

เสถียรภาพของความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ
Frequency Stability of Delay-line Controlled Oscillators



วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๖๔

@พ.
พ 436
2564
010548

015548

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

iii

บทคัดย่อ

iv

Abstract

v

บทที่ ๑. บทนำ

๑

๑.๑ วงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วยสัญญาณ

๑

๑.๒ ความเสถียรของความเร็ว

๒

บทที่ ๒. อุปกรณ์หน่วยสัญญาณ

๔

๒.๑ คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์หน่วยสัญญาณ

๔

๒.๑.๑ คลื่นภายในเนื้อสาร

๗

๒.๑.๒ คลื่นผิว

๗

๒.๒ ปฏิกิริยาการโต้ตอบไฮสตรอนิก

๘

๒.๓ หลักการทำงานของอุปกรณ์หน่วยสัญญาณ

๘

บทที่ ๓. ทฤษฎีและหลักการการทำงานของวงจรมีกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วยสัญญาณ

๑๑

๓.๑ ทฤษฎีของวงจรมีกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วยสัญญาณ

๑๑

๓.๒ ปฏิกิริยาการโต้ตอบของการกระโดดข้ามโมด

๑๒

บทที่ ๔. เสถียรภาพของความเร็วของวงจรมีกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วยสัญญาณ

๑๓

๔.๑ ความเสถียรของความเร็วในช่วงเวลานาน

๑๓

๔.๒ ความเสถียรของความเร็วในช่วงเวลาปานกลาง

๑๔

๔.๓ ความเสถียรของความเร็วในช่วงเวลาสั้น

๑๔

| | |
|--|----|
| บทที่ ๕. การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณโดยใช้คอมพิวเตอร์ | ๑๔ |
| ๕.๑ หลักการสร้างโปรแกรมให้ทำหน้าที่เป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ | ๑๔ |
| ๕.๑.๑ โปรแกรมของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ | ๑๔ |
| ๕.๑.๒ โปรแกรมของภาคขยาย | ๒๑ |
| ๕.๑.๓ โปรแกรมสร้างสัญญาณรบกวนระดับต่ำ | ๒๒ |
| ๕.๑.๔ ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเสมือนของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ | ๒๒ |
| ๕.๒ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่ของข้อมูล | ๒๔ |
| ๕.๓ ผลการวิเคราะห์ | ๒๕ |
| ๕.๔ สรุปผล | ๒๖ |
| บทที่ ๖. การทดลอง | ๒๗ |
| ๖.๑ การสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ | ๓๐ |
| ๖.๒ การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความถี่ | ๓๒ |
| ๖.๓ ผลการทดลอง | ๓๔ |
| ๖.๔ สรุปผล | ๔๐ |
| บทที่ ๗. บทสรุป | ๔๑ |
| บทความและหนังสืออ้างอิง | ๔๓ |
| ภาคผนวกที่ ๑ คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในบทที่ ๕ | ๔๔ |
| ภาคผนวกที่ ๒ รูป อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้นใช้ในการทดลองในบทที่ ๖ | ๔๕ |
| ภาคผนวกที่ ๓ วงจรที่ใช้ในการทดลองในบทที่ ๖ | ๔๗ |

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำตลอดเวลาที่ทำการวิจัย จึงใคร่ขอขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร.สิทธิชัย โภไคยอุดม ไว้เป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ อาจารย์ สมศักดิ์ ชัจจริย์วรกุล ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ต่าง ๆ ไว้ ณ ที่นี้ด้วย



บทคัดย่อ

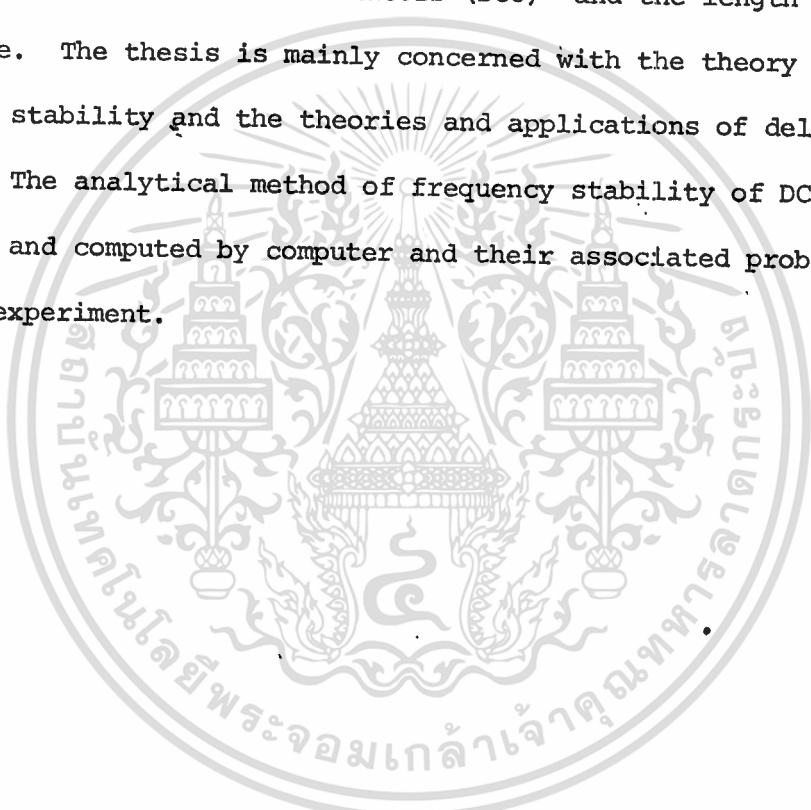
วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความ เสถียรของเวลาที่ของวงจรถ่วง
สัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ (Delay-line controlled oscillators, DCO)
กับความยาวของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ (Delay-line) ที่ใช้ โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการ
ทำงานของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณและวงจรถ่วง DCO พร้อมทั้งทฤษฎีความ เสถียรของเวลาที่ นอกจากนี้
ยังกล่าวถึงการวิเคราะห์ความ เสถียรของเวลาที่ของวงจรถ่วง DCO โดยการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์
และโดยการทดลองจากวงจรถ่วงที่สร้างขึ้น



Abstract

1

This thesis discusses the relation of the frequency stability of "Delay-line controlled oscillators (DCO)" and the length of such delay line. The thesis is mainly concerned with the theory of frequency stability and the theories and applications of delay line and DCO. The analytical method of frequency stability of DCO is discussed and computed by computer and their associated problems are shown by experiment.

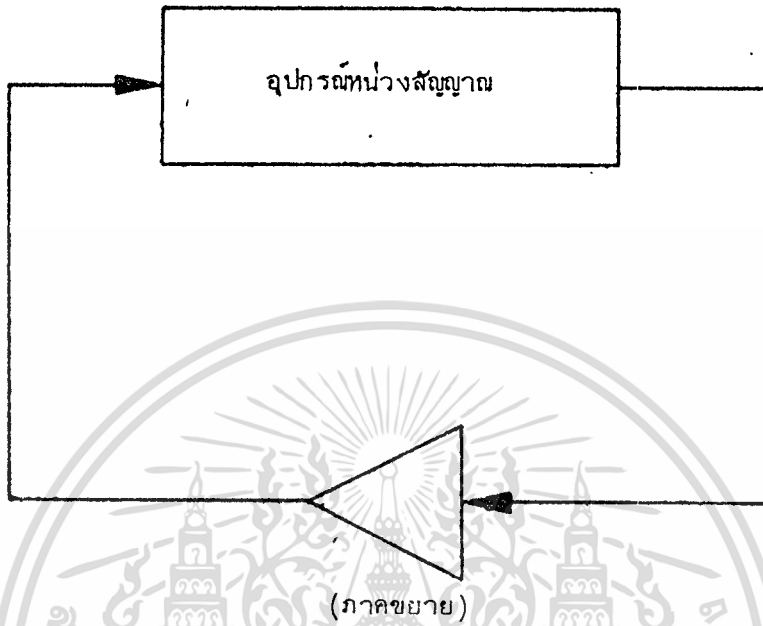


บทที่ ๑

บทนำ

๑.๑ วงจรรำเปิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ
(Delay-line Controlled Oscillator; DCO)

วงจรรำเปิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณหรือเรียกสั้น ๆ ว่า DCO นี้จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ให้ความถี่แบบหนึ่งนั่นเอง ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ ๒ ส่วนคือ อุปกรณ์หน่วงสัญญาณ (Delay-line) และภาคขยาย (Amplifier) ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๑.๑.๑ โดยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณในที่นี้จะหมายถึง อุปกรณ์หน่วงสัญญาณแบบคลื่นเสียง (Acoustic wave delay-line) ซึ่งจะอาศัยคุณสมบัติของสารที่เรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (Piezo-electric effect) โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้ในสารบางประเภท เช่น ควอตซ์ (Quartz) เป็นต้น และภาคขยายจะทำหน้าที่ป้อนสัญญาณกลับแบบบวก (Positive feed back) ให้แก่อุปกรณ์หน่วงสัญญาณ โดยมีข้อกำหนดที่ว่า ค่ากำลังขยายของทั้งระบบจะต้องมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ ๑ เสมอ และความยาวของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณจะต้องมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มของความยาวคลื่นของสัญญาณที่ความถี่ต้องการ



รูปที่ ๑.๑.๑ แผนผังการทำงานของวงจร DCO

๑.๒ ความเสถียรของความถี่

(Frequency Stability)

ความเสถียรของความถี่ของวงจร DCO นี้จะแบ่งออกเป็น ๓ ลักษณะคือ

- ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลานาน
(Long term frequency stability)
- ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาปานกลาง
(Intermediate frequency stability)
- ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาสั้น
(Short term frequency stability)

โดยความเสถียรของความคิดใน ๓ ลักษณะนี้จะกล่าวโดยละเอียดในบทต่อ ๆ ไป
และในการศึกษาความเสถียรของวงจร DCO ในที่นี้จะสนใจเฉพาะความเสถียรของความคิด
ในช่วงเวลาสั้นเท่านั้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณที่ใช้



อุปกรณ์ท่วงสัญญาณ
(Delay-line)

อุปกรณ์ท่วงสัญญาณเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทหนึ่งที่ใช้สำหรับท่วงสัญญาณให้ช้าลง โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่สูง ให้อยู่ในรูปของคลื่นเสียง (Acoustic wave) ซึ่งมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำกว่ามาก และคลื่นเสียงที่ได้นี้จะเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีความยาวค่าหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ต้องการจะท่วงสัญญาณ แล้วจึงทำการเปลี่ยนคลื่นเสียงนี้ให้กลับมามีอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าดังเดิมเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

๒.๑ คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ [๓, ๔]

เหตุที่ต้องทำการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของคลื่นเสียงนั้น เนื่องจากต้องการลดขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ท่วงสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้วย เหตุผลที่ว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจะต่ำกว่าความเร็วของสัญญาณไฟฟ้ามากนั่นเอง

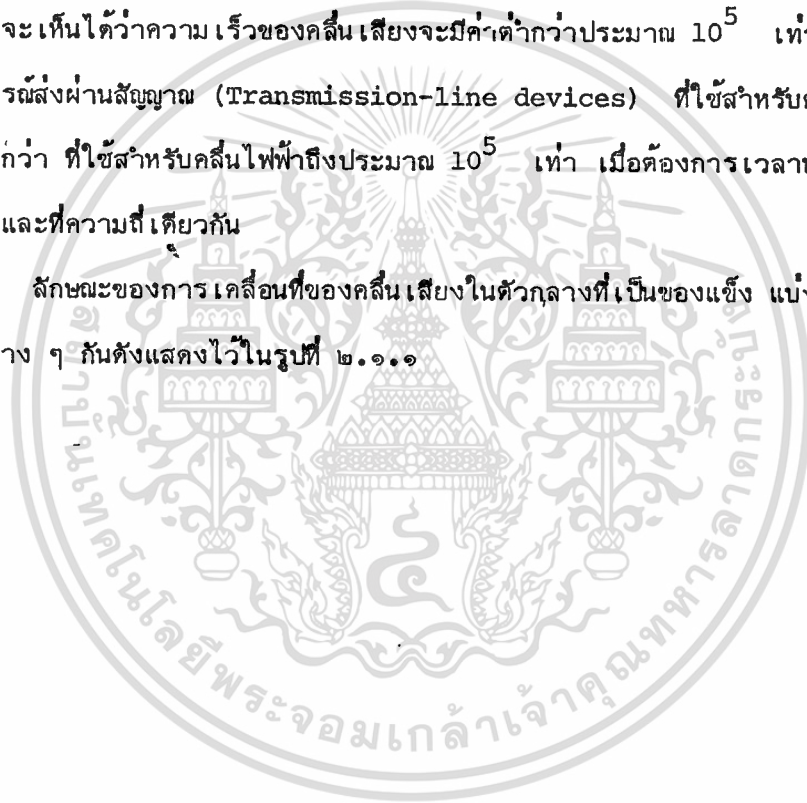
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

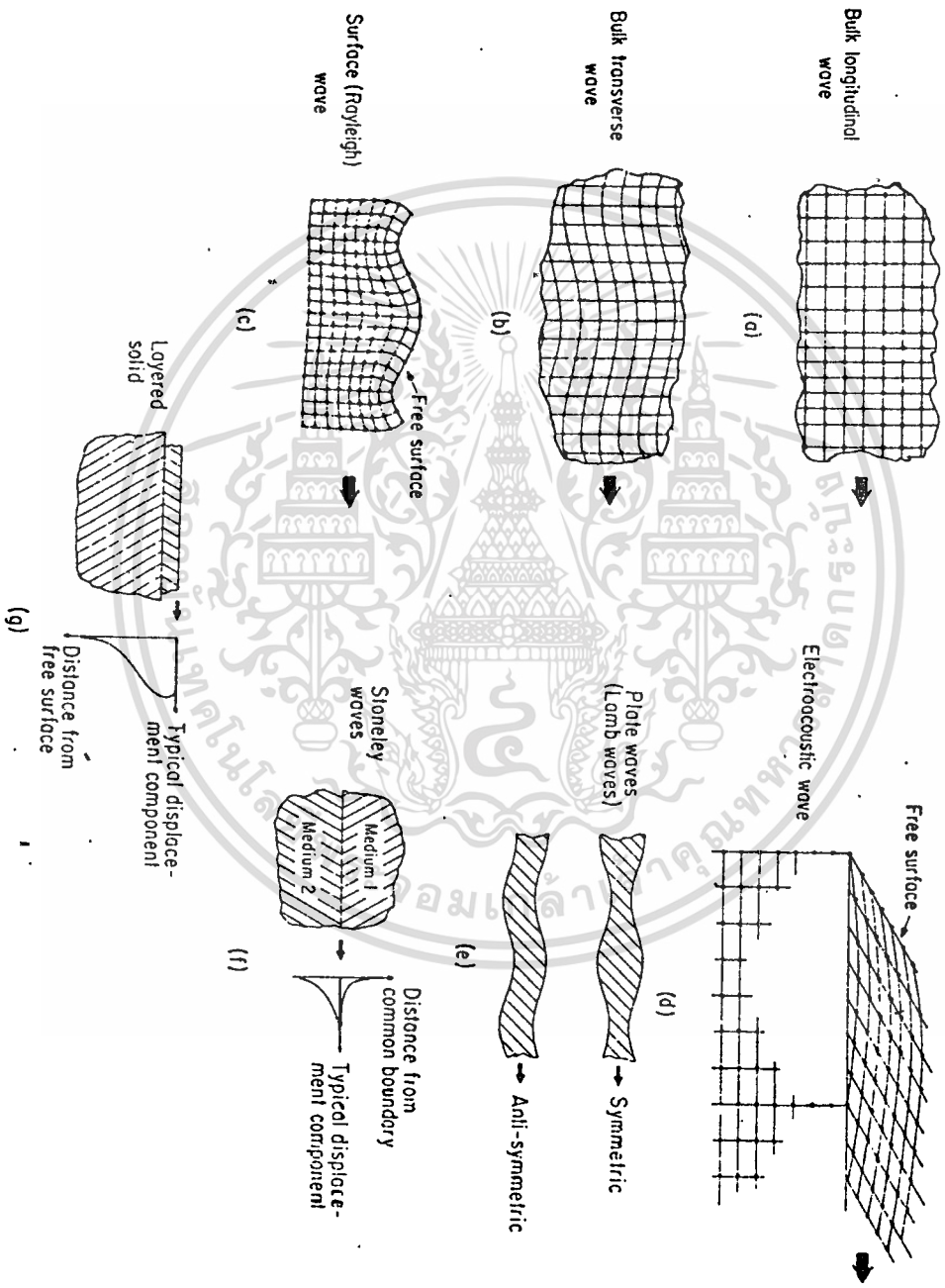
$$v_p = (C/\rho)^{1/2} \quad (2.1.1)$$

| | | |
|--------|--------|---|
| โดยที่ | v_p | หมายถึงความเร็วเฟส (Phase velocity) |
| | C | หมายถึงสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น (Elastic stiffness constant) |
| | ρ | หมายถึงความหนาแน่นของตัวกลาง (Density of medium) |

ซึ่งค่าความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางต่าง ๆ จะมีค่าประมาณ 1.5×10^3 ถึง 12×10^3 เมตร/วินาที ในขณะที่ความเร็วของสัญญาณไฟฟ้ามีค่าประมาณ 10^8 เมตร/วินาที จะเห็นได้ว่าความเร็วของคลื่นเสียงจะมีค่าต่ำกว่าประมาณ 10^5 เท่า ดังนั้นความยาวของอุปกรณ์ส่งผ่านสัญญาณ (Transmission-line devices) ที่ใช้สำหรับคลื่นเสียงจะมีขนาดสั้นกว่า ที่ใช้สำหรับคลื่นไฟฟ้าถึงประมาณ 10^5 เท่า เมื่อต้องการเวลาหน่วงของสัญญาณที่เท่ากันและที่ความถี่เดียวกัน

ลักษณะของการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางที่เป็นของแข็ง แบ่งออกได้เป็นลักษณะต่าง ๆ กันดังแสดงไว้ในรูปที่ ๒.๑.๑





รูปที่ ๒.๑.๑ ลักษณะของคลื่นเสียงในตัวกลางที่เป็นของแข็ง

โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่แตกต่างกันดังแสดงไว้ในรูปที่ ๒.๑.๑ นั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปและลักษณะโครงสร้างของตัวกลางนั้น ๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงลักษณะการเคลื่อนที่ที่สำคัญ ๒ ลักษณะคือ คลื่นภายในเนื้อสาร (Bulk acoustic wave) และคลื่นที่ผิว (Surface acoustic wave)

๒.๑.๑ คลื่นภายในเนื้อสาร

คลื่นภายในเนื้อสารนี้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ในทุกทิศทางในตัวกลางโดยจะแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางได้เป็น ๒ ลักษณะคือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางอยู่ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งเรียกว่าคลื่นภายในเนื้อสารแบบตามยาว (Bulk longitudinal wave) โดยจะมีลักษณะเหมือนกับคลื่นอัด-ขยายในตัวกลางที่เป็นของไหล (Fluid) และอีกลักษณะหนึ่งนั้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางจะอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งเรียกว่า คลื่นภายในเนื้อสารแบบตามขวาง (Bulk transverse wave) โดยจะมีลักษณะเหมือนกับคลื่นที่เคลื่อนที่บนเส้นลวด โดยความเร็วเฟสของคลื่นในเนื้อสารนี้จะ เป็นไปตามสมการที่ (๒.๑.๑) และจะไม่ขึ้นกับความเร็ว ความถี่ของคลื่นประเภทนี้จะมีค่าสูงสุดประมาณ 200 MHz

๒.๑.๒ คลื่นที่ผิว

คลื่นที่ผิวนี้มีการเคลื่อนที่อยู่เฉพาะบนผิวของตัวกลางเท่านั้น โดยอนุภาคของตัวกลางจะเคลื่อนที่เป็นรูปไข่ (Elliptical paths) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ทั้งในแบบตามยาวและตามขวางรวมกันนั่นเอง ความเร็วเฟสของคลื่นที่ผิวนี้นี้จะเป็นเช่นเดียวกับคลื่นภายในเนื้อสาร แต่เนื่องจากอนุภาคที่อยู่ผิวของตัวกลางมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยกว่าอนุภาคที่อยู่ภายในเนื้อสาร ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ผิวต่ำกว่าคลื่นภายในเนื้อสารเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางเดียวกัน และความเร็วของคลื่นประเภทนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 10 MHz ถึง

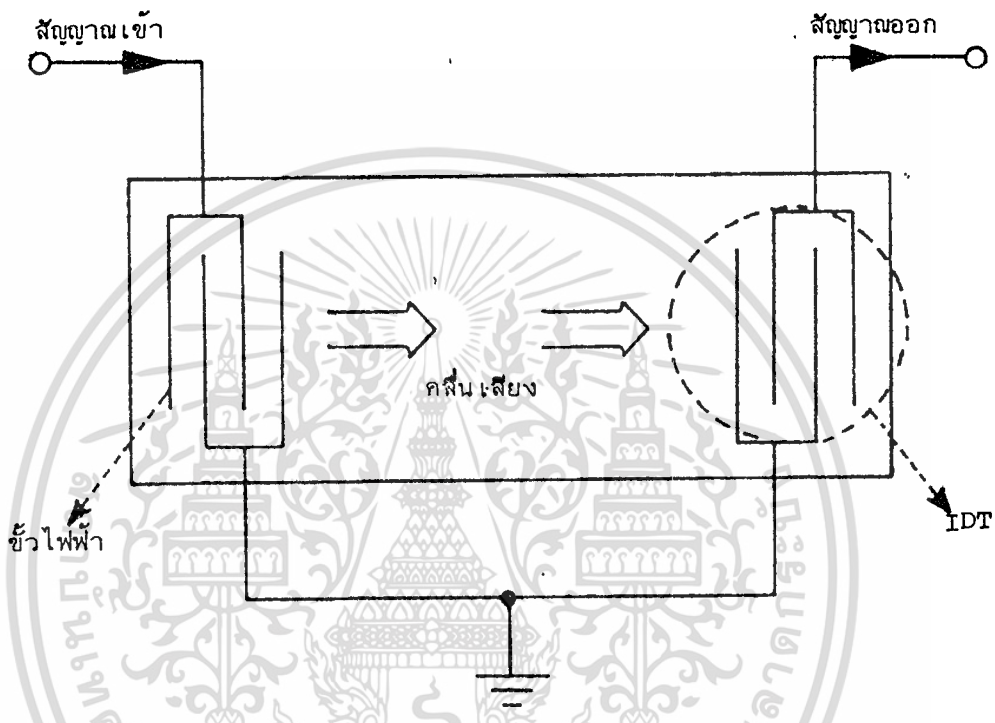
3 GHz

๒.๒ ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก
(Piezoelectric effect)

ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้ไปอยู่ในรูปของคลื่นเสียงนั้น จะใช้คุณสมบัติของสารที่เรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารบางประเภท เช่น สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว (Single crystal) ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) หรืออาจเกิดในสารกึ่งตัวนำได้แก่ แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide), ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) และแกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide) หรือในสารประเภทเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกส์ (Ferroelectric ceramics) ได้แก่ เลด-เซอร์โคเนต-ติตาเนต (Lead-zirconate-titanate) เป็นต้น เมื่อผลึกของสารเหล่านี้ได้รับพลังงานกลซึ่งอาจจะเกิดจากการเคาะหรือกระแทก ทำให้ตำแหน่งต่าง ๆ ของประจุไฟฟ้า (Ions) ของผลึกมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะสมดุลย์ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ขึ้นบนผิวของผลึกนั้น และในทางกลับกันถ้ามีการให้สนามไฟฟ้าแก่ผลึก ก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารนั้นขึ้นได้เช่นกัน

๒.๓ หลักการทำงานของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ [๓,๔]

จากคุณสมบัติของสารไพโซอิเล็กทริกดังกล่าวในหัวข้อ ๒.๒ ได้นำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้ไปอยู่ในรูปของคลื่นเสียง หรือในทางกลับกันคือเปลี่ยนคลื่นเสียงให้กลับมาอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า ได้โดยการสร้างขั้วไฟฟ้า (Electrode) ขึ้นบนผิวของสารไพโซอิเล็กทริก ที่นำมาใช้สร้างอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๒.๓.๑ ซึ่งจะเรียกขั้วไฟฟ้าในลักษณะนี้ว่า อินเตอร์ดิจิตอล ทรานสดิวเซอร์ (Interdigital transducer) หรือ IDT



รูปที่ ๒.๓.๑ ลักษณะของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ

จากรูปที่ ๒.๓.๑ เมื่อมีสัญญาณไฟฟ้าเข้าทางภาครับสัญญาณเข้า (Input transducer) จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่ IDT ภาครับ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดพลังงานกลในรูปของคลื่นเสียงขึ้น และคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นนี้จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปยัง IDT ของภาคส่งสัญญาณออก (Output transducer) และคลื่นเสียงนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อส่งออกจากอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ โดยเวลาหน่วงของสัญญาณที่ต้องการนั้นจะถูกกำหนดได้จากความยาวของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณนั่นเอง

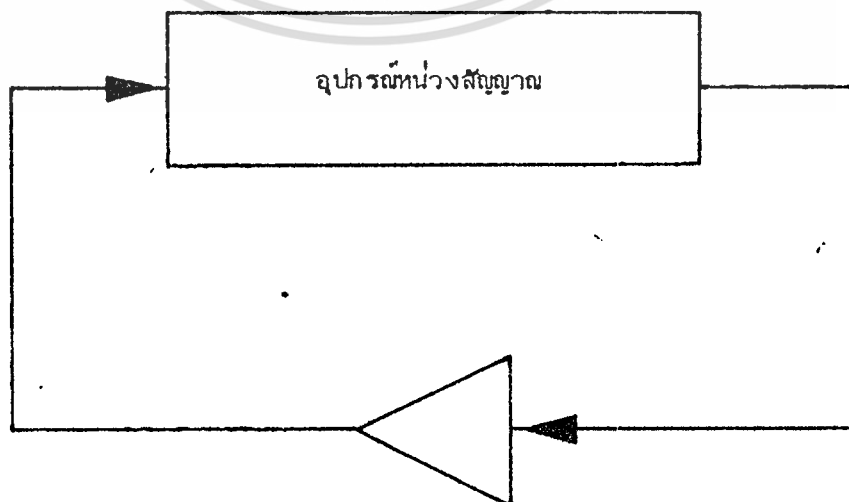
ประโยชน์ของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณนอกจากจะใช้ในคาร์หน่วงสัญญาณแล้ว ยังสามารถนำมาประกอบกับอุปกรณ์อื่น เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ให้ความถี่ (Oscillators) ได้ ซึ่งเรียก

อุปกรณ์ให้ความถี่ประเภทนี้ว่าวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ (Delay-line controlled oscillators) หรือ DCO

บทที่ ๓

ทฤษฎีและหลักการทํางานของวงจรถักกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ

วงจรถักกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ หรือ DCO นี้ เป็นวงจรถักให้ความถี่ ซึ่งนำเอาอุปกรณ์หน่วงสัญญาณมาใช้ประกอบกับภาคขยาย (Amplifier) ดังในรูปที่ ๓.๑ ซึ่งจะแสดงถึงหลักการทํางานของวงจรถัก DCO แบบง่าย ๆ โดยภาคขยายจะทำหน้าที่ป้อนสัญญาณกลับแบบบวก จากภาคส่งสัญญาณออกไปยังภาครับสัญญาณเข้าของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ โดยมีข้อกำหนดที่ว่า กำลังขยายของทั้งระบบจะต้องมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ ๑ และความยาวของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณจะต้องมีค่าเป็น เลขจำนวนเต็มของความยาวคลื่นของสัญญาณที่ความถี่ที่ต้องการ นั่นคือ ค่าการเลื่อนเฟส (Phase shift) ของทั้งระบบจะต้องมีค่าเป็น เลขจำนวนเต็มของ 2π เสมอ ดังนั้นจากข้อกำหนดดังกล่าว นี้จะเห็นได้ว่าความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่เป็นไปได้หลายความถี่ด้วยกัน แต่สำหรับในการทํางานของวงจรถัก DCO แต่ละครั้งจะให้ความถี่เพียงความถี่เดียว



(ภาคขยาย)

๓.๑ ทฤษฎีของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ [๑,๖]

จากข้อกำหนดที่ว่าค่าการเลื่อนเฟสของทั้งระบบจะต้องมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มของ 2π เสมอนั้นจะได้ว่า ถ้ากำหนดให้

L เป็นความยาวยังผลของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ (Effective delay-line length)

v เป็นความเร็วของคลื่นเสียง

ϕ_t เป็นค่าการเลื่อนเฟสเนื่องจากตัวแปลงพลังงาน (Transducers)

ϕ_a เป็นค่าการเลื่อนเฟสเนื่องจากภาคขยาย

และ n เป็นเลขจำนวนเต็มใด ๆ

ดังนั้นจะได้ว่า

$$2\pi L/\lambda + \phi_a + \phi_t = 2n\pi \tag{3.1.1}$$

และถ้าให้ τ เป็นเวลาหน่วงยังผล (Effective delay time) นั่นคือ

$$\tau = L/v \tag{3.1.2}$$

ดังนั้นสมการที่ (3.1.1) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$2\pi\tau f + \phi_a + \phi_t = 2n\pi \tag{3.1.3}$$

จากสมการที่ (3.1.3) นี้จะสามารถหาค่าความถี่ที่เกิดขึ้นได้ โดยค่า n ในที่นี้จะเป็นจำนวนเลขที่แสดงถึงโหมดของการสั่น (Mode of oscillation) ที่เกิดขึ้น

$$f_n = [n - (\phi_a + \phi_t)/2\pi] / \tau \tag{3.1.4}$$

จากสมการที่ (3.1.4) จะเห็นได้ว่าความถี่ที่เกิดขึ้นของโหมดที่ n จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าการเลื่อนเฟสของตัวแปลงพลังงาน หรือภาคขยายนั่นเอง

๓.๒ ปรากฏการณ์การกระโดดข้ามโหมด

(Mode Jumping)

ปรากฏการณ์การกระโดดข้ามโหมดนี้หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของความถี่ของโหมดหนึ่งไปยังอีกโหมดหนึ่ง ในระหว่างการทำงานของวงจร DCO แต่ละครั้ง ซึ่งสามารถศึกษาได้จากสมการที่ (3.1.4) โดย ค่าผลต่างของความถี่ของโหมดที่ n และ $(n + 1)$ จะหาได้จากสมการ

$$\Delta f = \left[1 - \left\{ (\phi_a f_{n+1} + \phi_t f_{n+1}) - (\phi_a f_n + \phi_t f_n) \right\} / 2\pi \right] / \tau \quad (3.1.5)$$

ในกรณีที่เวลาหน่วงมีค่ามาก จะทำให้ความถี่ของโหมดที่ n และ $(n + 1)$ จะมีค่าใกล้เคียงกันและค่าการเลื่อนเฟสเนื่องจากภาคขยายและตัวแปลงพลังงานจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโหมดที่ n และ $(n + 1)$ ดังนั้นผลต่างของความถี่ระหว่างโหมดที่ n และ $(n + 1)$ ในสมการที่ (๓.๑.๕) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta f \approx 1/\tau \quad (3.1.6)$$

โดยที่ τ ไปแล้วในการทำงานของวงจร DCO แต่ละครั้งจะเกิดความถี่ที่เสถียรเพียงความถี่เดียว ถึงอย่างไรก็ตามในบางกรณี โหมดของการสั่นอยู่ใกล้กันมาก ก็อาจจะเป็นไปได้ที่จะเกิดปรากฏการณ์การกระโดดข้ามโหมดเกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากทรานเซียน (Transient) ที่รุนแรงมารบกวนการทำงานของวงจร ดังนั้นวิธีป้องกันปรากฏการณ์การกระโดดข้ามโหมดที่อาจทำได้วิธีหนึ่งคือการป้องกันการเกิดทรานเซียนที่รุนแรงที่มารบกวนการทำงานของวงจรมันเอง

บทที่ ๔

เสถียรภาพของควมถี่ของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ

ในการศึกษาความเสถียรของควมถี่โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะแบ่งออกเป็น ๓ ลักษณะคือ

- ความเสถียรของควมถี่ในช่วงเวลานาน
- ความเสถียรของควมถี่ในช่วงเวลาปานกลาง
- ความเสถียรของควมถี่ในช่วงเวลาสั้น

๔.๑ ความเสถียรของควมถี่ในช่วงเวลานาน [๑,๒,๖]

(Long term frequency stability)

ความเสถียรของควมถี่ในช่วงเวลานาน นี้หมายถึงความเสถียรของควมถี่ที่ทำการศึกษาในช่วงเวลานานเป็นวันหรือเป็นปี โดยอาจจะถือได้ว่า เหมือนกับ เป็นการศึกษาอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาประกอบขึ้นเป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ DCO ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น ๒ ส่วนคือ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเช่น ตัวเก็บประจุและทรานซิสเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาประกอบนี้จะมีอายุการใช้งาน นานจนเกือบไม่ต้องคำนึงถึงเมื่อเปรียบเทียบกับอายุการใช้งานของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ

เหตุที่ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณลดลง อาจเนื่องมาจากการพุ่งกระจาย (Diffusion) อย่างช้า ๆ ของอะตอมโลหะจากขั้วไฟฟ้าของ IDT เข้าไปในเนื้อสารที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางกรยืดหยุ่น (Elastic properties) และเวลาท่วงของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณผิดไปจากเดิม วิธีแก้ไขอาจทำได้โดยการออกแบบ IDT ให้มีจำนวนของขั้วไฟฟ้าไม่มากนัก หรืออาจทำได้โดยการนำเอาอุปกรณ์ท่วงสัญญาณบรรจุในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย (Inert gas) หรือในสุญญากาศ เพื่อเป็นการป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอมโลหะที่ IDT กับออกซิเจนในอากาศ และป้องกันสิ่งแปลกปลอมที่

จะมาติดอยู่บนผิวของอุปกรณ์ทรงสัญญาณที่คลื่น เคลื่อนที่ผ่านนั้น เอง

๔.๒ ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาปานกลาง [๑,๒,๖]

(Intermediate frequency stability)

ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาปานกลางนี้หมายถึง ความเสถียรของความถี่ที่ ทำการศึกษาในช่วงเวลาไม่มากนัก อาจเป็นนาทิจึงหรือชั่วโมง ซึ่งเหตุที่ทำให้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผล ต่อการทำงานของวงจรดังนี้

