

เครื่องตรวจจับโลหะชนิดมือถือโดยใช้หลักการ Beat Frequency Oscillator

อนุชา แก้วพูลสุข และ รัชณุ กัดมัน*

Portable Metal Detector Based on Beat Frequency Oscillator Principle

Anucha Kaewpoonsuk and Ratchanoo Katman*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อ.เมือง จ.พิจิตร 65000

*Corresponding author. E-mail : anuchak@nu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะชนิดมือถือ โดยใช้หลักการ Beat Frequency Oscillator วงจรภายในของเครื่องตรวจจับโลหะที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ 2 วงจรต่อกับวงจรถาวด์ผลต่างความถี่ และวงจรขยายสัญญาณสำหรับขับลำโพง ขดลวดค้นหาที่ใช้เป็นแบบ 1 ขด ซึ่งต่ออยู่เป็นส่วนหนึ่งของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณวงจรแรก ในส่วนของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณวงจรที่สองถูกใช้สำหรับสร้างความถี่อ้างอิงให้กับระบบ ข้อดีของเครื่องตรวจจับโลหะที่พัฒนาออกแบบขึ้น คือวงจรมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ไอซีที่ใช้เป็นส่วนประกอบหาซื้อได้โดยง่ายภายในประเทศ และเครื่องมือมีความไวเพียงพอสำหรับการค้นหาเหรียญหรือลูกกุญแจขนาดเล็กภายในกระเป๋ากางเกงได้

คำสำคัญ: เครื่องตรวจจับโลหะ ตัวกำเนิดความถี่บีตส์ หลักการกระแสไหลวน

Abstract

This research focuses on the implementation of the portable metal detector based on beat frequency oscillator principle. The proposed circuit comprises of two oscillators, the differencing frequency detector, and the amplifier circuit used to driving the speaker. The first oscillator circuit employs one coil to function as a search coil. The second oscillator circuit is used as a frequency reference generator for the system. The obvious advantage of the proposed detector is ease of hardware implementation. The design method makes use of the commercially available electronics component in our country. In addition, the proposed detector is also sensitive for coins and small keys in a pocket.

Keywords: Metal detector, beat frequency oscillator, eddy current

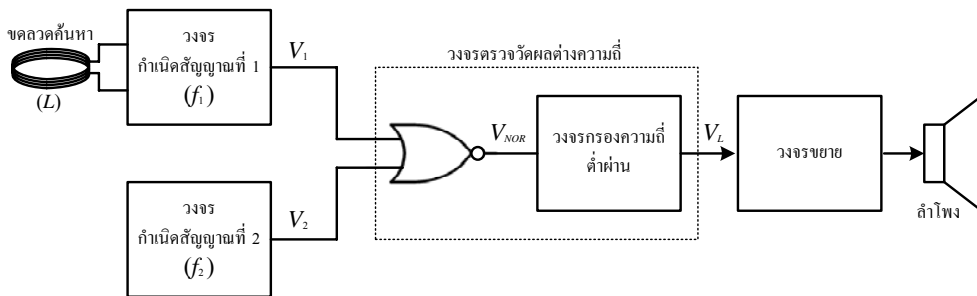
บทนำ

เครื่องตรวจจับโลหะคืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจหาโลหะหรือวัสดุที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ โดยเมื่อมีการตรวจพบโลหะหรือมีวัตถุที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบอยู่ใกล้จะทำให้เอาต์พุตออกมาในรูปของสัญญาณเสียงหรือการแสดงอาการสั้นเป็นต้น การประยุกต์ใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะ เช่น ใช้สำหรับการตรวจหาวัตถุระเบิดใต้พื้นดิน ใช้สำหรับตรวจค้นหาอาวุธตามสถานที่สำคัญๆ หรือใช้สำหรับการค้นหาเครื่องประดับของมีค่าที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบซึ่งสลับหล่นตามชายหาดเป็นต้น โดยที่ผ่านมามีนักวิจัยในต่างประเทศได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะชนิดต่างๆ กันมาอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างหลักการที่สำคัญที่นำมาใช้สำหรับการพัฒนาออกแบบ เช่น หลักการ Very Low Frequency (VLF) (Sharawi and Sharawi, 2007) หลักการ Pulse Induction (Crone and Crone, 1989; Stuart, 1989; Stuart, 1994; Medek *et al.*, 2001) หลักการ Off Resonance (Wareham, 1980) หลักการ Induction Balance (Flind, 1987) และหลักการ Beat Frequency Oscillator (Wait, 1981; Hageman and Hageman, 1998; Cheeseman, 1999; Rakes, 2001; FreeCircuitDiagram, 2009; Moreland, 2009; Wikipedia, 2009) เป็นต้น

สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะชนิดมือถือสำหรับงานรักษาความปลอดภัย เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งนั่นคือปัญหาความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สิน ตามสถานบันเทิงต่างๆ ข้ามค้ำคืน งานคอนเสิร์ตดนตรี หรือแม้แต่ตามงานวัดในชนบทเกิดปัญหาการพกพาอาวุธเข้ามาทำร้ายกันและกันของกลุ่มวัยรุ่น โดยหลักการออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะที่คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำมาใช้คือหลักการแบบ Beat Frequency Oscillator เนื่องจากเป็นหลักการที่เรียบง่าย ใช้ต้นทุนในการพัฒนาต่ำ และมีความเสถียรในการใช้งาน จากการสืบค้นข้อมูลเบื้องต้นพบว่าวิธีการตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณภายในเครื่องมือที่น่าสนใจมีด้วยกันสามวิธีดังนี้คือ วิธีการแรกเป็นการใช้วงจรบวกสัญญาณต่อร่วมกับวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Cheeseman, 1999) โดยสัญญาณที่ใช้ภายในวงจรจะอยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ (sinusoidal signals) ซึ่งจะมีจุดด้อยอยู่ที่ความเสถียรและยุ่งยากในการกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณที่ใช้ภายในวงจร สำหรับหลักการที่สองและหลักการที่สามสัญญาณที่ใช้ภายในวงจรจะอยู่ในรูปของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถกำหนดค่าความถี่ได้โดยง่าย โดยวิธีการที่สองเป็นการใช้ดีฟลิปฟลอป (D-Flip Flop) ต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่สูงผ่านเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่ (Wait, 1981) วิธีที่สามเป็นการใช้เกตแนนด์ (NAND Gate) ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (FreeCircuitDiagram, 2009) สำหรับภายในโครงงานนี้ได้ใช้เกตเนอร์ (NOR Gate) ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่ และใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันทำหน้าที่ขยายสัญญาณสำหรับขับลำโพง

หลักการออกแบบวงจรประมวลผล

การพัฒนาสร้างเครื่องตรวจจับโลหะภายในโรงงานนี้เป็นการอาศัยหลักการที่เรียกว่า Beat Frequency Oscillator ซึ่งเป็นวิธีการที่เลียนแบบมาจากการเกิดบีตส์ (beats) ของคลื่นเสียงสองขบวนที่มีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อย (Cutnell and Johnson, 2004; Serway and Jewett, 2004; Vuille *et al*, 2009) แต่อย่างไรก็ตามค่าความถี่เริ่มต้นของสัญญาณที่ใช้ภายในวงจรได้กำหนดให้มีค่าประมาณเท่ากับ 200 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าย่านความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินได้ บล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรวจจับโลหะที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูป 1 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ วงจรกำเนิดสัญญาณที่ 1 ใช้หลอดทองแดงพันเป็นวงกลมต่อรวมเป็นส่วนหนึ่งของวงจรเพื่อทำหน้าที่เป็นขดลวดค้นหา (search coil) หรือเซนเซอร์ของระบบ สัญญาณ (V_1) ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ 1 จะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ค่าความถี่เท่ากับ f_1 สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ 2 ทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม V_2 ที่มีความถี่ f_2 เพื่อใช้สำหรับเป็นค่าความถี่อ้างอิงให้กับระบบ



