

การออกแบบวงจรบวกทางเวกเตอร์แบบแอนาล็อกด้วยมอสเฟต

Analog MOSFET Vector Summation Circuit Design

ชัยวัฒน์ สากุล¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์โดยใช้ซีมอส ซึ่งจะอาศัยกฎกำลังสองของมอสทรานซิสเตอร์ โครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ วงจรกำลังสองและวงจรถอดรากที่สอง ซึ่งวงจรกำลังสองจะอาศัยคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงอิ่มตัว และวงจรถอดรากที่สองจะอาศัยคุณสมบัติการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ในช่วงไม่อิ่มตัวเป็นพื้นฐานในการออกแบบ วงจรถูกออกแบบให้มีการทำงานในโหมดแรงดันซึ่งจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันเพียง ± 1.5 โวลต์ ผลการเลียนแบบการทำงานจะถูกแสดงโดยใช้โปรแกรม PSpice และใช้ CMOS เทคโนโลยี 0.5 ไมครอน LEVEL 3 ของ MOSIS

คำสำคัญ : ซีมอส, วงจรบวกทางเวกเตอร์, ช่วงอิ่มตัว, โหมดแรงดัน

Abstract

This article presents a CMOS vector summation circuit using square's law of CMOS. Its structure consists of two main parts. First part is the squaring circuit and the second part is square-rooting circuit. The operational principle of the squaring circuit is based on saturation region, while square-rooting circuit is based on non-saturation region. The proposed circuit is performed in voltage mode. It operates with $\pm 1.5V$ power supply. Simulation results are demonstrated by PSpice program using CMOS technology of 0.5 μm . LEVEL of MOSIS.

Keywords: CMOS, Vector summation, Saturation region, Voltage mode

¹ อาจารย์, สาขาเทคโนโลยี, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการพัฒนาให้เจริญก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยเฉพาะชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หลายชนิดได้ถูกนำมาสร้างเป็นวงจรประมวลผลสัญญาณต่างๆ มากมาย โดยเริ่มจากระบบสุญญากาศมาเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่มีลักษณะเป็นดิสครีท (discrete) และมาเป็นรูปแบบของวงจรรวม (Integrator circuit) หรือที่เรียกทั่วไปว่า IC ในการออกแบบวงจรก็เช่นเดียวกัน ได้มีการนำเสนอเทคนิค วิธีการโดยใช้หลักการใหม่ๆ อย่างมากมาย เพื่อให้สามารถนำวงจรที่ออกแบบนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย หรือทำการออกแบบ ปรับปรุงแก้ไขวงจรที่มีอยู่แล้วให้มีคุณสมบัติและมีประสิทธิภาพในการทำงาน ตลอดจนให้ค่าความละเอียดและค่าความแม่นยำในการทำงานที่ดียิ่งขึ้น และมีผลตอบสนองต่อความถี่ในการปฏิบัติงานที่สูงตามไปด้วย อีกทั้งต้องพยายามออกแบบให้วงจรมีความยุ่งยากน้อยและใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย และมีราคาต่อวงจรต่ำ สำหรับวงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์ที่นำเสนอ นั้น เป็นวงจรที่มีใช้กันมากในด้านการสื่อสารโทรคมนาคม, การคำนวณทางเครื่องมือวัดและการวิเคราะห์ต่างๆ [1-5] แต่ส่วนใหญ่จะมีการนำเสนอโดยใช้หลักการที่สร้างมาจากวงจรทรานซิสลิเนียร์ของอุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กับออปแอมป์ หรือแม้กระทั่งวงจรสายพานกระแสที่สลับกับมอสเฟต [3] พบว่าโครงสร้างของวงจรยังคงมีขนาดใหญ่ ซึ่งปัจจุบันการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่นิยมใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟตเนื่องจากมีข้อดีที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาก ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอวงจรบวกทางเวกเตอร์ด้วยซีมอสที่มีความเหมาะสมกับการสร้างวงจรรวม ซึ่งใช้หลักการของวงจรชกกำลังสองและหลักการของวงจรถอดครากที่สองมาเป็นพื้นฐานในการออกแบบ โดยที่วงจรจะทำงานในโหมดแรงดัน การออกแบบจะเน้นการใช้มอสทรานซิสเตอร์จำนวนน้อย มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และสามารถทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงต่ำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ตามความเหมาะสม

