

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 และจากคุณสมบัติของ DO-CCCTA จะได้ว่าความสัมพันธ์ z เป็น

$$V_z = R_z \cdot \frac{I_z}{2} = \frac{V_T}{4I_B} I_z \quad (4)$$

เนื่องจาก $I_{B+} = \alpha_m I_z$ และ $I_{B-} = \alpha_m I_z$ จะได้ว่า

$$I_{B+} = \alpha_m \frac{V_T}{4I_B} I_z = \left(\frac{\alpha_m V_T}{2I_B} \right) \left(\frac{I_z}{4I_B} \right) \quad (5)$$

$$I_{B-} = \alpha_m \frac{V_T}{4I_B} I_z = \left(\frac{I_B}{2I_T} \right) \left(\frac{V_T}{4I_B} \right) I_z \quad (6)$$

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า

$$I_o = I_{B+} + I_{B-} \quad (7)$$

แทนสมการ (5) และ (6) ลงในสมการ (7) จะได้กระแสเอาต์พุต

$$I_o = \left(\frac{\alpha_m V_T}{2I_B} + \frac{I_B}{2I_T} \right) \left(\frac{I_z}{4I_B} \right) \quad (8)$$

จากสมการ (8) เมื่อ $I_{B2} = I_{B3} = I_B$ จะได้ว่า

$$I_o = \frac{I_z}{8I_B} \quad (9)$$

จากสมการ (9) เห็นได้อย่างชัดเจนว่า หาก I_z และ I_B เป็นสัญญาณอินพุต วงจรจะทำหน้าที่เป็นวงจรคูณสัญญาณ โดยกระแสตัวคูณสามารถปรับได้ เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 พบว่า I_1 และ I_2 สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบ นอกจากนี้ยังพบว่า ในอุดมคติ วงจรยังทำงานเป็นอิสระต่ออุณหภูมิ เนื่องจากระบบการกระจายเอาต์พุตไม่มีเทอมของค่าศักดาความร้อน (V_T) และพิจารณาสมการอินพุตอินพุตได้เช่นเดียวกับ วงจรสามารถทำหน้าที่การคูณสัญญาณได้บวก หากกำหนด I_1 หรือ I_2 และ I_B เป็นสัญญาณอินพุต แลอย่างใดก็ตาม เนื่องจาก I_B ไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ จึงต้องวงจรรูปที่ 2 นี้ จึงทำหน้าที่เป็นวงจรการคูณสัญญาณได้อย่างเหมาะสม (2 Quadrant analog divider)

4. การวิเคราะห์ในการไม่มีขั้วสมดุล

ในกรณีที่ DO-CCCTA ที่ใช้วงจร มีความไม่เป็นขั้วสมดุล สามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$I_z = \alpha_x I_x + \epsilon_z \quad (10)$$

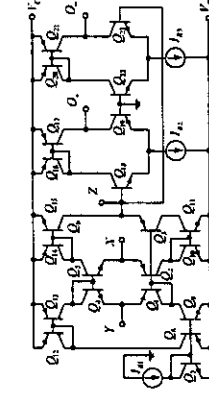
$$I_o = \beta_o V_z + \epsilon_o \quad (11)$$

$$I_{B-} = \beta_{O-} V_z + \epsilon_{O-} \quad (12)$$

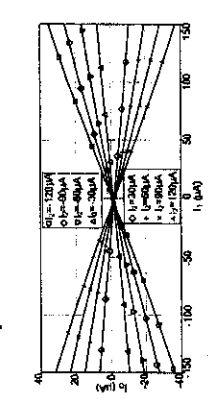
เมื่อ α_x , β_{O+} และ β_{O-} เป็นค่าผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไปจากหนึ่ง ส่วน ϵ_z , ϵ_{O+} และ ϵ_{O-} เป็นกระแสออฟเซตที่ Z , O , และ O ตามลำดับ เมื่อมีการพิจารณาความผิดพลาดแล้ว สามารถหาสมการกระแสเอาต์พุตได้จาก

$$I_o = \frac{\beta_{O+} \alpha_x}{4I_B(1+\alpha)} I_z + \frac{\beta_{O+} \alpha_x I_{B2} - \beta_{O-} \alpha_x I_{B3}}{4I_B(1+\alpha)} + \frac{\beta_{O+} \epsilon_z I_{B2} + \beta_{O-} \epsilon_z I_{B3} - \beta_{O+} \epsilon_{O+} - \beta_{O-} \epsilon_{O-}}{4I_B(1+\alpha)} \quad (13)$$

