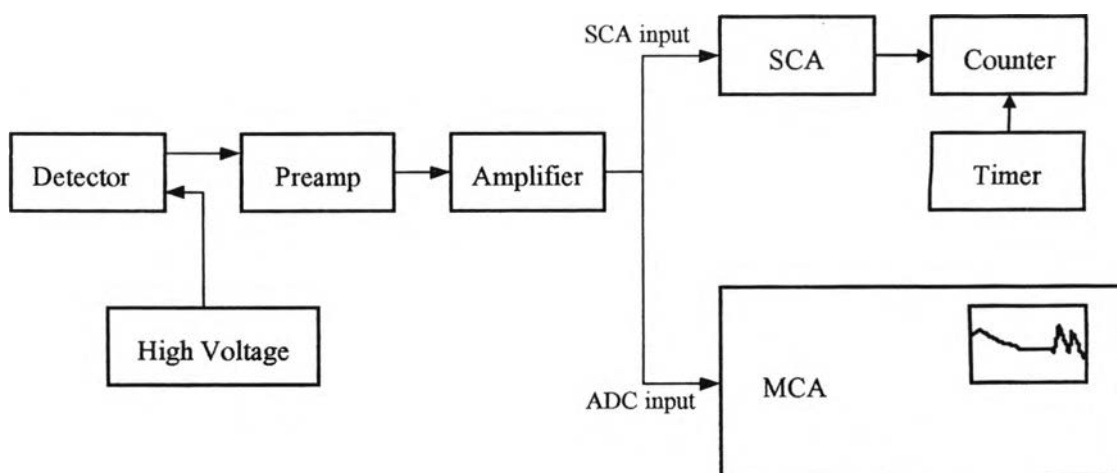


## บทที่ 2

### หลักการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ทางนิวเคลียร์

การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ในระบบวัดทางนิวเคลียร์ คือการวิเคราะห์ระดับพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์เพื่อแสดงสเปกตรัมพลังงานที่เกิดจากกระบวนการนิวเคลียร์ต่างๆ ได้แก่ การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (radioactive decay) ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction) และอันตรกิริยานิวเคลียร์ (nuclear interaction) เป็นต้น จากแผนภาพรูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์นิวเคลียร์ประกอบด้วย ระบบวัดนิวเคลียร์ส่วนหน้า ระบบขยายสัญญาณพัลส์และระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ โดยการทำงานจะเริ่มจาก ระบบวัดนิวเคลียร์ส่วนหน้า ทำหน้าที่แปลงพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ไปเป็นสัญญาณศักดาไฟฟ้า ซึ่งมีความสูงของพัลส์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ จากนั้นจะถูกขยายขนาดและกรองสัญญาณรบกวนออกก่อนส่งให้ระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ ซึ่งจะทำหน้าที่แจกแจงขนาดความสูงของพัลส์ ใน 2 กรณีคือ ในกรณีของเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเคี้ยว สัญญาณพัลส์แต่ละระดับจะได้รับการแจกแจงด้วยช่องวิเคราะห์พลังงานครั้งละ 1 ระดับและสะสมจำนวนนับแต่ละครั้งที่อุปกรณ์นับจำนวนพัลส์ที่เวลาหนึ่งๆก่อนนำไปสร้างสเปกตรัมพลังงาน ส่วนในกรณีของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง ระบบวิเคราะห์จะทำการแปลงผันความสูงของพัลส์เป็นรหัสเชิงตัวเลขที่สอดคล้องกับช่องวิเคราะห์หรือแอดเดรส (address) ของหน่วยความจำและสะสมจำนวนนับพัลส์ที่หน่วยความจำตำแหน่งนั้นๆอย่างต่อเนื่องแสดงสเปกตรัมพลังงานทางจอภาพได้ทันที



