วงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์โดยใช้วงจรสายพานกระแสแบบแรงดันอินพุทแตกต่างเป็นวงจรพื้นฐาน

Differential Voltage Current Conveyor-Based Chopper Modulator Circuit

มนตรี คำเงิน ธีติมา ตรีพยัคฆ์ กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความนี้นำเสนอวงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่สามารถกำหนดรูปแบบการมอดูเลตได้สามแบบในวงจรเดียวคือโควานมอดูเลเตอร์ ริงมอดูเลเตอร์และแอมปลิจูดมอดูเลเตอร์ วงจรที่นำเสนอสร้างจากวงจรสายพานกระแสชนิดแรงดันอินพุทแตกต่างหนึ่งวงจร สวิทช์แบบมอสสี่ตัวและวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สร้างจากมอสสองตัวหนึ่งวงจร วงจรที่นำเสนอมีข้อดีดังนี้ มีเอาท์พุทอิมพิแดนซ์ต่ำดังนั้นจึงสามารถต่อกับโหลดค่าต่างๆ ได้โดยไม่ต้องการวงจรบัฟเฟอร์ใดๆ ใช้มอสทรานซิสเตอร์จำนวนน้อยซึ่งเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ควบคุมการสวิทช์ของอุปกรณ์ด้วยสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณโดยตรง ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สามารถยืนยันการทำงานของวงจรที่นำเสนอ

คำสำคัญ: ช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์, โควานมอดูเลเตอร์, ริงมอดูเลเตอร์, แอมปลิจูดมอดูเลเตอร์, DVCC

Abstract

This paper presents a chopper modulators which can able assign three modulators in one circuit. It consists of Cowan, Ring and amplitude modulators. The proposed circuit is implemented from the different voltage current conveyor (DVCC), four-MOS transistors switch and two–MOS transistors inverter. The advantage of this proposed circuit is high-input and low-output impedance and is able to connect with any load without buffer and the number of transistor is quite less which is suitable for integrated circuits. The technique is to control the switch by using the square pulse which is obtained from direct signal generator. All simulation results are base on the PSPICE program simulator which confirms the performance of the proposed circuit and technique.

Key words: Chopper modulator, Cowan modulator, Ring modulator, Amplitude modulator, DVCC

1. บทนำ

วงจรแอมปลิจูดมอดูเลเตอร์คือการมอดูเลตที่ใช้ขนาดของสัญญาณข่าวสารเพื่อทำให้แอมปลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของสัญญาณข่าวสาร การมอดูเลตทางแอมปลิจูด (Amplitude Modulation: AM) การมอดูเลตแบบแถบความถี่ข้างคู่ที่ขจัดสัญญาณคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาห์ (Double Side Band Suppress Carrier: DSB-SC) และการมอดูเลตแบบแถบความถี่ข้างเดียว (Single Side Band: SSB) คือสามรูปแบบมาตรฐานการมอดูเลตทางแอมปลิจูดที่ใช้สัญญาณซายน์เป็นคลื่นพาห์ [1] นอกจากคลื่นพาห์ที่ใช้สัญญาณซายน์แล้ว สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมสามารถใช้เป็นคลื่นพาห์ได้เช่นกัน โดยเรียกการมอดูเลตแบบนี้ว่าช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ [1] โดยทั่วไปวงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นวงจรริงมอดูเลเตอร์และโควาน (Cowan) มอดูเลเตอร์ที่ใช้ใช้ไดโอดและหม้อแปลงเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

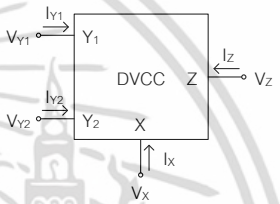
เมื่อเร็วๆ นี้วงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่เหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ถูกนำเสนอใน [2] วงจรสร้างขึ้นจากวงจรสายพานกระแสสองวงจร ตัวต้านทานแบบมอสสามวงจรและวงจรกลับเฟสสัญญาณหนึ่งวงจร

