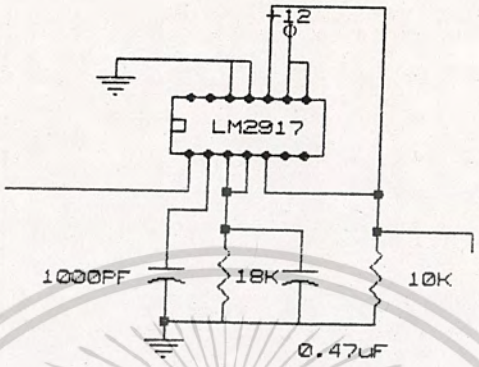
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ในการทดลองซึ่งได้ผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้



รูปกราฟที่แสดงการตอบสนองของความถี่กับแรงดันที่ได้จากการทดลองซึ่งผลที่ได้นี้มีความแตกต่างกับตามที่เห็นได้จากกราฟ ซึ่งวงจรที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงการทดลองของไอซี 2917

ส่วนขยายแรงดัน

เนื่องจากว่า การทดลองในส่วนของส่วนที่เปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันนั้นเป็นแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นที่ต้องการ จึงได้ใช้ส่วนของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5 โวลท์
ซึ่งในการทดลองนี้เนื่องจากว่าแรงดันที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (D.C voltage)ซึ่งทำให้ง่ายต่อการขยายแรงดันด้วยออปแอมป์ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ออปแอมป์ในการขยายแรงดันเบอร์ 353N ซึ่งต่อเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (NON_INVERTING AMPLIFIER) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการจากการคำนวณดังสูตรต่อไปนี้

$$V_{out} = R_f / R_{in}$$

ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นในตารางต่อไปนี้ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ป้อนเข้า (V_{in})	แรงดันที่ได้ (V_{out})
0.2	0.697
0.4	1.395
0.6	2.092
0.8	2.790
1.0	3.487
1.2	4.185
1.4	4.882
1.8	6.278

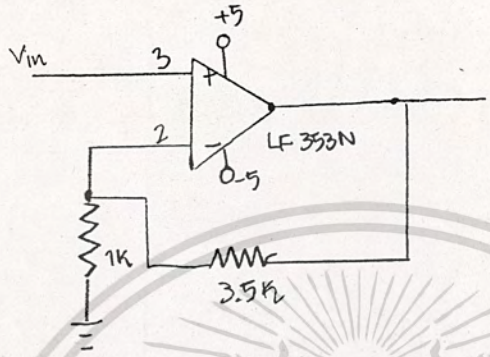
ตารางแสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในวงจรขยายซึ่งได้ จากการคำนวณ

แรงดันที่ป้อนเข้า (V_{in})	แรงดันที่ได้ (V_{out})
0.247	0.318
0.490	0.843
0.670	1.372
0.851	1.882
1.017	2.392
1.216	2.901
1.402	3.392
1.626	3.921

ตารางแสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในวงจรขยายซึ่งได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวงจรและค่าตัวความต้านทานที่ได้เป็นไปตามรูปต่อไปนี้



รูปแสดงการต่อวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล

ส่วนนี้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในลักษณะไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-5 โวลท์ เหมาะสำหรับงานดิจิตอลซึ่งแพร่หลายในปัจจุบัน แต่ในจุดประสงค์ที่ต้องการมิได้รวมถึงการอินเตอร์เฟสร่วมกับคอมพิวเตอร์ แต่ก็ได้แปลงระดับสัญญาณให้เหมาะสมกับคอมพิวเตอร์ซึ่งในการทดลองนี้ทำให้ได้ระดับสัญญาณดังตารางต่อไปนี้ซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลที่ได้จริงกับการคำนวณ

แรงดันที่ป้อนเข้า (V_{in})	สัญญาณที่ได้ (00H-FFH)
0.697	23 H
1.395	47 H
2.092	6A H
2.790	8D H
3.487	B2 H
4.185	C5 H
4.882	F9 H
5.000	FF H

ตารางแสดงค่าได้จากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลที่ได้จาก การคำนวณซึ่งมีค่าเป็นเลขฐานสิบหก

ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ตัวเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยใช้ไอซีเบอร์ ADC0809 ที่ให้เอาพุทมีค่า8 bit ซึ่งเป็นไอซีที่มีความสามารถสูงเกินกว่าที่ต้องการมากเนื่องจากสามารถเลือกอินพุทได้ถึง 8 ช่อง (IN0-IN8) โดยการเลือกจาก A0-A2 แต่ที่ใช้เนื่องจากไม่ต้องซื้อ ต่อไปจะแสดงตารางเพื่อการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ป้อนเข้า (V_{in})	สัญญาณที่ได้ (00H-FFH)
0.247	0F
0.490	2B
0.670	46
0.851	61
1.017	7A
1.216	94
1.402	A4
1.626	C8

ตารางแสดงค่าได้จากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลที่ได้จาก การทดลองซึ่งมีค่าเป็นเลขฐานสิบหก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณจริง ๆ แล้วจะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกัน สาเหตุที่แตกต่างกันนี้เป็นเพราะว่า การทดลองจริงนั้นย่อมที่จะได้มีความแตกต่างกันเสมอทางด้านอุปกรณ์และจากผู้ทดลองเองด้วย

ส่วนที่แปลงสัญญาณที่ได้เป็นช่องต่าง ๆ

ส่วนนี้เป็นส่วนที่แปลงสัญญาณที่ได้ไปเป็นสัญญาณซึ่งเป็นช่องต่าง ๆ ซึ่งถ้าในส่วนนี้เป็นส่วนที่ใช้ คอมพิวเตอร์ เป็นตัวที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณแล้ว จะทำให้ได้สัญญาณที่ถูกต้องดียิ่งขึ้น และจะมีการใช้งานที่ยืดหยุ่นและใช้งานที่ดียิ่งขึ้น แต่ตามที่ได้กล่าวได้ จุดประสงค์ที่ต้องมิได้เพื่อต่อร่วมกันคอมพิวเตอร์ ซึ่งส่วนนี้ผู้จัดขอเสนอแนะให้ผู้ที่สนใจเป็นกระทำต่อ ดังนั้นในการตรวจจับสัญญาณที่ได้โดยการนำเอาสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์เป็นเลขฐานสอง แล้วนำเอาสัญญาณที่มีสัญญาณเป็น "1" มารวมกัน เนื่องจากสัญญาณที่ได้นั้นจะเป็นส่วนที่เป็น "1" ต่างกัน เพราะฉนั้นจะทำให้ได้สัญญาณที่ได้จากการนำมารวมกันนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ออกมาเป็นช่อง ๆ ในการทดลองนั้นได้ทำการคัดเลือกสัญญาณที่ได้เพียง 4 bit เท่านั้น โดยใช้ไอซี เบอร์ 74LS20 ซึ่งเป็นไอซี TTL ประเภท NAND GATE 4 อินพุท ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณที่ต้องการ 8 ช่อง เพื่อให้เข้าใจดียิ่งขึ้น จะขอนำเอาผลที่ได้จาก

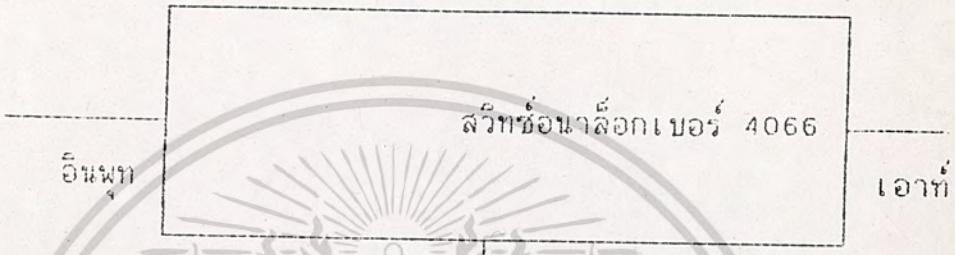
การอธิบายมาแสดงผังได้ดังต่อไปนี้

แผนผังแสดงการใช้ nand gate เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการเป็น
สัญญาณช่องตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

