

วงจรรูณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัวที่มีพื้นฐานอยู่บน

วงจรสายพานกระแส

วุฒิไกร อินทอุดม¹ และ วิวัฒน์ กิรานนท์²

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

รับเมื่อ 18 กรกฎาคม 2545 ตอรับเมื่อ 18 มิถุนายน 2546

บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอวงจรรูณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัว โดยวงจรประกอบไปด้วยวงจรสายพานกระแส (CCII) ชนิดเอาต์พุตเดี่ยวแบบบวก 2 ตัว ชนิด 2 เอาต์พุตบวกลบ 1 ตัว ตัวต้านทานที่ใช้ปรับค่าตัวคูณ 2 ตัว และตัวเก็บประจุสำหรับใช้คูณค่า 1 ตัว ที่มีปลายข้างหนึ่งต่ออยู่กับกราวด์ วงจรที่สร้างขึ้นมีข้อดีคือ สามารถปรับค่าของตัวเก็บประจุที่เป็นแบบค่าคงที่ให้มีค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยอาศัยการคูณค่าความจุไฟฟ้าจากค่าตัวคูณซึ่งปรับให้มีค่ามากกว่า 1 หรือน้อยกว่า 1 ได้ นอกจากนี้ วงจรที่นำเสนอยังสามารถดัดแปลงให้ค่าตัวคูณสามารถปรับได้จากการควบคุมของกระแสอีกด้วย ผลการจำลองการทำงานของวงจรแสดงให้เห็นถึงความสามารถของวงจรที่จะใช้ปรับค่าตัวคูณได้ในย่านความถี่ที่กว้าง

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

² ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

A Floating Capacitance Multiplier based on Current Conveyors

Vuttikai Intaudom¹ and Wiwat Kiranon²

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

Received 18 July 2002; accepted 18 March 2003

Abstract

A floating capacitance multiplier based on current conveyors is introduced. The circuit employs two single output current conveyors one multiple output current conveyor two resistors and one grounded capacitor. The floating capacitance multiplier can be used to modify the value of common capacitor by using multiplication factor as a key to modify. The multiplication factor results from operation of circuit can be tuned to obtain the value more or less than 1 depend on ratio of two resistors. Moreover, the circuit can be modify to achieve the current control multiplication factor which have an attractive feature for many application. SPICE simulations show that the proposed capacitance multiplier can be operated with wide frequency range.

¹ Graduate Student, Department of Telecommunication Engineering.

² Professor, Department of Telecommunication Engineering.

1. บทนำ

ได้มีการนำเสนอวงจรที่ทำหน้าที่แปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าหรือวงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าอยู่เป็นระยะเช่น [1]-[4] ทั้งนี้เพราะวงจรมีข้อดีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ทางโทรคมนาคม ทางระบบวัดคุม หรือทางระบบเครื่องมือวัด ที่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับแต่งค่าของตัวเก็บประจุในการใช้งาน เช่น นำไปสร้างวงจรกรองความถี่ที่ปรับค่าได้ วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ปรับความถี่ได้ วงจรจูน หรือเพื่อใช้ปรับค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรป้อนกลับ (feedback) ในระบบควบคุมอัตโนมัติที่ปรับค่าได้ หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใดๆ ที่ต้องการปรับการทำงานด้วยตัวเก็บประจุชนิดที่ปรับค่าได้เป็นส่วนหนึ่งในวงจร

การพัฒนาของวงจรคุณค่าความจุไฟฟ้านั้นจะเกิดขึ้นอยู่เสมอ โดยในระยะแรกๆ ตัวเก็บประจุที่คุณค่าได้ยังเสมือนต่อกับกราวด์เท่านั้น และค่าแพคเตอร์ของการคูณของหลายวงจรมีขีดจำกัดคือต้องมีค่ามากกว่า 1 [2]-[3] ซึ่งต่อมาข้อด้อยนี้ก็ได้รับการพัฒนาเป็นลำดับ เช่น บทความที่ได้นำเสนอวงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นแบบลอยตัวขึ้น [4] ทำให้เกิดความคล่องตัวในการใช้งานมากยิ่งขึ้น แต่ถึงกระนั้นก็จะพบว่าวงจรมีข้อดีที่แตกต่างๆ นี้ยังมีความซับซ้อนยุ่งยากอยู่