2. การออกแบบวงจร

การออกแบบวงจรทางเวกเตอร์โดยใช้มอสเฟตที่นำเสนอในบทความ จะมีโครงสร้างที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ

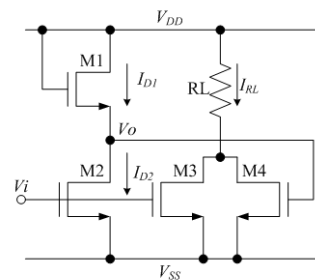
- 1) วงจรชกกำลังสอง
- 2) วงจรถอดครากที่สอง

การออกแบบวงจรทั้งสองวงจรจะใช้หลักการทางด้านกฎกำลังสองของมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะมีการทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) เป็นหลักในการออกแบบวงจร ความสัมพันธ์ทางด้านกระแสตรงแสดงได้ ดังนี้

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2; |V_{DS}| > |V_{GS}| - |V_T| > 0 \quad (1)$$

$$\text{โดยที่ } K = \frac{\mu_0 C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)$$

เมื่อ K คือค่าทรานส์คอนดักเต้นซ์, μ_0 คือ ค่าความคล่องของโฮลหรืออิเล็กตรอน, C_{OX} คือ ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์, W คือ ความกว้างของช่องนำ, L คือความยาวของช่องนำ, V_{GS} คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างเกตกับซอร์ส, V_T คือ ค่าแรงดันขีดเริ่ม, V_{DS} คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างเดรนกับซอร์ส และ I_D คือ กระแสเดรน ตามลำดับ



รูปที่ 1 วงจรชกกำลังสอง

2.1 วงจรชกกำลังสอง

การออกแบบวงจรชกกำลังสองที่ใช้ในวงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์ จะมีโครงสร้างที่ง่าย ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรขยายสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลต่อร่วมกัน แสดงดังรูปที่ 1 โดยที่วงจรอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วย M1 และ M2 ต่อ

ร่วมกัน ส่วนวงจรขยายสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลจะประกอบด้วย M3 และ M4 ต่อร่วมกัน แรงดันทางด้านอินพุตของวงจรจะถูกนำมาป้อนเข้าที่ขาเกตของ M2 และ M4 ตามลำดับ ซึ่งแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าทางด้านขาเกตของ M4 จะเป็นผลมาจากวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะมีค่าลบเมื่อเทียบกับแรงดันที่ป้อนเข้ามาทางด้านขาเกตของ M2 ดังนั้นเราสามารถที่จะหาความสัมพันธ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางด้านกระแสของมอสทรานซิสเตอร์ และกำหนดให้ค่า K และค่า V_T ของมอสทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากันทุกตัว ดังนี้

$$I_{D1} = I_{D2} \quad (2)$$

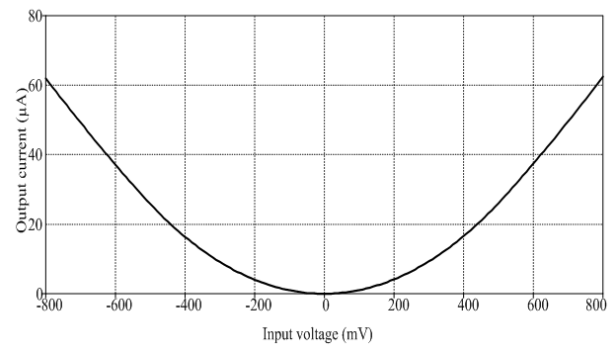
ดังนั้น จากสมการที่ (1) เมื่อนำมาแทนค่าในสมการที่ (2) พบว่าค่าของกระแส $I_{D1} = K(V_{DD} - V_O - V_T)^2$ และ $I_{D2} = K(V_i - V_{SS} - V_T)^2$ ตามลำดับ ส่วนผลทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีค่าเป็นส่วนกลับของแรงดันทางด้านอินพุต แสดงดังสมการที่ (3)

$$V_O = -V_i \quad (3)$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าแรงดันทางด้านอินพุตทั้งสอง (แรงดันอินพุตบวกและแรงดันอินพุตลบ) จะถูกนำมาป้อนเข้าที่ขาเกตของ M3 และ M4 ของมอสทรานซิสเตอร์ตามลำดับ ดังนั้นเราสามารถที่จะหาความสัมพันธ์ทางด้านกระแสเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลได้ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4)

$$I_{RL} = I_{D3} + I_{D4} \quad (4)$$

โดยที่ค่ากระแส $I_{D3} = K(V_i - V_{SS} - V_T)^2$ และกระแส $I_{D4} = K(-V_i - V_{SS} - V_T)^2$ ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อทำการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (4) ผลลัพธ์ของวงจรทางด้านเอาต์พุตจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (5)



