บทที่ 2

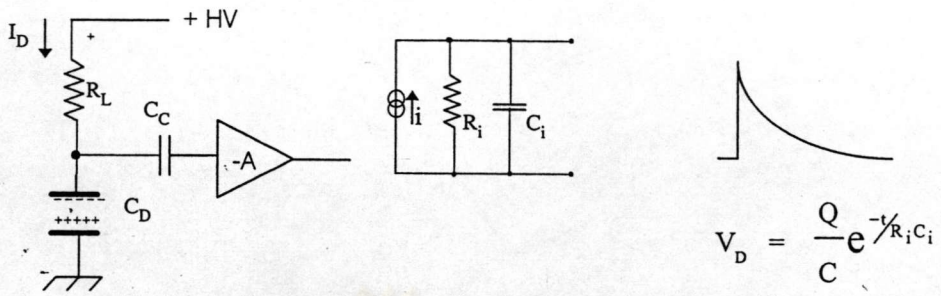
การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์

การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ในกระบวนการทางนิวเคลียร์หมายถึงการวิเคราะห์ระดับพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ที่ได้จากการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี อันตรกิริยาหรือปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ องค์ประกอบสำคัญในการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ ได้แก่ ระบบวัดนิวเคลียร์ส่วนหน้าและระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ โดยกระบวนการวิเคราะห์จะเริ่มที่ระบบวัดนิวเคลียร์ส่วนหน้าทำหน้าที่แปลงพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ที่วัดได้ไปเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดศักดาไฟฟ้าหรือความสูงของพัลส์เป็นสัดส่วนกับพลังงาน จากนั้นระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์จะทำหน้าที่คัดเลือกระดับความสูงของพัลส์ด้วยหลักการเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้า ในแต่ละระดับพลังงานที่เวลาในการคัดเลือกเท่าๆกันทุกระดับความสูง ทำให้ได้สเปกตรัมความสูงของพัลส์หรือสเปกตรัมของพลังงาน การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคระบบเชิงตัวเลขจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมความสูงของพัลส์ได้ครั้งละหลายช่องวัดโดยอาศัยการแปลงความสูงของพัลส์ที่จุดยอดเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข (peak height ADC) ซึ่งต่างจากการแปลงขนาดสัญญาณอนาลอกทั่วไปในเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าจะเป็นการแปลงความสูงของสัญญาณอนาลอกแบบสุ่ม (sampling ADC) ดังนั้นระบบแปลงความสูงของพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลขจึงเป็นระบบแปลงเฉพาะกระบวนการของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 ลักษณะสัญญาณพัลส์

สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์เป็นสัญญาณพัลส์ศักดาที่เกิดจากการสะสมปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดหลังการทำอันตรกิริยาระหว่างรังสีและตัวกลางของหัววัดรังสีบนค่าความจุของหัววัดรังสี อันเป็นกลไกของการเปลี่ยนพลังงานจลน์ของอนุภาคนิวเคลียร์เป็นสัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี วงจรของหัววัดรังสีประกอบด้วย ตัวต้านทานจำกัดกระแส (R_L) ตัวเก็บประจุสำหรับส่งผ่านเฉพาะสัญญาณ (C_C) และแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสำหรับไบอัสหัววัดรังสี ดังแสดงในรูปที่ 2.1



ก. วงจรของหัววัดรังสี ข. วงจรสมมูลย์ ค. สัญญาณพัลส์ที่ได้จากหัวรังสี

รูปที่ 2.1 การเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์

หัววัดรังสีทุกชนิดมีโครงสร้างภายในเทียบเท่าตัวเก็บประจุขนาดเล็กซึ่งแผ่นขั้วแอโนดและแคโทดหลังการไบอัสจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ เมื่อมีอันตรกิริยาของรังสีเกิดขึ้นภายในหัววัดรังสีจึงทำให้หัววัดรังสีมีพฤติกรรมเหมือนแหล่งจ่ายกระแส สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ได้ดังในรูปที่ 2.1 ข. ปริมาณประจุที่สะสมบนค่าความจุจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ศักดาไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานที่ขนานในวงจรสมมูลย์ ดังในรูปที่ 2.1 ค. มีรูปสัญญาณตามสมการ[1]

$$V_D = \frac{Q}{C_i} e^{-t/R_i C_i} \quad \text{.....(2.1)}$$

Q = ประจุที่เกิดหลังการถ่ายโอนพลังงาน

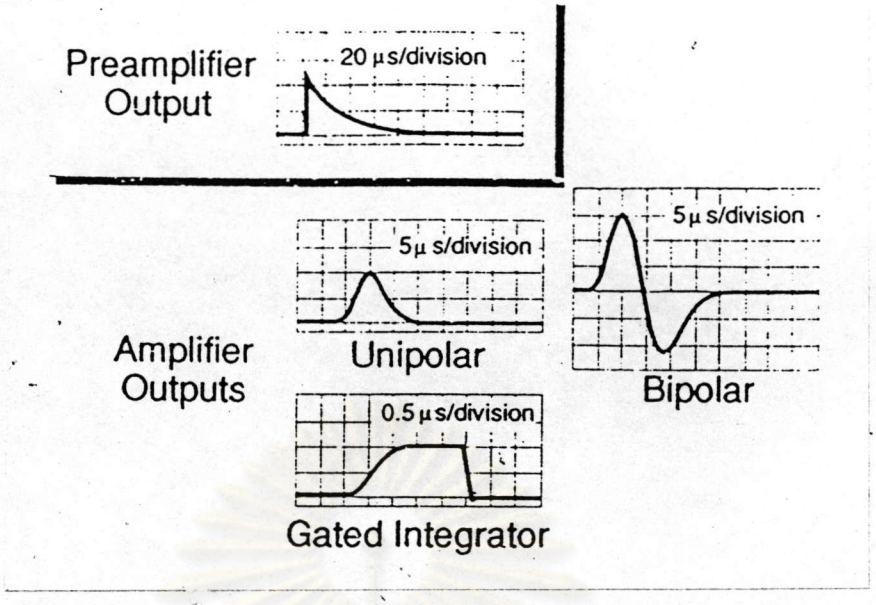
C_i = ค่าความจุในวงจรสมมูลย์

R_i = ค่าความต้านทานในวงจรสมมูลย์

t = เวลาใดๆ

เนื่องจากสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและแฝงไว้ด้วยสิ่งรบกวน ดังนั้นก่อนที่จะนำสัญญาณเข้ากระบวนการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ จึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณพัลส์ให้มีขนาดความสูงของพัลส์อยู่ในมาตรฐานของกระบวนการทางสัญญาณ (0-10 โวลต์) และกรองสิ่งรบกวนออกด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ ผลของการกรองสิ่งรบกวนทำให้รูปสัญญาณ เริ่มต้นหลังวงจรขยายส่วนหน้าได้รับการแต่งรูปสัญญาณให้เปลี่ยนไปมีลักษณะของสัญญาณคล้ายรูประฆังคว่ำ (near Gaussian) มาตรฐานการกรองสิ่งรบกวนที่ใช้ในอุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์หลักจะมีอยู่ 2 รูปแบบ ซึ่งจะให้สัญญาณทางออกแบบ ยูนิโพลาร์และไบโพลาร์ ดังในรูปที่ 2.2

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

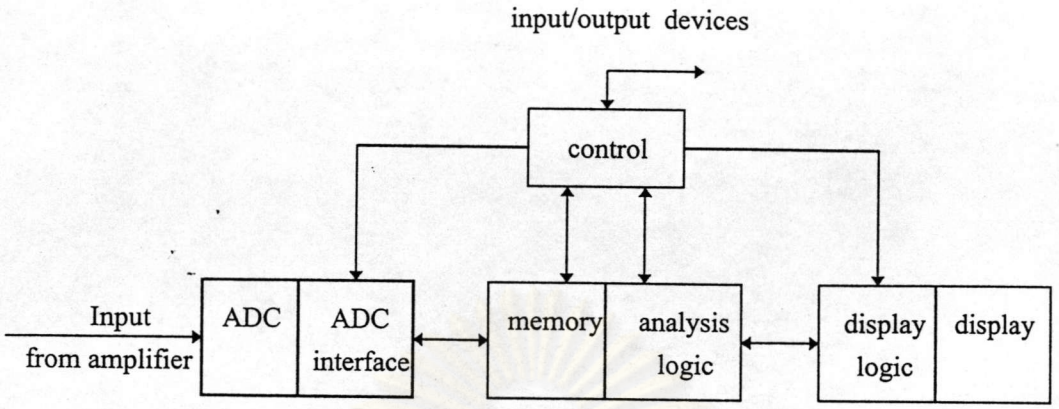


รูปที่ 2.2 รูปสัญญาณพัลส์มาตรฐานแบบต่างๆ [2]

