

การพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องแบบประหยัดโดยใช้เอดีซีชนิดไปป์ไลน์

จตุรภูษ แดงเนียม* สุวิทย์ ปุณณชัยยะ เดโช ทองอร่าม

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์ 0-2218-6781 โทรสาร 0-2218-6780 e-mail : fnespn@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

อุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่อง (MCA) เป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสี ซึ่งในปัจจุบันเครื่องมือวัดรังสีจะออกแบบให้มีขนาดเล็กเพื่อให้สะดวกกับการใช้งานภาคสนาม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องขนาด 4096 ช่องวิเคราะห์ แบบกะทัดรัดและประหยัด โดยประยุกต์ใช้เอดีซีชนิดไปป์ไลน์ (Pipeline ADC) ทำงานร่วมกับระบบส่งข้อมูลชนิดยูเอสบีความเร็วเต็มที่ (Full Speed USB) เชื่อมโยงการทำงานกับไมโครคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมอิมูเลเตอร์ให้ระบบทำงานเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่อง ผลการพัฒนาพบว่าระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลมีความเป็นเชิงเส้นที่ $R^2 = 0.9998$ และพบความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างช่องวิเคราะห์ (DNL) เล็กน้อย ซึ่งสามารถปรับแก้ได้ด้วยวิธีการสไลดิงสเกล (Sliding Scale) ระบบสามารถรับอัตรานับรังสีได้มากกว่า 10 kcps จากการทดลองใช้ MCA ที่พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ 5.9 keV ของดินกัมมันตรังสี Fe-55 ด้วยหัววัดรังสีเอกซ์ (CdZnTe) ให้ผลวิเคราะห์เป็นที่พอใจ

คำสำคัญ : อุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่อง เอดีซีชนิดไปป์ไลน์ ยูเอสบีพอร์ต สเปกตรัมพลังงาน

Development of a Low Cost Multichannel Analyzer using Pipe Line ADC

Jaturaput Dangniam* Suvit Punnachaiya Decho Thong-aram

Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Tel. 0-2218-6781 Fax. 0-2218-6780 e-mail : fnespn@eng.chula.ac.th

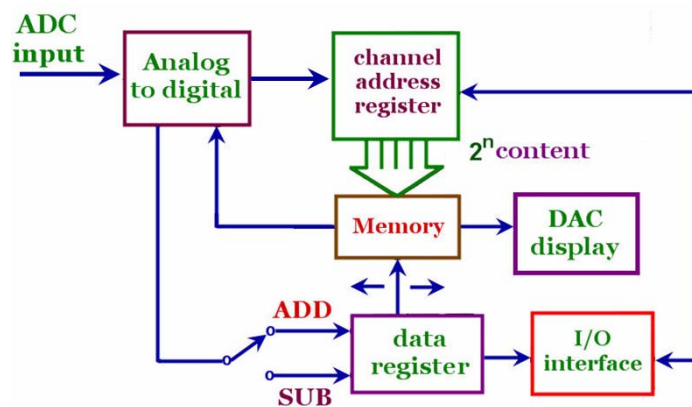
Abstract

An MCA is the most important instrument for nuclear spectrum analysis. Recently, the compact nuclear instrument feature was designed for expediency in the field measurement. Therefore, this research work was aimed to develop a low cost and compact size of 4096 channels MCA. The 12 bit pipeline ADC associated with a full speed USB data interface were applied to cooperate with a microcomputer. The emulating program was also developed for MCA function. The linearity test of pulse height ADC operation was found at $R^2 = 0.9998$ and a slightly differential non-linearity (DNL) was observed. This error could be corrected by sliding scale method. The counting rate of more than 10 kcps could be recorded. The 5.9 keV of Fe-55 energy spectrum analysis using a CdZnTe X-ray detector connected with this developed MCA showed satisfactory results.

