
หลักการประมวลผลสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์
Effective Signal Processing Methods for Metal Detector Based on Beat Frequency Oscillator

อนุชา แก้วพูลสุข*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

Anucha Kaewpoonsuk*

Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University.

บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายถึงหลักการประมวลผลสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสำหรับเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ ซึ่งมีจุดเด่นสำคัญที่วงจรประมวลผลภายในมีความเรียบง่าย ใช้พลังงานต่ำ และราคาถูก ในเนื้อหาได้บรรยายหลักการงานเบื้องต้น วงจรออสซิลเลเตอร์ ขดลวดค้นหาและการเลือกกำหนดความถี่ นอกจากนี้ผู้เขียนได้รวบรวมตัวอย่างหลักการของวงจรประมวลผลสัญญาณที่น่าสนใจ และอาศัยวิธีการวิเคราะห์วงจรทั่วไปและหลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์สำหรับการสังเคราะห์สมการเพื่อใช้ประกอบการอธิบายหลักการการทำงานของวงจร และได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการทำงานเบื้องต้นด้วยการใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงาน ส่วนท้ายเป็นการบรรยายถึงปัญหาและแนวทางสำหรับการพัฒนาเครื่องมือ

คำสำคัญ : เครื่องตรวจจับโลหะ ออสซิลเลเตอร์ ความถี่บีตส์

Abstract

This paper presents effective signal processing methods for beat frequency oscillator-based metal detector, which has advantageously simple and inexpensive processing unit with low power consumption. The basic concept, oscillator, sensing coil, and how to choose the suitable frequency are briefly discussed. Moreover, various interesting processing techniques that can be effectively used in the metal detector are described, and their illustrative formulas based on general circuit analysis and Fourier expansions are given. Basic characteristics of each processing technique were studied by PSPICE simulation program. Problems and development methods are also included.

Keywords : metal detector, beat frequency oscillator

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

เครื่องตรวจจับโลหะคืออุปกรณ์สำหรับการตรวจหาโลหะหรือวัสดุที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ โดยเมื่อมีการตรวจพบโลหะ เครื่องตรวจจะให้เอาต์พุตออกมาในรูปของสัญญาณเสียงหรือการแสดงการสั่นเป็นต้น การประยุกต์ใช้งานเช่น ใช้สำหรับการตรวจหาเครื่องประดับหรือของมีค่าที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบซึ่งล่องหนตามชายหาด ใช้สำหรับการค้นหาอาวุธตามสถานที่สำคัญๆ หรือใช้สำหรับการตรวจหาสายเคเบิลหรือท่อที่ฝังอยู่ใต้ดิน สำหรับงานก่อสร้าง โดยที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะชนิดต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างหลักการที่สำคัญที่นำมาใช้สำหรับการพัฒนาออกแบบเช่น หลักการความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency; VLF) (Sharawi and Sharawi, 2007) หลักการเหนี่ยวนำพัลส์ (Pulse Induction) (Crone and Crone, 1989; Medek *et al.*, 2001; Stuart, 1994; Stuart, 1989) หลักการออฟ-รีโซแนนซ์ (Off Resonance) (Wareham, 1980) หลักการสมดุลการเหนี่ยวนำ (Induction Balance) (Flind, 1987) และหลักการออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ (Beat Frequency Oscillator) (Cheeseman, 1999; FreeCircuitDiagram, 2010; Hageman & Hageman, 1998; Moreland, 2010; Rakes, 2001; Wait, 1981; Wikipedia, 2010) เป็นต้น

สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์มีจุดเด่นอยู่ที่ เป็นหลักการที่ค่อนข้างเรียบง่าย ใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ วงจรประมวลผลภายในใช้พลังงานต่ำ สามารถใช้งานกับแหล่งจ่ายพลังงานขนาดเล็กได้และมีความเสถียรในการใช้งาน แม้ว่าจะเป็นหลักการที่มีความไวในการทำงานไม่สูงที่สุด ภายในบทความนี้อธิบายถึงหลักการของเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นและใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะที่มีประสิทธิภาพต่อไป



ภาพที่ 1 เครื่องตรวจจับโลหะและตัวอย่างการประยุกต์ใช้ (ที่มา : www.indiamart.com, 2010; www.perekop.net, 2010)

หลักการทํางานเบื้องต้น

เป็นที่ทราบกันว่าในกรณีที่มีคลื่นเสียงสองขบวนที่มีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อยเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเดียวกันอย่างต่อเนื่อง เราจะได้ยินเสียงที่มีลักษณะดังคอยสลັบกัน โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดบีตส์ (beats) ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงความดัง-ความถี่นี้เรียกว่าความถี่บีตส์ (f_{beat}) โดยจะมีค่าเท่ากับผลต่างความถี่ของคลื่นทั้งสองขบวน (Cutnell and Johnson, 2004; Serway and Jewett, 2004; Vuille *et al.*, 2009) หรือ

$$f_{beat} = |f_1 - f_2| \quad (1)$$

เมื่อ f_1 และ f_2 คือความถี่ของคลื่นเสียงขบวนที่ 1 และขบวนที่ 2 ตามลำดับ จากสมการที่ (1) บุคคลโดยทั่วไปจะสามารถแยกแยะความถี่บีตส์ได้ไม่เกิน 10 Hz ซึ่งถ้ามีค่าสูงกว่านี้ จะไม่สามารถแยกแยะได้ว่าเป็นเสียงเดี่ยวหรือเสียงจากความถี่บีตส์

บล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็นการอาศัยหลักการคล้ายการเกิดบีตส์ของคลื่นเสียง โดยหลักการทํางานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้คือวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 1 ทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณอ้างอิง (ความถี่เท่ากับ f_1) ให้กับระบบ วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 2 มีขดลวดค้นหา (search coils) ต่อร่วมเป็นส่วนหนึ่งของวงจรทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณซึ่งโดยทั่วไปมักให้กำเนิดสัญญาณที่มีความถี่ (f_2) เท่ากับ (Floyd, 2008)

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \sqrt{\frac{Q^2}{Q^2 + 1}} \quad (2)$$