สัญญาณทางออกของอุปกรณ์ขยายสัญญาณยังคงรักษาภาวะของสัญญาณอนาลอกซึ่งคงรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงทางความสูงหรือพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ไว้ที่ค่าสูงสุดของพัลส์ (peak) การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์จะใช้สัญญาณทางออกที่คงรูปการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นนี้เท่านั้น รูปสัญญาณแบบยูโพลาร์จะใช้กับระบบวิเคราะห์ที่มีอัตรานับรังสีต่ำแบบส่งผ่านสัญญาณโดยตรง (direct current coupling) ส่วนรูปสัญญาณแบบไบโพลาร์จะใช้กับระบบวิเคราะห์อัตรานับสูงแบบส่งผ่านสัญญาณกระแสสลับ (alternating current coupling) เพื่อลดผลของการเคลื่อนของฐานสัญญาณ (baseline shift)

2.2 อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบหลายช่อง

เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องเป็นเครื่องมือหลักสำหรับใช้ในการวิเคราะห์พลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ ด้วยกระบวนการแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์จากระบบวัดนิวเคลียร์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข (analog to digital converter) ไปบันทึกในหน่วยความจำที่แชนแนลแอดเดรสปริมาณเชิงตัวเลขที่แปลงได้จะมีค่าแปรผันตามสัดส่วนความสูงของสัญญาณที่วัดได้ และใช้เป็นข้อมูลกำหนดตำแหน่งของหน่วยความจำ ทุกครั้งที่แปลงความสูงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขใดระบบควบคุมจะจัดการรวบรวมข้อมูลที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของหน่วยความจำนั้นทุกครั้ง รูปแบบของการจัดเก็บข้อมูลนี้จะมีลักษณะเป็นฮิสโตแกรมของการกระจายพลังงาน โดยมีความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างจำนวนนับและพลังงาน [dN(E)/dE] แสดงผลเป็นสเปกตรัมนิวเคลียร์ [1]



รูปที่ 2.3 แผนภาพการทำงานเบื้องต้นของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบหลายช่อง

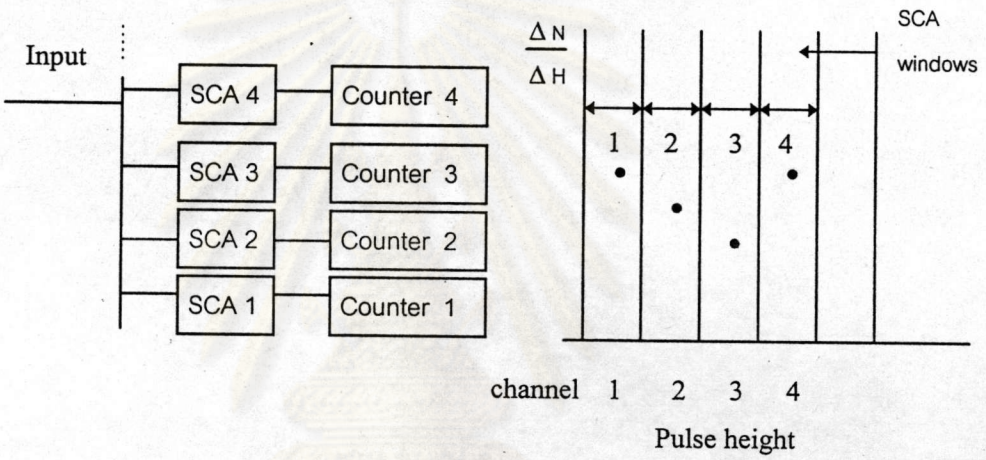
อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องมีส่วนประกอบในการจัดการกระบวนการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ หน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข หน่วยความจำ และหน่วยติดต่อข้อมูลกับอุปกรณ์แสดงผลภายนอกรวมทั้งการแสดงผล ดังในแผนภาพรูปที่ 2.3

หน้าที่ของหน่วยต่างๆในแผนภาพมีดังนี้

ก. หน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข (ADC) เป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณความสูงของพัลส์ ที่มีความสูงเทียบเท่าระดับพลังงานต่างๆของอนุภาคนิวเคลียร์ให้เป็นรหัสเชิงตัวเลข โดยอาศัยการแปลงความสูงของพัลส์เป็นช่วงเวลาและรหัสตัวเลขตามลำดับ รหัสตัวเลขที่ปรากฏบนตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำชั่วคราวหรือแรม (random access memory) จะเป็นค่ากำหนดช่องวิเคราะห์ซึ่งจัดเก็บปริมาณนับอนุภาคนิวเคลียร์โดยการบวกเพิ่มค่าจำนวนที่ความถี่ซ้ำกัน การกระจายของค่ารหัสเชิงตัวเลขจะเป็นไปตามการกระจายของความสูงของพัลส์ หน่วยความจำจะเก็บสะสมปริมาณนับเหล่านั้นและแสดงผลในรูปของสเปกตรัมบนจอภาพในภาคแสดงผล

ข. หน่วยความจำ (memory) ทำหน้าที่บันทึกจำนวนนับอนุภาคนิวเคลียร์ในหน่วยความจำในรูปรหัสเลขฐานสอง (ไบนารี) และมีความจุของแชนแนลแอดเดรสตามค่า 2^n ช่อง ขึ้นอยู่กับช่องวิเคราะห์ของแต่ละเครื่อง จำนวนช่องนี้จะสัมพันธ์กับขีดความสามารถของหน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล เช่น 2^8 , 2^9 , 2^{10},.....เท่ากับ 256 , 512 , 1024 .....ช่อง ลักษณะของการจัดช่องวิเคราะห์พลังงานสามารถเปรียบเทียบได้กับการจัดเรียงแอดเดรสซ้อนกันตั้ง

ขึ้น โดยช่องวัดที่ 1 จะอยู่ล่างสุดเรียงลำดับกันขึ้นมาจนถึงแอดเดรสของหน่วยความจำสูงสุดจะอยู่บนสุด ในแต่ละครั้งที่พัลส์ผ่านวงจรแปลงสัญญาณเข้ามาวงจรวิเคราะห์จะเลือกแอดเดรสของหน่วยความจำที่ตรงกับค่าความสูงของพัลส์ที่เป็นรหัสไบนารีแล้วบวกจำนวนครั้งของพัลส์ที่มีรหัสตรงแอดเดรสช่องใดๆครั้งละ 1 หน่วยนับ หรือเมื่อคำสั่งเป็นการลบก็จะลบเอาจำนวนนับที่มีอยู่เดิมในแอดเดรสที่ตรงกับรหัสของพัลส์ออก 1 หน่วยนับ ลักษณะการทำงานที่กล่าวมานี้สามารถเปรียบเทียบได้กับการซ้อนวงจรวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดียว (Single Channel Analyser) ดังรูปที่ 2.4



[3] , [4]