รูปที่ 2.1 ระบบวัดสำหรับวิเคราะห์อนุภาคนิวเคลียร์

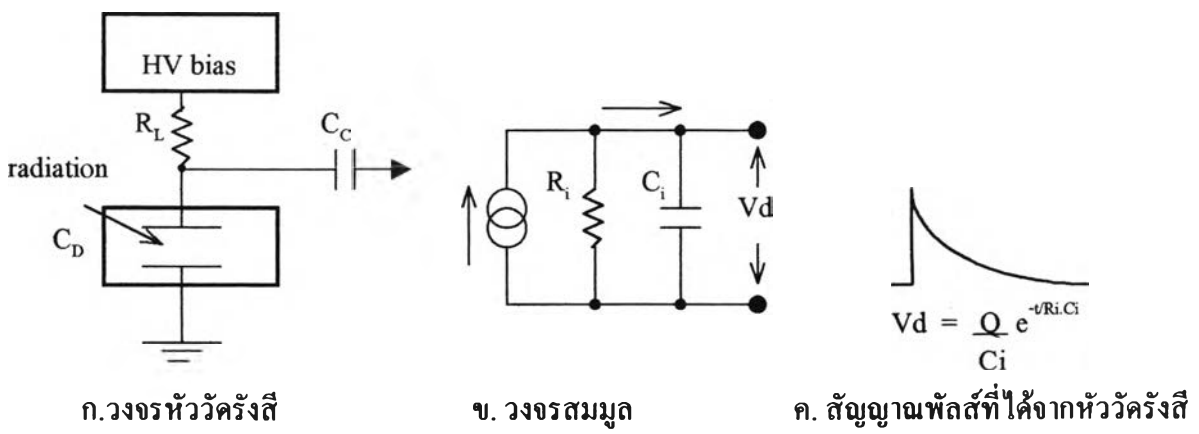
### 2.1 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ทางนิวเคลียร์

สัญญาณพัลส์ทางนิวเคลียร์เป็นสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการสะสมปริมาณประจุไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าภายในหัววัดรังสี หลังการถ่ายโอนพลังงานของรังสีแกมมาในตัวกลางภายในหัววัดรังสีแต่ละครั้ง โดยปริมาณประจุไฟฟ้า (Q) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับพลังงานและชนิดของตัวกลางที่รับการถ่ายโอนพลังงานในหัววัดรังสีชนิดนั้นๆ จากนั้นปริมาณประจุไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดความสูงสัมพันธ์กับสัดส่วนพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ดังสมการที่ (1)<sup>(1)</sup>

$$Q = nq = \frac{E \cdot q}{W} \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ n = จำนวนคู่ของพาหะไฟฟ้า (ion pair, e-h pair)
- E = พลังงานที่ถ่ายโอนให้ตัวกลางในหัววัดรังสี
- W = พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการกำเนิดคู่พาหะไฟฟ้า 1 คู่
- q = ประจุของอิเล็กตรอน ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

หัววัดรังสีจะมีโครงสร้างเทียบเท่าตัวเก็บประจุขนาดเล็กดังรูป 2.2 ก. ซึ่งแผ่นขั้วแอโนด (anode) และแคโทด (cathode) หลังการไบอัส (bias) จะมีสนามไฟฟ้าอยู่ เมื่อมีอนุภาคนิวเคลียร์ผ่านเข้ามาจะเกิดอันตรกิริยาของรังสีและสร้างปริมาณพาหะไฟฟ้าขึ้นภายในหัววัดรังสี ทำให้หัววัดรังสีมีพฤติกรรมเหมือนแหล่งจ่ายกระแส สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูป 2.2 ข. ปริมาณประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุแต่ละครั้งจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ศักดาไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานที่ขนานในวงจรสมมูล ดังรูป 2.2 ค. รูปสัญญาณพัลส์จะเป็นไปตามสมการที่ (2)<sup>(1)</sup>