รูป 1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรวจจับโลหะ

สัญญาณ V_1 และ V_2 ถูกป้อนเป็นอินพุตของเกตนอร์ ซึ่งต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณ V_1 และ V_2 โดยสัญญาณเอาต์พุต V_{NOR} ที่ได้จากเกตนอร์จะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมความถี่ประมาณเท่ากับ f_1 และ f_2 และมีค่าดีวี่ไซเคิล (Duty Cycle) ขึ้นอยู่กับผลต่างเฟสเริ่มต้นและผลต่างความถี่ของสัญญาณอินพุตทั้งสอง เมื่ออาศัยหลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) สำหรับสัญญาณ V_{NOR} จะสามารถเขียนองค์ประกอบของสัญญาณ V_{NOR} ได้ดังนี้คือ

$$V_{NOR} = V_C \frac{T_P}{T_0} + \frac{V_C}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin n\omega_0 t - \sin(n\omega_0 t - n\omega_0 T_P)}{n} \right\} \quad (1)$$

เมื่อ T_p/T_0 คือค่าความถี่เชิงมุมของสัญญาณ V_{NOR} , $\omega_0=2\pi/T_0$ คือค่าความถี่เชิงมุมของสัญญาณ V_{NOR} , $T_p=km_i$ คือค่าช่วงเวลาที่เป็นซีกบวก (ลอจิก 1) ของสัญญาณ V_{NOR} , T_0 คือคาบเวลาของสัญญาณ V_{NOR} , k คือค่าคงที่ของการแปลงผัน, m_i คือสัญญาณส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำภายในสัญญาณ V_{NOR} และ V_C คือค่าระดับแรงดันในสถานะลอจิก 1 ของเกตเนอร์

ในสภาวะเริ่มต้นจะกำหนดให้ความถี่ของสัญญาณ V_1 และ V_2 มีค่าเท่ากันประมาณเท่ากับ 200 กิโลเฮิรต์ ซึ่งจะส่งผลทำให้สัญญาณเอาต์พุตของเกตเนอร์เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ 200 กิโลเฮิรต์ (เท่ากับความถี่ของสัญญาณ V_1 และ V_2) โดยมีค่าความถี่เชิงมุมที่อยูระหว่าง 0 - 0.5 (หรือเท่ากับ 0 - 50 เปอร์เซ็นต์) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต่างมุมเริ่มต้นของสัญญาณ V_1 และ V_2 เมื่อพิจารณา T_p จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$T_p = T_0 \begin{cases} -\frac{\theta_i}{2\pi} + \frac{1}{2} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ \frac{\theta_i}{2\pi} - \frac{1}{2} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

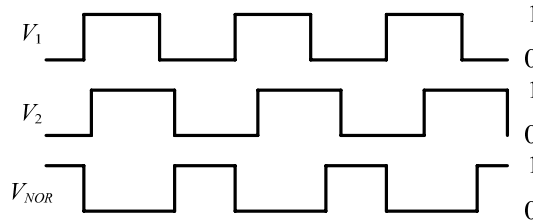
เมื่อ θ_i คือค่าผลความต่างเฟสเริ่มต้นของสัญญาณ V_1 และ V_2 จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) คาบเวลา (T_0) ของสัญญาณ V_{NOR} จะมีค่าเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณ V_1 และ V_2 โดย T_p จะมีค่าคงที่ไม่ว่าขึ้นกับเวลา (แต่จะขึ้นกับ θ_i) ซึ่งเมื่อนำสัญญาณ V_{NOR} ดังกล่าวนี้นี้ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้สัญญาณ V_L ที่เป็นสัญญาณไฟตรง และเมื่อนำสัญญาณดังกล่าวนี้ไปขยายและขับลำโพง จะไม่ได้ยินเสียง

เมื่อมีการนำวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetism) เข้าใกล้กับขดลวดค้นหา ค่าสภาพซึมได้ (permeability; μ) ที่มีค่าสูงมากของสารแม่เหล็กดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหา (L) มีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความถี่ของสัญญาณ V_1 มีค่าลดลง ในกรณีที่วัสดุที่เป็นโลหะชนิดอื่นๆ (non-magnetic objects) เข้าใกล้ขดลวดค้นหาจะเกิดปรากฏการณ์กระแสไหลวน (eddy current) เกิดขึ้นบนโลหะดังกล่าว ซึ่งจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กจากขดลวดค้นหา ผลที่ได้คือค่าความถี่ของสัญญาณ V_1 จะมีค่าสูงขึ้น ผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่สัญญาณ V_1 ทั้งสองกรณีจะมีผลทำให้ T_p ตามสมการที่ (1) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาในที่นี้จะสมมุติให้สัญญาณ V_1 และ V_2 มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากัน ซึ่งจะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่าง T_p กับค่าเวลา (t) ได้เป็น