รูปที่ 2 คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรกำลังสอง

$$I_{RL} = 2K(V_i^2 + (V_{SS} + V_T)^2) \quad (5)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (5) พบว่าจะได้ผลลัพธ์ทางด้านกระแสเอาต์พุตของวงจรกำลังสอง ซึ่งจะมีค่าเป็นกำลังสองของแรงดันอินพุต แต่จะมีข้อด้อยคือ จะมีค่าแรงดันออฟเซต (Offset) ปนมาด้วยค่าหนึ่งมีค่า $(V_{SS} + V_T)^2$ ดังนั้นเมื่อนำวงจรดังกล่าวไปใช้งานจริงจะต้องทำการหักล้างค่าแรงดันออฟเซตดังกล่าวให้หมดไปเสียก่อนซึ่งสามารถที่จะทำได้โดยการเพิ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในวงจรมีค่าเท่ากับ $40 \mu A$ เพื่อทำการหักล้างแรงดันดังกล่าวแสดงผลการเลียนแบบการทำงานได้ดังรูปที่ 2

การเลียนแบบการทำงานของวงจรกำลังสองที่ออกแบบโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ สามารถที่จะกระทำได้โดยการใช้โปรแกรม PSPICE ในการเลียนแบบการทำงาน ซึ่งในบทความนี้จะใช้โมเดลของมอสทรานซิสเตอร์เป็นของ MOSIS เทคโนโลยี $0.5 \mu m$, LEVEL 3 แสดงดังตารางที่ 1 และค่าของแหล่งจ่ายแรงดันกำหนดให้มีค่าแรงดันเท่ากับ ± 1.2 โวลต์ ค่าความต้านโหลด (R_L) มีค่าเท่ากับ 1 กิโลโอห์ม และกำหนดให้ค่าความกว้างต่อความยาวเซลล์แนลของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรมีค่าเท่ากันทุกตัวซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.35 \mu m / 1.35 \mu m$. ดังนั้นจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรกำลังสองในรูปที่ 2 จะพบว่าวงจรมีช่วงอินพุตปฏิบัติการมีค่าประมาณเท่ากับ ± 800 มิลลิโวลต์ นั่นเอง

ตารางที่ 1 โมเดลของมอสทรานซิสเตอร์

* MOSIS MODEL AT 0.5U
.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=3 PHI=0.700000 TOX=9.6000E-09
XJ=0.200000U TPG=1
+ VTO=0.6684 DELTA=1.0700E+00 LD=4.2030E-08 KP=1.7748E-04
+ UO=493.4 THETA=1.8120E-01 RSH=1.6680E+01 GAMMA=0.5382
+ NSUB=1.1290E+17 NFS=7.1500E+11 VMAX=2.7900E+05 ETA=1.8690E-02
+ KAPPA=1.6100E-01 CGDO=4.0920E-10 CGSO=4.0920E-10
+ CGBO=3.7765E-10 CJ=5.9000E-04 MJ=0.76700 CJSW=2.0000E-11
+ MJSW=0.71000 PB=0.9900000.
MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=3 PHI=0.700000 TOX=9.6000E-09
XJ=0.200000U TPG=-1
+ VTO=-0.9352 DELTA=1.2380E-02 LD=5.2440E-08 KP=4.4927E-05
+ UO=124.9 THETA=5.7490E-02 RSH=1.1660E+00 GAMMA=0.4551
+ NSUB=8.0710E+16 NFS=5.9080E+11 VMAX=2.2960E+05 ETA=2.1930E-02
+ KAPPA=9.3660E+00 CGDO=2.1260E-10 CGSO=2.1260E-10
+ CGBO=3.6890E-10 CJ=9.3400E-04 MJ=0.48300 CJSW=2.5100E-10
+ MJSW=0.21200 PB=0.930000.