รูปที่ 2.2 การเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์

$$V_d = \frac{Q}{C_i} e^{-t/R_i C_i} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ	Q	=	ปริมาณประจุที่เกิดหลังการถ่ายโอนพลังงาน
	C <sub>i</sub>	=	ค่าความจุในวงจรสมมูล (C <sub>D</sub> //C <sub>C</sub> )
	R <sub>i</sub>	=	ค่าความต้านทานในวงจรสมมูล (R <sub>L</sub> //R <sub>IN</sub> )
	t	=	เวลาใดๆ

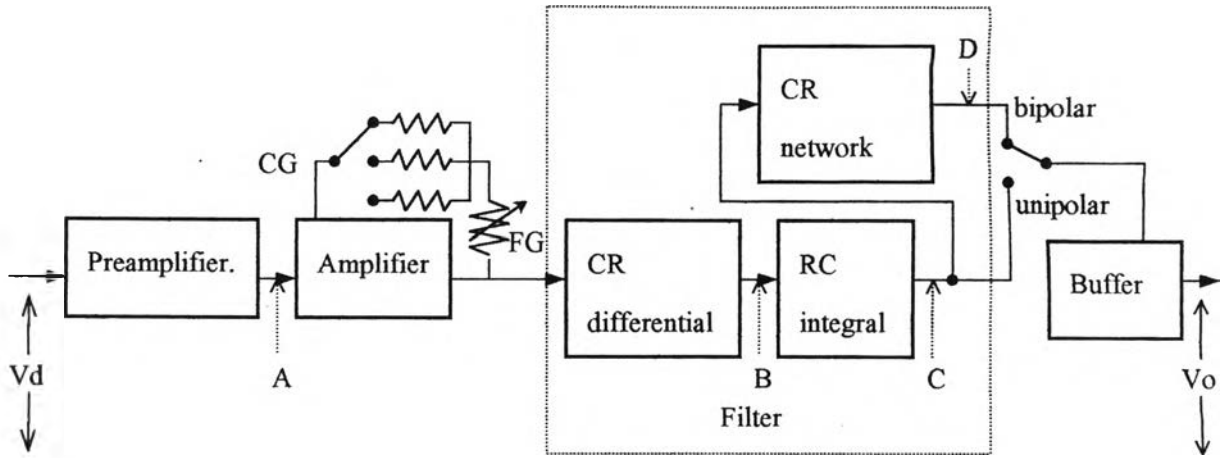
สัญญาณพัลส์ที่ได้จากหัววัดรังสีมีขนาดเล็กและมีสิ่งรบกวน (noise) ปนอยู่ ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ขนาดของพัลส์ จะต้องนำสัญญาณนี้ผ่านกระบวนการขยายสัญญาณและกำจัดสิ่งรบกวนออกไป อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ใช้ต้องมีย่านตอบสนองสัญญาณความถี่แคบ (narrow band amplifier) โดยใช้หลักการ กรององค์ประกอบสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกด้วยวงจร กรองความถี่ และยอมให้องค์ประกอบของขนาดพัลส์ผ่านไปได้ดีเท่านั้น อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ชนิดนี้เรียกว่า “ spectroscopy amplifier ” ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.3 ซึ่งจะให้รูปสัญญาณทางออก 2 รูปแบบ คือ รูปพัลส์ DC ยูนิโพลาร์ (unipolar) สำหรับการวัดรังสีอัตรานับต่ำ และรูปพัลส์ AC ไบโพลาร์ (bipolar) สำหรับการนับรังสีอัตรานับสูง สัญญาณดังกล่าวมีรูปสัญญาณตามฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ที่จัดไว้ ขนาดของสัญญาณพัลส์เต็มย่านวัดมีขนาด 0-10 โวลต์ สามารถปรับสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณและพลังงานได้จากอัตราขยายสัญญาณ (A<sub>v</sub>) ดังนี้