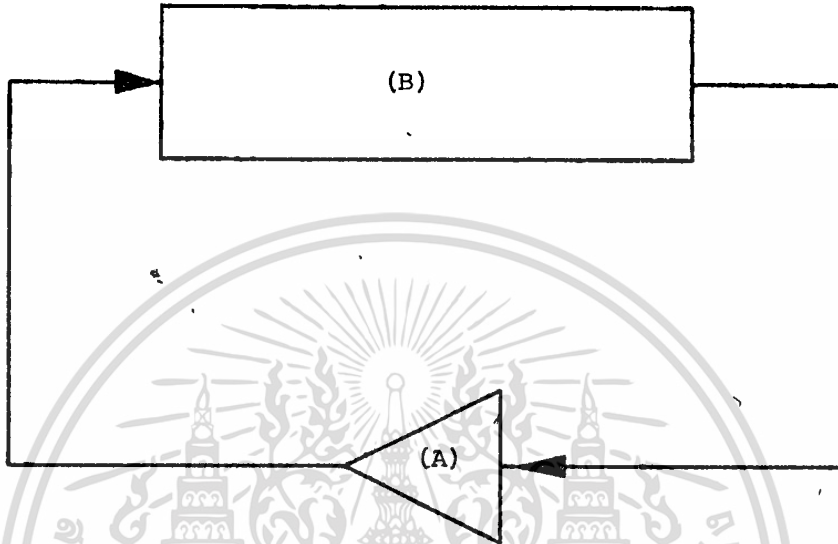
- มีผลต่อการทำงานของภาคขยายโดยจะทำให้ค่าการเลื่อนเฟสและกำลังขยายมีการเปลี่ยนแปลง
- มีผลทำให้ปริมาณความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ IDT ทั้งสองของอุปกรณ์ทรงสัญญาณและ ค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแมทชิ่งเน็ตเวิร์ค (Matching network) มีการเปลี่ยนแปลงไป
- มีผลทำให้ค่าเวลาหน่วงยังผลของอุปกรณ์ทรงสัญญาณคลาดเคลื่อนไปจาก เดิม

วิธีการป้องกันอาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของทั้งระบบในระหว่างการทำงานของ วงจรให้คงที่เสมอ

๔.๓ ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาสั้น [๑,๒,๖]

(Short term frequency stability)

ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาสั้นนี้หมายถึง ความเสถียรของความถี่ที่ทำการ ศึกษาในช่วงเวลาสั้นเป็นวินาทีหรือนาที ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่เกิดขึ้นนี้สืบเนื่องมาจาก การเปลี่ยนแปลงกำลังขยายของทั้งระบบ แม้เพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่อความถี่ที่เกิดขึ้น จากการทำงาน ของวงจร DCO ดังในรูปที่ 4.3.1 โดยกำหนดให้ภาคขยายที่ กำลังขยายเป็น A และ อุปกรณ์ทรงสัญญาณมีค่าสัมประสิทธิ์ของการลดลงของศักย์ไฟฟ้า (Voltage attenuation)



รูปที่ ๔.๓.๑ การทำงานของวงจร DCO

จากข้อกำหนดของวงจร DCO ที่ว่ากำลังขยายของทั้งระบบจะต้องมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ

๑ เสมอ ดังนั้น

$$A \cdot B \approx 1 \quad (4.3.1)$$

ถ้ามีการรบกวนเกิดขึ้นในการป้อนกลับของสัญญาณ จะทำให้กำลังขยายของทั้งระบบมีการเปลี่ยนแปลง โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta(A \cdot B) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial a_i} (A \cdot B) \Delta a_i + \frac{\partial}{\partial \omega} (A \cdot B) \Delta \omega \quad (4.3.2)$$

โดยที่ a_i เป็นพารามิเตอร์ (Parameters) ของวงจรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังขยายของทั้งระบบ

และ m เป็นจำนวนของพารามิเตอร์ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

ดังนั้นถ้ากำหนดให้ค่าเปลี่ยนแปลงของกำลังขยายของทั้งระบบมีค่าน้อยที่สุดนั่นคือ

$$\Delta(A.B) = 0 \quad (4.3.3)$$

สมการที่ (4.3.2) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\left| \frac{\Delta\omega}{\omega} \right| = \left| - \sum_{i=1}^m \frac{\partial}{\partial a_i} (A.B) \Delta a_i \right| / \left| \omega \frac{\partial}{\partial \omega} (A.B) \right| \quad (4.3.4)$$

จากสมการที่ (4.3.4) จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการให้ความเสถียรของควมที่มีค่าสูง นั่นคือ $\left| \frac{\Delta\omega}{\omega} \right|$ มีค่าน้อย จะต้องทำให้ $\left| \omega \frac{\partial}{\partial \omega} (A.B) \right|$ มีค่าสูง นั่นเอง

ดังนั้นถ้ากำหนดให้ Q เป็นค่าความเสถียรของวงจร DCO จะได้ว่า

$$Q = \left| \omega \frac{\partial}{\partial \omega} (A.B) \right| \quad (4.3.5)$$

ถ้ากำหนดให้ B มีค่าเป็น

$$B = B' e^{j\phi(\omega)} \quad (4.3.6)$$

โดย B' จะไม่ขึ้นกับความถี่ และ ϕ เป็นค่าการเลื่อนเฟส

และถ้ากำหนดให้ภาคขยายมีกำลังขยายคงที่โดยไม่ขึ้นกับความถี่ และค่าการเลื่อนเฟส มีค่าเป็น

$$\phi = \beta L \quad (4.3.7)$$

โดยที่ β เป็นเวฟ 넘เบอร์ (Wave number) ซึ่งมีค่าเป็น $2\pi/\lambda$ และ L เป็นค่าความยาวขงผลของอุปกรณ์หนึ่งวงสัญญาณ

ดังนั้นจากสมการ (4.3.5), (4.3.6) และ (4.3.7) จะได้ว่า

$$Q = 2\pi L/\lambda \quad (4.3.8)$$

จากสมการที่ (4.3.8) นี้จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดให้ความถี่มีค่าคงที่ ความเสถียรของวงจร DCO จะขึ้นอยู่กับความยาวของอุปกรณ์หนึ่งวงสัญญาณ โดยเมื่อความยาวของอุปกรณ์หนึ่งวงสัญญาณเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเสถียรภาพของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

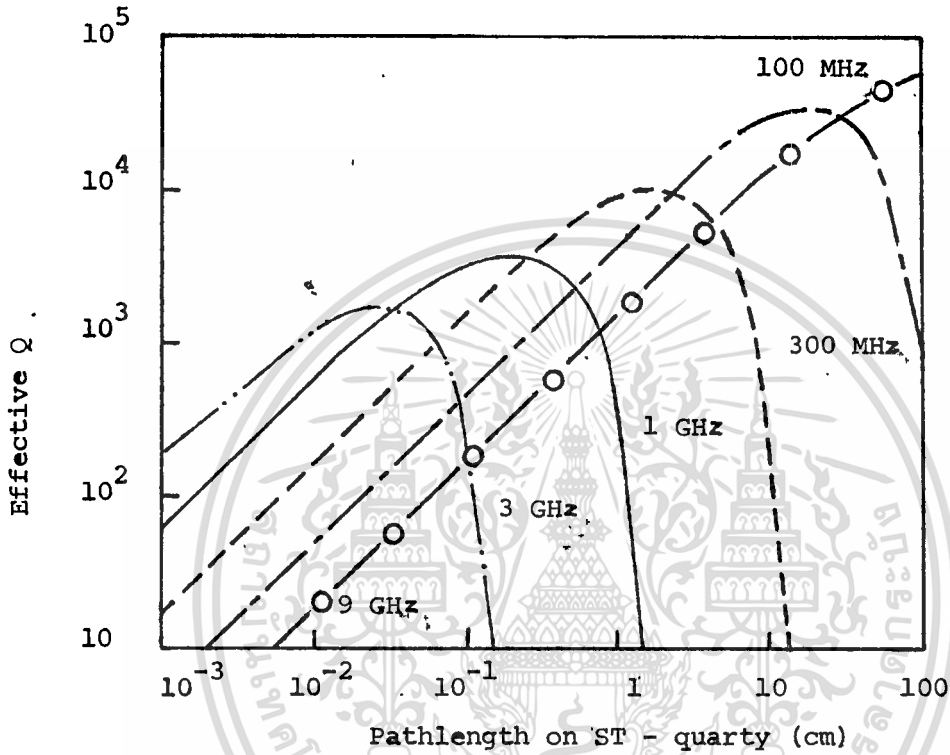
แต่ในกรณีที่ความถี่มีค่าสูงนั้น เมื่ออุปกรณ์หนึ่งวงสัญญาณมีความยาวมาก ก็จะทำให้ค่าความสูญเสียในการเคลื่อนที่ (Propagation losses) มีค่ามาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ภาคขยายที่มีกำลังขยายสูง เพื่อคงสภาพตามข้อกำหนดที่ว่ากำลังขยายของทั้งระบบจะต้องมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ ๑ ซึ่งการเพิ่มกำลังขยายของภาคขยายก็จะเป็นการเพิ่มระดับของสัญญาณรบกวน (Noise level) ขึ้นด้วย และเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่าสูงก็จะมีผลรบกวนต่อกำลังขยายของทั้งระบบซึ่งก็จะส่งผลทำให้ความเสถียรของวงจร DCO ลดลงได้ ดังนั้นอาจจะเขียนสมการที่ (4.3.8) ได้ใหม่เป็น [2]

$$Q = (2\pi L/\lambda)/D^{1/2} \quad (4.3.9)$$

โดยที่ D เป็นค่าการสูญเสียในการเคลื่อนที่

ในกรณีที่มีการเพิ่มค่าของ L อัตราในการเพิ่มขึ้นของ $(D^{1/2})$ จะมีค่าสูงกว่าอัตราในการเพิ่มขึ้นของค่า L ดังนั้นการใช้งานในช่วงความถี่สูงนั้นในการเพิ่มความยาวของอุปกรณ์หนึ่งวงสัญญาณในตอนแรกจะให้ความเสถียรของวงจรเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความยาวจนถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะทำให้ความเสถียรของวงจรกลับลดลง ซึ่งก็เนื่องมาจากระดับของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั่นเอง

ดังแสดงไว้ ในรูปที่ 4.3.2



รูปที่ ๔.๓.๒ แสดงถึงการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเสถียรของวงจร DCO เมื่อเพิ่มความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ

จากรูปที่ ๔.๓.๒ จะแสดงถึงผลที่ได้จากการเพิ่มความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณที่สร้างขึ้นจากควอทซ์แบบ ST (ST-Quartz) จะเห็นได้ว่าในตอนแรกการเพิ่มความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณจะทำให้ความเสถียรของวงจรเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณเพิ่มขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะทำให้ความเสถียรของวงจรถดลงเมื่อเพิ่มความยาวขึ้น การที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

บทที่ ๕

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรมีความถี่ของวงจรมักเกิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณโดยใช้คอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ที่ใช้คอมพิวเตอร์นั้นสามารถทำได้โดยการสร้างโปรแกรมให้มีลักษณะการทำงานเหมือนกับวงจร DCO ทุกประการ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ ซึ่งข้อมูลของสัญญาณความถี่ที่ได้จะอยู่ในรูปของฐานเวลา (Time domain) และจะนำเอาข้อมูลที่ได้นี้มาศึกษาถึงความเสถียรของวงจรมีความถี่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณ ซึ่งอยู่ภายในโปรแกรมที่สร้างขึ้น

๕.๑ หลักการสร้างโปรแกรมให้ทำหน้าที่เป็นวงจรมีความถี่

การสร้างโปรแกรมเพื่อให้ทำหน้าที่เสมือนกับเป็นวงจร DCO นั้น จะต้องคำนึงถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงภายในวงจร DCO โดยจะตั้งสมมติฐานว่าสัญญาณความถี่ที่ได้รับจากวงจร DCO นั้นจะเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีระดับต่ำ ๆ ที่เกิดขึ้นเองภายในวงจร ซึ่งจะเคลื่อนที่วนอยู่ภายในวงจร โดยจะทำให้สัญญาณความถี่ค่อย ๆ ถูกสร้างขึ้นจากผลของสัญญาณรบกวนนั้นเอง จนกระทั่งสัญญาณอยู่ในสภาวะคงที่ นั่นคือจะมีค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และความถี่คงที่

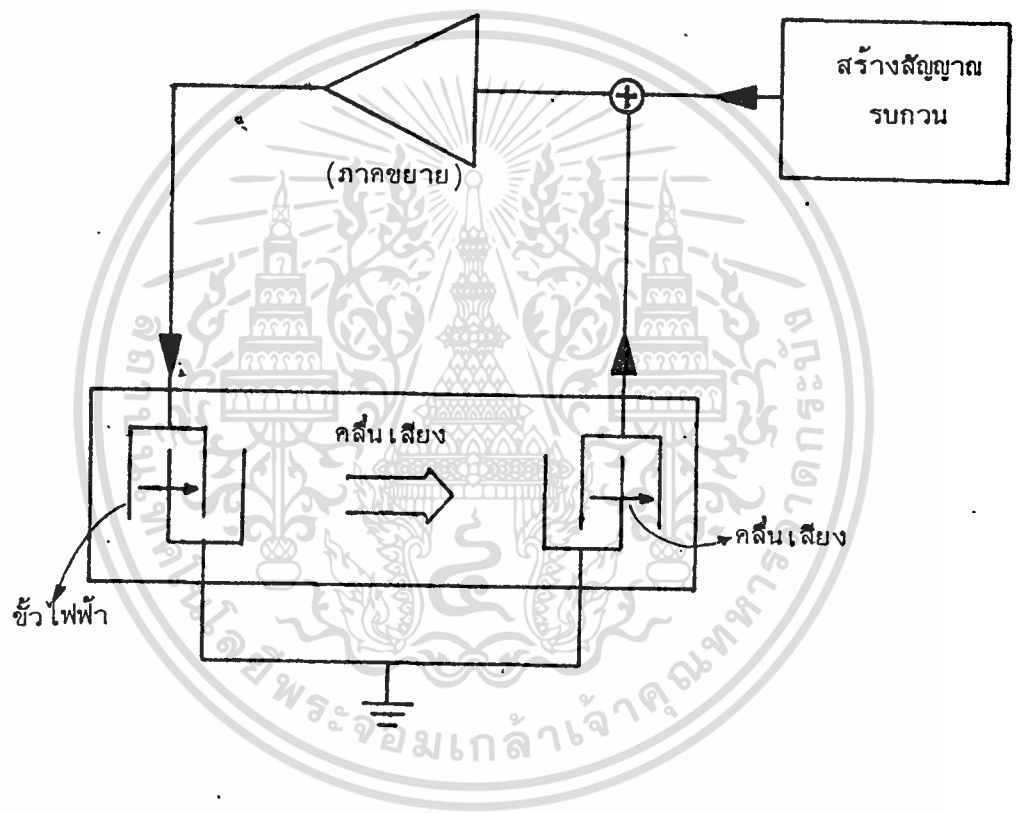
โปรแกรมที่ทำหน้าที่เสมือนกับวงจร DCO นี้จะแบ่งออกเป็นสามส่วนสำคัญ ๓ ส่วนคือ

- ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณ
- ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นภาคขยาย
- ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนระดับต่ำ

๕.๑.๑ โปรแกรมของอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณ

อุปกรณ์หนึ่งสัญญาณในที่นี้จะสมมติให้ไม่มีค่าการสูญเสียภายในตลอดความยาว ในการสร้างโปรแกรมนั้นจะทำการแบ่งความยาวของอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณออกเป็นช่วงย่อย ๆ ซึ่งการแบ่งจะแบ่งอยู่ในรูปของฐานเวลาโดยแต่ละส่วนจะมีความยาวเป็น Δt ถ้ากำหนดให้ IDT ทั้งสองของอุปกรณ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่วงสัญญาณมีจำนวนของขั้วไฟฟ้ามากกว่า ๑ ดังแสดงในรูปที่ ๕.๑.๑



รูปที่ ๕.๑.๑ ลักษณะการทำงานภายในของวงจร DCO

ดังนั้นที่ภาครับสัญญาณ เข้ค่าของสัญญาณที่ได้รับที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้วของ IDT จะมีค่าเป็นผลรวมของสัญญาณที่ได้รับจากภาคขยายรวมกับสัญญาณที่ได้รับจากคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่มาจนถึงพร้อมกัน ณ เวลาใด ๆ นั่นคือ ถ้าสมมติให้ $v_a(t)$ เป็นค่าของสัญญาณที่ได้รับจากภาคขยาย, $v_w(t)$ เป็นค่าของสัญญาณที่ได้รับจากคลื่นเสียง และ $v(t)$ เป็นสัญญาณที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้ว ณ เวลา t ใด ๆ จะได้ว่า

$$v(t) = v_a(t) + v_w(t) \tag{5.1.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ส่วนสัญญาณของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ไปตามความยาวของอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณนั้น จะแสดงด้วยการแทนค่าของสัญญาณที่ได้รับที่ชั่วไฟฟ้าอันสุดท้ายของ IDT ที่ เป็นภาครับสัญญาณเข้าตามตำแหน่งต่าง ๆ ณ เวลาต่าง ๆ กันนั้นคือ

$$v(t) = v(t + \Delta t) \quad (5.1.2)$$

และส่วนสัญญาณที่ส่งออกจากอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณนั้นจะมีค่าเป็นผลรวมของสัญญาณที่ได้รับจากคลื่นเสียงที่ชั่วไฟฟ้าแต่ละชั่วของ IDT ที่ทำหน้าที่เป็นภาคส่งสัญญาณออกนั้นคือ ถ้าสมมติให้ $v_i(t)$ เป็นสัญญาณที่ได้รับที่ชั่วไฟฟ้าแต่ละชั่วของ IDT, n เป็นจำนวนของชั่วไฟฟ้าทั้งหมดของ IDT ภาคส่งสัญญาณออก และ $v_c(t)$ เป็นค่าของสัญญาณที่ส่งออกจากอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณดังนั้นจะได้ว่า

$$v_c(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t) \quad (5.1.3)$$

สัญญาณที่ส่งออกจากอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังภาคขยาย ซึ่งจะรวมกับสัญญาณรบกวนระดับต่ำที่ภาครับของภาคขยายนั่นเอง

