โครงสร้างทางเลือกของวงจรกรอง Gm-C บันไดปลายคู่สองด้าน
Alternative Structure of Fully-Differential of Ladder Gm-C Filter

อำนาจ ประจง และ **จิรยุทธ์ มหัทธนกุล**

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ หนองจอก กรุงเทพฯ 10530
Email: amnaj_1356@hotmail.com, jirayut@mut.ac.th

Manuscript received October 5, 2010
Revised October 31,, 2010

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างทางเลือกของวงจรกรอง Gm-C บันไดแบบผลต่างสองด้าน จากผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรกรอง Gm-C โครงสร้างทางเลือกที่นำเสนอมีผลตอบสนองความถี่ สัญญาณรบกวน และการกินกำลังงานที่เท่ากันกับวงจรกรอง Gm-C โครงสร้างมาตรฐานแต่มีความเป็นเชิงเส้นดีกว่ามาก

คำสำคัญ: วงจรกรอง แอนะล็อก, วงจรกรอง จีเอ็ม-ซี, ซีมอส

ABSTRACT

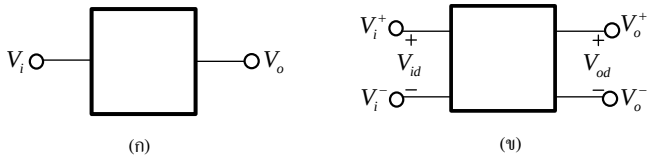
This paper presents an alternative structure of fully-differential ladder Gm-C filters. According to the simulation result, the proposed filter structure has the same frequency response, noise performance and power consumption as those of the traditional Gm-C filter structure but is much more linear.

Keywords: *Analog filter, Gm-C filter, CMOS*

1. บทนำ

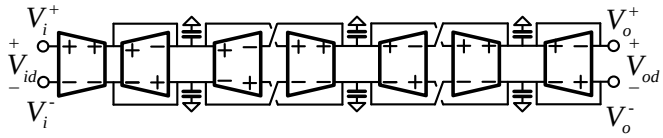
ในการออกแบบวงจรรวมแอนะล็อก (Analog Integrated Circuit) ในปัจจุบัน เรานิยมใช้วงจรที่มีโครงสร้างแบบปลายคู่สองด้าน (Fully Differential: FD) มากกว่าวงจรที่มีโครงสร้างแบบปลายเดี่ยว (Single -ended: SE) (รูปที่ 1) เนื่องจากวงจรแบบปลายคู่มีการสวิงของสัญญาณสูงกว่า มีระดับความเพี้ยนต่ำกว่า สามารถทนทานต่ออิทธิพลของสัญญาณรบกวนและความแปรปรวนของระดับไฟเลี้ยงได้ดีกว่าวงจรแบบปลายเดี่ยว [1] ทั้งนี้ในวงจรแบบ FD นั้นสัญญาณที่เราสนใจเป็นหลักคือสัญญาณในโหมดผลต่าง (Differential-Mode: DM) ในปัจจุบันวงจรกรองรวมแอนะล็อกที่ได้รับความนิยมหมายถึงวงจรแบบแอ็คทีฟ-RC [2] และ Gm-C โดยทั่วไปวงจรกรอง Gm-C แบบ FD จะถูกออกแบบให้ขาอินพุต (+) และ (-) ของ ทรานส์คอนดักเตอร์แต่ละตัวถูกเชื่อมต่อกับแรงดันจากฝั่งตรงกันข้ามของโครงสร้างที่มีความสมมาตร [3] – [4] ดังแสดงในรูปที่ 2 ในกรณีนี้แรงดันที่ตกคร่อมขาอินพุตทั้งสองของทรานส์คอนดักเตอร์จะมีการสวิงสูงทำให้ ทรานส์คอนดักเตอร์สร้างกระแสเอาต์พุตโหมดผลต่างที่มีความเพี้ยนมากกว่ากรณีที่แรงดันอินพุตมีการสวิงต่ำ เมื่อเร็วๆ นี้ได้มีการนำเสนอวงจรกรอง Gm-C แบบ FD ชนิดไบควอด ซึ่งมีการเชื่อมต่อในลักษณะที่ทำให้แรงดันโหมดผลต่างที่ตกคร่อมที่ขาอินพุตของทรานส์คอนดักเตอร์มีค่าต่ำกว่าโครงสร้างมาตรฐานมาก [5] ส่งผลให้วงจรมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าวงจรกรอง Gm-C แบบมาตรฐาน บทความนี้จะเสนอการขยายแนวคิดในการออกแบบวงจรกรองไบควอดใน [5] เพื่อให้ใช้ได้ในกรณีการออกแบบวงจรกรอง Gm-C แบบ FD ชนิด