$$T_p = T_0 \begin{cases} -\frac{t}{T_m} + \frac{1}{2} & ; 0 < t < T_m/2 \\ \frac{t}{T_m} - \frac{1}{2} & ; T_m/2 < t < T_m \end{cases} \quad (3)$$

$$T_m = \frac{1}{f_m} \cong \frac{1}{|f_1 - f_2|} \quad (4)$$

เมื่อ T_m คือคาบเวลาของสัญญาณความถี่ต่ำ (m_i) ที่แฝงอยู่ในสัญญาณ V_{NOR} จากสมการที่ (1), (3) และ (4) ค่าคงที่ของการแปลงผัน $k = T_0$ สัญญาณ m_i เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่ประมาณเท่ากับผลต่างความถี่ระหว่างสัญญาณ V_1 และ V_2 ซึ่งเมื่อนำสัญญาณ V_{NOR} ไปได้ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้สัญญาณ V_L ที่มีลักษณะคล้ายเป็นรูปสามเหลี่ยม และเมื่อนำสัญญาณดังกล่าวนี้ไปขยายและขับลำโพงจะสามารถได้ยินเสียงได้



รูป 2 สมบัติการทำงานของเกตเนอร์

นอกเหนือจากสมการที่ (1) ถึง (4) การอธิบายสมบัติการทำงานของวงจรจากการประยุกต์ใช้เกตเนอร์ต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นตัวตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ พิจารณาว่า V_1 และ V_2 มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีสถานะลอจิกสูง (high) และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อมีสถานะลอจิกต่ำ (low) ดังนั้นการทำงานของนอร์เกตจะสมมูลกับ $\bar{V}_1 \times \bar{V}_2$ สมมติให้ V_1 มีความถี่เชิงมุม ω_1 และ V_2 มีความถี่เชิงมุม ω_2 โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_1 t) \quad (5)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m\omega_2 t) \quad (6)$$

$$V_{NOR} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_1 t) + \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m\omega_2 t) + \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{nm} \sin(n\omega_1 t) \sin(m\omega_2 t) \tag{7}$$

เนื่องจาก $\sin(n\omega_1 t) \sin(m\omega_2 t) = \frac{\cos(n\omega_1 - m\omega_2)t}{2} - \frac{\cos(n\omega_1 + m\omega_2)t}{2}$ (8)

ดังนั้นจะได้

$$V_{NOR} = \frac{1}{4} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_1 t) + \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m\omega_2 t) - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{nm} \cos(n\omega_1 + m\omega_2)t + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{nm} \cos(n\omega_1 - m\omega_2)t \tag{9}$$

เนื่องจาก V_1 และ V_2 เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีค่าควิตซ์ไซเคิลประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น n และ m จะต้องเป็นจำนวนเต็มคี่ โดยเทอมที่สองถึงเทอมที่สี่ทางขวามือของสมการที่ (9) จะเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงซึ่งไม่สามารถผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำออกไปได้ ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุต (V_L) ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจึงเขียนได้เป็น

$$V_L = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{nm} \cos(n\omega_1 - m\omega_2)t \tag{10}$$

สมมติให้ $\omega_2 = \omega_1 \pm \Delta\omega$ เมื่อ $\Delta\omega$ คือผลต่างความถี่เชิงมุมของสัญญาณ V_1 และ V_2 ดังนั้นจะได้

$$V_L = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{nm} [\cos(n-m)\omega_1 t \cos(m\Delta\omega t) \pm \sin(n-m)\omega_1 t \sin(m\Delta\omega t)] \tag{11}$$