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = CG \times FG$$

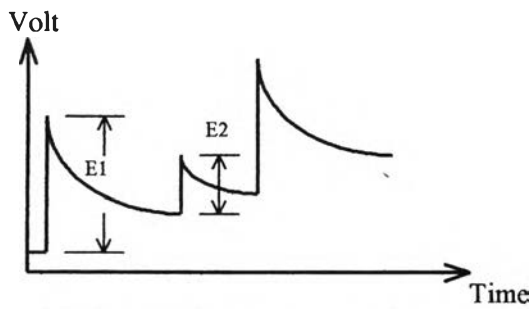
$$V_o = A_v \times V_i = (CG \times FG) \times V_i \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ	CG	=	อัตราขยายที่เลือกเป็นขั้นๆ (coarse gain)
	FG	=	อัตราขยายที่ปรับละเอียดระหว่างขั้น (fine gain)

โดยทั่วไปหัววัดรังสีจะใช้เวลาในการรวมประจุต่างกันระหว่าง 0.1  $\mu$ s – 10  $\mu$ s ดังนั้น วงจรขยายส่วนหน้า (preamplifier) จึงต้องออกแบบให้มีค่าคงที่เวลาของระบบประมาณ 50  $\mu$ s ซึ่งยาวเพียงพอที่จะให้ค่าความจุในวงจรรวบรวมปริมาณประจุจากหัววัดรังสีได้หมด เมื่อสัญญาณเข้ามาภายในค่าคงที่เวลาจะทำให้สัญญาณมีโอกาสรบกวนกันดังรูปที่ 2.4 ก อย่างไรก็ตามชุดวงจรกรองความถี่ส่วนแรก (differentiation) จะแยกพัลส์ให้อิสระจากกัน และวงจรกรองส่วนหลัง (integration) จะส่งสัญญาณที่มีองค์ประกอบจำกัดออกมาคล้ายรูปประฆังคว่ำ (near gaussian) ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์ขนาดความสูงของพัลส์บริเวณยอดสัญญาณดังรูปที่ 2.4. ก และ 2.4 ง



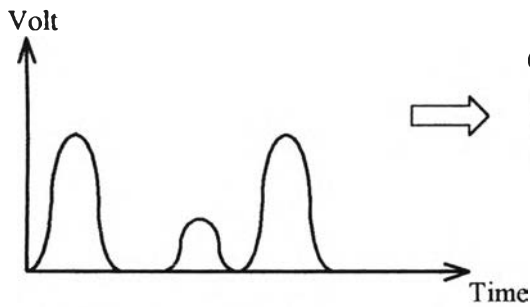
รูปที่ 2.3 แผนภาพของ Spectroscopy amplifier



ก. สัญญาณ Preamplifier ( A )



ข. differentiation pulse ( B )



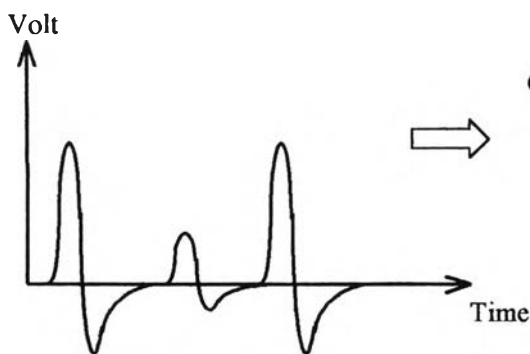
ค. สัญญาณ unipolar ( C )

CR-RC circuit <sup>(1)</sup>



$$V_o = V_i \frac{\tau_1}{(\tau_1 - \tau_2)} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \text{ for } t > 0 \dots\dots(4)$$

$$\tau_1 = CR, \tau_2 = RC \text{ และ } \tau = \tau_1 = \tau_2$$



ง. สัญญาณ bipolar ( D )