บันได (ladder) อันดับสูง



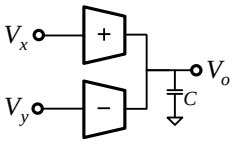
รูปที่ 1 *บล็อกแสดงวงจร*

(ก) แบบปลายเดี่ยว (ข) แบบปลายคู่สองด้าน



รูปที่ 2 *วงจรกรอง Gm-C แบบ FD บันไดโครงสร้างมาตรฐาน*

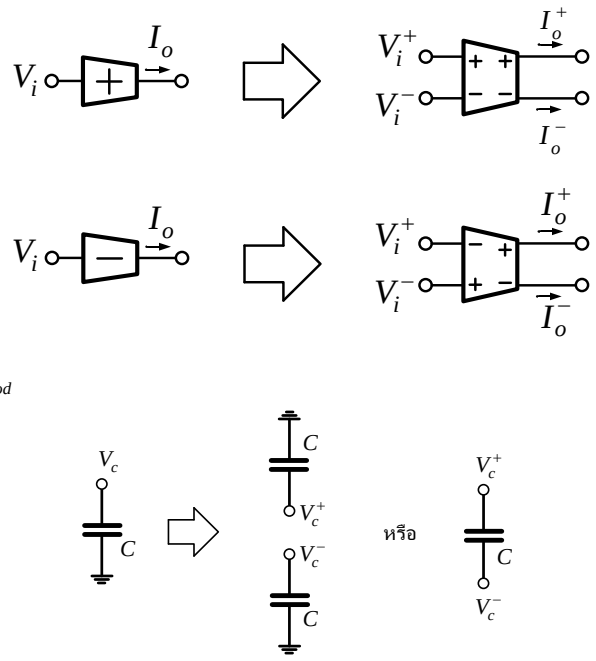
2. วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่าง Gm-C (Gm-C difference integrator)



รูปที่ 3 *วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่าง Gm-C แบบ SE*

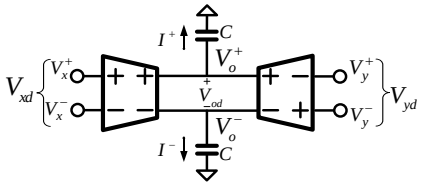
วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่าง (Difference Integrator) เป็นวงจรพื้นฐานสำหรับวงจรกรองความถี่อันดับสูง รูปที่ 3 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่างแบบ SE โดยเครื่องหมาย (+) และ (–) แสดงเครื่องหมายของอัตราขยายความนำ (transconductance gain) ของทรานส์คอนดักเตอร์ นั่นคือทรานส์คอนดักเตอร์ตัวบนเป็นทรานส์คอนดักเตอร์ไม่กลับเฟส(non-inverting transconductor) ซึ่งมีอัตราขยายความนำเป็นค่าบวกและทรานส์คอนดักเตอร์ตัวล่างเป็นทรานส์คอนดักเตอร์กลับเฟส (inverting transconductor) ซึ่งมีอัตราขยายความนำเป็นค่าลบ ในกรณีที่ทรานส์คอนดักเตอร์ตัวบนและตัวล่างมีอัตราขยายความนำเท่ากับ G_m และ $-G_m$ ตามลำดับ เราสามารถแสดงสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรได้เท่ากับ

$$V_o = \frac{G_m}{sC}\left(V_x - V_y\right) \qquad (1)$$



รูปที่ 4 *การแทนที่อุปกรณ์เพื่อแปลงวงจรกรอง Gm-C แบบ SE ให้เป็นวงจรกรอง Gm-C แบบ FD*