บทความนี้นำเสนอวงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่สร้างจากวงจรสายพานกระแสแบบแรงดันอินพุทแตกต่างหนึ่งวงจร มอสที่ทำงานเป็นสวิทช์สี่ตัวและวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งวงจร เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอใน [2] วงจรที่นำเสนอมีข้อดีกว่าดังนี้

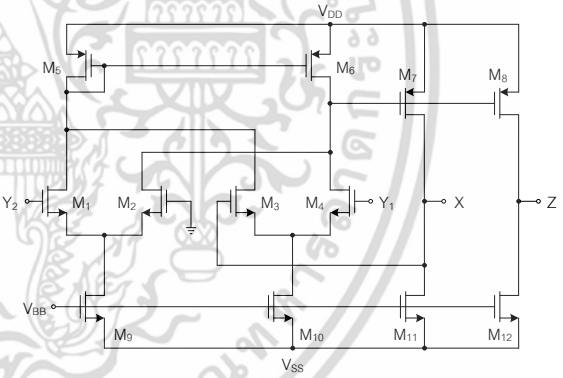
(1) วงจรที่นำเสนอใช้วงจรสายพานกระแสหนึ่งวงจร มอสสี่ตัวและวงจรอินเวอเตอร์หนึ่งวงจร (ใช้มอสทั้งหมด 18 ตัว) ในขณะที่วงจรใน [2] ใช้วงจรสายพานกระแสสองวงจร ตัวต้านทานแบบมอสสามวงจรและวงจรกลับเฟสสัญญาณหนึ่งวงจร (ใช้มอสทั้งหมด 43 ตัว) ดังนั้นวงจรที่นำเสนอจึงเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมมากกว่าวงจรที่นำเสนอใน [2]

(2) วงจรที่นำเสนอใน [2] ใช้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่อยู่ในรูปของกระแสเป็นคลื่นพาห์ ซึ่งโดยทั่วไปสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่กำเนิดได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณจะอยู่ในรูปแรงดันเสียเป็นส่วนมาก [3]-[5] ดังนั้นวงจรมอดูเลเตอร์ใน [2] อาจจะต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสเพื่อเปลี่ยนสัญญาณแรงดันจากวงจรกำเนิดสัญญาณเป็นกระแสเพื่อควบคุมวงจรสายพานกระแส นั่นหมายถึงอาจจะต้องใช้มอสมากกว่า 43 ตัว ในขณะที่วงจรที่นำเสนอใช้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่อยู่ในรูปแรงดันเป็นคลื่นพาห์เพื่อควบคุมสวิทช์โดยตรง ดังนั้นวงจรที่นำเสนอจึงมีความง่ายกว่า

(3) วงจรที่นำเสนอใน [2] เหมาะกับโหลดที่มีค่าอิมพิแดนซ์สูง ดังนั้นถ้าโหลดที่มีอิมพิแดนซ์ค่าต่ำมาต่อใช้งาน วงจรจะต้องการวงจรบัฟเฟอร์ ในขณะที่วงจรที่นำเสนอสามารถต่อกับโหลดค่าต่างๆ ได้โดยไม่ต้องการวงจรบัฟเฟอร์ใดๆ



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าวงจร DVCC



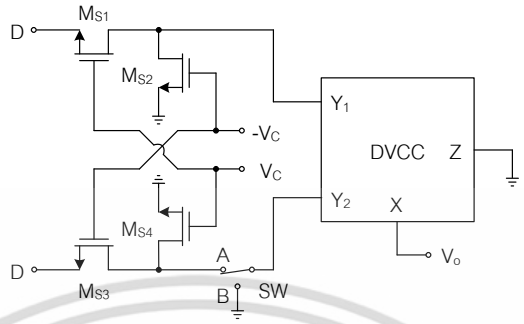
รูปที่ 2 วงจร DVCC ที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์