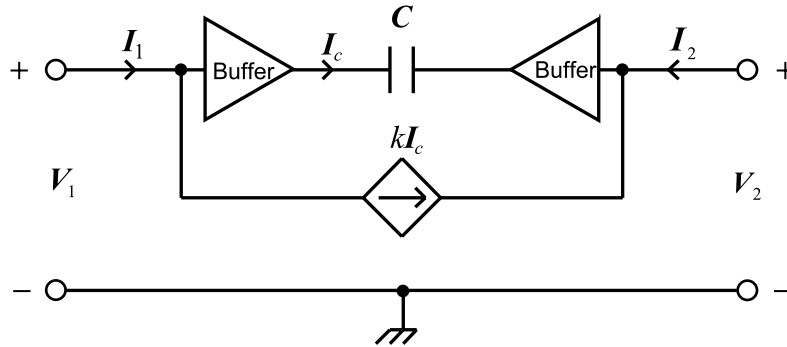
บทความนี้ ได้นำเสนอวงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าที่สามารถแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ต่อกับกราวด์ ให้กลายเป็นตัวเก็บประจุชนิดลอยตัวขึ้น และยังสามารถปรับค่าแพคเตอร์การคูณของค่าความจุไฟฟ้าได้ โดยการปรับค่าอัตราส่วนของความต้านทานที่ใช้ประกอบอยู่ในวงจร วงจรมีโครงสร้างที่ง่ายเพราะใช้วงจรสายพานกระแสแบบเอาต์พุตเดี่ยวเพียง 2 วงจร กับวงจรสายพานกระแสแบบเอาต์พุตคู่อีกหนึ่งวงจร ประกอบร่วมกับความต้านทานเพื่อใช้ควบคุมค่าแพคเตอร์การคูณและตัวเก็บประจุที่จะใช้สำหรับคุณค่าที่ต่อกับกราวด์เท่านั้น

วงจรที่ได้นำเสนอนี้เมื่อใช้วงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส มาแทนวงจรสายพานกระแสชนิดเอาต์พุตเดี่ยว จะสามารถใช้ความต้านทานแฝงของวงจรแทนความต้านทานในวงจรได้ และเป็นผลให้สามารถใช้ในการปรับกระแสไบอัสของวงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสมาปรับค่าแพคเตอร์ตัวคุณค่าความเก็บประจุของวงจรแทนการปรับค่าความต้านทานในวงจรโดยตรงได้ ทำให้เกิดการควบคุมค่าการคูณคุณค่าความจุไฟฟ้าทางอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นได้

การทดลองจำลองวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ผลสอดคล้อง เป็นไปตามทฤษฎี

2. หลักการสร้างวงจร

หลักการของวงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัวที่นำเสนอเป็นดังแสดงในรูปที่ 1



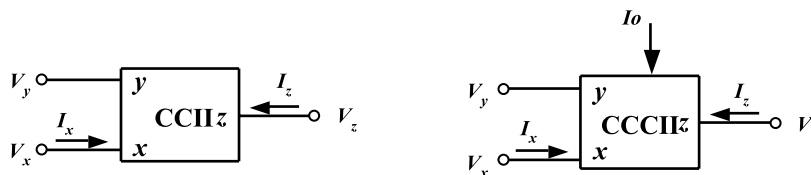
รูปที่ 1 หลักการของวงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัว

อาศัยการขยายกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ระหว่างพอร์ท 1 และพอร์ท 2 ให้ไหลมากขึ้น k เท่าที่พอร์ททั้งสองจะทำให้เหมือนกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ระหว่างพอร์ท 1 และพอร์ท 2 ถูกคูณด้วยค่าคงที่ k การพิสูจน์ทำได้ด้วยการวิเคราะห์ห้วงจรเพื่อกำหนดหาเมตริกซ์ของแอดมิตแตนซ์ที่เกิดจากการลัดวงจร (short circuit admittance matrix) ของวงจรตามรูปที่ 1 ซึ่งได้ผลคือ

$$[Y] = sCk \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงที่ได้จากวงจรคือ ผลคูณระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรและค่าอัตราขยายกระแส k จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเป็นวงจรจริง โดยอาศัยวงจรสายพานกระแส (CCII) [5] หรือวงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCII) [9] มาทำหน้าที่ในการขยายกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุได้ ดังนั้นในการเริ่มต้นนี้จึงจะขออธิบายถึงวงจร CCII และ CCCII ก่อน เพื่อประกอบความเข้าใจในวงจรที่จะนำเสนอ

วงจร CCII และ CCCII เป็นอุปกรณ์อนาล็อกชนิดหนึ่งทำงานในโหมดแรงดันหรือกระแสก็ได้ซึ่งสัญลักษณ์ของวงจร CCII และ CCCII มีดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 สัญลักษณ์ของวงจร CCII และ CCCII

คุณสมบัติที่สำคัญของวงจร CCII คือ ที่ขั้ว Y จะมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ทำให้ไม่มีกระแสไหลเข้าที่ขั้ว Y และแรงดันตกคร่อมที่ขั้ว X จะเท่ากับแรงดันตกคร่อมที่ขั้ว Y แสดงให้เห็นว่าที่ขั้ว X มีความต้านทานอินพุตเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้ว Z จะมีค่าเท่ากับกระแสไหลผ่านขั้ว X ซึ่งเมื่อนำคุณสมบัติเหล่านี้มาเขียนสรุปเป็นเมตริกซ์ แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วต่างๆ จะได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