๕.๑.๒ โปรแกรมของภาคขยาย

สัญญาณที่ได้รับที่ภาครับของภาคขยายนั่นจะมีค่าเป็นผลรวมของสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณ $v_c(t)$ รวมกับสัญญาณรบกวนระดับต่ำ v_r ดังนั้นถ้ากำหนดในสัญญาณที่ภาครับของภาคขยายมีค่าเป็น v_{in} จะได้ว่า

$$v_{in} = v_c(t) + v_r \quad (5.1.4)$$

ภาคขยายจะถูกกำหนดให้กำลังขยายอยู่ในรูปของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทน (tanh function) ดังนั้นค่าของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายจะมีค่าเป็น

$$v_o = A_m \tanh(v_{in}) \quad (5.1.5)$$

หรือเขียนได้อีกแบบหนึ่งเป็น

$$v_o = A_m \cdot \left[\frac{e^{v_{in}} - e^{-v_{in}}}{e^{v_{in}} + e^{-v_{in}}} \right] \quad (5.1.6)$$

โดย A_m เป็นค่าคงที่มีค่าน้อยกว่า ๑

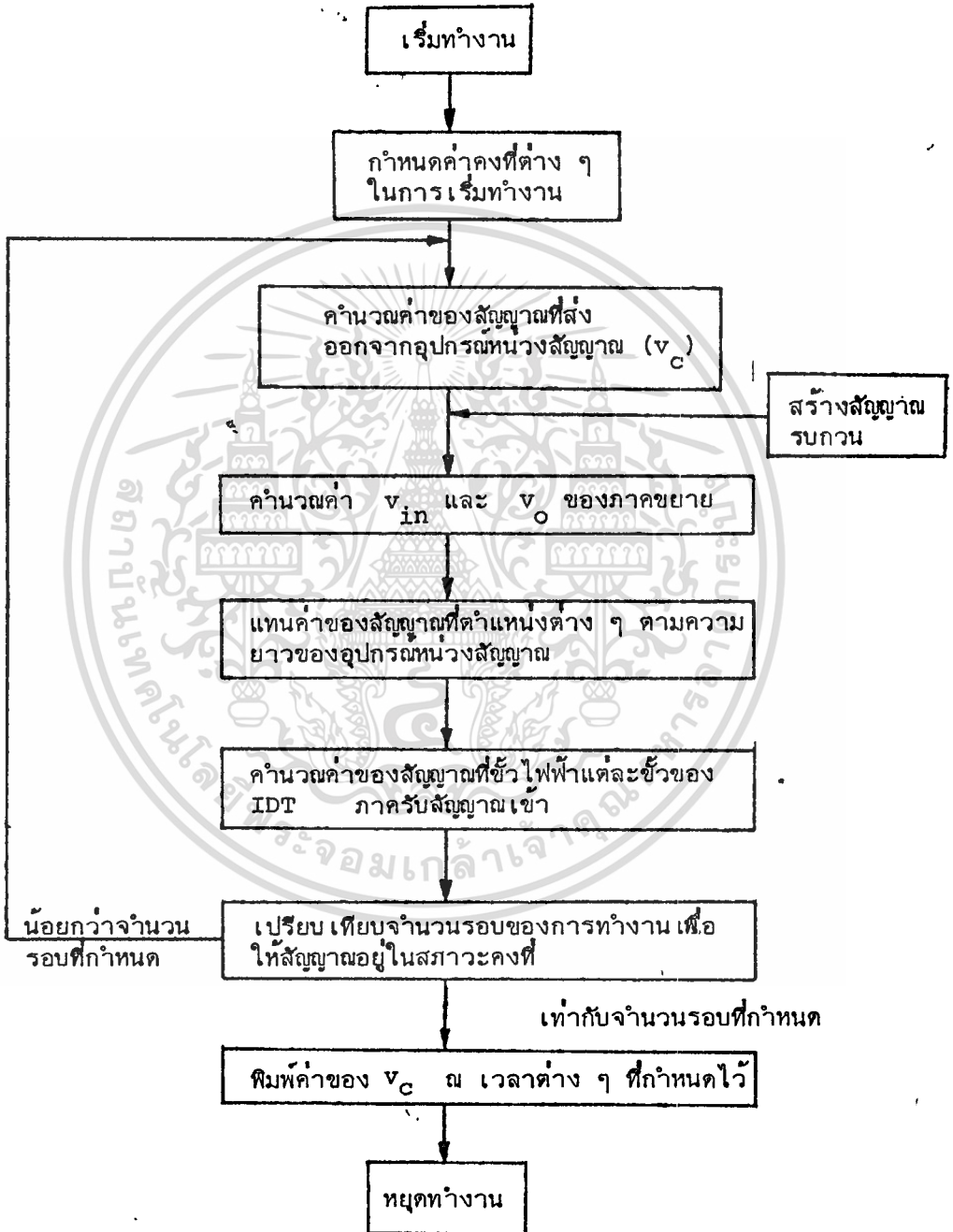
และสัญญาณที่ได้จากภาคขยายนี้จะถูกป้อนกลับไปยังอุทกณ์หน่วงสัญญาณอีกครั้งหนึ่ง

๕.๑.๓ โปรแกรมสร้างสัญญาณรบกวนระดับต่ำ

สำหรับส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนนั้น จะเป็นโปรแกรมที่ใช้สร้างตัวเลขสุ่ม (Random number) ที่มีทั้งค่าบวกและลบ โดยจะกำหนดให้สัญญาณรบกวนนี้อยู่ในระดับต่ำประมาณ 10^{-4} ถึง 10^{-6}

๕.๑.๔ ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมเสมือนของวงจรถักความถี่

ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมที่ทำหน้าที่เสมือนกับวงจร DCO สามารถเขียนได้เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้



$$Y = A + BX + CX^2 + DX^3 \quad (5.2.1)$$

โดย Y เป็นค่าของแอมป์รีจูด ของสัญญาณ

X เป็นค่าของตำแหน่งที่แกนเวลา

A, B, C และ D เป็นค่าคงที่

ค่าคงที่ A, B, C และ D นั้นสามารถหาได้จากกลุ่มของสมการดังต่อไปนี้

$$AM + B\sum X_i + C\sum X_i^2 + D\sum X_i^3 = \sum Y_i \quad (5.2.2)$$

$$A\sum X_i + B\sum X_i^2 + C\sum X_i^3 + D\sum X_i^4 = \sum (X_i \cdot Y_i) \quad (5.2.3)$$

$$A\sum X_i^2 + B\sum X_i^3 + C\sum X_i^4 + D\sum X_i^5 = \sum (X_i^2 \cdot Y_i) \quad (5.2.4)$$

$$A\sum X_i^3 + B\sum X_i^4 + C\sum X_i^5 + D\sum X_i^6 = \sum (X_i^3 \cdot Y_i) \quad (5.2.5)$$

โดย M ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 4

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจากสมการที่ (5.2.1) ถ้า Y มีค่าเท่ากับ ๐ แล้ว ค่า X ที่ได้จะเป็นตำแหน่งที่สัญญาณตัดแกนเวลานั้นเอง เมื่อทราบตำแหน่งของจุดตัดแกนแล้ว ก็จะสามารถหาความยาวคลื่นของสัญญาณได้ และจะนำเอากลุ่มของข้อมูลของความยาวคลื่นที่คำนวณได้นี้มาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ซึ่งก็จะเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่นั่นเอง ดังนั้นจะสามารถศึกษาความสัมพันธ์ของความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ได้โดยการเปลี่ยนแปลงความยาวของ อุปกรณ์ท่วงสัญญาณที่กำหนดขึ้นในโปรแกรม เสมือนของวงจร DCO และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ที่คำนวณได้

๕.๓ ผลการวิเคราะห์

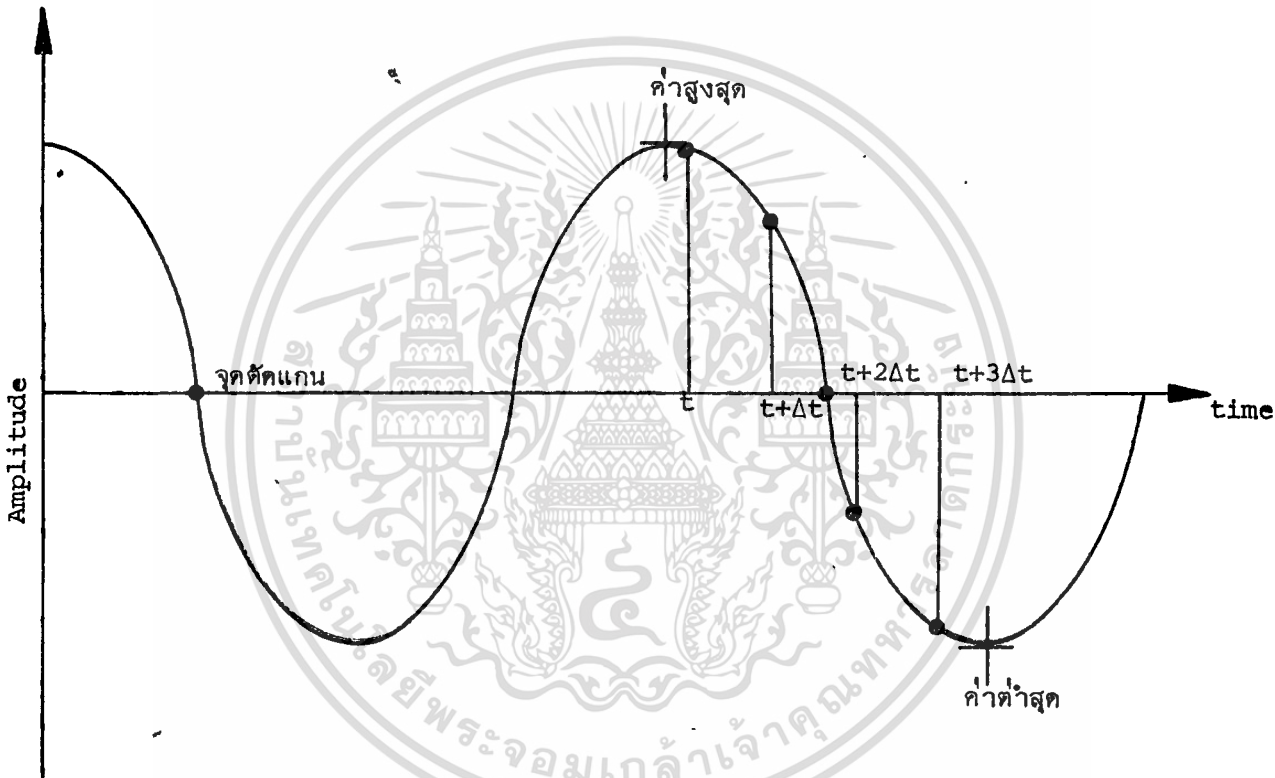
โปรแกรมต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์จริงนั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ ๑ โดยจะกำหนดให้

IDT ที่ภาครับสัญญาณ เข้ามีขั้วไฟฟ้าอยู่เพียง ๑ ขั้ว และที่ภาคส่งสัญญาณออกจะมีขั้วไฟฟ้า ๒ ขั้ว และจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

๔.๒ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่ของข้อมูล [๕]

ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความถี่ของข้อมูลที่ได้นั้นจะทำได้โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของสัญญาณ ซึ่งความยาวคลื่นนี้จะหาได้โดยการ หาค่าแทนที่สัญญาณตัดกับแกนเวลาดังในรูปที่ ๔.๒.๑



รูปที่ ๔.๒.๑ แสดงถึงการหาจุดตัดแกนเวลาของสัญญาณ

จากรูปที่ ๔.๒.๑ จะเห็นได้ว่าในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ นั้น จะมีการตัดแกนเวลา ๒ จุดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะต้องการหาจุดตัดแกนเวลาเพียงจุดเดียวเพื่อให้ระยะห่างระหว่างจุดแต่ละจุดเป็นค่าของความยาวคลื่นที่ต้องการ และเนื่องจากข้อมูลของสัญญาณที่ได้นั้น เป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นการหาจุดตัดแกน เวลาจะต้องทำโดยการหารูปฟังก์ชันที่แน่นอนของข้อมูลที่อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละช่วงของข้อมูล ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๔.๒.๑ การหารูปฟังก์ชันที่แน่นอนของข้อมูลนั้นจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) โดยจะสมมติให้มีรูปฟังก์ชัน เป็น

แบ่งช่วงเวลาในหนึ่งความยาวคลื่นออกเป็น ๑๐ ค่า โดยขนาดของสัญญาณรบกวนจะมีค่าเป็น 10^{-6} ค่าเพียง เบนมาตรฐานที่คำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความยาวของอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณ ได้แสดงไว้ใน

ตารางที่ ๔.๑

| ความยาวของอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, σ_n ($n = 100$) |
|------------------------------|---|
| ๕๑ | ๐.๓๗๔๔ |
| ๑๐๑ | ๐.๔๙๑๘ |
| ๑๕๑ | ๐.๕๒๗๓ |

จากตารางที่ ๔.๑ จะเห็นว่าผลที่คำนวณได้มีข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง ซึ่งถ้าพิจารณาจากสมการที่ (4.3.8) จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มความยาวของอุปกรณ์หนึ่งสัญญาณขึ้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ควรมีค่าลดลง เหตุที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดนี้ก็เนื่องมาจากค่าของ Δt ที่ใช้ในการคำนวณมีช่วงกว้างมากเกินไป นั่นคือ การแบ่งช่วงเวลาในหนึ่งความยาวคลื่นไม่ละเอียดพอ จึงมีผลทำให้ข้อมูลของสัญญาณที่ได้จากโปรแกรม เสมือนของวงจร DCO ไม่ละเอียดพอ ดังนั้นผลการคำนวณที่ได้ในตารางที่ ๔.๑ จึงเกิดความผิดพลาดจากความเป็นจริง

๔.๔ สรุปผล

การวิเคราะห์ความเสถียรของวงจร DCO ด้วยวิธีดังกล่าวมาแล้วข้างต้น โดยหลักการแล้วสามารถใช้วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง แต่เหตุที่ทำให้ผลที่ได้ในตารางที่ ๔.๑ มีข้อผิดพลาดนั้นเนื่องจากข้อมูลของสัญญาณไม่ละเอียดพอ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ก็ยังไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน เนื่องจากต้องใช้เวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มาก (หลายชั่วโมง) จึงได้หันมาสนใจในการวิเคราะห์โดยการทดลองจากวงจร DCO ที่สร้างขึ้นจริง ๆ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียด

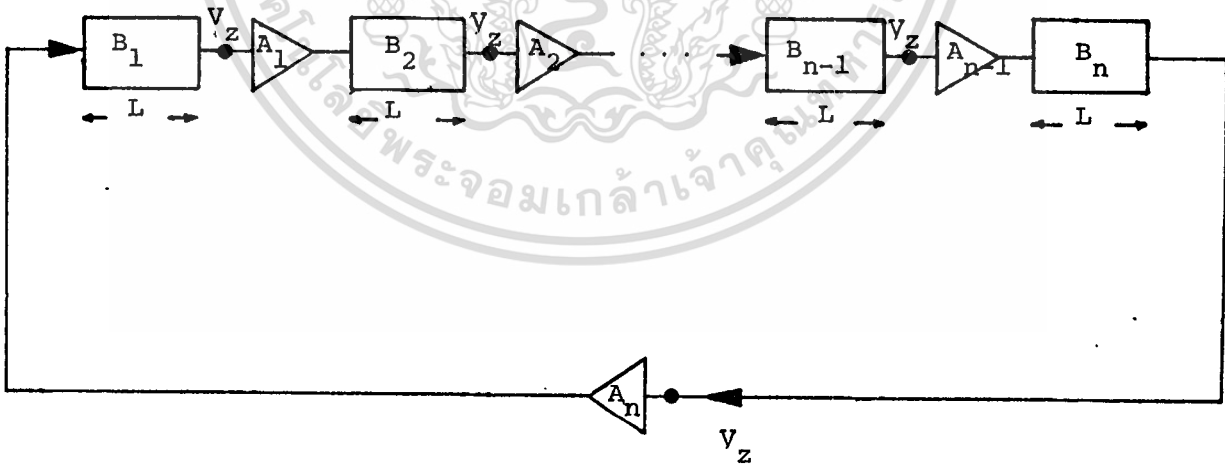
ในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ ๖

การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองโดยการสร้างวงจร DCO เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความเสถียรของวงจร ที่เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ การเปลี่ยนแปลงความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณนี้จะกระทำโดยการนำเอาอุปกรณ์ท่วงสัญญาณที่มีขนาดความยาวคงที่หลาย ๆ ตัวมาต่อเป็นอนุกรมกัน โดยจะมีบัฟเฟอร์แอมป์ไฟเออร์ (Buffer amplifiers) ต่อคั่นอยู่ระหว่างอุปกรณ์ท่วงสัญญาณแต่ละตัว ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๖.๑