โดยทั่วไปเราสามารถทำการแปลงวงจรกรอง Gm-C แบบ SE ให้เป็นแบบ FD ได้โดยการแยกโหนดแรงดัน (voltage node) ในวงจร SE ออกเป็นโหนดฝั่ง (+) และโหนดฝั่ง (-) พร้อมกับทำการแทนที่ทรานส์คอนดักเตอร์แบบ SE ด้วยทรานส์คอนดักเตอร์แบบ FD และแทนที่ตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างโหนดใดๆ กับกราวนด์ด้วยตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวนด์สองตัวหรือตัวเก็บประจุลอยหนึ่งตัว ดังแสดงในรูปที่ 4 จากการแทนที่แสดงในรูปที่ 4 เราสามารถทำการแปลงวงจร Gm-C แบบ SE แสดงในรูปที่ 3ให้เป็นวงจร Gm-C แบบ FD ได้ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 *วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่าง Gm-C แบบ FD โครงสร้างมาตรฐาน*

จากการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้ G_{md} เป็นอัตราขยายความนำโหมดผลต่าง (DM transconductance gain) และ G_{mc} ให้เป็นอัตราขยายความนำโหมดผลร่วม (CM transconductance gain) ของทรานส์คอนดักเตอร์ทั้งสองตัว เราจะได้

$$I^+ = \left(G_{mc}V_{xc} + G_{md}\frac{V_{xd}}{2} \right) + \left(G_{mc}V_{yc} - G_{md}\frac{V_{yd}}{2} \right) \qquad (2)$$

และ

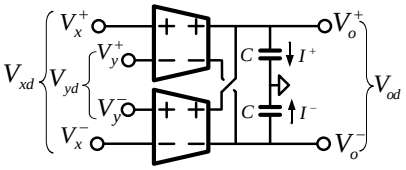
$$I^- = \left(G_{mc}V_{xc} - G_{md}\frac{V_{xd}}{2} \right) + \left(G_{mc}V_{yc} + G_{md}\frac{V_{yd}}{2} \right) \qquad (3)$$

ซึ่งเมื่อแทนสมการข้างบนลงในสมการ

$$V_{od} = \frac{I^+ - I^-}{sC} \qquad (4)$$

เราจะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตโหมดผลต่างเป็น

$$V_{od} = \frac{G_{md}}{sC}\left[V_{xd} - V_{yd} \right] \qquad (5)$$

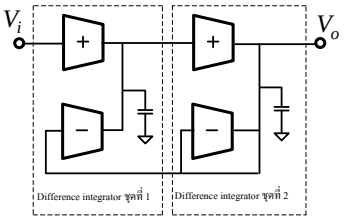


รูปที่ 6 *วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่าง Gm-C แบบ FD โครงสร้างทางเลือก*

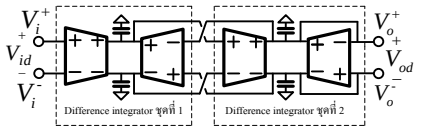
รูปที่6 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่างGm-C แบบFD โครงสร้างทางเลือก ทั้งนี้เราสามารถแสดงได้ว่าสมการของกระแส I^+ และ I^- และแรงดัน V_{od} ของวงจรในรูปที่ 6 จะเท่ากันกับสมการที่ (2) - (4) ตามลำดับ ความเท่ากันดังกล่าวจะส่งผลให้แรงดัน V_{od} ของวงจรในรูปที่ 6 จะเป็นไปดังสมการที่ (5) เช่นเดียวกับวงจรในรูปที่ 5

3. วงจรกรอง Gm-C ไบควอด (Gm-C biquadratic filter)

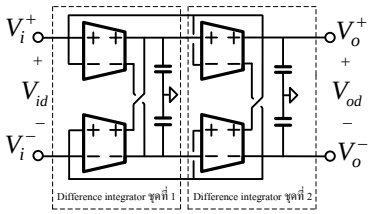
รูปที่ 7 แสดงวงจรกรอง Gm-C ไบควอดแบบ SE ซึ่งภายในวงจรประกอบไปด้วยอินทิเกรเตอร์ผลต่างแบบ SE ที่แสดงในรูปที่ 3 จำนวน 2 ชุด โดยใช้การแทนที่ในรูปที่ 4 เราสามารถแปลงวงจรกรอง Gm-C ไบควอดแบบ SE ในรูปที่ 7 ให้เป็นแบบ FD ได้ดังแสดงในรูปที่ 8(ก) ทั้งนี้อีกวิธีในการสังเคราะห์วงจรในรูป 8(ก) คือการแทนที่วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่างแบบ SE ในรูปที่ 7 ด้วยอินทิเกรเตอร์ผลต่างแบบ FD ในรูปที่ 5 นอกจากนี้ในกรณีที่เราแทนที่วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่างแบบ SE ในรูปที่ 7 ด้วยวงจรในรูปที่ 6 เราจะได้วงจรกรอง Gm-C ไบควอดโครงสร้างทางเลือกดังแสดงในรูปที่ 8(ข)



