

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองแอมป์ที่ฟาร์ซีปลายคู่ ที่มีการต่อโครงข่ายป้อนกลับโหมดผลรวม

Stability analysis of Fully-Differential Active-RC filter with Common-Mode Feedback Network

ชัยรัตน์ อุปถัมภ์เกื้อกูล และ จิรยุทธ์ มัทธนกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Email: chairatu@kmutnb.ac.th, jirayut@mut.ac.th

Manuscript received September 7, 2014

Revised November 13, 2014

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองแอมป์ที่ฟาร์ซีปลายคู่ที่มีการต่อโครงข่ายป้อนกลับโหมดผลรวม ผลจากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปช่วยในการออกแบบวงจรเพื่อให้สามารถปรับแต่งคุณลักษณะด้านต่าง ๆ ของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลจากจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการวิเคราะห์

ABSTRACT

This paper presents stability analysis of fully-differential active-RC filters with CMFB networks. The results from this study can be used to help the trade-off in the circuit design process to be more effective. Simulation results are in good agreement with the presented analysis.

Keywords: stability analysis, fully-differential active-RC filters, CMFB networks

1. บทนำ

ถึงแม้ว่าสัญญาณโหมดผลต่าง (differential mode signal) คือสัญญาณที่ถูกนำไปใช้งานโดยตรงในวงจรปลายคู่ (fully-differential circuits) ในการออกแบบวงจรต้องคำนึงถึงสัญญาณโหมดผลรวม (common-mode signal) ด้วยเนื่องจากสัญญาณ

ดังกล่าวสามารถส่งผลต่อเสถียรภาพของวงจรได้ โดยทั่วไปวงจรย่อยของวงจรปลายคู่ได้ถูกออกแบบให้มีอัตราขยายโหมดผลรวม (common-mode gain) ต่ำเพื่อให้อัตราขยายวงรอบ (loop gain) ของการป้อนกลับโหมดผลรวม (common-mode feedback) มีค่าต่ำกว่าหนึ่งซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพของวงจรโดยรวม

สำหรับการออกแบบวงจรกรองแอมป์ที่ฟาร์ซีปลายคู่ (fully-differential active RC filter) นั้น วิธีการที่เคยได้รับความนิยมในการกดอัตราขยายโหมดผลรวมคือการต่อแหล่งจ่ายกระแสที่ขาซอร์สของมอสเฟตในคู่ร่วมซอร์ส (source coupled pair) ที่ภาคหน้าของออปแอมป์ซึ่งจะทำให้อัตราขยายทรานส์คอนดักแตนซ์ผลรวม (common-mode transconductance gain) มีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานภายใต้ระดับไฟเลี้ยงต่ำ (low voltage application) วิธีการกดอัตราขยายโหมดผลรวมที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือการต่อโครงข่ายป้อนกลับโหมดผลรวม (common-mode feedback: CMFB) ซึ่งจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวต้านทานลดทอน (damping resistance) สำหรับสัญญาณโหมดผลรวม [1] – [3] และในบางกรณีกำหนดค่าแรงดันไบอัสที่เหมาะสมให้กับวงจร แต่จะไม่ส่งผลต่อสัญญาณโหมดผลต่าง

อย่างไรก็ตามการใช้โครงข่าย CMFB ทำให้วงจรมีการกินกำลังงาน (power consumption) สูงขึ้น ในบางครั้งโครงข่าย CMFB อาจกดอัตราขยายผลรวมเกินความจำเป็นโดยเราสามารถลดอัตราการกินกำลังงานลงโดยที่ยังรักษาเสถียรภาพของ

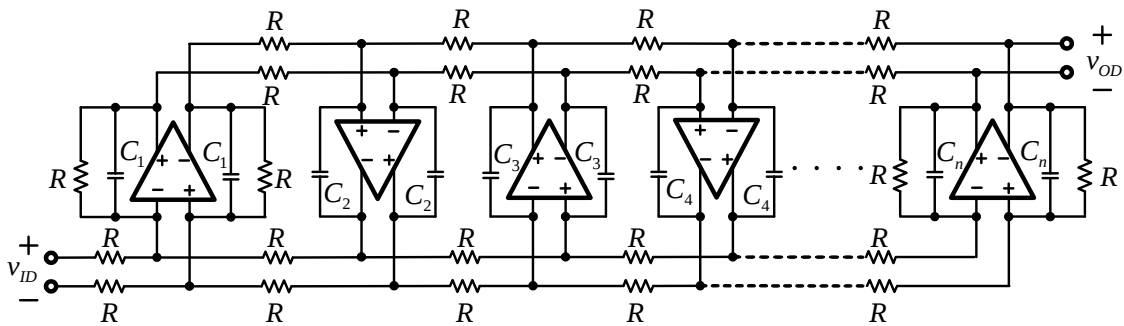
วงจรไว้ได้อยู่ ในบทความนี้เราจะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองแอมป์ที่พาสซีฟหลายคู่ที่มีการต่อโครงข่าย CMFB เพื่อให้เราสามารถนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาใช้เพื่อให้เราสามารถปรับแลก (trade off) คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. พิจารณาโหมดผลรวมของวงจรกรองความถี่