เครื่องหมายบวกในสมการ (2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_z และ I_x จะเป็นเครื่องหมายบวกหรือลบขึ้นอยู่กับชนิดของวงจร CCII ถ้าเป็นเครื่องหมายบวกจะหมายถึงวงจร CCII+ ซึ่งมีกระแส I_x และ I_z ไหลในทิศทางเดียวกัน แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบจะหมายถึงวงจร CCII- ซึ่งมีกระแส I_x และ I_z ไหลในทิศทางตรงข้ามกัน คุณสมบัติของวงจร CCCII จะคล้ายกันกับวงจร CCII แตกต่างกันตรงวงจร CCCII จะมีค่าความต้านทานแฝง R_x ปรากฏอยู่ที่ขั้ว X ซึ่งทำให้เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วต่างๆ ของวงจร CCCII กลายเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

เครื่องหมายบวกในสมการที่ (3) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_z และ I_x ในทำนองเดียวกับวงจร CCII และในที่นี้ R_x คือค่าความต้านทานแฝงที่ขั้ว X ของวงจร CCCII ที่สร้างจากวงจรทรานส์ลิเนียร์ [9] จะมีค่าสัมพันธ์กับกระแสไบอัสคือ

$$R_x = \frac{V_T}{2I_0} \quad (4)$$

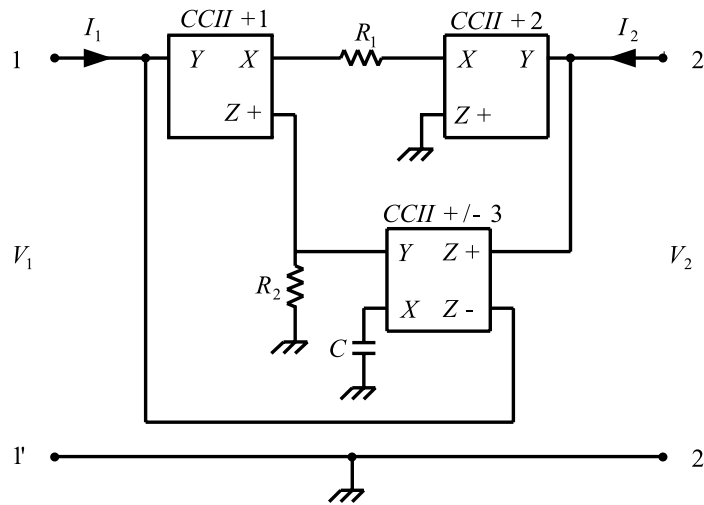
เมื่อ I_0 คือค่ากระแสไบอัสของวงจรทรานส์ลิเนียร์ และ V_T คือค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิ

วงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัวนั้นจะมีการต่อวงจรในลักษณะตามรูปที่ 3 อาศัยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วต่างๆ ตามสมการที่ (2) มาร่วมในการวิเคราะห์ห้วงจร เพื่อกำหนดหาเมตริกซ์ของแอดมิตแตนซ์ที่เกิดจากการลัดวงจรตามรูปที่ 3 จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$[Y] = sC \frac{R_2}{R_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า วงจรนี้เป็นเสมือนตัวเก็บประจุที่ลอยตัวอยู่ระหว่างพอร์ท 1 และพอร์ท 2 โดยมีค่าตัวคูณที่เท่ากับค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทาน R_2 และ R_1 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงจากวงจรจะมีค่าตามสมการที่ (6)

$$C_{eq} = \frac{R_2}{R_1} C \quad (6)$$



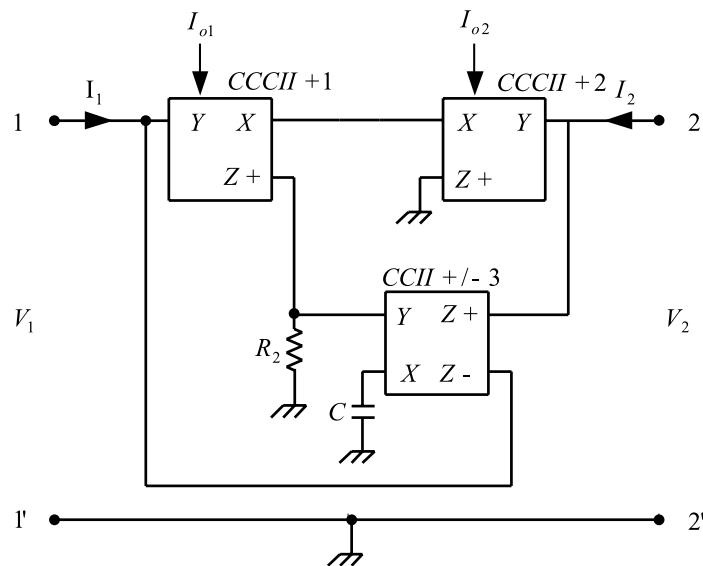
รูปที่ 3 วงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัวที่นำเสนอ