รูปที่ 7 *วงจรกรอง Gm-C ไบควอดแบบ SE*



(ก)

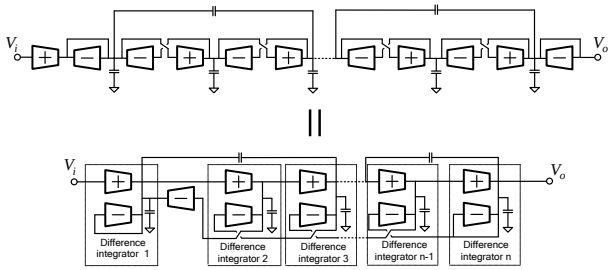


(ข)

รูปที่ 8 *วงจรกรอง Gm-C ไบควอด*
(ก) โครงสร้างมาตรฐาน (ข) โครงสร้างทางเลือก

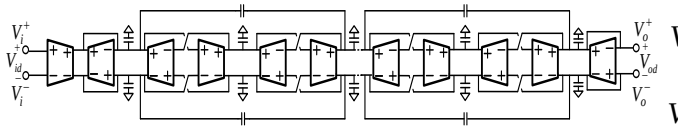
4. วงจรกรอง Gm-C บันได

รูปด้านบนของรูปที่ 9 แสดงวงจรกรอง Gm-C บันไดแบบ SE ทั้งนี้เราสามารถวาดวงจรดังกล่าวใหม่เพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้นว่าวงจรประกอบไปด้วยอินทิเกรเตอร์ผลต่างจำนวน n ชุด ดังแสดงในรูปที่ 9 ล่าง

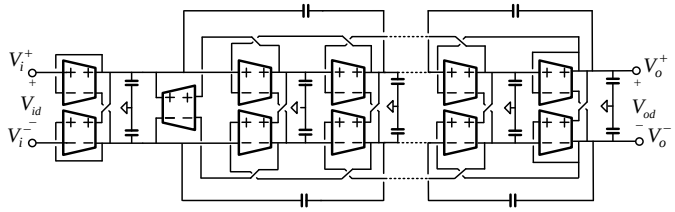


รูปที่ 9 *วงจรกรอง Gm-C แบบ SE บันไดอันดับ n แบบซีโรจำกัด*

โดยใช้การแทนที่ในรูปที่ 4 เราสามารถแปลงวงจรกรอง Gm-C บันได แบบ SE ในรูปที่ 9 ให้เป็นแบบ FD ได้ดังแสดงในรูปที่10 (ก) และในกรณีที่เราแทนที่วงจรอินทิเกรเตอร์ผลต่างในรูปที่ 9 ล่างด้วยวงจรในรูปที่ 6 เราจะได้วงจรกรอง Gm-C แบบ FD ดังแสดงในรูปที่10 (ข)



(ก)

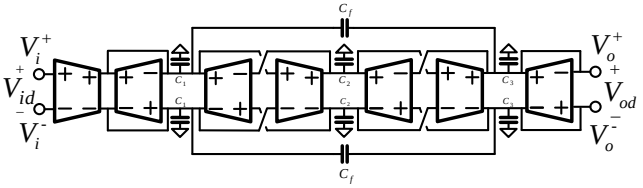


(ข)

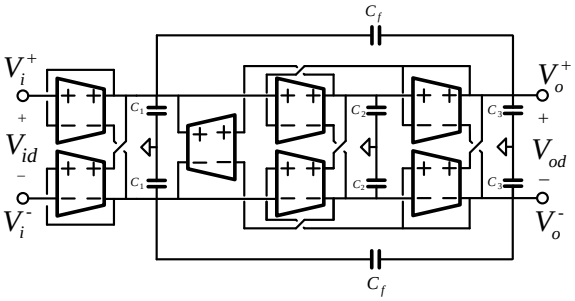
รูปที่ 10 *วงจรกรอง Gm-C แบบ FD บันไดอันดับ n แบบซีโรจำกัด (ก) โครงสร้างมาตรฐาน (ข) โครงสร้างที่นำเสนอ*

5. การจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 10(ก) และ (ข) เราสามารถแสดงโครงสร้างใหม่ของวงจรกรอง Gm-C บันไดอันดับสาม (n=3) ได้ดังแสดงในรูปที่ 11(ก) และ (ข) ตามลำดับ ในการจำลองการทำงานวงจรกรองในรูปที่ 11 เราใช้วงจรคู่ร่วมซอร์ส (Source coupled pair) ในรูปที่ 12 เป็นอุปกรณ์ทรานส์คอนดักเตอร์ และใช้แบบจำลองของมอสเฟตภายใต้เทคโนโลยีการผลิต 0.18 ไมครอนและไฟเลี้ยง ±1.5V รูปที่ 13 - 17 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 11 เมื่อออกแบบให้วงจรมีผลตอบสนองแบบเอลลิพติก (Elliptic) และมีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 1MHz โดยกำหนดให้ $C_1 = C_3 = 0.059$ nF, $C_2 = 0.027$ nF , $C_f = 7.058$ pF, $(W/L)_{1-3} = 10$ ไมครอน/ 5 ไมครอน, $(W/L)_{4-5} = 1.25$ ไมครอน/ 2 ไมครอน, $(W/L)_{6-7} = 5$ ไมครอน/ 5 ไมครอนม และ $I_{SS} = 20$ ไมโครแอมป์ ส่งผลให้วงจรมีสัญญาณรบกวนรวม (Total noise output) เท่ากับ 70.56 μV_{rms} และการบริโภคกำลังงานเท่ากับ 1.2mW

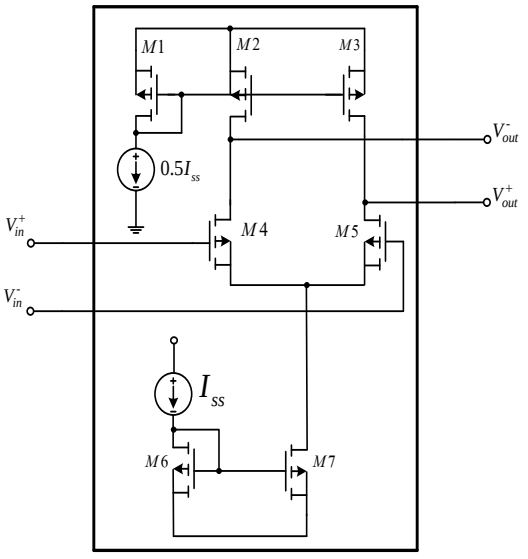


(ก)



(ข)

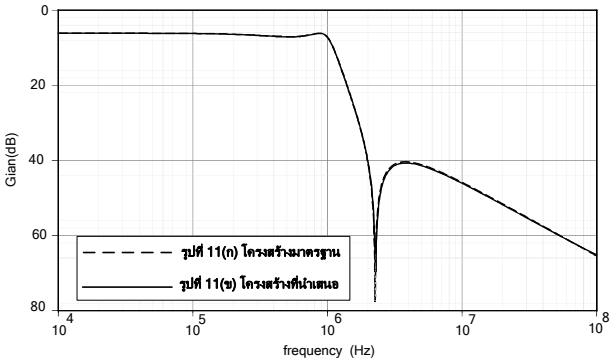
รูปที่ 11 *วงจรกรอง Gm-C แบบ FD บันไดอันดับสาม (ก) โครงสร้างมาตรฐาน (ข) โครงสร้างที่นำเสนอ*