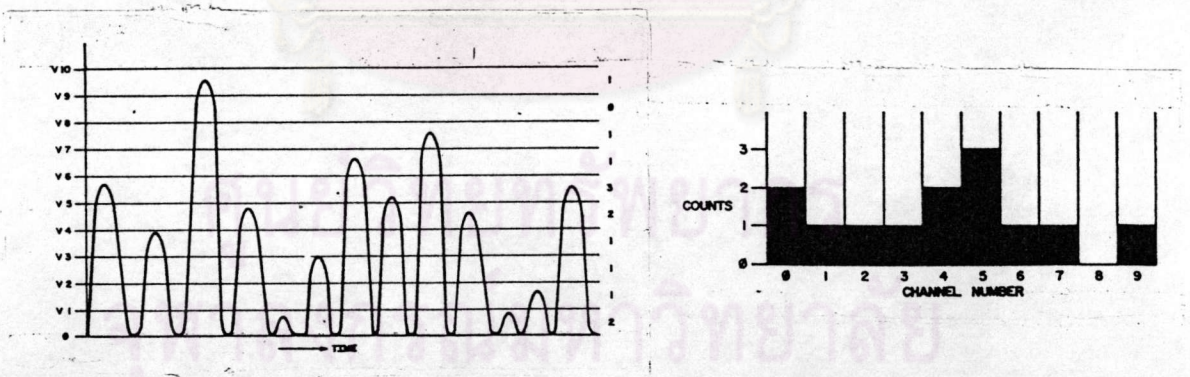
รูปที่ 2.4 การจัดเรียงซ้อนชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดียว

ค. หน่วยแสดงผล (display) ทำหน้าที่แสดงผลของข้อมูลที่บันทึกได้ในหน่วยความจำบนจอภาพด้วยการส่งรหัสเชิงตัวเลขในหน่วยความจำที่แอดเดรสต่างๆ ผ่านวงจรแปลงสัญญาณเชิงตัวเลขเป็นสัญญาณอนาลอก (DAC) ในรูปของสเปกตรัมผ่านส่วนเชื่อมโยงสัญญาณกับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่สื่อสารเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์ภายนอกเช่น เครื่องพิมพ์ เครื่องเขียนกราฟ คีย์บอร์ด เป็นต้น ส่วนเชื่อมโยงนี้จะติดต่อกับหน่วยความจำในอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องเพื่อทำหน้าที่ประสานการส่งข้อมูลเข้าและรับข้อมูลออก

2.3 การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ (Pulse Height Analysis, PHA) ของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบหลายช่อง เริ่มจากขบวนสัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีผ่านส่วนขยายสัญญาณหลักส่งเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์ โดยพัลส์เหล่านี้จะมีความสูงต่างๆกันเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีตกกระทบ (incident radiation) ที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานของรังสีในหัววัดรังสี เครื่องวิเคราะห์จะวัดพลังงานโดยการนับวัดจำนวนการเกิดพัลส์แต่ละความสูงแล้วสร้างเป็นรูปกราฟฮีสโตรแกรม

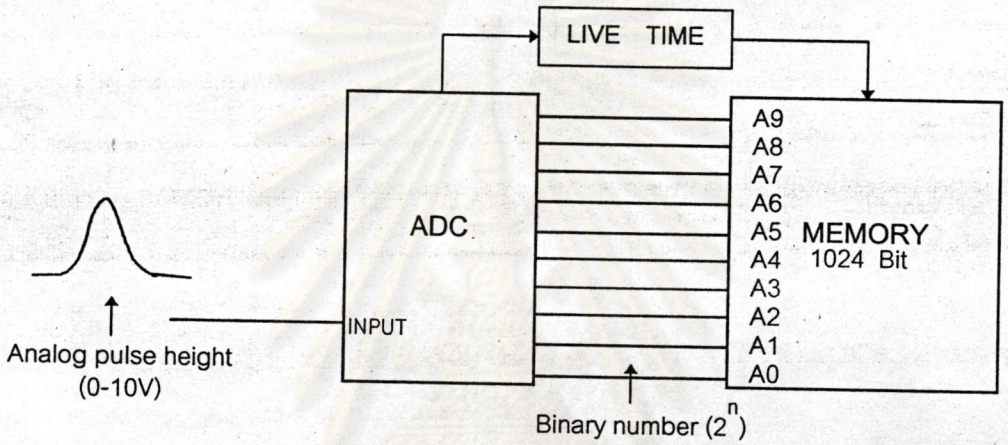
การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การวิเคราะห์การกระจายความสูงของพัลส์เนื่องจากรูปแบบของการวิเคราะห์นี้คือ สัญญาณพัลส์ทางเข้าจะถูกจำแนกตามขนาดศักดาไฟฟ้า (voltage amplitude) เปลี่ยนให้เป็นรูปกราฟฮีสโตรแกรมที่แสดงถึงความถี่ของการเกิดความสูงของพัลส์ที่ระดับต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยอุปกรณ์วิเคราะห์ตัวอย่างนี้มีความละเอียดช่องวิเคราะห์ 10 ช่อง



ก. พัลส์ศักดาไฟฟ้าเข้า ข. ฮีสโตรแกรมของการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์

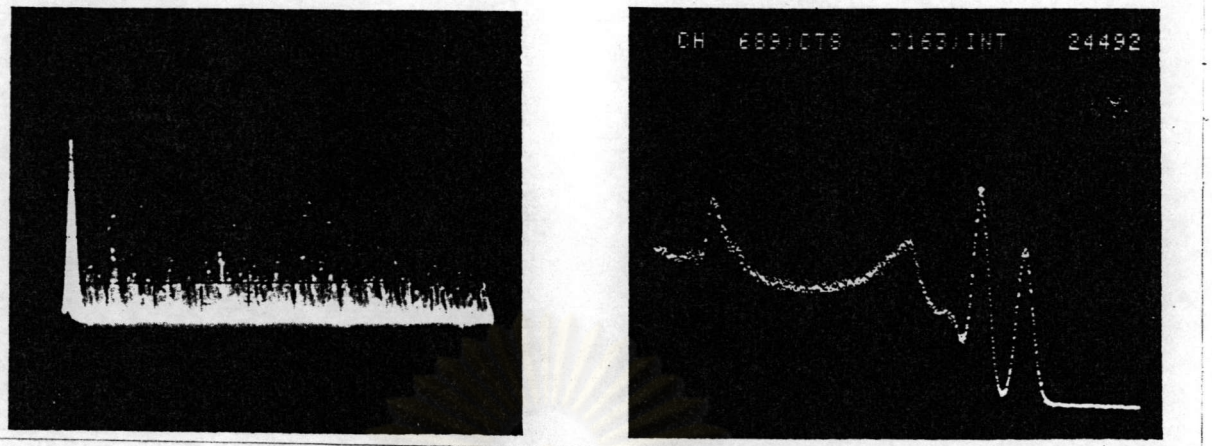
รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์ความสูงพัลส์ [5]

ระบบวัดนิวเคลียร์ที่จะให้ความสูงของพัลส์ศักดาไฟฟ้าทางออกเป็นสัดส่วนกับพลังงานนั้นจะต้องเป็นระบบวัดนิวเคลียร์ที่ใช้กับหัววัดรังสีที่สามารถแจกแจงพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ที่ตกกระทบหัววัดรังสีได้ เช่น หัววัดซินทิลเลชันชนิดโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) [NaI(Tl)] หัววัดรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนล (proportional counter) และหัววัดรังสีประเภทกึ่งตัวนำ ได้แก่ Ge(Li) , Si(Li) , HPGe เป็นต้น สัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีเมื่อผ่านอุปกรณ์ขยายส่วนหน้าและอุปกรณ์ขยายหลักจะได้สัญญาณพัลส์พลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์อยู่ในรูปการกระจายความสูงของพัลส์



รูปที่ 2.6 แผนภาพส่วนประกอบการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ [5]

เมื่อวัดรังสีแกมมาจากไอโซโทปรังสีโคบอลต์-60 ด้วยหัววัดรังสีชนิดโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ผ่านระบบวัดนิวเคลียร์จะได้การกระจายความสูงของพัลส์ดังในรูปที่ 2.7 ก. ถ้านำสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 2.7 ก. มาวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ด้วยระบบวิเคราะห์ซึ่งมีโครงสร้างดังในรูปที่ 2.6 มีความละเอียดของช่องวิเคราะห์ 10 บิต หรือ 1024 ช่องวิเคราะห์ จะได้สเปกตรัมการกระจายพลังงานของโคบอลต์-60 ดังในรูปที่ 2.7 ข. ให้รายละเอียดของการแจกแจงรูปสเปกตรัมเด่นชัดกว่าระบบวิเคราะห์ความสูงแบบ 10 ช่องมาก อย่างไรก็ตามความละเอียดของช่องวิเคราะห์ของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องจะออกแบบให้ละเอียดเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการแจกแจงพลังงาน (energy resolution) ของหัววัดรังสีด้วย เช่น ถ้าระบบวิเคราะห์ใช้กับหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ความละเอียดช่องวิเคราะห์ 1024 ช่องนั้นเพียงพอแล้ว แต่ถ้าใช้หัววัด HPGe หรือ Si(Li) ความละเอียดช่องวิเคราะห์จะต้องมากกว่า 2048 ช่อง ในกรณีที่เครื่องวิเคราะห์มีความจุของช่องวิเคราะห์สูงสามารถแบ่งกลุ่มของช่องวิเคราะห์ให้วิเคราะห์สเปกตรัมหลายสเปกตรัมได้ ในช่องวิเคราะห์แต่ละช่องมักจะออกแบบให้สามารถจุข้อมูลนับรังสีได้ 10^6 - 1 ครั้ง ขึ้นไป