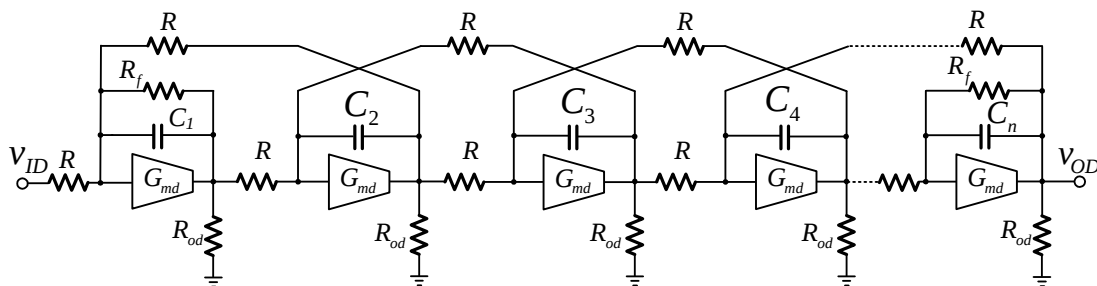
รูปที่ 1 แสดงวงจรกรองแอมป์ที่พาสซีฟหลายคู่สองด้านอันดับ n เราสามารถแสดงครึ่งวงจรโหมดผลต่างของวงจรดังกล่าวได้ ดังรูปที่ 2 [4] โดย G_{md} และ R_{od} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ โหมดผลต่าง (DM transconductance) และความต้านทานเอาต์พุตโหมดผลต่าง (DM output resistance) ของออปแอมป์ตามลำดับโดยทั่วไปออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรกรองแอมป์ที่พาสซีฟหลายคู่สองด้านจะมีการต่อโครงข่าย CMFB เพื่อลดสัญญาณโหมดผลรวมในวงจร โครงข่าย CMFB มีหลักการทำงานสองรูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งคือการเซ็นส์แรงดันโหมด

ผลรวมของคูโหนดใด ๆ และนำแรงดันดังกล่าวไปควบคุมแหล่งจ่ายกระแสที่ต่อกับแต่และโหนดของคูโหนดนั้นในทิศทางที่ทำให้เกิดการลดทอนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโหมดผลรวม อีกรูปแบบหนึ่งคือการต่อโครงข่ายไขว้สลับเพื่อให้เกิดการดึงและจ่ายกระแสในแต่ละโหนดในทิศทางที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโหมดผลรวม ถึงแม้หลักการทำงานของโครงข่าย CMFB สองลักษณะนี้จะแตกต่างกัน แต่ในการวิเคราะห์ห้วงจรโหมดผลรวม เราสามารถแสดงได้ว่าแบบจำลองของโครงข่าย CMFB ทั้งสองรูปแบบคือความต้านทานที่ต่อระหว่างโหนดนั้นกับกราวด์

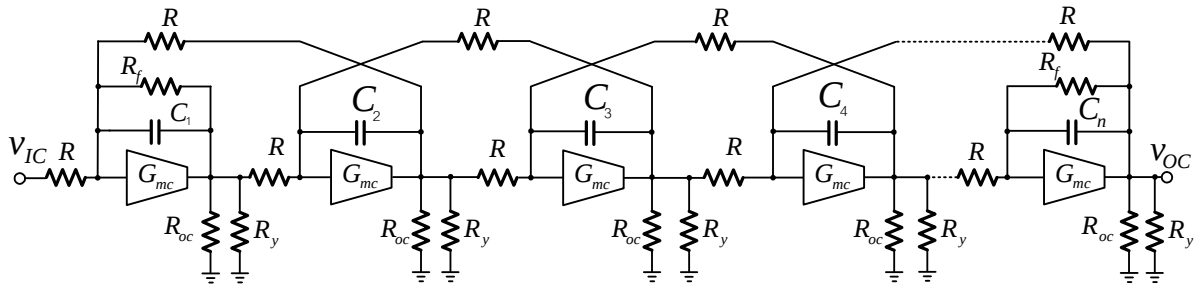
ในทำนองเดียวกันถ้ากำหนดให้ G_{mc} และ R_{oc} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์โหมดผลรวม (CM transconductance) และความต้านทานเอาต์พุตโหมดผลรวม (CM output resistance) ของออปแอมป์ เราสามารถแสดงครึ่งวงจรโหมดผลรวมของวงจรกรองในรูปที่ 1 ได้ดังรูปที่ 3