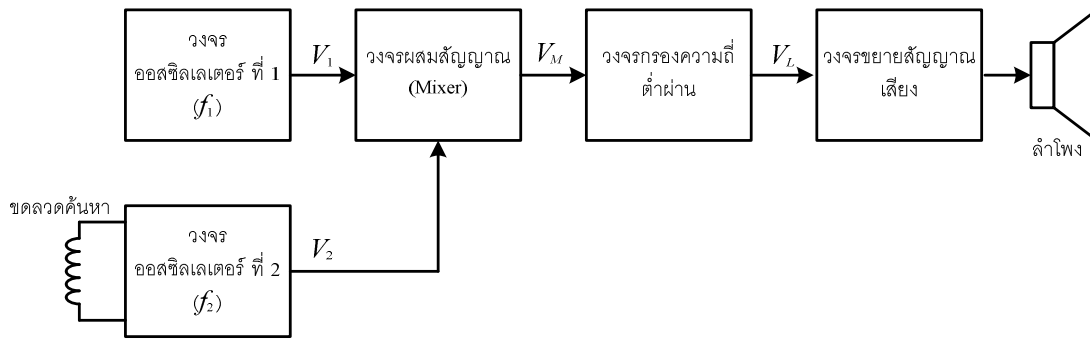
เมื่อ C_T คือค่าความจุไฟฟ้ารวมภายในวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 2, L คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหา และ Q คือ ค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) ของวงจรออสซิลเลเตอร์

ในสภาวะเริ่มต้นความถี่ f_2 จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ f_1 สัญญาณที่ได้จากวงจรผสมสัญญาณ (V_M) จะเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงเท่ากับ f_1 และ f_2 ซึ่งไม่สามารถรอดผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านออกไปได้ แต่เมื่อมีการนำวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetism) เข้าใกล้กับขดลวดค้นหา ค่าสภาพซึมได้ (permeability; μ) ที่มีค่าสูงมากของสารแม่เหล็กดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของขดลวดค้นหามีค่าสูงขึ้น

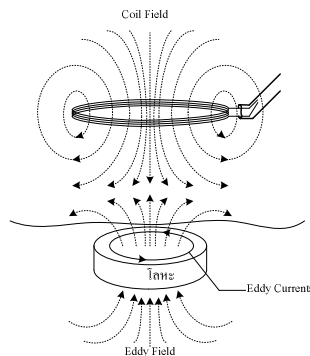
ซึ่งจะทำให้ค่าความถี่ f_2 ตามสมการที่ (2) มีค่าลดลง ในกรณีที่มีวัสดุที่เป็นโลหะชนิดอื่นๆ (non-magnetic objects) เข้าใกล้ขดลวดค้นหาจะเกิดปรากฏการณ์กระแสไหลวน (eddy current) เกิดขึ้นบนโลหะดังกล่าว ซึ่งจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กจากขดลวดค้นหา ผลที่ได้คือค่าความถี่ของสัญญาณจากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 2 จะมีค่าสูงขึ้น ผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ทั้งสองกรณีเมื่อนำสัญญาณดังกล่าวนี้ไปผสมกับสัญญาณจากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 1 จะได้สัญญาณ V_M ที่มีองค์ประกอบทางความถี่สองส่วนคือ ส่วนความถี่สูง (ความถี่เฉลี่ยระหว่าง f_1 และ f_2) และส่วนความถี่ต่ำ (ผลต่างระหว่าง f_1 และ f_2) โดยองค์ประกอบส่วนที่เป็นความถี่สูงนั้นจะไม่สามารถผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ องค์ประกอบส่วนที่เป็นความถี่ต่ำซึ่งอยู่ในย่านความถี่เสียงจะถูกส่งผ่านไปขยายเพื่อขับลำโพงต่อไป

วงจรออสซิลเลเตอร์ ขดลวดค้นหา และการเลือกกำหนดความถี่

ตัวอย่างวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นิยมใช้ภายในเครื่องตรวจจับโลหะแสดงดังภาพที่ 4 (Floyd, 2008) ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตได้ดังสมการที่ (2) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจร (Q) มีค่าเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency; f_0) หารด้วยค่าแบนด์วิดท์ (bandwidth; BW) วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ Q มีค่าสูงจะมีความไวในการทำงานสูง แต่ก็จะมีไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การขยับเคลื่อนที่ของขดลวดและผลของกราวด์แฝงภายนอกเป็นต้น ซึ่งวงจรที่ Q มีค่าต่ำจะมีความเสถียรมากกว่า การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์โดยทั่วไปจะกำหนดให้ Q มีค่าสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยความไวจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมจะต้องอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์



ภาพที่ 3 การเกิดกระแสไหลวน (eddy currents) บนโลหะ

การออกแบบขดลวดค้นหาโดยทั่วไปมีปัจจัยเบื้องต้นที่ต้องพิจารณา 2 ประการ คือ ขนาดและรูปร่างของขดลวดค้นหา ในกรณีที่ใช้ขดลวดค้นหาเป็นแบบโซเลนอยด์ (solenoid coil) ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของขดลวดได้ดังนี้ คือ (Cutnell and Johnson, 2004; Vuille *et al.*, 2009)

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} = \mu n^2 l A \quad (3)$$

เมื่อ μ คือสภาพซึมได้ (permeability) ของตัวกลางที่ใช้ขดลวดพันรอบ, N คือจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด, n คือจำนวนรอบต่อหน่วยความยาวแกนกลาง, l คือความยาวแกนกลาง และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง ในกรณีที่พื้นขดลวดค้นหาเป็นมัดวงกลม (แกนอากาศ) ดังแสดงในภาพที่ 5(ข) จะสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของขดลวดโดยประมาณได้ดังนี้ คือ (Moreland, 2010)

$$L = \frac{0.8(NA)^2}{6a + 9b + 10c} \quad (4)$$

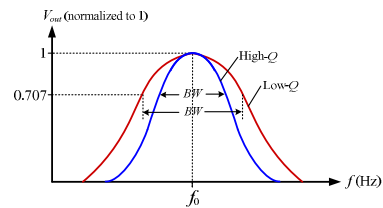
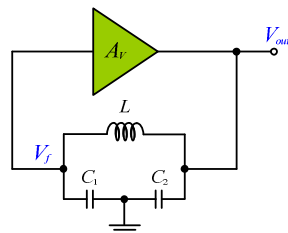
จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) โดยทั่วไปเมื่อต้องการออกแบบให้ L มีค่าสูงจะใช้วิธีเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด โดยขดลวดค้นหาแบบเป็นมัดวงกลมแกนอากาศเป็น

แบบที่นิยมมากกว่า ขนาดความกว้างพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ นั้นค่อนข้างยืดหยุ่นนั้นคือมีขนาดตั้งแต่ 3-4 นิ้ว จนถึง 36 นิ้ว (หรือมากกว่า) สำหรับการเลือกขนาดของเส้นลวดนั้นพิจารณาจากชนิดและขนาดของโลหะที่ต้องการค้นหา โดยเส้นลวดขนาดใหญ่ (ปริมาณกระแสสูง) เหมาะสำหรับการตรวจหาระยะไกล หรือใช้ตรวจหาวัตถุขนาดใหญ่เช่นท่อน้ำหรือวัตถุโบราณขนาดใหญ่ เส้นลวดขนาดกลางเหมาะสำหรับงานตรวจหาของมีค่าทั่วไป เช่น เทริยม และเส้นลวดขนาดเล็กเหมาะสำหรับการตรวจหาระยะใกล้แต่ต้องการความละเอียดในการทำงาน หรือการตรวจหาของมีค่าขนาดเล็กเช่นแร่ทองคำ เป็นต้น