ก. ภาพของสัญญาณทางออกจากหัววัดบนจอแคโทดเรย์ ข. ภาพที่ปรากฏบนส่วนแสดงผลของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

รูปที่ 2.7 การเกิดสเปกตรัมของพลังงาน [5]

2.4 วงจรแปลงสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขเป็นวงจรที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ เนื่องจากเป็นหน่วยแปลงผันความสูงของพัลส์ให้เป็นรหัสเชิงตัวเลขของช่องวิเคราะห์บนหน่วยความจำ คุณสมบัติของวงจรแปลงสัญญาณนี้กำหนดด้วย

ก. ความเร็วในการแปลงผันสัญญาณ (conversion time)

ข. ความเป็นเชิงเส้นของการแปลงสัญญาณหรือความเที่ยงตรงในการสร้างสัญญาณเชิงตัวเลขให้ได้สัดส่วนกับสัญญาณพัลส์ทางเข้า (linearity)

ค. ความละเอียดในการแจกแจงสัญญาณของการแปลงสัญญาณ (resolution) ในช่องวิเคราะห์หรือความละเอียดในสเกลเชิงตัวเลขที่สัมพันธ์กับความสูงของพัลส์

การกำหนดศักดาไฟฟ้าให้สอดคล้องกับช่องวิเคราะห์สัญญาณขึ้นอยู่กับความต้องการแต่วงจรแปลงสัญญาณที่ใช้ ในระบบวัดนิวเคลียร์ความละเอียดช่องวิเคราะห์ออกแบบให้มีความสัมพันธ์กับศักดาไฟฟ้า 0 ถึง 10 โวลต์ ดังนั้นถ้า conversion gain เท่ากับ 2048 ช่อง ศักดาไฟฟ้า 0 ถึง 10 โวลต์ของวงจรแปลงสัญญาณจะแปลงสัญญาณพัลส์ 10 โวลต์ ไว้ที่ช่องที่ 2048

หรือถ้า conversion gain เท่ากับ 512 จะแปลงสัญญาณพัลส์ 10 โวลต์ ไว้ที่ช่องที่ 512 เป็นต้น ความละเอียดของการแจกแจงสัญญาณมากจะต้องมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูง

วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขในเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง เป็นวงจรแปลงค่าความสูงเฉพาะส่วนพีคของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ -

1. วงจรแบบลิเนียร์แรมพ์ (linear ramp conversion) หรือ แบบวิลคินสัน
2. วงจรแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน
3. วงจรแปลงสัญญาณแบบ Flash ซึ่งใช้เทคนิคการอ่านค่าในตาราง (Look Up Table, LUT)

วงจรแบบวิลคินสันค่าเวลาการแปลงผันสัญญาณจะขึ้นกับระดับพลังงานไม่คงที่แต่จะมีความเป็นเชิงเส้น (linearity) ในการแปลงสัญญาณสูง นิยมใช้กับเครื่องวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบหลายช่องที่ทำงานด้วยตนเอง (stand alone) สำหรับวงจรแปลงสัญญาณใน 2 แบบหลังค่าเวลาการแปลงผันสัญญาณจะคงที่แต่มีข้อเสียที่การแปลงผันไม่ค่อยมีความเป็นเชิงเส้น ต้องมีการรวมค่าตัวประกอบความคลาดเคลื่อนทางสถิติระหว่างการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงคุณภาพความเป็นเชิงเส้นจึงเหมาะกับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องที่ทำงานบนไมโครคอมพิวเตอร์

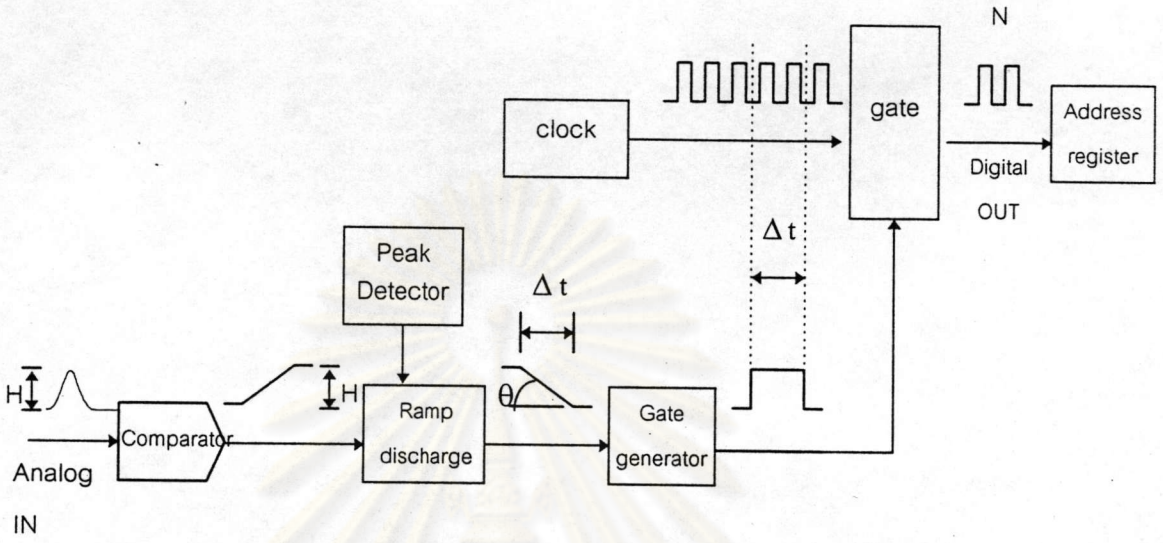
2.4.1 วงจรแบบวิลคินสัน

วงจรแบบวิลคินสันเป็นวงจรแปลงความสูงของพัลส์โดยใช้หลักการเก็บประจุจนมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับความสูงของพีคของสัญญาณพัลส์แล้วจึงคายประจุแบบสัดส่วนเชิงเส้นด้วยวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ เป็นการสร้างคาบเวลาในการเปิดเกต (Δt) ของสัญญาณนาฬิกาความถี่สูง คาบเวลานี้จะเป็นสัดส่วนกับความสูงของพัลส์และจำนวนลูกของสัญญาณนาฬิกา

$$N \propto H \propto \Delta t$$

รูปที่ 2.8 เป็นโครงสร้างของวงจรวิลคินสัน ประกอบด้วย วงจรตรวจสอบความสูงของพัลส์ วงจรสร้างสัญญาณแรมพ์จากการคายประจุ วงจรสร้างคาบเวลาเปิดเกต วงจรเกต วงจร

กำเนิดความถี่สัญญาณนาฬิกาควบคุมด้วยผลึก (crystal-controlled clock) และวงจรนับไบนารีในส่วนของแอดเดรสรีจีสเตอร์ (address register)