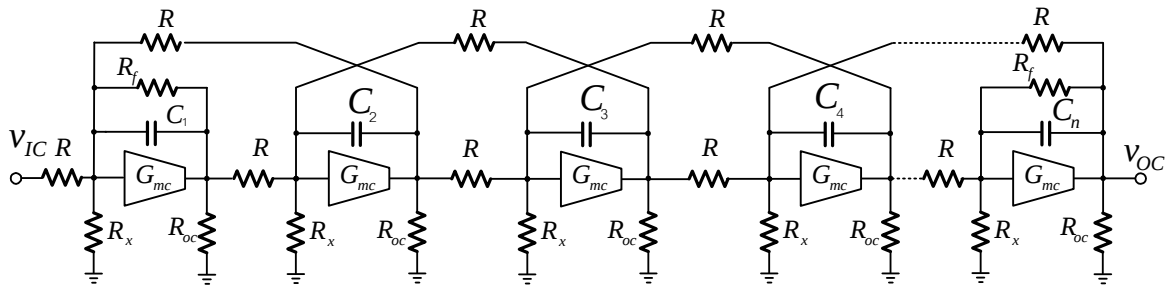
รูปที่ 1 วงจรกรองแอมป์ที่พาสซีฟหลายคู่สองด้านอันดับ n



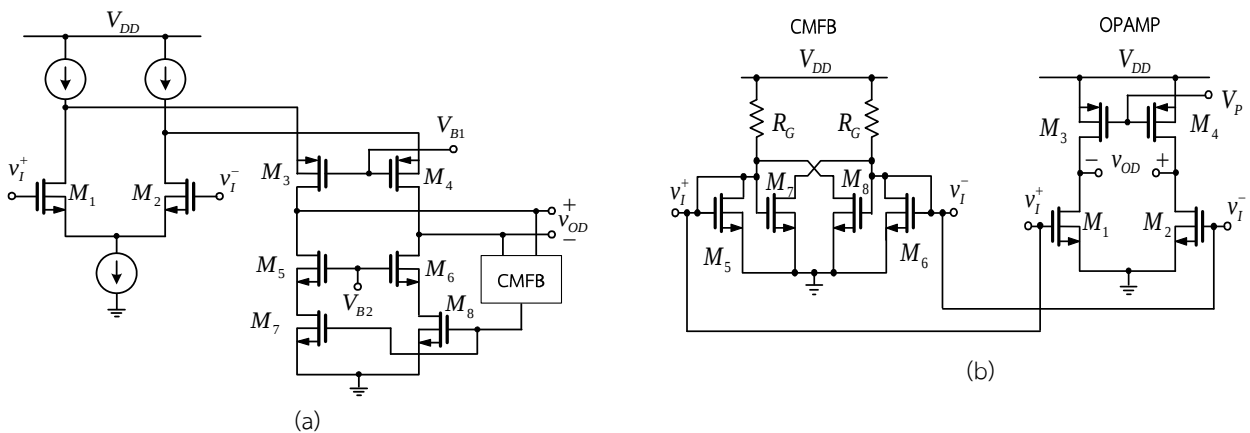
รูปที่ 2 วงจรสมมูลครึ่งวงจรโหมดผลต่างของวงจรในรูปที่ 1



รูปที่ 3 วงจรสมมูลยครึ่งวงจรโหนดผลรวมของวงจรในรูปที่ 1 กรณีใช้ออปแอมป์ที่มีการต่อโครงข่าย CMFB ที่ด้านเอาต์พุต



รูปที่ 4 วงจรสมมูลยครึ่งวงจรโหนดผลรวมของวงจรในรูปที่ 1 กรณีโครงสร้างออปแอมป์ที่มีการต่อโครงข่าย CMFB ที่ด้านอินพุต



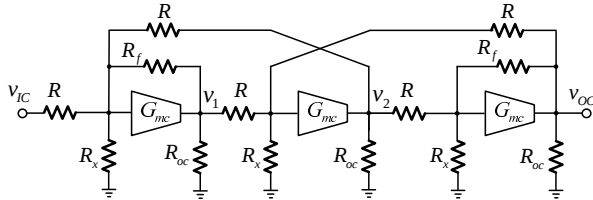
รูปที่ 5 (a) ตัวอย่างออปแอมป์ที่มีการต่อโครงข่าย CMFB ที่ด้านเอาต์พุต (b) ตัวอย่างโครงสร้างออปแอมป์ที่มีการต่อโครงข่าย CMFB ที่ด้านอินพุต

