

การออกแบบวงจรโครงข่ายแบบผ่านทั้งหมดในโหมดกระแสชนิด  
ปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน

A DESIGN OF CAPACITOR-GROUNDED CURRENT-TUNABLE  
CURRENT MODE ALL-PASS NETWORK

ศาสตราจารย์ สัมปตธรรม นิช  
PASSARON SAMPATTAVANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2003-EN-M-010-014

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การออกแบบวงจรโครงข่ายแบบผ่านทั้งหมดในโหมดกระแสชนิด  
ปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน**

**A DESIGN OF CAPACITOR- GROUNDED CURRENT-TUNABLE  
CURRENT MODE ALL - PASS NETWORK**



**ภาสธรณ สัมปตตะวานิช**

**PASSARON SAMPATTAVANICH**

เลขที่.....  
เลขทะเบียน.....**82900**  
วัน,เดือน,ปี.....**25 ก.ค. 2551**



**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม**

**บัณฑิตวิทยาลัย**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ.2551**

**KMITL-2008-EN-M-010-314**

**A DESIGN OF CAPACITOR– GROUNDED CURRENT–TUNABLE  
CURRENT MODE ALL – PASS NETWORK**

**PASSARON SAMPATTAVANICH**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-010-314**

**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การออกแบบวงจร โครงข่ายแบบผ่านทั้งหมดใน โหมดกระแส<br>ชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน |
| นักศึกษา                    | นายภาสกรณ สัมปัดตะวานิช   |
| รหัสประจำตัว                | 46061212  |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมโทรคมนาคม   |
| พ.ศ.                        | 2551  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ. ดร. กอบชัย เดชหาญ   |

#### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอส่วนของวงจรแบบผ่านทั้งหมดลำดับที่ 1 ในโหมดกระแส (CM-APS) ที่มีการใช้ วงจรสายพานกระแส 2 (CCCII) และใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน ซึ่งในส่วนของโหมดกระแสลำดับที่ 1 นั้นประกอบด้วย หนึ่งเอาต์พุตเดี่ยว CCCII หนึ่งเอาต์พุตคู่ CCCII และหนึ่งตัวเก็บประจุซึ่งต่อลงดิน วงจรมีรูปแบบการทำงานในโหมดกระแส และใช้งานในระบบวงจรโมโนลิติกได้โดยตรง โดยเลือกใช้ Pspice พิสูจน์ผลลัพธ์ตามทฤษฎี

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Thesis Title</b>   | A Design of Capacitor–Grounded Current–Tunable Current Mode<br>All – Pass Network |
| <b>Student</b>        | Mr. Passaron Sampattavanich   |
| <b>Student ID.</b>    | 46061212  |
| <b>Degree</b>         | Master of Engineering   |
| <b>Program</b>        | Telecommunication Engineering   |
| <b>Year</b>           | 2008  |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc. Prof. Dr. Kobchai Dejhan   |

### **ABSTRACT**

A first-order current-mode all-pass section (CM-APS) using two current-controlled conveyers (CCCII) and a grounded capacitor are presented. The current-mode first order section consists of one single-output CCCII, one dual-output CCCII and one grounded capacitor. The circuit operation in current mode and it can be directly employed as a subsystem of monolithic circuit. Pspice simulation results are carried out in order to verify the theory.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน ซึ่งข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ดร.พิพัฒน์ พรหมมี ดร.มนตรี คำเงิน ที่ได้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ในการทำวิจัย รวมถึงพี่ชาย น้องชาย และคนใกล้ชิดของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุน ในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุชัยและคุณแม่สุพัชรินทร์ บุพการีผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างแก่ข้าพเจ้า

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภาสกรณ สัมปต์ตะวันิช

# สารบัญ

หน้า

|  |     |
|--|-----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I   |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II  |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III |
| สารบัญ.....  | IV  |
| สารบัญรูป.....   | VI  |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1   |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                              | 1   |
| 1.2 การพัฒนาในงานวิจัย.....  | 1   |
| 1.3 ขั้นตอนของการศึกษา.....  | 2   |
| บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรสายพานกระแส.....                        | 3   |
| 2.1 บทนำ.....  | 3   |
| 2.2 วงจรสายพานกระแส.....   | 3   |
| 2.2.1 ความเป็นมาของวงจรสายพานกระแส.....                              | 4   |
| 2.2.2 วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง.....                                | 4   |
| 2.2.3 วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง.....                                  | 5   |
| 2.2.4 การสร้างวงจรสายพานกระแส.....                                   | 6   |
| 2.3 วงจร โครงข่ายแบบผ่านทุกความถี่.....                              | 13  |
| 2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วงจรสายพานกระแสกับวงจร โครงข่ายสัญญาณ..... | 15  |
| 2.4.1 วงจร โครงข่ายสัญญาณอันดับที่หนึ่ง.....                         | 16  |
| 2.4.2 วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน.....                      | 17  |
| 2.4.3 วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่าน.....                      | 18  |
| 2.4.4 วงจรกรองสัญญาณอันดับที่สอง.....                                | 19  |
| 2.5 กล่าวสรุป.....   | 21  |
| บทที่ 3 รายละเอียดวงจรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....                       | 22  |
| 3.1 บทนำ.....  | 22  |
| 3.2 วงจรสายพานกระแส CCCII+ และ CCCII-.....                           | 22  |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 3.3 วงจรโครงข่ายแบบผ่านหมดที่ทำงานในโหมดกระแส.....   | 25   |
| 3.4 กล่าวสรุป.....   | 27   |
| <b>บทที่ 4</b> วงจรโครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแสชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุ<br>ต่อลงดิน..... | 28   |
| 4.1 บทนำ.....  | 28   |
| 4.2 วงจรโครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแสชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บ<br>ประจุต่อลงดิน.....            | 28   |
| <b>บทที่ 5</b> ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....  | 31   |
| 5.1 บทนำ.....  | 31   |
| 5.2 การทดลอง.....  | 31   |
| 5.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....   | 33   |
| 5.4 กล่าวสรุป.....   | 37   |
| <b>บทที่ 6</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....  | 38   |
| เอกสารอ้างอิง.....   | 39   |
| ภาคผนวก .....  | 40   |
| ประวัติผู้เขียน.....   | 49   |

# สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 วงจรเสมือนของวงจรสายพานกระแสขั้วที่หนึ่ง.....   | 4    |
| 2.2 วงจรเสมือนของวงจรสายพานกระแสขั้วที่สอง.....   | 5    |
| 2.3 วงจรสายพานกระแสขั้วที่หนึ่ง(ก) และ (ข) วงจร (ค) สัญลักษณ์.....  | 7    |
| 2.4 วงจรสายพานกระแสขั้วที่สองแบบบวก (ก) วงจร (ข) สัญลักษณ์.....   | 10   |
| 2.5 วงจรสายพานกระแสขั้วที่สองแบบลบ (ก) วงจร (ข) สัญลักษณ์.....  | 10   |
| 2.6 วงจรสายพานกระแสขั้วที่สองประสิทธิภาพดี.....   | 11   |
| 2.7 วงจรสายพานกระแสขั้วที่สองที่สร้างจากออปแอมป์.....   | 12   |
| 2.8 แสดงคลื่น 2 ลูกที่มีเฟสต่างกันเท่ากับ $\phi_0$ .....  | 14   |
| 2.9 แสดงตัวอย่างวงจรผ่านทุกความถี่ซึ่งใช้ออปแอมป์.....  | 15   |
| 2.10 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์.....   | 15   |
| 2.11 แสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียล.....  | 16   |
| 2.12 (ก) แสดงวงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านในโหมดกระแส.....   | 17   |
| (ข) แสดงวงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านในโหมดแรงดัน.....   | 17   |
| 2.13 (ก) แสดงวงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่านใน โหมดแรงดัน.....   | 18   |
| (ข) แสดงวงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่านใน โหมดกระแส.....   | 18   |
| 2.14 แสดงวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน.....   | 19   |
| 2.15 แสดงวงจรกรองสัญญาณแบบความถี่สูงผ่าน.....   | 20   |
| 2.16 แสดงวงจรกรองสัญญาณแบบแถบความถี่ผ่าน.....   | 21   |
| 3.1 สัญลักษณ์วงจร CCCII .....   | 22   |
| 3.2 รูปโครงสร้างภายในวงจร CCCII แบบบวก.....   | 23   |
| 3.3 สัญลักษณ์วงจร CCCII – แบบเอาต์พุตคู่.....   | 24   |
| 3.4 รูปโครงสร้างวงจร CCCII- ที่มีอัตราขยายกระแสแบบเอาต์พุตคู่.....  | 24   |
| 3.5 (ก) แสดงวงจร โครงข่ายผ่านทุกความถี่ที่ทำงานใน โหมดแรงดันแบบที่1.....  | 25   |
| (ข) แสดงวงจร โครงข่ายผ่านทุกความถี่ที่ทำงานใน โหมดแรงดันแบบที่2.....  | 25   |
| 3.6 (ก) แสดงวงจร โครงข่ายสัญญาณแบบผ่านทุกความถี่ที่ทำงานใน โหมดกระแส(แบบที่ 1).....   | 26   |
| (ข) แสดงวงจร โครงข่ายสัญญาณแบบผ่านทุกความถี่ที่ทำงานใน โหมดกระแส(แบบที่2).....  | 26   |
| 4.1 วงจรผ่านโหมดแบบง่ายลำดับที่หนึ่งที่ประกอบขึ้นจากวงจร CCCII วงจร CCCII-<br>แบบเอาต์พุตคู่และตัวเก็บประจุแบบต่อลงดิน..... | 29   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 5.1    | วงจรผ่านหมดที่ประกอบขึ้นจากวงจร CCCII วงจร CCCII-แบบเอาต์พุตคู่และ<br>ตัวเก็บประจุแบบต่อลงดินซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์ในบทนี้.....31   |
| 5.2    | แสดงรูปโครงสร้างของวงจรภายในของวงจรแบบผ่านหมดตามรูปที่ 5.1 ที่ถูก<br>เขียนขึ้น โดยใช้โปรแกรม Pspice เพื่อที่จะนำมาใช้ในการเลียนแบบการทำงาน.....32                         |
| 5.3    | แสดงขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส( $I_{out} / I_{in}$ )ต่อความถี่ของสัญญาณ<br>อินพุตเมื่อใช้ตัวเก็บประจุขนาด 12nF และ $I_{o1} = I_{o2}$ เท่ากับ $100 \mu A$ .....33      |
| 5.4    | แสดงเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส( $I_{out} / I_{in}$ )ต่อความถี่เมื่อใช้ตัวเก็บ<br>ประจุขนาด 12nF และ $I_{o1} = I_{o2}$ เท่ากับ $100 \mu A$ .....33                      |
| 5.5    | แสดงเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส( $I_{out} / I_{in}$ )ต่อความถี่เมื่อทำการ<br>ป้อนกระแสไบอัส( $I_o$ )ค่าต่างๆโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 12nF.....34                          |
| 5.6    | แสดงเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส( $I_{out} / I_{in}$ )ต่อกระแสไบอัส( $I_o$ )โดยทำการ<br>เปรียบเทียบที่ความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ต่างกันและใช้ตัวเก็บประจุขนาด 12nF.....35 |
| 5.7    | แสดงการเปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส( $I_{out} / I_{in}$ )ต่อ<br>ตัวเก็บประจุที่ต่อลงดินเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่ความถี่ต่างๆ.....35                            |
| 5.8    | แสดงการเปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส( $I_{out} / I_{in}$ )ต่อ<br>โหลดเอาพุตที่จะนำมาต่อใช้งาน.....36   |
| 5.9    | แสดงการปรับแต่งความถี่หักมุมด้วยกระแสไบอัส $I_o$ เมื่อตัวเก็บประจุมีค่า 12 nF.....37  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวงจรรองแบบผ่านหมดซึ่งมีอัตราขยายคงที่ อิสระต่อความถี่ และสามารถควบคุมเฟสด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นที่นิยมประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายตัวอย่างเช่น ใช้เป็นวงจรรวดค่าความถี่ในวงจรรอสซิทิลเลเตอร์ที่ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ หรือสามารถใช้เป็นวงจรมอดูเลเตอร์ในระบบสื่อสารได้โดยตรง เป็นต้น วงจรรองแบบผ่านหมดนั้น ได้มีผู้คิดค้นขึ้นมากมายหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็น วงจรรองแบบคิจิตอลซึ่งมีข้อดีคือผลลัพธ์ที่ได้จะมีความแม่นยำสูง การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นไปได้ง่ายโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนฮาร์ดแวร์มากนัก แต่อย่างไรก็ตามมนุษย์ก็ยังรับรู้เป็นแบบอะนาลอก วงจรในแบบอะนาลอกจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะขาดไม่ได้โดยการทำงานของวงจระอนาลอกมีได้สองแบบคือ

แบบแรกทำงานในโหมคแรงดัน (Voltage-mode) ซึ่งได้แก่วงจรรองแบบแอกตีฟที่มีการออกแบบขึ้นจากอุปกรณ์จำพวกออปแอมป์ จำนวนหนึ่งวงจรหรือมากกว่าเหล่านี้ล้วนทำงานอยู่ในโหมคแรงดันทั้งสิ้น โดยข้อเสียของการใช้วงจรรองจากอุปกรณ์ออปแอมป์นั้นคือการปรับแต่งการใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆทำได้ยาก

แบบที่สองโหมคกระแส (Current-mode) ซึ่งการออกแบบวงจรรองที่ทำงานในโหมคกระแสนั้นยังไม่แพร่หลายมากนัก แต่พบว่าวงจรที่ทำงานในโหมคกระแสนั้นมีข้อดี คือสามารถทำงานได้ความถี่สูงกว่าโหมคแรงดัน เนื่องจากวงจร์ที่ทำงานในโหมคกระแสจะมีโนคภายในน้อยกว่าวงจร์ที่ทำงานในโหมคแรงดัน มีความแม่นยำสูงกว่าเมื่อสัญญาณอยู่ในรูปกระแส ดังนั้นการลดแหล่งจ่ายลงมาจึงเป็นเรื่องง่าย การใช้กำลังงานต่ำ ซึ่งวงจระโหมคกระแส (Current-mode circuit) สามารถสร้างได้โดยใช้ วงจรสายพานกระแส ซึ่งเหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำวงจรรอง

### 1.2 การพัฒนาในงานวิจัย

จากข้อดีของการใช้งานวงจระโหมคกระแสที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบวงจรรองแบบผ่านหมด แบบง่ายขึ้นจากวงจระสายพานกระแสยุคที่สอง และตัวเก็บประจุต่อลงดิน โดยวงจระดังกล่าวทำงานในโหมคกระแสซึ่งด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้งานในวงจระโมโนลิธิค (monolithic) ได้โดยไม่ต้องมีภาคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ ในส่วนของวงจรรองผ่านหมดในโหมคกระแสที่ได้นำเสนอนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานต่อภายนอก และยังสามารถปรับแต่งได้ทางอิเล็กทรอนิกส์จากการควบคุมกระแสของวงจระสายพานเอง จากการใช้ตัว

เก็บประจูดลงคืนทำให้วงจรมีได้เปรียบในเรื่องการสร้างขึ้นเป็นวงจรรวมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ต่อไป

### 1.3 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย การพัฒนาในงานวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรสายพานกระแส ลักษณะเด่นและการประยุกต์ใช้งาน คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แบบผ่านหมด

บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของวงจรต่างๆ ที่นำมาใช้ออกแบบ วงจรสายพานกระแส CCCII+ และ CCCII- วงจรแบบผ่านหมดที่ทำงานในโหมดกระแส

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์นำวงจรในบทที่ 3 มาใช้สร้างวงจรแบบผ่านทั้งหมดในโหมดกระแส ชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจูดลงคืน

บทที่ 5 เป็นผลการทดลองจากวงจรในบทที่ 4 ด้วยการจำลองแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรสายพานกระแส

### 2.1 บทนำ

การทำงานในโหมดแรงดันนั้นหมายความว่าสัญญาณที่ป้อนให้กับทางอินพุตและเอาต์พุตสามารถวัดได้อยู่ในรูปสัญญาณแรงดัน ส่วนการทำงานในโหมดกระแส นั้นหมายความว่าสัญญาณที่ป้อนให้กับทางอินพุตและเอาต์พุตสามารถวัดได้อยู่ในรูปสัญญาณกระแส ในปัจจุบันนี้งานวิจัยมักจะมุ่งเน้นออกแบบวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสกันมากเพราะว่ามีข้อดีคือสามารถทำงานได้ความถี่สูงกว่าโหมดแรงดัน ทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสจะมีโนคภายในน้อยกว่าวงจรที่ทำงานในโหมดแรงดันมีความแม่นยำสูงกว่าเมื่อสัญญาณอยู่ในรูปกระแส ดังนั้นการลดแหล่งจ่ายลงมาจึงเป็นเรื่องง่าย การใช้กำลังงานต่ำ ที่ผ่านมาวงจร โหมดกระแส (Current-mode circuit) สามารถสร้างได้โดยใช้วงจรต่าง ๆ เช่น วงจรสายพานกระแส , วงจรตามกระแส (Current follower) วงจรออปเปอเรชันแนลแอมพลิไฟฟ์ (OP-AMP) , วงจรออปแอมป์แบบป้อนกลับกระแส (Current-Feedback Operational Amplifier : CFOA) เป็นต้น

แต่สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอและแนะนำให้รู้จักวงจรสายพานกระแส และหลักการทำงาน