Keywords : multichannel analyzer, pipeline ADC, USB port, energy spectrum

บทนำ

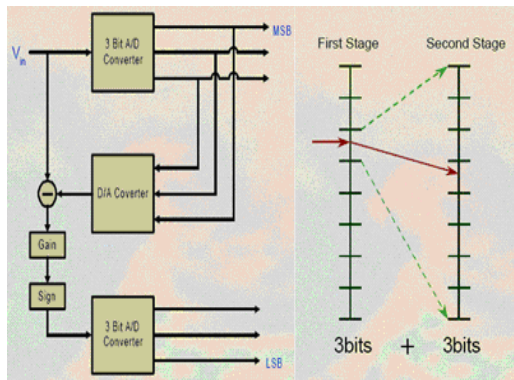
อุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องมีโครงสร้างพื้นฐานดังแผนภาพในรูปที่ 1 ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ คือ วงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) การแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลใน MCA รุ่นเก่านั้นจะใช้เทคนิค Wilkinson ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นสูงแต่มีค่าเวลาในการแปลงสัญญาณขึ้นกับพลังงาน⁽¹⁾ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานสูงจะทำให้มีการสูญเสียอัตรานับสูงด้วย เนื่องจากต้องใช้เวลาการแปลงผันสัญญาณยาวนานตามระดับพลังงาน ต่อมาจึงมีการพัฒนากระบวนการแปลงผันสัญญาณที่มีค่าเวลาในการแปลงผันคงที่ (Fixed-conversion time) ได้แก่ การแปลงผันด้วยเทคนิค Successive Approximation และ Pipeline⁽²⁾ เป็นต้น ปัจจุบันไอซีสำเร็จรูปของวงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ Pipeline ได้มีการพัฒนาให้มีสมรรถนะสูงและเป็นที่นิยมใช้ เพราะมีเวลาในการแปลงผันสัญญาณสั้นและให้ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) สูงขึ้น ประกอบกับเทคนิคการสื่อสารแบบอนุกรมทางพอร์ตแบบยูเอสบี (USB) เป็นที่นิยมในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เนื่องจากให้อัตราการรับส่งข้อมูลสูงกว่าระบบเก่าที่เป็นแบบ RS-232 มาก ด้วยเหตุนี้การนำเทคโนโลยีทั้งสองด้านมาผนวกกันจะสามารถพัฒนาให้อุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องมีขนาดเล็กลงมาก



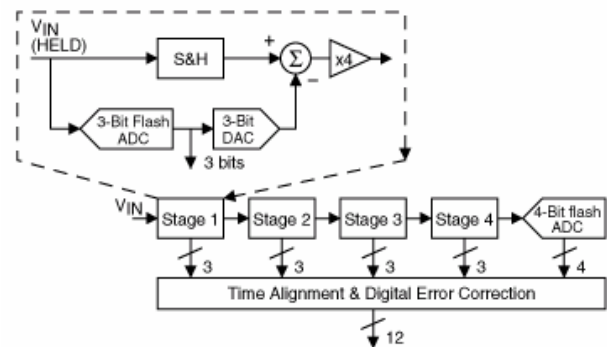
รูปที่ 1 แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่อง

การแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบไปป์ไลน์ อาศัยหลักการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นรหัสเชิงเลขที่พัฒนามาจากพื้นฐานของการแปลงผันแบบแฟลช (Flash ADC) ซึ่งมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงมาก แต่มีข้อเสียที่ต้องมีตัวเปรียบเทียบ (Comparator) จำนวน $2^{\text{bit}} - 1$ ตัว เช่น วงจรขนาด 10 บิต ต้องมีตัวเปรียบเทียบถึง 1,023 ตัว ทำให้สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าสูงและไม่สามารถเพิ่มความ

ละเอียดรหัสเชิงเลขได้เมื่อต้องการความละเอียดมากกว่า 10 บิต ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการแปลงผันสัญญาณแบบไปป์ไลน์โดยนำเฉพาะข้อดีของเทคนิคในการแปลงผันแบบเฟลช มาแบ่งช่วงการทำงานในระดับบิตย่อยต่อเนื่อง (Sub-ranging) เพื่อให้ได้ความละเอียดรหัสเชิงเลขสูงแต่ใช้จำนวนตัวเปรียบเทียบน้อยดังในแผนภาพรูปที่ 2