รูปที่ 12 *โครงสร้างภายในของวงจรกรอง Gm-C บันได*

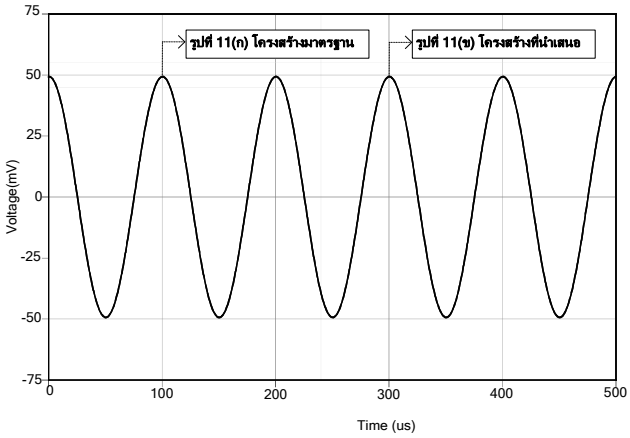
ผลจำลองการทำงาน

ในรูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองผลตอบสนองความถี่ (frequency response) ของวงจรโครงสร้างมาตรฐานในรูปที่ 11(ก) และโครงสร้างที่นำเสนอในรูปที่ 11(ข) จากรูปดังกล่าวเราพบว่าทั้งสองวงจรมีผลการตอบสนองความถี่ที่เหมือนกัน

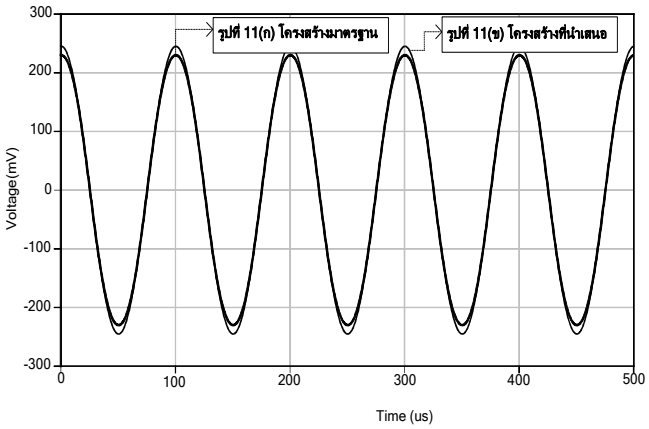


***รูปที่ 13** ผลตอบสนองทางความถี่*

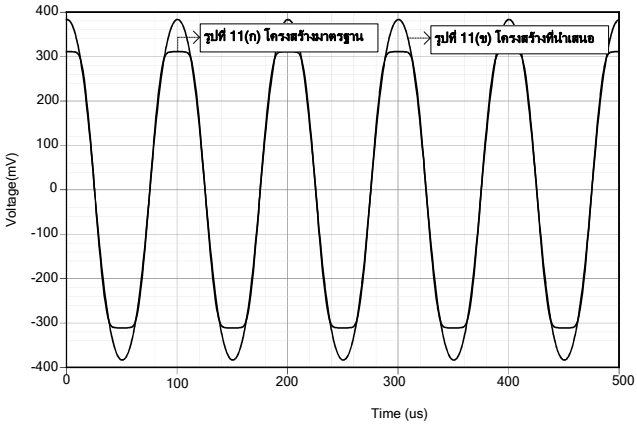
รูปที่ 14 – 16 แสดงผลการจำลองผลตอบสนองทรานเซี้ยนต์ (transient response) ของวงจรในรูปที่ 11(ก) และ (ข) ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันอินพุต 1 KHz ขนาดเท่ากับ $100mV_{p\text{-}p}$, $500mV_{p\text{-}p}$ และ $1000mV_{p\text{-}p}$ ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตของวงจรในรูปที่ 11(ก) และ (ข) มีขนาดเล็กจะส่งผลให้เอาต์พุตมีขนาดคลายคลึงกัน แต่เมื่อสัญญาณอินพุตของวงจรมีขนาดใหญ่ขึ้นพบว่าสัญญาณเอาต์พุตของโครงสร้างมาตรฐานมีความเพี้ยนสูงกว่าโครงสร้างที่นำเสนอมากซึ่งสอดคลองกับกราฟความเพี้ยนฮาร์โมนิก (THD) ในรูปที่ 17



