

วงจรรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมอดมอดนำแบบสมดุล  
และปรับค่าความถี่ด้วยกระแส

A Fully-Balanced Current-Tunable Phase-Lead All-Pass Filter

ภูมินทร์ สุวรรณธาดา<sup>1</sup> ณัฐวุฒิ สุวรรณทา<sup>2</sup> และ วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูลย์<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ <sup>2</sup>อาจารย์ <sup>3</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมอดมอดนำ วงจรจะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ โดยที่สถาปัตยกรรมของวงจรไม่สลับซับซ้อน และ สมดุลด้วยสัญญาณความแตกต่าง วงจรประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เพียง 6 ตัว และตัวเก็บประจุอีกหนึ่งตัว โดยปราศจากตัวต้านทานภายนอกและเงื่อนไขการสมดุลกันของอุปกรณ์ ทำให้เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม จากผลการจำลอง ความถี่จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่ากระแส เมื่อกระแสมีค่ามากขึ้นจะส่งผลต่อความถี่ให้มีความถี่สูงขึ้นเช่นกัน ความถี่จะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ และความถี่สูงสุด 250 MHz

Abstract

A new integrable fully-balanced current-tunable in phase-lead all-pass filter is presented. The architecture of the circuit is relatively simple and symmetry with differential signals consisting of merely 6 NPN Bipolar transistors. Without external resistors and matching condition, the proposed circuit is very appropriate to further develop into an integrated circuit. Simulation results shown that: frequency is a function of bias current- the increasing currents effect the higher frequency, frequency is a function of capacitance, low-power-consumption and the maximum useful frequency of 250 MHz

คำสำคัญ : ปรับความถี่ด้วยกระแส สมดุล วงจรรองสัญญาณผ่านทั้งหมด

Keywords : Current-tunable, Fully balanced, All-Pass Filter

\*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ wor\_nui@yahoo.com โทร. 08 6851 4433

## 1. บทนำ

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด (All Pass Filter, APF) คือ วงจรที่ใช้กรองสัญญาณผ่านทุกความถี่ โดยสัญญาณที่ผ่านจะมีขนาดเท่ากับสัญญาณอินพุตแต่มีเฟสแตกต่างจากสัญญาณอินพุต 90 องศา ด้วยคุณลักษณะดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวงจรต่างๆ ทั้งในระบบไฟฟ้าสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์ ยกตัวอย่างเช่น วงจรมอดูเลต (ประกาศิต และคณะ, 2554) และวงจรเฟสล็อกลูป (Phase Lock Loop) (อิศราวุธ และคณะ, 2544) เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดนิยมนำมาพัฒนาโดยใช้ออปแอมป์ [xx-xx] และทรานซิสเตอร์ [xx-xx] ซึ่งวงจรกรองความถี่ผ่านทั้งหมดที่ถูกพัฒนาโดยออปแอมป์จะใช้อุปกรณ์จำนวนมากและใช้กำลังไฟฟ้าสูง ขณะที่วงจรกรองความถี่ผ่านทั้งหมดที่ถูกพัฒนาโดยทรานซิสเตอร์เป็นการพัฒนาเพื่อแก้ไขการใช้พลังงานจำนวนมากและการใช้กำลังไฟฟ้าสูงของออปแอมป์ อย่างไรก็ตามการใช้ทรานซิสเตอร์แบบไม่สมดุลส่งผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวนสูง ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านทั้งหมดที่โดยทรานซิสเตอร์แบบสมดุลเพื่อลดสัญญาณรบกวนดังกล่าว และสามารถปรับความถี่ด้วยกระแส แต่ยังคงใช้กำลังไฟฟ้าสูงเนื่องจากมีจำนวนทรานซิสเตอร์ที่มาก

