

# การค้นหาย่านการล็อกของวงจรรหารความถี่จำนวนคี่ที่อาศัยวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบผ่อนคลายที่มีการอินเจ็คนล็อก

## Determining Locked Ranges of Odd-number Frequency

## Divider Based on Injection Locked Relaxation Oscillator

อารัมภ์ กิตติพงษ์วัฒนา<sup>1</sup> พูลศักดิ์ โกษียาภรณ์<sup>2</sup> จิรสุดา โกษียาภรณ์<sup>1</sup> ปราโมทย์ วาดเขียน<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการค้นหาย่านการล็อกของวงจรรหารความถี่ที่อาศัยวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบผ่อนคลายที่มีการอินเจ็คนล็อก โมเดลที่นำเสนอสามารถชี้ให้เห็นว่าอัตราหารความถี่ที่เหมาะสมของวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบผ่อนคลายที่มีการอินเจ็คนล็อกเป็นจำนวนคี่ ย่านการล็อกของวงจรรที่ได้อาจได้จากโมเดลนั้นนอกจากจะหาได้จากอิทธิพลของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แล้ว แต่ยังสามารถหาได้จากสัญญาณอินพุตไม่เป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อีกด้วย โมเดลที่นำเสนอถูกพิสูจน์ด้วยการจำลองการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบผ่อนคลายซึ่งใช้เทคโนโลยี 0.35um CMOS ของ TSMC

**คำสำคัญ :** วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบผ่อนคลาย, วงจรรหารความถี่, อินเจ็คนล็อกออสซิลเลเตอร์

### Abstract

The mathematical model for determining locked ranges of frequency divider based on an injection locked relaxation oscillator (ILRO) is proposed. The proposed model can indicate that an appropriate frequency division ratio of the injection locked relaxation oscillator is an odd number. Locked ranges of the oscillator which are derived from the proposed model can not only be determined from the influence of a pure sinusoidal input signal but also from non-pure sinusoidal input signal. The verification of the proposed model is provided by using the simulation of the injection locked relaxation oscillator based on 0.35um CMOS of TSMC.

**Keywords :** Relaxation oscillator, Frequency divider, Injection locked oscillator (ILO)

### 1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรรหารความถี่โดยอาศัยอินเจ็คนล็อกออสซิลเลเตอร์ (ILOs) ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นจำนวนมาก

เช่น โครงข่ายกระจายสัญญาณนาฬิกา [1] วงจรคู่อัตราสัญญาณนาฬิกา [2] วงจรสังเคราะห์ความถี่ [3] และเครื่องรับส่ง FSK [4] เป็นต้น

เพื่อที่เราจะสามารถนำวงจรความถี่ที่อาศัย ILOs ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราจะต้องทราบขั้นตอนการเลือกและอัตราการทำงานที่ถูกต้องของวงจร ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากนำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาขั้นตอนการเลือก กลุ่มแรก [5]-[6] เป็นโมเดลเชิงการวิเคราะห์ซึ่งถูกจำกัดไว้ที่วงจรออสซิลเลเตอร์ที่สามารถโมเดลได้ด้วยระบบป้อนกลับ ขณะที่อีกกลุ่มหนึ่ง [7]-[8] เป็นโมเดลเชิงเลขที่ได้พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของออสซิลเลเตอร์ซึ่งส่งผลให้มีกระบวนการคำนวณที่มากและซับซ้อน นอกจากนี้โมเดลทั้งสองกลุ่มจะกำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนของการวิเคราะห์และเพื่อให้ขั้นตอนการเลือกสามารถเขียนในรูปสูตรทางคณิตศาสตร์ได้ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าสัญญาณอินพุตอาจจะไม่ใช่สัญญาณไซน์ เช่น ในระบบดิจิทัล ดังนั้นการทราบอิทธิพลของสัญญาณดังกล่าวต่อขั้นตอนการเลือกจึงมีความสำคัญต่อการนำ ILOs ไปประยุกต์ใช้