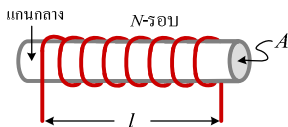
พิจารณาสมการที่ (2) กำหนดให้ S_L^f คือค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงความถี่ (f_2) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ (L) (ถือว่าพารามิเตอร์อื่นคงที่) ซึ่งจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$S_L^f = \frac{L}{f_2} \frac{df_2}{dL} = -\frac{1}{2} \quad (5)$$

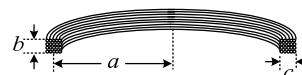
$$\frac{\Delta f}{f_2} = S_L^f \frac{\Delta L}{L} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$



ภาพที่ 4 วงจรออสซิลเลเตอร์



(ก) แบบโซเลนอยด์



(ข) แบบเป็นมัดวงกลม

ภาพที่ 5 ขดลวดค้นหา

จากสมการที่ (6) ซึ่งใช้สำหรับการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำขนาดน้อยๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น 5% ค่าความถี่ของวงจรจะมีค่าลดลงประมาณเท่ากับ 2.5% แต่ถ้าพิจารณาในด้านค่า ΔL ต่อ L จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ L ที่มีค่าต่ำจะมีผลทำให้ Δf ไรต่อค่า ΔL อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ L ที่มีค่าต่ำจะให้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำกว่า L ที่มีค่าสูง เมื่อใช้กระแสไหลในขดลวดค่าเท่ากัน

สำหรับการกำหนดความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในเบื้องต้นอาศัยหลักการที่ว่าคลื่นความถี่ต่ำจะมีความสามารถในการทะลุทะลวงได้ดีกว่าคลื่นความถี่สูง อย่างไรก็ตามการกำหนดความถี่เริ่มต้นภายในวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้งสอง (สำหรับหลักการแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์) มักกำหนดให้มีค่าอยู่ในย่านที่สูงกว่าความถี่เสียงที่มนุษย์จะสามารถได้ยินได้ นั่นคือในกรณีที่ยังไม่มีโลหะอยู่ใกล้ผู้ใช้งานจะได้ไม่ได้ยินเสียง นอกจากนี้ยังใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกรองสัญญาณความถี่สูงนี้ทิ้งไปจะได้ไม่มีการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการขับลำโพงไปอย่างเปล่าประโยชน์ เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ผลความแตกต่างของความถี่จะอยู่ในย่านความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินได้พอดี ค่าความถี่เริ่มต้นดังกล่าวนี้ผู้ออกแบบมักกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 100 kHz ขึ้นไป

ตัวอย่างการประมวลผลสัญญาณที่น่าสนใจ

รูปแบบของสัญญาณที่นิยมใช้ประมวลผลมี 2 แบบ คือสัญญาณรูปไซน์ (sinusoidal signals) และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (square wave signals)

1. การประมวลผลด้วยสัญญาณรูปไซน์

วิธีการดังกล่าวนี้ (Cheeseman, 1999) วงจรออสซิลเลเตอร์ทั้งสองวงจรจะให้กำเนิดสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งการตรวจเช็คค่าความถี่ของสัญญาณทั้งสองมีค่าเท่ากันหรือไม่จะใช้วิธีการนำสัญญาณทั้งสองมาบวกกันดังแสดงตามบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 6 เมื่อ V_1 และ V_2 คือสัญญาณแรงดันจากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 1 และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 2 ตามลำดับ เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายจะสมมติให้สัญญาณแรงดันทั้งสองมีค่าแอมพลิจูด (amplitude; A) และค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันดังนี้คือ

$$V_1 = A \sin 2\pi f_1 t \quad (7)$$

$$V_2 = A \sin 2\pi f_2 t \quad (8)$$

จากภาพ Z คือค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับแปลงแรงดันทั้งสองให้เป็นกระแสเพื่อการบวกกันของสัญญาณ โดยจะสามารถวิเคราะห์หาค่าแรงดัน V_s ภายในวงจรได้ดังนี้คือ

$$V_s = \frac{V_1 + V_2}{2} = A \cos \left[(2\pi) \frac{(f_1 - f_2)}{2} t \right] \sin \left[(2\pi) \frac{(f_1 + f_2)}{2} t \right] \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) เมื่อนำสัญญาณแรงดัน V_s ไปผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น อาศัยหลักการกระจายอนุกรม

ฟูเรียร์ (Fourier series) และจัดรูปสมการใหม่จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์โดยประมาณได้เป็นสองกรณีดังนี้คือ

กรณีที่ $f_1 = f_2 = f$ จะได้

$$|V_s| = |A \sin 2\pi f t| = \frac{2|A|}{\pi} - \frac{4|A|}{\pi} \left(\frac{\cos 2(2\pi f) t}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4(2\pi f) t}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6(2\pi f) t}{5 \cdot 7} + \dots \right) \quad (10)$$

กรณีที่ $f_1 \neq f_2$ จะได้

$$|V_s| = |A_{mod}(t) \sin 2\pi f_{av} t| \quad (11a)$$

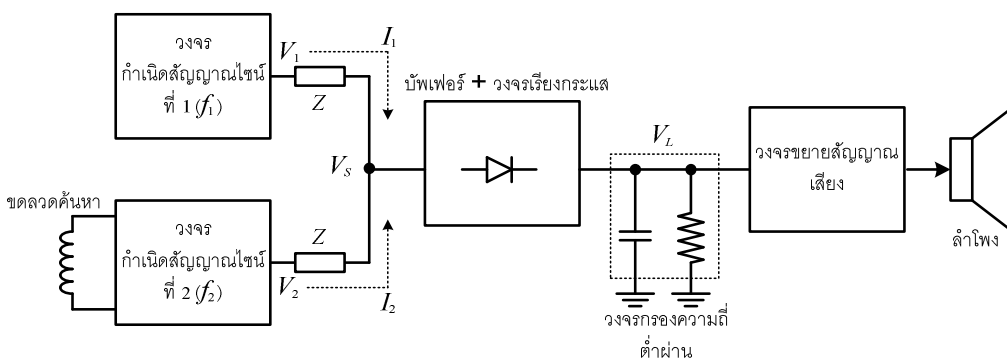
$$|V_s| = \frac{2|A_{mod}(t)|}{\pi} - \frac{4|A_{mod}(t)|}{\pi} \left(\frac{\cos 2(2\pi f_{av}) t}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4(2\pi f_{av}) t}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6(2\pi f_{av}) t}{5 \cdot 7} + \dots \right) \quad (11b)$$