รูปที่ ๖.๑ การนำเอาอุปกรณ์ท่วงสัญญาณมาต่อเป็นอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ในรูปที่ ๖.๑ จะแสดงถึงการนำเอาอุปกรณ์หนึ่งวงสัญญาณ n ตัว มาต่อเป็นอนุกรม โดยแต่ละตัวจะมีความยาวเป็น L และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการลดลงของความต่างศักย์ (Voltage attenuation coefficient) มีค่าเป็น $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ ตามลำดับ โดยบัฟเฟอร์แอมป์ที่ใช้จะมีกำลังขยายเป็น $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ ตามลำดับ ถ้ากำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดลงของความต่างศักย์ของอุปกรณ์หนึ่งวงสัญญาณแต่ละตัวมีค่าเท่ากันหมดเป็น B ดังนั้นจะได้ว่า

$$B_1 = B_2 = B_3 = \dots = B_n = B \quad (6.1)$$

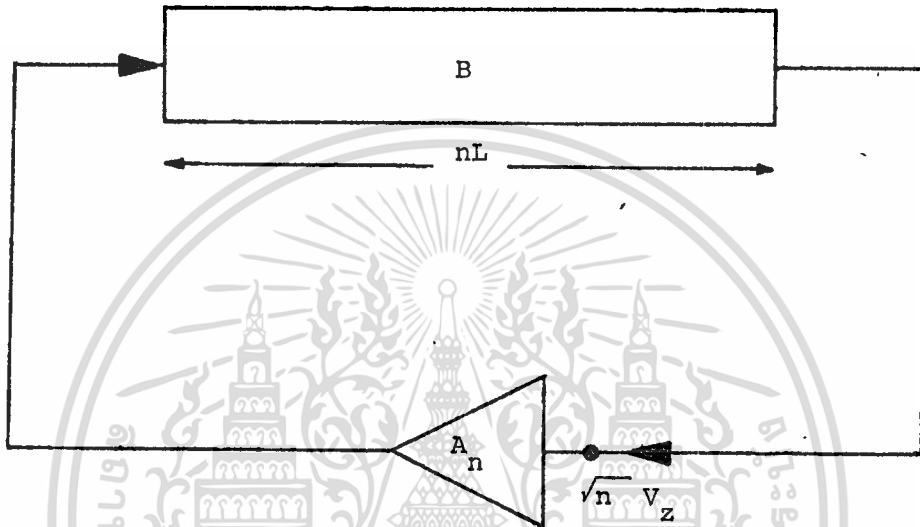
และความสัมพันธ์ของกำลังขยายของบัฟเฟอร์แอมป์กับค่าของ B จะเป็นไปดังสมการ

$$A_1 B_1 = A_2 B_2 = A_3 B_3 = \dots = A_{n-1} B_{n-1} = 1 \quad (6.2)$$

ค่าความต่างศักย์เสมือนของสัญญาณรบกวน (Equivalent noise voltage) ที่ภาครับของบัฟเฟอร์แอมป์แต่ละตัว จะสมมติให้มีค่าเท่า ๆ กัน เป็น v_z ดังนั้น จากสมการที่ (๖.๑) และ (๖.๒) จะเห็นได้ว่าค่าความต่างศักย์เสมือนของสัญญาณรบกวนทั้งหมด (Total equivalent noise voltage) ที่ภาครับของบัฟเฟอร์แอมป์ตัวที่ n จะมีค่าดังนี้ [๗]

$$v_{eq} = (n)^{\frac{1}{2}} \cdot v_z \quad (6.3)$$

บัฟเฟอร์แอมป์ตัวที่ n จะถูกกำหนดให้มีค่าการแกว่ง สูงสุดของความต่างศักย์ (Maximum voltage swing) ต่ำกว่าของตัวอื่น ๆ มาก ดังนั้นระดับกำลังของการสั่น (Oscillation power level) ของวงจร DCO จะถูกจำกัดโดยกำลังสูงสุด (Maximum output power) ของภาคขยายตัวที่ n ด้วยข้อกำหนดต่าง ๆ ข้างต้น วงจรในรูปที่ ๖.๑ สามารถเขียนเป็นวงจรเสมือนได้ดังนี้



๖.๒ วงจรเสมือนของรูปที่ ๖.๑

ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณที่มีความยาวเป็น nL โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการลดลงของความต่างศักย์ มีค่าเป็น B และกำลังขยายของภาคขยายมีค่าเป็น A_n โดยมีค่าความต่างศักย์เสมือนของสัญญาณรบกวนที่ภาครับของภาคขยายเป็นไปตามสมการที่ (๖.๓) จากวงจรเสมือนในรูปที่ ๖.๒ จะเห็นได้ว่า ในการเพิ่มความยาวของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการนำเอาอุปกรณ์หน่วงสัญญาณหลายตัวมาต่อเป็นอนุกรมกัน โดยมีบัพเฟอร์แอมป์ต่อคั่นอยู่ระหว่างอุปกรณ์หน่วงสัญญาณแต่ละตัว ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [๖]

๖.๑ การสร้างวงจรถ้าเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ

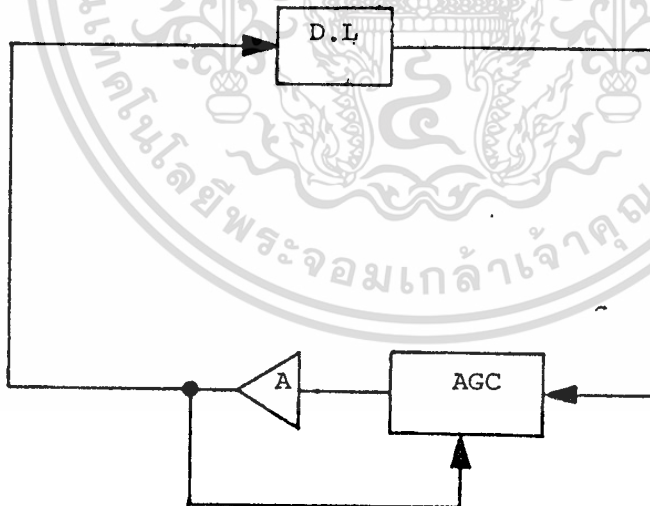
อุปกรณ์หน่วงสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลองนี้จะเป็นอุปกรณ์หน่วงสัญญาณแบบบัลค์ (Bulk acoustic wave delay-line) โดยจะมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ช่วงเวลาดำเนิน (Phase delay time) มีค่าเป็น $63.943 \pm 0.005 \mu\text{s}$

ช่วงกว้างของความถี่ (Band width) ที่ -3dB มีค่าเป็น ≤ 3.43 ถึง $\geq 5.23 \text{ MHz}$

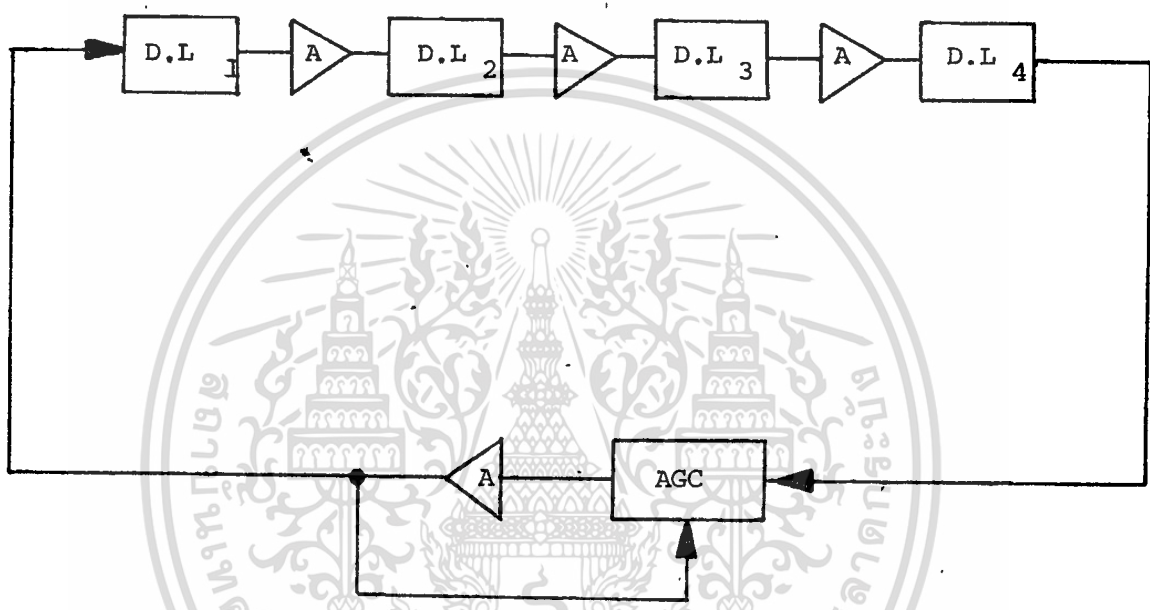
การสูญเสียภายใน (Insertion losses) มีค่าเป็น $8 \pm 3 \text{ dB}$

ความต่างศักย์สูงสุดของสัญญาณเข้า (Maximum input voltage p-p) มีค่าเป็น 15 V



รูปที่ ๖.๑.๑ วงจร DCO ที่มีอุปกรณ์หน่วงสัญญาณเพียงตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ ๖.๑.๒ วงจร DCO ที่มีอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ ๔ ตัว

ในรูปที่ ๖.๑.๑ จะแสดงถึงวงจร DCO ที่มีอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ (D,L) เพียงตัวเดียว โดยจะส่งผ่านสัญญาณมายังภาคขยาย (A) โดยจะมีวงจรควบคุมกำลังขยาย (Automatic gain controlled, AGC) เป็นตัวควบคุมกำลังขยายของภาคขยาย และในรูปที่ ๖.๑.๒ จะแสดงถึงวงจร DCO ที่มีอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ ๔ ตัว ต่อกันเป็นอนุกรม โดยมีฟีดแบ็คต่อกันอยู่ระหว่างอุปกรณ์หน่วงสัญญาณแต่ละตัว ซึ่งจะทำให้เหมือนกับว่าอุปกรณ์หน่วงสัญญาณของวงจร DCO ในรูปที่ ๖.๑.๒ มีความยาวมากกว่าอุปกรณ์หน่วงสัญญาณของวงจร DCO ในรูปที่ ๖.๑.๑ เป็น ๔ เท่านั่นเอง ซึ่งในการทดลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

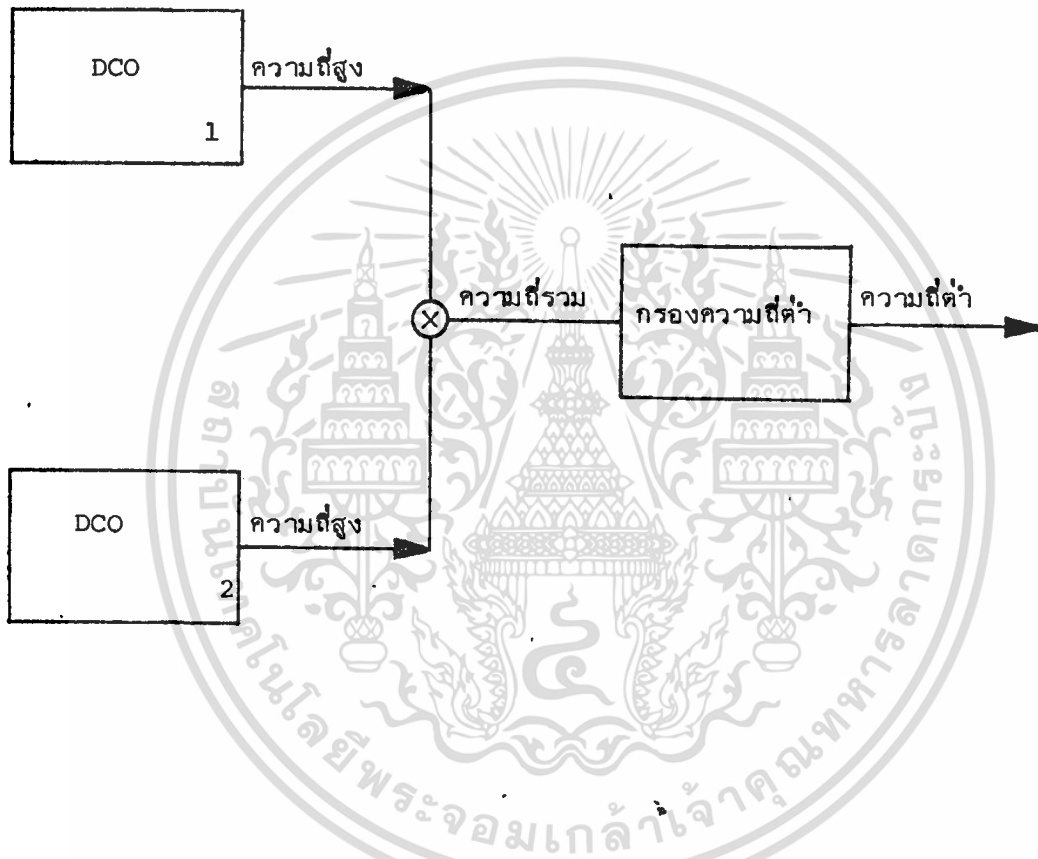
จริงนั้นได้มีการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ท่วงสัญญาณจาก ๑ เป็น ๒, ๓ และ ๔ ตามลำดับ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความเสถียรของวงจร DCO เมื่อเพิ่มความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ

และในระหว่างทำการทดลองนั้น สัญญาณที่ได้จากวงจร DCO ได้เกิดปรากฏการณ์ของการกระโดดข้ามโมดเกิดขึ้น ซึ่งเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้เนื่องมาจากทรานเซียน (Transient) ของการเปิดวงจรให้เริ่มทำงานนั่นเอง ดังนั้นจึงทำการป้องกันโดยการสร้างวงจรที่ใช้สำหรับท่วงระดับของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจร (Voltage supply) เพื่อไม่ให้ศักย์ไฟฟ้านี้เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเมื่อเปิดวงจรให้ทำงาน และโดยวิธีดังกล่าวนี้สามารถป้องกันการเกิดปรากฏการณ์การโดดข้ามโมดที่เกิดขึ้นได้

๖.๒ การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความถี่

การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ได้จากวงจร DCO ที่สร้างขึ้นนั้นจะทำได้ลำบาก เนื่องจากความถี่ของสัญญาณที่ได้รับนั้นมีค่าสูง ($\approx 4 \text{ MHz}$) และมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับต่ำ และการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่เกิดขึ้นนี้ จะเนื่องมาจากความเสถียรของวงจร DCO ใน ๒ ลักษณะ คือ ความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาปานกลาง ซึ่งเนื่องมาจากอุณหภูมิและความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาสั้นรวมกัน แต่ในการศึกษานี้จะสนใจเฉพาะความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาสั้นเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องกำจัดการเปลี่ยนแปลงของความถี่เนื่องจากอุณหภูมิออกไป

การวิเคราะห์จะทำได้โดยการสร้างวงจร DCO ขึ้น ๒ เครื่อง โดยให้มีลักษณะต่าง ๆ เหมือนกันทุกประการ เพื่อนำเอาความถี่ที่ได้รับจากทั้ง ๒ เครื่องมารวมกันโดยใช้วงจรรวมสัญญาณ (Mixer) แล้วจึงนำเอาสัญญาณที่รวมกันนี้มาผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass filter) เพื่อแยกเอาเฉพาะความถี่ต่ำที่เกิดขึ้น เนื่องจากผลต่างของความถี่ของสัญญาณที่ได้จากวงจร DCO ทั้ง ๒ เครื่องนั้น และจะทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความถี่จากสัญญาณความถี่ต่ำที่ได้นี้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่สังเกตได้ ก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่ของวงจร DCO ทั้งสองนั่นเอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๖.๒.๑



รูปที่ ๖.๒.๑ แผนผังในการใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความถี่

ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในการทดลองนี้จะสังเกตจากความถี่ที่ได้จากเครื่องนับความถี่ (Frequency counter) ซึ่งจะกำหนดให้มีอัตราเร็วในการนับ (Sampling rate) เป็น ๑ ครั้ง/วินาที และจะเก็บข้อมูลที่ได้ในแต่ละความยาวของอุปกรณ์หน่วยสัญญาณเป็นจำนวน ๔๐๐ ค่า และจากข้อมูลที่ได้นี้จะนำมาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งค่าที่ได้นี้ก็จะเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ของวงจร DCO ในแต่ละความยาวของอุปกรณ์หน่วยสัญญาณนั่นเอง

รูปของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ ๒ และวงจรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองก็ได้แสดงไว้ทั้งหมดในภาคผนวกที่ ๒
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๖.๓ ผลการทดลอง