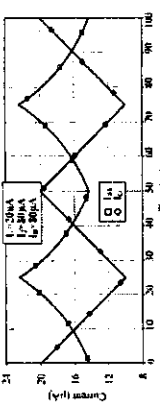
จากสมการที่ (13) ซึ่งพจน์สุดท้ายเป็นกระแสออฟเซต ส่วนในพจน์แรกนั้น จะสัมพันธ์กับกระแสคูณเอาต์พุต ซึ่งค่าผิดพลาดเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิด้วย ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเป็นอุณหภูมิอ้างอิงแล้ว จะสามารถปรับให้ DO-CCCTA มีค่าผิดพลาดในสมการที่ (10)-(12) ให้น้อยที่สุด ซึ่งวิธีการก็คือ ใช้วงจรชดเชยกระแสที่มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านกระแส



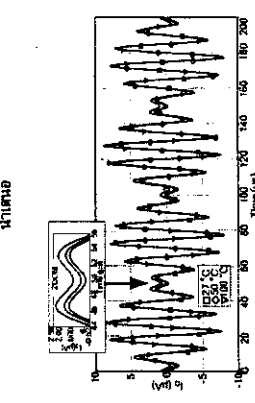
รูปที่ 3 โครงสร้างภายในของ DO-CCCTA



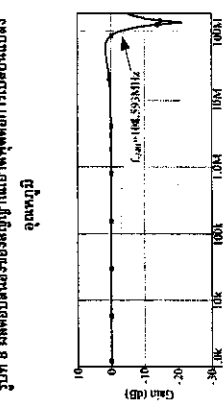
รูปที่ 4 คุณสมบัติการคูณกระแสในตัวคูณกระแสคูณสัญญาณของวงจร



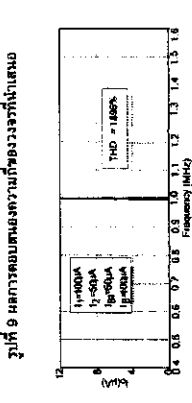
รูปที่ 7 ผลตอบสนองการเปลี่ยนการคูณสัญญาณของวงจรที่นำตาม



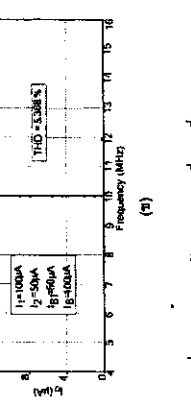
รูปที่ 8 ผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 9 ผลการตอบสนองของวงจรที่นำตาม



รูปที่ 10 ผลของการวัดค่า THD ที่ความถี่ 1MHz (ข)

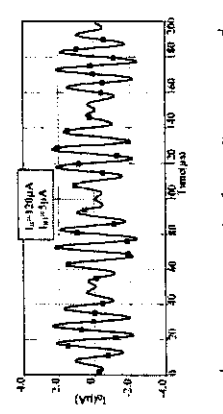


รูปที่ 10 ผลของการวัดค่า THD ที่ความถี่ 10MHz

5. ผลการจำลองการที่งาน

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถภาพของวงจรที่นำตาม จึงได้ทำการทำงานของวงจรที่นำตาม PSpice สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ ALMADO ของ AT&T (19) ในรูปที่ 3 เป็นโครงสร้างภายในของ DO-CCCTA โดยกำหนดให้แรงจลน์ที่เปลี่ยน $\pm 2V$ รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลการตอบสนองต่อกระแสไฟตรง ของวงจรถูกคูณและหารตามลำดับ ส่วนรูปที่ 6 เป็นการผสมสัญญาณขาอินพุต I_1 ขนาด $10 \mu A$ ความถี่ 10kHz และ I_2 ขนาด $20 \mu A$ ความถี่ 0.1MHz วงจรที่นำตามคูณสัญญาณได้ตามความคาดหวัง ส่วนรูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองการคูณเชิงเส้นของวงจร เมื่อรับ $I_1 = 20 \mu A$, $I_2 = 80 \mu A$ และ I_B เป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ความถี่ 20kHz

ผลของกระแสเอาต์พุตที่ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 27.50 และ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 8 เห็นได้ว่า กระแสเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิ และมาจากของพหุคูณไปจนอุณหภูมิที่สูงเล็กน้อย ทั้งนี้เกิดเนื่องมาจากความไม่เป็นขั้วสมดุลของอินพุตที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับที่วิเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้ (13) ในรูปที่ 9 เป็นผลตอบสนองการคูณของวงจร จะเห็นได้ว่าวงจรมีผลคูณสูงถึง 108.59MHz ส่วนรูปที่ 10 แสดงผลของการวัดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิก (Total Harmonic Distortion, THD) ที่ความถี่ 1MHz และ 10MHz ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลตอบสนองการคูณสัญญาณของวงจรที่นำตาม