สังเกตว่าถ้าเปลี่ยนแทนวงจร CCII+ ทั้งสองด้วยวงจร CCCII+ แล้วค่าความต้านทานแฝง R_x ของวงจรทั้งสองก็จะทำหน้าที่แทน R_1 ได้ ในการกระทำเช่นนี้จะทำให้ได้วงจรคุณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัวที่ค่าตัวคูณสามารถปรับได้ด้วยการควบคุมกระแสเช่น ดังรูปที่ 4 อาศัยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วต่างๆ ของวงจร CCCII ตามสมการที่ (3) มาร่วมในการวิเคราะห์ห้วงจรเพื่อหาเมตริกซ์ของแอดมิตแตนซ์ที่เกิดจากการลัดวงจรตามรูปที่ 4 ได้ดังนี้คือ

$$[Y] = sC \frac{R_2}{(R_{x1} + R_{x2})} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ในที่นี้ R_{x1} , R_{x2} คือค่าความต้านทานแฝงที่ขั้ว X ของวงจร CCCII+ ตัวที่ 1 และ 2 ซึ่งมีค่าตามสมการที่ (4) และเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (7) โดยกำหนดให้ $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ จะได้

$$[Y] = \frac{sCR_2 I_o}{V_T} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$



รูปที่ 4 วงจรควบคุมค่าความจุไฟฟ้าที่ปรับตัวคุณได้ด้วยกระแส

สมการ (8) แสดงให้เห็นว่า วงจรทำตัวเสมือนตัวเก็บประจุที่ลอยตัวอยู่ระหว่างพอร์ท 1 และพอร์ท 2 และปรับค่าได้จากการควบคุมของกระแสซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเป็นค่า V_T ในสมการที่ (9) นั้น เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่คูณได้ด้วยวงจรมีแปรผันตาม

$$C_{eq} = \frac{R_2 I_o}{V_T} C \quad (9)$$

อุณหภูมิด้วย ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานบางด้าน การแก้ไขตรงจุดนี้ทำได้โดยการทำให้กระแสไบอัส I_o เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเช่นเดียวกับ V_T มีวงจรที่สามารถจ่ายกระแสซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิได้อยู่หลายวงจร ในบทความนี้เลือกใช้วงจรในบทความ [10] ซึ่งเป็นวงจรล่าสุดที่ได้รับการพัฒนา โดยมีการของกระแสเอาต์พุตเป็น

$$I_B = \frac{2I_C I_D V_T}{I_R V_T} \quad (10)$$

เมื่อ I_C, I_D, I_R , คือกระแสไบอัสของวงจรตามบทความ [10] และ I_B คือกระแสเอาต์พุตที่ต้องการ เมื่อเลือกกำหนดให้ $I_C = I_D = I_R$ จะได้

$$I_B = \frac{2I_R V_T}{V_s} \quad (11)$$

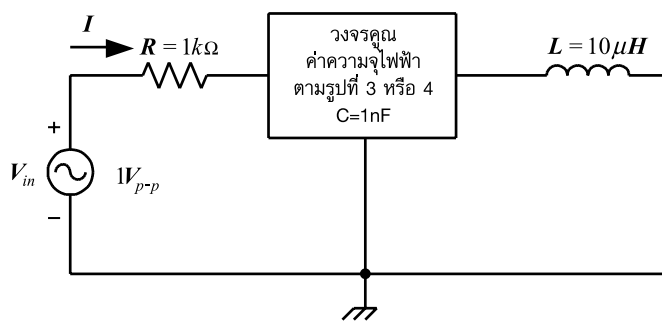
แทน I_B จากสมการ (11) มาเป็นกระแสไบอัส I_o ของวงจร CCCII+ ตามสมการที่ (9) จะได้

$$C_{eq} = \frac{2R_2 I_R}{V_s} \quad (12)$$

จะเห็นว่าผลลัพธ์ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงที่ได้ในสมการ (12) นั้นไม่แปรผันต่ออุณหภูมิตามต้องการ

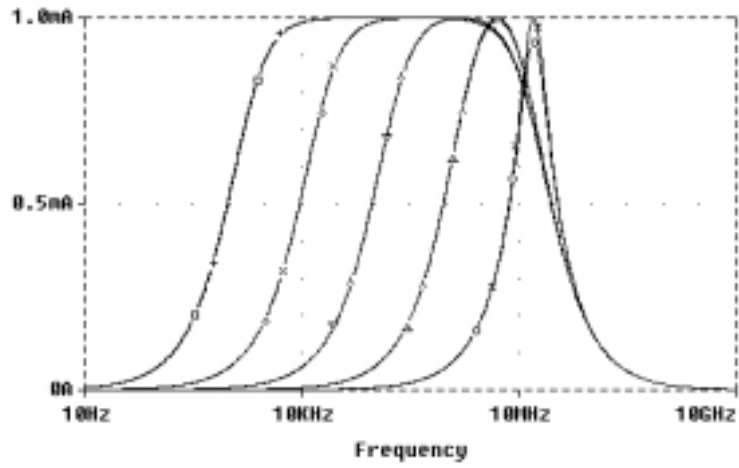
3. ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมสไปซ์

การจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอในรูปแบบที่ 3 วงจร CCII ที่นำมาใช้มีโครงสร้างตามบทความ [6] ซึ่งมีวงจร CCII+ ชนิดเอาต์พุตเดี่ยวและ CCII+/- ชนิด 2 เอาต์พุตเป็นดังรูปที่ 12 ได้เลือกทดลองใช้มอสเฟตเบอร์ CD4007 มีพารามิเตอร์เป็นไปตามเอกสารอ้างอิง [6] มาประกอบวงจรเพื่อจำลองผล ค่าความต้านทาน R_2 และตัวเก็บประจุ C ที่ใช้กำหนดให้มีค่า $10k\Omega$ และ $1nF$ ตามลำดับ วงจรรูปที่ 3 ที่มีส่วนประกอบตามข้างต้นถูกนำมาต่อร่วมกับอุปกรณ์ $R-L$ ในลักษณะตามรูปที่ 5 เพื่อจำลองการทำงานให้เป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบ RLC อนุกรม



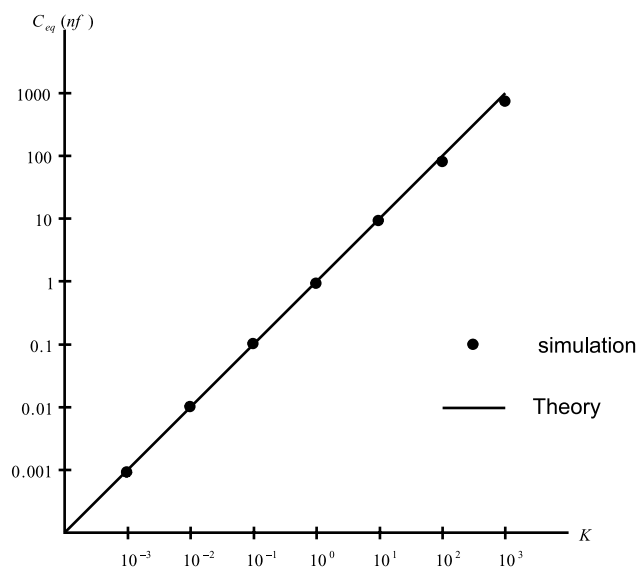
รูปที่ 5 ลักษณะการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบวงจรที่นำเสนอในรูปแบบที่ 3 และ 4

จากการทดลองเปลี่ยนค่า R_1 ให้มีค่าต่างๆ กัน พบว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ของกระแส I มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 6 คือมีการเกิดรีโซแนนซ์ขึ้นตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้า และค่าความถี่รีโซแนนซ์สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามค่า R_1 ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี แสดงให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอสามารถทำตัวเสมือนตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ถูกปรับเปลี่ยนค่าได้โดยอาศัยการคูณจากค่าอัตราส่วนระหว่าง R_2 และ R_1 ตามต้องการ และเมื่อพล็อตค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงที่ได้จากการคูณของวงจรเทียบกับตัวคูณค่าต่างๆ ภายในย่านแล้วพบว่า วงจรให้ผลค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่าตัวคูณ ซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 7



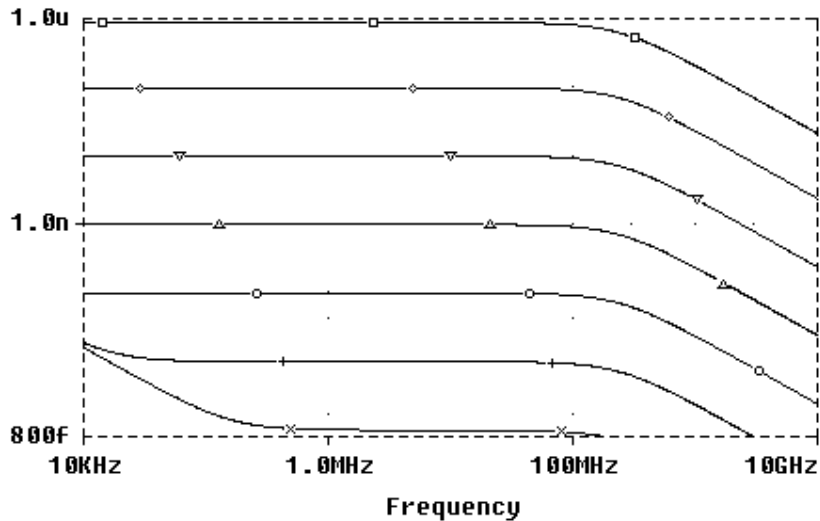
- $R_1 = 100\Omega$ $k = 100$ --□-- ผลจำลองการทำงาน --+-- ค่าตามทฤษฎี
- $R_1 = 1k\Omega$ $k = 10$ --◇-- ผลจำลองการทำงาน --x-- ค่าตามทฤษฎี
- $R_1 = 10k\Omega$ $k = 1$ --จ-- ผลจำลองการทำงาน --|_-- ค่าตามทฤษฎี
- $R_1 = 100k\Omega$ $k = 1/10$ --▲-- ผลจำลองการทำงาน --v_-- ค่าตามทฤษฎี
- $R_1 = 1M\Omega$ $k = 1/100$ --○-- ผลจำลองการทำงาน --*-- ค่าตามทฤษฎี