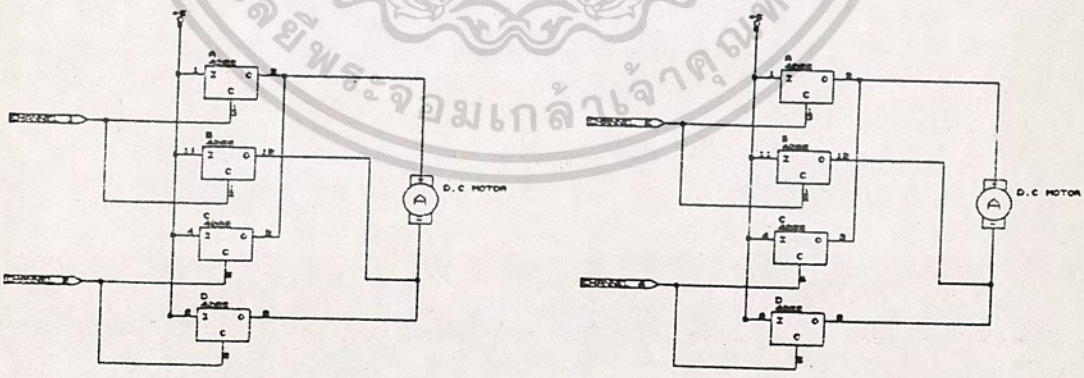
ส่วนควบคุมการทำงาน

ส่วนนี้เป็นส่วนที่นำเอาสัญญาณที่ได้มาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ซึ่งได้นำเอาสัญญาณมาควบคุมสวิทช์ให้ทำการปิดเปิด โดยสวิทช์ที่ใช้นี้ได้ใช้ในรูปของไอซีของ CMOS เบอร์ 4066 ซึ่งเป็นสวิทช์อนาล็อก ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ๆ ดังรูปต่อไปนี้



สัญญาณควบคุมให้ทำการเปิด-ปิด
" 5 " โวลท์ ทำให้สวิทช์เปิด
" 0 " โวลท์ ทำให้สวิทช์ปิด