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแบบวิลคินสัน

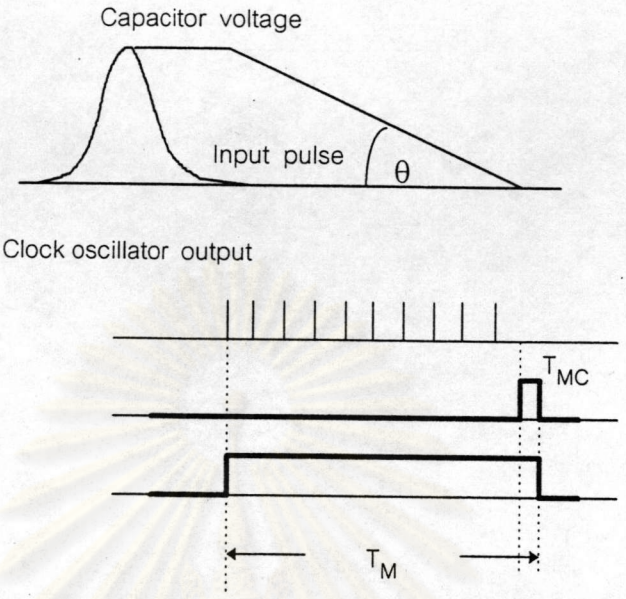
ขั้นตอนการทำงานที่แสดงในรูป 2.8 เป็นดังนี้

1. ในขณะที่วงจรทางเข้าเริ่มตรวจวัดสัญญาณอนาลอกที่เพิ่มสูงขึ้น จะมีการเก็บประจุเพิ่มขึ้น โดยประจุในตัวเก็บประจุจะเป็นสัดส่วนกับความสูงของพัลส์ (H)

2. เมื่อวงจรตรวจสอบความสูงของพัลส์พบค่าพีคตัวเก็บประจุจะเริ่มคายประจุด้วยอัตราลดคงที่จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าคงที่และสร้างสัญญาณศักดาไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น (linear ramp) โดย มุม θ มีค่าคงที่และเป็นอิสระจากความสูงพัลส์ ดังนั้นช่วงเวลาในการคายประจุ (Δt) จึงมีความเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความสูงของพัลส์

3. วงจรเกตจะสร้างคาบเวลาจากสัญญาณแรมพ์ที่เริ่มลดลงจนกระทั่งถึงเส้นฐานสัญญาณ ดังนั้นความกว้างของสัญญาณเกตจึงมีค่าเท่ากับ Δt

4. คาบเวลานี้ใช้เป็นตัวเปิดปิดเกตให้วงจรนับไบนารีสร้างรหัสเชิงตัวเลขเป็นค่ากำหนดแอดเดรสในหน่วยความจำ ดังนั้นแชนแนลแอดเดรสจะเป็นสัดส่วนกับความสูงของพัลส์ทางเข้า



รูปที่ 2.9 รูปสัญญาณแสดงหลักการแปลงรหัสในวงจรแบบวิลคินสัน วิธีการคายประจุแบบเชิงเส้น (linear discharge) [6]

คาบเวลาในการแปลงสัญญาณจะถูกควบคุมโดยวงจรคายประจุแบบเชิงเส้นและความถี่ของสัญญาณนาฬิกา เวลาของสัญญาณนาฬิกาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของพัลส์ที่สะสมในช่องแอดเดรสนั้น ดังนั้นพัลส์ที่มีขนาดใหญ่เวลาในการแปลงสัญญาณจะมากกว่าของพัลส์ที่มีขนาดเล็ก คาบเวลาในการแปลงสัญญาณหาได้จาก

$$T_M = \left(N_C / f_C \right) + T_{MC} \quad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ T_M = คาบเวลาในการแปลงผันสัญญาณ

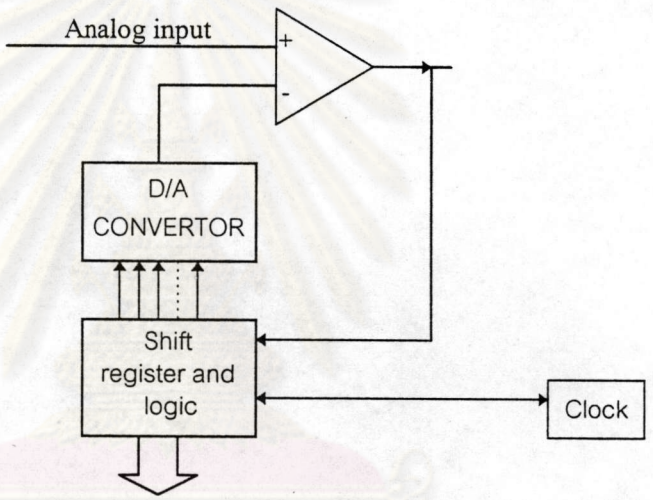
N_C = ตำแหน่งช่องวิเคราะห์

f_C = ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา

T_{MC} = ช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลนับ

2.4.2 วงจรแปลงสัญญาณแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน

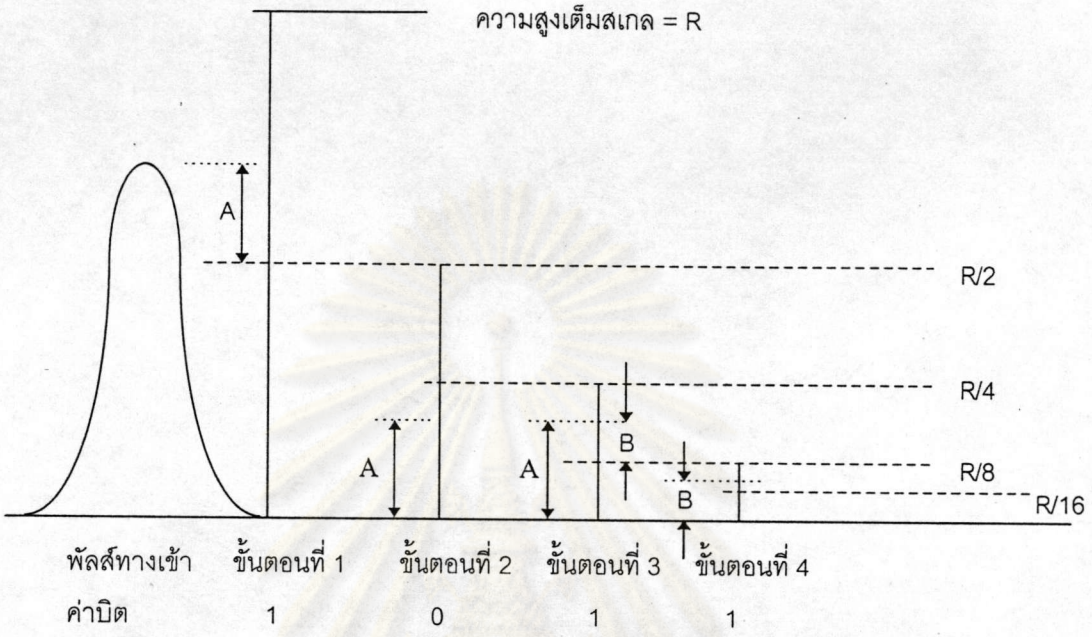
วงจรแปลงสัญญาณความสูงของพัลส์วิธีนี้เป็นการประยุกต์การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขด้วยวิธีประมาณค่าเปรียบเทียบ หรือ ซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน (successive approximation) มาใช้แทนการสร้างคาบเวลาในวงจรแปลงสัญญาณแบบวิลคินสันมีผลให้คาบเวลาในการแปลงผันคงที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน เนื่องจากหลักการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชันอาศัยการประมาณค่าด้วยการเลื่อนข้อมูลเปรียบเทียบค่าอ้างอิงไบนารีจำนวนครั้งเท่ากันไม่ว่าจะมีขนาดสัญญาณเท่าใด จึงใช้เวลาการแปลงผันคงที่



รูปที่ 2.10 แผนภาพวงจรแปลงสัญญาณแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน [3]