ในปี 2013 วงจรความถี่ที่อาศัย ILRO [9] ได้ถูกนำเสนอ วงจรดังกล่าวบริโภคกำลังน้อยกว่าวงจรความถี่ที่อาศัยวงจรออสซิลเลเตอร์ประเภทอื่น (ดังตารางที่ 5 ของ [5]) และมีอัตราการทำงานที่เพียงค่าเดียว เป็นที่น่าเสียดายว่าบทความดังกล่าวไม่ได้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการค้นหาขั้นตอนการเลือกที่ถูกต้อง นอกจากนี้โมเดลทั้งสองกลุ่มก็ไม่สามารถนำมาใช้หาขั้นตอนการเลือกให้ในรูปของสูตรทางคณิตศาสตร์สำหรับ ILRO ได้โดยง่าย ในบทความนี้โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาขั้นตอนการเลือกและอัตราการทำงานที่ถูกต้องของ ILRO จะถูกนำเสนอ นอกจากนี้โมเดลที่นำเสนอจะถูกนำไปใช้คำนวณหาขั้นตอนการเลือกเมื่อสัญญาณอินพุตไม่ใช่สัญญาณไซน์ได้อีกด้วย

องค์ประกอบของบทความนี้ประกอบด้วย หลักการพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพ้อนคลายในหัวข้อที่ 2 หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงพฤติกรรมทางกายภาพและปัจจัยการเลือกโมเดลสำหรับการค้นหาขั้นตอนการเลือกจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการจำลองการทำงานจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 5 และหัวข้อที่ 6 จะเป็นบทสรุปของงานวิจัย

## 2. วงจรออสซิลเลเตอร์แบบพ้อนคลาย

โดยทั่วไปโครงสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพ้อนคลายประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักดังรูปที่ 1 (โดยไม่มีแหล่งจ่ายกระแส  $i_{in}(t)$ ) ส่วนแรกคือตัวเก็บประจุ ส่วนที่สองคือวงจร Charge Pump โดยที่  $I_{CP}$  คือขนาดของกระแส ส่วนสุดท้ายคือวงจร Schmitt trigger ซึ่งมีระดับแรงดันขีดเปลี่ยนคือ  $V_{th,L}$  และ  $V_{th,H}$  คาบเวลาธรรมชาติของสัญญาณ ( $T_{nat}$ ) ที่วงจรสร้างขึ้นซึ่งประกอบไปด้วยค่าเวลาการเก็บประจุ ( $\tau_H$ ) และคายประจุ ( $\tau_L$ ) สามารถเขียนคือ  $T_{nat} = 2C\Delta V_{th}/I_{CP}$  และความถี่ธรรมชาติหาได้จาก  $f_{nat} = 1/T_{nat}$

## 3. พฤติกรรมทางกายภาพและปัจจัยการเลือก

ด้วยกระบวนการผลิตสัญญาณของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพ้อนคลายซึ่งแบ่งออกเป็นขั้นตอนการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุ ดังนั้นเพื่อที่จะผลิตสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ ค่าเวลา  $\tau_H$  และ  $\tau_L$  จะต้องเท่ากัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือขนาดของกระแสของวงจร Charge Pump ในช่วงการจ่าย ( $+I_{CP}$ ) และการดึง ( $-I_{CP}$ ) จะต้องเท่ากัน

จากกระบวนการข้างต้น เมื่อสัญญาณอินพุตปรากฏวงจรจะพยายามทำการปรับคาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตให้สอดคล้องกับคาบเวลาของสัญญาณอินพุต พร้อมทั้งทำการปรับค่าเวลาเก็บและคายประจุให้เท่ากันเพื่อรักษาความถูกต้องของสัญญาณ และเมื่อสัญญาณอินพุตอยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสมวงจรจะเข้าสู่สภาวะล็อก เมื่อพิจารณามุมมองทางกายภาพดังรูปที่ 2 วงจรจะทำการล็อกสัญญาณอินพุต เมื่อค่าขนาดเฉลี่ยของสัญญาณอินพุตในช่วงเวลาการเก็บและคายประจุมีขนาดเท่ากันแต่ขั้วต่างกัน อิทธิพลของค่าขนาดเฉลี่ยนี้จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปสัญญาณ และคาบเวลาของสัญญาณอินพุต ตัวแปรเหล่านี้จะถูกพิจารณาในหัวข้อถัดไป