2. วงจรที่นำเสนอ

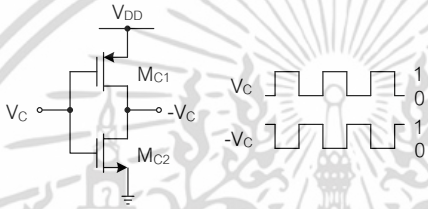
สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสชนิดแรงดันอินพุทแตกต่าง (Differential Voltage Current Conveyor: DVCC) สามารถแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นวงจรที่นำเสนอใน [6] โดยมีคุณสมบัติมีแบนด์วิดท์กว้าง มีความเป็นเชิงเส้นสูงและมีช่วงปฏิบัติงานทางอินพุทกว้าง [6] ค่าความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าขั้วต่างๆ ของวงจรสามารถแสดงได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} V_X \\ I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ I_X \end{pmatrix} \qquad (1)$$



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 3 (ก) วงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอ (ข) วงจรอินเวอร์เตอร์ (ค) การยกระดับสัญญาณด้วยแรงดัน DC

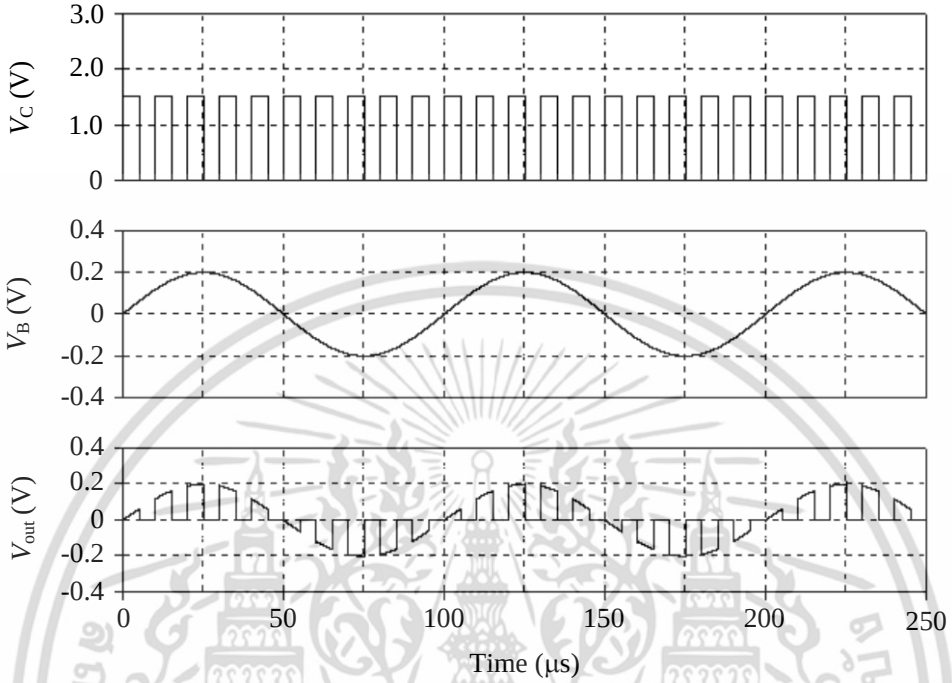
วงจร DVCC เป็นวงจรที่มีอินพุทแรงดันสองอินพุทคือ ขั้ว Y_1 และ Y_2 โดยแต่ละอินพุทจะมีอิมพีแดนซ์สูง ส่วนที่ขั้ว X เป็นเอาท์พุทแรงดันที่มีอิมพิแดนซ์ต่ำที่สามารถกำหนดได้คือ $V_X=V_{Y1}-V_{Y2}$ ในขณะเดียวกันถ้าป้อนกระแสเข้าที่ขั้ว X ของวงจร DVCC จะได้กระแสที่ขั้ว Z เท่ากับกระแสที่ขั้ว X ($I_Z=I_X$) รูปที่ 2 แสดงวงจร DVCC ที่สร้าง จากมอสทรานซิสเตอร์

วงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 3(ก) วงจรประกอบด้วยวงจรวงจร DVCC หนึ่งวงจร มอสที่ทำงานเป็นสวิทช์สี่ตัว (M_{S1}-M_{S4}) และวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งวงจร (รูปที่ 3(ข)) โคเวานมอดูเลเตอร์ ริงมอดูเลเตอร์และแอมปลิจูดมอดูเลเตอร์สามารถเลือกได้ด้วยสวิทช์ SW และแรงดัน V_{DC} สัญญาณเอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีเฟสต่างจากอินพุท 180 องศา สัญญาณนี้จะใช้ควบคุมให้สวิทช์ M_{S1}-M_{S4} นำกระแสและหยุดนำกระแส วงจรมอดูเลเตอร์จะทำงานเป็นโคเวานช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์เมื่อสวิทช์ SW อยู่ในตำแหน่ง B และ V_{DC}=0 (ไม่ใช้) สัญญาณอินพุท V_B จะถูกป้อนเข้าสู่อินพุท Y_1 ของวงจร DVCC ตามช่วงจังหวะความถี่ของคลื่นพาห์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม V_C ที่ใช้ควบคุมมอสสวิทช์ M_{S1} และ M_{S2} ซึ่งมอสทั้งสองจะทำงานและหยุดทำงานสลับกัน

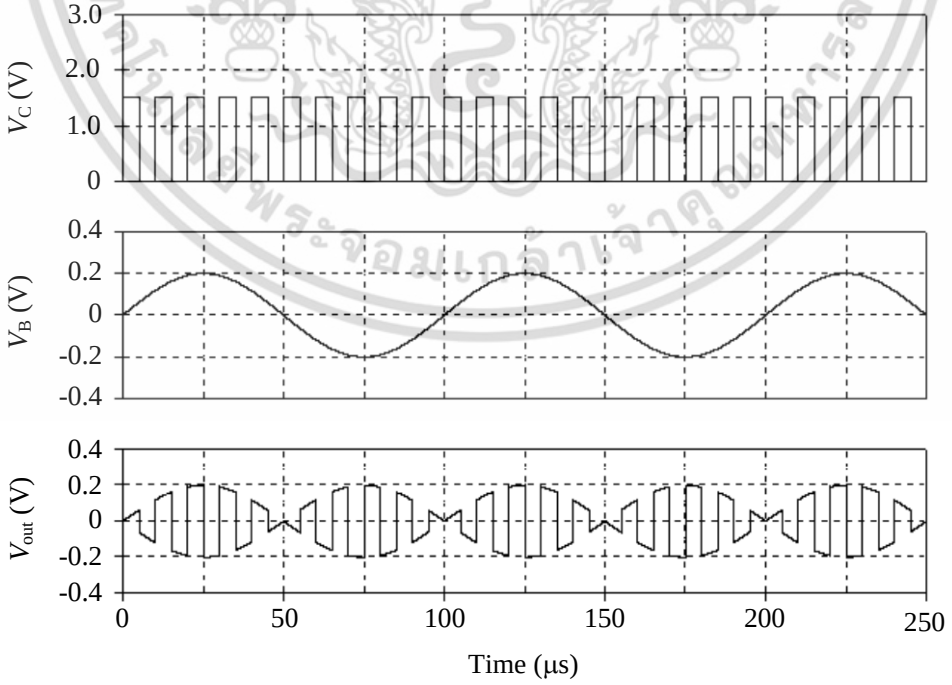
เอาท์พุทแบบริงสามารถกำหนดได้เมื่อสวิทช์ SW ถูกเลือกอยู่ในตำแหน่ง A และ V_{DC}=0 (ไม่ใช้) สัญญาณอินพุท V_B จะถูกป้อนเข้าสู่อินพุท Y_1 และ Y_2 ของวงจร DVCC ตามจังหวะความถี่ของคลื่นพาห์ V_C ที่ใช้ควบคุมมอสสวิทช์ M_{S1} ถึง M_{S4} คู่มอส M_{S2}-M_{S3} และ M_{S1}-M_{S4} จะทำงานและหยุดทำงานสลับกันโดยมอสสวิทช์ M_{S2} และ M_{S4} จะทำหน้าที่รีเซ็ตสัญญาณที่ขั้ว Y_1 และ Y_2 จากสมการที่ (1) เอาท์พุทแรงดันของวงจรจึงสามารถสวิงได้ทั้งซีกบวกและลบซึ่งเป็นเอาท์พุทของริงช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ ส่วนแอมปลิจูดมอดูเลเตอร์สามารถกำหนดได้โดยเลือก สวิทช์ SW อยู่ในตำแหน่ง A และ V_{DC}=DC (ใช้) สัญญาณอินพุท V_B จะถูกป้อนเข้าสู่อินพุท Y_1 และ Y_2 ของวงจร DVCC ตามจังหวะความถี่ของคลื่นพาห์ V_C ที่ใช้ควบคุมมอสสวิทช์ M_{S1} ถึง M_{S4} ในกรณีนี้สัญญาณข่าวสาร V_B จะถูกยกระดับด้วยแรงดัน V_{DC} ซึ่งค่าแรงดัน V_{DC} นี้จะใช้สำหรับควบคุมค่าดัชนีการมอดูเลต คู่มอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิทช์ M_{S2}-M_{S3} และ M_{S1}-M_{S4} จะทำงานและหยุดทำงานสลับกันตามจังหวะความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แรงดัน V_C และ $-V_C$ จะทำให้มอสสวิทช์ M_{S1} และ M_{S3} ทำงานและหยุดทำงานสลับกัน จากสมการที่ (1) สัญญาณเอาท์พุทที่ได้คือการมอดูเลตทางแอมปลิจูดนั่นเอง การใช้งานวงจรซ็อพเปอร์ มอดูเลเตอร์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