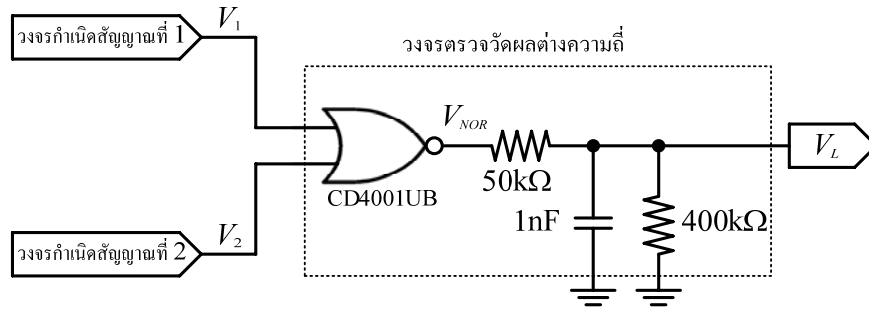
จากสมการที่ (11) สามารถแยกพิจารณาได้สองกรณีคือ กรณีแรก $(n-m) \geq 2$ ซึ่งจะส่งผลให้ได้สัญญาณที่มีค่าความถี่เชิงมุมสูงกว่า $2\omega_1$ (ไม่สามารถผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านออกมาได้) กรณีที่สอง $n=m=i$ ซึ่งสมการที่ (11) จะกลายเป็น

$$V_L = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \cos(i\Delta\omega t) \tag{12}$$

จากสมการที่ (12) เนื่องจาก i เป็นเลขจำนวนเต็มคี่ ดังนั้น V_L จึงเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่ประมาณเท่ากับ $\Delta\omega/2\pi$ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (3) และ (4)

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการ

เพื่อเป็นการทดสอบแนวคิดในการใช้เกตเนอร์ต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่ในเบื้องต้นได้ใช้โปรแกรม PSPICE เขียนแบบการทำงานของวงจรดังแสดงในรูป 3 โดยกำหนดให้ความถี่ของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ 2 มีค่าที่เท่ากับ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ และทำการแปรค่ามุมเริ่มต้นและความถี่ของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ 1 โดยจะได้ตัวอย่างผลการทำงานของวงจรดังแสดงตามรูป 6



รูป 3 การทดสอบวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่โดยใช้โปรแกรม PSPICE

หลังจากได้ทำการทดสอบหลักการเบื้องต้น ผู้วิจัยได้พัฒนาวงจรตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 ขึ้นซึ่งจะได้วงจรดังแสดงในรูป 4 โดยที่เกตนอร์และเกตเนอร์ที่ใช้เป็นแบบซีมอสเบอร์ CD4049 และเบอร์ CD4001 ตามลำดับ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ 1 ได้ใช้หลอดทองแดงเบอร์ 23 (SWG) พันเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 เซนติเมตร จำนวน 30 รอบต่อรวมเป็นส่วนหนึ่งของวงจร โดยจะให้กำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม V_1 ที่มีค่าความถี่ f_1 โดยประมาณเป็นไปตามสมการ

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \quad (13)$$

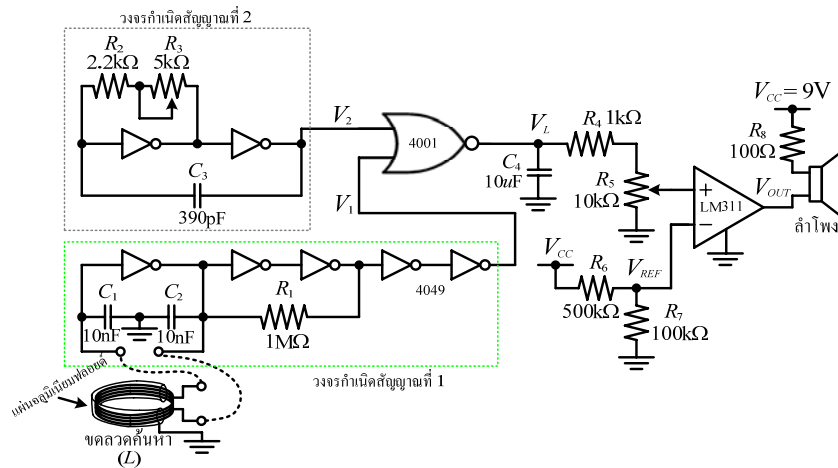
$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (14)$$

เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหา พิจารณาสมการที่ (13) กำหนดให้ $S_L^{f_1}$ คือค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงความถี่ (f_1) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$S_L^{f_1} = \frac{L}{f_1} \frac{df_1}{dL} = -\frac{1}{2} \tag{15}$$

$$\frac{\Delta f}{f_1} = S_L^{f_1} \frac{\Delta L}{L} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} \tag{16}$$

จากสมการที่ (16) ซึ่งใช้สำหรับการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำขนาดน้อยๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ ค่าความถี่ของวงจรจะมีค่าลดลงประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์



รูป 4 วงจรประมวลผลภายในเครื่องตรวจจับโลหะ

สำหรับการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณที่ 2 ได้ออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณได้ เนื่องจากค่าความถี่ f_1 ตามสมการที่ (13) เป็นเพียงค่าโดยประมาณ นอกจากนี้การเคลื่อนย้ายขดลวดค้นหาขณะประกอบวงจรอาจมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดคลาดเคลื่อนไป โดยสัญญาณ (V_2) ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ 2 จะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่ (f_2) โดยประมาณเท่ากับ

$$f_2 = \frac{1}{C_3(R_2 + R_3)} \tag{17}$$

ในส่วนของการขยายสัญญาณเพื่อใช้สำหรับขับลำโพงในโครงการนี้ได้ใช้รีนาสัญญาณ V_L จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปทำการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง V_{REF} โดยใช้อปแอมป์เบอร์ LM311 ดังแสดงตามรูป 4 สำหรับการพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะเพื่อใช้งานสามารถแสดงได้ดังรูป 5

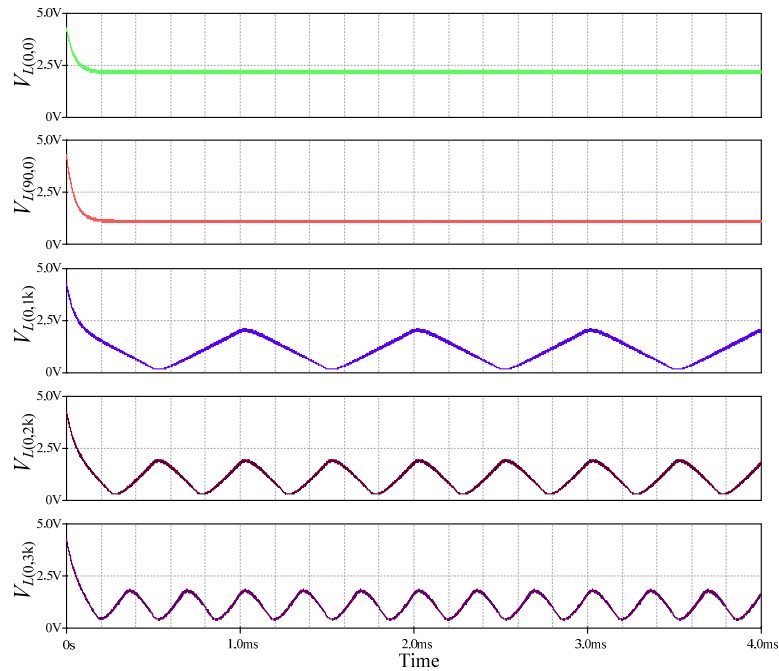


รูป 5 เครื่องตรวจจับโลหะชนิดมือถือที่พัฒนาขึ้น

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากวิธีการเขียนแบบการใช้งานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อทดสอบแนวคิดในการใช้เกตเนอร์ต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับการตรวจวัดผลต่างความถี่ ซึ่งจะได้ออกอย่างผลการทดสอบดังแสดงในรูป 6 เมื่อ $V_{L(0,0)}$ $V_{L(90,0)}$ $V_{L(0,1k)}$ $V_{L(0,2k)}$ และ $V_{L(0,3k)}$ คือสัญญาณที่ได้จากการนำสัญญาณเอาต์พุตของเกตเนอร์ (V_{NOR}) ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดย $V_{L(0,0)}$ และ $V_{L(90,0)}$ เป็นผลการทำงานเพื่อใช้เปรียบเทียบกรณีที่กำหนดให้ V_1 และ V_2 มีความถี่เท่ากัน (เท่ากับ 200 กิโลเฮิร์ต) แต่มีมุมเริ่มต้นแตกต่างกันเท่ากับ 0 องศาและ 90 องศา ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีขนาดขึ้นอยู่กับค่าผลต่างมุมเริ่มต้นของสัญญาณทั้งสอง พิจารณาสัญญาณ $V_{L(0,0)}$ $V_{L(0,1k)}$ $V_{L(0,2k)}$ และ $V_{L(0,3k)}$ เป็นผลการทำงานเพื่อใช้เปรียบเทียบกรณีที่กำหนดให้สัญญาณ V_1 และ V_2 มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากัน สัญญาณ V_2 มีค่าความถี่ที่เท่ากับ 200 กิโลเฮิร์ต แต่สัญญาณ V_1 แปรค่าความถี่จาก 200 กิโลเฮิร์ต