รูปที่ 2 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล
แบบไปป์ไลน์เบื้องต้น

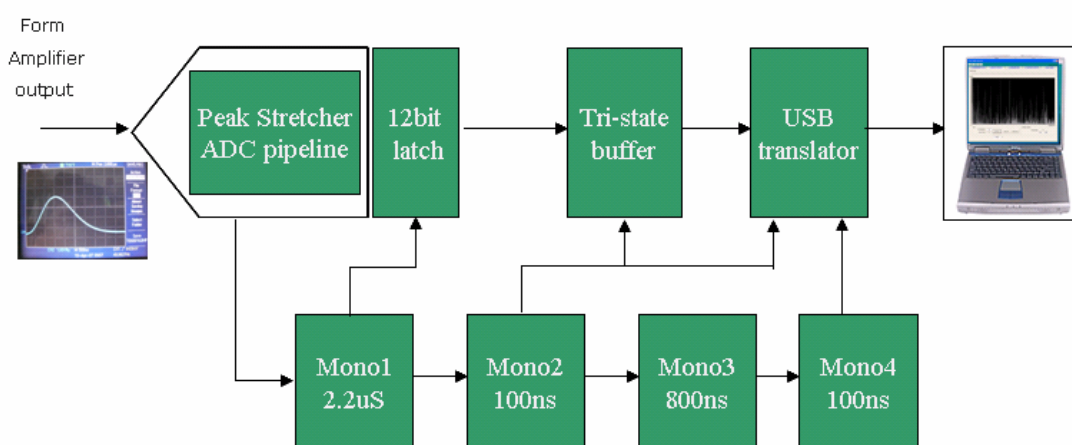


รูปที่ 3 โครงสร้างของเอดีซีแบบไปป์ไลน์
ขนาด 12 บิต⁽³⁾

ในรูปที่ 2 แสดงการแปลงผันสัญญาณแบบไปป์ไลน์ที่ประกอบด้วยเอดีซี (ADC) แบบแฟลช 3 บิต ย่อยต่อเนื่อง 2 สเตจ (Stage) ในสเตจแรกจะแปลงสัญญาณ 3 บิตบน (MSB) เป็นสัญญาณรหัสเชิงเลขขนาด $(2^3) = 8$ ระดับ โดยใช้ตัวเปรียบเทียบ $(2^3 - 1) = 7$ ตัว จากนั้นสัญญาณเชิงเลขที่ถูกแปลงด้วยวงจรดีเอซี (DAC) จะนำไปหักลบกับสัญญาณอินพุต ส่วนของสัญญาณอนาล็อกที่เหลือจะนำมาผ่านวงจรขยายให้ได้สัญญาณเต็มสเกลและส่งให้เอดีซี 3 บิตล่าง (LSB) แปลงเป็นสัญญาณรหัสเชิงเลขต่อขนาด $(2^3) = 8$ ระดับ โดยใช้ตัวเปรียบเทียบอีก 7 ตัว จะเห็นว่าวงจรขนาด 6 บิต จะได้สัญญาณเชิงเลข $8 \times 8 = 64$ ระดับโดยใช้ตัวเปรียบเทียบเพียง $7 + 7 = 14$ ตัว ในแผนภาพรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของเอดีซีแบบไปป์ไลน์ขนาด 12 บิต⁽³⁾ ซึ่งประกอบด้วยชุด 3-bit flash ADC จำนวน 4 สเตจต่อเนื่องกัน แต่ละชุดจัดสัดส่วนอัตราขยายสัญญาณจากอีเอซีที่เหมาะสมเพื่อหักลบสัญญาณอนาล็อกเดิมของแต่ละสเตจตามนัยสำคัญของบิต สัญญาณอนาล็อกที่เหลือจากหลักสุดท้ายจะส่งให้ 4-bit flash ADC เพื่อใช้เป็นข้อมูลปรับแก้ความคลาดเคลื่อนในการแปลงสัญญาณด้วยวงจร Digital Error Correction ดังนั้นเอดีซีแบบไปป์ไลน์จึงเป็นเอดีซีที่มีการแปลงผันสัญญาณสั้นเช่นเดียวกับเอดีซีแบบแฟลชแต่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าน้อย เนื่องจากใช้จำนวนตัวเปรียบเทียบภายในวงจรน้อยกว่ามาก นอกจากนี้ยังมีความเป็นเชิงเส้นสูงกว่า