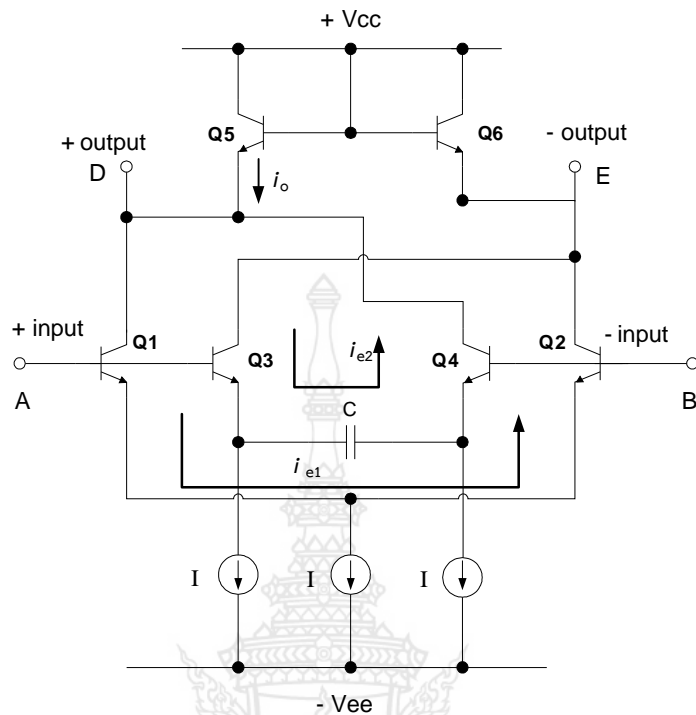
บทความนี้จึงนำเสนอวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมุมมองานำแบบสมดุลและปรับค่าความถี่ด้วยกระแส โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบโพลาร์ NPN มีจำนวนทรานซิสเตอร์น้อยเพื่อลดการใช้กำลังไฟฟ้า และวงจรต่อแบบสมดุลเพื่อลดสัญญาณรบกวน

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมุมมองานำแบบสมดุลและปรับค่าความถี่ด้วยกระแสโดยใช้ทรานซิสเตอร์จำนวน 6 ตัว แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย วงจรทรานคอนดักแตนท์ซัดที่ 1 (Q1 และ Q2) วงจรทรานคอนดักแตนท์ซัดที่ 2 (Q3 และ Q4) และภาระโหลด (Q5 และ Q6) จากรูปที่ 1 วงจรทรานคอนดักแตนท์ซัดที่ 1 รับสัญญาณแรงดัน  $v_{in}$  ที่โหนด A และ B ส่งผลให้เกิดกระแสอิมิตเตอร์  $i_{e1}$  ไหลจากขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 ไปยังขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q2 และส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์  $i_{c1}$  ไหลจากโหนด E ไปยังโหนด D ขณะสัญญาณแรงดัน  $v_{in}$  ที่โหนด A และ B ส่งผลให้เกิดกระแสอิมิตเตอร์  $i_{e2}$  ไหลจากขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q3 ไปยังขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q4 เช่นกัน และส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์  $i_{c2}$  ไหลจากโหนด D ไปยังโหนด E สัญญาณเอาพุต  $v_o$  เกิดจากการหักล้างกันของกระแสคอลเลคเตอร์  $i_{c1}$  และ  $i_{c2}$  แล้วไหลผ่านโหลดจากโหนด D ไปยังโหนด E

กำหนดให้ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ของ Q1 ถึง Q2 มีค่าเท่ากับ  $r_e = r_{e1} = r_{e2} = 2V_T / I$  เมื่อ  $r_{e1}$  และ  $r_{e2}$  คือ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 ถึง Q2 และ  $V_T = 0.025V$  คือ แรงดันเนื่องจากความร้อน (thermal voltage) ที่อุณหภูมิห้อง และ  $r_e' = r_{e3} = r_{e4} = V_T / I = r_e / 2$  เมื่อ  $r_{e3}$  และ  $r_{e4}$  คือ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 ถึง Q2 ขณะที่  $r_e'' = r_{e5} = r_{e6} = V_T / (3I / 2) = 2r_e / 3$  คือ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 จากรูปที่ 1 กระแสอิมิตเตอร์  $i_{e1}$  มีค่าเท่ากับ  $i_{e1} = v_{in} / 2r_e$  และกระแสอิมิตเตอร์  $i_{e2}$  มีค่าเท่ากับ  $i_{e2} = v_{in} / (2r_e' + 1/sC) = v_{in} / (r_e + 1/sC)$  เมื่อ  $i_{c1} \approx i_{e1}$ ,  $i_{c1} \approx i_{e1}$  ที่โหนด D กระแสเอาพุต  $i_o = i_{e1} - i_{e2} \approx i_{c1} - i_{c2}$  ดังนั้น