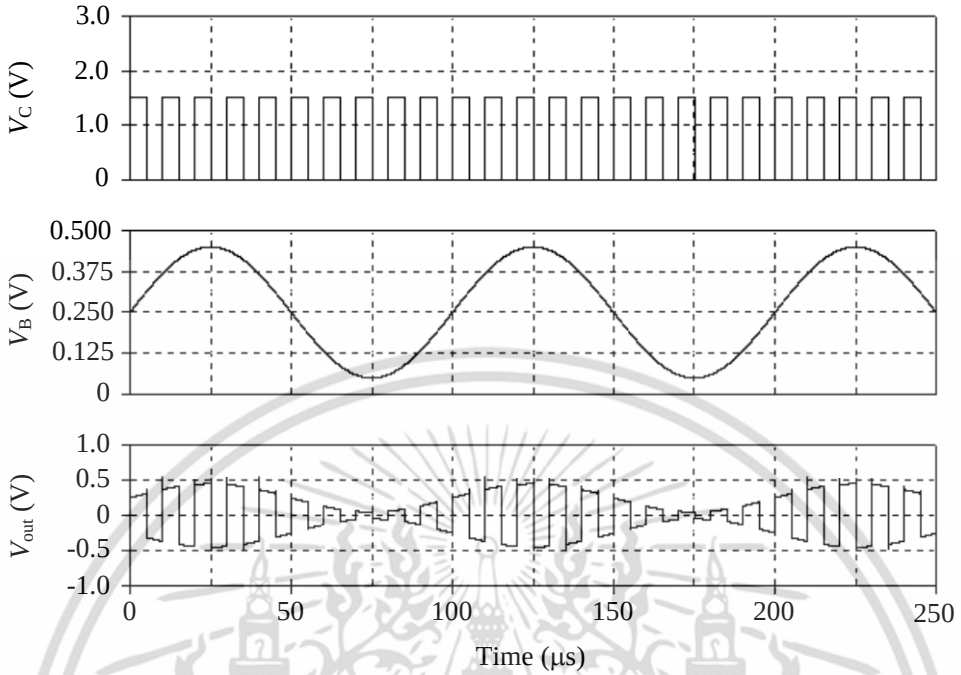


รูปที่ 4 การทำงานของโควานซ็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5 การทำงานของริงช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอ



รูปที่ 6 การทำงานของแอมปลิจูดช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอ

เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาโอเวอร์มอดูเลชั่น ในกรณีนี้ค่าแรงดัน V_{DC} จะต้องมีค่ามากกว่าขนาดสัญญาณ $V_{B(peak)}$ จากการจำลองการทำงานช่วงปฏิบัติงานของวงจรมอดูเลเตอร์ที่นำเสนอมีค่าประมาณ -500mV ถึง 500mV ที่แหล่งจ่ายแรงดัน ±2V ดังนั้นถ้าป้อนสัญญาณ V_B เท่ากับ $200mV_{peak}$ แรงดัน V_{DC} จะต้องมากกว่า 200mV จากวงจรมอดูเลเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเอาท์พุทของวงจรสามารถต่อกับโหลดค่าต่างๆ ได้โดยตรงโดยไม่ต้องการวงจรบัฟเฟอร์ใดๆ

ตารางที่ 1 การใช้งานวงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์

ช็อพเปอร์เอาท์พุท	ตำแหน่งสวิทช์	V_{DC}
โคเวานมอดูเลเตอร์	B	ไม่ใช้
ริงมอดูเลเตอร์	A	ไม่ใช้
แอมปลิจูดมอดูเลเตอร์	A	ใช้

3. ผลการจำลองการทำงาน

วงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอในรูปที่ 3 จะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE การจำลองได้ใช้พารามิเตอร์ 0.5μm จาก MIETEC [7] วงจรใช้แหล่งจ่ายแรงดัน ±2V วงจร DVCC ในรูปที่ 2 กำหนดค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ตาม [8] M_{S1}-M_{S4} เท่ากับ 2μm/2μm และแรงดันไบอัส V_{BB} เท่ากับ -1.2V สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกำหนดค่าสูงสุดเท่ากับ 1.5V ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0V

รูปที่ 4 แสดงการทำงานของโคเวานช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ เมื่อสัญญาณ V_B เป็นสัญญาณรูปคลื่นซายน์ความถี่ 10kHz แอมปลิจูด $200mV_{peak}$ และ V_C เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 100kHz ในกรณีนี้สวิทช์ถูกเลือกไว้ที่ตำแหน่ง B และ V_{DC} เท่ากับ 0V รูปที่ 5 แสดงการทำงานของริงมอดูเลเตอร์ เมื่อสวิทช์ถูกเลือกไว้ที่ตำแหน่ง A ส่วน V_{DC} เท่ากับ 0V ส่วนรูปที่ 6 แสดงการทำงานของแอมปลิจูดมอดูเลเตอร์ ในกรณีนี้สวิทช์ถูกเลือกไว้ที่ตำแหน่ง A และแรงดัน V_{DC} เท่ากับ 0.25V ถูกใช้เพื่อยกระดับสัญญาณและกำหนดค่าดัชนีการมอดูเลต ในทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิบัติแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{DC} อาจจะเป็นแหล่งจ่ายอิสระจากภายนอก ดังนั้นการยกระดับสัญญาณจึงสามารถทำได้โดยต่อแหล่งจ่ายสัญญาณ V_B อนุกรมกับแรงดัน V_{DC} (รูปที่ 3(ค)) แล้วจึงป้อนให้กับอินพุทที่โนด D ของวงจร