วิธีการออกแบบและทดสอบ

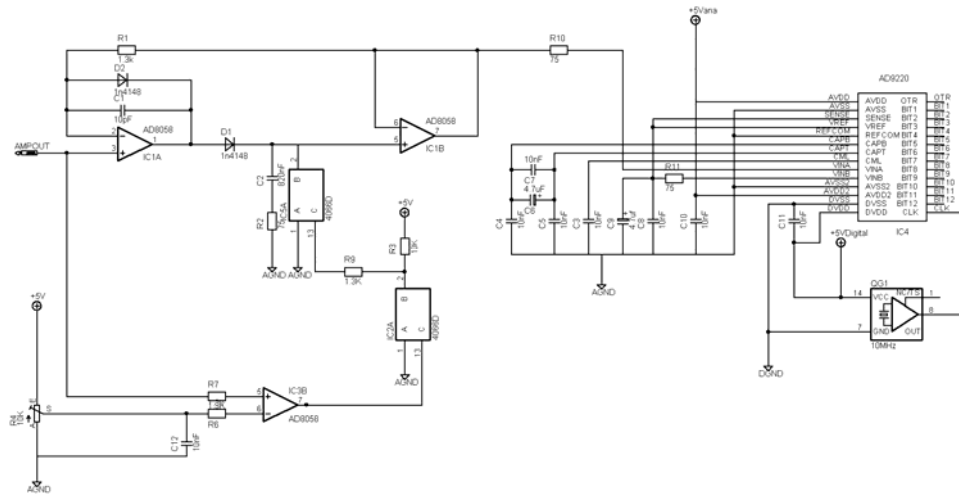
จากหลักการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องสามารถออกแบบระบบแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลแบบไปป์ไลน์ขนาด 12 บิต หรือขนาดช่องวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ 4,096 ช่อง ได้ผังแผนภาพรูปที่ 4 โดยข้อมูลดิจิทัลในรหัสไบนารีที่แปลงได้จะแบ่งออกเป็น 2 ชุด ส่งเข้าไมโครคอมพิวเตอร์ครั้งละ 8 บิต ผ่านทางพอร์ตสื่อสารข้อมูลชนิดอนุกรมมาตรฐานยูเอสบีของไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลข้อมูลและแสดงสเปกตรัมความสูงของพัลส์บนจอภาพ



รูปที่ 4 แผนภาพของอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องที่พัฒนาขึ้น

วงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลแบบไปป์ไลน์ (Pipeline ADC)