รูปที่ 1 วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด

$$i_o = \frac{1}{2r_e} \frac{(1 - s\ddagger)}{(1 + s\ddagger)} v_{in} \tag{1}$$

เมื่อ  $\ddagger = r_e C$  และกระแส  $i_o$  ไหลผ่านภาระโหลด  $z = 2r_e'' = 4r_e / 3$  ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ที่โหนด D และ E มีค่าเท่ากับ

$$v_o = i_o \frac{4r_e}{3} \tag{2}$$

แทนค่า  $i_o$  ในสมการที่ (1) ลงในสมการที่ (2) จะได้

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{2}{3} \frac{(1 - s\ddagger)}{(1 + s\ddagger)} \tag{3}$$

จากสมการที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อแทนค่า  $s = j\ddot{S}$  และ  $\ddot{S} = 1/\ddagger$

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{2}{3} \quad \text{และ} \quad \angle = 90^\circ \tag{4}$$

เมื่อ  $\ddot{S} = 1/\ddagger$  ดังนั้น

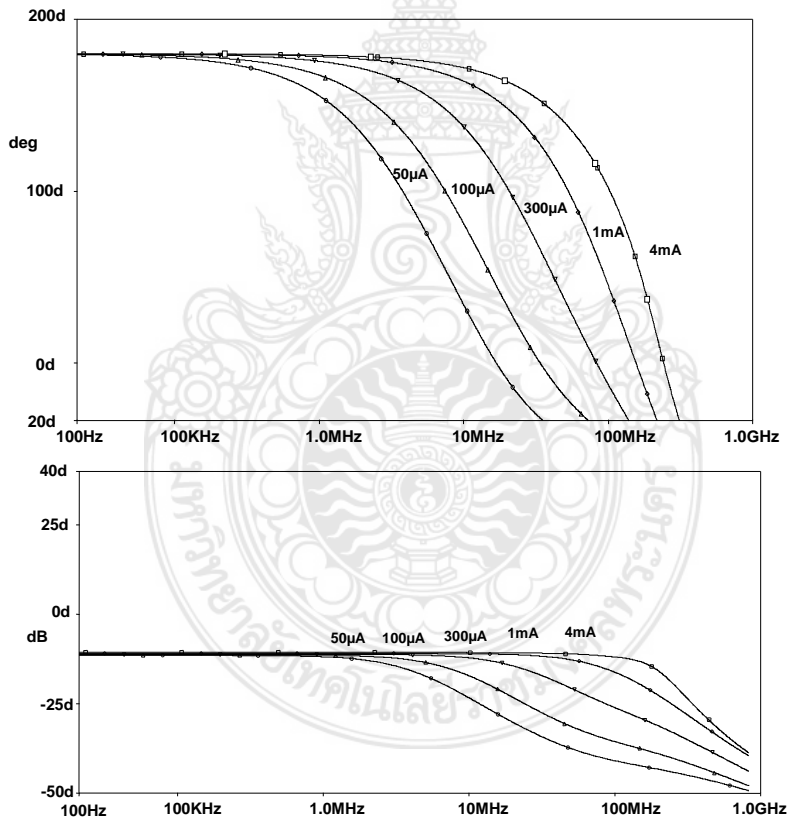
$$\ddot{S} = \frac{I}{V_T C} \tag{5}$$

จากสมการที่ 5 จะเห็นว่าความสามารถปรับได้ด้วยกระแส  $I$

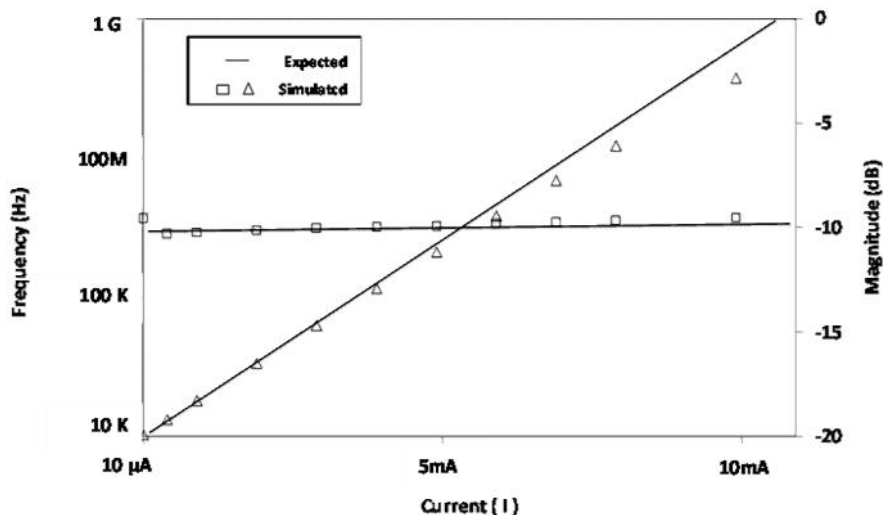
### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 3.1 ผลการจำลอง

การจำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดูลานำดังรูปที่ 1 ใช้แบบจำลองของทรานซิสเตอร์ NPN Q2N2222A ที่มีค่าความถี่  $f_T$  ที่ 300 MHz (Couch II, 1997) และ ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 0.01 $\mu$ F โดยการจำลองด้วยโปรแกรม SPICE ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการป้อนข้อมูลของวงจรและโนด เช่น พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง รวมถึงคำสั่งการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจร ในแฟ้มข้อมูล ขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจรโดยการเรียกแฟ้มข้อมูลในขั้นตอนแรก และขั้นตอนสุดท้ายการแสดงผลด้วยโพรบ ซึ่งผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรโดยการจำลองวงจร แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อกระแส (I) มีค่าเท่ากับ 50 $\mu$ A, 100 $\mu$ A, 300  $\mu$ A 1mA และ 4 mA พบว่า ที่มุม 90 องศา และขนาดของอัตราขยายจะมีค่าคงที่ จะมีค่าความถี่ในการใช้งาน 3 MHz, 6 MHz, 18 MHz, 60 MHz และ 240 MHz ตามลำดับ

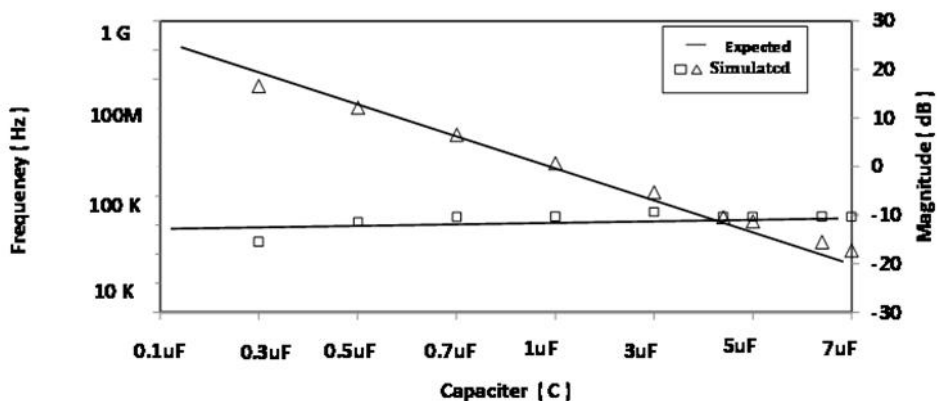


รูปที่ 2 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด โดย C=0.01  $\mu$ F



รูปที่ 3 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด เมื่อกำหนดให้  $C = 10 \text{ pF}$

จากรูปที่ 3 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่ส่งผลต่อมุมและความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด ซึ่งพบว่า ผลการจำลองที่ได้จากการจำลองวงจร (Simulated) ได้มุมและความถี่ที่มุม 90 องศา มีค่าใกล้เคียงกับการแทนค่าในสมการที่ 4 (Expected) เมื่อค่ากระแสเปลี่ยนแปลงตั้งแต่  $10 \text{ }\mu\text{A}$  ถึง  $10 \text{ mA}$  และกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่าคงที่  $C = 10 \text{ pF}$  พบว่า มีอัตราการขยายมีค่าคงที่และที่มุม 90 องศา ความถี่จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่ากระแสเมื่อกระแสมีค่ามากขึ้นจะส่งผลต่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน และความสัมพันธ์เชิงเส้นจะเปลี่ยนไปเมื่อกระแสมีค่ามากกว่า  $10 \text{ mA}$  หรือความถี่สูงสุด  $240 \text{ MHz}$



รูปที่ 4 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด กำหนดให้  $I = 200 \text{ }\mu\text{A}$

จากรูปที่ 4 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่ออัตราการขยายและความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด ซึ่งพบว่า ผลการจำลองที่ได้จากการจำลองวงจร (Simulated) ได้อัตราการขยาย (Magnitude) และความถี่ที่มุม 90 องศา มีค่าใกล้เคียงกับการแทนค่าในสมการที่ 4 (Expected) เมื่อค่าความจุของตัว

เก็บประจุมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.1  $\mu\text{F}$  ถึง 7 $\mu\text{F}$  และกำหนดให้กระแส (I) ค่าคงที่  $I = 200 \mu\text{A}$  พบว่า ที่อัตราการขยายมีค่าคงที่ และที่มุม 90 องศา ความถี่จะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ เมื่อค่าความจุของตัวเก็บประจุมีค่าลดลงจะส่งผลต่อความถี่ที่มีค่าสูงขึ้น และความถี่จะเปลี่ยนไปเมื่อค่าความจุของตัวเก็บประจุน้อยกว่า 0.1  $\mu\text{F}$  ที่ความถี่สูงสุด 250 MHz

#### 4. สรุป

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมูมองคานำที่นำเสนอเป็นวงจรแบบสมมูล และปรับความถี่ด้วยกระแส วงจรนี้ประกอบด้วย วงจรทรานคอนดักแทนซ์จำนวน 2 วงจร และภาระโหลดที่มีตัวเก็บประจุเป็นส่วนประกอบ สามารถปรับความถี่ด้วยกระแสของทรานคอนดักแทนซ์ ความถี่จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่ากระแสเมื่อกระแสมีค่ามากขึ้นจะส่งผลต่อความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ความถี่จะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ และใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการขยายคงที่และที่มุม 90 องศา ที่ความถี่สูงสุด 250 MHz

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การส่งเสริมและสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- ประกาศิต ปราบพาล, วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล และอภิรักษ์ อูโรโสภณ. 2555. วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมูมองคานำตามแบบสมมูล และปรับค่าความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส.วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า. ปีที่ 3 (ฉบับที่ 2).
- อิศราวุธ สีดาตาน, วัลลภ สุระกำพลธร และบันลือ ศรีสุขชินวงศ์. 2544. วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมูมองคานำ วงจรมีความสมมาตรและสามารถปรับความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (ฉบับที่ 1): 31-41.
- Comer, D.T., Comer, D.J and Gonzalez, J.R. 1999. A High-Frequency Integrable Bandpass Filter Configuration. *IEEE Trans. On Circuit and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, Volume 44, No.10, 1999: 856-861.
- Donald A. Bell. 2001. *Operational Amplifiers Application: Troubleshooting and Design*, 2<sup>nd</sup> edition., McGraw-Hill Higher: New York.
- K. Bult and H. Wallinga. 1988. A CMOS analog continuous-time delay line with adaptive delay- time control. *IEEE Journal of solid-state circuits*, volume 23, No. 3, June 1988.
- L. W. Couch II. 1997. *Digital and analog communication system: Chapter 5*, 5<sup>th</sup> edition., Prentice hall: New York.
- Srisuchinwong Banlue. 1997. A Fully-Balanced Wide-Frequency Current-Tunable All-Pass Filter. *ICICS*, 1997: 1732-1736.
- Tay,E.W. and Murti, V.G.K. **Unity-gain frequency-independent quadrature phase shifter.** *Electron.Lett*, 20.1984.
- Viewspice User's Manual, Workview PLUS on Windows, Viewlogic systems, 1993.