### 2.2 วงจรสายพานกระแส

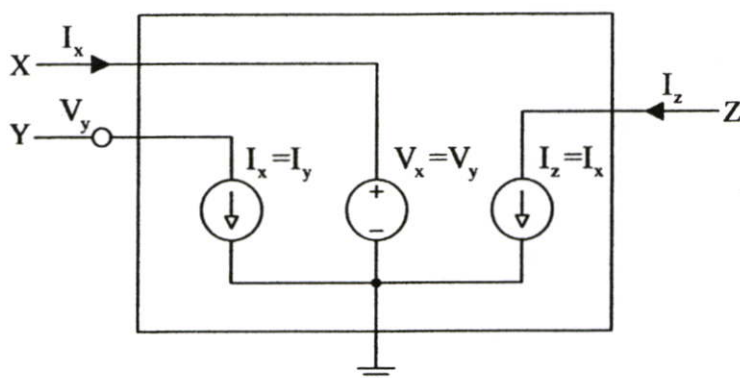
วงจรสายพานกระแสคือวงจรแอกทีฟที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งในโหมดแรงดันและโหมดกระแส แต่โดยทั่วไปมักจะมีการประยุกต์ใช้งานในโหมดกระแสเสียเป็นส่วนมากเพราะการทำงานในโหมดแรงดันนั้นออปแอมป์มีความเหมาะสมมากกว่า ดังนั้นเราอาจจะกล่าวได้ว่าวงจรสายพานกระแสคือ “ออปแอมป์กระแส” ก็เป็นได้ สรุปง่าย ๆ ก็คือถ้าไปถึงออปแอมป์ก็คืออุปกรณ์ที่เหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้งานใน โหมดแรงดันแต่ถ้าเป็นวงจรสายพานกระแสก็คืออุปกรณ์ที่เหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้งานใน โหมดกระแสแต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากออปแอมป์มีค่าพารามิเตอร์อยู่สองค่าที่จำกัดช่วงความถี่ปฏิบัติงานคือ ค่า GBW (Gain Band width product) และค่า SR (Slew Rate) ดังนั้นวงจร เช่น วงจรตามแรงดัน (Voltage follower) วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสเมื่อใช้วงจรสายพานกระแสจึงให้คุณสมบัติดีกว่าใช้ ออปแอมป์

### 2.2.1 ความเป็นมาของวงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแสได้ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1968 โดยวงจรแรกถูกเรียกว่าวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง หลังจากนั้นประมาณอีกสองปีคือในปี 1970 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองก็ได้ปรากฏออกมาโดยได้ทำการปรับปรุงวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากกว่าเดิม โดยรายละเอียดของวงจรถังสองมีดังนี้

### 2.2.2 วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง

วงจรสายพานกระแสคือวงจรแบบแอกติฟที่ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1968 โดยบุคคลสองคนคือ Sedra และ Smith โดยวงจรถังนำเสนอในครั้งแรกจะเรียกว่าวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง (First generation current conveyor : CCI) วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และมีคุณสมบัติดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 วงจรเสมือนของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

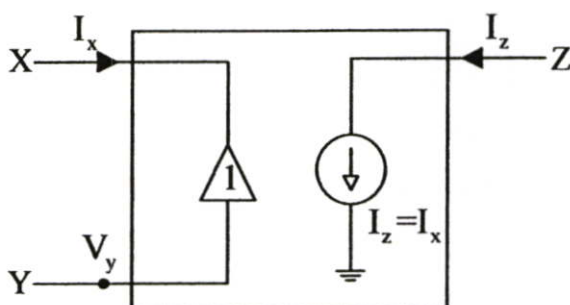
วงจรสายพานกระแสในยุคที่หนึ่งจะมีขั้วสามขั้วเพื่อเป็นอินพุตและเอาต์พุตโดยขั้ว X , Y เป็นอินพุตส่วนขั้ว Z จะเป็นเอาต์พุต คุณสมบัติของวงจรถังสมการที่ (2.1) สามารถอธิบายได้คือ ถ้ามีแรงดันตกคร่อมที่ขั้ว Y แรงดันที่ปรากฏที่ขั้ว X จะเท่ากับแรงดันขั้ว Y เป็นกรณีทีหนึ่ง กรณีที่สอง ถ้ามีกระแสถูกป้อนเข้าที่ขั้ว X กระแสที่ไหลผ่านขั้ว Y จะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านขั้ว X และกระแสค่าเดียวกันนี้จะถูกขนถ่ายไปเป็นกระแสที่ไหลผ่านขั้ว Z ที่เท่ากับขั้ว X เป็นกรณีทีสาม ทั้งสามกรณีนี้จะเป็นอิสระจากกัน

### 2.2.3 วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง

ต่อมาบุคคลทั้งสองได้ปรับปรุงแก้ไขวงจรสายพานกระแสให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยได้เรียกว่า วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง (Second generation current conveyor : CCII) โดยได้นำเสนอในปี 1970 ซึ่งในช่วงแรกยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก จนกระทั่งปี 1990 เป็นต้นมาวงจรสายพานกระแสได้มีการนำมาใช้ออกแบบวงจรประเภทนอกอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และคุณสมบัติแสดงได้ดังสมการที่ (2.2) โดยคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสในทางอุดมคติ ค่าความต้านทานที่ขั้ว X ควรจะต่ำมาก ๆ เข้าใกล้ศูนย์ ความต้านทานที่ขั้ว Y และ Z ควรจะสูงมาก ๆ เข้าใกล้อนันต์ ความแตกต่างระหว่างวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งและยุคที่สอง คือ ขั้ว X ของวงจรสายพานกระแสยุคที่สองสามารถเป็นเหมือนแหล่งจ่ายแรงดันได้

$$\begin{bmatrix} I_x \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

จากคุณสมบัติตามสมการที่ (2.2) สามารถเขียนเป็นวงจรเสมือนได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรเสมือนของวงจรสายพานกระแสยุคที่สอง

### 2.2.4 การสร้างวงจรมอดูเลชันกระแส

จากสมการที่ (2.2) จะเห็นว่าไม่มีกระแสไหลเข้าที่ขั้ว Y ดังนั้นในการออกแบบวงจรมอดูเลชัน จะต้องการให้ความต้านทานที่ขั้ว Y มีค่าสูง ๆ ในขณะที่แรงดันที่ขั้ว X ( $V_x$ ) จะเท่ากับขั้ว Y ( $V_y$ ) ในกรณีนี้จะเห็นว่ามีคุณสมบัติเหมือนวงจรมอดูเลชันแรงดัน (Voltage follower) ส่วนกระแสที่ไหลเข้าออกที่ขั้ว Z ( $I_z$ ) จะเท่ากับขั้ว X ( $I_x$ ) ซึ่งจะมีคุณสมบัติเหมือนวงจรมอดูเลชันกระแส (Current follower) โดยคุณสมบัติความต้านทานที่ขั้ว Z ควรจะต้องสูงมาก ๆ ส่วนความต้านทานที่ขั้ว X ควรจะต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากวงจรมอดูเลชันกระแสถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ค่าความผิดพลาดในกรณีที่  $V_x$  ไม่เท่ากับ  $V_y$  เราจะเรียกว่า “Voltage Tracking Error” ส่วนค่าความผิดพลาดในกรณีที่  $I_z$  ไม่เท่ากับ  $I_x$  จะเรียกว่า “Current Tracking Error” โดยค่าความผิดพลาดเหล่านี้ในการออกแบบวงจรมอดูเลชันจะต้องพยายามให้มีค่าน้อยที่สุด

วงจรมอดูเลชันกระแสยุคที่หนึ่ง (CCI) แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ส่วนรูปที่ 2.4 คือสัญลักษณ์ที่มักจะใช้แทนวงจรมอดูเลชันกระแสนี้ จากรูปที่ 2.3 ทรานซิสเตอร์ Q1 ถึง Q4 ประกอบขึ้นโดยใช้หลักการที่เรียกว่า “ทรานส์ลิเนียร์” ซึ่งหลักการนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าความนำ (Transconductance) กับกระแสที่ไหลในตัวไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับแรงดันซึ่งไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์คืออุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_c$ ) กับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างเบสและอิมิตเตอร์ ( $V_{BE}$ ) ตรงตามหลักการดังกล่าว ซึ่งเขียนได้คือ

$$I_c = I_s \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (2.3)$$

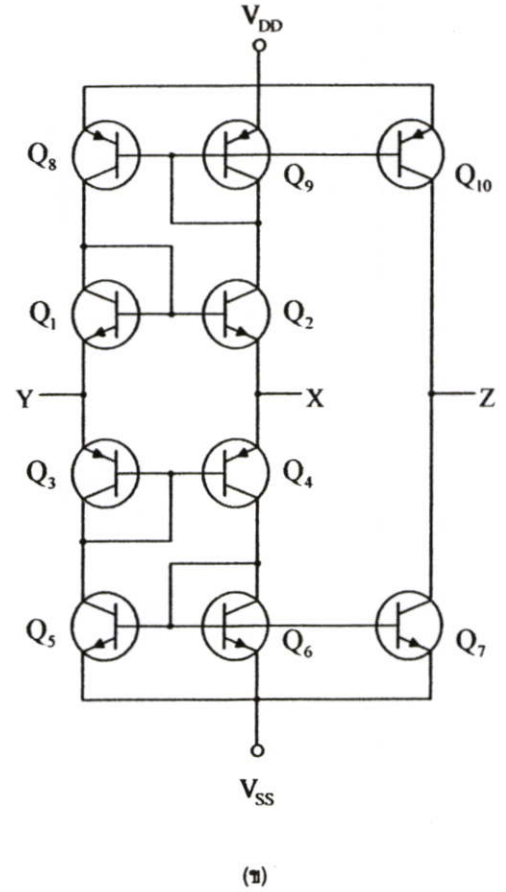
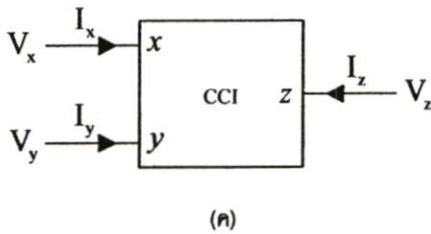
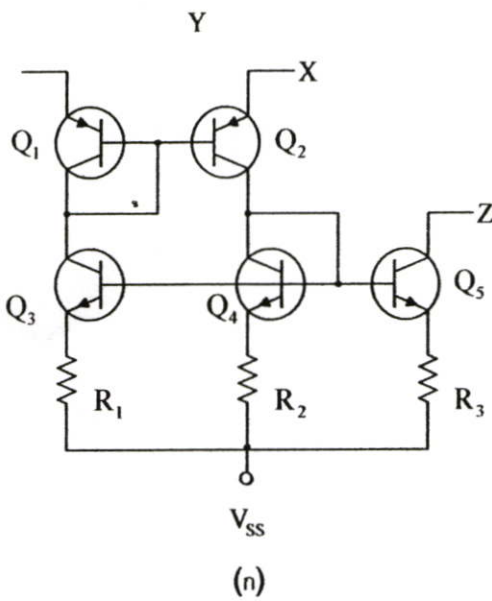
เมื่อ  $I_s$  คือกระแสในช่องอิมิตเตอร์

$V_T$  คือแรงดันอุณหภูมิ มีค่าเท่ากับ  $kT/q$  โดยจะมีค่าประมาณ 25mV ที่อุณหภูมิ 27°C

$k$  คือค่าคงที่ของ Boltzmann ที่ค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23} J/K$

$T$  คือค่าอุณหภูมิซึ่งมีหน่วยเป็น  $K$

$q$  คือค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23} J/K$



รูปที่ 2.3 วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง(ก) และ (ข) วงจร (ค) สัญลักษณ์

จากวงจรในรูปที่ 2.3 ทรานซิสเตอร์ Q1 ถึง Q4 ค่อยอยู่ในลักษณะของทรานส์ติสเตอร์ ซึ่งหลักการนี้ได้ถูกนำเสนอโดย Gilbert ในปี 1975 โดยทฤษฎีนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกันระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์ในตัวทรานซิสเตอร์กับกระแสที่ไหลในตัวทรานซิสเตอร์ โดยมีความสัมพันธ์สอดคล้องกันแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลระหว่างกระแสกับแรงดัน ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$g = \frac{dI}{dV} = aI \quad (2.4)$$

โดยที่  $g$  คือค่าทรานคอนดักแตนซ์ และ  $a$  คือ ค่าคงที่

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.4) จะได้

$$\frac{dI}{dV} = aI$$

$$\int \frac{1}{I} dI = a \int dV$$

$$\ln I = aV + c$$

$$I = b \exp(aV) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $b$  คือค่าคงที่

เมื่อใช้ทฤษฎีแรงดันของเจอร์ชอฟฟ์ เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$V_{BE1} + V_{BE3} = V_{BE2} + V_{BE4} \quad (2.6)$$

และเมื่อแทนค่า จะเขียนใหม่ได้  $V_{BE}$  ( $V_{BE} = V_T \ln(\frac{I_c}{I_s})$ ) จะเขียนใหม่ได้

$$V_{T1} \ln\left(\frac{I_{c1}}{I_{s1}}\right) + V_{T3} \ln\left(\frac{I_{c3}}{I_{s3}}\right) = V_{T2} \ln\left(\frac{I_{c2}}{I_{s2}}\right) + V_{T4} \ln\left(\frac{I_{c4}}{I_{s4}}\right) \quad (2.7)$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปความหนาแน่นของกระแส ( $J$ ) จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$V_{T1} \ln\left(\frac{J_{c1}}{J_{s1}}\right) + V_{T3} \ln\left(\frac{J_{c3}}{J_{s3}}\right) = V_{T2} \ln\left(\frac{J_{c2}}{J_{s2}}\right) + V_{T4} \ln\left(\frac{J_{c4}}{J_{s4}}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อสมมติว่าให้ Q1-Q4 ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการที่ทำในเวลาเดียวกันและทำงานที่อุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ได้  $V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = V_{T4} = V_T$  และเมื่อกำหนดให้  $J_s$  ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากันคือ  $J_{s1} = J_{s2} = J_{s3} = J_{s4} = J_s$  ดังนั้นจะเขียนใหม่ได้คือ

$$\ln J_{c1} + \ln J_{c3} = \ln J_{c2} + \ln J_{c4} \quad (2.9)$$

และเมื่อจัดสมการใหม่จะได้

$$J_{c1} J_{c3} = J_{c2} J_{c4} \quad (2.10)$$

ซึ่งเมื่อแสดงความสัมพันธ์ของสมการในรูปทั่วไประหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับพื้นที่ของอิมิตเตอร์ (A) จะได้

$$\frac{I_{c1} I_{c3}}{A_1 A_3} = \frac{I_{c2} I_{c4}}{A_2 A_4} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) จะเห็นว่าวงจรทรานสิเออร์ที่คิดการทำงานใน โหมดกระแสเป็นหลัก จะให้หน้าที่การทำงานของวงจรที่มีความแน่นอน โดยไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วเงื่อนไขของหลักการทรานสิเออร์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

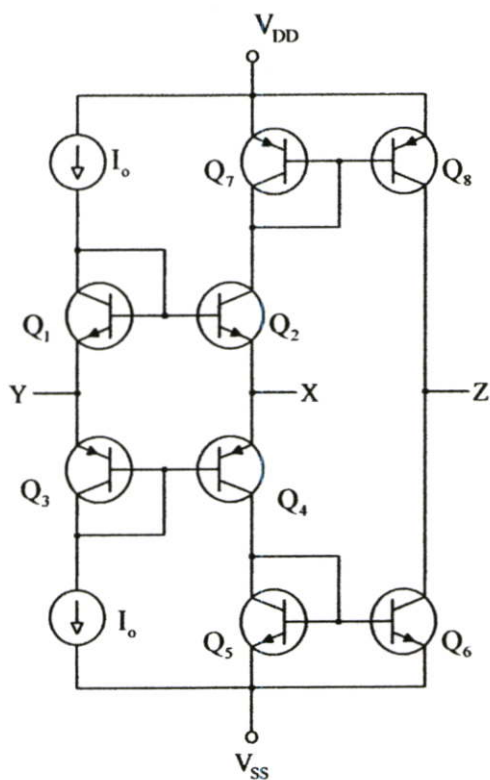
1. อุปกรณ์ทุกตัวที่ประกอบรวมกันเป็นรูปของทรานสิเออร์นั้นจะต้องมีความสัมพันธ์ของตัวแปรไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$V = V_T \ln \left( \frac{J}{J_s} + 1 \right) \text{ หรือ } J = J_s \left( \exp \left( \frac{V}{V_T} \right) - 1 \right)$$

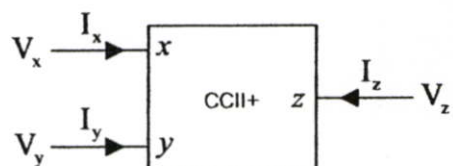
2. ความหนาแน่นกระแส  $J$  ต้องมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว  $J_s$  มาก ๆ จึงจะทำให้สามารถตัดค่า 1 ที่ในพจน์ของลอการิทึมได้โดยไม่เกิดความผิดพลาด
3. รูปของทรานสิเออร์จะต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีเงื่อนไขตามข้อที่ 1 เป็นจำนวนคู่ โดยจะมีอุปกรณ์ดังกล่าวจำนวนเท่าๆ กันค่ออยู่ในทิศทางสวนกันภายในรูป
4. คู่ของอุปกรณ์ที่ค่ออยู่ในทิศทางตรงกันข้ามจะต้องใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวเท่ากัน
5. อุปกรณ์ภายในรูปทุกตัวทำงานที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน

จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าในการวิเคราะห์หลักการของทรานสิเออร์นั้นค่าพารามิเตอร์  $J_s$  และ  $V_T$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกระบวนการในการสร้างอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำจะถูกขจัดออกไปจากความสัมพันธ์ของกระแสที่ต้องการซึ่งทำได้โดยการกำหนดให้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับอุณหภูมิของอุปกรณ์แต่ละตัวมีค่าเท่ากันและอุปกรณ์ภายในรูปทำงานที่อุณหภูมิเดียวกันซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของอุปกรณ์ภายในเป็นไปดังสมการที่ (2.11) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ที่มีความแม่นยำ โดยไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ

วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งในรูปที่ 2.3 (ข) คือวงจรที่เหมาะสมจะนำมาใช้สร้างเป็นวงจรต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันไม่ค่อยได้รับความสนใจแล้ว โดยวงจรที่ได้รับความสนใจเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สองซึ่งสามารถสร้างเป็นวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โดย Q1 ถึง Q4 สร้างเป็นทรานสิเออร์รูป โดยมี Q5 และ Q6 เป็นวงจรสะท้อนกระแสอย่างง่าย เช่นเดียวกับ Q7 และ Q8 เราจะเรียกววงจรในรูปที่ 2.4 นี้ว่าเป็นวงจรสายพานกระแสแบบบวก โดยจะสังเกตเห็นว่าทิศทางกระแสไหลของกระแสที่ขั้ว Z จะไหลเข้า