จากพฤติกรรมทางกายภาพข้างต้นทำให้เราทราบความสัมพันธ์ทางด้านเวลาในกรณีที่วงจรอยู่ในสภาวะล็อกคือ

$$\tau_{1,H} = \tau_{1,L} = T_1/2 \quad (1)$$

โดยที่  $\tau_{1,H}$  และ  $\tau_{1,L}$  คือค่าเวลาการเก็บและคายประจุในสภาวะลือกตามลำดับ ขณะที่  $T_1$  คือคาบเวลาเอาต์พุตในสภาวะลือก ความสัมพันธ์ของค่าเวลาดังกล่าวสอดคล้องกับสภาวะปกติของวงจร นอกจากนี้ในรูปที่ 2 ยังพบอีกว่าเมื่อวงจรอยู่ในสภาวะลือก คาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอินพุตมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_1 = nT_{in} \quad (2)$$

โดยที่  $T_{in}$  คือคาบเวลาสัญญาณอินพุต และ  $n$  คืออัตราการทำงานจำนวนเต็ม

#### 4. ย่านการลือกของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟ่อนคลายที่มีการอินเจกชันลือก

ในบทความนี้สัญญาณอินพุตจะถูกพิจารณาให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูเรียร์และสามารถเขียนได้ดังนี้

$$i_{in}(t) = I_{in} \sum_{x=1}^{\infty} a_x \sin(x\omega_m t) \quad (3)$$

โดยที่  $I_{in}$  คือขนาด  $\omega_m$  คือความถี่  $x$  คือดัชนี  $a_x$  คือสัมประสิทธิ์ของแต่ละ  $x$  ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์หนึ่งความถี่จะพบว่า  $x=1$  และ  $a_1=1$  ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม องค์ประกอบของสัญญาณจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกที่เท่ากัน ( $x_{odd}$ ) และสัมประสิทธิ์จะมีค่าเป็น

$$a_{x_{odd}} = 8/(\pi x_{odd})^2 \quad (4)$$

เช่นกัน ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม องค์ประกอบของสัญญาณจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกที่และสัมประสิทธิ์จะมีค่าเป็น

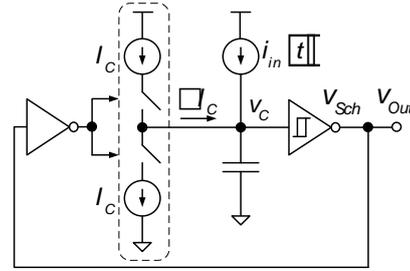
$$a_{x_{odd}} = 4/(\pi x_{odd}) \quad (5)$$

สมการสำหรับการหาค่าเวลาในการเก็บประจุสามารถถูกเขียนได้ดังนี้

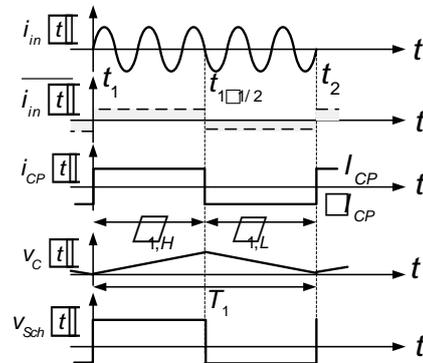
$$\int_{v_C(t_1)}^{v_C(t_{1+1/2})} dv_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_{1+1/2}} [I_{CP} + i_{in}(t + t_{d,1})] dt \quad (6)$$

โดยที่  $t_{d,1}$  คือเวลาหน่วง ด้วยการกำหนดให้  $t_1 = 0$ ,  $t_{1+1/2} = \tau_{1,H}$ ,  $v_C(t_1) = V_{th,L}$  และ  $v_C(t_{1+1/2}) = V_{th,H}$  ผลต่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุคือ

$$\Delta V_{th} = I_{CP} \tau_{1,H} / C - \frac{I_{in}}{C\omega_m} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[ \cos(x\omega_m(\tau_{1,H} + t_{d,1})) - \cos(x\omega_m t_{d,1}) \right] \quad (7)$$



รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจร ILRO



รูปที่ 2 ลักษณะสัญญาณอินพุตที่ส่งผลให้ระบบทำการลือกและสัญญาณอื่นๆของ ILRO

ทำการจัดรูปสมการเพื่อหาค่าเวลาการเก็บประจุจะได้

$$\tau_{1,H} = \frac{T_{nat}}{2} + \frac{\alpha}{\omega_m} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[ \cos(x\omega_m(\tau_{1,H} + t_{d,1})) - \cos(x\omega_m t_{d,1}) \right] \quad (8)$$