รูป 2.10 เป็นแผนภาพของวงจรแปลงสัญญาณแบบประมาณค่า ซึ่งประกอบด้วย วงจรเปรียบเทียบขนาดศักดาไฟฟ้ากับระดับอ้างอิงไบนารี วงจรแปลงรหัสเชิงตัวเลขเป็นขนาดศักดาไฟฟ้า วงจรเลื่อนข้อมูล มีวิธีการแปลงสัญญาณตามขั้นตอนในรูปที่ 2.11 โดยขั้นแรกตัวเปรียบเทียบจะทำหน้าที่เลือกความสูงของพัลส์ว่าอยู่ในส่วนของครึ่งบนหรือครึ่งล่างของค่าเต็มสเกล (R) ถ้าอยู่ในส่วนของครึ่งล่างวงจรเปรียบเทียบจะให้ค่าเป็น 0 ในบิตแรกและสัญญาณที่อยู่ในส่วนของครึ่งบนวงจรเปรียบเทียบจะให้ค่าเป็น 1 ในบิตแรก ในขณะเดียวกันวงจรภายในจะลบค่าความสูงของพัลส์ลงครึ่งหนึ่งแล้วส่งสัญญาณส่วนที่เหลือไปเปรียบเทียบในบิตต่อไป โดยการเปรียบเทียบทำนองเดียวกับบิตแรกกล่าวคือถ้าสัญญาณที่เหลือจากการลบค่าความสูงอยู่ในช่วงครึ่งล่างของสเกล R/2 วงจรเปรียบเทียบจะให้ค่าเป็น 0 ถ้าอยู่ในครึ่งบนจะให้ค่าเป็น 1 ในบิตที่สอง จากนั้นก็ลบค่าความสูงของพัลส์ในช่วงที่สองออกครึ่งหนึ่งแล้วส่งไปเปรียบเทียบในบิตที่ 3 ต่อ โดยทำเหมือน

กับในสองบิตแรก ถ้าขั้นตอนมี 10 ขั้นตอนก็จะมีเอาท์พุท 10 บิต ซึ่งหมายถึงความละเอียดในการแปลงสัญญาณมีค่าเป็น 2^{10} หรือ กำหนดแอดเดรสได้ 1024 ช่องนับ



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการทำงานของเอดีซีแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน 4 ขั้นตอน

ตัวอย่างการทำงานของซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน ขนาด 4 บิต มีค่าเต็มสเกลในการวัดสัญญาณเชิงอนาลอกขนาด 1 โวลต์ ศักดาไฟฟ้าแต่ละบิตมีค่าดังนี้

BIT 1 (MSB) = 0.5 โวลต์

BIT 2 = 0.25 โวลต์

BIT 3 = 0.125 โวลต์

BIT 4 (LSB) = 0.0625 โวลต์

ในกรณีนี้กำหนดให้ขนาดสัญญาณอนาลอกทางเข้ามีค่าเป็น 0.72 โวลต์

การทำงานของวงจรจะแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เมื่อป้อนสัญญาณทางเข้ามาในวงจรจะถูกเปรียบเทียบกับค่าครึ่งสเกล 0.5 โวลต์ โดยการเปรียบเทียบศักดาอ้างอิงและพิจารณาว่าสัญญาณทางเข้าอยู่ในช่วง 0-0.5 โวลต์ หรือ 0.5-1 โวลต์ แล้วจึงตัดสินใจว่า MSB (Most Significant Bit) เป็นลอจิก 0 หรือ 1 ซึ่งค่าศักดาอ้างอิงที่ขาลบของตัวเปรียบเทียบศักดาจากการแปลงค่าของ DAC จะเป็น 0.5 โวลต์ เทียบกับสัญญาณเชิงตัวเลขทำให้ได้ค่าเป็น 1000 ดังนั้นผลของศักดาทางออกที่ตัวเปรียบเทียบศักดาคือ 1

ขั้นตอนที่ 2 ในขั้นนี้จะเปรียบเทียบศักดาทางเข้าที่ถูกลบค่าออกครึ่งหนึ่งว่าอยู่ในช่วง 0.5-0.75 โวลต์ หรือ 0.75-1 โวลต์ หรือไม่ การตัดสินใจว่าจะเป็น 0 หรือ 1 ขึ้นอยู่กับวงจรศักดาอ้างอิงซึ่งศักดาอ้างอิง 0.75 โวลต์ (มีค่าเทียบเท่ารหัสเชิงตัวเลข 1100) เป็นศักดาอ้างอิงที่ตัวเปรียบเทียบ เนื่องจากที่ศักดาทางเข้าน้อยกว่า 0.75 โวลต์ ดังนั้นศักดาทางออกจึงอยู่ในช่วง 0.5-0.75 โวลต์ ทำให้ศักดาทางออกของตัวเปรียบเทียบเป็น 0

ขั้นตอนที่ 3 เปรียบเทียบสัญญาณว่าอยู่ในช่วง 0.5-0.625 โวลต์ หรือ 0.625-0.75 โวลต์ เมื่อศักดาอ้างอิงหรือค่าครึ่งสเกลคือ 0.625 โวลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับรหัสเชิงตัวเลขคือ 1010 ผลจากการเปรียบเทียบศักดาเป็น 1 เนื่องจากศักดาทางเข้าอยู่ในช่วง 0.625-0.75 โวลต์

ขั้นตอนที่ 4 เปรียบเทียบศักดาไฟฟ้าที่ถูกลบค่าออกครึ่งหนึ่งว่าอยู่ในช่วง 0.625-0.6875 หรือ 0.6875-0.75 โวลต์ เมื่อศักดาอ้างอิงหรือค่าครึ่งสเกลคือ 0.6875 มีความสัมพันธ์กับรหัสเชิงตัวเลข 1011 จากการเปรียบเทียบศักดาจะอยู่ในช่วง 0.6875-0.75 โวลต์ ทำให้ศักดาทางออกของตัวเปรียบเทียบเป็น 1 ดังนั้นบิตที่ 4 หรือ LSB (Least Significant Bit) เป็น 1

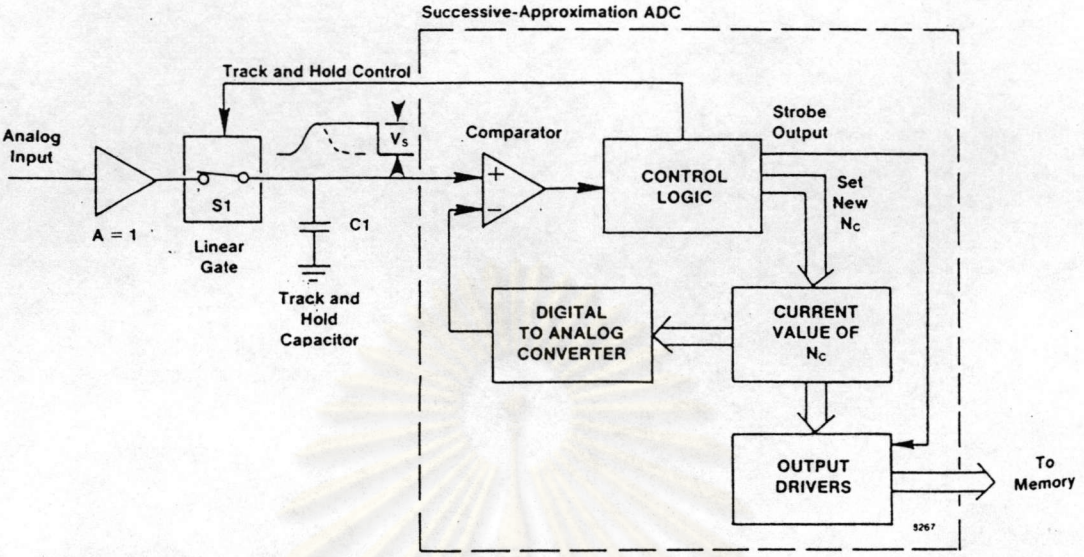
ค่าการแปลงรหัสเชิงเลขของซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน 4 บิต แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงขั้นตอนและผลของการทำงานของซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน 4 บิต

Stage	D/A Input	Com. Ref.	Comparator Output	Decision
1	1000	0.5 V	1	MSB = 1
2	1100	0.75 V	0	2^{nd} Bit = 0
3	1010	0.625 V	1	3^{rd} Bit = 1
4	1011	0.6875 V	1	LSB = 1