โดยรูปที่ 3 เป็นกรณีที่ออปแอมป์มีโครงข่าย CMFB ต่ออยู่ที่ด้านเอาต์พุต (โดย R_y คือความต้านทานโหนดผลรวมของโครงข่าย CMFB) และรูปที่ 4 เป็นกรณีที่ออปแอมป์มีโครงข่าย CMFB ต่อ

อยู่ที่ด้านอินพุต (โดย R_x คือความต้านทานโหนดผลรวมของโครงข่าย CMFB) รูปที่ 5a และ 5b แสดงตัวอย่างที่มีการต่อโครงข่าย CMFB ไว้ที่ด้านเอาต์พุต [5] และด้านอินพุต [6] ตามลำดับ

3. การพิจารณาเสถียรภาพของวงจรกรองในโหมดผลรวม

ในหัวข้อนี้เราจะแสดงการวิเคราะห์โหมดผลรวมของวงจรกรองแอมป์ฟอรัสซึ่เพื่อนำผลที่ได้มาพิจารณาเกี่ยวกับเสถียรภาพของวงจรรูปที่ 6 แสดงครีวงจรโหมดผลรวมของวงจรกรองแอมป์ฟอรัสซึ่ปลายคู่สองด้านอันดับสามที่มีการต่อโครงข่าย CMFB ไว้ที่ด้านหน้าของออปแอมป์

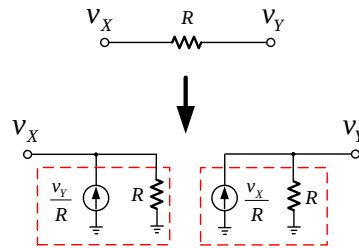


รูปที่ 6 วงจรสมมูลครีวงจรโหมดผลรวมของวงจรกรองแอมป์ฟอรัสซึ่ปลายคู่สองด้านอันดับสาม

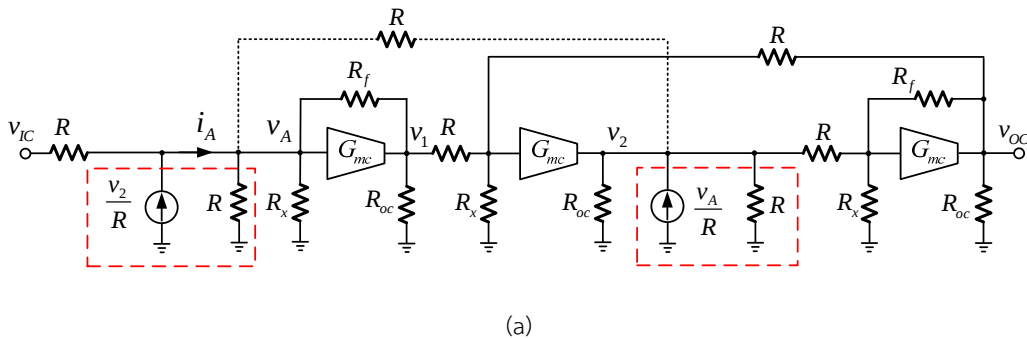
จากการพิจารณารูปที่ 6 เราพบว่าวงจรมีวงรอบการป้อนกลับ (feedback loop) สองวงรอบคือวงรอบที่หนึ่งผ่านตัวต้านทาน R ที่ต่อระหว่างโหนดเอาต์พุตของออปแอมป์ตัวที่สองและโหนดอินพุตของออปแอมป์ตัวแรก ส่วนวงรอบที่สองผ่านตัวต้านทาน R ที่ต่อ

ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์ตัวที่สามและโหนดอินพุตของออปแอมป์ตัวที่สอง ทั้งนี้วงจรที่มีวงรอบการป้อนกลับหลายวงรอบแบบนี้จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่ออัตราขยายวงรอบ (loop gain) ทุกวงรอบมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง

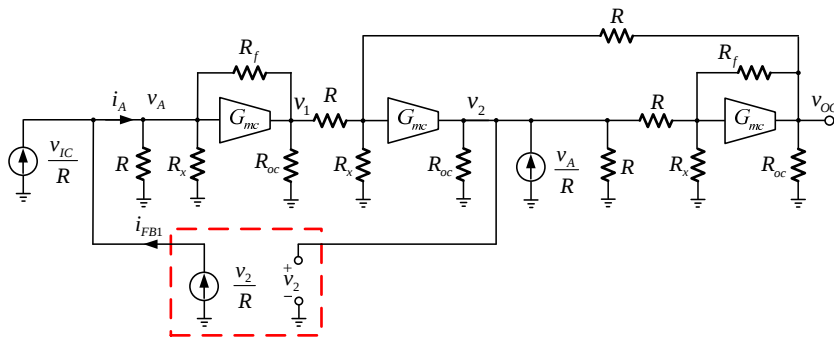
พิจารณาวงรอบที่ 1 ถ้าเราใช้วิธีการแปลงวงจรในรูปที่ 7 ไปแทนที่ตัวนำที่อยู่ระหว่างโหนดเอาต์พุตของออปแอมป์ตัวที่สองและโหนดอินพุตของออปแอมป์ตัวแรกเราจะได้วงจรดังรูปที่ 8a จากนั้นเมื่อทำการจัดรูปวงจรเพื่อแยกส่วนป้อนกลับออกมาจากส่วนอื่นจะได้รูปที่ 8b จากการวิเคราะห์ห้วงจรดังกล่าวเราจะได้สมการอัตราขยายวงรอบดังสมการที่ (1)



รูปที่ 7 วงจรสมมูลตัวนำ R ที่ต่อระหว่างโหนด V_X และ V_Y



(a)



(b)

รูปที่ 8 (a) การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลครีวงจรโหมดผลรวม กรณีพิจารณาวงรอบที่ 1

(b) วงจรสมมูลรูปที่ 8a แบบแยกส่วนป้อนกลับ

$$LG1 = \frac{i_{FB1}}{i_A} = \frac{a_4 R_x^4 + a_3 R_x^3 + a_2 R_x^2 + a_1 R_x}{b_4 R_x^4 + b_3 R_x^3 + b_2 R_x^2 + b_1 R_x + b_0} \quad (1)$$

โดยที่

$$a_4 = -R^4 R_x^4 R_{oc}^3 \left[3G_{mc}^3 + \frac{3G_{mc}^2}{R} + \frac{10G_{mc}}{RR_{oc}} + \frac{12G_{mc}}{R^2} - \frac{12}{RR_{oc}^2} - \frac{26}{R^2 R_{oc}} - \frac{12}{R^3} \right]$$

$$a_3 = -R^6 R_x^3 R_{oc}^3 \left[G_{mc}^3 + \frac{G_{mc}^2}{R} + \frac{9G_{mc}}{RR_{oc}} + \frac{15G_{mc}}{R^2} - \frac{16}{RR_{oc}^2} - \frac{45}{R^2 R_{oc}} - \frac{19}{R^3} \right]$$

$$a_2 = R_3 R_x^2 R_{oc} (R + 2R_{oc})(7R + 10R_{oc} - 2G_{mc} RR_{oc})$$

$$a_1 = R^4 R_x R_{oc} (R + 2R_{oc})^2$$

$$b_4 = 3R_x^4 R^3 R_{oc}^3 \left[G_{mc}^3 - \frac{G_{mc}^2}{R_{oc}} - \frac{10G_{mc}}{R_{oc}^2} - \frac{32G_{mc}}{RR_{oc}} - \frac{25G_{mc}}{R^2 R_{oc}} + \frac{12}{R_{oc}^3} + \frac{44}{RR_{oc}^2} + \frac{47}{R^2 R_{oc}} + \frac{12}{R^3} \right]$$

$$b_3 = R^3 R_{oc}^3 R_x^3 \left[G_{mc}^3 R - \frac{G_{mc}^2 R}{R_{oc}} - \frac{37G_{mc} R}{R_{oc}^2} - \frac{128G_{mc}}{RR_{oc}} - \frac{109G_{mc}}{R} + \frac{60R}{R_{oc}^3} + \frac{260}{R_{oc}^2} + \frac{353}{RR_{oc}} + \frac{144}{R^2} \right]$$

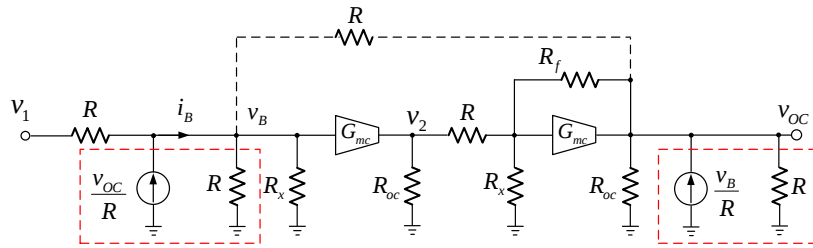
$$b_2 = R_2 R_x^2 (R + 2R_{oc}) \left[37R^2 - 15G_{mc} R^2 R_{oc} - 26G_{mc} RR_{oc}^2 + 109RR_{oc} + 76R_{oc}^2 \right]$$