โดยที่  $\alpha = I_{in}/I_{CP}$  ในกรณีของค่าเวลาการคายประจุสามารถหาได้จาก

$$\int_{v_C(t_{1+1/2})}^{v_C(t_2)} dv_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{1+1/2}}^{t_2} [-I_{CP} + i_{in}(t + t_{d,1})] dt \quad (9)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าผลต่างของตัวเก็บประจุคือ

$$-\Delta V_{th} = -I_{CP} \tau_{1,L} / C - \frac{I_{in}}{C\omega_m} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[ \cos(x\omega_m(T_1 + t_{d,1})) - \cos(x\omega_m(\tau_{1,H} + t_{d,1})) \right] \quad (10)$$

โดยกำหนดให้  $t_2 = T_1$ ,  $v_C(t_2) = V_{th,L}$  และ  $v_C(t_{1+1/2}) = V_{th,H}$  หลังจากการจัดรูปสมการ ค่าเวลาการคายประจุจะได้

$$\tau_{1,L} = T_{nat}/2 + \frac{\alpha}{\omega_m} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[ -\cos(x\omega_m(T_1 + t_{d,1})) + \cos(x\omega_m(\tau_{1,H} + t_{d,1})) \right] \quad (11)$$

จากความสัมพันธ์  $T_1 = \tau_{1,H} + \tau_{1,L}$  และจากสมการที่ (8) และ (11) จะได้

$$T_1 = T_{nat} + \frac{\alpha}{\omega_m} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \begin{bmatrix} -\cos(x\omega_m(T_1 + t_{d,1})) \\ +2\cos(x\omega_m(\tau_{1,H} + t_{d,1})) \\ -\cos(x\omega_m t_{d,m}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

ตามทีกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3 ภายหลังจากการแทนสมการที่ (1) และ (2) ลงในสมการที่ (12) มันจะกลายเป็น

$$nT_{in} = T_{nat} + \frac{\alpha}{\omega_m} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \begin{bmatrix} -\cos(xn2\pi + x\omega_m t_{d,1}) \\ +2\cos(xn\pi + x\omega_m t_{d,1}) \\ -\cos(x\omega_m t_{d,1}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

จากองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณอินพุตซึ่งมีเฉพาะฮาร์โมนิกที่เท่ากัน และความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ สมการที่ (13) จะกลายเป็น

$$nT_{in} = T_{nat} - \frac{4\alpha}{\omega_m} \sum_{x_{Odd}=1}^{\infty} \frac{a_{x_{Odd}}}{x_{Odd}} \sin^2\left(\frac{x_{Odd}n\pi}{2}\right) \cos(x_{Odd}\omega_m t_{d,1}) \quad (14)$$

ในกรณีที่  $n$  เป็นจำนวนคู่จะพบว่า  $\sin^2(x_{Odd}n_{Even}\pi/2) = 0$  และสมการที่ (14) จะกลายเป็น

$$n_{Even}T_{in} = T_{nat} \quad (15)$$

สมการนี้ชี้ให้เห็นว่าในกรณีนี้ ILRO จะทำการล็อกเฉพาะที่ความถี่  $f_{in} = n_{Even}f_{nat}$  นอกจากนี้มันยังได้แสดงให้เห็นว่าวงจรความถี่โดยอาศัย ILRO ไม่เหมาะสมจะทำการหารด้วยอัตราจำนวนคู่

ในกรณีที่  $n$  เป็นจำนวนคี่จะพบว่า  $\sin^2(x_{Odd}n_{Odd}\pi/2) = 1$  และสมการที่ (14) จะกลายเป็น

$$\sum_{x_{Odd}=1}^{\infty} \frac{a_{x_{Odd}}}{x_{Odd}} \cos(x_{Odd}\omega_m t_{d,1}) = \frac{T_{nat} - n_{Odd}T_{in}}{4\alpha/\omega_m} \quad (16)$$

จากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติจะพบว่าเทอมทางฝั่งซ้ายของสมการจะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\omega_m t_{d,1} = 0$  หรือ  $2\pi$  และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อ  $\omega_m t_{d,1} = \pi$  ดังนั้นสมการที่ (16) จะเขียนได้เป็น

$$-K \leq (T_{nat} - n_{Odd}T_{in})/(4\alpha/\omega_m) \leq K \quad (17)$$

โดยที่  $K = \sum_{x_{Odd}=1}^{\infty} \frac{a_{x_{Odd}}}{x_{Odd}}$  ภายหลังจากการจัดรูปสมการ