$$\text{เมื่อ } A_{\text{mod}}(t) = A \cos \left[(2\pi) \frac{(f_1 - f_2)}{2} t \right] \quad (12)$$

$$f_{av} = (f_1 + f_2) / 2 \quad (13)$$

จากสมการที่ (10) จะเห็นได้ว่า $|V_s|$ ประกอบด้วยพจน์ของสัญญาณไฟตรงและพจน์ที่เป็นผลบวกของฟังก์ชันโคไซน์ซึ่งมีความถี่สูงกว่าสัญญาณเสียง โดยองค์ประกอบทั้งสองส่วนนี้เป็นย่านความถี่ที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน จากสมการที่ (11) ถึง (13) แสดงให้เห็นว่า $|V_s|$ ประกอบด้วยพจน์ที่เป็นค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณความถี่ต่ำ และพจน์ที่เป็นผลบวกของฟังก์ชันโคไซน์ซึ่งมีความถี่สูง และเมื่อนำสัญญาณ $|V_s|$ ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะทำให้เหลือเฉพาะส่วนที่ย่านความถี่ต่ำซึ่งเมื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานเสียงแล้วจะสามารถได้ยินได้

เพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติการทำงานเบื้องต้นของวงจรตามภาพที่ 6 ในที่นี้ได้ใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงานซึ่งได้ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรดังแสดงในภาพที่ 7 เมื่อ V_{S0} V_{S1} และ V_{S2} คือผลการบวกกันของสัญญาณแรงดัน V_1 และ V_2 ซึ่งมีความถี่แตกต่างกันเท่ากับ 0 Hz 1 kHz และ 2 kHz ตามลำดับ (V_1 มีความถี่ที่เท่ากับ 100 kHz) V_{L2} คือผลการนำสัญญาณ V_{S2} ไปผ่านวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จากผลการทดสอบการทำงานจะเห็นได้ว่าความถี่ในการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ V_{S1} และ V_{S2} มีค่าเท่ากับผลต่างความถี่ระหว่างสัญญาณ V_1 และ V_2 และเมื่อนำสัญญาณ V_{S2} ไปผ่านวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้สัญญาณ V_L ที่เป็นค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณความถี่ต่ำจริง



ภาพที่ 6 การประมวลผลด้วยสัญญาณรูปไซน์

2. การประมวลผลด้วยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

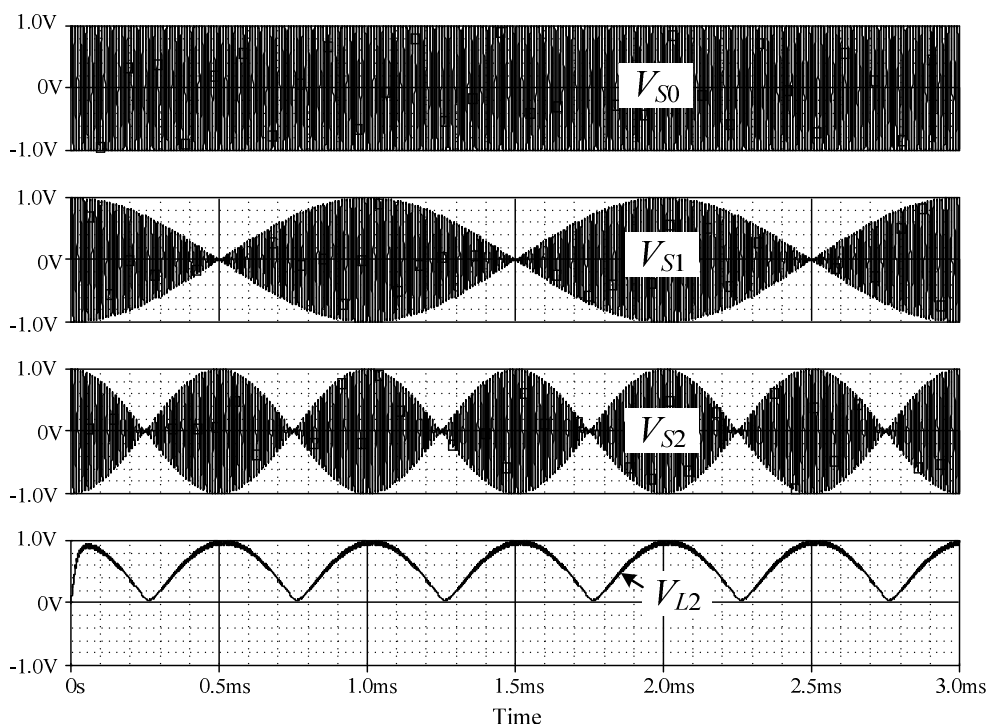
สำหรับวิธีการที่ใช้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมในการประมวลผลภายในบทความนี้จะอธิบายวิธีการตรวจเช็คความถี่ที่น่าสนใจ 2 วิธี คือ

2.1 การประมวลผลโดยใช้ดี-ฟลิปฟลอป

ตัวอย่างการใช้ดี-ฟลิปฟลอป (D-Flip Flop) (Wait, 1981) เป็นวงจรตรวจเช็ค (เปรียบเทียบ) ความถี่ของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณสองแหล่งแสดงได้ดังภาพที่ 8 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

กรณีที่ $f_1 = f_2$: จากสมบัติการทำงานของดี-ฟลิปฟลอป ซึ่งจะมีการเปิดรับข้อมูลที่ขา D ไปเป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจร (Q=D) ทุกครั้งที่สัญญาณนาฬิกา (ck) เป็นขอบขาขึ้น (ช่วงเวลาอื่นๆ Q จะคงค่าเดิมในสภาวะก่อนหน้าไว้) สมมุติให้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม V_1 และ V_2 มีค่ามุมเริ่มต้นแตกต่างกันค่าหนึ่ง ทุกจังหวะขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาสถานะที่ขา D จะเป็นสถานะเดิมเสมอครบเท่าที่ความถี่ของสัญญาณ V_1 และ V_2 ยังคงมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะมีผลทำให้สถานะของ Q จะคงมีค่าเท่าเดิม (อาจเป็นสถานะลอจิก 1 หรือลอจิก 0 ก็ได้) สัญญาณ V_Q ที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟตรงซึ่งไม่สามารถผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไปได้ จึงไม่เกิดเสียงดังที่ลำโพง