2.2 วงจรถอดรหัสดิจิตอล

วงจรในรูปที่ 3 จะเป็นวงจรถอดรหัสดิจิตอลที่นำมาใช้ในวงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์ จะมีหลักการการทำงานโดยอาศัยหลักการของการสะท้อนกระแส ซึ่งกำหนดให้อัตราการสะท้อนมีค่าที่แตกต่างกัน [1,4-5] โดยที่เราสามารถที่จะกำหนดอัตราการสะท้อนของกระแสดังกล่าวได้โดยการปรับค่าความกว้างต่อความยาวเซลล์แนลของมอสทรานซิสเตอร์นั่นเอง ในบทความนี้ได้กำหนดให้อัตราการสะท้อนเท่ากับ 1:0.25 วงจรมีโครงสร้างดังรูปที่ 3 ดังนั้นจากโครงสร้างของวงจรในรูปดังกล่าว เราสามารถที่จะอธิบายความสัมพันธ์ทางด้านเอาท์พุทของวงจรได้ตามสมการที่ (6)-(10) และในวงจรกำหนดให้ขนาดของ M13 มีขนาดเป็น 0.25 เท่าของ M11 ดังนี้

$$I_{IN} = K(V_B - V_{SS} - V_T)^2 \quad (6)$$

และ
$$I_{IN} = \frac{K}{4}(V_A - V_T)^2 \quad (7)$$

โดยที่เราสามารถหาค่าแรงดัน $V_A = \sqrt{4I_{IN}/K} + V_T$ และ $V_B = \sqrt{I_{IN}/K} + (V_{SS} + V_T)$ จากวงจรในรูปที่ 3 พบว่าค่ากระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์ M14 และ M15 มีค่า

เท่ากับ $I_{D14} = I_{D15}$ โดยที่ค่า K ของมอสทรานซิสเตอร์ทุกตัวก็จะมีค่าเท่ากันเช่นกัน เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ถูกต้องตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เราสามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ทางด้านเอาท์พุทได้ตามสมการที่ (8)-(10)

$$I_{D14} = K(V_A - V_O - V_T)^2 \quad (8)$$

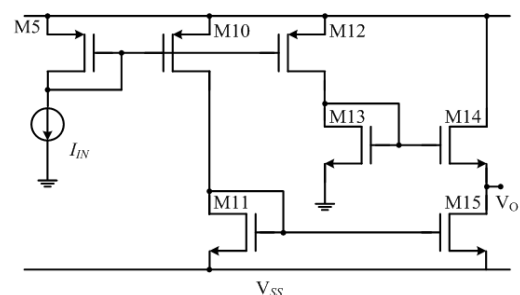
$$I_{D15} = K(V_B - V_{SS} - V_T)^2 \quad (9)$$

$$V_O = \sqrt{\frac{I_{IN}}{K}} \quad (10)$$

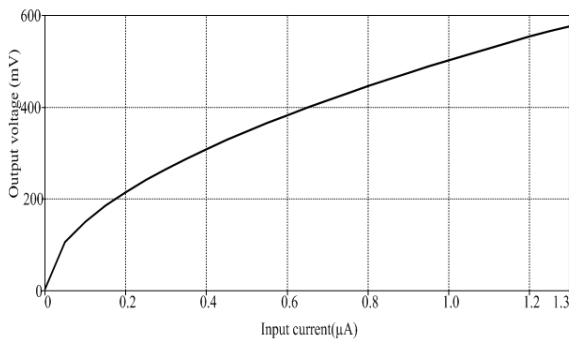
การเขียนแบบการทำงานของวงจรถอดรหัสดิจิตอลที่สองนั้นก็สามารถที่จะกระทำได้โดยใช้โปรแกรมเขียนแบบการทำงานของ PSPICE โดยใช้โมเดลของมอสทรานซิสเตอร์เดียวกันกับวงจรกำลังสองที่เสนอไปข้างต้น โดยกำหนดให้วงจรมีค่าของแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าเท่ากับ ± 1.5 โวลต์ ซึ่งผลจากการเขียนแบบการทำงานของวงจรตามรูปที่ 4 พบว่าวงจรจะมีช่วงอินพุตปฏิบัติงานมีค่าประมาณ $1.3 \mu A$ โดยตารางที่ 2 จะแสดงความกว้างต่อความยาวเซลล์แนลของมอสทรานซิสเตอร์ของวงจรถอดรหัสดิจิตอล

ตารางที่ 2 ค่า W/L ของวงจรถอดรหัสดิจิตอล

มอสทรานซิสเตอร์	M5,M10	M11	M12,M13	M14,M15
W/L($\mu m / \mu m$)	400/4	400/16	4/50	4/8



รูปที่ 3 วงจรถอดรหัสดิจิตอล



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรออดรากที่สองระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต

2.3 วงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์

วงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์จะนำวงจรยกกำลังสองในรูปที่ 1 จำนวน 2 วงจรต่อร่วมกับวงจรออดรากที่สองในรูปที่ 3 จำนวน 1 วงจร โดยที่วงจรจะใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ในการหาค่าของแรงดันออฟเซตที่เกิดขึ้น โครงสร้างของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5 ดังนั้นจากโครงสร้างในรูปดังกล่าวเราสามารถที่จะหาค่าความสัมพันธ์ของวงจรกำลังสองได้โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2)-(5) โดยที่วงจรบวกแรงดันจะรับแรงดันอินพุตจากวงจรอินเวอร์เตอร์ 2 ชุด โดยชุดแรกจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ V_X โดยจะป้อนที่ขาเกตของ M2 ซึ่งผลลัพธ์ทางด้านเอาต์พุตของวงจรจะมีค่าเป็น $-V_X$ ในทางกลับกันชุดที่สองกำหนดให้มีค่าเท่ากับ V_Y โดยจะป้อนที่ขาเกตของ M9 ซึ่งผลลัพธ์ทางด้านเอาต์พุตของวงจรจะมีค่าเป็น $-V_Y$ ตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (11) จะเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ทางด้านกระแสของวงจรขยายสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลก่อนที่จะส่งผ่านไปยังวงจรออดรากที่สอง และในสมการที่ (12) จะเป็นการแทนค่าความสัมพันธ์ต่างๆ ในสมการที่ (11) นั่นเอง

$$I_{OUT} = (I_{D3} + I_{D4}) + (I_{D6} + I_{D7}) \quad (11)$$

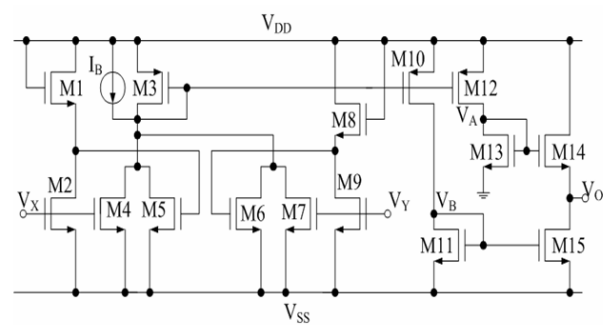
ดังนั้น
$$I_{OUT} = 2K[V_X^2 + V_Y^2 + 2(V_{SS} + V_T)^2] \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) พบว่า วงจรมีค่าแรงดันออฟเซตเกิดขึ้นเมื่อเรานำวงจรที่นำเสนอไปใช้จะต้องกำจัดค่าแรงดันดังกล่าวให้หมดไปซึ่งได้กล่าวถึงในหัวข้อของวงจรกำลังสองแล้ว ในที่นี้ค่าแหล่งจ่ายกระแสที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดแรงดันออฟเซตให้หมดไปมีค่าเท่ากับ $55.5 \mu A$ ดังนั้นจากสมการที่ (12) เมื่อนำค่ากระแสเอาต์พุตป้อนให้กับวงจรออดรากที่สองพบว่าเราจะได้ความสัมพันธ์เป็นวงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์แสดงได้ตามสมการที่ (13) ผลการเขียนแบบการทำงานของวงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 6-9 ตามลำดับ