สมการย่านการล็อกของวงจรที่มีอัตราหารจำนวนคี่จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (18)

$$(n_{Odd}f_{nat} - \Delta f) \leq f_{in} \leq (n_{Odd}f_{nat} + \Delta f) \quad (18)$$

โดยที่  $\Delta f = f_{nat} 2\alpha K/\pi$  จากสมการได้แสดงให้เห็นว่าย่านการล็อกของแต่ละ  $n_{Odd}$  จะเท่ากัน ด้วยผลลัพธ์ที่ได้

ILRO เหมาะสมที่จะเป็นวงจรหารความถี่จำนวนคี่ จากสมการที่ (15) และ (18) ย่านการล็อกของวงจรความถี่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยที่แกนดิ่งและแกนนอนเป็นขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตตามลำดับ

ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์มันถูกพบว่า  $K = \pi/2$  ดังนั้นความกว้างของย่านการล็อกจะเป็น

$$2\Delta f = 2f_{nat} (2\alpha/\pi) \quad (19)$$

ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความกว้างของย่านการล็อกจะเป็น

$$2\Delta f = 2f_{nat} ((16\alpha/\pi^3)(1.0518)) \quad (20)$$

และถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความกว้างของย่านการล็อกจะเป็น

$$2\Delta f = 2(f_{nat} \alpha) \quad (21)$$

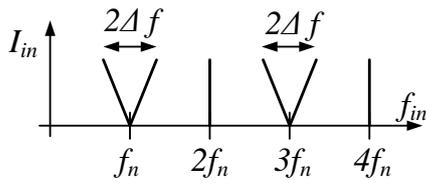
จากสมการที่ (19) ถึง (21) แสดงให้เห็นว่าย่านการล็อกแปรผันตรงกับขนาดของสัญญาณอินพุตและผลรวมสัมประสิทธิ์ ( $K$ ) และย่านการล็อกจะกว้างมากที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม และกว้างน้อยที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

## 5. ผลการจำลองการทำงาน

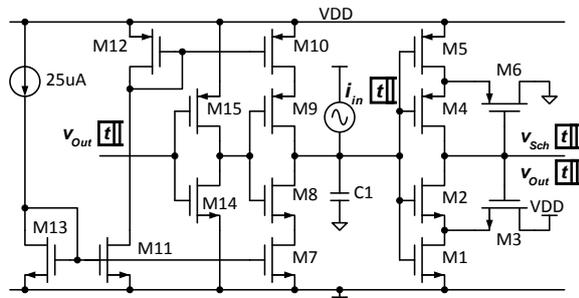
เพื่อทำการพิสูจน์หลักการที่นำเสนอวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟอนคลายจะถูกออกแบบโดยใช้เทคโนโลยี 0.35um CMOS ของ TSMC โครงสร้างของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และขนาดของ MOS สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1. วงจร Schmitt trigger มีแรงดันขีดผ่านด้านสูงและด้านต่ำคือ 2.75V และ 0.65V วงจร Charge-pump มีขนาดกระแส 25uA ตัวเก็บประจุมีค่า 1pF และแหล่งจ่ายกำลังมีค่า 3.3V ในสภาวะปราศจากสัญญาณภายนอกวงจรผลิตสัญญาณที่ความถี่ 5.4MHz ซึ่งความถี่นี้อยู่ในย่าน 60-meter และเป็นความถี่ที่ใช้ควบคุม Switching regulator ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5

เนื่องจาก ILRO เหมาะสมเป็นวงจรหารความถี่จำนวนคี่ ดังนั้นเพื่อให้กระชับต่อการนำเสนอ การจำลองการทำงานและการคำนวณจะถูกนำเสนอเฉพาะในกรณีของอัตราหารเป็นคี่เท่านั้นซึ่งคือ 3 และ 5 รูปที่ 6 และ 7 คือผลการหารความถี่ด้วย 3 เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีขนาด 3uA

ตามลำดับ รูปที่ 8 คือผลการหารความถี่ด้วย 5 เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 3uA