กรณี $f_1 \neq f_2$: แต่ละรอบของการเปิดรับข้อมูลใหม่สัญญาณ V_1 และ V_2 จะเริ่มมีความต่างเฟสกันขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งจังหวะการเปิดรับข้อมูลใหม่ได้ค่าที่เป็นลอจิกสถานะใหม่ (จากลอจิก 1 เปลี่ยนเป็นลอจิก 0 หรือจากลอจิก 0 เปลี่ยนเป็นลอจิก 1) และจะค่อย ๆ เปลี่ยนกลับไปเปิดรับสถานะเดิมอีกครั้ง การทำงานจะดำเนินเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ซึ่งจะได้สัญญาณ V_Q ที่มีความถี่เท่ากับ $|f_1 - f_2|$ โดยสัญญาณดังกล่าวนี้สามารถ



ภาพที่ 7 ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรแบบใช้สัญญาณรูปไซน์

ผ่านวงจรกรองความถี่สูงผ่านไปยังวงจรขยายเพื่อใช้สำหรับขับลำโพงได้ สาเหตุที่วิธีการดังกล่าวนี้ใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านแทนที่จะเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเนื่องจากการทำงานของดี-ฟลิปฟlop จะให้เอาต์พุตออกมาในสองลักษณะคือเมื่อไม่มีโลหะอยู่ใกล้จะให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิตอลหรือสัญญาณที่มีความถี่ต่ำมาก และเมื่อมีโลหะเข้าใกล้จะให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าในกรณีแรกและเป็นย่านที่มนุษย์ได้ยินได้ การกำหนดค่าความถี่คัตออฟ (Cutoff frequency) ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านนั้นจะกำหนดให้มีค่าต่ำกว่าย่านที่มนุษย์สามารถได้ยินและมีค่าสูงกว่าย่านความถี่ต่ำที่ต้องการกำจัด

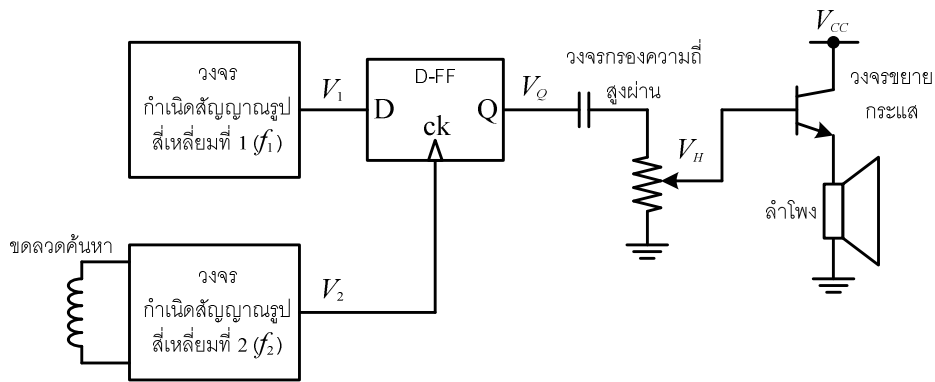
วิธีการหาค่าผลต่างของความถี่ : สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าความถี่เริ่มต้นในส่วนที่ใช้ป้อนให้กับขา D ของดี-ฟลิปฟlop ให้มีค่ามากกว่าความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้กับขา ck เป็นจำนวนเต็ม ซึ่งจะได้ค่าความถี่ของสัญญาณ V_Q ดังนี้คือ

$$f_Q = n|(f_1/n) - f_2| \quad (14)$$

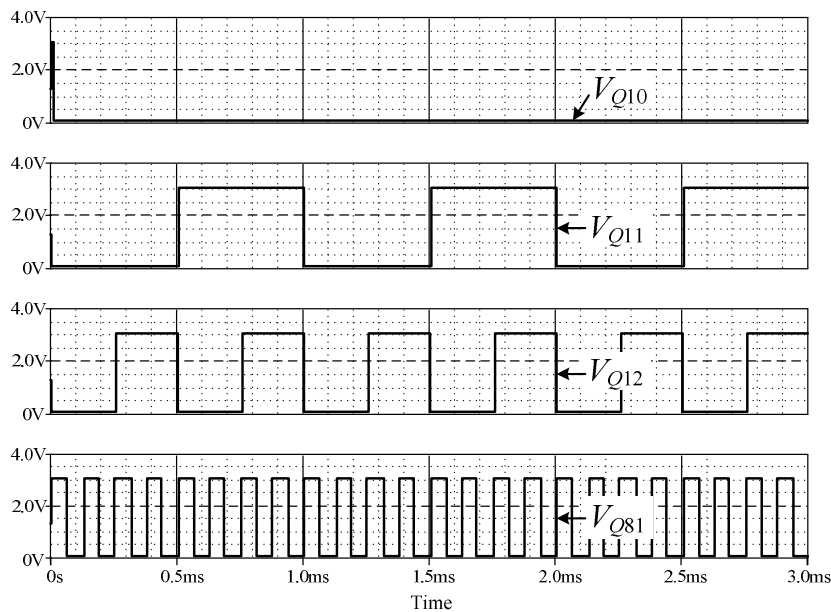
เมื่อ $n = f_1 / f_2$ เป็นเลขจำนวนเต็ม f_1 และ f_2 คือค่าความถี่ของสัญญาณที่ใช้ป้อนให้กับขา D และขา ck ของดี-ฟลิปฟlop ตามลำดับ จากสมการที่ (14) ยกตัวอย่างการคำนวณเช่น กำหนดค่าความถี่เริ่มต้น $f_1 = 800$ kHz $f_2 = 100$ kHz นั่นคือ

$n = 8$ ในกรณีที่มีการนำโลหะเข้าใกล้ขดลวดค้นหาจนมีผลทำให้ f_2 เปลี่ยนเป็น 101 kHz จะสามารถคำนวณค่าความถี่ f_Q ได้เป็น 8 kHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ดังกล่าวนี้มีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ f_2 ถึง 8 เท่า

ตัวอย่างผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่ใช้ดี-ฟลิปฟlop เป็นตัวตรวจเช็คความถี่ แสดงดังภาพที่ 9 เมื่อ V_{Q10} V_{Q11} V_{Q12} และ V_{Q81} คือสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากขา Q ของดี-ฟลิปฟlop โดย V_{Q10} V_{Q11} และ V_{Q12} เป็นผลการทำงานเมื่อกำหนดให้สัญญาณ V_1 มีความถี่ที่เท่ากับ 100 kHz สัญญาณ V_2 แปรค่าความถี่เป็น 100 kHz 101 kHz และ 102 kHz ตามลำดับ สำหรับสัญญาณ V_{Q81} เป็นผลการทำงานเมื่อกำหนดให้สัญญาณ V_1 มีความถี่เท่ากับ 800 kHz และสัญญาณ V_2 มีความถี่เท่ากับ 101 kHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของสัญญาณ V_{Q10} V_{Q11} และ V_{Q12} จะมีค่าเท่ากับผลความแตกต่างความถี่ของสัญญาณ V_1 และ V_2 นั่นคือ 0 Hz 1 kHz และ 2 kHz ตามลำดับ และในกรณีที่มีการกำหนดให้ค่าความถี่เริ่มต้นของสัญญาณ V_1 มีค่ามากกว่า V_2 เท่ากับ 8 เท่า ต่อมากรณีที่ความถี่ของสัญญาณ V_2 เปลี่ยนไปจะมีผลทำให้ค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 8 เท่าของการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณ V_2