ซึ่งแสดงวงจรรวมดังต่อไปนี้

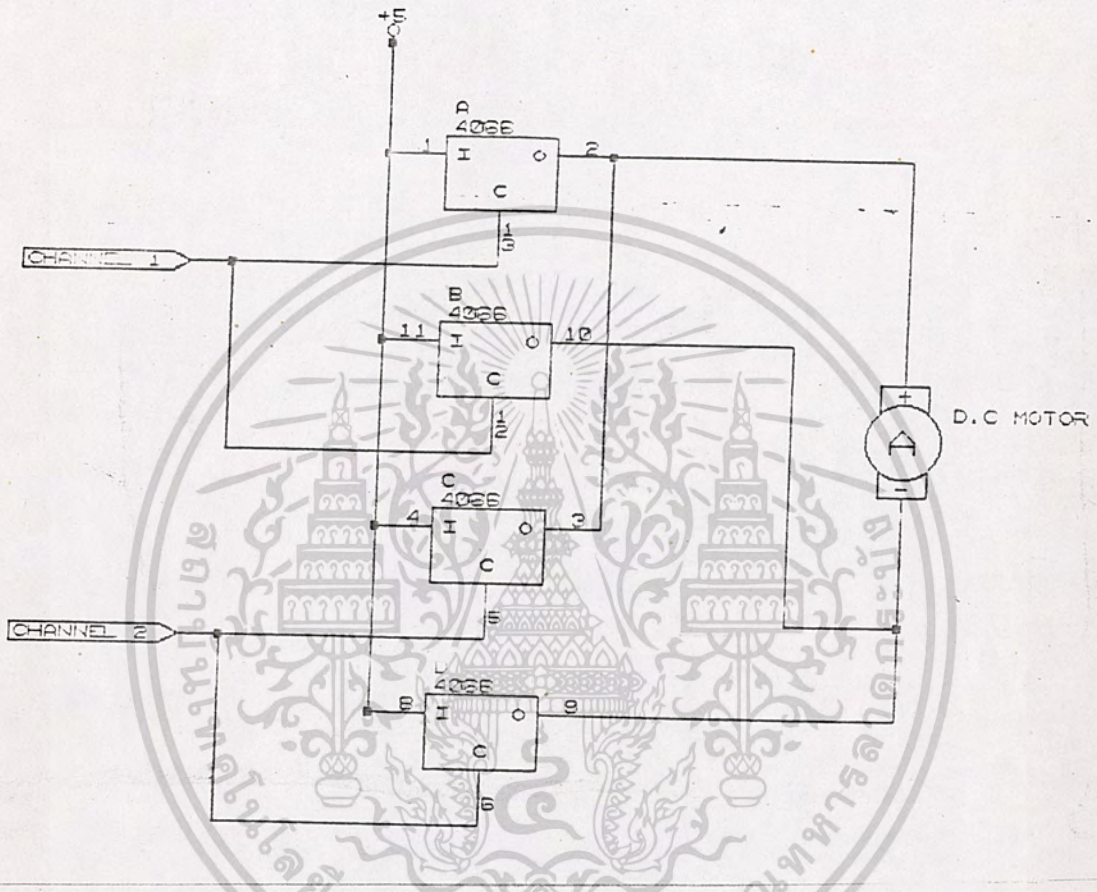


วงจรรวม ของสวิทช์อนาล็อก

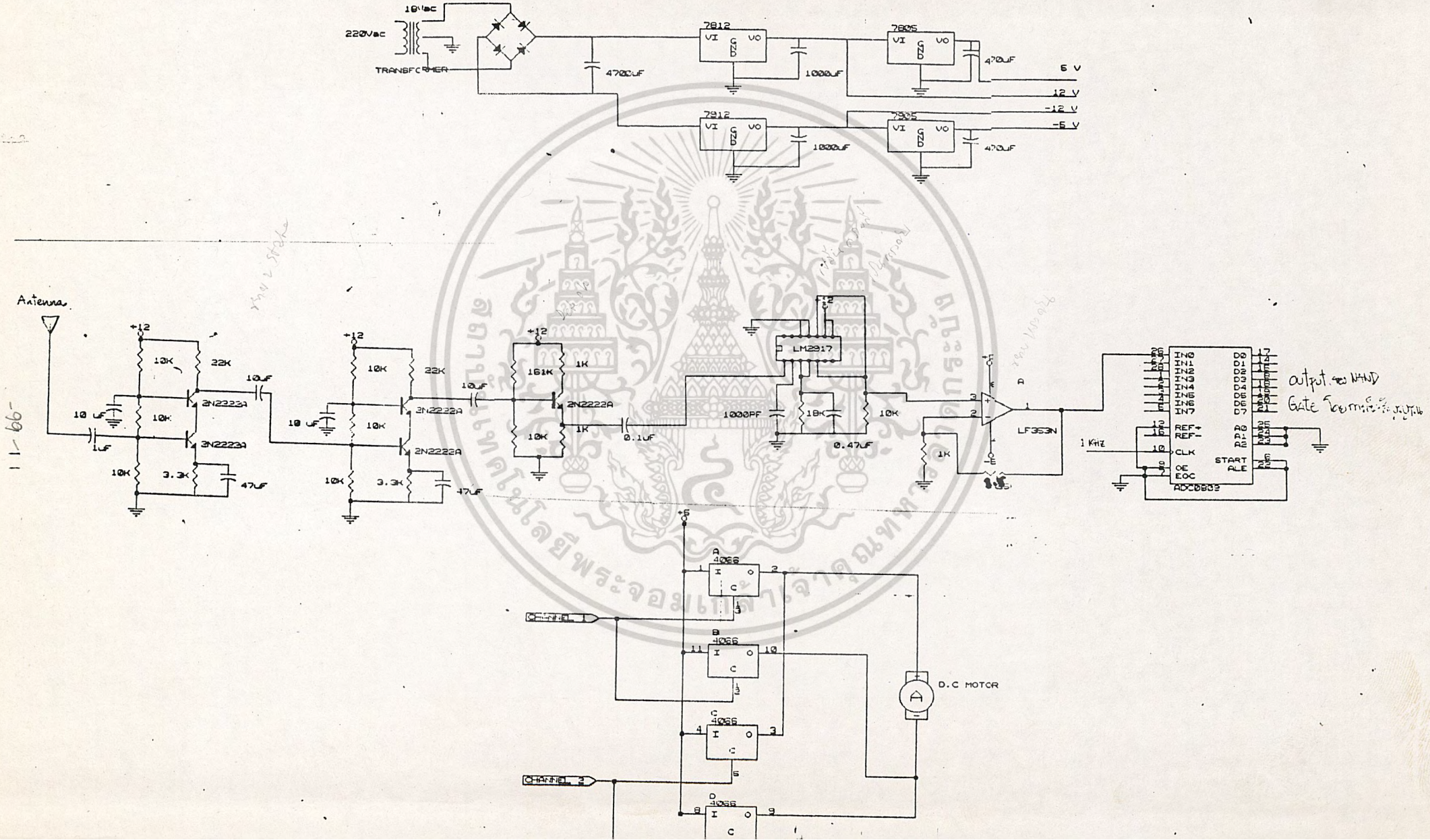
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ควบคุม

อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมในที่นี้เป็นอุปกรณ์โดยทั่วไป แต่ในการทดลองนี้ได้ใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่ถูกควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


220Vac
TRANSFORMER
7812
7805
470uF
1000uF
6 V
12 V
-12 V
-5 V
Antenna
10K
22K
10uF
2N2222A
3.3K
47uF
1K
161K
0.1uF
1000PF
18K
0.47uF
LM2917
LF353N
1 KHz
ADC0803
output ของ NAND Gate
4066
CHANNEL 1
CHANNEL 2
D.C MOTOR

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมา เราได้ใช้เพียงหลักการเบื้องต้นของสื่อสาร ด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ส่วนส่ง และส่วนรับ โดยส่วนส่งจะทำการส่งสัญญาณควบคุมด้วยคลื่นวิทยุ และส่วนรับ จะทำการดีเทคสัญญาณที่ได้และนำไปควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งในการทดลองที่ผ่านมานั้น ผลปรากฏว่า มีบางส่วนที่สามารถทำงานได้ และมีบางส่วนที่จะต้อง ปรับปรุงแก้ไข ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

ในส่วนส่งนั้นเราใช้ความถี่ของสัญญาณในการส่งประมาณ 12 MHz เพื่อเพิ่มพลังงานในการส่ง สามารถทำให้ส่งได้ในระยะไกล

ในส่วนรับนั้น เพื่อสะดวกในการนำสัญญาณที่รับได้ มาใช้ในการควบคุมนั้นเราอาศัยการดีเทคสัญญาณแบบง่าย ๆ โดยอาศัยการแปลงสัญญาณทางความถี่เป็นแรงดัน และนำเอาท์พุทที่ได้ไปควบคุมสัญญาณต่อไป

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ในการส่งนั้น เราไม่สามารถส่งสัญญาณได้ในระยะไกลมากนัก เนื่องจากในส่วนของสายอากาศยังไม่สมบูรณ์ และในการดีเทคสัญญาณของส่วนรับนั้นยังมีข้อบกพร่องอยู่ จึงทำให้การดีเทคสัญญาณ ที่ได้นั้นยังไม่สมบรูณ์เท่าที่ควร

จากการทดลองเท่าที่ผ่านมา ถึงแม้ผลการทดลองที่ได้ จะไม่เป็นที่น่าพอใจ เท่าที่ควร แต่ผู้จัดทำหวังว่า ผลการทดลองที่ได้ จะเป็นแนวทาง ในการศึกษาค้นคว้า และเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจต่อไปบ้างไม่มากก็น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

โครงงาน และ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มิอาจที่จะสำเร็จลงได้ตามวัตถุประสงค์ถ้าขาดความร่วมมือและคำแนะนำต่าง ๆ ดังนั้น ในนามของผู้จัดทำจึงต้องขอขอบคุณแก่ผู้ให้ความร่วมมือทุกฝ่าย อาทิ อาจจารย์ เพื่อน ๆ ที่ได้ช่วยในการให้ข้อคิดเห็น ตลอดจนผู้ร่วมงานในกลุ่มทุกคนที่ได้ช่วยแก้ปัญหา และสุดท้ายคือ อาจารย์ สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกด้านในการทำวิจัยครั้งนี้อย่างมาก ตลอดจนจัดสรรหาเครื่องมือในการทดลอง และหวังว่า ความดีที่ได้จากปริญญานิพธ์นี้ ขอมอบกลับสู่ผู้ที่ให้ความร่วมมือและกำลังใจทุกท่าน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

(1) วันชัย คุณากรวงศ์, บัณฑิต บัวบูชา,รัฐวุฒิ ประทุมราช,รุ่งแสง เครือไวศยวรรณ," การคำนวณวงจรทรานซิสเตอร์" ,ห.จ.ก.สำนักพิมพ์ฟิสิกเซนเตอร์,1990

(2) ประกิจ ตังติสานนท์,"วิศวกรรมการสื่อสารไฟฟ้าอิเล็คทรอนิคส์", คณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง,2527

(3) Forrest Barker,"Communication Electronics Systems circuits and devices",prentice-Hall International Inc. ,1987

(4) addel S.Sedra,Kenneth C.smith,"Micro Electronic Circuits"Hot-Sanuders International Edition,1982

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้