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอกับวงจรในวารสารต่างๆ

พารามิเตอร์	วงจรที่นำเสนอ	วงจรใน [1]	วงจรใน [2]
อุปกรณ์ส่วนประกอบ	วงจร DVCC 1 วงจร มอสสวิทช์ 4 ตัว วงจรอินเวอร์เตอร์ 1 วงจร (ใช้มอสทั้งหมด 18 ตัว และ แหล่งจ่ายแรงดัน 2 แหล่งจ่าย)	หม้อแปลง 1 ตัว ไดโอด 4 ตัว	วงจร CCII 2 ตัว ตัวต้านทานแบบมอส 3 ตัว วงจรกลับเฟสสัญญาณ 1 วงจร (ใช้มอสทั้งหมด 43 ตัว และ แหล่งจ่ายกระแส 2 แหล่งจ่าย)
แหล่งจ่ายแรงดัน	$\pm$2V	-	+1.5V
ช่วงอินพุทปฏิบัติงาน	$\pm$0.5V	-	$\pm$0.3V
การใช้กำลังงาน	2mW		0.8mW
เหมาะกับการสร้าง IC	ใช่	ไม่ใช่	ใช่

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรโควานช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ ริงช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์และแอมปลิจูดช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ วงจรที่นำเสนอใช้วงจรสายพานกระแสชนิดแรงดันอินพุทแตกต่างหนึ่งวงจร มอสที่ทำงานเป็นสวิทช์สี่ตัว และวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สร้างจากมอสสองตัวหนึ่งวงจร เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่เคยนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ วงจรที่นำเสนอเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมมากกว่าวงจรใน [1] และถ้าเปรียบเทียบกับวงจรช็อพเปอร์มอดูเลเตอร์ที่นำเสนอใน [2] วงจรที่นำเสนอใช้อุปกรณ์น้อยกว่า คลื่นพาห์เป็นแรงดันซึ่งง่ายต่อการใช้งานมากกว่า สัญญาณเอาท์พุทของวงจรที่นำเสนอสามารถต่อใช้งานกับโหมดค่าต่างๆ ได้โดยไม่ต้องการวงจรบัฟเฟอร์ใดๆ คุณสมบัติโดยสรุปเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรที่เคยนำเสนอก่อนหน้านี้แสดงได้ดังตารางที่ 2

5. เอกสารอ้างอิง

[1] J. E. Pearson, Basic communication theory, UK: Prentice Hall, 1992.

[2] A. Monpapassorn, “Chopper modulators using current conveyor analogue switches,” Analog Intergrated Circuits and Signal Processing, Vol. 45, pp. 155-162, 2005.

[3] M. T. Abuelma'Atti and M. Al-Shahrani, “New CFOA-based triangular/square wave generator,” International Journal of Electronics, Vol. http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713599654~db=all~tab=issueslist~branches=84 - v8484, pp. 583–588, 1998.

[4] M. T. Abuelma'atti and M. K. Alabsi, “A low-cost dual-slope triangular/square wave generator,” International Journal of Electronics, Vol. http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713599654~db=all~tab=issueslist~branches=84 - v8491, pp. 185–190, 2004.

[5] W.-S. Chung, H. Kim, H.-W. Cha, and H.-J. Kim, “Triangular/square-wave generator with independently controllable frequency and amplitude,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 54, pp. 105-109, 2005.

[6] H. O. Elwan and A. M. Soliman, “Novel CMOS differential voltage current conveyor and its applications,” IEE Proceeding of Circuits Devices and System, Vol. 144, pp. 195-200, 1997.

[7] M. Kumngern and K. Dejhan, “High frequency and high precision CMOS full-wave rectifier,”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International Journal of Electronics, Vol. 93, pp. 185-199, 2006.

[8] S. Minaei and M. A. Ibrahim, "General configuration for realizing current-mode first-order all-pass filter using DVCC," International Journal of Electronics, Vol. 92, pp. 347-356, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้