ภาพที่ 8 การประมวลผลโดยใช้ดี-ฟลิปฟlop



ภาพที่ 9 ผลการทำงานโดยใช้ดี-ฟลิปฟlopประมวลผล

2.2 การประมวลผลโดยใช้แนนด์เกต

บล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรววจโลหะแบบ ออสซิลเลเตอร์ความถี่ปัลส์โดยใช้แนนด์เกต (NAND Gate) เป็นตัวประมวลผล แสดงดังภาพที่ 10 โดยที่สัญญาณอินพุตทั้งสอง (V_1 และ V_2) ที่ป้อนให้กับ แนนด์เกตจะอยู่ในรูปของสัญญาณ

แรงดันรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งการทำงานของแนนด์เกตจะให้เอาต์พุต (V_N) ที่เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน แต่มีค่าตัวชี้เซเคิล (Duty Cycle) ที่ขึ้นอยู่กับผลต่างความถี่และผลความต่างเฟสเริ่มต้นของสัญญาณอินพุตทั้งสอง เมื่ออาศัยหลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์จะสามารถเขียนองค์ประกอบของสัญญาณ V_N ได้ดังนี้คือ

$$V_N = V_C \frac{T_P}{T_0} + \frac{V_C}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin n\omega_0 t - \sin(n\omega_0 t - n\omega_0 T_P)}{n} \right\} \quad (15a)$$

$$V_N = V_C D + \frac{V_C}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin n\omega_0 t - \sin(n\omega_0 t - n\omega_0 DT_0)}{n} \right\} \quad (15b)$$

เมื่อ $D = T_p / T_0$ คือค่าดิวิตีไซเคิลของสัญญาณ V_N , $\omega_0 = 2\pi / T_0$ คือค่าความถี่เชิงมุมของสัญญาณ V_N , $T_p = K_{mi}$ คือค่าช่วงเวลาที่เป็นซิกนัล (ลอจิก 1) ของสัญญาณ V_N , T_0 คือคาบเวลาของสัญญาณ V_N , k คือค่าคงที่ของการแปลงผัน, m_i คือสัญญาณความถี่ต่ำที่แฝงมาภายในสัญญาณ V_N , และ V_C คือค่าระดับแรงดันในสถานะลอจิก 1 ของแนนด์เกต จากสมการที่ (15) สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณี ดังนี้คือ

กรณีที่ $f_1 = f_2$: ค่าดิวิตีไซเคิล (D) ของสัญญาณ V_N จะขึ้นอยู่กับผลความต่างเฟสเริ่มต้นของสัญญาณ V_1 และ V_2 เมื่อพิจารณาในรูปของค่า T_p จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$T_p = T_0 \begin{cases} \frac{\theta_i}{2\pi} + \frac{1}{2} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ -\frac{\theta_i}{2\pi} + \frac{3}{2} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (16)$$

เมื่อ θ_i คือค่าผลความต่างเฟสเริ่มต้นของสัญญาณ V_1 และ V_2 จากสมการที่ (15) และสมการที่ (16) คาบเวลาของสัญญาณ $V_N (T_0)$ จะมีค่าเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณ V_1 และ V_2 โดย T_p จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา (แต่จะขึ้นอยู่กับ θ) ซึ่งเมื่อนำสัญญาณ V_N ดังกล่าวนี้นี้ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะได้สัญญาณ V_L ที่เป็นสัญญาณไฟตรง และเมื่อนำสัญญาณดังกล่าวนี้ไปขยายและขับลำโพงจะไม่ได้ยินเสียง

กรณีที่ $f_1 \neq f_2$: เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา สมมติให้ $\theta_i = 0$ สัญญาณ V_N ที่ได้จากแนนด์เกตจะมีความถี่ประมาณเท่ากับค่าความถี่เฉลี่ยของสัญญาณอินพุตทั้งสอง ในขณะที่ค่าดิวิตีไซเคิลของสัญญาณ V_N ในแต่ละรอบจะมีค่าค่อยๆ เปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาในรูปของค่า T_p จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$T_p = T_0 \begin{cases} \frac{t}{T_m} + \frac{1}{2} & ; 0 < t < T_m / 2 \\ -\frac{t}{T_m} + \frac{3}{2} & ; T_m / 2 < t < T_m \end{cases} \quad (17a)$$

$$T_m = \frac{1}{f_m} = \frac{1}{|f_1 - f_2|} \quad (17b)$$

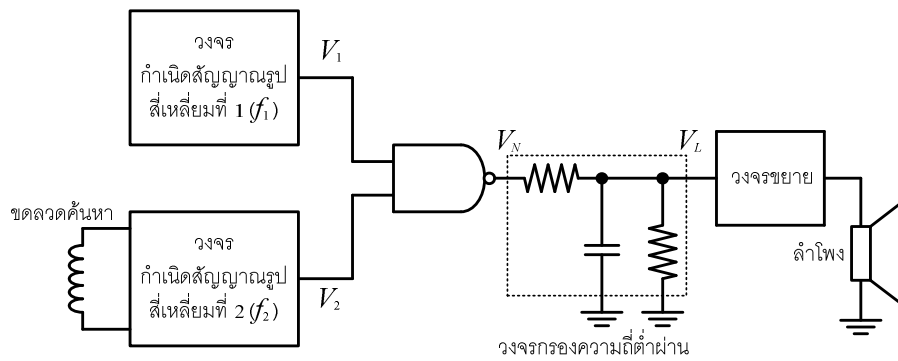
เมื่อ t คือเวลา และ T_m คือคาบเวลาของสัญญาณความถี่ต่ำ (m_i) ที่แฝงมาภายในสัญญาณ V_N จากสมการที่ (15) และสมการที่ (17) ค่าคงที่ของการแปลงผัน $k = T_0$ สัญญาณ m_i เป็นสัญญาณ

รูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่ประมาณเท่ากับผลต่างความถี่ของสัญญาณ V_1 และ V_2 ซึ่งเมื่อนำสัญญาณ V_N ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้สัญญาณ V_L ที่มีลักษณะคล้ายเป็นรูปสามเหลี่ยมผสมมากับสัญญาณไฟตรง และเมื่อนำสัญญาณดังกล่าวนี้ไปขยายและขับลำโพงจะสามารถได้ยินเสียงได้