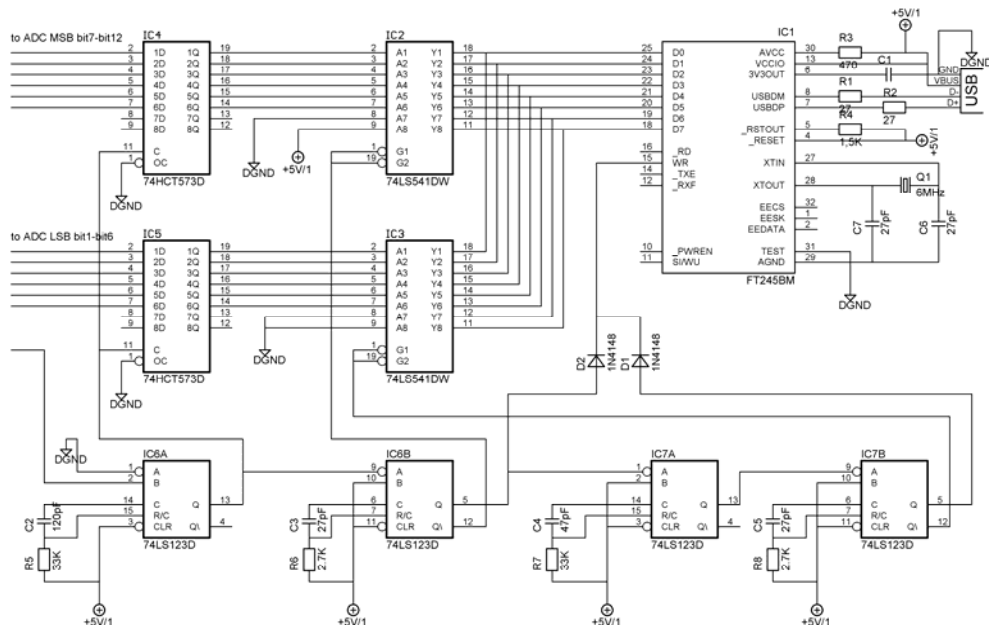
วงจรแปลงผันสัญญาณนี้เลือกใช้ ADC เบอร์ AD9220 ออกแบบให้ทำงานด้วยความถี่ 10 MHz หรือเวลาในการแปลงผัน 100 ns หลังการแปลงสัญญาณ ADC จะใช้สัญญาณนาฬิกา 3 ลูก เพื่อส่งชุดข้อมูลดิจิทัล ทำให้ต้องหน่วงเวลาไป 300 ns หลังจากสัญญาณพัลส์อนาลอกผ่านตำแหน่งสูงสุด จากวงจรที่ออกแบบในรูปที่ 5 ทางด้านอินพุตจะเป็นวงจรตรวจตำแหน่งสูงสุด (IC1) รับสัญญาณพัลส์มาตรวจสอบพิก (Peak) สัญญาณและเก็บค่าแรงดันสูงสุดไว้ที่ C2 เพื่อส่งเข้าเอดิซีไปป์ไลน์ (IC4) แปลงสัญญาณป้อนให้วงจรส่งข้อมูล จากนั้นวงจรตรวจระดับ threshold (IC3B) จะตรวจระดับสัญญาณพัลส์ส่วนหลังที่ลดระดับลงต่ำกว่าระดับที่ตั้งค่าไว้พร้อมเปิดเกตวงจรสวิตช์อนาลอก (IC2A, IC5A) เพื่อรีเซตประจุที่ C2 ก่อนเริ่มวงจรวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ใหม่



รูปที่ 5 วงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลแบบไปป์ไลน์

วงจรส่งข้อมูล ADC ผ่านพอร์ตยูเอสบี

วงจรส่งข้อมูลออกแบบให้ส่งข้อมูล 2 ชุด ครั้งละ 8 บิต ผ่านวงจรแลทช์ (Latch) IC4 และ IC5 โดยแต่ละชุดจะประกอบด้วยข้อมูล ADC จำนวน 6 บิต และบิตตรวจสอบชุดข้อมูล (MSB,LSB) 2 บิต ข้อมูลแต่ละชุดจะถูกคัดเลือกด้วย IC2 และ IC3 ส่งเข้าแปลงรูปแบบการส่งสัญญาณอนุกรมมาตรฐาน USB ด้วยตัวแปลงเบอร์ FT245BM (IC1) จังหะการเคลื่อนข้อมูลจาก ADC ควบคุมด้วยลำดับการทำงานของไมโครสเตเบิล IC6 และ IC7 ดังวงจรในรูปที่ 6 ข้อมูลจะถูกส่งเข้าพอร์ต USB ตามลำดับการติดต่อของโปรแกรม



รูปที่ 6 วงจรส่งข้อมูล ADC ผ่านพอร์ตยูเอสบี

โปรแกรมอิมูเลเตอร์สำหรับระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง

โปรแกรมอิมูเลเตอร์สำหรับระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง ประกอบด้วยโปรแกรมติดต่อข้อมูลทางพอร์ตยูเอสบี และโปรแกรมปรับไมโครคอมพิวเตอร์ให้ทำงานเป็นระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตยูเอสบี เลือกใช้วิธีติดต่อผ่านไครเวอร์เวอร์ซอลคอมพอร์ต (VCP) ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับไอซี FT245BM การทำงานเริ่มเมื่อระบบปฏิบัติการระบุตำแหน่งที่แน่นอนของพอร์ตแล้ว โปรแกรมจะพร้อมรับข้อมูลดิจิทัลจากพอร์ตยูเอสบีได้ จากนั้นโปรแกรมรับข้อมูลทางพอร์ตจะเชื่อมโยงกับโปรแกรมปรับการทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์ให้เป็นระบบวิเคราะห์หลายช่อง