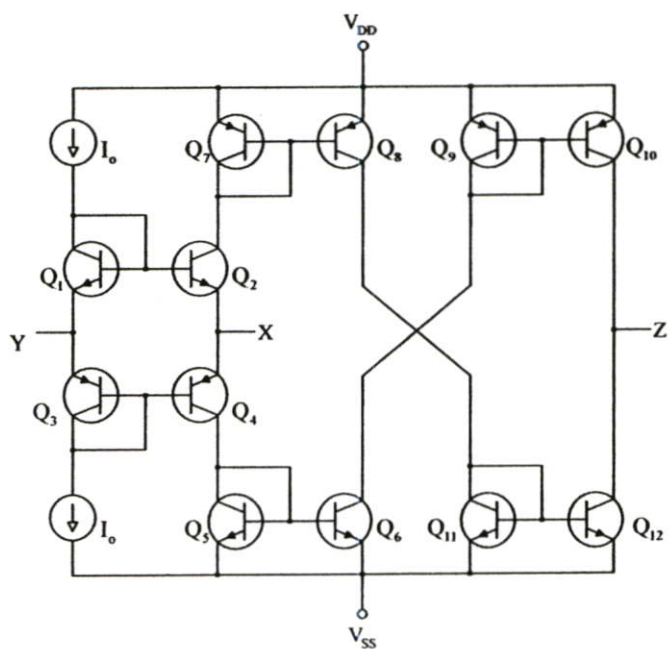


(n)

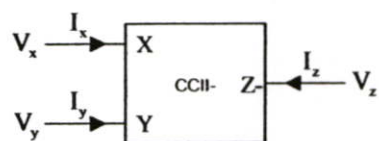


(ข)

รูปที่ 2.4 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบบวก (ก) วงจร (ข) สัญลักษณ์



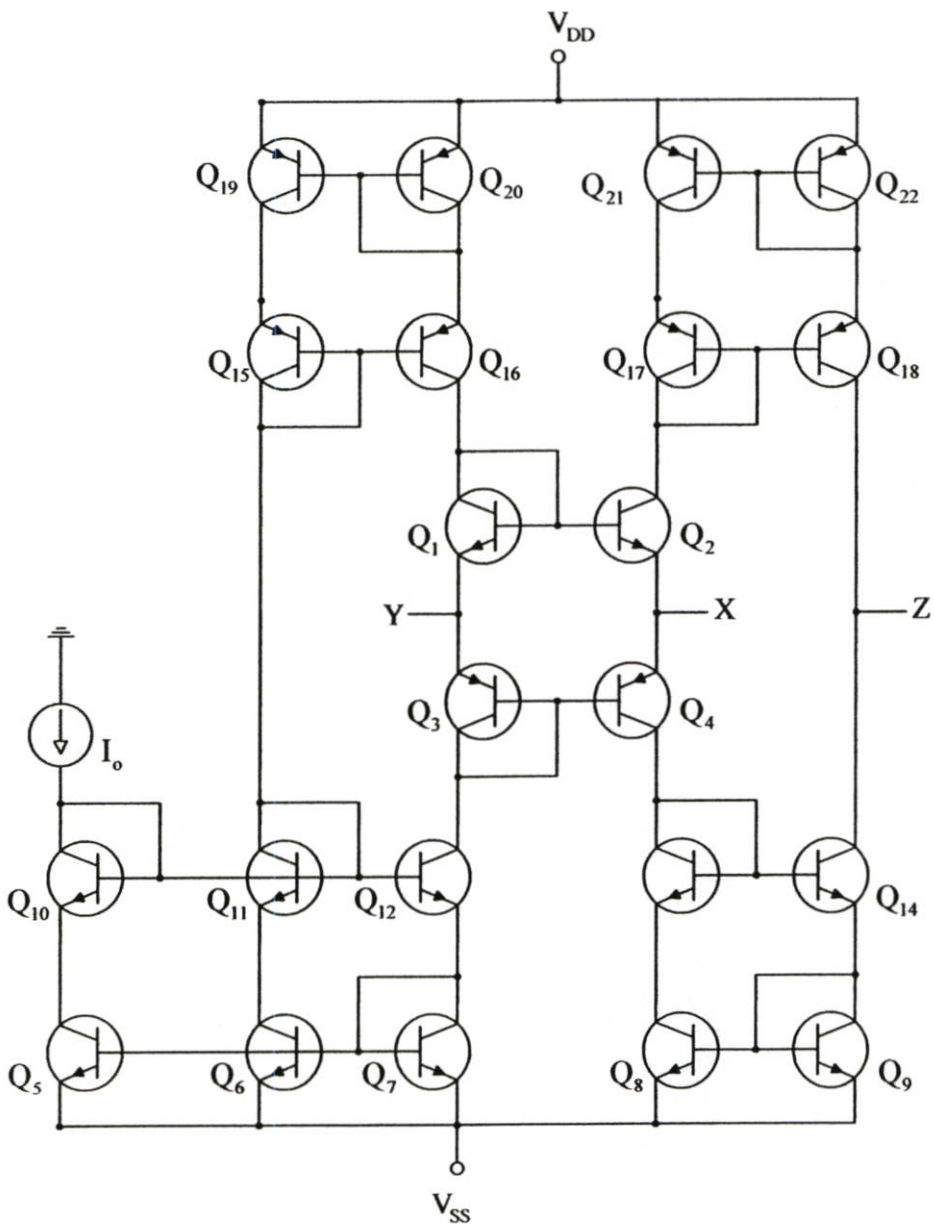
(n)



(ข)

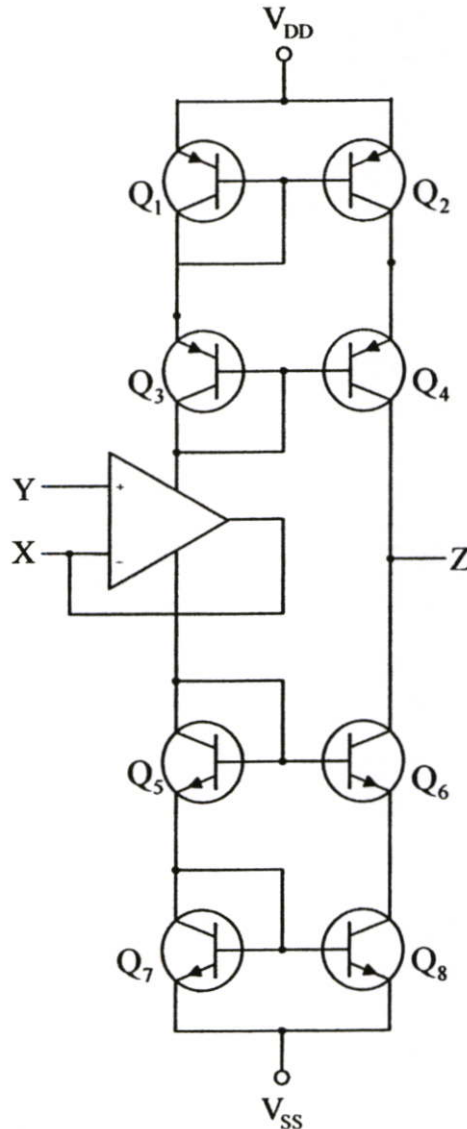
รูปที่ 2.5 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบลบ (ก) วงจร (ข) สัญลักษณ์

และสำหรับวงจรสายพานกระแสแบบลบเราจะสามารถสร้างได้โดยง่ายซึ่งวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ก) โดย Q6 Q8 Q9 และ Q11 ต่อในลักษณะ Cross couple ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสที่ขั้ว Z จะไหลออก โดยวงจรในรูปที่ 2.4 และ 2.5 จะใช้วงจรสะท้อนกระแสอย่างง่ายมาทำการตรวจจับกระแสที่ขั้ว X แล้วสะท้อนสู่ขั้ว Z ดังนั้นคุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแสจึงเป็นตัวกำหนดค่าผิดพลาดของกระแส (Current tracking error) ระหว่างขั้ว X และ Z โดยตรง ดังนั้นจึงได้ปรับปรุงวงจรโดยเปลี่ยนมาใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบแคสโคด (Cascode current mirror) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นวงจรที่มีความเที่ยงตรงมากกว่าแบบอย่างง่าย



รูปที่ 2.6 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองประสิทธิภาพดี

นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงให้วงจรใช้แหล่งจ่ายกระแสแหล่งจ่ายเดียวซึ่งจะทำให้  
 ง่ายต่อการปรับเซตกระแสอีกด้วยซึ่งวงจรจากรูปที่ 2.6 นี้มักจะนิยมนำมาใช้สร้างและออกแบบเป็น  
 วงจรต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผู้นำวงจรสายพานกระแสมาออกแบบเป็นวงจรประมวลผลต่าง โดยจะใช้  
 วงจรในรูปที่ 2.6 นี้เป็นหลัก และนอกจากนั้นวงจรสายพานกระแสยังสามารถสร้างได้จากออป  
 แอมป์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะสามารถนำมาใช้งานได้เช่นเดียวกัน แต่ข้อเสียของวงจร  
 สายพานกระแสที่สร้างจากออปแอมป์คือคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสจะขึ้นอยู่กับออป  
 แอมป์เป็นหลัก



รูปที่ 2.7 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองที่สร้างจากออปแอมป์

วงจรสายพานกระแสที่กล่าวมานี้เป็นวงจรสายพานกระแสแบบพื้นฐาน โดยจะสร้างได้โดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในแบบวงจรมหาศาล นอกจากนี้ยังมีวงจรสายพานกระแสอีกเป็น

จำนวนมากที่ได้เผยแพร่ในวารสารต่าง ๆ โดยจะออกแบบวงจร โดยปรับปรุงให้วงจรมีคุณสมบัติใกล้เคียงอุดมคติที่สุด โดยใช้มอสเฟตโดยจะนำเสนอในแบบวงจรรวม

## 2.3 วงจรโครงข่ายแบบผ่านหมด (ALL-Pass Network)

วงจร All-pass หรือ phase-shift filter เป็นวงจรโครงข่ายความถี่ที่มีคุณสมบัติในอันที่จะยอมให้สัญญาณทุกความถี่ผ่านไปได้โดยเท่าเทียมกันตลอด ในขณะที่เดียวกันจะทำการเปลี่ยนหรือเลื่อนเฟสของสัญญาณทั้งหลายไปด้วยค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง ถ้าค่าจำนวนนั้นที่กำหนดไว้เป็นค่าลบเสมือนกับการหน่วงสัญญาณความถี่ด้วยช่วงเวลาหนึ่งขณะที่สัญญาณเหล่านี้ผ่านวงจรความถี่ชนิดนี้ ฉะนั้นวงจร all-pass นี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า วงจรไทม์ ดีเลย์ (Time-delay circuit) หรือวงจรหน่วงเวลาเฟสที่เลื่อนไปหรือเวลาที่หน่วงออกไปในสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน(ความถี่หรือเวลาในสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน นิยามค่าด้วย  $s$  ซึ่งเท่ากับ  $j\omega$ ) จะแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ในขณะที่ค่าแอมพลิจูดหรือขนาดของสัญญาณยังคงมีค่าคงที่เท่าเทียมกันไปตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน

สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน แสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตต่ออินพุตของค่าโวลเตจหรือความต่างศักย์ ตามรูปสมการดังนี้

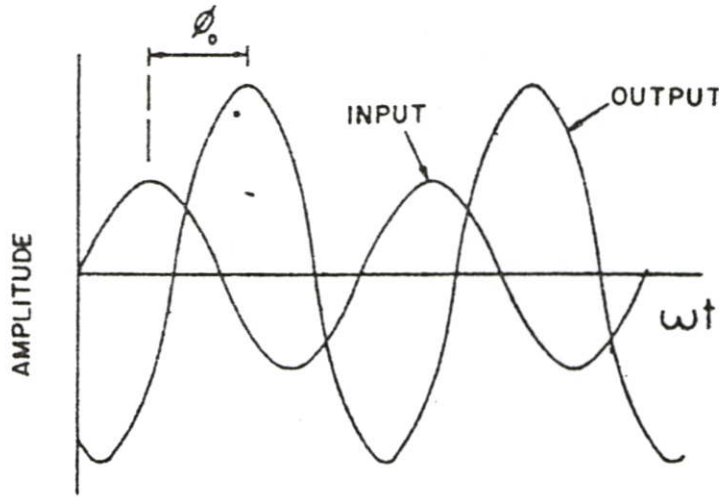
$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} \quad (2.12)$$

$V_2$  = แรงดันเอาต์พุต และ  $V_1$  = แรงดันอินพุต

ที่  $\omega_0$  ( $f_0$  ถ้าคิดในหน่วย Hz) ถ้าค่าเฟสชิฟต์ (Phase shift) หรือเฟสที่เลื่อนออกไปเป็นค่าลบ นั่นคือ  $\phi(\omega_0) = -\phi_0$  (เป็นองศา) จะได้ว่าที่  $\omega_0$  นี้ค่าเฟสของอินพุต  $V_1$  มีค่ามากกว่าค่าเฟสทางเอาต์พุต  $V_2$  อยู่เท่ากับ  $\phi_0$  องศา ฉะนั้นถ้ารูปร่างคลื่นทั้งสองพร้อมกัน (ทั้งเอาต์พุตและอินพุตจับสัญญาณมาเทียบกัน) จะพบว่าสัญญาณอินพุตหรือรูปร่างคลื่นทางอินพุตจะนำหน้ารูปร่างคลื่นทางเอาต์พุตด้วยจำนวน  $\phi_0$  องศา เพราะว่าสัญญาณเป็นแบบ periodic (หมายถึงรูปร่างคลื่นจะซ้ำกันในช่วงเวลาหนึ่งที่คงที่ซึ่งเรียกว่าคาบเวลาของคลื่น) เมื่อนำจุดใด ๆ ของคลื่นทั้งสองที่ห่างกัน 1 คาบเวลา หรือ 1 period มาพล็อตบนกราฟแอมพลิจูดกับเวลาจะได้กราฟที่คงที่เรียกว่า คอนสแตนท์ไทม์ ดีเลย์ (Constant Time-delay) และด้วยเหตุที่สัญญาณความถี่หรือรูปร่างคลื่นเป็นแบบ periodic  $-\phi_0$  จึงมีค่าเท่ากับ  $360 - \phi_0$  เช่น ถ้าให้รูปร่างคลื่นทางเอาต์พุตตามหลังรูปร่างคลื่นทางอินพุตเท่ากับ  $270^\circ$  ( $\phi = -\phi_0 = -270^\circ$ ) สามารถกล่าวได้อีกแบบว่า รูปร่างคลื่นทางเอาต์พุตนำหน้ารูปร่างคลื่นทางอินพุตอยู่เท่ากับ  $90^\circ$

และสำหรับผลการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณสำหรับวงจรกรองผ่านหมดนั้น ในทางอุดมคติจะมีค่าแอมพลิจูดคงที่ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วสามารถทำได้มีค่าเกือบคงที่ตลอดย่านความถี่ใช้งาน ในรูปที่ 6.2 แสดงรูปร่างคลื่นทางเอาต์พุต

ตามหลังรูปคลื่นทางอินพุตเท่ากับ  $\phi_0$  องศา (หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ รูปคลื่นทางเอาต์พุตนำหน้ารูปคลื่นทางอินพุตอยู่  $360 - \phi_0$  องศา) และถ้าเราพล็อตบนแกนเวลา คือแทนแกน  $\omega$  ด้วยแกนเวลา ผลต่างระหว่างจุดใดๆที่ห่างกัน 1 คาบเวลา(1 period) ก็คือ ค่าหนึ่งวงเวลา



รูปที่ 2.8 คลื่น 2 ลูกที่มีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\phi_0$

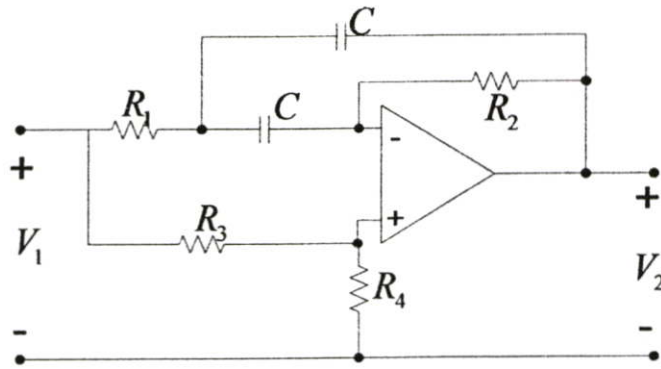
การประมาณค่าในรูปสมการอันดับที่สอง (Second – order polynomial function) สำหรับวงจรผ่านหวมจะออกมาในรูปสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K(s^2 - as + b)}{s^2 + as + b} \quad (2.13)$$

โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ เฟสชิฟท์  $\phi(\omega)$  ซึ่งอาจแทนด้วยเทอมของ  $f = \omega/2\pi$  (Hz) ได้ มีค่าเท่ากับ

$$\phi(\omega) = -2 \arctan\left(\frac{a\omega}{b - \omega^2}\right) \quad (2.14)$$

และค่าแอมพลิจูดคือ  $|H(j\omega)|$  เท่ากับ K ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายของวงจรกรองความถี่นี้ด้วย



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างวงจรผ่านหมดซึ่งใช้ออปแอมป์

แทนค่า  $R$  และ  $C$  ที่เหมาะสมในวงจรรูปที่ 2.9 ทำการวิเคราะห์วงจรจะได้ค่า  $a$  และ  $b$  ที่ทำให้สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ (2.13) เป็นจริงเมื่อ