$$b_1 = R^3 R_x (R + 2R_{oc})(10R + 15R_{oc} - 2G_{mc} RR_{oc})$$

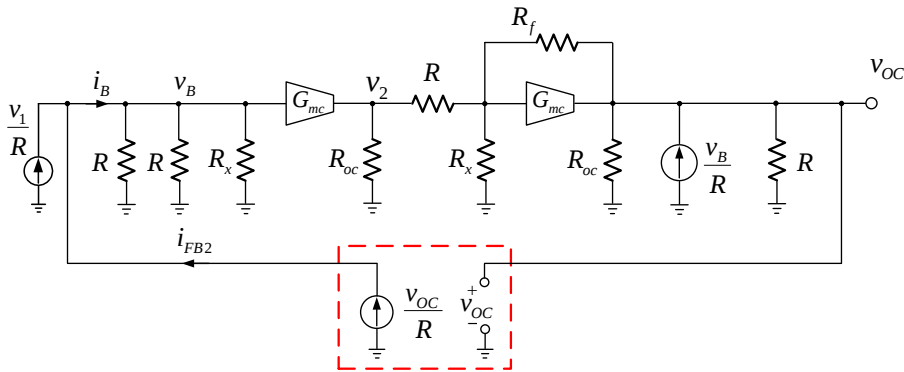
$$b_0 = R^4 (R + 2R_{oc})^3$$

พิจารณาวงรูปที่ 2 ถ้าเราใช้วิธีการแปลงวงจรในรูปที่ 7 ไปแทนที่ตัวนำที่อยู่ระหว่างโหนดอินพุตของออปแอมป์ตัวที่สอง และเอาต์พุตของออปแอมป์ตัวที่สาม เราจะได้วงจรดังรูปที่ 9a จากนั้นเมื่อทำการจัดรูปวงจรเพื่อแยกส่วนป้อนกลับออกมาจากส่วนอื่นจะได้รูปที่ 9b สามารถหาสมการอัตราขยายวงรอบของวงจรคือ

$$LG2 = \frac{i_{FB2}}{i_B} = \frac{c_2 R_x^2 + c_1 R_x + c_0}{d_2 R_x^2 + d_1 R_x + d_0} \quad (2)$$



(a)



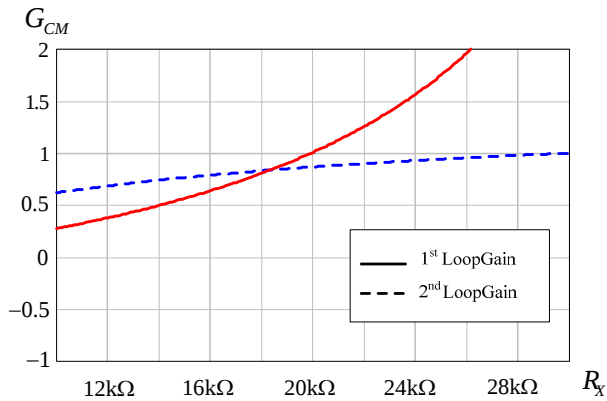
(b)

รูปที่ 9 (a) การวิเคราะห์วงจรสมมูลย์ครึ่งวงจรในโหมดผลรวม กรณีที่พิจารณาวงรูปที่ 2

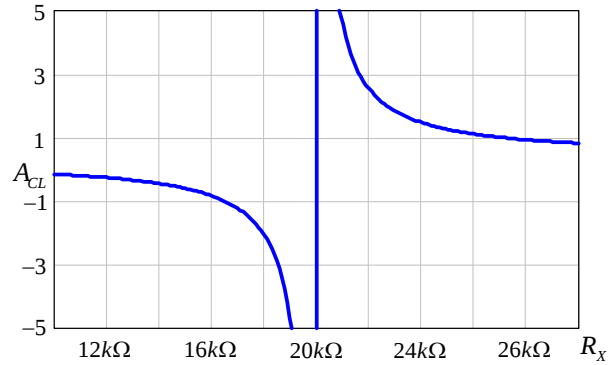
(b) วงจรสมมูลย์รูปที่ 9a แบบแยกส่วนป้อนกลับ