CR<sup>2</sup>-RC circuit <sup>(2)</sup>

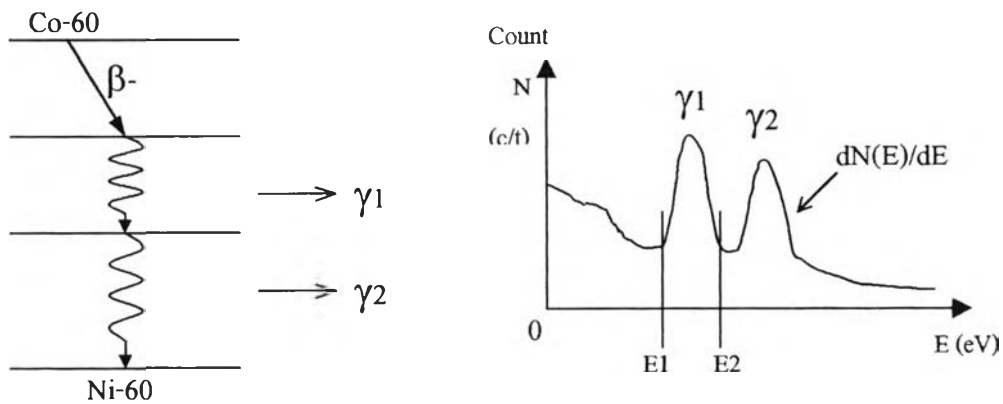
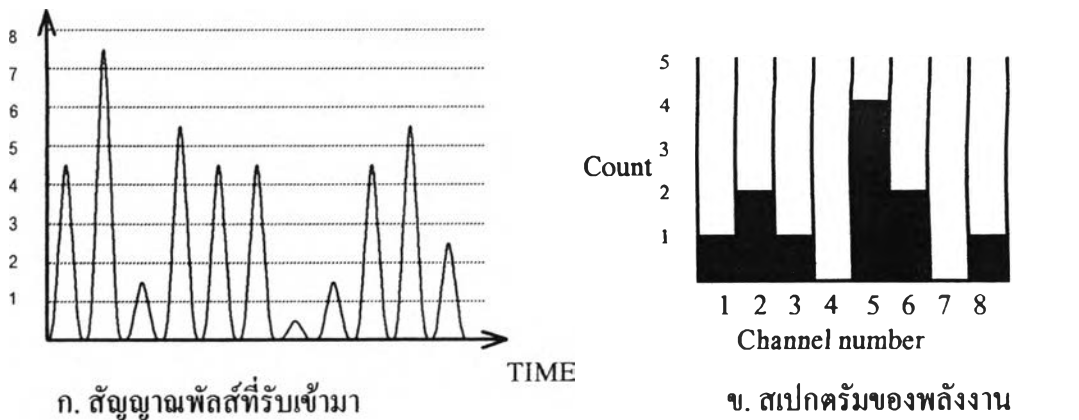


$$V_o = V_i \left( \frac{1}{\tau} \cdot \frac{t \cdot e^{-t/\tau}}{1!} - \frac{1}{\tau^2} \cdot \frac{t^2 \cdot e^{-t/\tau}}{2!} \right) \dots\dots(5)$$

รูปที่ 2.4 สัญญาณพัลส์มาตรฐานในระบบวัดนิวเคลียร์

2.2 เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ที่มีความสามารถสูง หลักการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ อาศัยการแจกแจงขนาดความสูงของพัลส์ที่รับจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ โดยเก็บเป็นข้อมูลจำนวนความถี่ของขนาดพัลส์ที่คัดเลือกได้ และแสดงการกระจายข้อมูลแต่ละระดับความสูงของพัลส์หรือพลังงานในรูปของฮิสโตแกรม (histogram) ซึ่งแกนอนจะเป็นสเกลขนาดของสัญญาณพัลส์ซึ่งสามารถปรับเทียบเป็นสเกลพลังงานและแกนตั้งเป็นสเกลจำนวนนับรังสี เส้นกราฟบนจุดยอดของแท่งกราฟจะเป็น โพรไฟล์ของเส้นกราฟความชัน  $dN(E)/dE$  หรือสเปกตรัมพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