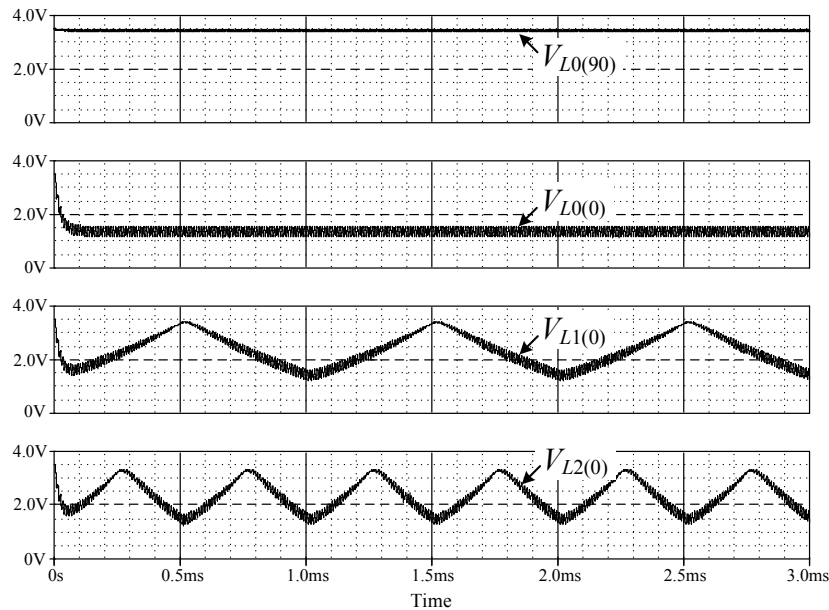
ภาพที่ 11 แสดงผลการเลียนแบบการทำงานของการใช้แนนด์เกตเป็นตัวประมวลผล เมื่อ $V_{L0(90)}$, $V_{L1(0)}$, $V_{L1(0)}$ และ $V_{L2(0)}$ คือสัญญาณที่ได้จากการนำสัญญาณเอาต์พุตของแนนด์เกต (V_N) ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดย $V_{L0(90)}$ และ $V_{L0(0)}$ แสดงผลการทำงานเพื่อใช้เปรียบเทียบกรณีที่มีการกำหนดให้สัญญาณ V_1 และ V_2 มีความถี่เท่ากันเท่ากับ 100 kHz แต่มีมุมเริ่มต้นแตกต่างกันเท่ากับ 90 องศา และ 0 องศา ตามลำดับ ในขณะที่ $V_{L0(0)}$, $V_{L1(0)}$ และ $V_{L2(0)}$ เป็นผลการทำงานเพื่อใช้เปรียบเทียบกรณีที่กำหนดให้สัญญาณ V_1 และ V_2 มีมุมเริ่มต้นเท่ากันเท่ากับ 0 องศา สัญญาณ V_1 มีความถี่คงที่เท่ากับ 100 kHz แต่สัญญาณ V_2 แปรค่าความถี่เป็น 100 kHz 101 kHz และ 102 kHz ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่สัญญาณ V_1 และ V_2 มีความถี่เท่ากันจะได้สัญญาณที่ออกจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง (แม้จะมีสัญญาณความถี่สูงผสมอยู่ด้วยเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้ยังไม่สามารถลดทอนองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณ V_N ings ได้ทั้งหมด) แต่จะมีค่าระดับเฉลี่ยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่ามุมเริ่มต้นของสัญญาณ V_1 และ V_2 ในกรณีที่สัญญาณ V_1 และ V_2 มีค่าความถี่แตกต่างกันจะได้สัญญาณที่ออกจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมีความถี่เท่ากับผลต่างความถี่ของ V_1 และ V_2 (แม้จะมีสัญญาณความถี่สูงผสมอยู่ด้วยเล็กน้อยทั้งนี้ด้วยเหตุผลเดียวกันกับกรณีแรก) นั่นคือความถี่ของสัญญาณ $V_{L0(0)}$, $V_{L1(0)}$ และ $V_{L2(0)}$ จะมีค่าเท่ากับ 0 Hz 1 kHz และ 2 kHz ตามลำดับ

ปัญหาและแนวทางสำหรับการพัฒนาเครื่องมือ

ปัญหาที่สำคัญของเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ คือความเสถียรทางความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ พิจารณาภาพที่ 12(n) เส้นลวดในแต่ละรอบจะมีคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าค่าต่ำแฝงอยู่ด้วย (ไม่พิจารณาผลของค่าความต้านทานแฝง) ซึ่งวงจรเสมือนของขดลวดจะมีลักษณะเป็นวงจรเครือข่าย L และ C (L - C network) เนื่องจากการคำนวณค่าความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ตามสมการที่ (2) เป็นการประมาณด้วยค่า L และ C_T ที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในกรณีที่เส้นลวดในแต่ละรอบมีการเคลื่อนตำแหน่งจะมีผลทำให้ค่า L



ภาพที่ 10 การประมวลผลโดยใช้แนตเกต



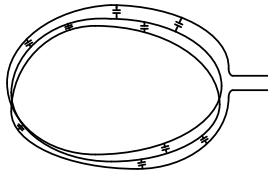
ภาพที่ 11 ผลการทำงานโดยใช้แนตเกตประมวลผล

และ C_T รวมของวงจรมีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้ค่าความถี่เริ่มต้นของวงจรถัดจันหาไป ดังสมการ (Moreland, 2010)

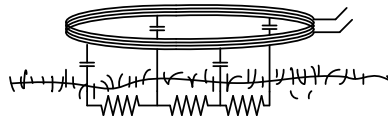
$$\frac{\Delta f}{f_2} \cong \sqrt{\frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{\Delta C_T}{C_T}} \quad (18)$$

วิธีการแก้ปัญหาในเบื้องต้นสามารถทำได้โดยการใช้กาวหรือเทปพันสายไฟยึดตำแหน่งของเส้นลวดให้อยู่กับที่ ในกรณีที่มีการนำขดลวดคั่นหาไปใช้งานใกล้บริเวณแหล่งน้ำหรือสนามหญ้าที่มีสภาพชื้นแฉะจะเกิดปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์อีกประการหนึ่งคือความจุไฟฟ้าเทียบดิน (ground capacitance) ดังแสดงในภาพที่ 12(ข) ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวม (C_T) ของวงจรถัดจันหาเลเตอร์มีค่าเปลี่ยนไปในแต่ละ