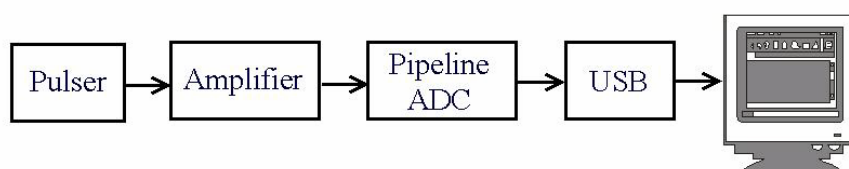
การทดสอบระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

1. ดัชนีกำเนิดรังสี Fe-55
2. หัววัดรังสีเอกซ์ (CdZnTe) พร้อมอุปกรณ์ขยายสัญญาณ Amptex รุ่น XR-100-CZT
3. อุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องที่พัฒนาขึ้นพร้อมโปรแกรมอิมูเลเตอร์
4. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ Tektronix รุ่น 2022
5. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ Canberra รุ่น 807

วิธีการทดสอบ

1. ทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันสัญญาณและวงจรส่งข้อมูล โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 7 ทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ของวงจรแปลงผันสัญญาณด้วยการแปรเปลี่ยนขนาดความสูงของพัลส์และอ่านตำแหน่งช่องวิเคราะห์ที่สัมพันธ์กัน ได้ผลทดสอบตามเส้นกราฟรูปที่ 10 เมื่อใช้เครื่องอ่านรูปสัญญาณตรวจวัดสัญญาณควบคุมการส่งข้อมูลจากวงจรแปลงผันสัญญาณไปยังวงจรส่งข้อมูลหลังสิ้นสุดการแปลงสัญญาณ ให้ผลดังรูปที่ 11.ก และการทดสอบความสามารถในการรับอัตรานับพัลส์ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ให้ผลตอบสนองความถี่สูงสุดดังรูปที่ 11.ข

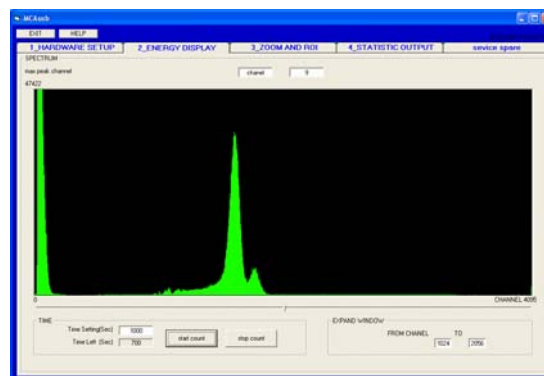


รูปที่ 7 แผนภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบการทำงานของระบบวิเคราะห์หลายช่อง

2. จัดอุปกรณ์ทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสีดังรูปที่ 8 โดยเปลี่ยนการทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์เป็นระบบวิเคราะห์หลายช่องด้วยโปรแกรมอิมูเลเตอร์ที่พัฒนาขึ้น จากนั้นปรับอัตราขยายสัญญาณของระบบวัดรังสีเอกซ์ให้พอเหมาะกับการวิเคราะห์พลังงานในช่วง 0 ถึง 20 keV เพื่อวิเคราะห์พลังงานของรังสีจากต้นกำเนิดรังสี Fe-55 (5.9 keV) เปรียบเทียบกับอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องที่ผลิตจากต่างประเทศได้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 12