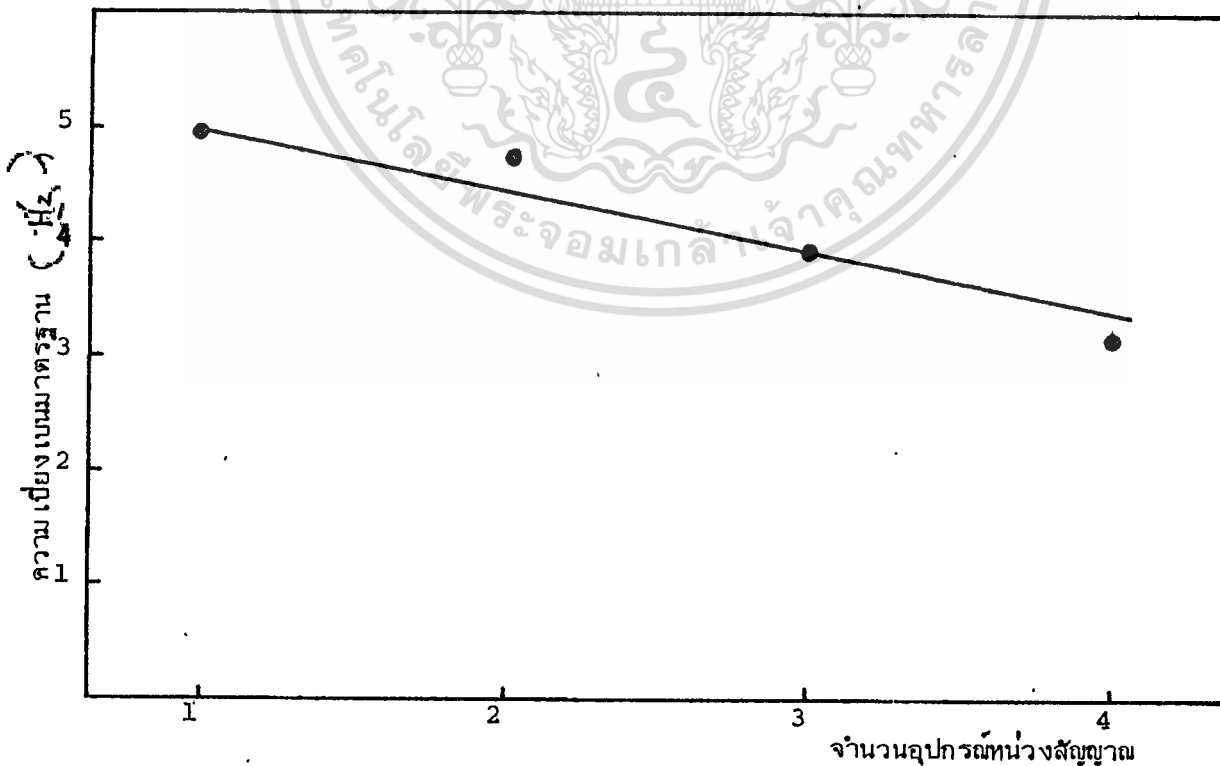
ในการทดลองได้ทำการทดลองซ้ำ ๔ ครั้ง ซึ่งผลการทดลองในแต่ละครั้งได้แสดงไว้ในตารางที่ ๖.๑, ๖.๒, ๖.๓ และ ๖.๔ และนำผลที่ได้นำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ ๖.๓.๑, ๖.๓.๒, ๖.๓.๓ และ ๖.๓.๔ ตามลำดับ ส่วนในตารางที่ ๖.๕ และกราฟรูปที่ ๖.๓.๕ นั้นจะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองทั้ง ๔ ครั้งรวมกัน

โดยในการทดลองแต่ละครั้งกำหนดให้ DCO ทั้งสองกำเนิดความถี่มีค่าเป็น 4.87 MHz



ตารางที่ ๖.๑

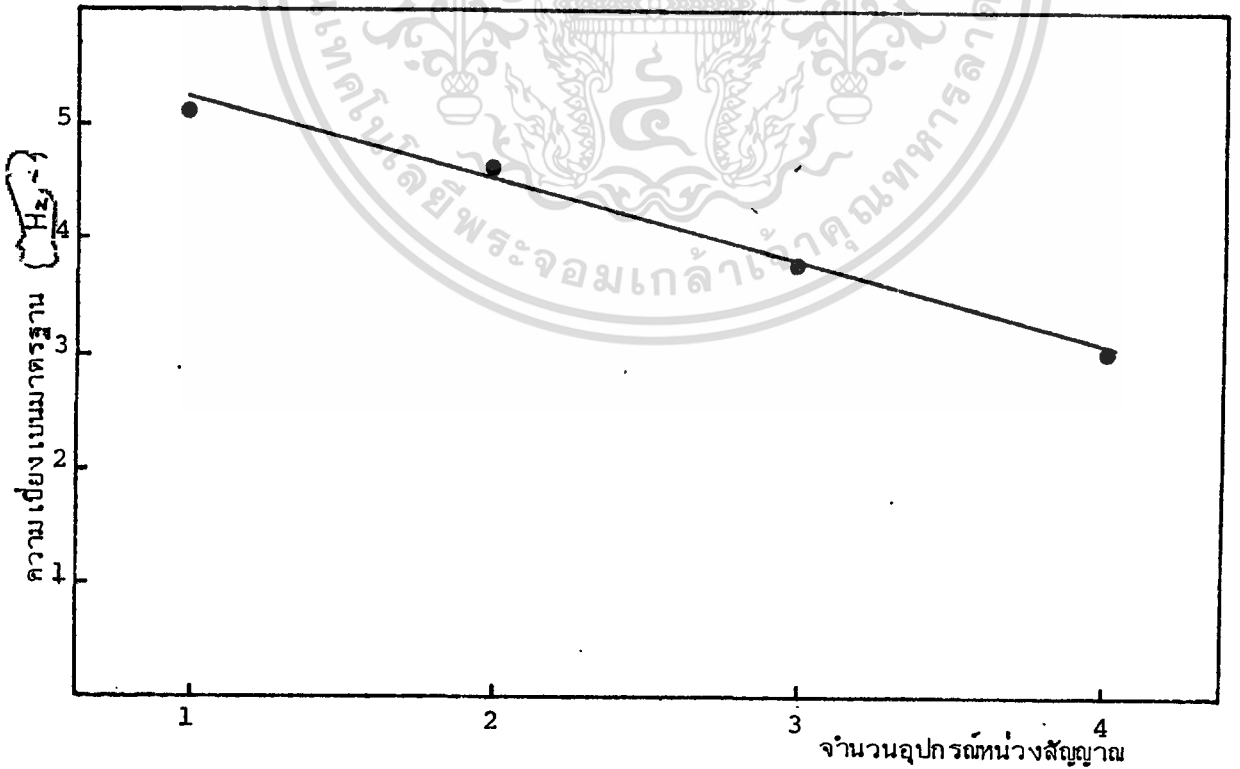
| จำนวนอุปกรณ์ห้องสัญญาณ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (H_2) |
|------------------------|-------------------------------|
| ๑ | ๔.๙๘๒ |
| ๒ | ๔.๗๗๗ |
| ๓ | ๓.๙๓๔ |
| ๔ | ๓.๑๒๘ |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ๖.๓.๑ กราฟของผลที่ได้จากการทดลอง ครั้งที่ ๑

ตารางที่ ๖.๒

| จำนวนอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Hz) |
|------------------------|----------------------------|
| ๑ | ๕.๑๒๔ |
| ๒ | ๔.๖๐๑ |
| ๓ | ๓.๗๒๖ |
| ๔ | ๓.๐๕๓ |

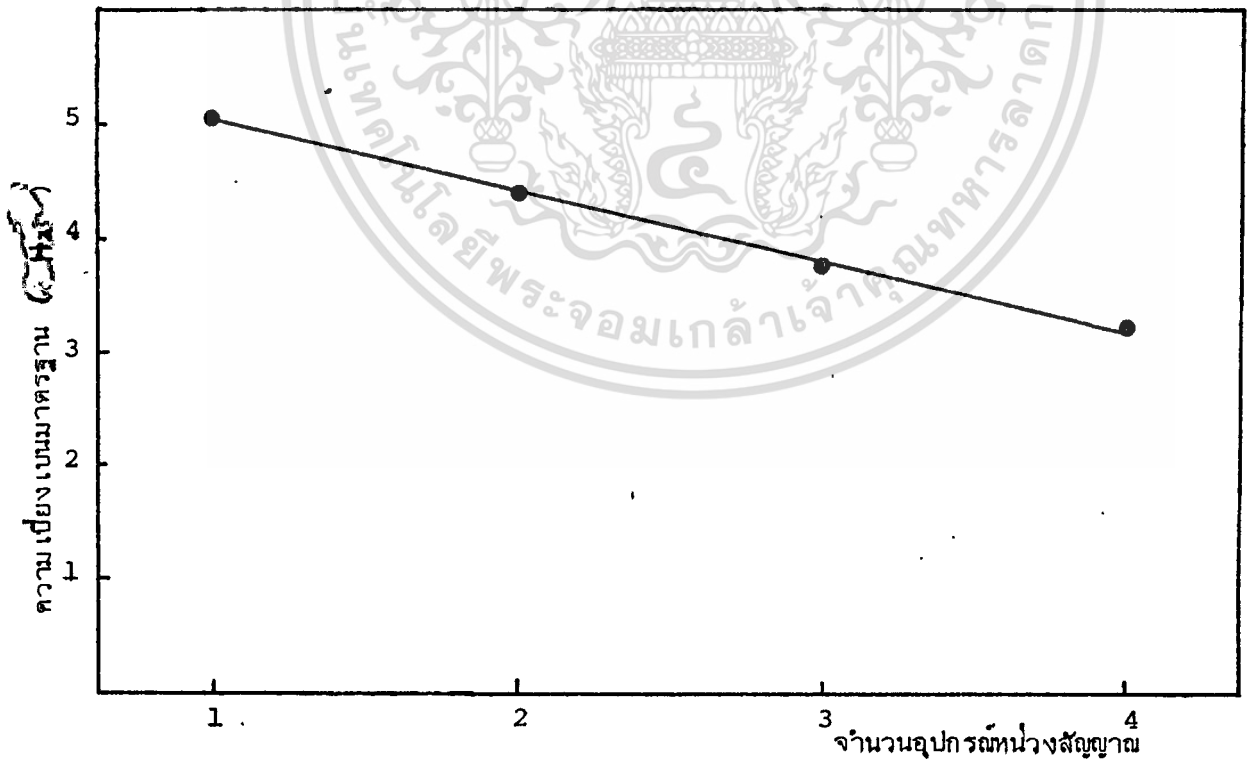


รูปที่ ๖.๓.๒ กราฟของผลการทดลองครั้งที่ ๒

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ๖.๓

| จำนวนอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Hz) |
|------------------------|-------------------------------------|
| ๑ | ๕.๐๓๗ |
| ๒ | ๔.๓๘๒ |
| ๓ | ๓.๘๑๗ |
| ๔ | ๓.๒๐๔ |

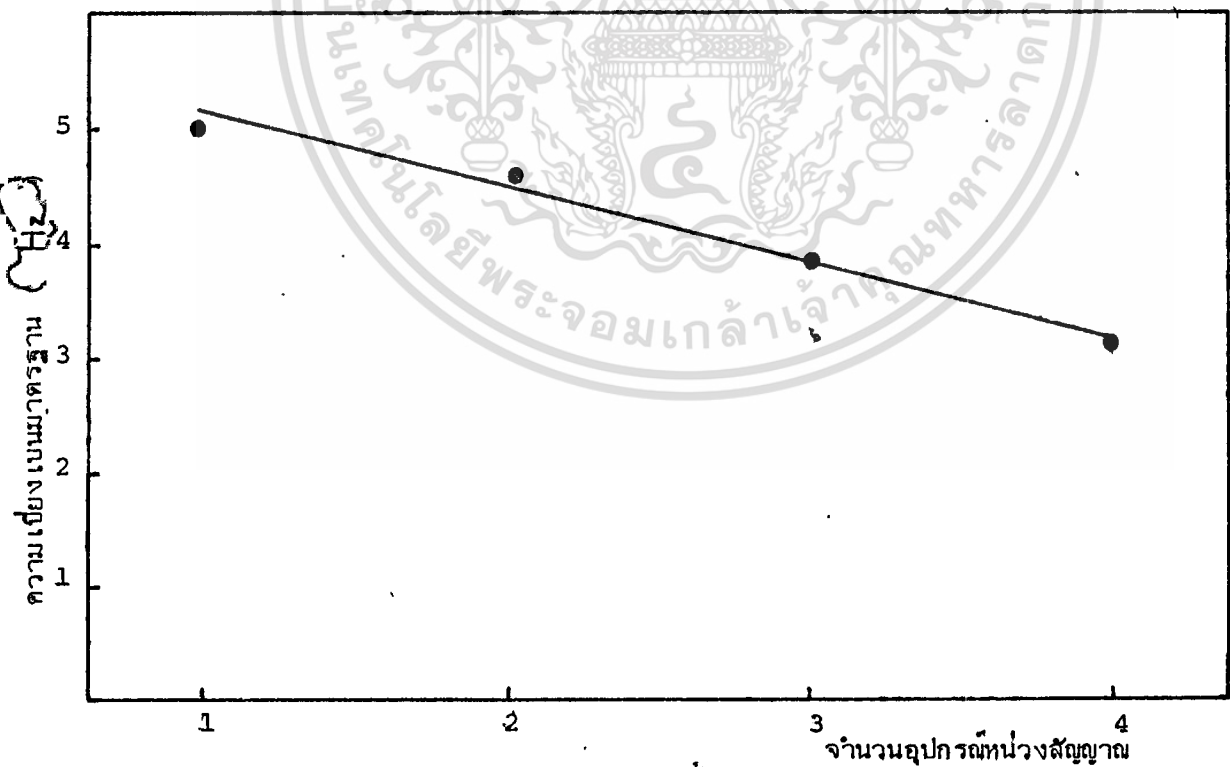


รูปที่ ๖.๓.๓ กราฟของผลการทดลองครั้งที่ ๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ๖.๔

| จำนวนอุปกรณ์หน่วยสัญญาณ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (H_z^{-1}) |
|-------------------------|------------------------------------|
| ๑ | ๔.๕๙๒ |
| ๒ | ๔.๕๘๔ |
| ๓ | ๓.๘๑๒ |
| ๔ | ๓.๑๔๗ |



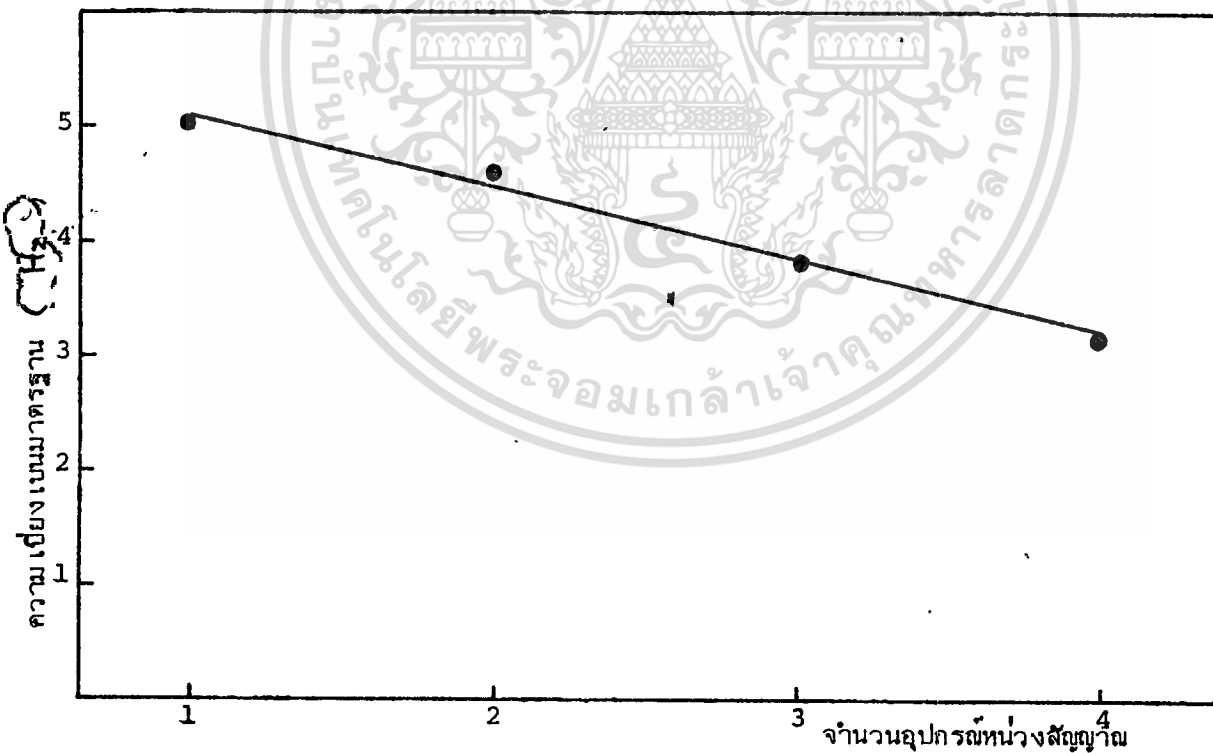
รูปที่ ๖.๓.๔ กราฟของผลการทดลองครั้งที่ ๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์จะถือเป็นของกองทัพอากาศ และผู้ว่าราชการจังหวัดเชียงใหม่ ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลที่ได้

ตารางที่ ๖.๕

| จำนวนอุปกรณ์ห้องสัญญาณ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_{H_2}) (ค่าเฉลี่ย) |
|------------------------|--|
| ๑ | ๕.๐๓๔ |
| ๒ | ๔.๕๘๘ |
| ๓ | ๓.๘๒๓ |
| ๔ | ๓.๑๓๓ |