$$\begin{aligned}
c_2 &= 2G_{mc}RR_{oc}(R_{oc}G_{mc}^2R^2 + R_{oc}G_{mc}R + 2R + R_{oc}) \\
c_1 &= G_{mc}R^2R_{oc}(R_{oc}G_{mc}^2R^2 + R_{oc}G_{mc}R + 4R + 3R_{oc}) \\
c_0 &= G_{mc}R^3R_{oc}(R + R_{oc}) \\
d_2 &= -2(G_{mc}^2R^3R_{oc} + G_{mc}^2R^2R_{oc}^2 - 2G_{mc}R^3 - 4G_{mc}RR_{oc}^2 \\
&\quad - G_{mc}RR_{oc}^2 + 2RR_{oc} + R_{oc}^2) \\
d_1 &= -R(G_{mc}^2R^3R_{oc} + G_{mc}^2R^2R_{oc}^2 - 4G_{mc}R^3 - 10G_{mc}RR_{oc}^2 \\
&\quad - 5G_{mc}RR_{oc}^2 + 2RR_{oc} + 2R_{oc}^2) \\
d_0 &= G_{mc}R^3(R + R_{oc})(R + 2R_{oc})
\end{aligned}$$

รูปที่ 10 แสดงกราฟของอัตราขยายวงรอบในสมการ (1) และ (2) โดยกำหนดค่า $G_{mc} = -150 \mu A/V$, $R = 100 \text{ k}\Omega$, $R_{oc} = 378 \text{ k}\Omega$ จากรูปดังกล่าวเราพบว่าอัตราขยายวงรอบที่ 1 มีค่ามากกว่าหนึ่งเมื่อ R_x มีค่ามากกว่าประมาณ $20 \text{ k}\Omega$ ในขณะที่อัตราขยายวงรอบที่ 2 มีค่ามากกว่าหนึ่งเมื่อ R_x มีค่ามากกว่าประมาณ $28 \text{ k}\Omega$ นั้นแสดงว่าวงจรจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ R_x ของโครงข่าย CMFB มีค่าน้อยกว่า $20 \text{ k}\Omega$ นอกจากนี้จากรูปที่ 11 เราพบว่าในกรณีที่ R_x มีค่าน้อยกว่า $20 \text{ k}\Omega$ อัตราขยายโหมดผลรวม (CM gain) จะมีค่าเป็นลบ ในขณะที่เมื่อ R_x มีค่ามากกว่า $20 \text{ k}\Omega$ อัตราขยายผลรวมจะมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 10 กราฟของอัตราขยายวงรอบในสมการ (1) และ (2)



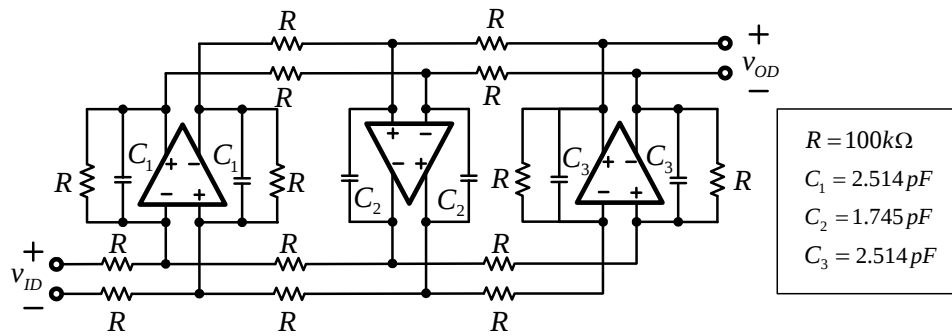
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายโหมดผลรวมกับ R_x

4. ผลการจำลองการทำงาน

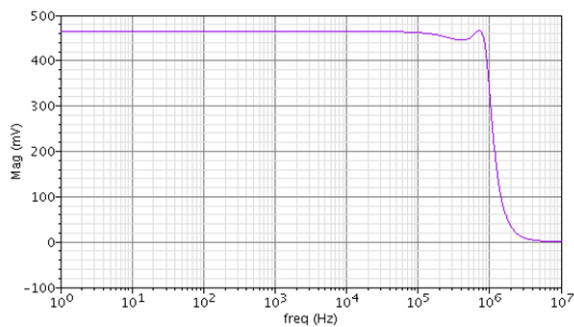
วงจรในรูปที่ 12 คือวงจรกรองแอมป์ที่ฟาร์ซีปลายคู่สองด้านอันดับสามที่มีผลตอบสนองแบบเชบิเชฟ (Chebyshev) เราได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรดังกล่าวโดยใช้ซอฟต์แวร์ในรูปที่ 12 เป็นสองกรณี (โดยใช้โครงสร้างออปแอมป์ดังรูปที่ 5b และสามารถดูค่าพารามิเตอร์การผลิตและออกแบบในตารางที่ 1) คือกรณีที่ออกแบบให้ $R_x = 19 \text{ k}\Omega$ (กรณี A) และกรณีที่ออกแบบให้ $R_x = 23 \text{ k}\Omega$ (กรณี B)