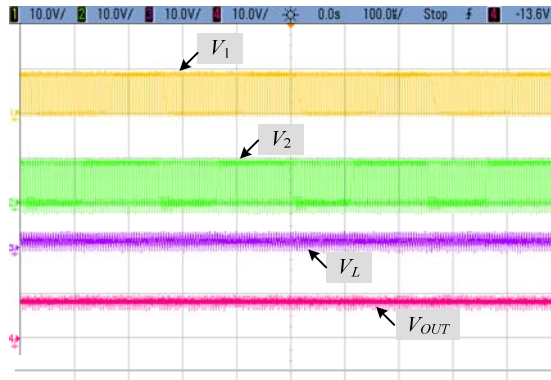
จนถึง 203 กิโลเฮิร์ต ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าสัญญาณได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีความถี่เท่ากับผลต่างความถี่ของ V_1 และ V_2 จริง



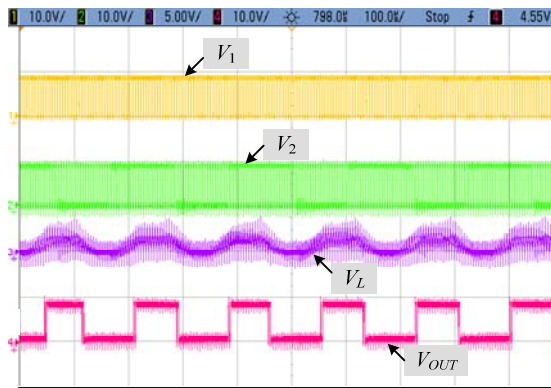
รูป 6 ผลการทดสอบวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่โดยใช้โปรแกรม PSPICE

การทดสอบการทำงานของวงจรตามรูปที่ 4 ได้ทดลองกับเหรียญ ลูกกอล์ฟ และวัสดุที่เป็นโลหะชนิดต่าง ๆ ภายในกระเป๋ากางเกงและเสื้อนิต ซึ่งจะได้ตัวอย่างผลการวัดสัญญาณภายในวงจรขณะไม่มีและมีการตรวจพบโลหะดังแสดงตามรูป 7 โดยจะเห็นได้ว่าขณะไม่มีโลหะอยู่ใกล้ขดลวดค้นหา สัญญาณ V_L และ V_{OUT} จะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟตรง เมื่อนำสัญญาณ V_{OUT} ไปขับลำโพงจึงไม่ได้ยินเสียง ขณะที่โลหะอยู่ใกล้ขดลวดค้นหา สัญญาณ V_L จะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีความถี่ในย่านความถี่เสียง และจะได้สัญญาณ V_{OUT} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสัญญาณ V_L ซึ่งผู้ใช้งานจะสามารถได้ยินเสียงดังที่ลำโพง

เมื่อทำการทดสอบระยะห่างของการตรวจพบวัสดุที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบโดยทดลองนำเหรียญซึ่งมีขนาดแตกต่างกันมาเข้าใกล้ขดลวดค้นหา ระยะห่างมากที่สุดที่เครื่องสามารถตรวจพบได้ แสดงดังตารางที่ 1



(ก) ขณะไม่มีโลหะอยู่ใกล้



(ข) ขณะมีโลหะอยู่ใกล้

รูป 7 สัญญาณ V_1 V_2 V_L และ V_{OUT} ภายในวงจรตามรูป 4 ขณะทดสอบการทำงานจริง (ใช้ตัวต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์มต่อแทนลำโพง)