การพิจารณาว่าวงจรแปลงสัญญาณมีขนาด N บิต ต้องพิจารณาถึงสิ่งต่างๆดังนี้

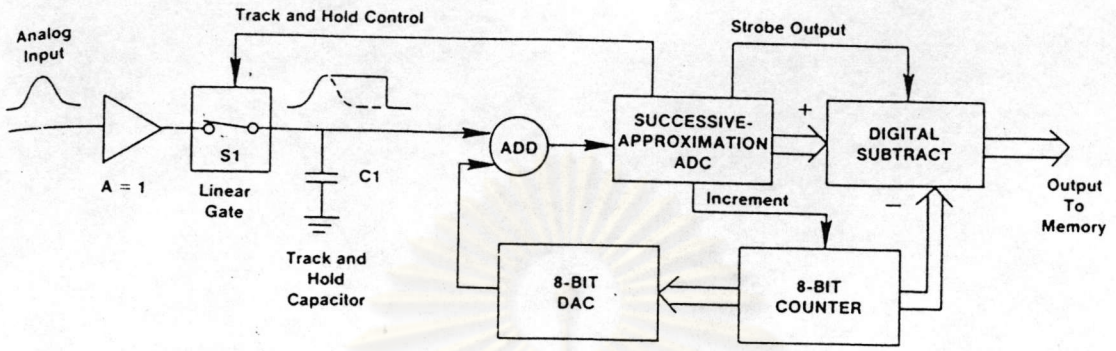
1. ต้องมีขั้นตอนการเปรียบเทียบสัญญาณอนาลอก N ขั้น
2. MSB จะเป็นขั้นตอนแรกในการพิจารณาเสมอ
3. LSB จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการพิจารณา
4. คาบเวลาในการแปลงสัญญาณสำหรับ N บิต ต้องเท่ากับค่าคาบเวลา N clock
5. คาบเวลาของการแปลงสัญญาณต้องคงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับขนาดศักดาทางเข้า



รูปที่ 2.12 แผนภาพวงจรแปลงความสูงของพัลส์แบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชัน [7]

วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชันนำมาประยุกต์ในการวงจรแปลงสัญญาณพัลส์แบบคาบเวลาการแปลงผันคงที่ได้ดังในแผนภาพรูปที่ 2.12 เมื่อสัญญาณพัลส์ทางเข้าถึงตำแหน่งพีคจะถูกจับไว้ที่ตัวเก็บประจุ และค่าความสูงจะได้รับการแปลงเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขด้วยวงจรแปลงสัญญาณแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชันสร้างเป็นค่าของตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำที่เป็นสัดส่วนกับความสูงของพัลส์ เมื่อสิ้นสุดการทำงานแต่ละครั้งจะคายประจุที่ C1 ทิ้ง แล้วเริ่มวงรอบใหม่ด้วยคาบเวลาแปลงผันคงที่ทุกครั้ง

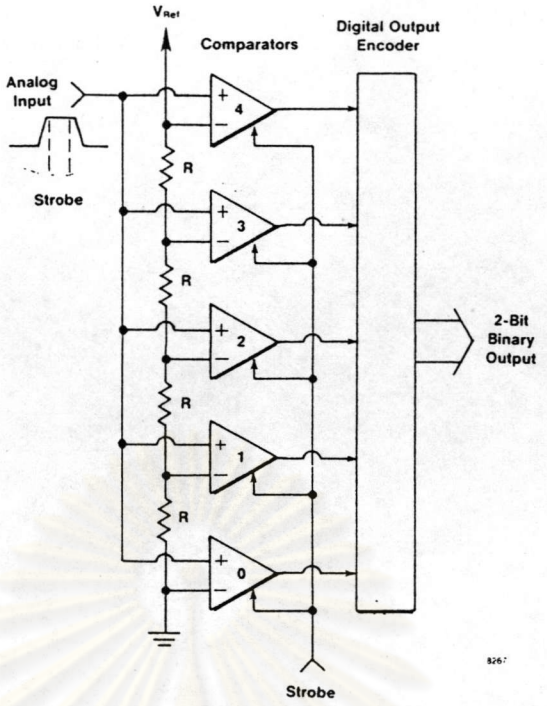
แต่เนื่องจากการประมาณค่าของการทำงานในวงจรซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชันทำให้ค่าเชิงตัวเลขในการแปลงไม่เป็นเชิงเส้นจากการปัดเศษเหลือ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงการทำงานให้ความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีผลต่อความผิดพลาดของสเปกตรัมพลังงานลดลง โดยเพิ่มระบบปรับค่าเชิงเส้น (sliding scale linearization) ขึ้นในวงจร ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.13 มีผลให้ความไม่เป็นเชิงเส้นลดลงน้อยกว่า 1 เปอร์เซนต์ [7]



รูปที่ 2 .13 แผนภาพวงจรแปลงความสูงของพัลส์แบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชันความไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล [7]

2.4.3 วงจรแปลงสัญญาณแบบแฟลช (Flash)

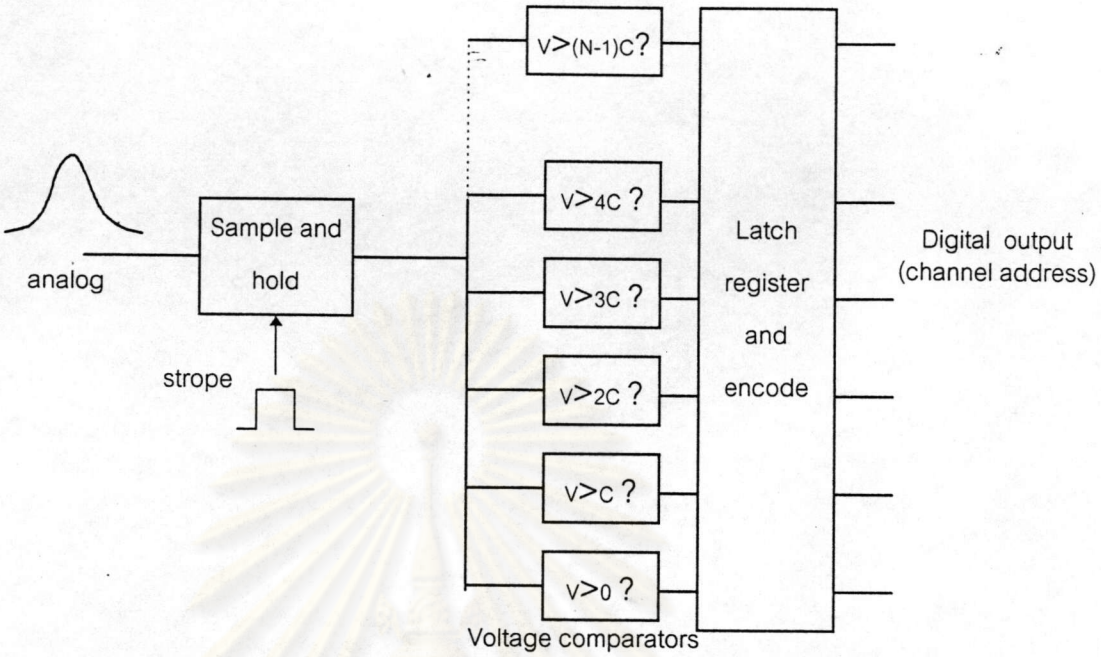
วงจรแปลงสัญญาณแบบแฟลชเป็นวงจรที่มีความเร็วสูงสุดในการแปลงผันสัญญาณแต่ต้องการส่วนประกอบวงจรมากกว่าชนิดอื่น ตัวอย่างเช่น วงจรแปลงสัญญาณแฟลชแบบ 6 บิต ต้องการวงจรเปรียบเทียบทั้งหมด 63 วงจร ขณะที่ 8 บิต ต้องการ 255 วงจร 10 บิต ต้องการ 1023 วงจร ขนาดของวงจรแปลงสัญญาณจะมีจำนวนวงจรเปรียบเทียบที่ใช้กันทั่วไปอยู่ที่ 2-8 บิต มีการทำงานดังในรูปที่ 2.14 สัญญาณอนาลอกที่ทางเข้าจะเปรียบเทียบกับระดับศักดาอ้างอิงที่วงจรเปรียบเทียบพร้อมกันทุกระดับ และผลการเปรียบเทียบนำไปเข้ารหัสกำเนิดสัญญาณเชิงตัวเลขทางออกทันทีจึงมีคาบเวลาแปลงผันสัญญาณคงที่และสั้นมาก



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรแปลงสัญญาณแบบแฟลช [7]