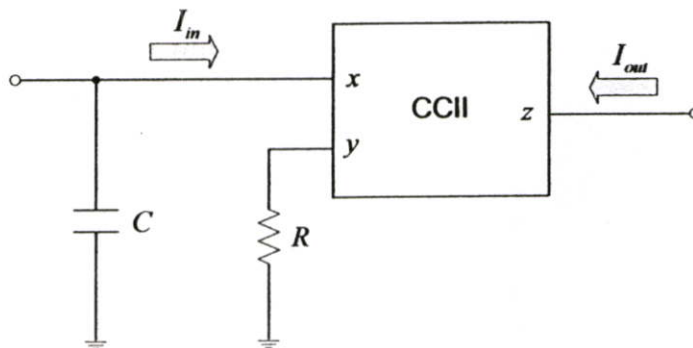
$$a = \frac{2}{R_2 C} \quad \text{และ} \quad b = \frac{1}{R_1 R_2 C^2}$$

และมีค่าอัตราขยาย  $K = \frac{R_4}{(R_3 + R_4)}$  โดยที่  $R_2 R_3 = 4 R_1 R_4$

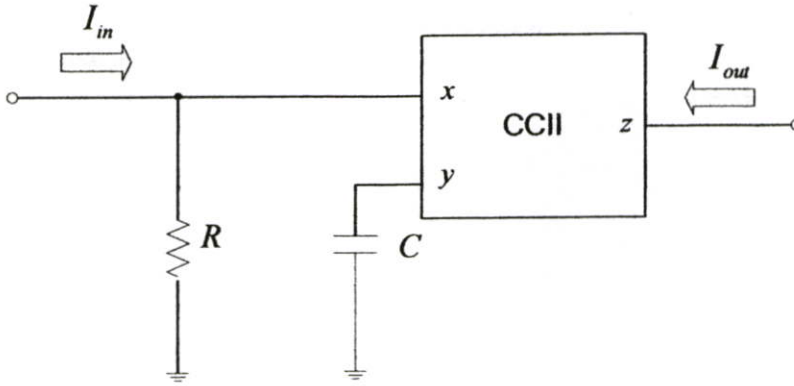
ดังนั้นจึงสามารถสร้างวงจรผ่านหมดได้โดยกำหนดค่าเฟสชิฟท์  $\phi$  ความถี่ที่ต้องการได้

#### 2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วงจรสายพานกระแสกับวงจรโครงข่ายสัญญาณ

เนื่องจากวงจรดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiator) และวงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator) คือวงจรพื้นฐานในการนำมาใช้สร้างวงจรโครงข่ายสัญญาณในแบบต่างๆ เสมอ ดังนั้นจึงขอเริ่มต้นด้วยการพิจารณาบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของวงจรทั้งสองดังรูปที่ 2.10 และ รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 วงจรอินทิเกรเตอร์



รูปที่ 2.11 วงจรคิฟเฟอเรนซิเอเตอร์

โดยเมื่อพิจารณาจากวงจรรูปที่ 2.10 และ 2.11 เมื่อใช้คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสคือ  $V_x = V_y, I_z = I_x$  จะได้ทำให้สมการคือ

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{sRC}$$

และ

$$\frac{I_{in}}{I_{out}} = sRC$$

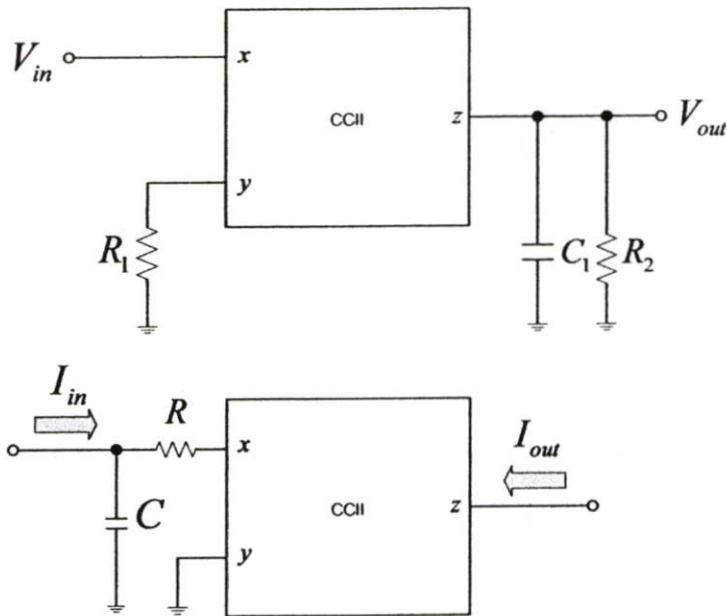
วงจรอินทิเกรเตอร์จะมีคุณสมบัติเหมือนวงจร โครงข่ายแบบความถี่ต่ำผ่าน ส่วนวงจรคิฟเฟอเรนซิเอเตอร์จะมีคุณสมบัติเหมือนกับวงจร โครงข่ายแบบความถี่สูงผ่านอันดับที่หนึ่ง ซึ่งคุณสมบัติแสดงได้ดังสมการ โดยวงจรที่แสดงเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรคิฟเฟอเรนซิเอเตอร์ แบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless Integrator and Differentiator)

#### 2.4.1 วงจรโครงข่ายสัญญาณอันดับที่หนึ่ง

วงจรโครงข่ายสัญญาณอันดับที่หนึ่งคือ วงจรที่มีโพลของความถี่เพียงโพลเดียว มีค่า Roll-off ของเส้นกราฟเท่ากับ 20dB/decade ซึ่งวงจร โครงข่ายสัญญาณอันดับที่หนึ่งที่จะกล่าวถึงคือ วงจรโครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน วงจรโครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่าน และวงจรโครงข่ายสัญญาณแบบผ่านหมดซึ่งเราได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

### 2.4.2 วงจรโครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน

วงจรโครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low pass network) เป็นวงจรโครงข่ายสัญญาณที่มีแถบความถี่ผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึงความถี่คัตออฟ ( $\omega_c$ ) ในขณะที่ช่วงความถี่สูงจะถูกกลทอนซึ่งเป็นช่วงความถี่แถบหยุดของวงจร ในกรณีนี้แบนด์วิดธ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ  $\omega_c$  ส่วนวงจรโครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านอันดับที่หนึ่งที่ใช้วงจรสายพานกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 (ก) วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านในโหมดกระแส

(ข) วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านในโหมดแรงดัน

เมื่อใช้คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส จะได้ค่าทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันสำหรับวงจรทั้งสองดังนี้

$$H(s) = \frac{1}{sRC + 1}$$

และจากวงจรในรูปที่ 2.12 (ก) เมื่อกำหนดให้  $R_1 = R_2 = R$  แล้วจะได้ความถี่คัตออฟสำหรับวงจรทั้งสองมีค่าเท่ากับ

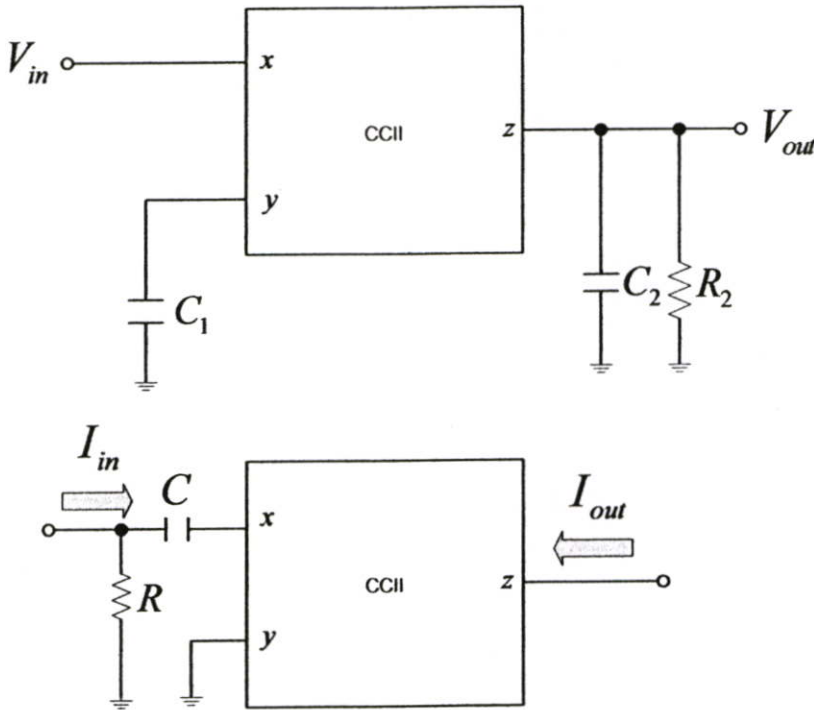
$$\omega_c = 1/RC \text{ หรือ } f_c = 1/2\pi RC$$

วงจรในรูปที่ 2.12 (ก) จะต้องกำหนดเงื่อนไข  $R_1 = R_2$  จึงจะได้ผลตอบสนองของสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านอันดับที่หนึ่ง โดยที่อินพุตจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมากส่วนวงจรใน รูปที่ 2.12 (ข)

เป็นวงจรที่ทำงานใน โหมดกระแสที่มีเอาต์พุตมีอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งจะมีประโยชน์คือสามารถนำสัญญาณเอาต์พุตไปใช้งานได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้วงจรแมตซ์ชิ่งใด ๆ

### 2.4.3 วงจรโครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่าน

วงจรโครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่าน (High pass network) เป็นวงจร โครงข่ายความถี่ ที่มีแถบความถี่ผ่านในช่วง  $\omega_c$  ถึง  $\infty$  ในกรณีนี้แบนด์วิดธ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ  $\omega_c$  ถึง  $\infty$  วงจรโครงข่ายสัญญาณความถี่สูงผ่านอันดับที่หนึ่งที่สร้างจากวงจรสายพานกระแสสามารถ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 (ก) วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่านใน โหมดแรงดัน

(ข) วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบความถี่สูงผ่านใน โหมดกระแส

โดยเมื่อใช้คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส จะได้ค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันสำหรับวงจร ทั้งสองดังนี้

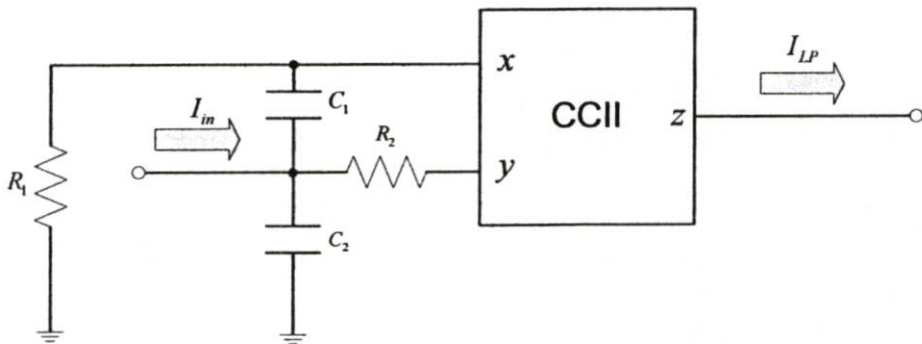
$$H(s) = \frac{sRC}{sRC + 1}$$

และจากวงจรในรูปที่ 2.13 (ก) เมื่อกำหนดให้  $C_1 = C_2 = C$  แล้วจะให้ความถี่คัตออฟ สำหรับวงจรทั้งสองมีค่าเท่ากับ

$$\omega_c = 1/RC \text{ หรือ } f_c = 1/2\pi RC$$

### 2.4.4 วงจรกรองสัญญาณอันดับที่สอง

ที่ผ่านมาวงจรกรองสัญญาณอันดับที่สองหรือสูงกว่าได้มีการนำเสนอเป็นงานวิจัยไว้มากมาย ซึ่งต่างก็มีการออกแบบที่แตกต่างกันไป สำหรับวงจรกรองสัญญาณที่จะหยิบยกมากล่าวในบทความนี้จะเป็นวงจรที่มีคุณสมบัติคือ ใช้อุปกรณ์ทั้งแบบพาสซีฟและแอ็กทีฟน้อย โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน และสำหรับวงจรแบบโหมครระแสดความต้านทานทางเอาต์พุตของวงจรจะต้งสูง โดยวงจรกรองสัญญาณอันดับที่สองที่จะกล่าวถึงคือ วงจรกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองสัญญาณแบบแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองสัญญาณแบบความถี่สูงผ่าน วงจรในรูปที่ 2.14 เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านอันดับสองโดยมีคุณสมบัติคือ



รูปที่ 2.14 วงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

$$\text{ค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน} \quad \frac{I_{LP}}{I_{in}} = \frac{1}{s^2 + \frac{(C_1 + C_2)}{R_1 C_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

พารามิเตอร์ : Gain = 1

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$\frac{\omega_c}{Q} = \frac{C_1 + C_2}{R_1 C_1 C_2}$$

วงจรในรูปที่ 2.15 เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบความถี่สูงผ่านอันดับที่สองโดยมีคุณสมบัติคือ

$$\text{ค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน} \quad \frac{I_{HP}}{I_{in}} = \frac{\frac{R_1}{R_2} s^2}{s^2 + \frac{(C_1 + C_2)}{R_2 C_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_2}}$$

พารามิเตอร์ : Gain = 1

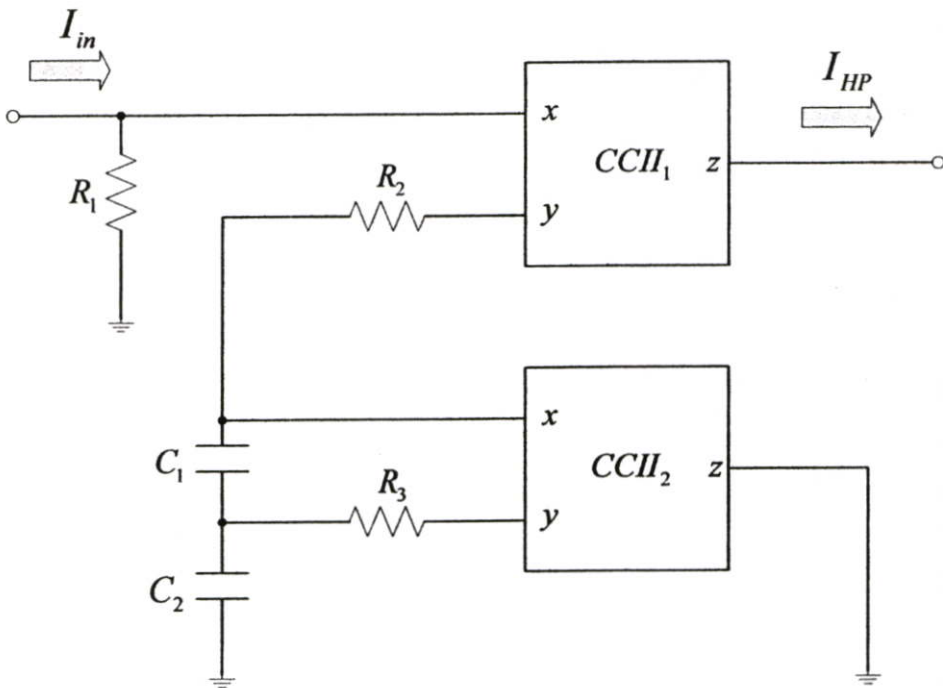
$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$\frac{\omega_c}{Q} = \frac{C_1 + C_2}{R_1 C_1 C_2}$$

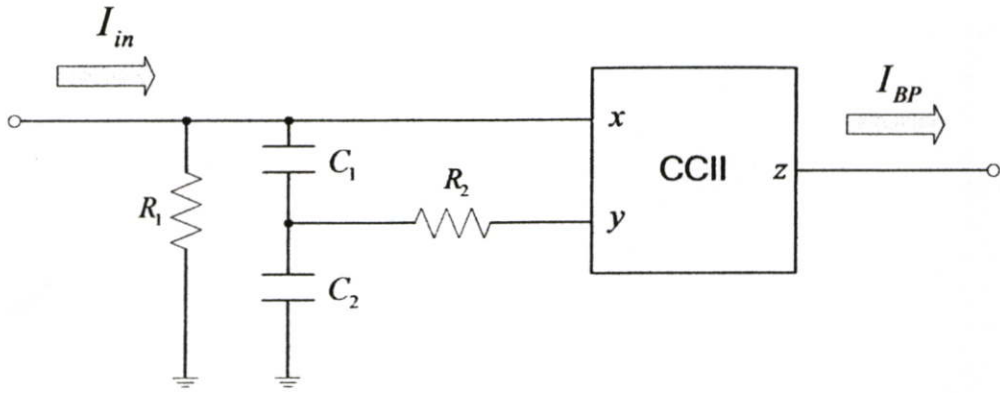
วงจรในรูปที่ 2.16 เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบแถบความถี่ผ่านอันดับที่สอง โดยมีคุณสมบัติคือ

ค่าทรานสเฟอว์ฟังก์ชัน

$$\frac{I_{BP}}{I_{in}} = \frac{\frac{1}{R_2 C_1} s}{s^2 + \frac{(C_1 + C_2)}{R_1 C_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรกรองสัญญาณแบบความถี่สูงผ่าน



รูปที่ 2.16 แสดงวงจรกรองสัญญาณแบบแถบความถี่ผ่าน

พารามิเตอร์ : Gain = 1

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$\frac{\omega_c}{Q} = \frac{C_1 + C_2}{R_1 C_1 C_2}$$

จากค่าทราสเฟอร์ฟังก์ชันวงจรรูปที่ 2.14 ถึงรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าสามารถปรับค่าความถี่ได้ โดยเปลี่ยนค่า  $R_2$  โดยจะไม่มีผลกับค่า  $\omega_0/Q$  วงจรที่กล่าวทั้งสามวงจรเป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์พาสซีฟและแอ็กทีฟน้อย มีความต้านทานทางเอาต์พุตสูงจะเห็นว่าสามารถที่จะนำเอาต์พุตไปใช้งานได้โดยไม่ต้องใช้วงจรแมตซ์จิงจากภายนอก

## 2.5 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีการทำงานและสมการสำคัญๆ ของวงจรสายพานกระแส โดยจะเน้นการนำวงจรสายพานกระแสอันดับที่สองมาใช้เป็นหลัก รวมทั้งได้กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งมีการเกี่ยวข้องกับอูณหภูมิตัวได้อีก ทั้งยังมีการกล่าวถึงวงจร โครงข่ายแบบผ่านหมด โดยได้มีการนำวงจรสายพานกระแสมาประยุกต์ใช้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาผลของวงจร โครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแส โดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดินในบทต่อไป