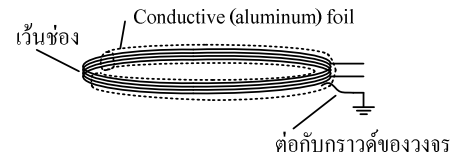
สถานที่ใช้งาน วิธีการแก้ปัญหาที่นิยมนำมาใช้คือ Faraday shielding โดยการใช้แผ่นตัวนำ (นิยมใช้แผ่นอลูมิเนียมบาง) พันรอบขดลวดคั่นหา โดยเว้นช่องว่างไว้เล็กน้อย และใช้สายไฟต่อเข้ากับกราวด์ของวงจรถัดจันหาแสดงในภาพที่ 12(ค) ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเทียบดินของขดลวดมีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับพื้นที่ใช้งาน การเว้นระยะช่องว่างไว้เล็กน้อยเพื่อป้องกันการเกิดกระแสไหลวนบนแผ่นตัวนำ (ทิศขนานกับแนวของขดลวด) ซึ่งจะไปรบกวนการผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดคั่นหา ข้อพิจารณาสำคัญอีกประการหนึ่งคืออุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการทำงานของวงจรถัดจันหา คลาดเคลื่อนไป วิธีการแก้ปัญหาคือการพยายามเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก วิธีการต่อ



(ก) ค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างเส้นลวด



(ข) ความจุไฟฟ้าเทียบดิน



(ค) Faraday shielding

ภาพที่ 12 ปัญหาของขดลวดค้นหาและแนวทางแก้ไขปัญหา (Moreland, 2010)

วงจรต่างๆ ให้อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน และวิธีการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่ไม่ดูดซับพลังงานภายนอกเข้ามารบกวนวงจร

บางเวลาผลจากการทำงานของวงจรจะมีสัญญาณกระแสกลับไปรบกวนขนาดของแรงดันไฟตรงที่ใช้เลี้ยงวงจร ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยการใช้ตัวเก็บประจุต่อคร่อมระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับกราวด์ของวงจร (ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน) การปรับแต่งค่าความถี่เริ่มต้นของวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้งสอง บางครั้งจะใช้วิธีการกำหนดให้ค่าความถี่เริ่มต้นมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยทั้งนี้เพื่อเพิ่มความไวในการทำงาน

สรุป

เครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์เป็นหลักการที่ค่อนข้างเก่าแก่ เรียบง่าย และใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ จุดประสงค์การใช้งานเครื่องมือที่ใช้หลักการนี้ค่อนข้างกว้างและยืดหยุ่น เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาเรียนรู้การพัฒนารูปแบบเครื่องตรวจจับโลหะ เมื่อพิจารณาหลักการการทำงานของวงจรประมวลผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ฟิลิปฟลอป หรือลอจิกเกตเป็นตัวประมวลผลซึ่งเป็นวิธีการที่มีความแตกต่างกับการเกิดปรากฏการณ์บีตส์ของคลื่นเสียง แต่วิธีการทั้งสองให้ผลการทำงานที่คล้ายกันคือการให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่เท่ากับผลต่างความถี่ของสัญญาณอินพุตทั้งสองจึงจัดให้วิธีการทั้งสองอยู่ในกลุ่มของหลักการแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์โดยทั้งหมดอาศัยปรากฏการณ์ที่สำคัญของขดลวดค้นหาเข้ามาประกอบ (รวมทั้งเครื่องตรวจจับโลหะแบบอื่นๆ) คือการเปลี่ยนค่าสภาพซึมได้ของสภาพแวดล้อม หรือเกิดจากปรากฏการณ์กระแสไหลวนบนโลหะภายในบทความนี้ผู้เขียนได้รวบรวม วิเคราะห์ ใช้คอมพิวเตอร์เลียนแบบการทำงานเบื้องต้น และเรียบเรียงหลักการที่สำคัญของเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนักออกแบบวงจรและผู้สนใจทั่วไป โดยหวังว่าจะเป็น

ประโยชน์สำหรับการใช้งานหรือการพัฒนาออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะที่มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ทุนและเครื่องมือสนับสนุนในการศึกษาค้นคว้าวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Cheeseman, G. (1999, May). Metal Detectors (Part 1). *Electronics and Beyond*.

Crone, R., & Crone, D. (1989). Twin Loop Treasure Seeker. *ETI*.

Cutnell, J.D., & Johnson, K.W. (2004) Physics. (6th Edition). John Wiley & Sons, Inc. 2004.

Flind, A. (1987). E.E. Buccaneer IB Metal Detector. *Everyday Electronics*.

Floyd, T.L. (2008). *Electronic Devices : electron flow version*. (8th Edition). PEARSON Prentice Hall.

FreeCircuitDiagram. (2010). A Simple Metal Detector Circuit Using Beat Frequency Oscillator (BFO). Retrieved April 1, 2010, from <http://freecircuitdiagram.com/2008/11/24/simple-metal-detector-circuit-beat-frequency-oscillator-bfo/>

Hageman, R., & Hageman, S. (1998, September). "BFO Metal Detector". *EDN*.

Moreland, C.W. (2010). BFO Theory. Retrieved April 1, 2010, from <http://www.geotech1.com/pages/metdet/info/bfotheory/bfo.pdf>

- Medek, R., Nicolics, J., & Schrottmayer, D. (2001, May). *High Sensitive Pulse Inductive Eddy Current Measurement For Mine Detection Systems*. Paper presented at the meeting of the 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata, Romania.
- Rakes, C.D. (2001, August). Basic Circuitry Metal Detection. *Poptronics*,
- Sharawi, M.S., & Sharawi, M.I. (2007, November). *Design and Implementation of A Low Cost VLF Metal Detector with Metal-type Discrimination Capabilities*. Paper presented at the meeting of the IEEE International Conference on Signal Processing and Communications (ICSPC 2007), Dubai, United Arab Emirates.
- Serway, R.A., & Jewett Jr.J.W. (2004). *Physics for Science and Engineers*. (6th Edition). THOMSON Brooks/Cole. 2004.
- Stuart, M. (1989). EE Treasure Hunter. *Everyday Electronics*.
- Stuart, M. (1994). Microcontroller P.I. Treasure Hunter. *Everyday with Practical Electronics*.
- Wait, P. (1981). Simple, Sensitive Metal Detector. *ETI561: How To Build Gold & Treasure Detectors*.
- Wareham, G. (1980). Off-Resonance Metal Detector. *Wireless World*.
- Wikipedia*. (2010). Build your own metal detector. Retrieved April 1, 2010, from <http://www.easytreasure.co.uk/bfo.htm>
- Vuille, C., Serway, R.A., & Faughn, J.S. (2009). *College Physics*. (8th Edition). Brooks/Cole CENGAGE Learning. 2009.