รูปที่ 8 การจัดอุปกรณ์วิเคราะห์สเปกตรัมรังสีเอกซ์



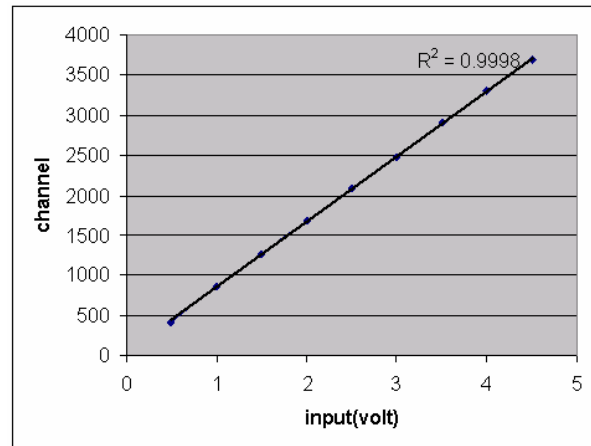
รูปที่ 9 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ (Fe-55) บนจอภาพ

ผลการทดลองและวิจารณ์

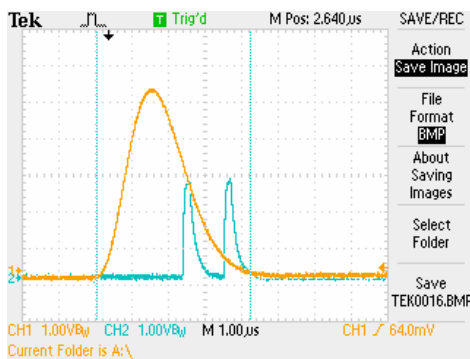
จากผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ในการแปลงผันสัญญาณของวงจรแปลงผันสัญญาณที่ใช้เอ็ดจีแบบไปป์ไลน์ พบว่าให้ความเป็นเชิงเส้นสูงที่ $R^2 = 0.9998$ ดังข้อมูลในตารางที่ 1 และเส้นกราฟรูปที่ 10 การแปลงสัญญาณแต่ละพัลส์ใช้เวลาในการแปลงสัญญาณคงที่สั้นเพียง 100 ns ส่วนความไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Non-Linearity) ที่ปรากฏบนสเปกตรัมพลังงานในรูปที่ 12.ก สามารถแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคสไลด์ิงสเกล (Sliding Scale)⁽⁴⁾ สำหรับผลตรวจสอบรูปสัญญาณของวงจรส่งข้อมูลรหัสเชิงเลขจากวงจรแปลงผันสัญญาณ พบว่าสามารถส่งข้อมูล 2 ชุดได้ภายในคาบเวลาของพัลส์แต่ละลูก ดังผลทดสอบในรูปที่ 11.ก และจากผลทดสอบการตอบสนองอัตรานับพัลส์สูงสุดในรูปที่ 11.ข เห็นได้ว่าระบบสามารถรับอัตรานับรังสีสูงสุดได้ 10,500 cps ผลทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานในรูปที่ 12 พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นให้ผลวิเคราะห์ที่ทัดเทียมกับระบบที่ผลิตจากต่างประเทศ แต่ยังมีสัญญาณรบกวนด้านพลังงานต่ำพอสมควร จำเป็นต้องมีการปรับแก้ด้านเทคนิคเพื่อลดสิ่งรบกวน (Noise) ให้น้อยลง นอกจากนี้การเชื่อมโยงผลวิเคราะห์ผ่านทางโปรแกรม Excel จะช่วยให้นำข้อมูลส่งไปทำงานร่วมกับโปรแกรมที่ใช้ประยุกต์สำหรับการวิเคราะห์เฉพาะด้านต่างๆ ได้โดยสะดวก

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของพัลส์และตำแหน่งช่องวิเคราะห์