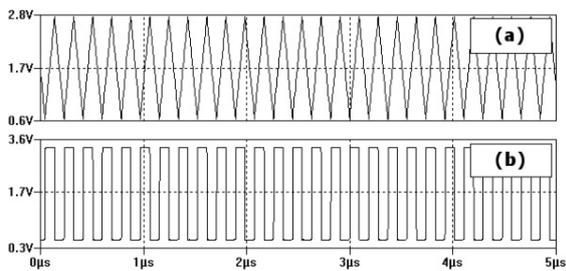
รูปที่ 3 ย่านการลือกของวงจรหารความถี่ที่อาศัย ILRO



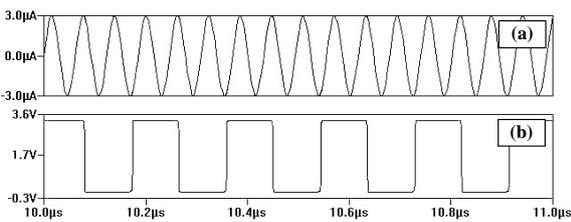
รูปที่ 4 โครงสร้างของวงจรรออสซิลเลเตอร์แบบพอนคลาย

ตารางที่ 1. ขนาดของอุปกรณ์

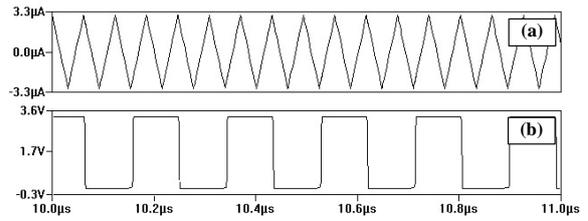
Device names	W(um)/L(um)	Device names	W(um)/L(um)
M1, 2, 7, 8, 11, 13, 14	4.2/0.7	M4, 5, 9, 10, 12, 15	14/0.7
M3	25/0.7	M6	70/0.7



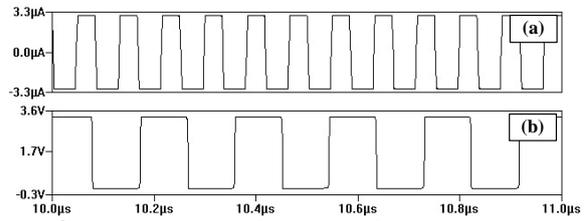
รูปที่ 5 สัญญาณของวงจรในสภาวะปราศจากสัญญาณอินพุต โดยที่ (a) คือ  $v_C(t)$  และ (b) คือ  $v_{Sch}(t)$



รูปที่ 6 ผลการหารความถี่ด้วย 3 โดยที่ (a) คือ  $i_{in}(t)$  เป็นสัญญาณไซน์ ( $f_{in} = 16.2\text{MHz}$ ) และ (b) คือ  $v_{Sch}(t)$



รูปที่ 7 ผลการหารความถี่ด้วย 3 โดยที่ (a) คือ  $i_{in}(t)$  เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ( $f_{in} = 16.2\text{MHz}$ ) และ (b) คือ  $v_{Sch}(t)$

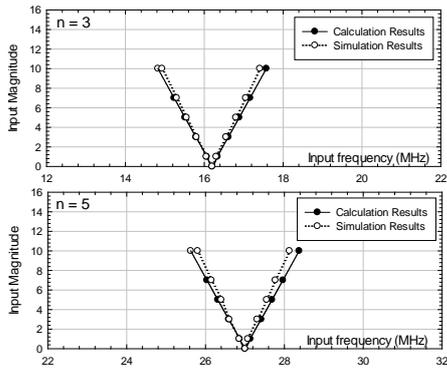


รูปที่ 8 ผลการหารความถี่ด้วย 5 โดยที่ (a) คือ  $i_{in}(t)$  เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ( $f_{in} = 27\text{MHz}$ ) และ (b) คือ  $v_{Sch}(t)$

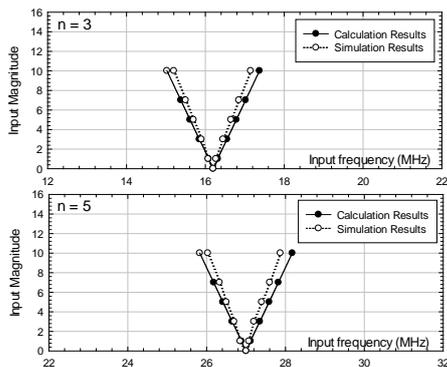
รูปที่ 9 ถึง 11 คือย่านการลือกที่ได้จากการจำลองการทำงานเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นไซน์ สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม ตามลำดับ โดยที่แกนตั้งและแกนนอนเป็นขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุต จากรูปพบว่าย่านการลือกของทั้งสามกรณีแปรผันตรงกับขนาดของสัญญาณอินพุต ดังที่ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (19) ถึง (21) ทุกอัตราการหารย่านการลือกจะกว้างมากที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม และแคบที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม นอกจากนี้จะเห็นว่าย่านการลือกที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองอีกด้วย