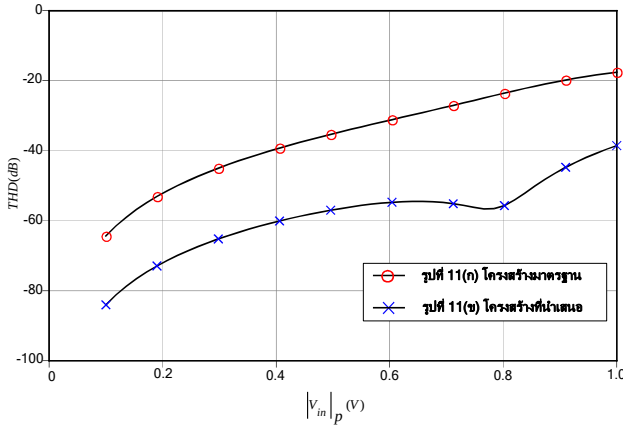
***รูปที่ 14** ผลตอบสนองทรานเซียนต์ของวงจร โดยกำหนดให้อินพุตเป็นสัญญาณซายน์มีขนาด $100mV_{p\text{-}p}$ ที่ความถี่ 1 kHz*



***รูปที่ 15** ผลตอบสนองทรานเซียนต์ของวงจร โดยกำหนดให้อินพุตเป็นสัญญาณซายน์มีขนาด 500 $mV_{p\text{-}p}$ ที่ความถี่ 1 kHz*



รูปที่ 16 *ผลตอบสนองทรานเซียนต์ของวงจร โดยกำหนดให้อินพุตเป็นสัญญาณซายน์มีขนาด* $1000mV_{p-p}$ *ที่ความถี่ 1 kHz*



รูปที่ 17 *ผลของการวัดหาค่า THD ที่ความถี่ 10 kHz*

6. สรุปผล

บทความนี้ได้นำเสนอโครงสร้างใหม่ของวงจรกรอง Gm-C บันไดแบบ FD ซึ่งมีจำนวนอุปกรณ์เท่ากับวงจรกรอง Gm-C โครงสร้างมาตรฐานแต่มีการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน จากผลจำลองการทำงานที่แสดงในหัวข้อที่แล้วพบว่าวงจรกรอง Gm-C บันไดโครงสร้างทางเลือกที่นำเสนอมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่าวงจรกรอง Gm-C บันไดโครงสร้างมาตรฐาน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากวงจรกรอง Gm-C ที่นำเสนอได้ถูกออกแบบเพื่อให้แรงดันที่ปรากฏที่ขาอินพุต (+) และ (-) ของทรานส์คอน-ดักเตอร์แต่ละตัวเป็นสัญญาณเฟสเดี่ยวกันซึ่งส่งผลให้แรงดันอินพุตผลต่างของทรานส์คอนดักเตอร์มีค่าต่ำ นอกจากนี้เราพบว่าวงจรกรอง Gm-C บันไดโครงสร้างทางเลือกและโครงสร้างมาตรฐานมีผลตอบสนองความถี่ สัญญาณรบกวน และการกินกำลังงานเท่ากัน

เอกสารอ้างอิง

[1] จิรยุทธ์ มหัทธนกุล,"การออกแบบวงจรรวมแอนะล็อก,"มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, กรุงเทพมหานคร, 2551.

[2] J. Mahattanakul, "Active-RC filter synthesis by section substitution method", *Engineering Transactions*, vol. 13, no. 2, pp. 45-52, 2553.

[3] Y.P. Tsividis, "Integrated continuous-time filter design - an overview", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 29, no. 3, pp. 166-176, March 1994.

[4] A.Otin, C.Aldea, S.Celma, "Low Voltage LC –Ladder Gm-C Low-Pass Filters with 42-215 MHz Tunable range", *IEEE European Conference on circuit theory and Design*, vol. 1, pp. 245-248, August 2005.

[5] A. Tajalli and Y. Leblebici, "Linearity improvement in biquadratic transconductor-C filters", Electronics Letters, vol. 43, no. 24, pp. 1360-1362, November 2007.

อำนาจ ประจง สำเร็จการศึกษา หลักสูตรครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า สาขาย่อยอิเล็กทรอนิกส์ จากจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาย่อยอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจ งานวิจัยทางด้านวงจรกรองความถี่

ศ.ดร.จิรยุทธ์ มหัทธนกุล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังในปี พ.ศ. 2532 ระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จาก Florida Institute of Technology ในปี 2534 และระดับปริญญาเอกสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Imperial College London ในปี 2540 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ และคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร