

บทที่ 5

การออกแบบและการสร้างตัวตรวจจับเอ็กซ์เรย์

5.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ซึ่งเกี่ยวกับเรื่องตัวตรวจจับเอ็กซ์เรย์นั้น สามารถเห็นได้ว่า ตัวตรวจจับเอ็กซ์เรย์ที่ใช้กันโดยทั่วไปมีวิธีการตรวจจับ 2 วิธีคือ

1. วิธีการทางตรง จะใช้ตัวนำชนิดไวต่อแสงมาใช้ในการเปลี่ยนเอ็กซ์เรย์ให้เป็นประจุไฟฟ้า
2. วิธีการทางอ้อม จะใช้ไดโอดที่ไวต่อแสงต่อใช้งานร่วมกับชั้นของฟอสเฟอร์ในการเปลี่ยนเอ็กซ์เรย์ให้เป็นประจุไฟฟ้า

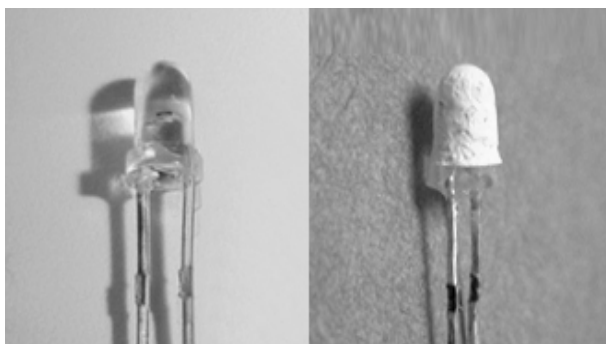
โดยที่ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวตรวจจับเอ็กซ์เรย์โดยใช้วิธีการทางอ้อมเนื่องจากไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการสร้างและงบประมาณที่สูงมากนัก ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะด้อยกว่าตัวตรวจจับที่ใช้วิธีการทางตรงก็ตาม แต่ก็มีประสิทธิภาพเพียงพอที่สามารถนำมาใช้งานได้

5.2 ตัวตรวจจับเอ็กซ์เรย์แบบแถวยาว

ในงานวิจัยเดิมได้ทดลองกับสารเรืองแสง ดังนี้

1. $Gd_2O_2S:Tb$
2. $TaO_4:Nb$
3. $CaWO_4$

ในส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ได้จากสารเรืองแสงได้นำโฟโตทรานซิสเตอร์มาเป็นอุปกรณ์วัดแสง โฟโตทรานซิสเตอร์จะเด่นในด้านของขนาดที่เล็กและมีอัตราการขยายดี โดยที่ในงานวิจัยเดิมได้ทำการเคลือบสารเรืองแสงลงบนอุปกรณ์วัดแสงโดยตรง ซึ่งทำได้โดยผสมสารเรืองเข้าด้วยกันกับ น้ำ และกาว เพื่อให้สามารถเคลือบบนตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ได้ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงโฟโตทรานซิสเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยเดิม

ซึ่งผลที่ได้นั้น จะมีผลกระทบของความหนาและความไม่สม่ำเสมอของสารเรืองแสงที่เคลือบในงานวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนจากสารเรืองแสงเป็นฉากเรืองแสง (Intensifying Screen หรือ Image Plate) และเปลี่ยนจากโฟโตทรานซิสเตอร์แบบทั่วไป เป็นแบบเล็กพิเศษ เพื่อที่จะสามารถเพิ่มความละเอียดของข้อมูล ทำให้ภาพที่ได้จากการประมวลผลภาพดีขึ้น

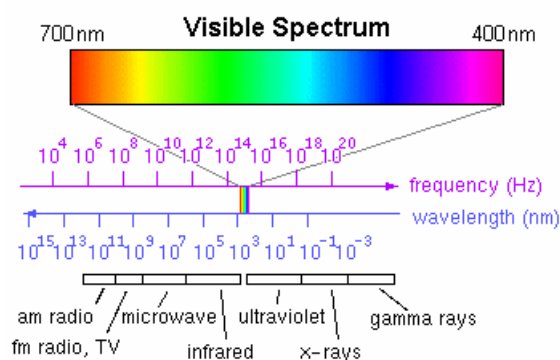


รูปที่ 5.2 แสดงขนาดของโฟโตทรานซิสเตอร์แบบใหม่เทียบแบบที่ใช้ในงานวิจัยเดิม

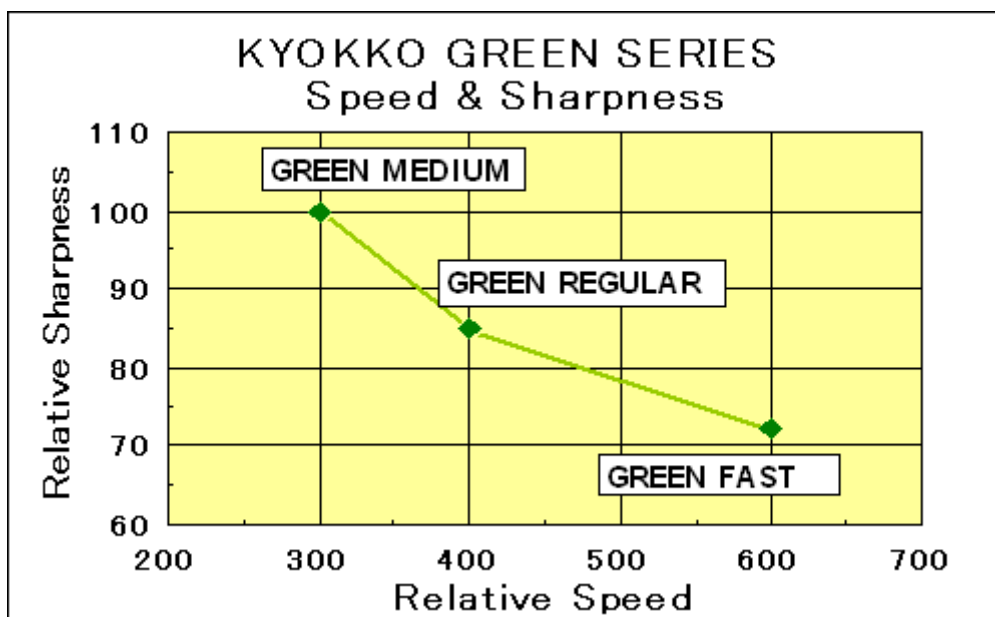


รูปที่ 5.3 แสดงฉากเรืองแสงที่นำมาใช้งาน

ฉากเรืองแสง (Intensifying Screen) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฉากเรืองแสงสีเขียว เนื่องจากมีความไวมากกว่าฉากเรืองแสงสีน้ำเงิน ตามคุณสมบัติของแสงสีต่างๆ [8]



รูปที่ 5.4 แสดงสเปกตรัมของแสงสีต่างๆ

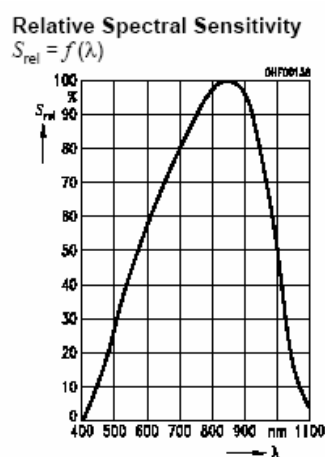


รูปที่ 5.5 แสดงความไวของการตอบสนองเทียบกับความคมชัดของการแสดงผลของฉากเรืองแสงสีเขียวที่เลือกใช้งาน

โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนจากแสงที่ได้จากฉากเรืองแสงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยระดับสัญญาณที่ได้จะมีค่าน้อยแตกต่างกัน ตามค่าความเข้มแสงที่ได้รับ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ของบริษัท OSRAM รุ่น SFH 305 – 2 ซึ่งเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กมาก มีพื้นที่รับแสงกว้าง 1 มม. ทำให้ข้อมูลภาพที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น อีกทั้งกราฟคุณสมบัติยังมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าโฟโตทรานซิสเตอร์แบบทั่วไปที่ใช้ในงานวิจัยเดิมอีกด้วย



(a)



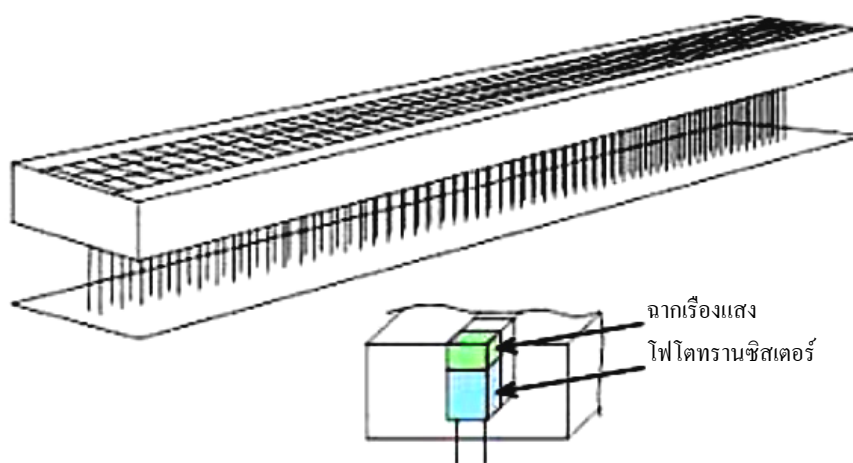
(b)

รูปที่ 5.6 (a) แสดงโฟโตทรานซิสเตอร์ OSRAM รุ่น SFH 305 – 2

(b) แสดงกราฟคุณสมบัติของโฟโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในงาน

จากกราฟคุณสมบัติของโฟโตทรานซิสเตอร์ จะเห็นว่า ช่วงสูงสุดของกราฟแสดงให้เห็นว่า โฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ตอบสนองการทำงานได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่น 850 มม. ซึ่งอยู่ย่านของแสงสีแดง แต่เนื่องจากจากเรื่องแสงที่มีอยู่ทั่วไปนั้นเป็นสีเขียว และสีน้ำเงิน ดังนั้นเมื่อเราเลือกใช้จากเรื่องแสงสีเขียว การตอบสนองของการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์จึงอยู่ที่ประมาณ 20 % ในขณะที่ถ้าเลือกใช้สีน้ำเงินจะอยู่ที่ 10% เท่านั้น ดังนั้นในส่วนนี้หากสามารถใช้สารเรืองแสงเคลือบจากให้เป็นแสงสีแดงได้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้ดีอีกหลายเท่าตัว แต่เนื่องจากในทางการแพทย์นั้นสารเรืองแสงสีแดงไม่เป็นที่นิยมใช้งานเพราะฟิล์มเอ็กซเรย์แทบจะไม่ตอบสนองต่อแสงสีแดงเลย แต่จะตอบสนองต่อแสงสีเขียว และสีน้ำเงินได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงไม่สามารถหาจากเรื่องแสงสีแดงมาใช้งานได้

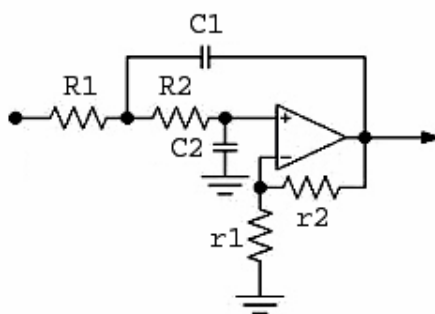
เมื่อได้จากเรื่องแสง และโฟโตทรานซิสเตอร์แล้ว ต่อไปคือการจัดวางลงในช่องที่มีการแบ่งและกันโฟโตทรานซิสเตอร์แต่ละตัวแยกจากกันเพื่อป้องกันการรบกวนของแสงจากตัวข้างเคียงโดยตัวที่นำมาทำกันนี้ใช้ฟิล์มถ่ายรูปที่ถูกทำให้ทึบแล้วมาเป็นฉากกัน เพื่อลดช่องว่างระหว่างโฟโตทรานซิสเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างของหน่วยตรวจจับเอ็กซเรย์ชนิดแถวยาว

5.3 การออกแบบวงจร

วงจรที่ใช้งานในงานวิจัยนี้ จะเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจึงเข้าสู่วงจรระบบควบคุมต่อไป



รูปที่ 5.8 แสดงวงจรต้นแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอ็กซเรย์เมื่อถูกตรวจจับได้โดยชุดตรวจจับเอ็กซเรย์แล้วจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ก็จะถูกนำมาผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (รูปที่ 5.8) เพื่อเลือกเอาเฉพาะองค์ประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณเอทพุทที่ได้เท่านั้น

จากรูปที่ 5.8 สามารถคำนวณหาค่า pole, zero และค่าตัวแปรต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำ

ค่าอัตราขยาย (k) สามารถคำนวณได้จาก

$$k = 1 + \frac{r2}{r1} \quad (5.1)$$

ค่าฟังก์ชันการส่งถ่าย $H(s)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{k \frac{1}{R1C1R2C2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R1C1} + \frac{1}{R2C1} + \frac{1-k}{C2R2} \right) s + \frac{1}{R1C1R2C2}} \quad (5.2)$$

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

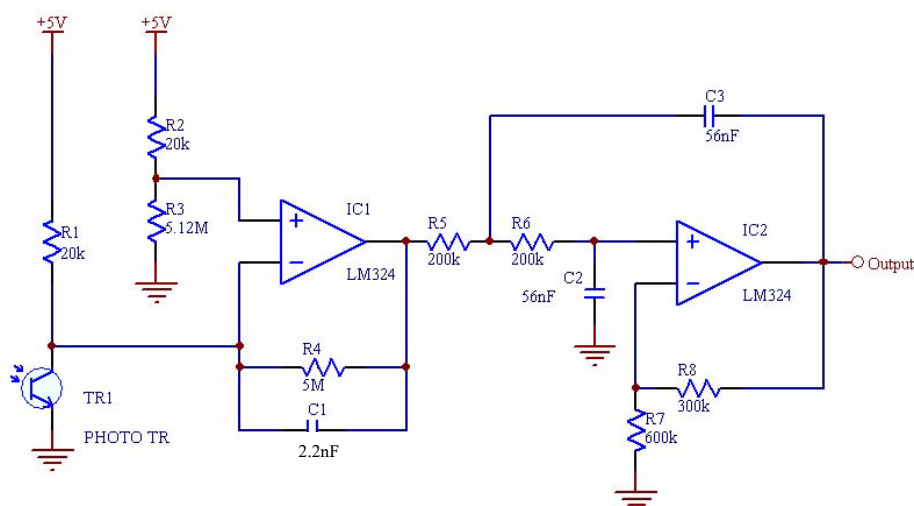
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{k\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (5.3)$$

จะได้

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{R1C1R2C2}} \quad (5.4)$$

และค่า Q ของวงจรสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_p = \frac{\omega_p}{\frac{1}{R1C1} + \frac{1}{R2C1} + \frac{1-k}{C2R2}} \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.9 แสดงวงจรที่ใช้ในส่วนของอินพุตและกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้รับการปรับปรุง

จากรูปที่ 5.9 วงจรที่ได้ทำการแก้ไขจะมีส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสองชุดคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีอันดับการกรอง 1 อันดับ (R4 และ C1) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีอันดับการกรอง 2 อันดับ (R5, R6, C2, C3, R7, R8 และ IC2) ดังนั้นในวงจรชุดนี้จึงมีอันดับการกรองเท่ากับ 3 อันดับ จากรูปที่ 5.11 สามารถคำนวณหาค่า pole, zero และค่าตัวแปรต่างๆ ของวงจรกรองความถี่อันดับ 2 โดยเทียบเคียงวงจรต้นแบบในรูปที่ 5.8 ได้ดังนี้

จาก (5.1) สามารถคำนวณค่าอัตราขยาย (k) ได้ คือ

$$1 + \frac{300k}{600k} = 1.500 \quad (5.6)$$

จาก (5.4) สามารถคำนวณค่า ω_p ได้ คือ

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{200k \times 56nF \times 200k \times 56nF}} = 89.286 \text{ Rad/Sec} \quad (5.7)$$

ดังนั้นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้จะมีจุดตัดความถี่ (frequency cutoff) ที่ 14.210 Hz และค่า Q ของวงจรสามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าตัวแปรลงใน (5.5) จะได้

$$Q_p = \frac{89.986}{89.986 + 89.986 - 44.643} = 0.672 \quad (5.8)$$

จาก (5.2) ค่าฟังก์ชันการส่งถ่ายของระบบ คือ

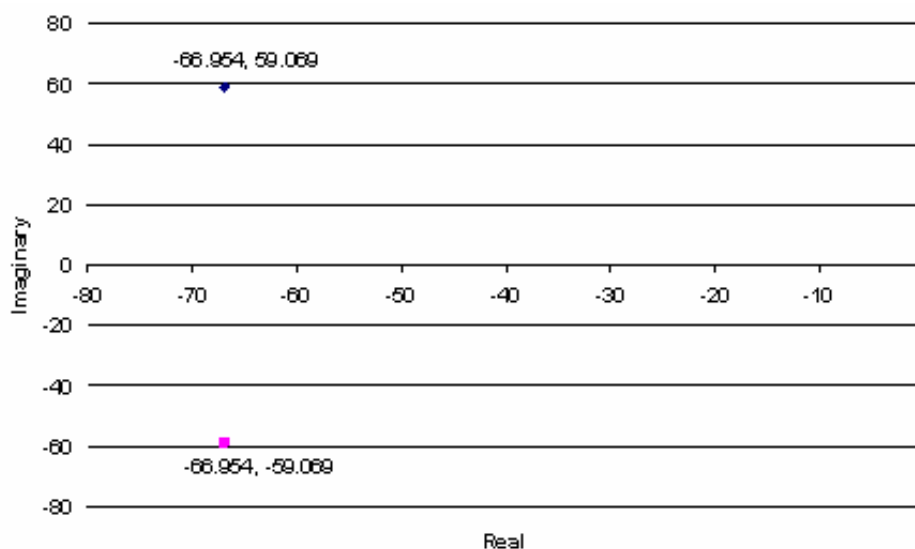
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{1.500 \times 7971.939}{S^2 + 133.908S + 7971.939} \quad (5.9)$$

จาก (5.9) สามารถคำนวณหาค่า pole ทั้งสองตัวของวงจรได้ค่าดังนี้

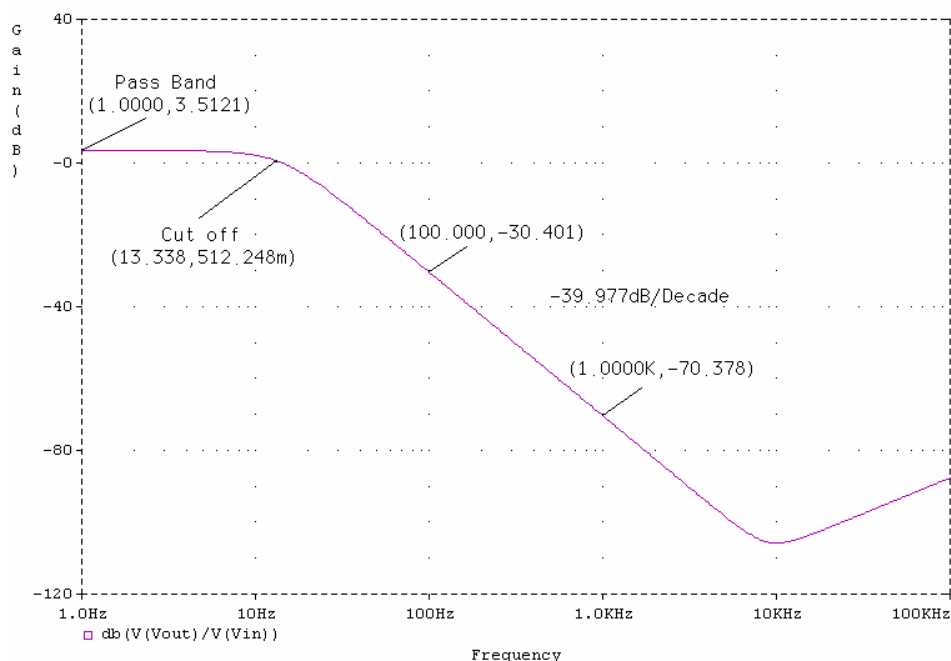
$$S_1 = -66.954 + j59.069$$

$$S_2 = -66.954 - j59.069$$

จากค่า S_1 และ S_2 ที่ได้ปรากฏว่า pole ของระบบจะอยู่ฝั่งซ้ายของ complex s-plane ดังแสดงใน รูปที่ 5.10 ทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานและกราฟการตอบสนองของวงจรในด้านความถี่ต่อ อัตราการขยายแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 แสดงตำแหน่ง pole ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับ 2 ในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.11 แสดงกราฟการตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับ 2 ในรูปที่ 5.9 ในด้านความถี่ต่ออัตราขยาย

วงจรในรูปที่ 5.9 มีค่าการลดทอนที่ -39.977dB/Decade

หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับแต่ละตัวจะนำมาผ่านวงจร Multiplexer เพื่อให้สัญญาณที่ได้ทางเอาต์พุต 8 ช่องสัญญาณ

จากบล็อกการทำงานรวมในรูปที่ 5.12 สามารถอธิบายการทำงานของแต่ละส่วนได้ดังนี้

1. Detector module คือ ตัวตรวจจับเอ็กซ์เรย์ในแต่ละหน่วยซึ่งจะประกอบด้วย

1.1. ตัวตรวจจับแสงที่มีทั้งสิ้น 256 ตัว และนาฬิกาเรียงแสง

1.2. วงจรภาคต้น

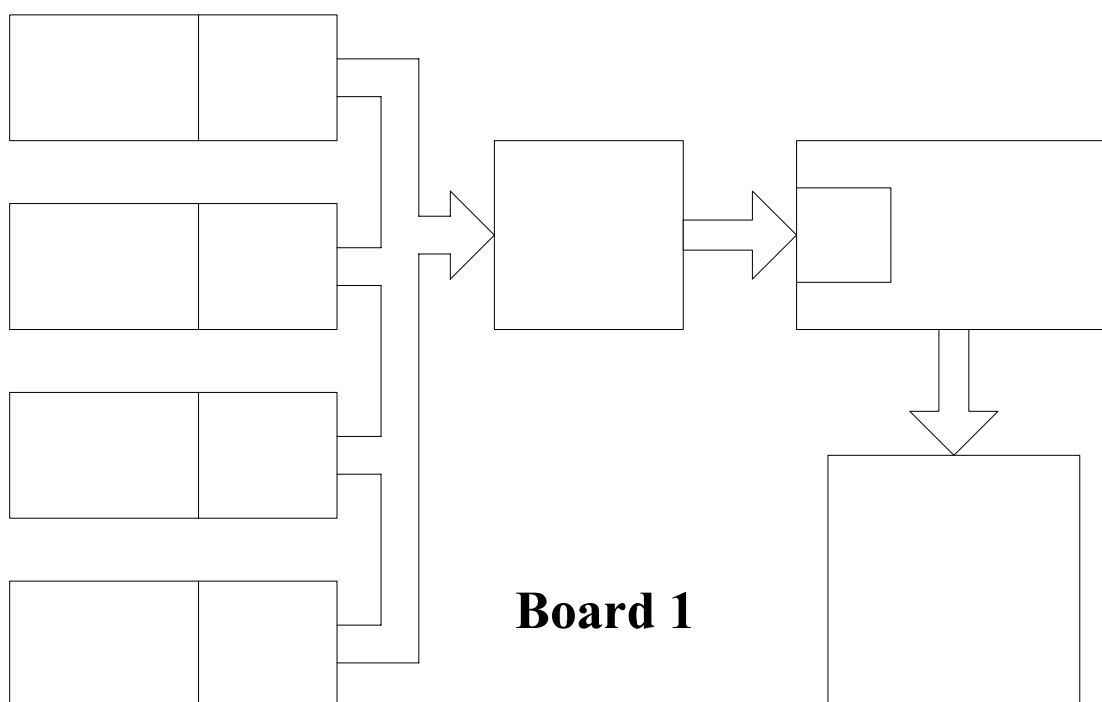
1.3. วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

2. Address decoder หรือ Multiplexer ทำหน้าที่เลือกสัญญาณจาก Detector module ให้ส่งออกไปทางด้านเอาต์พุต 8 ช่องต่อ 1 บอร์ด โดยเรียงลำดับต่อเนื่องกันไป และทำการเลือกสัญญาณที่ได้อีกครั้งหนึ่งเพื่อเข้าสู่ Multiplexer ชุดที่ 2 ซึ่งเป็นจะจัดเรียงสัญญาณอีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่ A/D Converter ทั้ง 8 ตัว

3. A/D converter ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต โดยในส่วนนี้จะเป็นส่วนประกอบภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่แล้ว จึงสามารถประหยัดพื้นที่วงจรไปได้มาก

4. USART port ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากหน่วยตรวจจับอิเล็กทรอนิกส์ไปสู่เครื่องคอมพิวเตอร์โดยมีการเชื่อมต่อการทำงานผ่านทางช่องการสื่อสารแบบ Serial Port ใช้ Boud Rate ที่ 38400 bps Sampling Rate ที่ 3840 sampling per sec

5. Central Processing Unit. หน่วยควบคุมการประมวลผลกลาง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้อุปกรณ์ Microcontroller ATmega64 ของ ATML มาทำหน้าที่ควบคุมการเลือกข้อมูลของ Multiplexer ควบคุมการสุ่มตัวอย่างของ A/D converter และควบคุมการทำงานของ USART

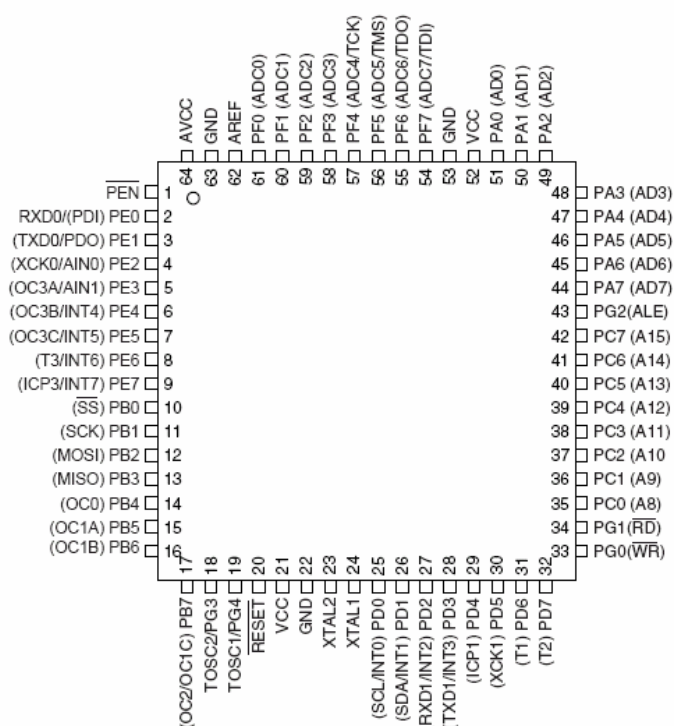
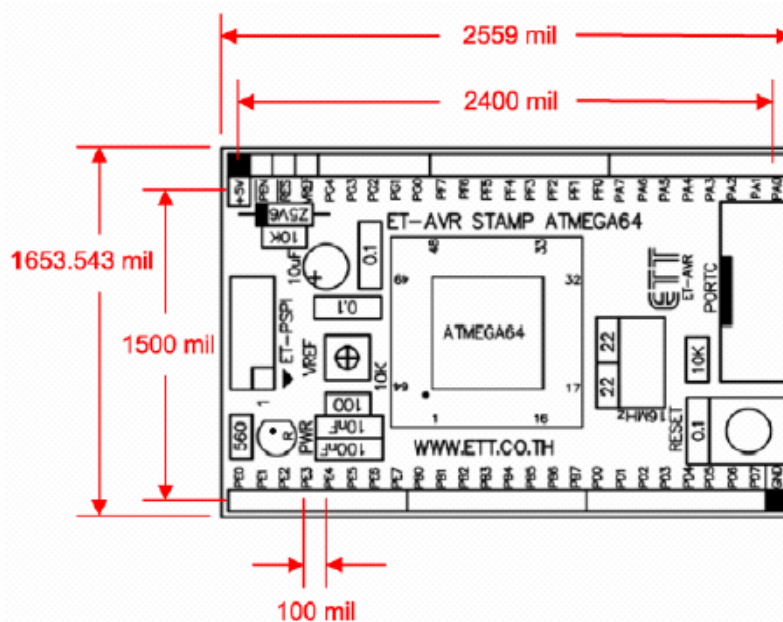


รูปที่ 5.12 แสดงบล็อกการทำงานของระบบตรวจจับอิเล็กทรอนิกส์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์

Board 1
64 Detectors 8 MUX
SFH305-2 74HC4051

Board 2
64 Detectors 8 MUX
SFH305-2 74HC4051

Board 3
64 Detectors 8 MUX
SFH305-2 74HC4051

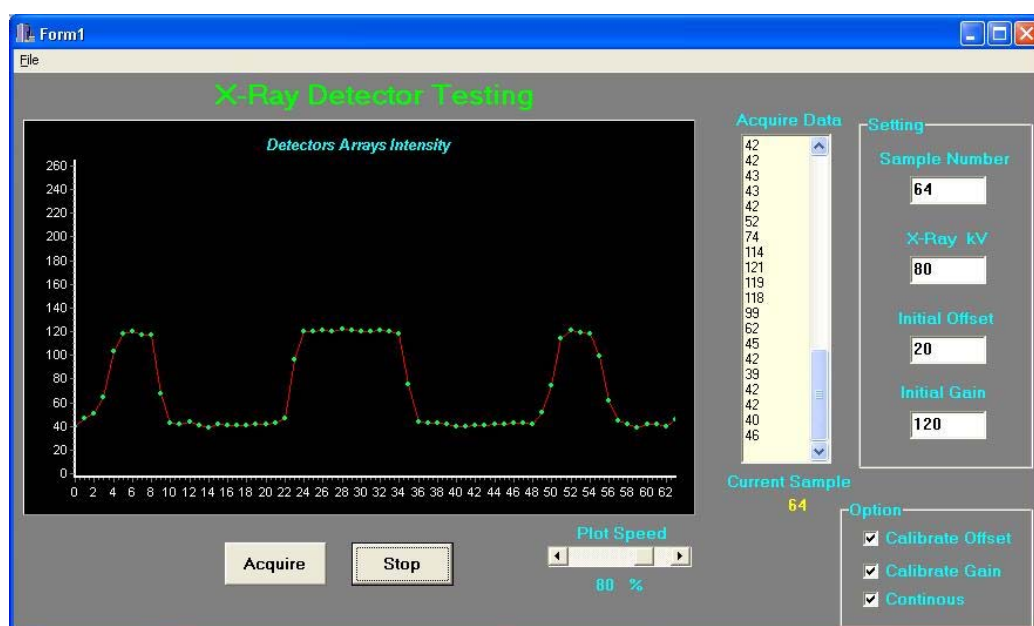


รูปที่ 5.13 แสดงหน่วยประมวลผลกลาง

ซึ่งในการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางจะทำหน้าที่ควบคุมการรับสัญญาณของเอ็กซ์เรย์ที่ออกมาในแต่ละครั้ง จากรูปที่ จะเห็นได้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้มีพอร์ตอินพุต-เอาต์พุตมากมาย อีกทั้งยังมีพอร์ตที่ทำหน้าที่เป็น A/D Converter จำนวนถึง 8 พอร์ตอีกด้วย ในการออกแบบหน่วยประมวลผลกลางได้ใช้โปรแกรม CodeVisionAVR C Compiler ของบริษัท ETT

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้จะทำหน้าที่รับข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับ โดยข้อมูลที่ได้นี้จะเป็นข้อมูลที่เรียกว่าข้อมูลโปรเจกชัน ซึ่งเป็นการเอ็กซเรย์ผ่านวัตถุใน 1 มุม จากรูปที่ 5.14 แกนนอนคือจำนวนตัวตรวจจับเอ็กซเรย์ แกนตั้งคือระดับพลังงานเอ็กซเรย์

ในส่วนของการปรับเทียบค่าของตัวตรวจจับเอ็กซเรย์แต่ละตัวจะมีช่วงการทำงานดังแสดงในรูปที่ 5.14 ซึ่งจะมีการปรับเทียบค่าสองครั้ง โดยในครั้งแรกจะเป็นการปรับเทียบค่าออฟเซตของแรงดันในขณะที่ไม่มีการถ่ายเอ็กซเรย์และในครั้งที่สองจะเป็นการปรับเทียบอัตราขยายในขณะที่ทำการถ่ายเอ็กซเรย์



รูปที่ 5.14 แสดงตัวโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นโดยใช้ Borland C++Builder 5

รูปที่ 5.14 แสดงตัวโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นโดยใช้ Borland C++Builder 5 โดยมีส่วนการทำงานหลักๆ ดังนี้

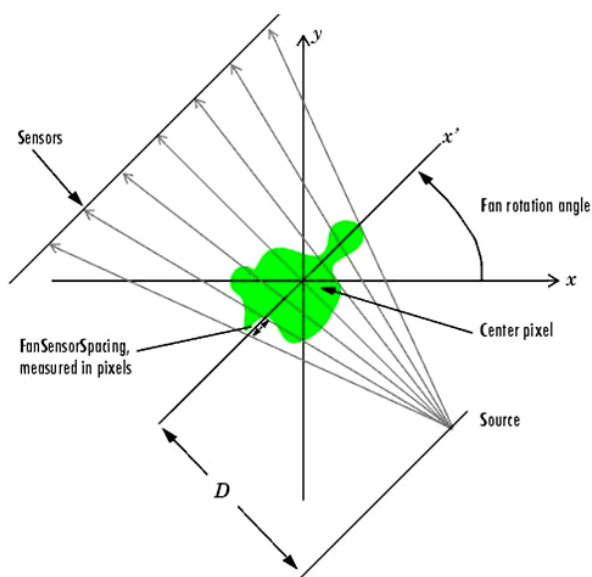
1. Sample Number คือส่วนที่ใช้กำหนดจำนวนของหัววัดเอ็กซเรย์ กำหนดเป็น 64 128 192 และ 256
2. X-Ray kV คือส่วนที่ใช้กำหนดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการฉายเอ็กซเรย์
3. Initial Offset คือส่วนที่ใช้กำหนดระดับของสัญญาณเริ่มต้น ว่าต้องการค่าเป็นเท่าไร
4. Initial Gain คือส่วนที่ใช้กำหนดอัตราขยาย ว่าต้องการอัตราขยายเท่าไร
5. Option คือส่วนที่ใช้กำหนดการปรับเทียบต่างๆ และกำหนดโหมดการทำงานให้เป็นโหมดการทำงานแบบต่อเนื่อง
6. Acquire Data คือส่วนแสดงผลของข้อมูลในลักษณะของตัวเลข
7. Plot Speed คือส่วนที่ใช้กำหนดความเร็วในการแสดงผลภาพสัญญาณที่จอมอนิเตอร์

8. Acquire และ Stop เป็นปุ่มกดเปิดและปิดการรับส่งข้อมูล
9. File เป็นหน้าต่างสำหรับการเซฟข้อมูลในรูปแบบของ text file อีกทั้งยังเป็นส่วนที่ไว้โหลดข้อมูล และออกจากโปรแกรมอีกด้วย

ในการนำข้อมูลที่ได้จากหน่วยตรวจจับไปทำการสร้างภาพตัดขวางจะเป็นการบันทึกข้อมูลที่ได้ในแต่ละโปรเจกชันและนำไปสร้างภาพตัดขวางโดยใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 7.0 ซึ่งสามารถสร้างภาพตัดขวางให้ตรงตามลักษณะของงานวิจัยที่เป็นการสร้างภาพตัดขวางแบบลำแสงพัดได้

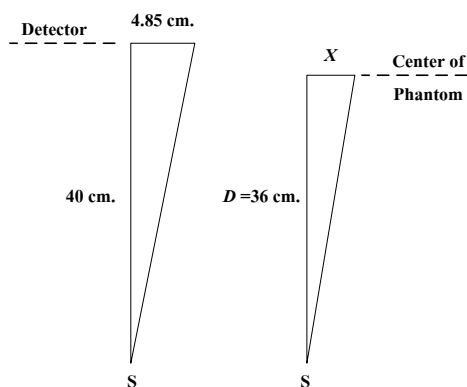
5.4 การคำนวณระยะห่างของอุปกรณ์เพื่อนำไปประมวลผลภาพ

การจัดวางตำแหน่งต่างๆของระบบ จะมีความสำคัญต่อการประมวลผลภาพตัดขวางที่ได้ เนื่องจากระยะห่างระหว่างหลอดเอ็กซเรย์สู่วัตถุจะถูกนำไปคำนวณการประมวลผลภาพตัดขวางโดยใช้ลำแสงแบบพัด ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งต้องกำหนดเป็นระยะในพิกัดของภาพ (pixel) โดยสามารถพิจารณารูปและการคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.15 ระยะที่ต้องทำการคำนวณในหน่วยพิกเซล

จากรูปที่ 5.15 จะเห็นว่า ระยะที่เราต้องการคือ ระยะห่างระหว่างหลอดเอ็กซเรย์กับตำแหน่งศูนย์กลางการหมุน ในที่นี้คือตำแหน่งศูนย์กลางของวัตถุ (D) ในหน่วย พิกเซล (pixel) และระยะห่างระหว่างลำรังสี (Fan Sensor spacing (d)) ในหน่วย พิกเซล (pixel) ซึ่งการคำนวณหาระยะเหล่านี้จะใช้หลักการสามเหลี่ยมคล้าย นั่นคือ



รูปที่ 5.16 ระยะที่ต้องทำการคำนวณเพื่อใช้ในการประมวลผลภาพ

ระยะ D เราสามารถทำการวัดได้ มีค่า 36 ซม. ขณะที่ระยะห่างระหว่างหลอดเอกซเรย์กับหน่วยวัดเอกซเรย์ มีค่า 40 ซม. หน่วยวัดเอกซเรย์มีความยาวทั้งหมด 9.7 ซม. เมื่อนำมาสร้างรูปสามเหลี่ยมมุมฉากก็จะได้สามเหลี่ยมมุมฉาก 2 รูป ดังรูปที่ 5.16 เมื่อทำการเทียบสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ระยะ X

$$\frac{4.85}{40} = \frac{X}{36}$$

$$X = 4.365 \text{ ซม.}$$

เมื่อรู้ระยะ X สามารถนำไปคำนวณหาระยะ d ได้ โดยการหารด้วยจำนวนเส้นของแนวรังสีที่เข้าสู่ตัวตรวจจับเอกซเรย์ ทั้งหมด 64 เส้น จึงนำมาคำนวณทั้งสิ้น 32 เส้น

$$d = \frac{X}{32}$$

$$d = \frac{4.365}{32} = 0.1364 \text{ ซม.}$$

เมื่อเราได้ระยะ D, d แล้วจึงนำมาคำนวณเพื่อเปลี่ยนเป็นหน่วยพิกเซล ดังต่อไปนี้

กำหนดรูปที่สร้างขึ้นมีขนาด 64x64 พิกเซล เนื่องจากให้ตัวตรวจจับเอกซเรย์ 64 ตัว ส่วนนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนตัวตรวจจับเอกซเรย์

64 พิกเซล มีความยาวของหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ 9.7 ซม.

1 พิกเซล จึงมีความยาวของหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ 0.1516 ซม.

ดังนั้น

$$D = \frac{36}{0.1516} \approx 238 \text{ พิกเซล}$$

$$d = \frac{0.1364}{0.1516} \approx 1 \text{ พิกเซล}$$

ค่าที่ได้เหล่านี้จะถูกนำไปสู่การคำนวณเพื่อประมวลผลภาพต่อไป