6. สรุป

บทความวิจัยนี้เสนอ วงจรคูณแบบสี่แควดแรนต์ และทริกกระแสของตัวคูณที่มีเสถียรภาพโดยใช้อุปกรณ์ CMOS ซึ่งวงจรใช้เทคนิคคือ DO-CCCCTA เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากการทำงานที่เกินขอบเขต PSRICE ของตัวคูณที่ทำงานที่ $\pm 2V$ กระแสเข้าที่ผู้ผลิตกำหนดบนตัวคูณที่ได้นั้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนั้นยังสามารถออกแบบวงจรที่รับสัญญาณ MHz ซึ่งกระแสที่มากไปเพื่อให้อุปกรณ์ทำงาน เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อกำลังที่ใช้ และเพื่อเป็นทางเลือกอื่น เช่น ระบบสื่อสารแบบไร้สาย เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] D. M. W. Leenaerts, G. H. M. Jondens, and J. A. Hegt, "A 3.3V 625kHz switched-current multiplier," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 31, pp. 1340-1343, Sept. 1996.

[2] M. A. Abou El-Atta, M. A. Abou El-El, and M. K. El Said, "Four-quadrant current multiplier and its application as a phase-detector," *Proceedings of the Nineteenth National Radio Science Conference (NRSC 2002)*, pp. 502-508, March 2002.

[3] H. Wasaki, Y. Horio, and S. Nakamura, "Current multiplier/divider circuit," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 6, pp. 504-506, March 1991.

[4] B. Gilbert, "A precise four quadrant multiplier with subnanosecond response," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-3, no. 4, pp. 365-375, Dec., 1968.

[5] J. S. Pente-Finol, and J. A. Connelly, "A MOS four-quadrant analog multiplier using the quarter-square technique," *IEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-22, pp. 1064-1073, Dec. 1987.

[6] M. Yasumoto, and T. Ekomoto, "Integrated MOS four-quadrant analog multiplier using switched-capacitor technique," *Electronics Letters*, vol. 18, no. 18, pp. 769-771, Sep. 1982.

[7] Toumazou C., Lidzey F. J., and Hight D. G. *Analogue IC design: the current-mode approach*, London: Peter Peregrinus, 1990.

[8] Hlas C. S. and Laopoulos Tn. "Circuit design: a study on voltage-mode to current-mode conversion technique". *Proceedings of MIELECON '96*, Bari, Italy, May 1996: 1309-1312.

[9] D. Brodarac, D. Herbst, B. J. Hosticka, and B. Hoefflinger, "Novel sampled-data MOS multiplier," *Electronics Letters*, vol. 18, no. 5, pp. 228-230, March 1982.

[10] G. Manganaro, and J. P. De Gyvez, "A four-quadrant S21 switched-current multiplier," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, vol. 45, no. 7, pp. 791 - 799, July 1998.

[11] R. J. Wiegand, "A CMOS four-quadrant analog current multiplier," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 4, pp. 2244 - 2247, June 1991.

[12] T. Arhanaini, V. Kasemsuan, and Hyung Keun Ahn, "A ± 1.5 V High Frequency Four Quadrant Current Multiplier," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, ISCAS 2005, pp. 1016 - 1019, May 2005.

[13] S. Maheshwari, and I. A. Khan, "Current-controlled current differencing buffered amplifier: implementation and applications," *Active and Passive Electronic Components*, 4: 219-227, 2004.

[14] C. Fremont, S. Cellat, R. Grisel, N. Abouchi, J. P. Charlet, D. Renault, "A CMOS multiplier/divider based on current conveyors," *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 1, pp. 69-71, 1998.

[15] K. Kaewwang, C. Fogsamat and W. Surakamponthorn, "A Wide-Band, Current-Mode OTA-Based Analog Multiplier-Divider," *ISCAS'03*, Vol. 1, pp. 1-348 - 1-352, 2003.

[16] A. Ü. Keskin, "A Four Quadrant Analog Multiplier Employing Single CDBA," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 40 n.1, pp.99-101, July 2004.

[17] W. Jaikla and M. Sriprachyanun, "Novel Current-mode Four-Quadrant Multiplier/Divider Based on Current Controlled CDBAs (CCDBAs)," *The 3rd ECTI Annual Conference*, pp. 509-512, 2006.

[18] M. Sriprachyanun, M. Phattanasak and W. Jaikla, "Current-Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifier (CCCCTA): A Building Block for Analog Signal Processing," *Proceedings of EEECONSO*, pp. 897-900, October 2007.

[19] D. R. Frey, "Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering," *IEE Proc. Circuit Devices Syst.*, 140: 406-416, 1993.