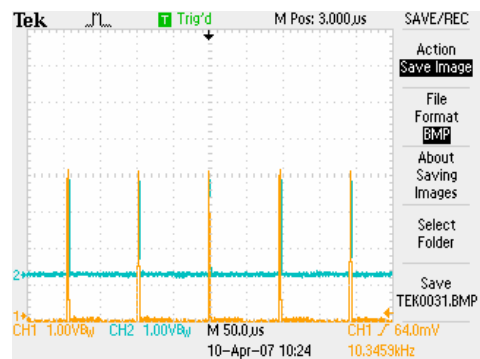
ความสูงของพัลส์ (V)	ช่องวิเคราะห์ที่ พลังงาน	แรงดันเทียบ กลับ (V)
0.5	416	0.5079
1.0	863	1.052
1.5	1270	1.550
2.0	1680	2.051
2.5	2078	2.537
3.0	2473	3.019
3.5	2897	3.537
4.0	3312	4.043
4.5	3698	4.515



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของพัลส์และตำแหน่งช่องวิเคราะห์

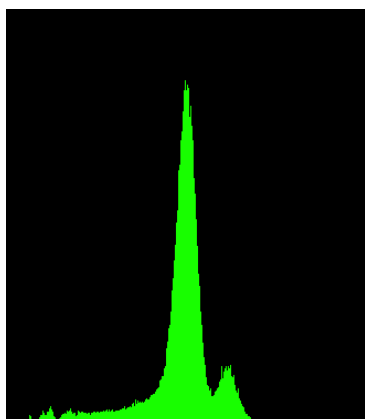


ก. รูปสัญญาณควบคุมการส่งข้อมูล 2 ชุด

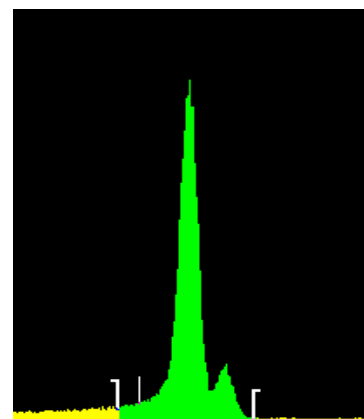


ข. รูปสัญญาณอัตรานับสูงสุดที่วัดได้

รูปที่ 11 ผลทดสอบการแปลงผันสัญญาณและส่งข้อมูลผ่าน USB พอร์ตที่อัตรานับรังสีสูงสุด



ก. ผลวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีเอกซ์ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องที่พัฒนาขึ้น



ข. ผลวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีเอกซ์ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องที่ผลิตจากต่างประเทศ

รูปที่ 12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีเอกซ์จากคันทันกำเนิดรังสี Fe-55

สรุปผล

ระบบแปลงสัญญาณความสูงของพัลส์เป็นสัญญาณเชิงเลข ซึ่งใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลชนิด Pipeline เบอร์ AD9220 สามารถแปลงความสูงของพัลส์ได้ในช่วง 0-5 โวลต์ โดยเวลาแปรผันสัญญาณคงที่มีค่า 100 ns และให้ความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณสูงที่ $R^2 = 0.9998$ อัตราการนับสัญญาณพัลส์สูงสุดในการทำงานร่วมกันระหว่างระบบส่งข้อมูลผ่านพอร์ตยูเอสบี และโปรแกรมการรับข้อมูลอยู่ที่ 10,500 cps ผลการวิจัยพบว่าอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่องที่ใช้ระบบแปลงสัญญาณชนิดไปป์ไลน์สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็ก โดยใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่หาได้ในประเทศเป็นหลัก ทำให้มีราคาประหยัด บำรุงรักษาได้ง่าย สิ่งที่ยังต้องมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบ ได้แก่ การลดสิ่งรบกวน และ DNL ของวงจรแปลงผันสัญญาณ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญการวิเคราะห์และทดสอบวัสดุด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์สำหรับงานทดลองนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Knoll, Glenn F., 2000. Radiation Detection and Measurement. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York , p. 693-694.
2. Allen, Holberg. 2003. CMOS Analog Circuit Design. 2nd ed., Oxford University Press. New York, p. 59-80.
3. <http://dbserv.maxim-ic.com>. Application Note : Understanding Pipeline ADCs.
4. Richard, Sumner, 2002. A Sliding Scale Method to Reduce the Differential Non-Linearity of a Time Digitizer. IEEE, p. 803-806.