ตารางที่ 1 ระยะห่างมากที่สุดที่เครื่องตรวจจับโลหะสามารถตรวจพบเหรียญแบบต่างๆ ได้

ชนิดของเหรียญทดสอบ	ระยะห่างมากที่สุด (มิลลิเมตร)
เหรียญยี่สิบห้าสตางค์	10
เหรียญห้าสิบสตางค์	15
เหรียญบาท	23
เหรียญห้าบาท	27
เหรียญสิบบาท	35

สรุปผลการทดลอง

เครื่องตรวจจับโลหะชนิดมือถือที่พัฒนาออกแบบขึ้นเป็นการอาศัยหลักการ Beat Frequency Oscillator จากผลการทดสอบการทำงานพบว่าสามารถใช้งานได้จริง โดยเครื่องมือมีความไวเพียงพอสำหรับการค้นหาเหรียญหรือลูกกุกญขนาดเล็กภายในกระเป๋ากางเกงได้ และผลจากการทดสอบกับเหรียญขนาดต่างๆ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเหรียญมีขนาดใหญ่ขึ้นจะได้ระยะการตรวจจับที่ไกลขึ้น โดยเมื่อมีการตรวจพบวัตถุที่เป็นโลหะเป็นส่วนประกอบจะแสดงผลออกมาในรูปของการเกิดเสียงดังที่ถ้าโพง การออกแบบวงจรประมวลผลภายในค่อนข้างเรียบง่าย และสามารถทำงานได้ด้วยการใช้แบตเตอรี่รีจันขนาด 9 โวลต์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ทุนและเครื่องมือสนับสนุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Cheeseman, G. (1999, May). Metal Detectors (Part 1). *Electronics and Beyond*.
- Cheeseman, G. (1999, June). Metal Detectors (Part 2). *Electronics and Beyond*.
- Crone, R. and Crone, D. (1989, September). Twin Loop Treasure Seeker. *ETI*.
- Cutnell, J. D. and Johnson, K. W. (2004). *Physics*. (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Flind, A. (1987, July). E.E. Buccaneer IB Metal Detector. *Everyday Electronics*.
- FreeCircuitDiagram. (2009). A Simple Metal Detector Circuit Using Beat Frequency Oscillator (BFO). Retrieved December, 2009, from <http://freecircuitdiagram.com/2008/11/24/simple-metal-detector-circuit-beat-frequency-oscillator-bfo/>

- Hageman, R. and Hageman, S. (1998, September). BFO Metal Detector. *EDN*.
- Medek, R. Nicolics, J. and Schrottmayer, D. (2001, May). *High Sensitive Pulse Inductive Eddy Current Measurement For Mine Detection Systems*. Paper presented at meeting of the 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata, Romania.
- Moreland, C. W. (2009). BFO Theory. Retrieved December, 2009, from <http://www.geotech1.com/pages/metdet/info/bfotheory/bfo.pdf>
- Rakes, C. D. (2001, August). Basic Circuitry Metal Detection. *Poptronics*.
- Serway, R. A. and Jewett, J. W. Jr. (2004). *Physics for Science and Engineers*. (6th ed.). THOMSON Brooks/Cole.
- Sharawi, M. S. and Sharawi, M. I. (2007, November). *Design and Implementation of A Low Cost VLF Metal Detector with Metal-type Discrimination Capabilities*. Paper presented at meeting of the IEEE International Conference on Signal Processing and Communications (ICSPC 2007), Dubai, United Arab Emirates.
- Stuart, M. (1989, August). EE Treasure Hunter. *Everyday Electronics*.
- Stuart, M. (1994, June). Microcontroller P. I. Treasure Hunter. *Everyday with Practical Electronics*.
- Vuille, C. Serway, R. A. and Faughn, J. S. (2009). *College Physics*. (8th ed.). Brooks/Cole CENGAGE Learning.
- Wait, P. (1981). Simple, Sensitive Metal Detector. *ETI561: How To Build Gold & Treasure Detectors*.
- Wareham, G. (1980). Off-Resonance Metal Detector. *Wireless World*.
- Wikipedia. (2009). Build your own metal detector. Retrieved December, 2009, from <http://www.easytreasure.co.uk/bfo.htm>