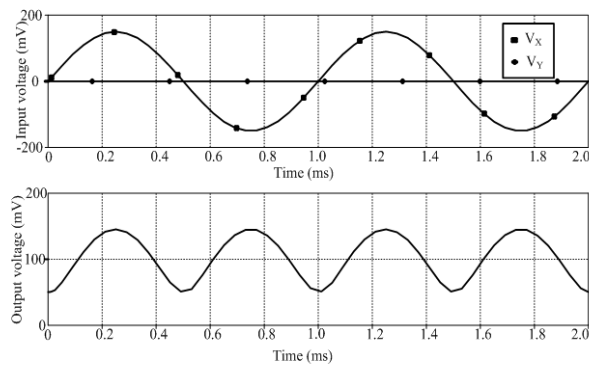
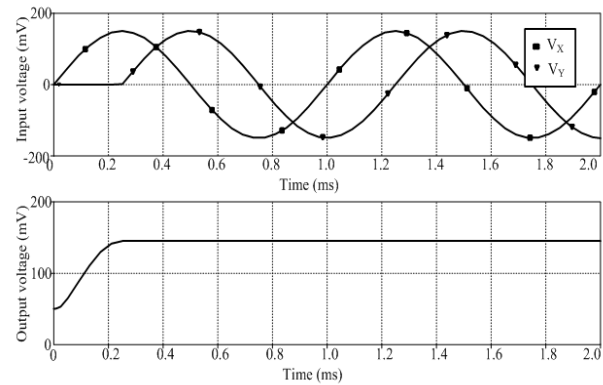
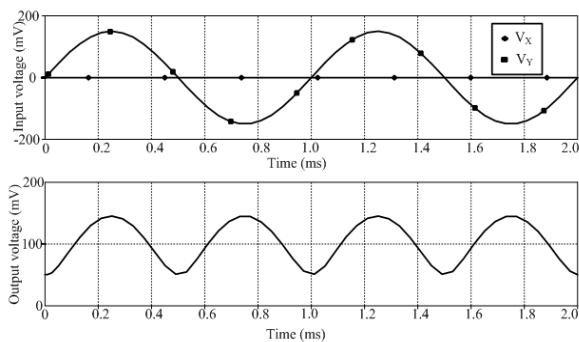
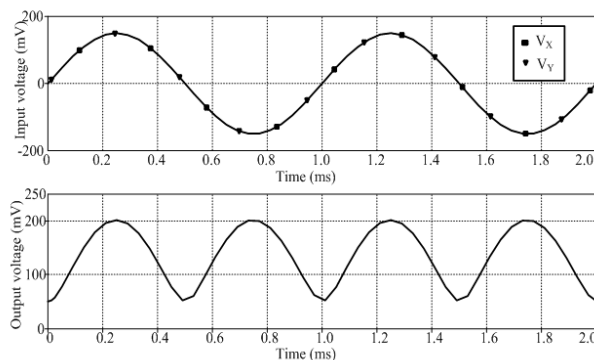
$$V_O = 1.414\sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + (V_{SS} + V_T)^2} \quad (13)$$

3. บทสรุป

วงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์ด้วยซีมอสที่ได้นำเสนอในบทความนี้ จะใช้หลักการของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีการทำงานในช่วงอิ่มตัวเป็นหลัก (Saturation) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการใช้กฎกำลังสอง (Square's Law) พบว่าวงจรมีโครงสร้างที่ง่าย มีประสิทธิภาพดี เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมซึ่งวงจรมีคุณสมบัติเด่น คือ ใช้แหล่งจ่ายแรงดันต่ำเพียง ± 1.5 โวลต์ ประสิทธิภาพของการทำงานของวงจรสามารถยืนยันโดยการโปรแกรม PSPICE ซึ่งให้ผลตรงตามทฤษฎีที่นำเสนอ



รูปที่ 5 วงจรบวกแรงดันทางเวกเตอร์

รูปที่ 6 $V_X = 200mV \sin 2000\pi, V_Y = 0$ รูปที่ 9 $V_X = 200mV \sin 2000\pi, V_Y = 200mV \cos 2000\pi$ รูปที่ 7 $V_Y = 200mV \sin 2000\pi, V_X = 0$ รูปที่ 8 $V_X = V_Y = 200mV \sin 2000\pi$

เอกสารอ้างอิง

- 1 ชัยวัฒน์ สากุล, กอบชัย เฉลียว และวิชัย แซ่ลี, “วงจรกำลังสองและวงจรถดถากที่สองโดยใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงต่ำ”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2545, หน้า 13-18.
- 2 บุญยิ่ง นบหนอง, กอบชัย เฉลียว, สมเกียรติ ฤกษ์วิญญู และเชื้อ นกอยู่, “การออกแบบวงจรบวกทางเวกเตอร์ด้วยมอสเฟต”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, สิงหาคม 2541.
- 3 S.I. Liv, “Square-rooting and vector summation Circuit using current conveyer,” IEE Proceedings Circuits, Devices & Systems, August 1995, Vol.142, No.4, pp.223-226.
- 4 K.Dejhan, C.Soonyeekan, P.Prommee and F.Cheevasuvit, “An MOSFET Square-rooting circuit,” Pro. Of International conference on Robotics, Vision and Parallel Processing for Industrial Automation (ROVPIA’96), Ipoh Malaysia, Nov. 28-30 1996, pp.597-601.
- 5 C.Sakul, “A CMOS Square-Rooting Circuits,” 23rd International Technical Conference on Circuits/systems, Computer and Communications (ITC-CSCC 2008), Japan, July 6-9 2008, pp.537-540.