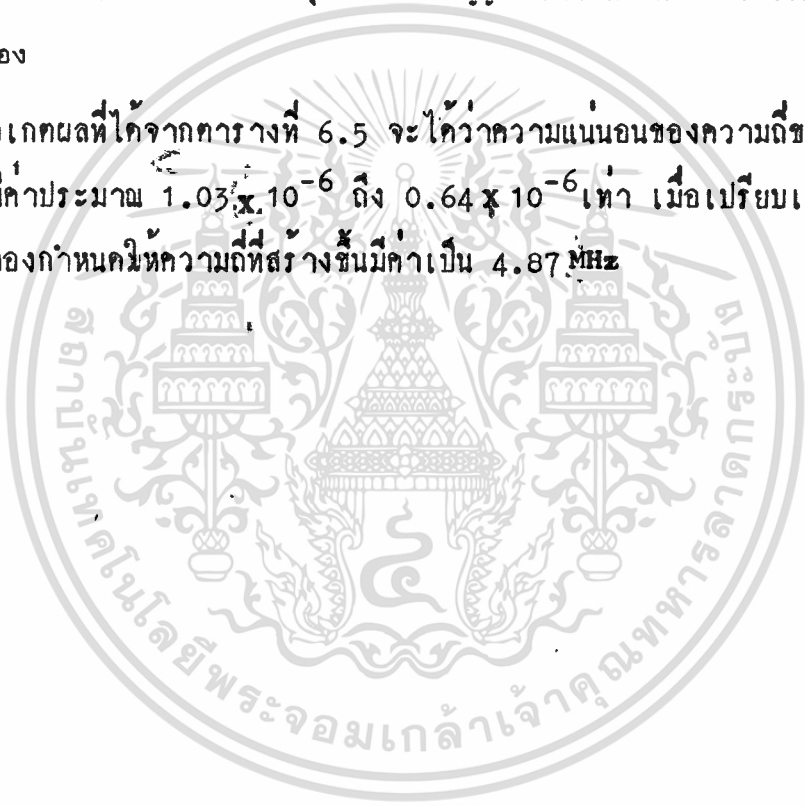


รูปที่ ๖.๓.๕ กราฟเฉลี่ยของผลการทดลองทั้ง ๔ ครั้ง

๖.๔ สรุปผล

จากข้อมูลในตารางที่ ๖.๑, ๖.๒, ๖.๓, ๖.๔ และ ๖.๕ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อจำนวนของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณที่ใช้ในวงจรเพิ่มขึ้น ก็จะมีผลทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ลดลงด้วย นั่นคือเมื่อมีการเพิ่มความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณ ก็เป็นการทำให้ความเสถียรของวงจร DCO เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ถ้าสังเกตผลที่ได้จากการวางที่ 6.5 จะได้ว่าความแน่นอนของความถี่ของ DCO ที่สร้างขึ้นนี้ จะมีค่าประมาณ 1.03×10^{-6} ถึง 0.64×10^{-6} เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับหนึ่ง โดยในการทดลองกำหนดความถี่ที่สร้างขึ้นมีค่าเป็น 4.87 MHz



บทที่ ๗

บทสรุป

การศึกษาความเสถียรของวงจร DCO ในที่นี้จะทำการศึกษาเฉพาะความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาสั้นเท่านั้น ซึ่งจากทฤษฎีต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า ความเสถียรของความถี่มีความสัมพันธ์กับความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณที่ใช้อยู่ในวงจร DCO นั้น โดยจะเห็นได้จากสมการที่ (๔.๓.๘) ดังนี้

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อ L มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ Q มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือเมื่อเพิ่มความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณก็จะมีผลทำให้ความเสถียรของความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยนั่นเอง

การวิเคราะห์โดยการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ที่กล่าวไว้ ในบทที่ ๕ นั้น โดยหลักการแล้วสามารถทำได้แต่มีปัญหาเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มากเกินไป ซึ่งเป็นผลเนื่องจากจำนวนรอบในการคำนวณวนกลับ ไปกลับมา เพื่อให้สัญญาณที่ได้ออยู่ในสภาวะคงที่นั่นเอง จึงเป็นเหตุทำให้ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการวิเคราะห์

ส่วนการทดลองโดยใช้วงจรที่สร้างขึ้นโดยการนำเอาอุปกรณ์ท่วงสัญญาณหลาย ๆ ตัวมาต่อกันเป็นอนุกรมโดยมีบัฟเฟอร์แอมป์ต่อกันอยู่ระหว่างอุปกรณ์ท่วงสัญญาณแต่ละตัว เพื่อให้ทำหน้าที่เสมือนกับเป็นอุปกรณ์ท่วงสัญญาณตัวเดียวที่มีความยาวเพิ่มขึ้นนั้น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความถี่ทำโดยการนำเอาสัญญาณความถี่สูงจากวงจร DCO ๒ เครื่อง ที่สร้างขึ้นให้มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ มารวมกันและแยกเอาเฉพาะสัญญาณความถี่ต่ำที่เกิดขึ้น เนื่องจากผลต่างของสัญญาณความถี่สูงทั้งสองโดยผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และสังเกตการเปลี่ยนแปลงความถี่ของวงจร DCO ได้จากสัญญาณความถี่ต่ำที่ได้นั่นเอง ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ ๖.๑ ถึง ๖.๕ และในกราฟรูปที่ ๖.๓.๑ ถึง ๖.๓.๕ นั้นได้เป็นการยืนยันทฤษฎีของความเสถียรของวงจร DCO ที่ว่า เมื่อความยาวของอุปกรณ์ท่วงสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะมีผลทำให้ความเสถียรของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นจะสามารถสรุปได้จากทางทฤษฎีและจากการทดลองได้ว่า เมื่อต้องการให้วงจร DCO มีความเสถียรของความเร็วที่เพิ่มขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มความยาวของอุปกรณ์หน่วยสัญญาณที่ประกอบอยู่ในวงจรนั้นเอง



บทความและหนังสืออ้างอิง

- [1] M.W. Lawrence, "Surface-Elastic-Wave Delay-line Oscillators", AWA. Tech. Rev., Vol.15, no.2, pp 67-76, 1973.
- [2] M.F. Lewis, "Surface-Acoustic Wave Devices and Applications, 6. Oscillators The next successful surface acoustic wave devices?", Ultrasonics, vol. 12, pp 115-123, 1974.
- [3] R.M. White, "Surface Elastic Waves", Proc. IEEE, vol. 58, no.8, pp1238-1276, Aug. 1970
- [4] R.M. White, "Topic in Solid State and Quantum Electronics, High-Frequency Ultrasonic Devices", pp 187-223, John Wiley & Sons. Inc.
- [5] R.W. Hamming, "Numerical Methods for Scientists and Engineers", pp 437-441, Mc. Graw-Hill Kogakusha, LTD., 1973.
- [6] S. Pookaiyudom, "Device Applications of Surface Acoustic Waves, Surface Acoustic Wave Delay Line Controlled Oscillators", Ph.D. Thesis, University of N.S.W., pp 423-461, 1975.
- [7] S. Pookaiyudom and C. Surawatpanya, "Optimum Short -term Frequency Stability Improvement in Multi-Delay line Surface-Acoustic-Wave Oscillators", IEEE Trans. Instrum.Meas., vol. IM27, no.1, pp 86-89, Mar. 1978.

ภาคผนวกที่ ๑

คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ในบทที่ ๔

เมนโปรแกรม (Main program)

```
1๐ OPTION BASE 1
2๐ FIXED 1๐
3๐ COM Vc(12๐๐), Yr(2), Ar(2), Xr(2), Dr(2) Vr, Num, G
4๐ DIM V(51)
5๐ PRINTER IS ๐
6๐ ! * * * * *
7๐ ! Num = NUMBER OF DATA.
8๐ ! Kfin = NUMBER OF TRANSMISSION PAIR.
9๐ ! Kfic = NUMBER OF COLLECTION PAIR.
1๐๐ ! Nsec = SECTIONS OF DELAY LINE.
11๐ ! Am = CONSTANT FOR AMPLIFIER.
12๐ ! G = ORDER OF AMPLITUDE OF NOISE.
13๐ ! * * * * *
14๐ Num = 12๐๐
15๐ Kfin = 1
16๐ Kfic = 2
17๐ Nsec = 51
18๐ Am = ๐.51
19๐ G = ๐.๐๐๐๐๐1
2๐๐ !SET CONSTANTS FOR SUB-PROGRAM "Rand"
21๐ Yr(1) = 1๐73741824
```

```

220 Ar(1) = 32763
230 Xr(1) = 89745369
240 Dr(1) = 0.498735643
250 Yr(2) = 2189437605
260 Ar(2) = 30657
270 Xr(2) = 74586031
280 Dr(2) = 0.513287463
290 !
300 Kficg = Kfic * 10
310 Kfing = Kfin * 10
320 Nsee = Nsec + 10
330 Nscc = Nsec + 1
340 Nss = Nsec - Kfing + 9
350 !SET INITIAL CONSTANTS
360 FORI = 1 TO Nsec
370 V(I) = 0
380 NEXT I
390 N = 0
400 Nz = 1
410 CALCULATION SECTION
420 FOR Jm = 1 TO Num
430 N = N + 1
440 Vc(Jm) = 0
450 !CALCULATE OUTPUT
460 FOR L = 10 TO Kficg STEP 10

```

```

47Ø Vc(Jm) = Vc(Jm) + V(Nsec - L)
48Ø NEXT L
49Ø Nz = -Nz
50Ø ! AMPLIFIER SECTION
51Ø CALL Rand
52Ø Vin = Vc(Jm) + (Vr*Nz)
53Ø Vo = Am* (EXP(Vin)-EXP(-Vin))/(EXP(Vin) + EXP(-Vin))
54Ø ! CALCULATE SIGNAL IN DELAY LINE
55Ø FOR L = 1 TO Nss
56Ø Je = Nssc - L
57Ø V(Je) = V(Je+1)
58Ø NEXT L
59Ø V(1) = Vo
60Ø NEXT Jm
61Ø LO = N/Nsec
62Ø PRINT "END LOOP = "; Lo
63Ø PRINT N
64Ø PRINT "*" * 20
65Ø PRINT "*" * 20
66Ø PRINT LIN(5)
67Ø PRINT "TRANSMISSION FINGER = "; Kfin
68Ø PRINT "COLLECTION FINGER ="; Kfic
69Ø PRINT "DELAY LINE SECTION ="; Nsec
70Ø PRINT "AMPLIFIER GAIN ="; Am
71Ø PRINT "NOISE AMPLITUDE ="; G
72Ø PRINT LIN(2)

```

```
730 FOR I = 1 TO Num STEP 5
740 PRINT Vc(I);Vc(I + 1);Vc(I + 2);Vc(I + 3);Vc(I + 4)
750 NEXT i
760 PAUSE
770 ! IF THE SIGNAL IS STABLE - CONTINUE-
780 ! IF NOT - GOTO 420
790 CALL Nplot
800 PAUSE
810 CALL Nfit
820 END
```



โปรแกรมย่อย (Sub-program)

โปรแกรมที่ใช้สร้างสัญญาณรบกวนระดับต่ำ

```

83Ø SUB Rand
84Ø OPTION BASE 1
85Ø COM Yr(2),Ar(2),Xr(2),Dr(2),Vr,G
86Ø DIM E(2),F(2)
87Ø FOR I = 1 TO 2
88Ø T = Ar(I) * Xr(I)
89Ø Z = T/Yr(I)
90Ø IZ = Z
91Ø Q = IZ
92Ø F(I) = Z - Q
93Ø E(I) = F(I) - Dr(I)
94Ø Xr(I) = F(I) * 100000000
95Ø NEXT I
96Ø Vr = (ABS(E(1) - E(2))) * G
97Ø SUBEND

```

โปรแกรมที่ใช้ในการเขียนรูปของสัญญาณที่ได้รับจาก เมนโปรแกรม

```

98Ø SUB Nplot
99Ø OPTION BASE 1
1ØØØ COM Vc(12ØØ), Num
1Ø1Ø DIM Ib $(61), Ia(1ØØ).
1Ø2Ø FOR I = 1 TO 1ØØ
1Ø3Ø A = Vc(I) * 1ØØ
1Ø4Ø J = A
1Ø5Ø IF A - J <= .5 THEN 2ØØØ
1Ø6Ø Ia(I)=J + 32
1Ø7Ø GOTO 1Ø9Ø
1Ø8Ø Ia(I)=J + 31
1Ø9Ø NEXT I
11ØØ PRINT "-0.3";TAB(11);"-0.2";TAB(21),"-0.1";TAB(32), "0.0";
TAB(42), "0.1";TAB(52), "0.2";TAB(62), "0.3"
111Ø PRINT TAB(3), "-----+-----+-----+-----+-----+
-----+-----+-----+-----+-----"
112Ø FOR L = 1 TO 1ØØ
113Ø FOR I = 1 TO 61
114Ø Ib$(1) = " "
115Ø Ib$(31) = " + "
116Ø Ib$(Ia(L)) = " . "
117Ø NEXT I
118Ø IMAGE #, 2X,A
119Ø IMAGE #, A

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ข้อมูลใดๆในเอกสารนี้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางออกของเอกสารนี้

121Ø PRINT USING 118Ø; Ib\$(1)

122Ø PRINT USING 119Ø; Ib\$(2), Ib\$(3), Ib\$(4), Ib\$(5), Ib\$(6), Ib\$(7),
Ib\$(8), Ib\$(9), Ib\$(10), Ib\$(11)

123Ø PRINT USING 119Ø; Ib\$(12), Ib\$(13), Ib\$(14), Ib\$(15), Ib\$(16), Ib\$(17),
Ib\$(18), Ib\$(19), Ib\$(20), Ib\$(21)

124Ø PRINT USING 119Ø; Ib\$(22), Ib\$(23), Ib\$(24), Ib\$(25), Ib\$(26), Ib\$(27),
Ib\$(28), Ib\$(29), Ib\$(30), Ib\$(31)

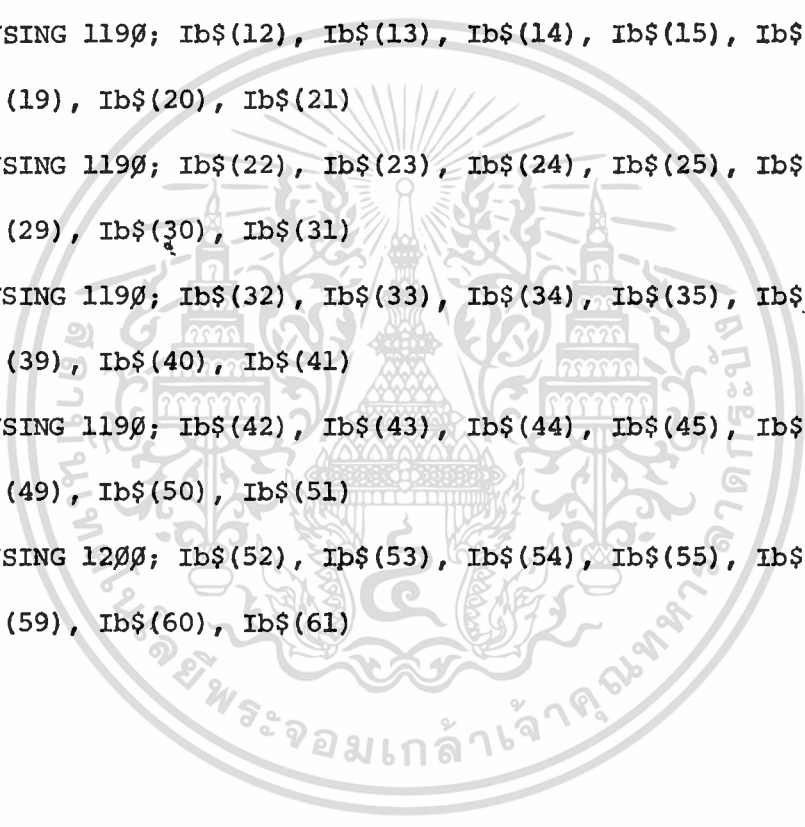
125Ø PRINT USING 119Ø; Ib\$(32), Ib\$(33), Ib\$(34), Ib\$(35), Ib\$(36), Ib\$(37),
Ib\$(38), Ib\$(39), Ib\$(40), Ib\$(41)

126Ø PRINT USING 119Ø; Ib\$(42), Ib\$(43), Ib\$(44), Ib\$(45), Ib\$(46), Ib\$(47),
Ib\$(48), Ib\$(49), Ib\$(50), Ib\$(51)

127Ø PRINT USING 12ØØ; Ib\$(52), Ib\$(53), Ib\$(54), Ib\$(55), Ib\$(56), Ib\$(57),
Ib\$(58), Ib\$(59), Ib\$(60), Ib\$(61)

128Ø NEXT L

129Ø SUBEND



โปรแกรมหาความยาวคลื่นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

```
1300 SUB Nfit
1310 OPTION BASE 1
1320 COM Vc(1200), Num
1330 DIM R(1000), M(200), X(20), Xint(201), Leng(200)
1340 J = 0
1350 FOR I = 2 TO Num - 1
1360 L = I - 1
1370 IF Vc(L) - Vc(I) > 0 THEN 1410
1380 J = J + 1
1390 R(J) = Vc(I)
1400 GOTO 1440
1410 IF Vc(I) - Vc(I + 1) > 0 THEN 1440
1420 J = J + 1
1430 R(J) = Vc(I)
1440 NEXT I
1450 FOR K = 1 TO 200
1460 M(K) = 1
1470 NEXT K
1480 K = 1
1490 FOR I = 2 TO J
1500 L = I - 1
1510 IF R(L) - R(I) > 0 THEN 1540
1520 M(K) = M(K) + 1
```