รูปที่ 6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของกระแสในวงจรตามรูปที่ 5 เมื่อใช้วงจรคูณความจุไฟฟ้าที่นำเสนอในรูปที่ 3



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงที่ได้รับเทียบกับค่าตัวคูณ

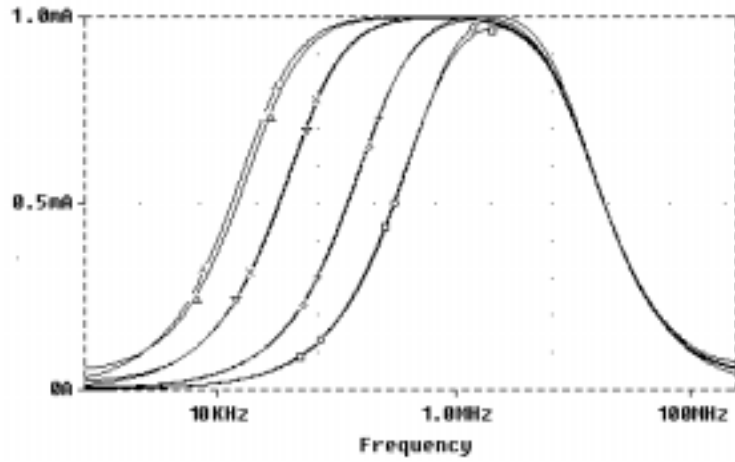
นอกจากนี้ ได้ทดสอบช่วงความถี่ใช้งานของค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงที่ได้รับจากวงจร โดยการพล็อตความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเทียบกับความถี่ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าวงจรให้การตอบสนองค่าความจุไฟฟ้าที่คงที่ตลอดช่วงจากความถี่ต่ำจนกระทั่งถึงประมาณ 100 MHz โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าตัวคูณสูงๆ



- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1000$
- ◇--- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 100$
- ▽--- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 10$
- △--- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1$
- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1/10$
- +--- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1/100$
- ×--- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1/1000$

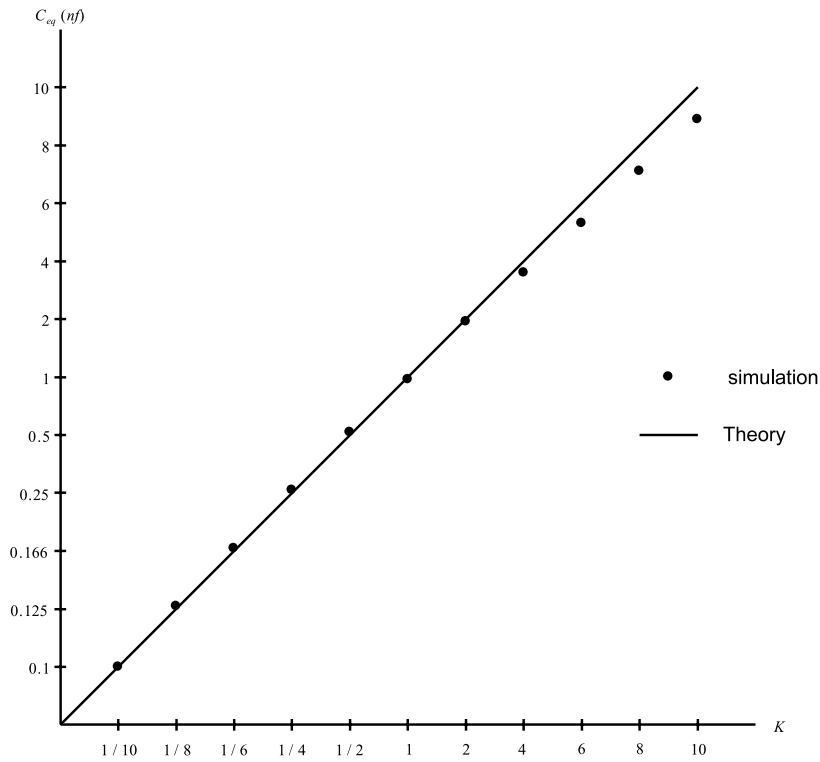
รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเทียบกับความถี่

การจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 4 โดยวงจร CCCII ที่มีโครงสร้างเป็นแบบทรานส์ลิเนียร์ [9] ดังรูปที่ 13 โดยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP คือเบอร์ NR100N และ PR100N [10] เมื่อต่อวงจรคุณค่าตัวเก็บประจุเข้ากับตามรูปที่ 5 เพื่อจำลองการทำงานเหมือนกับวงจรในรูปที่ 3 โดยใช้ค่าเท่า C เดิมแต่เปลี่ยนค่า R_2 เป็น 500Ω ทดลองเปลี่ยนค่ากระแส I_0 ให้มีค่าต่างๆ กันดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าได้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของกระแส I เป็นดังรูปที่ 9 คือมีการเกิดค่าความความถี่รีโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส I_0 ในลักษณะเดียวกับวงจรรูปที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถทำตัวเสมือนตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ด้วยการควบคุมกระแส I_0 ตามต้องการ เมื่อพล็อตค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเทียบกับตัวคูณและพล็อตค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเทียบกับความถี่ในการทำงานเดียวกับรูปที่ 7 และ 8 พบว่าได้ผลเป็นดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

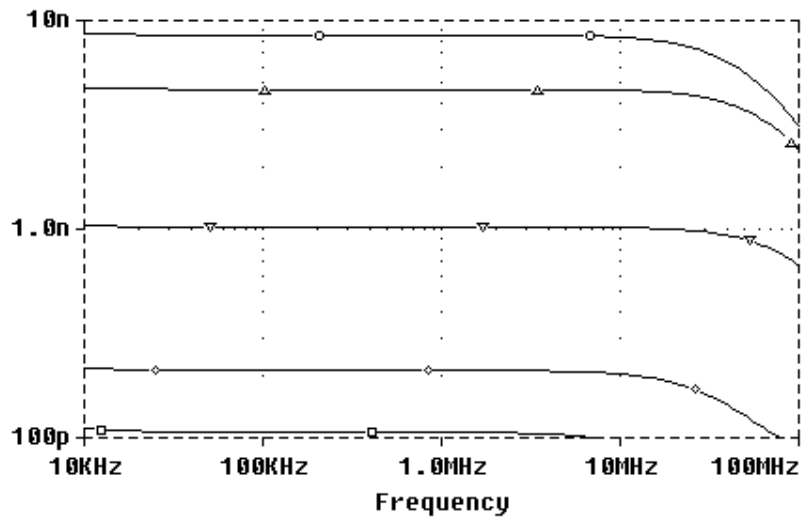


- $I_o = 260\mu A$ $k = 5$ --△-- ผลจำลองการทำงาน --▲-- ค่าตามทฤษฎี
- $I_o = 104\mu A$ $k = 2$ --▽-- ผลจำลองการทำงาน --×-- ค่าตามทฤษฎี
- $I_o = 26\mu A$ $k = 1/2$ --◇-- ผลจำลองการทำงาน --+-- ค่าตามทฤษฎี
- $I_o = 10.4\mu A$ $k = 1/5$ --□-- ผลจำลองการทำงาน --○-- ค่าตามทฤษฎี

รูปที่ 9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของกระแสในวงจรตามรูปที่ 5 เมื่อใช้วงจรคุณความจุไฟฟ้าที่นำเสนอในรูปที่ 4



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงที่ได้รับเทียบกับค่าตัวคูณ

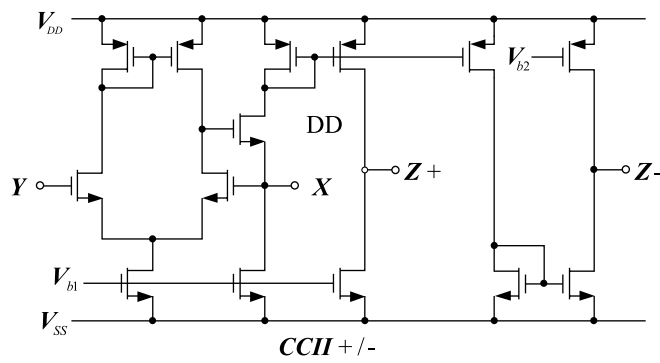
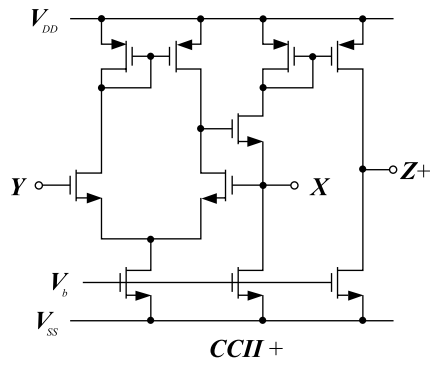