ปัจจุบันมีการพัฒนาวงจรแปลงสัญญาณแบบแฟลชให้มีขนาด 10-12 บิต ซึ่งมีการนำมาใช้ในกระบวนการแปลงสัญญาณอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นด้านกระบวนการสร้างภาพและระบบแปลงสัญญาณความสูงของพัลส์แบบคาบเวลาแปลงผันคงที่ โครงสร้างหลักของวงจรแปลงสัญญาณชนิดนี้คล้ายกับการนำเครื่องวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดียวมาเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ โดยแต่ละชั้นทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบที่มีระดับศักดาไฟฟ้าสูง ค่าศักดาอ้างอิงวงจรเปรียบเทียบแต่ละตัวมีค่าเป็น ΔE เหนือค่าศักดาอ้างอิง (threshold) ลำดับถัดไป เมื่อสัญญาณพัลส์ทางเข้าอนาลอกผ่านเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบแต่ละวงจร โดยสัญญาณที่มีขนาดต่ำกว่าศักดาไฟฟ้าอ้างอิงจะถูกนำส่งไปเลือกค่าเชิงตัวเลขที่เก็บไว้ในหน่วยความจำถาวรเฉพาะค่าและแปลงสัญญาณเป็นตัวเลขฐานสองโดยตัวถอดรหัสอนาลอกทำให้สัญญาณเอาท์พุทมีค่าเป็น 0 หรือ 1 ดังในรูปที่ 2.15

คาบเวลาในการแปลงผันขึ้นอยู่กับความไวของการเปรียบเทียบระดับศักดาไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจึงมีความรวดเร็วมากถึง 10 นาโนวินาทีในวงจรรวมรุ่นใหม่ แต่ข้อเสียของการแปลงสัญญาณชนิดนี้คือ มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความไม่แน่นอนของระดับศักดาอ้างอิงที่สร้างขึ้นภายในทำให้ช่องวิเคราะห์กว้างไม่เท่ากัน



รูป 2.15 แผนภาพการทำงานของวงจรแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์แบบแฟลช
โดย C คือ ความกว้างของช่อง และ N คือจำนวนช่องทั้งหมด [2]

2.5 ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณ

การเปรียบเทียบพิกัดการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแต่ละแบบจะเทียบกันที่ความเป็นเชิงเส้นและคาบเวลาการแปลงผันสัญญาณ เนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงต่อการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ทั้งระดับพลังงานและปริมาณนับรังสี

2.5.1 ผลของการสูญเสียเวลาวิเคราะห์อนุภาค (dead time)

ในระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของอนุภาคนิวเคลียร์ ซึ่งประกอบด้วย หัววัดรังสี อุปกรณ์ขยายส่วนหน้า อุปกรณ์ขยายหลัก และวงจรแปลงความสูงของพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลขของเครื่องวิเคราะห์หลายช่องนั้น เวลาที่สูญเสียไปกับการทำงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและวงจรแปลงความสูงของพัลส์จะอนุกรมกัน ดังแสดงในแผนภาพเวลาในรูปที่ 2.16 เริ่มด้วยการสูญเสียเวลาด้านขาขึ้นไปยังพีคของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Tp) ตามด้วยเวลาที่ใช้ในการแปลงผันสัญญาณ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

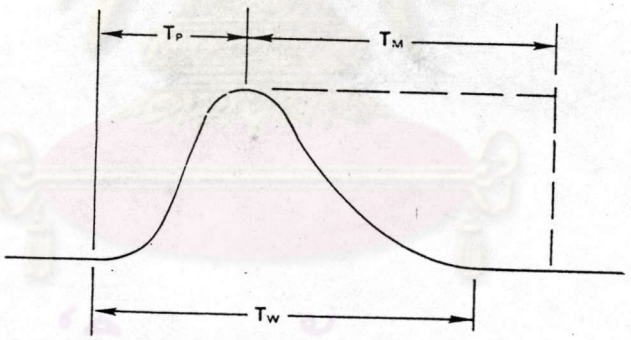
(T_M) ดังนั้นอัตราการนับรังสีจากหัววัดรังสี (r_i) และอัตรานับรังสีที่ระบบวิเคราะห์จับไว้ได้ (r_o) จึงมีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$r_o = \frac{r_i}{e^{[r_i(T_W + T_P)] + r_i[T_M - (T_W - T_P)]\, U[T_M - (T_W - T_P)]}} \quad \text{.....(2.3)}$$

เมื่อ T_W เป็นคาบเวลาเฉพาะของสัญญาณพัลส์จากรูปสัญญาณทางออกที่อุปกรณ์ขยายเอง

$U[T_M-(T_W-T_P)]$ เป็นฟังก์ชันของสัญญาณสเต็ป (unit step) ของสัญญาณเปิดปิดเกต จาก 0 เป็น 1 เมื่อ $T_M > (T_W-T_P)$

สำหรับ T_M เป็นเวลาในการแปลงผันสัญญาณ ในกรณีของวงจรแปลงแบบซัคเซสซีพแอพพรอกซิเมชัน T_M จะคงที่ แต่ในกรณีของวงจรแปลงสัญญาณแบบวิลคินสัน T_M จะเป็นไปตามสมการที่ (2.2)



รูปที่ 2.16 แผนภาพเวลาแสดงการสูญเสียเวลาในการวิเคราะห์อนุภาค [7]

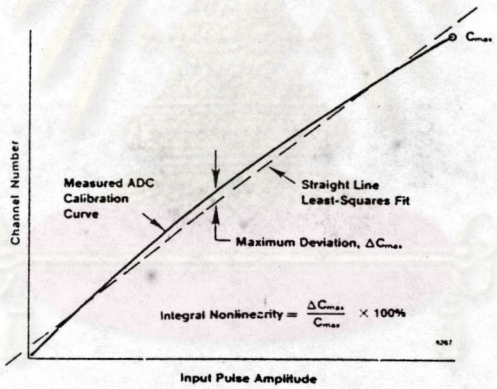
การปรับแก้การสูญเสียเวลาในระบบ (dead time correction) ตามสมการที่ 2.3 ทำได้โดยการชดเชยเวลาในเทอมต่างๆของสมการ โดยตรวจสอบช่วงเวลาที่สูญเสียระหว่างกระบวนการสัญญาณและการเกิดไพล์อัพ (pile-up) ของพัลส์ และควบคุมเวลาการนับรังสีในลักษณะของเวลาที่ได้รับการปรับแก้แล้ว (live time)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.2 ความเป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงความสูงของพัลส์

ความเป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงความสูงของพัลส์เป็นสิ่งสำคัญของการวิเคราะห์ตำแหน่งพลังงาน ณ ช่องวิเคราะห์บนหน่วยความจำ เนื่องจากการแปลงข้อมูลเชิงตัวเลขจะคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับกระบวนการแปลงสัญญาณในแต่ละแบบ การทดสอบสมรรถนะความเป็นเชิงเส้นนี้ แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

ก. ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล (differential nonlinearity) เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของความกว้างช่องวิเคราะห์ (channel width , C) ทดสอบโดยการเลื่อนความสูงของพัลส์ด้วยพัลเซอร์ช้าๆจาก 0-10 โวลต์ และเคลื่อนกลับจาก 10-0 โวลต์ เพื่อเป็นการลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบจะใช้เวลาทดสอบอย่างน้อย 10 ชั่วโมง และอ่านค่าปริมาณนับของแต่ละช่องวิเคราะห์และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนปริมาณนับเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของความกว้างช่องวิเคราะห์ในเทอมของความไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล



รูปที่ 2.16 การทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอินติกรัล [7]

ข. ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอินติกรัล (integral nonlinearity) เป็นการทดสอบความถูกต้องของสัดส่วนตำแหน่งวิเคราะห์กับความสูงของพัลส์ตลอดย่านวิเคราะห์ทดสอบ โดยการสร้างเส้นกราฟปรับเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของพัลส์จากพัลเซอร์เทียบกับตำแหน่งช่องวิเคราะห์ นำข้อมูลที่ได้เข้ากระบวนการสร้างกราฟเส้นตรง (least-square fit) และพลอตค่าจริงซ้อนกันดังในรูปที่ 2.16 หาค่าเบี่ยงเบนสูงสุด (Δ Cmax) เพื่อคำนวณหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอินติกรัล ตามสมการ

$$\text{integral nonlinearity} = \frac{\Delta \text{Cmax}}{\text{Cmax}} \times 100\ \% \quad \text{.....(2.4)}$$