```

154Ø K = K + 1
155Ø NEXT I
156Ø FOR I = 1 TO 2Ø
157Ø X(I) = I
158Ø NEXT I
159Ø N = M(1)
160Ø FOR L = 2 TO K
161Ø E = Ø
162Ø F = Ø
163Ø G = Ø
164Ø H = Ø
165Ø O = Ø
166Ø P = Ø
167Ø Q = Ø
168Ø U = Ø
169Ø S = Ø
170Ø T = Ø
171Ø FOR I = 1 TO M(L)
172Ø N = N + 1
173Ø E = E + X(I)
174Ø F = F + X(I) ^ 2
175Ø G = G + X(I) ^ 3
176Ø H = H + X(I) ^ 4
177Ø O = O + X(I) ^ 5
178Ø P = P + X(I) ^ 6

```

179Ø Q = O + R(N)

181Ø S = S + X(I) ^ 2 * R(N)

182Ø T = T + X(I) ^ 3 * R(N)

183Ø NEXT I

184Ø Eh = E * H - F * G

185Ø Ee = E * E - F * M

186Ø Eg = E * G - F * F

187Ø Ef = E * F - G * M

188Ø Et = E * T - G * U

189Ø Eq = E * Q - M * U

190Ø Eo = E * O - G * G

191Ø Es = E * S - F * U

192Ø Eu = E * G - M * U

193Ø Ep = E * P - G * H

194Ø Em = E * G - H * M

195Ø Ex = E * O - F * H

196Ø D = ((Eh * Ee - Eg * Ef) * (Et * Ee - Eh * Eq) - (Eo * Ee - Eh * Ef) * (Es * Ee - Eg * Eu)) / ((Eh * Ee - Eg * Ef) * (Ep * Ee - Eh * Em) - (Eo * Ee - Eh * Ef) * (Ex * Ee - Eg * Em))

197Ø C = (es * Ee - Eg * Eu) - Ex * Ee - Eg * Em * D) / (Eh * Ee - Eg * Ef)

198Ø B = (Eq - Ef * C - Em * D) / Ee

199Ø A = (U - B * F - C * G - D * H) / E

200ØØ Xint (L) = 2

201ØØ Rn = Ø

202ØØ Ye = A + B * Xint (L) + C * Xint (L) ^ 2 + D * Xint (L) ^ 3

203ØØ IF Ye < 0 THEN 214Ø

204ØØ FOR I = 1 TO 1Ø

205ØØ Xint (L) = Xint (L) - Rn

```

2060 Rn = 10 ^ (-I)
2070 Xint (L) = Xint (L) + Rn
2080 Ye = A + B * Xint (L) + C * Xint (L) ^ 2 + D * Xint (L) ^ 3
2090 PRINT Xint (L), Ye
2100 IF Ye < 0 THEN 2120
2110 GOTO 2070
2120 NEXT I
2130 GOTO 2230
2140 FOR I = 1 TO 10
2150 Xint (L) = Xint (L) - Rn
2160 Rn = 10 ^ (-I)
2170 Xint (L) = Xint (L) + Rn
2180 Ye = A + B * Xint (L) + C * Xint (L) ^ 2 + D * Xint (L) ^ 3
2190 PRINT Xint (L), Ye
2200 IF Ye > 0 THEN 2220
2210 GOTO 2170
2220 NEXT I
2230 NEXT L
2240 FOR I = 2 TO K - 1
2250 Leng (I) = Xint (I + 1) - Xint (I) + 10
2260 NEXT I
2270 Sum = 0
2280 FOR I = 2 TO K - 1
2290 Sum = Sum + Leng (I)
2300 NEXT I

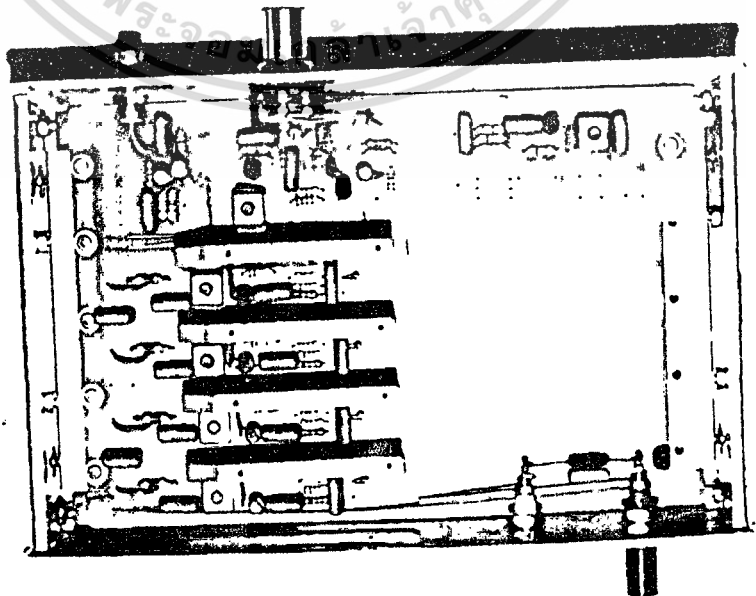
```

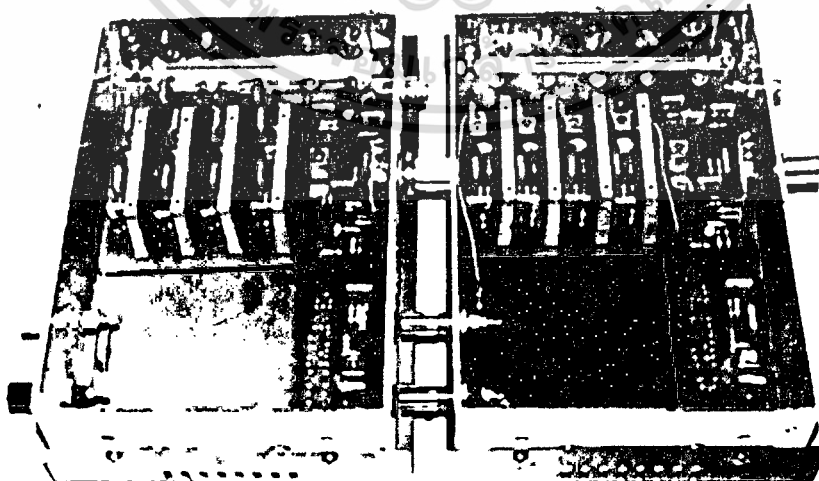
๒310 Mean = Sum/K - 3

ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาคผนวกที่ ๒

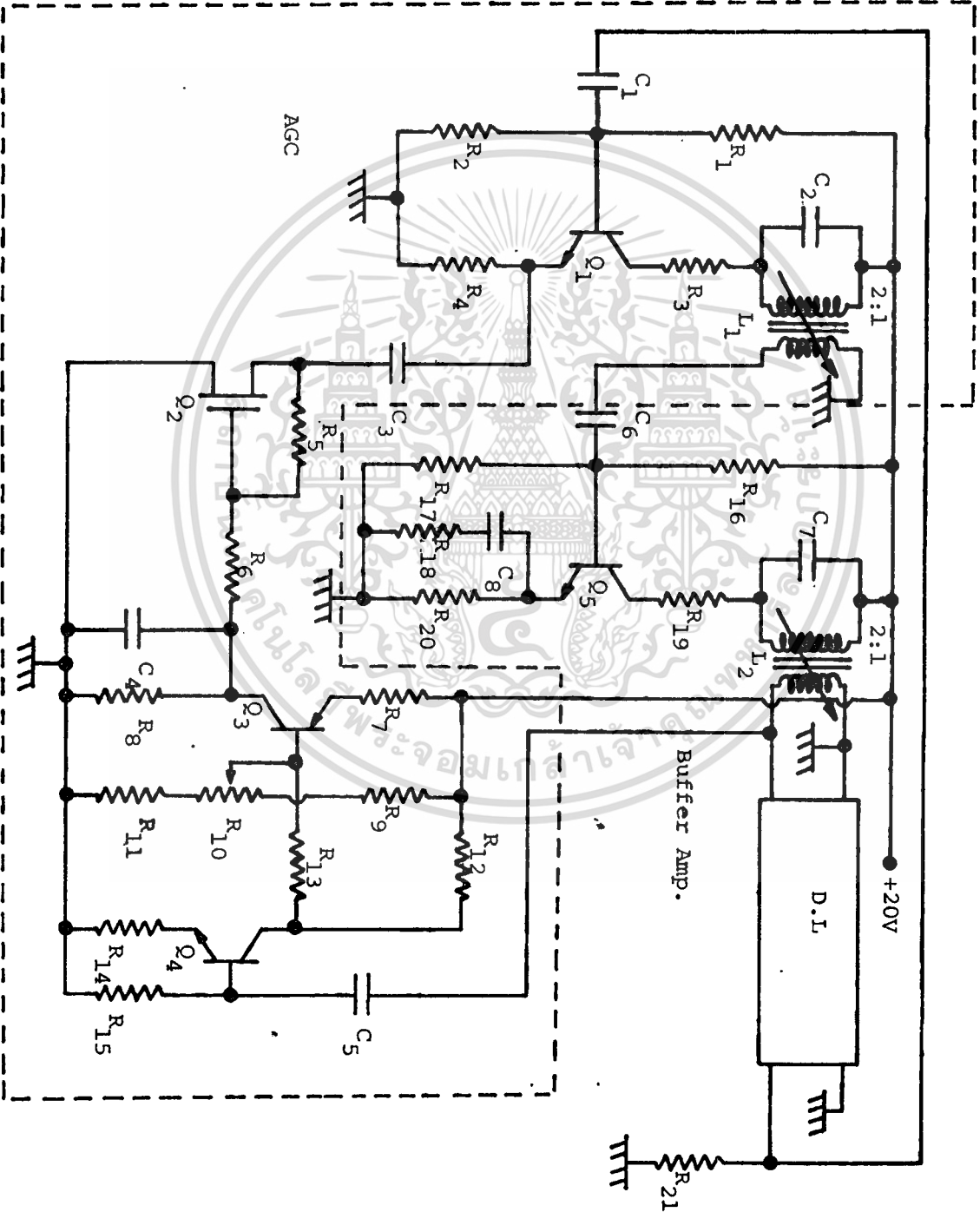
รูปอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้นใช้ในการทดลอง ในบทที่ ๖



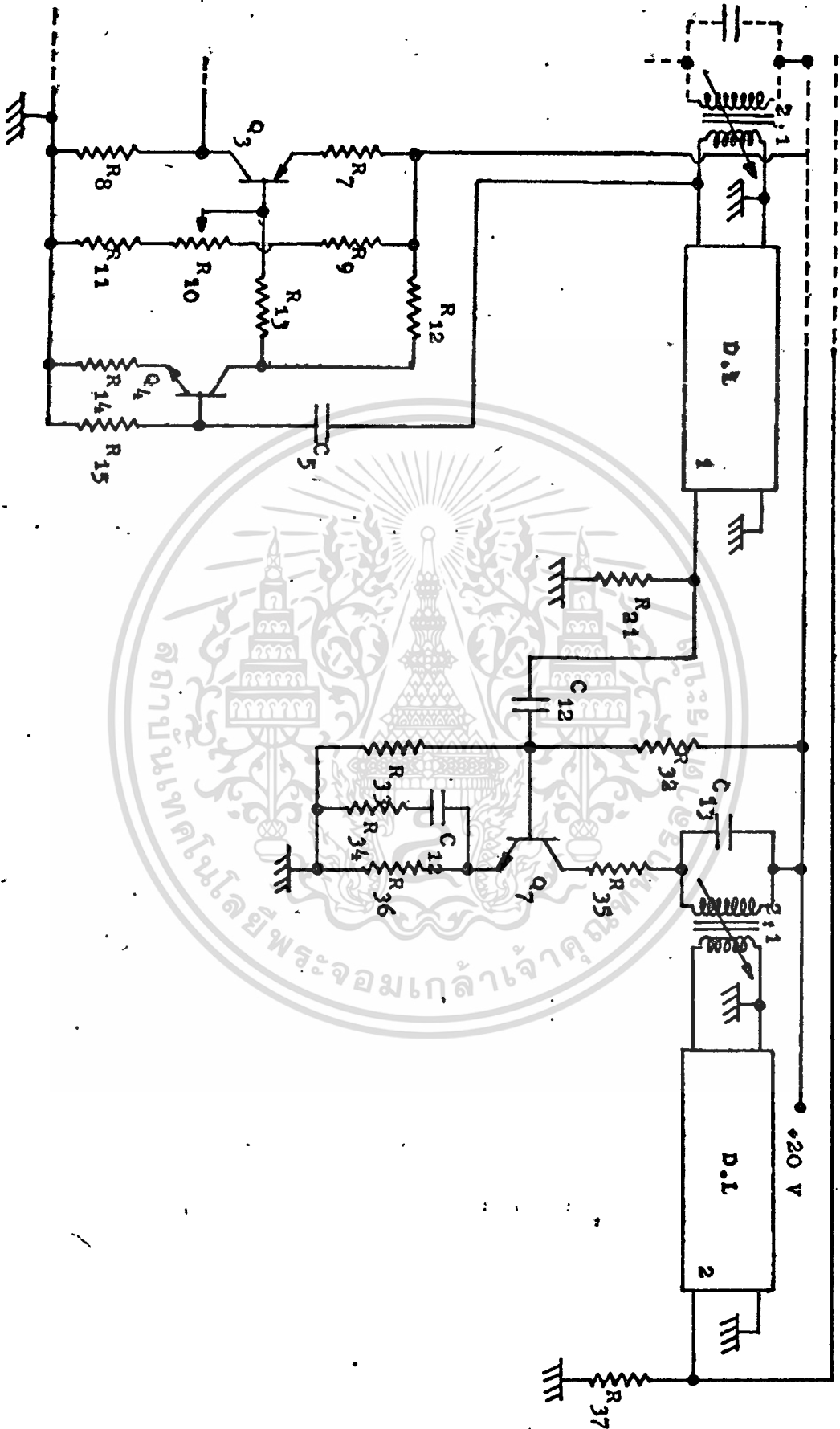


ภาคผนวกที่ ๓

วงจรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองในบทที่ ๖

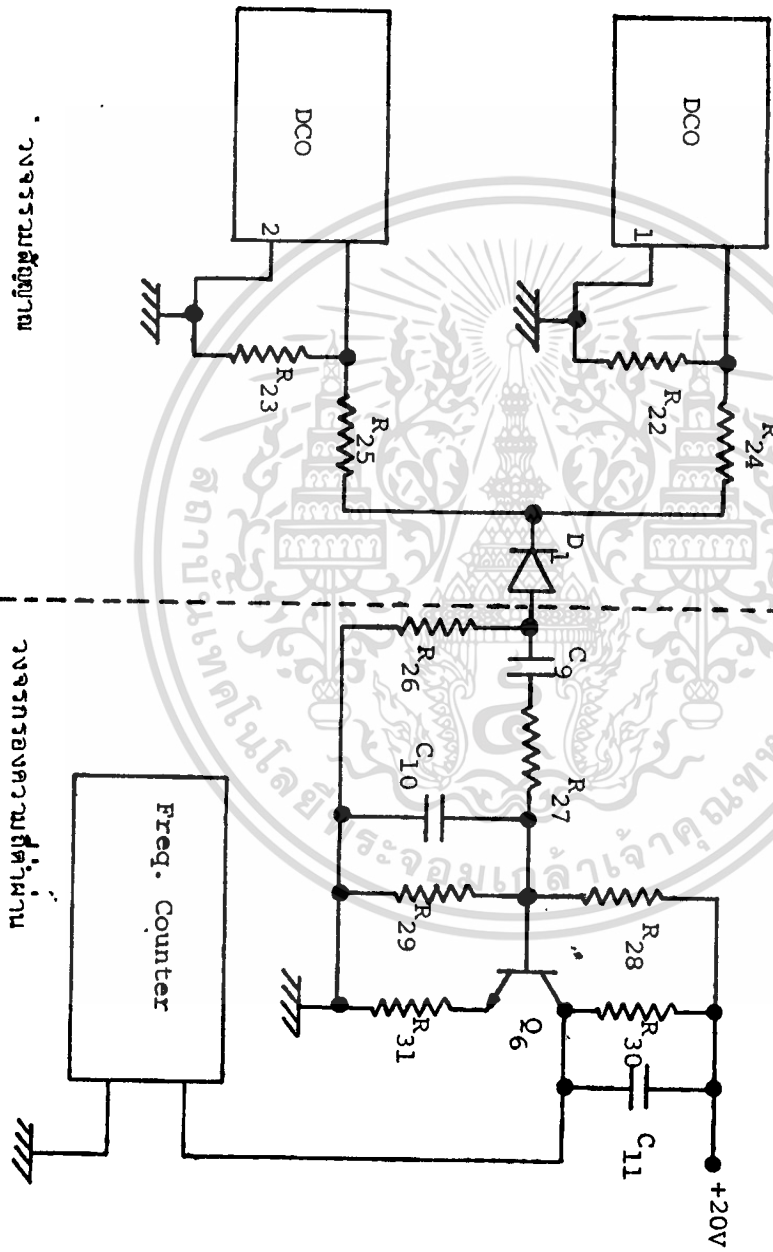


วงจร DCO ที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ทางอื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

วงจรที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความถี่



วงจรรวมสัญญาณ

วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

Freq. Counter

รายละเอียดของวงจร

| | | | |
|---------------------------------------|----------------|-----------------------------------|-------------|
| R_1 | = 15K | $C_1, C_3, C_4, C_6, C_8, C_{12}$ | = 0.1μ |
| $R_2, R_4, R_{13}, R_{27}, R_{30}$ | = 5.6K | C_2, C_7, C_{13} | = 450p |
| $R_3, R_{18}, R_{19}, R_{34}, R_{35}$ | = 100 Ω | C_5 | = 68p |
| R_5, R_{28} | = 120K | C_9 | = 1μ |
| R_6 | = 20K | C_{10}, C_{11} | = 820p |
| R_7 | = 270 Ω | | |
| R_8, R_{12} | = 1K | | |
| $R_9, R_{11}, R_{16}, R_{32}$ | = 10K | Q_1, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7 | = 2SC387 |
| R_{10} | = 100K | Q_2 | = 2N3820 |
| R_{14} | = 300 Ω | Q_3 | = 2N3905 |
| R_{15} | = 2K | | |
| R_{17}, R_{33} | = 6.8K | D_1 | = 1N4148 |
| R_{20}, R_{36} | = 200 Ω | | |
| R_{21}, R_{37} | = 270 Ω | | |
| $R_{22}, R_{23}, R_{24}, R_{25}$ | = 1.8K | | |
| R_{26} | = 3.3K | | |
| R_{29} | = 30K | | |
| R_{31} | = 1.2K | | |