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์การผลิตและออกแบบ

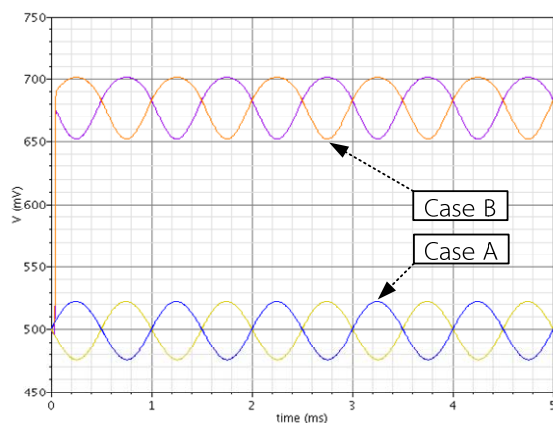
ค่าพารามิเตอร์	กรณี A ($R_x = 19 \text{ k}\Omega$)	กรณี B ($R_x = 23 \text{ k}\Omega$)
ไฟเลี้ยง	1V	
Bandwidth	1MHz	
(W/L) _{1,2}	2.5 $\mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$	
(W/L) _{3,4}	20 $\mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$	
R_G	144 k Ω	162k Ω
(W/L) _{5,6}	0.25 μm / 1.5 μm	0.25 μm / 2.3 μm
(W/L) _{7,8}	1.45 μm / 1.5 μm	1.82 μm / 2.3 μm



รูปที่ 12 วงจรกรองแอมป์ที่ฟอรัซิปลายคู่สองด้านอันดับสามที่มีผลตอบสนองแบบเชบีเชฟ



รูปที่ 13 ผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่ในโหมดผลต่าง



รูปที่ 14 ผลการตอบสนองเชิงเวลากรณี A และ B

รูปที่ 13 แสดงผลการจำลองผลตอบสนองความถี่ในโหมดผลต่าง (DM frequency response) ของวงจรซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี แต่จากการพิจารณาผลการจำลองผลตอบสนองเชิงเวลา (transient response) ดังแสดงในภาพที่ 14 จะพบว่ากรณี A ($R_x = 19 \text{ k}\Omega$) จะมีผลตอบสนองที่ถูกต้องและกรณี B ($R_x = 23 \text{ k}\Omega$) ระดับแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงผิดปรกติใกล้เคียงแรงดันไฟเลี้ยงทำให้ได้รูปสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไป

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองแอมป์ที่ฟอรัซิปลายคู่สองด้าน จากผลการวิเคราะห์ที่เรพบว่ามีค่าความต้านทานลวดทอง R_x ที่เกิดจากโครงข่าย CMFB จะเป็นตัวแปรสำคัญของเสถียรภาพของวงจร ผลการจำลองการทำงานมีความสอดคล้องกันอย่างยิ่งกับผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ทั้งนี้เราสามารถนำผลการศึกษานี้มาใช้ในการช่วยในการปรับแต่งในการออกแบบวงจรกรองแอมป์ที่ฟอรัซิปที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Johns, K. W. Martin, "Analog integrated circuit design" University of Michigan, 1997
- [2] PHILLIP E. ALLEN AND D. R. HOLBERG, "CMOS ANALOG CIRCUIT DESIGN", OUP USA, 2012
- [3] B. Razavi, "Design of Analog CMOS Integrated Circuit" Los Angeles: University of California, 2001.
- [3] Y. P. Tzividis, "Integrated Continuous-time filter design - An overview," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 29, no. 3, pp.166-176, March 1994.
- [4] R. A. Whatly, "Fully Differential Operational Amplifier with DC Common-Mode Feedback," U.S. Patent no. 4573020, February 1986.
- [5] C. Upathamkuekool, A. Jiraseree-amornkun, and J. Mahattanakul, "A Compensation Technique for Compact Low-Voltage Low-Power Active-RC Filters" *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2010)*, Paris, France, May 2010, pp. 3633-3636.



ศ.ดร.จิริยูทธ์ มหัทธนกุล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2532 ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จาก Florida Institute of technology ในปี 2534 และระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Imperial College, University of London ในปี 2540 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจทางด้านการออกแบบวงจรรวม (Integrated Circuit Design)



ชัยรัตน์ อุปลัมภ์เกื้อกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้า แขนงอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปี พ.ศ. 2554 และปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

งานวิจัยเน้นทางด้านการวิเคราะห์และออกแบบวงจรรวม