### บทที่ 3

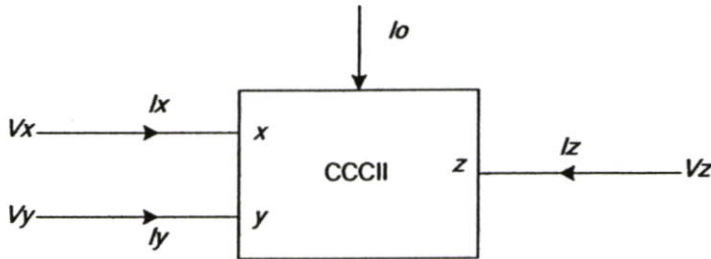
## รายละเอียดวงจรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอรายละเอียดของวงจรแบบผ่านหมดในโหมดกระแส (Current-Mode All-Pass Section: CM-APS) ลำดับที่ 1 แบบง่าย วงจรสายพานควบคุมด้วยกระแสยุคที่ 2 แบบบวก (CCCII+) เอาต์พุตเดี่ยว และวงจรสายพานควบคุมด้วยกระแสยุคที่ 2 แบบลบ (CCCII-) เอาต์พุตคู่ โดยวงจรดังกล่าวทำงานในโหมดกระแสด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้งานในวงจร โมโนลิธิค (monolithic) โดยไม่จำเป็นต้องมีภาคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ โดยวงจรต่างๆมีรายละเอียดดังนี้

### 3.2 วงจรสายพานกระแส CCCII+ และ CCCII-

ความสัมพันธ์ระหว่างพอร์ตของวงจรสายพานควบคุมกระแสยุคที่ 2 (CCCII) สามารถแสดงสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สัญลักษณ์วงจร CCCII

โดยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขา X Y และ Z ของ CCCII ในอุดมคติสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $k$  คืออัตราส่วนการถ่ายโอนกระแสของวงจร

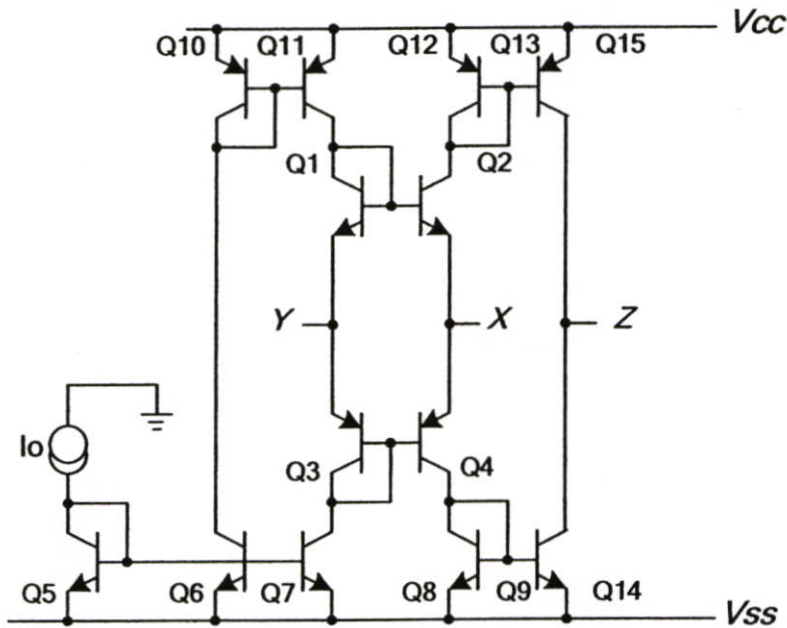
$R_x$  คือค่าความต้านทานแฝง(Parasitic Resistance) ด้านอินพุตที่พอร์ต  $X$  ของ CCCII ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัสดังสมการต่อไปนี้

$$R_x = \frac{V_T}{2I_O} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $V_T$  คือ สักคาความร้อน ที่มีค่า 26mV ที่อุณหภูมิห้อง

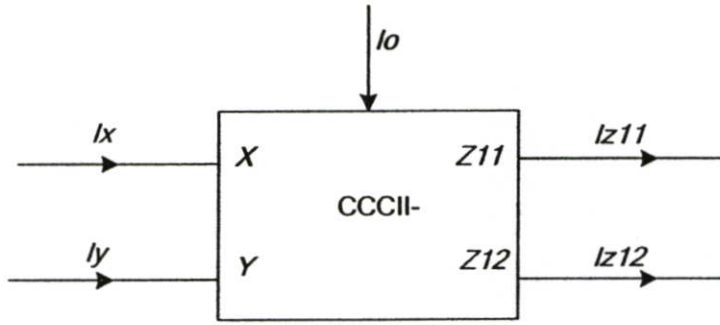
$I_O$  คือกระแสไบอัสวงจรสายพานกระแส

ส่วน  $I_z = kI_x$  และ  $I_z = -kI_x$  โดยเครื่องหมายบวกและลบของ  $I_z$  จะแทนชนิดบวก(CCCII+) และลบ(CCCII-) ตามลำดับ โดยวงจรจริง CCCII+ ชนิดไบโพลาร์สามารถแสดงได้ดังรูป

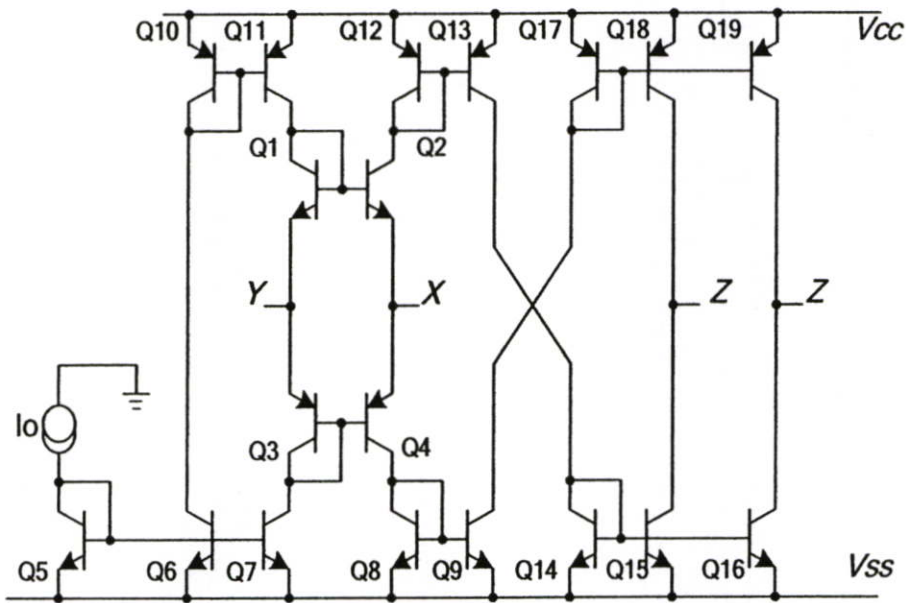


รูปที่ 3.2 รูปโครงสร้างภายในวงจร CCCII แบบบวก

และสำหรับวงจร CCCII แบบลบนั้นในงานวิจัยนี้จะขอเสนอวงจร CCCII-แบบเอาต์พุตคู่ โดยสามารถสร้างได้จากการเพิ่มวงจรที่เป็นภาคสะท้อนกระแสเพื่อให้ได้เอาต์พุต  $Z^-$  ขึ้น โดยสามารถแสดงรูปวงจรสมมูล และวงจร โครงสร้างภายใน ได้ตามรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



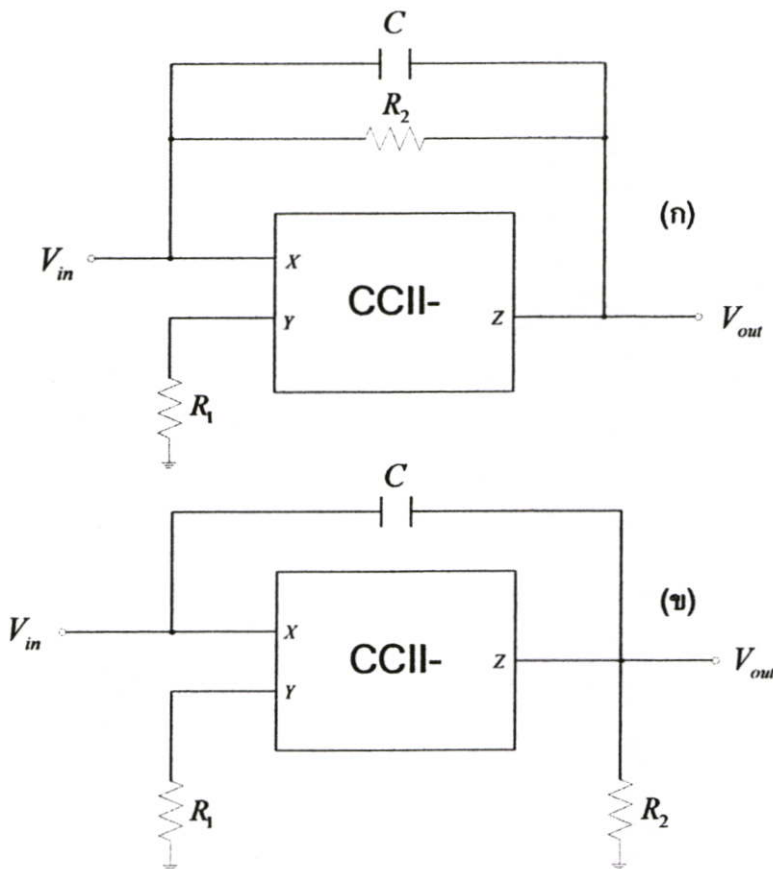
รูปที่ 3.3 สัญลักษณ์วงจร CCCII - แบบเอาต์พุตคู่



รูปที่ 3.4 รูปโครงสร้างวงจร CCCII- ที่มีอัตราขยายกระแสแบบเอาต์พุตคู่

### 3.3 วงจรโครงข่ายแบบผ่านหมดที่ทำงานในโหมดกระแส(CM-APS)

วงจรโครงข่ายสัญญาณแบบผ่านหมดทุกความถี่ (All-pass network) เป็นวงจรที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในงานระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุม เช่น เป็นวงจรชดเชยเฟส วงจรหน่วงสัญญาณ วงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งวงจรโครงข่ายผ่านหมดคือวงจรที่สามารถให้ความถี่ผ่านไปได้ทุกความถี่แต่เฟสของสัญญาณจะถูกเลื่อนไปคั้งนั้นจึงสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรเลื่อนเฟสวงจรโครงข่ายผ่านหมดที่ใช้วงจรสายพานกระแสนั้นมีมากมายแต่ในที่นี้ จะขอเลือกเอาเฉพาะวงจรที่ง่ายไม่ซับซ้อนและเข้าใจง่ายมากกล่าวถึงเท่านั้น โดยเป็นวงจรที่ทำงานใน โหมดแรงดันสองวงจรและวงจรที่ทำงานใน โหมดกระแสสองวงจร



รูปที่ 3.5 (ก) วงจร โครงข่ายผ่านหมดที่ทำงานใน โหมดแรงดันแบบที่1

(ข) วงจร โครงข่ายผ่านหมดที่ทำงานใน โหมดแรงดันแบบที่2

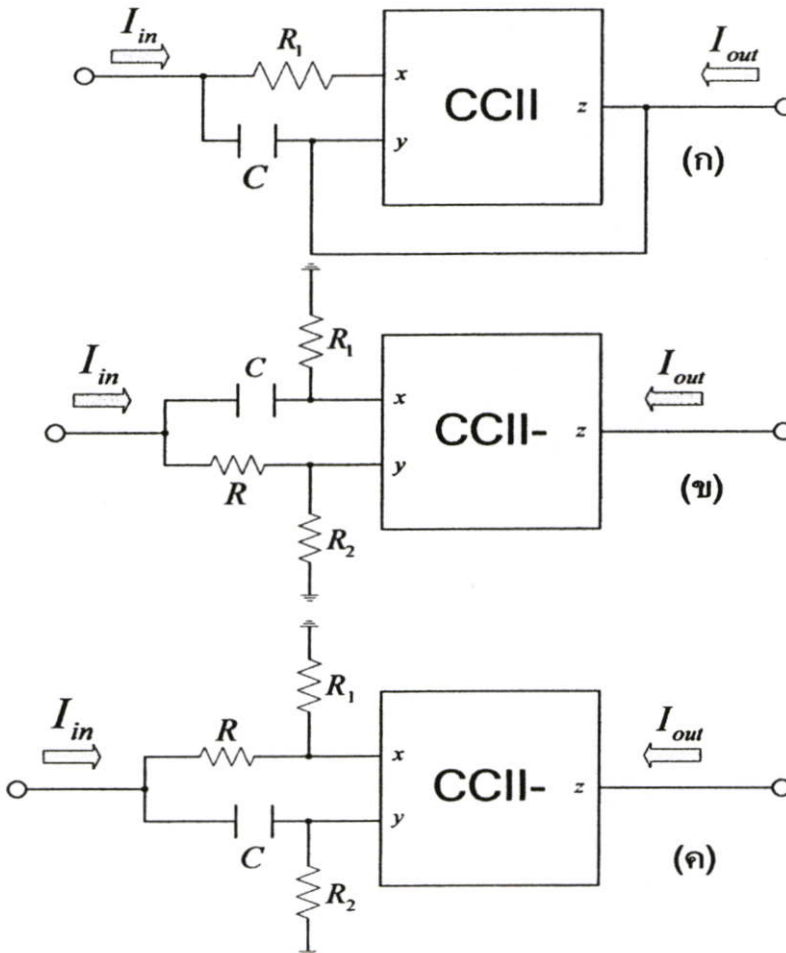
เมื่อพิจารณาโดยใช้คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสแล้วจะได้ค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันสำหรับวงจรทั้งสองดังนี้

$$H(s) = \frac{sRC - 1}{sRC + 1}$$

โดยกำหนดให้วงจรในรูปที่ 3.5 (ก) มีค่า  $R_2 = R_1 / 2$  และ  $R_1 = R_2 = R$  และวงจรในรูปที่ 3.5 (ข) มีค่า  $R_2 = R_1$  และ  $R_1 = R_2 = R$  จะทำให้ได้เฟสของค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันสำหรับวงจรทั้งสองดังนี้

$$|H(j\omega)| = 1 \text{ หรือ } \angle H(j\omega) = \pi - \tan^{-1}(\omega CR)$$

ซึ่งวงจรโครงข่ายสัญญาณแบบผ่านทุกความถี่ (รูปที่ 3.5) คือวงจรที่ทำงานในโหมดแรงดัน โดยใช้อุปกรณ์พาสซีฟสามตัวและวงจรสายพานกระแสแบบลบหนึ่งตัวซึ่งข้อดีของวงจรแบบนี้คือใช้อุปกรณ์ค่อนข้างน้อย



- รูปที่ 3.6 (ก) วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบผ่านหมดที่ทำงานใน โหมดกระแส(แบบที่ 1)  
 (ข) วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบผ่านหมดที่ทำงานใน โหมดกระแส(แบบที่ 2)  
 (ค) วงจร โครงข่ายสัญญาณแบบผ่านหมดที่ทำงานใน โหมดกระแส(แบบที่ 3)

และเมื่อใช้คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสจะได้ค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันสำหรับวงจรรูปที่ 3.6(ก) และ (ข) ดังนี้

$$H(s) = \frac{sRC - 1}{sRC + 1}$$

สำหรับวงจรรูปที่ 3.6 (ค) จะได้ค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันดังนี้

$$H(s) = \frac{1 - sRC}{1 + sRC}$$

เมื่อกำหนดให้วงจรรูปที่ 3.6(ข) และ (ค) มีค่า  $R_2 = R_1$  และ  $R_2 = R_1 = R$  เฟสของค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันสำหรับวงจรรูปที่ 3.6(ก) และ (ข) จะได้

$$|H(j\omega)| = 1 \text{ หรือ } \angle H(j\omega) = \pi - 2 \tan^{-1}(\omega CR)$$

และสำหรับวงจรรูปที่ 3.6 (ค) จะได้

$$|H(j\omega)| = 1 \text{ หรือ } \angle H(j\omega) = -2 \tan^{-1}(\omega CR)$$

### 3.4 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายการทำงานของวงจรต่างๆ ได้แก่ วงจร CCCII แบบบวก วงจร CCCII แบบลบ ที่มีเอาต์พุตคู่ และวงจร โคร่งข่ายแบบผ่านโหมดที่ทำงานในโหมดกระแสโดยละเอียด โดยวงจรที่กล่าวถึงนั้นเป็นวงจรที่จะถูกนำมาใช้ประกอบเป็นวงจรรวมในบทต่อไป

## บทที่ 4

# วงจรโครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแส ชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน

### 4.1 บทนำ

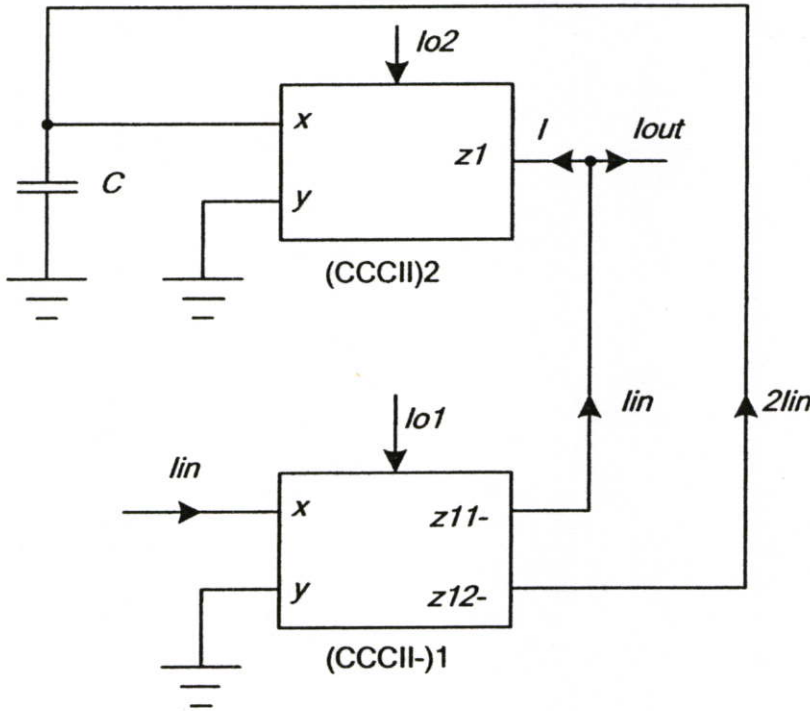
ในบทนี้จะนำเสนอวงจรแบบผ่านหมดในโหมดกระแส (Current-Mode All-Pass Section: CM-APS) ลำดับที่ 1 แบบง่ายขึ้นจากวงจรสายพานความคุมด้วยกระแสยุคที่ 2 แบบบวก (CCCII+) เอาต์พุตเดี่ยว วงจรสายพานควบคุมด้วยกระแสยุคที่ 2 แบบลบ (CCCII-) เอาต์พุตคู่ และตัวเก็บประจุต่อลงดิน วงจรดังกล่าวทำงานในโหมดกระแสซึ่งด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้งานเป็นวงจร โมโนลิธิค (monolithic) ได้โดยไม่ต้องมีภาคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ ในส่วนของวงจรกรองผ่านหมดในโหมดกระแสที่ได้นำเสนอนี้ก็มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานต่อภายนอก และสามารถปรับแต่งได้ทางอิเล็กทรอนิกส์จากการควบคุมกระแสของวงจรสายพานกระแสเอง โดยการใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดินทำให้วงจรนี้ทำให้ได้เปรียบในเรื่องของการสร้างขึ้นเป็นวงจรรวม [8], [9] โดยรายละเอียดของวงจรที่ได้ทำการวิจัยมีดังนี้

### 4.2 วงจรโครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแสชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน

วงจร CM-APS ลำดับที่ 1 แบบง่ายซึ่งประกอบด้วยวงจร CCCII+ วงจร CCCII- แบบเอาต์พุตคู่และตัวเก็บประจุแบบต่อลงดินนั้นสามารถแสดงดังรูปที่ 4.1 (หมายเหตุว่าการใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดินในทางปฏิบัติมีความดึงดูดใจมากกว่าการสร้างวงจรใช้งานจริง [8], [9]) จากการวิเคราะห์สามารถแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแสคือ

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1 - SR_{X2}C}{1 + SR_{X2}C} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 จะพบว่าวงจรในรูปที่ 4.1 แสดงความเป็นวงจรรองแบบผ่านหมดโหมคกระแส ลำดับที่ 1 เมื่อ  $R_{x2}$  คือ ค่าความต้านทานของวงจรสายพานซึ่งสามารถควบคุมได้จากกระแสไบอัส  $I_{o2}$  และ  $k$  คืออัตราส่วนการถ่ายโอนกระแสฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส และเมื่อพิจารณาจากวงจร ในรูปที่ 3.4 ในบทที่ 3 ที่ค่า  $k$  มีค่าเท่ากับ 2 ถูกกำหนดจากทรานซิสเตอร์  $Q_{16}$  และ  $Q_{19}$  ซึ่งมีพื้นที่ อิมิตเตอร์เป็น 2 เท่า



รูปที่ 4.1 วงจรผ่านหมดแบบง่ายลำดับที่หนึ่งซึ่งประกอบขึ้นจากวงจร CCCII วงจร CCCII-แบบ เอาต์พุตคู่และตัวเก็บประจุแบบต่อลงดิน

จากสมการที่ 4.1 ปรากฏว่าวงจรที่นำเสนอเป็นวงจรรองแบบผ่านหมดโหมคกระแส ลำดับที่ 1 แบบง่ายและจากสมการที่ 4.1 ยังพบอีกว่าวงจรสามารถเลื่อนเฟสได้ 0 ถึง  $-180$  องศา และยังพบว่าความถี่หักมุม  $\omega_0$  ของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$\omega_0 = \frac{1}{CR_{x2}} = \frac{2I_o}{V_T C} \quad (4.2)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.2 นี้เองทำให้พบว่าความถี่โพลของวงจรกรองแบบผ่านหมดสามารถควบคุมได้จากกระแส  $I_o$  ซึ่งคือกระแสไบอัสวงจรสายพานกระแสนั้นเอง

เช่นเมื่อกำหนดให้  $I_{o1} = I_{o2} = 100\mu A$  และ  $C = 12nF$  โดย  $V_T$  มีค่า  $26mV$  ที่อุณหภูมิห้องนำไปแทนที่ในสมการที่ 4.2

จะได้ 
$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{2I_o}{V_T C} = \frac{2 \times 100 \times 10^{-6}}{26 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^{-9}}$$

พบว่าความถี่หักมุม 
$$f = \frac{2 \times 100 \times 10^{-6}}{26 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^{-9} \times 2 \times \pi} = 100.6 kHz$$

และผลกระทบจากการไม่เป็นไปตามอุดมคติของอัตราขยายการถ่ายโอนกระแสของเอาต์พุตทั้งสองกำหนดได้เป็น  $\alpha_i$  และ  $\alpha_j$  สำหรับ  $i$ th CCCII ส่วน  $j$ th  $I_z$  สำหรับ CCCII

$$\text{เมื่อ } I_{zi} = \alpha_i I_{xi}, I_{z1i} = -\alpha_{1i} I_{x1i} \text{ และ } I_{z2i} = -\alpha_{2i} I_{x2i}$$

ซึ่งจะพิจารณาในลำดับต่อไป สมมุติให้วงจรกรองแบบผ่านหมดตามรูปที่ 4.1 ถูกวิเคราะห์ในเชิงของเหตุความไม่เป็นอุดมคติซึ่งจากสมการที่ 4.1 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{2\alpha_1\alpha_{22} - \alpha_{21} - \alpha_{21}SCR_{X2}}{1 + SCR_{X2}} \quad (4.3)$$

$$\text{เมื่อ } \alpha_i = (1 - \varepsilon_i), \alpha_{ij} = (1 - \varepsilon_{ij}), \varepsilon_j (|\varepsilon_j| \ll 1) \text{ และ } \varepsilon_{ij} (|\varepsilon_{ij}| \ll 1)$$

แสดงค่าความผิดพลาดตามกระแส ด้วยเหตุดังกล่าวและความไม่เป็นอุดมคติของวงจร CCCII วงจรในรูปที่ 4.1 จึงเป็นวงจรกรองแบบผ่านหมดให้ค่าอัตราขยายและความถี่หักมุมบิดเบือนไปเล็กน้อย

## บทที่ 5

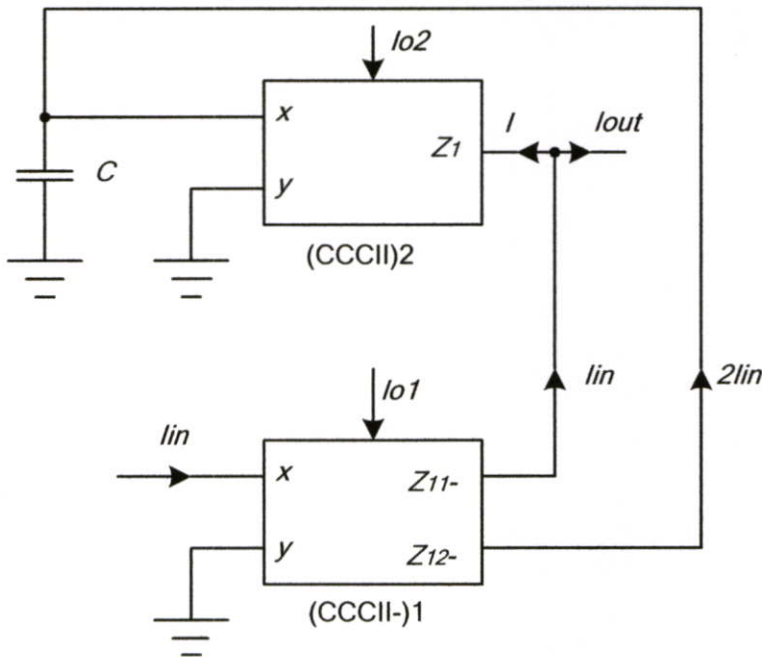
### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 5.1 บทนำ

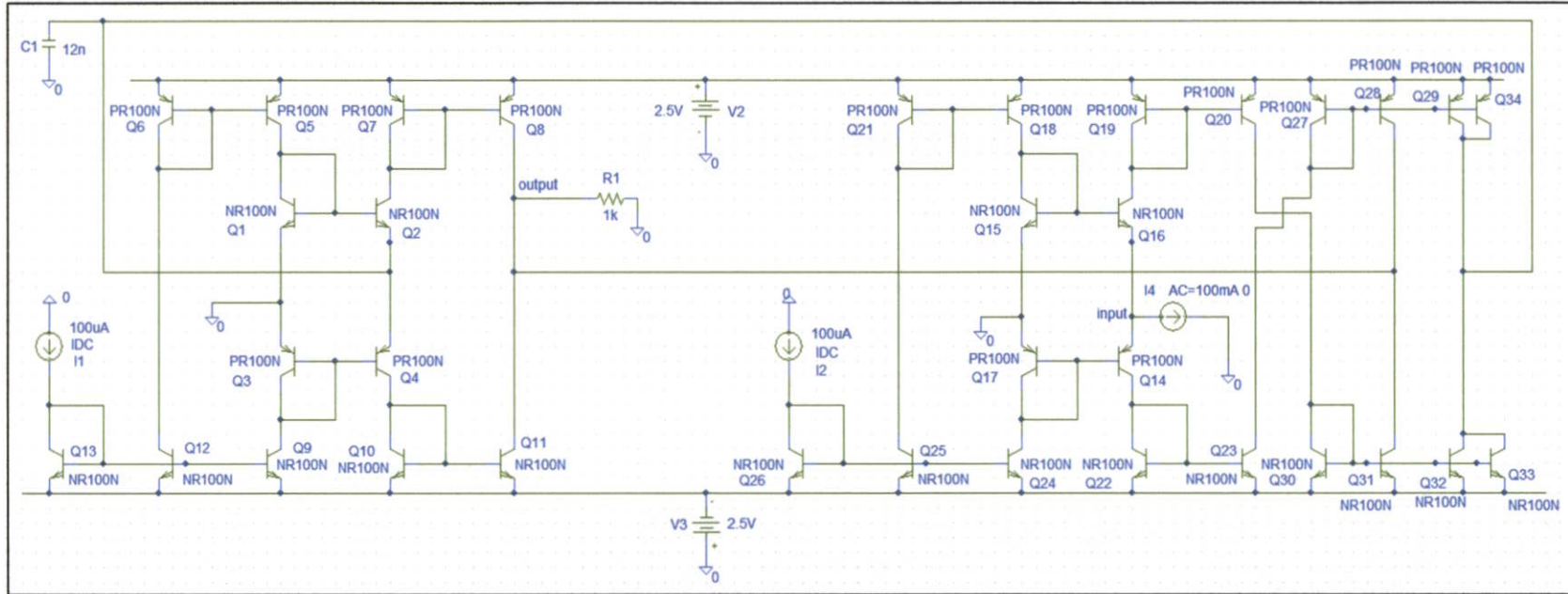
ในบทที่ 4 ที่ผ่านมา ได้กล่าวถึงหลักการทํางานและการวิเคราะห์วงจรต่างๆ ไปแล้ว ในบทนี้จะแสดงผลการจำลองแบบการทํางานของวงจรต่างๆ ว่า ให้ผลตรงตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ผ่านมาหรือไม่ โดยจะแสดงผลการทดลองของด้วยโปรแกรม PSPICE รวมถึงวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ เปรียบเทียบกับทฤษฎี และสมการที่ได้วิเคราะห์ไว้

#### 5.2 การทดลอง

โปรแกรม PSpice ถูกนำมาใช้เพื่อพิสูจน์การทํางานของวงจรตามรูปที่ 5.1 โดยสามารถพิจารณารูปโครงสร้างของวงจรภายในโดยละเอียดได้ตามรูปที่ 5.2 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด  $\pm 2.5$  โวลต์ และพารามิเตอร์ของแบบจำลอง BJT ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการเลียนแบบการทํางานใช้แบบจำลองของทรานซิสเตอร์เบอร์ NR100N และ PR100N [11]

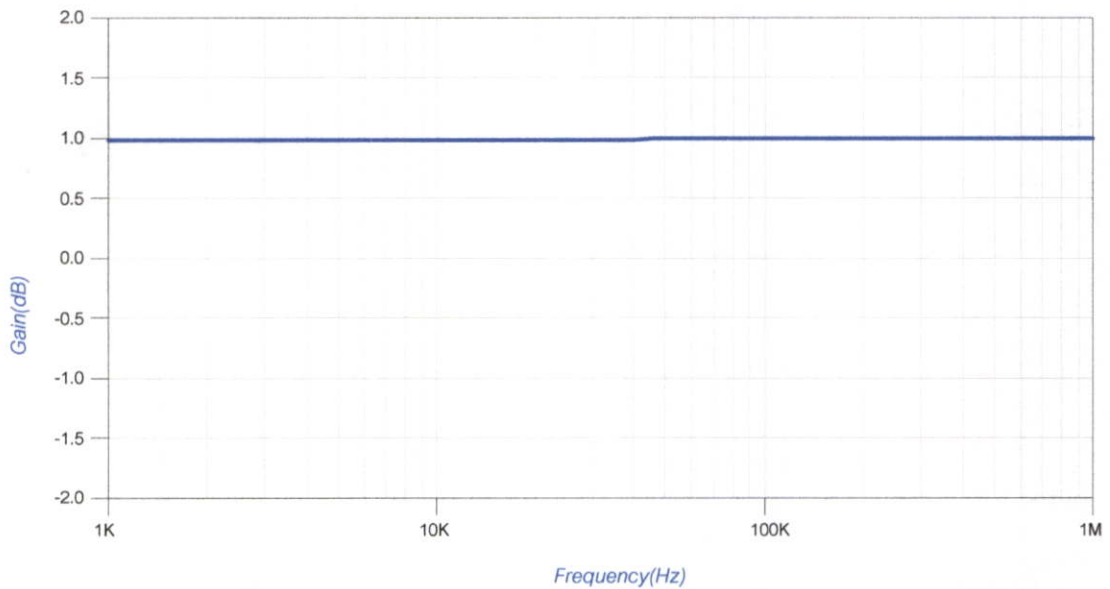


รูปที่ 5.1 วงจรผ่านหมดที่ประกอบขึ้นจากวงจร CCCII วงจร CCCII-แบบเอาต์พุตคู่และตัวเก็บประจุแบบต่อลงดินซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์ในบทนี้



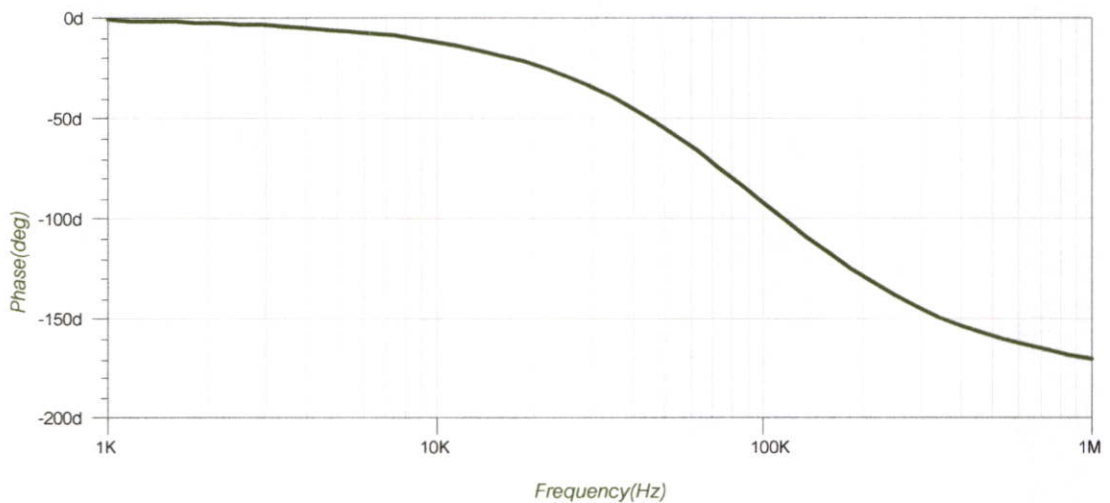
รูปที่ 5.2 แสดงรูปโครงสร้างของวงจรภายในของวงจรแบบผ่านหมุดตามรูปที่ 5.1 ที่ถูกเขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม Pspice เพื่อที่จะนำมาใช้ในการเลียนแบบการทำงานและวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

### 5.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์



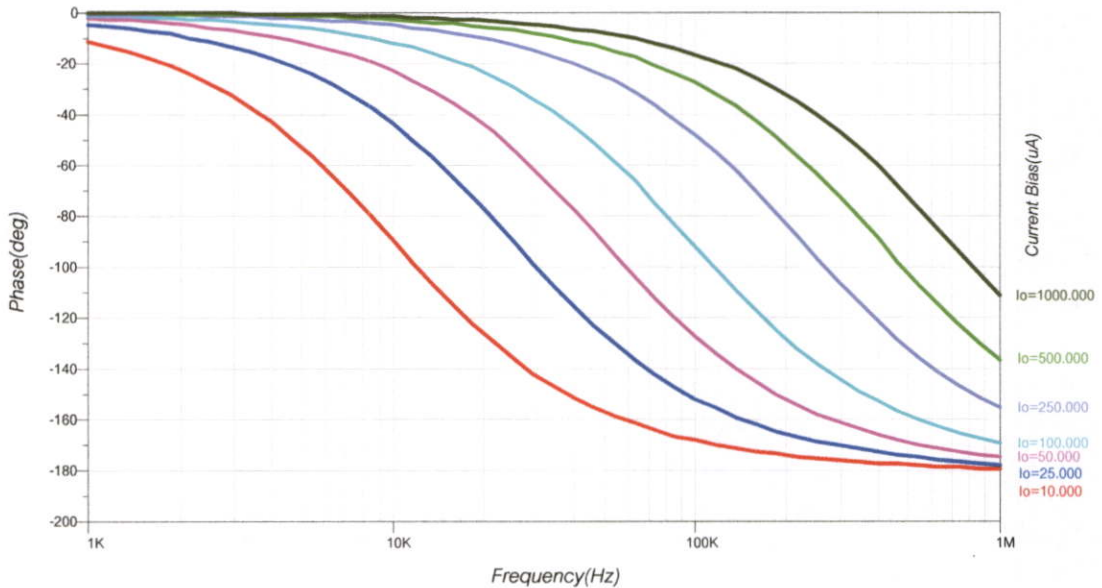
**รูปที่ 5.3** ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนกระแส ( $I_{out} / I_{in}$ ) ต่อความถี่ของสัญญาณอินพุตเมื่อใช้ตัวเก็บประจุขนาด 12nF และ  $I_{o1} = I_{o2}$  เท่ากับ  $100 \mu A$

จากรูปที่ 5.3 แสดงถึงผลตอบสนองความถี่ (Frequency Response) ของวงจรที่ได้ทำการออกแบบซึ่งพบว่าผลตอบสนองที่ได้นั้น เป็นวงจรโคจรข่ายแบบผ่านหมดซึ่งทำงานในโหมดกระแสตาม



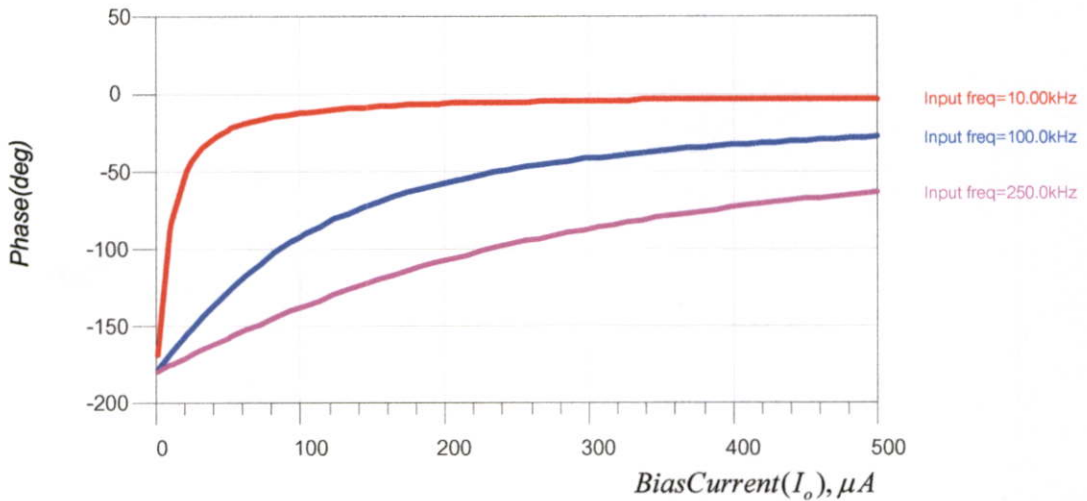
**รูปที่ 5.4** เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนกระแส ( $I_{out} / I_{in}$ ) ต่อความถี่เมื่อใช้ตัวเก็บประจุขนาด 12 nF และ  $I_{o1} = I_{o2}$  เท่ากับ  $100 \mu A$

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าเฟสของสัญญาณอินพุตนั้นจะถูกเลื่อนออกไปตามคุณสมบัติของวงจรเลื่อนเฟส และเมื่อพิจารณาจากรูปยังพบอีกว่าเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ต่างกันก็จะให้เฟสของสัญญาณที่เอาต์พุตที่แตกต่างกันไปด้วยจากรูปพบว่าเฟสที่  $-90$  องศา มีความถี่ห้กมูมที่  $100\text{kHz}$  ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความถี่ห้กมูมที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 ในบทที่ 4 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน



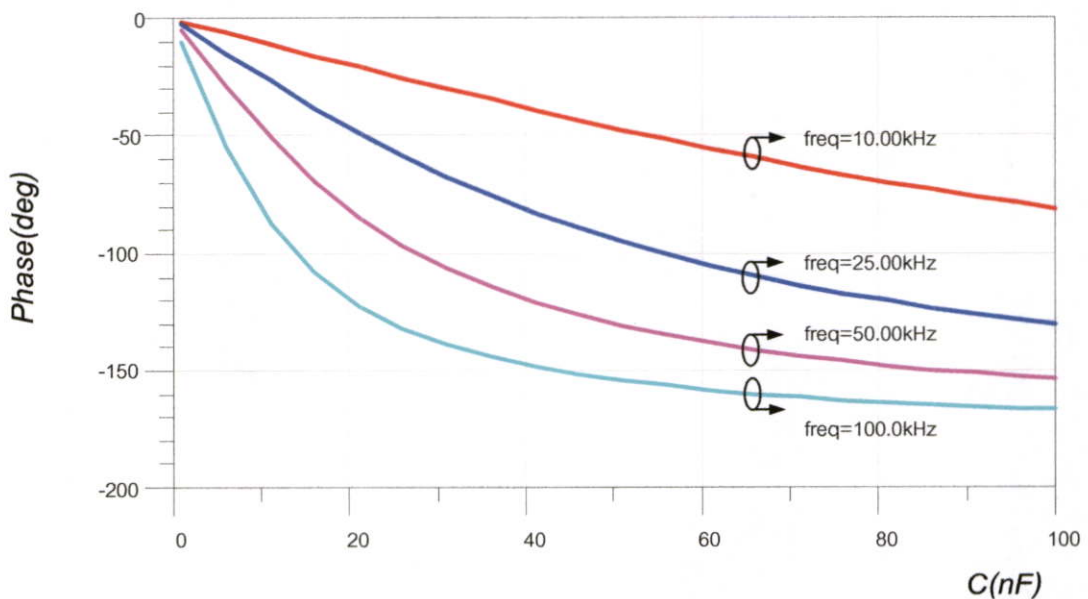
**รูปที่ 5.5** เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส ( $I_{out} / I_{in}$ ) ต่อความถี่เมื่อทำการป้อนกระแสไบอัส ( $I_o$ ) ค่าต่างๆ โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $12\text{nF}$

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.5 จะพบว่าที่เฟส  $-90$  องศาความถี่ห้กมูมของวงจรจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสที่มาไบอัส ( $I_o$ ) ซึ่งแสดงว่าความถี่โพลของวงจรแบบผ่านหมดสามารถควบคุมได้จากกระแส  $I_o$  ตามสมการที่ 4.2 ในบทที่ 4



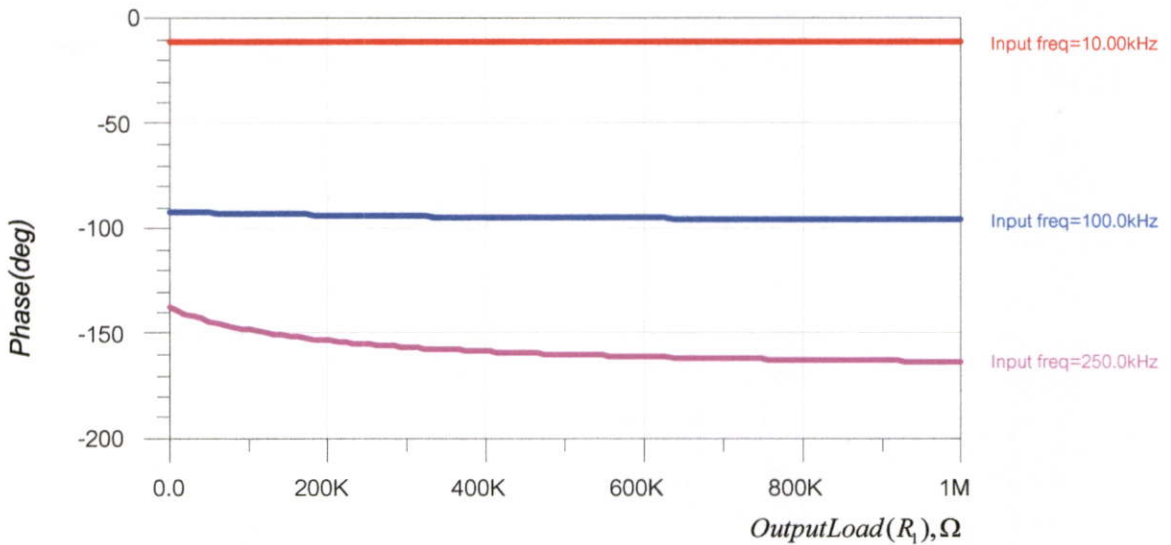
รูปที่ 5.6 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส ( $I_{out} / I_{in}$ ) ต่อกระแสไบอัส ( $I_o$ ) โดยทำการเปรียบเทียบที่ความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ต่างกันและใช้ตัวเก็บประจุขนาด 12nF

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.6 จะพบว่าที่ความถี่ต่างๆ กระแสไบอัส ( $I_o$ ) จะมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่ไวกว่าเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่ความถี่สูง



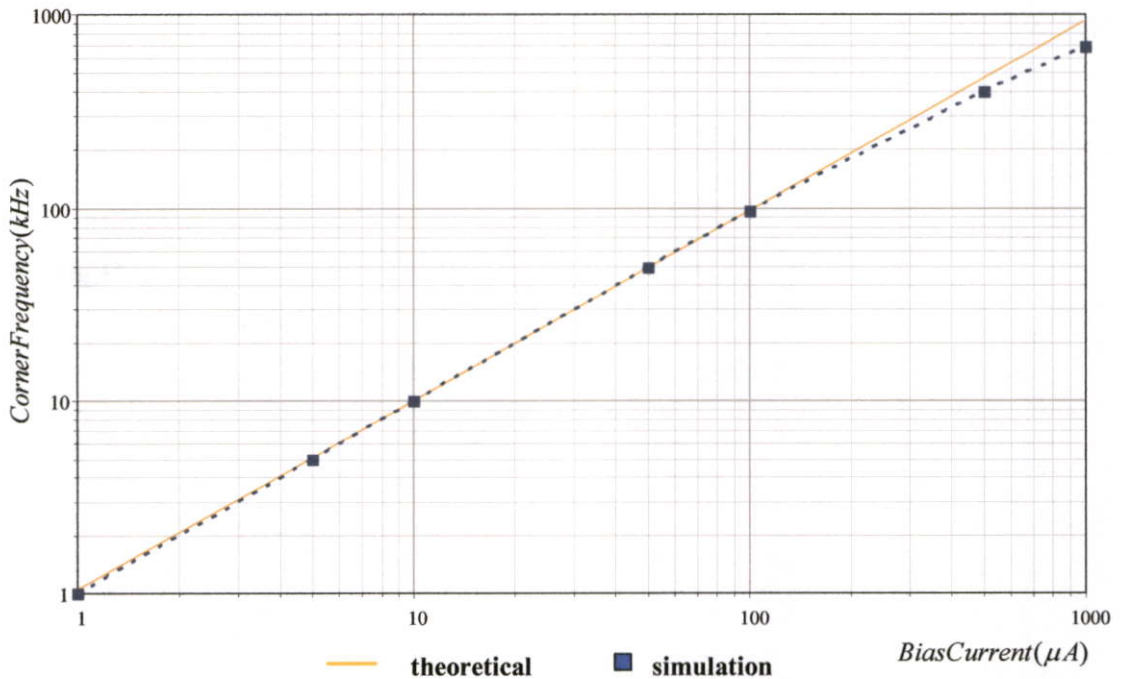
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส ( $I_{out} / I_{in}$ ) ต่อตัวเก็บประจุที่ต่อลงดินเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่ความถี่ต่างๆ

จากรูปที่ 5.7 จะพบว่าค่าของตัวเก็บประจุที่ต่อลงดินนั้นก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเฟสของสัญญาณเอาพุตที่เช่นกัน และยังพบว่าที่ความถี่สูงๆ ค่าตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ก็ยิ่งใช้ค่าน้อยซึ่งพบว่าผลของรูปที่ 5.7 นั้นสอดคล้องกับสมการที่ 4.2 ในบทที่ 4



**รูปที่ 5.8** การเปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันสัการถ่ายโอนกระแส ( $I_{out} / I_{in}$ ) ต่อ โหลดเอาพุตที่จะนำมาต่อใช้งาน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.8 จะพบว่าเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตให้วงจรทำงานในช่วงความถี่ต่ำ โหลดที่นำมาต่อต่อทางด้านเอาพุตจะไม่มีผลทำให้เฟสของวงจรเปลี่ยนไป แต่เมื่อใช้งานวงจรในช่วงความถี่สูงขึ้นพบว่า เฟสของสัญญาณจะเริ่มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.9 การปรับแต่งความถี่หักมุมด้วยกระแสไบอัส  $I_o$  เมื่อตัวเก็บประจุมีค่า 12 nF

รูปที่ 5.9 แสดงถึงผลการเลียนแบบการทำงานของความถี่หักมุมเมื่อเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกระแส ( $I_{out} / I_{in}$ ) มีค่าเฟส  $-90$  องศา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัส  $I_o$  ค่าต่างๆ โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 12 nF ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.9 จะพบว่าผลการเลียนแบบการทำงานของความถี่หักมุมนั้นมีความเที่ยงตรงและปรับแต่งได้อย่างเป็นเชิงเส้นกับกระแส

## 5.4 กล่าวสรุป

จากผลการทดลองด้วยโปรแกรม PSPICE ของวงจรแบบผ่านหมดในโหมดกระแส (Current-Mode All-Pass Section: CM-APS) ลำดับที่ 1 แบบง่ายขึ้นจากวงจรสายพานควบคุมด้วยกระแสยุคที่ 2 แบบบวก (CCCII+) เอาต์พุตเดี่ยว วงจรสายพานควบคุมด้วยกระแสยุคที่ 2 แบบลบ (CCCII-) เอาต์พุตคู่ และตัวเก็บประจุต่อลงดิน พบว่าผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องกับสมการที่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้ ในบทที่ 3 และในบทที่ 4 แต่ผลที่ได้นั้นอาจจะไม่สอดคล้องกับสมการตลอดช่วงการใช้งาน ทำให้ช่วงการใช้งานนั้นแคบลง และในส่วนของผลการทดลองที่วัดความเป็นเชิงเส้นของวงจรมัน แสดงให้เห็นว่าวงจรมีความเป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้นวงจรแบบผ่านที่ได้ออกแบบมานี้ สามารถปรับเลื่อนเฟสได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัสและค่าตัวเก็บประจุ อีกทั้งยังสร้างมาจากวงจรพื้นฐานทั้งสิ้น จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในวงจรรวมต่อไป

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบวงจร โครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแสชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน โดยสร้างจากวงจร CCCII+, วงจร CCCII- แบบเอาต์พุตคู่ และตัวเก็บประจุต่อลงดิน

โดยในบทที่ 2 นั้น ก็ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน และหลักการทั่วไปของวงจรสายพานกระแสในชุดต่างๆ วงจร โครงข่ายแบบผ่านหมดรวมถึงประโยชน์ของมัน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวงจรเลื่อนเฟสตามต้องการ ส่วนในบทที่ 3 และ 4 นั้น เป็นการวิเคราะห์และอธิบายวงจรต่างๆ ที่นำมาใช้ ออกแบบเป็นวงจร โครงข่ายแบบผ่านหมด รวมทั้งแสดงโครงสร้างภายในของวงจรมานั้น โดยวงจรดังกล่าวทำงานซึ่งมีข้อดีคือสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องมีภาคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณและสามารถปรับแต่งได้ทางอิเล็กทรอนิกส์จากการควบคุมกระแสไบอัสของวงจรสายพานเอง อีกทั้งการทำงานในโหมดกระแสมีความเป็นเชิงเส้นสูง และมีผลจากอุณหภูมิต่ำ

จากนั้นจะนำวงจรต่างๆ ที่ได้วิเคราะห์การทำงานไว้มาทดลอง ซึ่งทำการทดลองด้วยการจำลองแบบการทำงานในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการวิเคราะห์ในบทที่ผ่านมา ซึ่งผลการทดลองของโครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแสชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดิน ก็ให้ผลที่สอดคล้องกับสมการที่ได้วิเคราะห์ไว้ ผลการทดลองของโครงข่ายแบบผ่านหมดในโหมดกระแสชนิดปรับแต่งด้วยกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อลงดินก็มีความเป็นเชิงเส้นสูงอย่างเห็นได้ชัด สามารถปรับค่ากระแสไบอัสวงจรเพื่อเปลี่ยนแปลงเฟสได้ตามต้องการ ซึ่งถือว่ายู่ในเกณฑ์ดี

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าการออกแบบของงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วงจรสายพานกระแสชุดที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส(CCCII) ซึ่งมีข้อดีเหนือกว่าวงจรสายพานกระแสชุดที่สองอื่นคือ สามารถควบคุมค่าความต้านทานแฝง(Parasitic Resistance) ที่ขา X ได้ด้วยกระแสไบอัสแต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานนี้ก็แปรผันโดยตรงกับศักดาความร้อน(Thermal Voltage) ซึ่งหมายความว่าคุณสมบัติของวงจรที่ใช้ งานจะมีความเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้

ในส่วนของความเป็นเชิงเส้น วงจรที่ได้ทำการออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ แม้จะมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีแล้ว แต่เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงอาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจาก อิมพีแดนซ์ของโหลดที่นำมาต่อใช้งานทางด้านเอาต์พุต จะเริ่มมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเฟสได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Higashimura, and Y. Fukui, "Realization of current mode all-pass networks using a current conveyor," IEEE Trans.Circuits Syst., vol.37, pp.660-661, May 1990.
- [2] A. M. Soliman, "Generation of current conveyor based all-pass filters from op-amp based circuits," IEEE Trans. Circuits Syst., II, vol. 44, pp. 324-330, April 1997.
- [3] M. Higashimura, "Current-mode allpass filter using FTFN with grounded capacitor", Electron. Lett., vol. 27 pp. 1182-1183, June 1991.
- [4] A. Toker, S. Ozoguz, O. Cicekoglu, and C. Acar, "Current-mode all-pass filters using current differencing buffered amplifier and a new high-Q bandpass filter configuration," IEEE Trans. Circuits Syst., II, vol.47, pp. 949-954, September 2000.
- [5] S. Maheshwari, and I. A. Khan, "Novel first order all-pass sections using a single CCIII," Int. J. Electronics, vol.88, pp.773-778, 2001.
- [6] A. Fabre, O. Wiest, and C. Boucheron, "Current controlled bandpass filter based on Translinear conveyors," Electron Letts., vol. 31, pp. 1727-1728, September 1995.
- [7] S. Maheshwari, and I. A. Khan, "Simple first-order translinear-C current-mode all-pass sections," Int. J. Electronics, vol.90, pp.79-85, 2003
- [8] M. Bhusan, and R. W. Newcomb, "Grounding of capacitors in integrated circuits," Electron. Letts., vol. 3, pp. 148-149, 1967.
- [9] K. Pal, and R. Singh, "Inductorless current conveyor allpass filter using grounded capacitors," Electron. Letts., vol. 18, pp. 47-48, 1982.
- [10] M. A. Abuelma'atti, and M. A. Al-Qahtani, "A new current-controlled multiphase sinusoidal oscillator using translinear current conveyor," IEEE Trans. Circuits Syst., I, vol. 45, pp. 881-885, July 1998.

**ภาคผนวก**

## ภาคผนวก ก.

โมเดลทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

**1. ชนิด NPN**

.MODEL NR100N NPN (

IS=121E-018 BF=137.5 IRB=0

NF=1 NR=1 VAF=159.4

IKF=6.974E-3 ISE=36E-16 ISC=0

NE=1.713 BR=0.7258 VAR=10.73

IKR=2.198E-3

RE=1

RB=524.6

RBM=25

RC=50

CJE=0.214E-12

VJE=0.5

MJE=0.28

CJC=0.983E-13

VJC=0.5

MJC=0.3

XCJC=0.034

CJS=0.913E-12

VJS=0.64

MJS=0.4

FC=0.5

TF=0.425E-9

TR=0.425E-8

EG=1.206

XTB=1.538

XTI=2)

## 2. ชนิด PNP

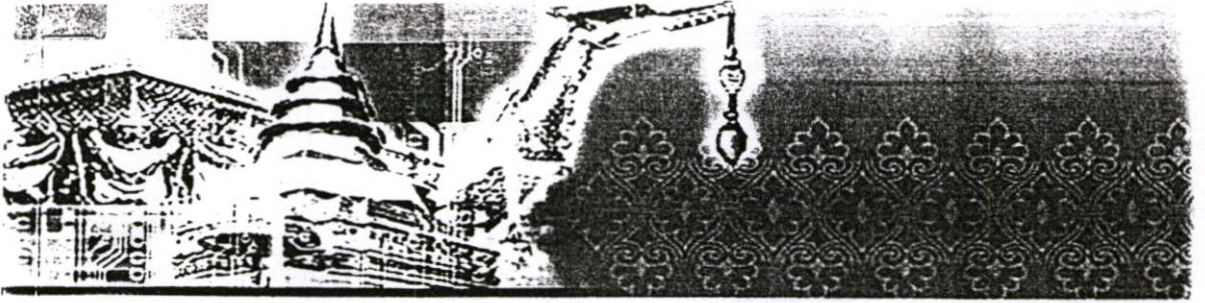
.MODEL PR100N PNP (

IS=73.5E-18    BF=110            NF=1  
VAF=51.8      IKF=2.359E-3            ISE=25.1E-16  
NE=1.650      BR=0.4745                VAR=9.96  
IKR=6.478E-3   NR=1            ISC=0  
NC=2  
RE=3  
RB=327  
IRB=0  
RBM=24.55  
RC=50  
CJE=0.180E-12  
VJE=0.5  
MJE=0.28  
CJC=0.164E-12  
VJC=0.8  
MJC=0.4  
XCJC=0.037  
CJS=1.03E-12  
VJS=0.55  
MJS=0.35  
FC=0.5  
TF=0.610E-9  
TR=0.610E-8  
EG=1.206  
XTB=1.866  
XTI=1.7)

## ภาคผนวก ข.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Montree Kumngern, Passaron Sampattavanich, Pipat Prommee and Kobchai Dejhan, "A capacitor-grounded current-tunable current mode all-pass network," Proc. IEEE TENCON 2004, Chiangmai, Thailand, Volume D, pp.384 – 386, Vol. 4, 21-24 November 2004.



# TENCON 2004

Conference Proceedings

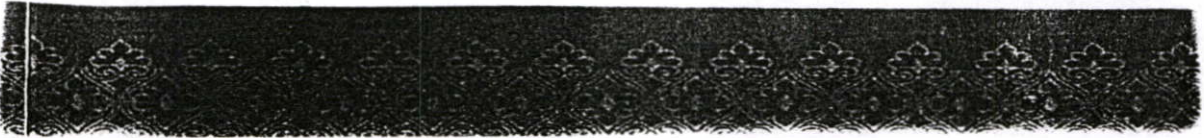
*Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering*

**21 - 24 November 2004, Chiang Mai, THAILAND**

**Organizer: IEEE Thailand Section**

*Sponsored by: IEEE Region 10*

**Venue: Lotus Hotel Pang Suan Kaew**



# A Capacitor-Grounded Current-Tunable Current Mode All-Pass Network

Montree Kumngern, Passaron Sampattavanich, Pipat Prommee and Kobchai Dejhan

Faculty of Engineering and Research Center for Communication and Information Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Tel: 66-2326-4238, 66-2326-4242, Fax:66-2326-4554,

E-mail:montree217@hotmail.com, {pipat, kobchai}@telecom.kmitl.ac.th,

## ABSTRACT

A first-order current-mode all-pass section (CM-APS) using two current-controlled conveyors (CCCII) and a grounded capacitor are presented. The current-mode first order section consists of one single-output CCCII, one dual-output CCCII and one grounded capacitor. The circuit operation in current mode; and it can be directly employed as a subsystem of monolithic circuit. PSpice simulation results are carried out in order to verify the theory.

## 1. INTRODUCTION

All-pass filters, having constant frequency independent gain, with electronic-controlled phase shifts, are widely useful in many applications, for example, they can be employed as the frequency determining elements in electronic-controlled oscillator, or they can be directly employed as phase modulators in communication systems. Many all-pass circuits exist in the literature. However, the majority of them have been designed using one or more CCII [1]-[2], FTFN [3], CDBA [4], CCIII [5] with passive RC elements. Hence, they are not easily electronic adjustable.

By using the second-generation current controlled conveyors (CCCII), current conveyor applications can be extended to the domain of electronically adjustable function [6]. In the recent past, a all-pass filter electronically adjustable transfer functions employing one or more CCCII have been proposed in [7], but these proposed required the floating capacitors, therefore it not suitable for IC implementation.

In this paper, a simple first-order CM-APS using one positive single-output current controlled conveyor (CCCII+), one negative dual-output current controlled conveyor (CCCII-) and a single grounded capacitor is proposed. The circuits also operate in current mode. Thus it can be directly employed in many monolithic circuits without extra conversion stages. The proposed current-mode all-pass sections require no external resistor and are electronically adjustable by controlling the bias current of conveyor. The use of grounded capacitors is beneficial to IC implementation [8], [9].

## 2. PROPOSED CIRCUITS

The port relations of a CCCII is shown in Fig. 1, and characterized by the relationship;

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

When  $k$  is current transfer ratio of circuit,  $R_x$  is input resistance at port X, for  $I_x = kI_x$  and  $I_x = -kI_x$  can obtained the positive (CCCII+) and negative (CCCII-) current conveyors respectively. Bipolar realization circuit of CCCII- is illustrated in Fig. 2 [11]. A dual output CCCII- has an additional mirror stage to provide another Z- output. For the circuit of Fig. 2 the parasitic resistance  $R_x$ , can be expressed as;

$$R_x = \frac{V_T}{2I_o} \quad (2)$$

Where  $V_T$  is the thermal voltage and  $I_o$  is the bias current of the conveyor.

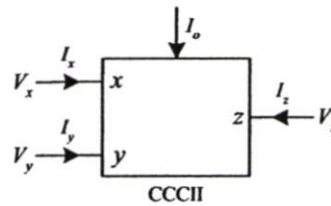


Fig. 1 CCCII symbol.

The proposed first-order CM-APS with one CCCII+ and one dual-output CCCII- and a grounded capacitor is shown in Fig. 3. Note that the use of grounded capacitors is particularly attractive for integrated circuit implementation [8], [9]. Routine analysis yields the following current transfer function:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1 - R_{x2}Cs}{1 + R_{x2}Cs} \quad (3)$$

From (3), it is seen that the circuit of Fig. 3 realizes a first-order current-mode all-pass filter, where  $R_{x2}$  is the intrinsic resistance of the conveyor controllable

by the bias current  $I_{o2}$ ,  $k$  is current transfer ratio. The current transfer function for the circuit of Fig. 4 with  $k=2$  is achieved by multiple transistors Q16 and Q19 in which 2 times of emitter area of transistors.

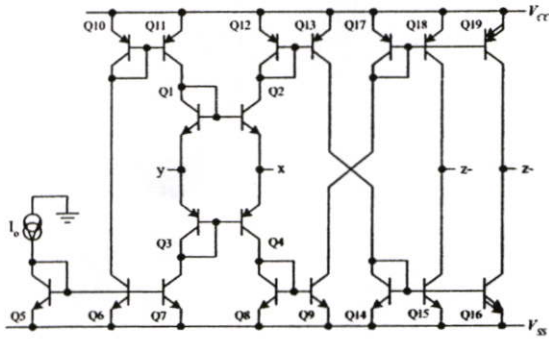


Fig. 2 Schematic implementation of dual output and having current gain CCCII-.

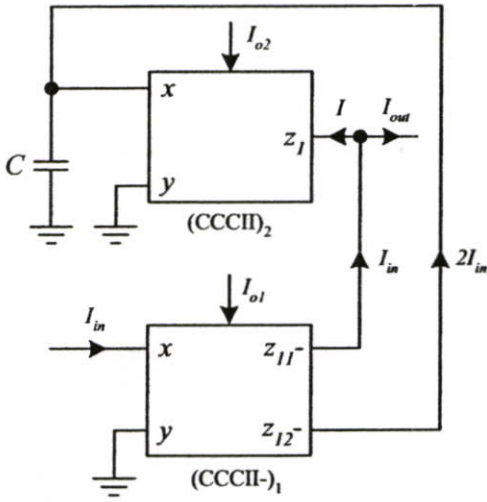


Fig. 3 Simple all-pass section with one CCCII, one dual-output CCCII- and one grounded capacitor.

The equation (3) implies that the proposed circuits easily realize first order current mode all-pass filter. From equation (3) it can be seen that the circuit yields a phase shift from 0 to -180. The corner frequency  $\omega_o$  of the circuit is found as:

$$\omega_o = \frac{1}{CR_{x2}} = \frac{2I_o}{V_T C} \tag{4}$$

From equation (4) one can realize that the pole frequency of the all-pass filter can be controlled with adjusting current  $I_o$ .

The effect of the non-ideal current transfer gains of both outputs defined by  $\alpha_i$  and  $\alpha_{ij}$  for the  $i$ th CCCII, the  $j$ th IZ of CCCII, where  $I_{z1} = \alpha_i I_{x1}$ ,  $I_{z1} = -\alpha_{i1} I_{x1}$  and  $I_{z2} = -\alpha_{i2} I_{x2}$ , is considered next. Assuming that all-pass filter of Fig. 3 is analyzed taking into account the non-idealities of a CCCII equation (3) can be modified. The transfer function can be rewritten as;

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{2\alpha_i \alpha_{22} - \alpha_{21} - \alpha_{21} sCR_{x2}}{1 + sCR_{x2}} \tag{5}$$

Where  $\alpha_i = (1 - \epsilon_i)$ ,  $\alpha_{ij} = (1 - \epsilon_{ij})$ ,  $\epsilon_j (|\epsilon_j| \ll 1)$ , and  $\epsilon_{ij} (|\epsilon_{ij}| \ll 1)$  denote the current tracking error. Thus, even with a non-ideal CCCII, the circuit of Fig. 3 is capable of realizing an all-pass filter with a slightly altered value of the gain and corner frequency.

### 3. SIMULATION RESULTS

To verify the proposed circuit, PSPICE simulation is used. The CCCII- is simulated using the schematic implementation shown in Fig. 2 with a DC supply voltage  $\pm 2.5V$ . The BJT model parameters of the NR100N and PR100N transistors are used in the simulation [11]. Fig. 4 show the magnitude and phase of current transfer function versus frequency obtained from the simulation using, as an example, capacitor  $C=12nF$ ,  $I_{o1}=I_{o2}=100\mu A$ . It can be seen from Fig. 4 that, for the phase shift at -90 degree, the corresponding corner frequency are 100 kHz.

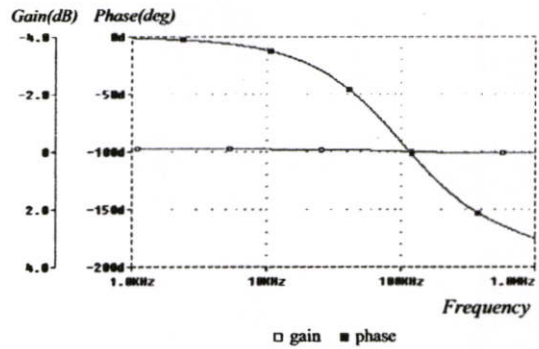


Fig. 4 Magnitude and phase characteristics of  $I_{out}/I_{in}$  versus frequency using the capacitor  $C=12nF$  and  $I_{o1}=I_{o2}=100\mu A$ .

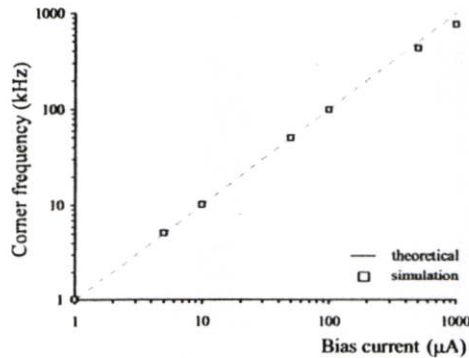


Fig. 5 Current-tuning of corner frequency with bias current  $I_o$  for  $C=12nF$ .

Fig. 5 depicts the simulation results of both the corner frequency and corresponding magnitude of  $I_{out}/I_{in}$ , for the phase shift at -90 degree, versus the

bias current  $I_o$ , using fixed capacitor  $C=12\text{nF}$ . It can be seen from Fig. 5 that the simulation results are consistent, and the corner frequency is linear current-tunable.

#### 4. CONCLUSIONS

In this paper, we realize electronic tunable simple current mode first order all-pass filters, where one CCCII+, one dual-output CCCII- and one grounded capacitor was used. The circuit is high impedance outputs, which enables easy cascading for applications. The use of grounded capacitor is more beneficial to IC implementation than the previous proposed.

#### 5. ACKNOWLEDGMENTS

This research is financial supported form the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0166/2546) to student's initials and advisor's initials.

#### 6. REFERENCES

- [1] M. Higashimura, and Y. Fukui, "Realization of current mode all-pass networks using a current conveyor," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, pp. 660-661, May 1990.
- [2] A. M. Soliman, "Generation of current conveyor based all-pass filters from op-amp based circuits," *IEEE Trans. Circuits Syst., II*, vol. 44, pp. 324-330, April 1997.
- [3] M. Higashimura, "Current-mode allpass filter using FTFN with grounded capacitor", *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 1182-1183, June 1991.
- [4] A. Toker, S. Ozoguz, O. Cicekoglu, and C. Acar, "Current-mode all-pass filters using current differencing buffered amplifier and a new high-Q bandpass filter configuration," *IEEE Trans. Circuits Syst., II*, vol. 47, pp. 949-954, September 2000.
- [5] S. Maheshwari, and I. A. Khan, "Novel first order all-pass sections using a single CCIII," *Int. J. Electronics*, vol. 88, pp. 773-778, 2001.
- [6] A. Fabre, O. Wiest, and C. Boucheron, "Current controlled bandpass filter based on translinear conveyors," *Electron Lett.*, vol. 31, pp. 1727-1728, September 1995.
- [7] S. Maheshwari, and I. A. Khan, "Simple first-order translinear-C current-mode all-pass sections," *Int. J. Electronics*, vol. 90, pp. 79-85, 2003.
- [8] M. Bhusan, and R. W. Newcomb, "Grounding of capacitors in integrated circuits," *Electron. Lett.*, vol. 3, pp. 148-149, 1967.
- [9] K. Pal, and R. Singh, "Inductorless current conveyor allpass filter using grounded capacitors," *Electron. Lett.*, vol. 18, pp. 47-48, 1982.
- [10] M. A. Abuelma'atti, and M. A. Al-Qahtani, "A new current-controlled multiphase sinusoidal oscillator using translinear current conveyor,"

*IEEE Trans. Circuits Syst., I*, vol. 45, pp. 881-885, July 1998.

- [11] D. R. Frey, "Log-domain filter: an approach to current-mode filter," *IEE Proceedings-G, Circuit device and systems*, vol. 140, pp. 406-416, 1990.

## ประวัติผู้เขียน

|                    |  |
|--------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล       | นายภาสกร สัมปัดตะวนิช  |
| วัน เดือน ปีเกิด   | 13 พฤษภาคม 2524  |
| ที่อยู่            | 9/204 หมู่1 หมู่บ้านบัวทองเคหะ ต.บางบัวทอง อ.บางบัวทอง<br>จ.นนทบุรี 11110 โทร.081-642-7987                     |
| E-mail Address     | passaron@p-hz.com  |
| ประวัติการศึกษา    | 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง               |
| ความชำนาญเฉพาะด้าน | 1.) ระบบโทรคมนาคมสื่อสารไร้สาย<br>2.) การออกแบบวงจรความถี่สูง<br>3.) การออกแบบวงจรขยายกำลัง<br>4.) VLSI Design |