## 6. สรุป

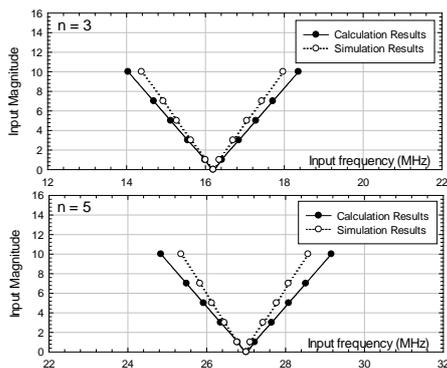
บทความนี้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการค้นการย่านการลือกซึ่งอยู่ในรูปสูตรทางคณิตศาสตร์ของวงจรหารความถี่ที่อาศัย ILRO หลักการที่นำเสนอได้แสดงให้เห็นว่า ILRO เหมาะสมกับการเป็นวงจรหารความถี่จำนวนคี่และแสดงให้เห็นว่านอกจากความกว้างของย่านการลือกขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณอินพุต มันยังขึ้นอยู่กับอีกรูปร่างของสัญญาณอินพุตซึ่งหามาได้จากผลรวมของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณ พร้อมกันนั้นผลการคำนวณย่านการลือกมีค่าใกล้เคียงกับย่านการลือกที่ได้จากการจำลองการทำงาน



รูปที่ 9 ย่านการล็อกเมื่อ  $i_{in}(t)$  เป็นสัญญาณไซน์



รูปที่ 10 ย่านการล็อกเมื่อ  $i_{in}(t)$  เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 11 ย่านการล็อกเมื่อ  $i_{in}(t)$  เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม

7. กิตติกรรมประกาศ

Financial support from the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0014/2553) to Arum Kitipongwatana and Paramote Wardkein are acknowledged.

8. เอกสารอ้างอิง

[1] L. Zhang, B. Ciftcioglu, M. Huang, and H. Wu, "Injection-Locked Clocking: A New GHz Clock

Distribution Scheme," IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2006

[2] S. Jafarbeiki, K. Hajsadeghi and N. Modir, "A 20 Gb/s Injection-Locked Clock and Data Recovery Circuit," International Journal of VLSI design & Communication Systems, Vol. 5, No.4, Aug. 2014

[3] H. R. Rategh, H. Samavati, and T. H. Lee, "A CMOS Frequency Synthesizer with an Injection-Locked Frequency Divider for a 5-GHz Wireless LAN Receiver," IEEE Journal on Solid-State Circuits, Vol. 35, No. 5, May, 2000

[4] J. Bae and H. J. Yoo, "A Low Energy Injection-Locked FSK Transceiver with Frequency-to-Amplitude Conversion for Body Sensor Applications," Symposium on VLSI Circuits/Technical Digest of Technical Papers, 2010

[5] K. Zhu, S. K. Islam, M. Roknsharifi, Md. S. Hasan and I. Mahub, "A Divide-by-3 0.4-1.4 GHz Injection-Locked Frequency Divider Based on Relaxation Oscillator" IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 23, Jul. 2013

[6] B. Razavi, "A Study of injection locking and pulling in oscillators," IEEE J. Solid-State Circuits, 2004

[7] I. Ali, A. Banerjee, A. Mukherjee, and B. N. Biswas, "Study of Injection Locking with Amplitude Perturbation and its Effect on Pulling of Oscillator," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. 59, No. 1, Jan. 2012

[8] P. Maffezzoni, "Analysis of Oscillator Injection Locking through Phase-Domain Impulse-Response," IEEE Trans. Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2008

[9] P. Maffezzoni, "Computing the Synchronization Regions of Injection-Locked Strongly Nonlinear Oscillators for Frequency Division Applications," IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 29, No. 12, Dec 2010