- ○ --- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 10$
- △ --- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 5$
- ▽ --- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1$
- ◇ --- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1/5$
- □ --- ค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเมื่อค่าตัวคูณ $k = 1/10$

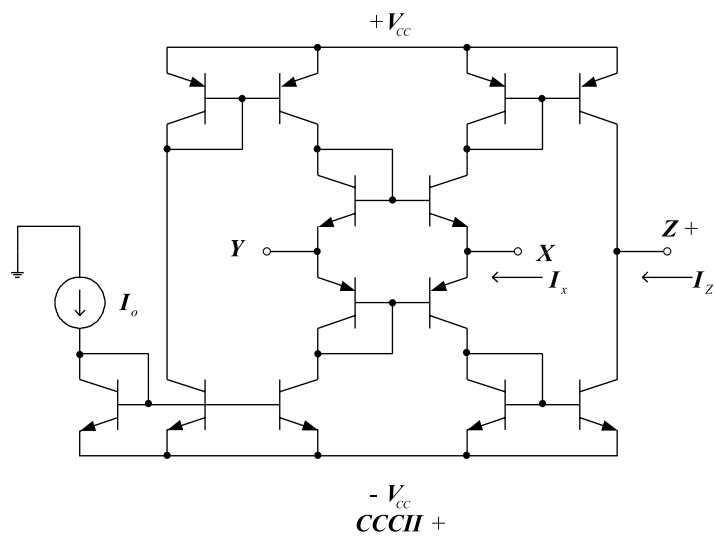
รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าเทียบเคียงเทียบกับความถี่

4. สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรคูณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัว ซึ่งวงจรสามารถปรับค่าของตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยอาศัยการคูณค่าความจุไฟฟ้าจากตัวคูณที่สามารถปรับได้จากอัตราส่วนค่าความต้านทานหรือจากกระแส การทดสอบหลักการและการทำงานของวงจรจะอาศัยการนำวงจรไปต่อร่วมกับอุปกรณ์ $R-L$ เพื่อให้ทำงานเป็นวงจรรีโซแนนซ์ RLC อนุกรม และสังเกตการเกิดควมถี่รีโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามการตั้งค่าตัวคูณมาเป็นตัวพิจารณา ซึ่งจากการทดลองพบว่าให้ผลสอดคล้องตามทฤษฎี ดังนั้นวงจรที่ได้นำเสนอนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรต่างๆ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของวงจรเหล่านั้นให้มากขึ้นได้



รูปที่ 12 โครงสร้างของวงจร CCI+ และ CCI+/- ที่นำมาใช้ในวงจรรูปที่ 3



รูปที่ 13 โครงสร้างของวงจร CCCII+ ที่นำมาใช้ในวงจรรูปที่ 4

5. เอกสารอ้างอิง

1. G. Di Cataldo, G. Ferri, and S. Pennisi, 1998, "Active Capacitance Multipliers Using Current Conveyors," *ISCAS*, pp. 343-346.
2. Christophe Premont, Richard Grisel, Nacer Abouchi and Jean-Pierre Chante, 1998, "A Current Conveyor Based Capacitive Multiplier," *Proceeding of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 1, pp.146-147.
3. G. Ferri, S. Pennisi, 1998, "A 1.5V Current-Mode Capacitance Multiplier," *ICM'98 Proceedings of the 10th International Conference on Microelectronics*, pp. 9-12.
4. M. T. Ahmed, I.A. Khan, and N. Minhaj, 1995, "Novel Electronically Tunable C-Multipliers," *Electron. Lett.*, Vol. 31, No.1, pp. 9-11.
5. Sedra A. S., and Smith K. C., 1970, "Second-Generation Current Conveyors and Its Application," *IEEE Trans. Circuit Theory*, Vol. CT-17, pp. 132-134.
6. Surakamponorn, W., Riewruja, V., Kumwachara, K., and Dejhan K., 1991, "Accurate CMOS-Based Current Conveyors," *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, Vol. 40, No. 4, pp. 699-702.
7. Fabre, A. and Alami, M., 1997, "A Precise Macromodel for Second Generation Current Conveyors," *IEEE Trans. Circuit & Sys.*, Vol. 44, No. 7, pp. 639-642.
8. Fabre, A., Saaid, O., Wiest, F., and Boucheron, C., 1982, "High Frequency Application Based on a New Current Controlled Conveyor," *IEEE Trans. Circuit & Sys.*, CAS-29, 5 pp. 333-336.
9. D.R. Frey, 1993, "Log-Domain Filtering : an Approach to Current-Mode Filtering," *IEE Proc. S-G.*, Vol. 140, pp. 406-416.
10. นฤมล เกียรติวารินทร์, ไชยวัฒน์ ทองช้อย และ วิวัฒน์ กิรานนท์, 2545, "การชดเชยอณูภูมิสำหรับ วงจรทรานส์คอนดักเตอร์", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25*, 21-22 พฤศจิกายน, มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์, หน้า 31-35.