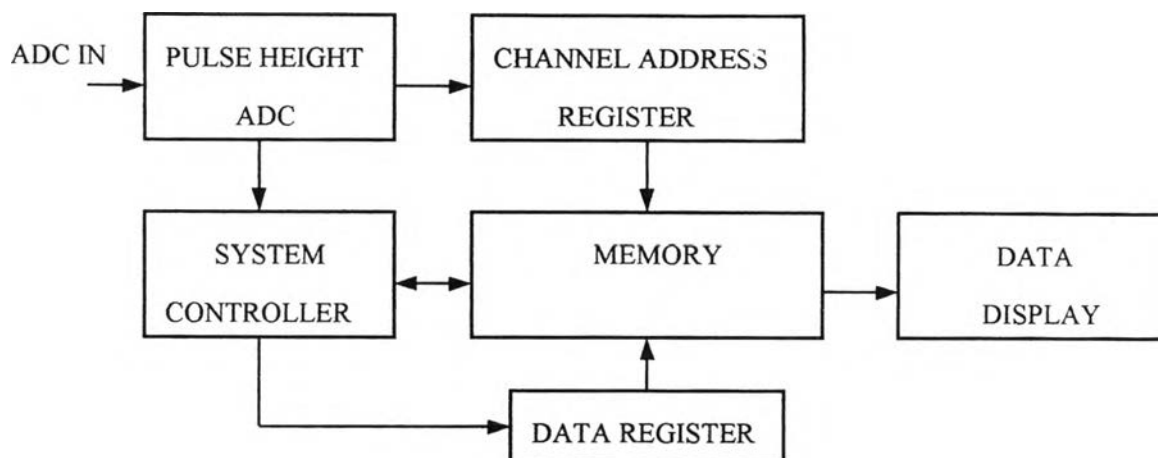


รูปที่ 2.5 สเปกตรัมพลังงานจากการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์

จากรูปที่ 2.5 ค ผลการแจกแจงการกระจายขนาดความสูงของพัลส์ พลังงานรังสีแกมมา ( $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$ ) ให้สเปกตรัมพลังงานเฉพาะธาตุกัมมันตรังสี Co-60 และจำนวนนับรังสีของพลังงาน  $\gamma_1$  หาได้จาก <sup>(1)</sup>

$$N_{\gamma_1} = \int_{E_1}^{E_2} \frac{dN(E)}{dE} dE \dots\dots\dots(6)$$

### 2.3 การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์สำหรับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง



รูปที่ 2.6 แผนภาพการทำงานของ MCA เบื้องต้น

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องวิเคราะห์หลายช่องประกอบด้วย วงจรแปลงผันสัญญาณพัลส์นอกให้เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข (ADC) วงจรหน่วยความจำ (memory) วงจรรีจิสเตอร์ตำแหน่งแอสเครตและข้อมูล (register) วงจรควบคุมขั้นตอนการทำงานของระบบ (system control) และวงจรแสดงผล (data display) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.6 วงจรที่เป็นหัวใจการทำงานของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องได้แก่ วงจรแปลงผันความสูงของพัลส์เป็นข้อมูลเชิงตัวเลขจะต้องมีลักษณะเป็นการแปลงเฉพาะตำแหน่งความสูง (peak height) ซึ่งต่างจาก ADC ทั่วไปที่เป็นแบบสุ่ม (sampling) การทำงานของระบบเริ่มจากสัญญาณจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์จะส่งเข้าที่วงจรแปลงผันความสูงพัลส์ (ADC) ทาง ADC input ความสูงของพัลส์จะถูกแปลงผันเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขของตำแหน่งเก็บข้อมูล (address) ของหน่วยความจำ ซึ่งมักจะเรียกว่า “channel number หรือ channel address” ส่งให้รีจิสเตอร์แอสเครต หลังสิ้นสุดการแปลงข้อมูลพัลส์ที่ตำแหน่งขอดีคพัลส์แต่ละครั้ง ระบบควบคุมจะส่งวงจรรีจิสเตอร์ข้อมูลอ่านข้อมูลเดิมที่ตำแหน่งของหน่วยความจำที่แปลงข้อมูลได้และบวกข้อมูลเพิ่มไปทุกครั้ง ดังนั้นบนหน่วยความจำจะมีข้อมูลการกระจายขนาดของพัลส์ที่ทำการแปลงสัญญาณเข้ามาอย่างต่อเนื่อง จนกว่าจะหมดเวลาที่สั่งให้เครื่องวิเคราะห์ทำงาน ระหว่างเวลาที่เครื่องวิเคราะห์ทำงานวงจรแสดงผลสามารถอ่านข้อมูลบนหน่วยความจำไปทำการแสดงผลสเปกตรัมทางจอภาพได้ตลอดเวลา เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องจะมีความสามารถในการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ได้ประสิทธิภาพสูงมีการสูญเสียเวลาในการนับรังสี (dead time) ต่ำเพียงใดขึ้นกับความรวดเร็วในการทำงานของสองส่วน ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการแปลงข้อมูล (conversion time;  $t_c$ ) และเวลาในการเก็บข้อมูล (data storage time;  $t_s$ ) ดังนั้นเวลาที่สูญเสียไปจะมีค่าเท่ากับ

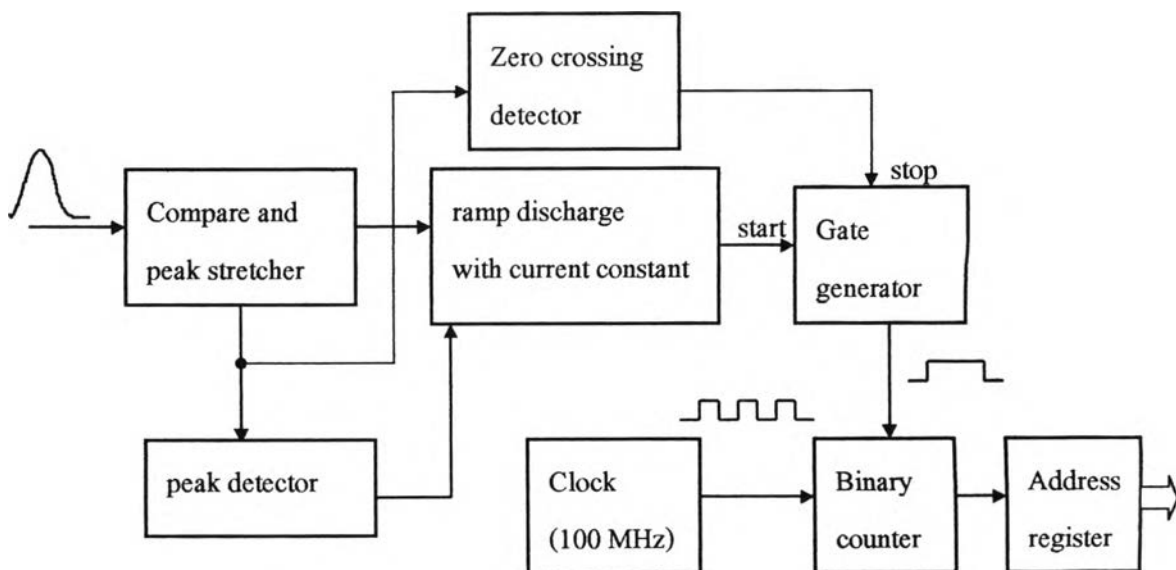
$$\text{ADC dead time} = t_c + t_s \quad \dots\dots\dots(7)$$

ปัจจุบันเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องมีการเลือกใช้วงจรแปลงผันสัญญาณอยู่ 2 แบบ คือ

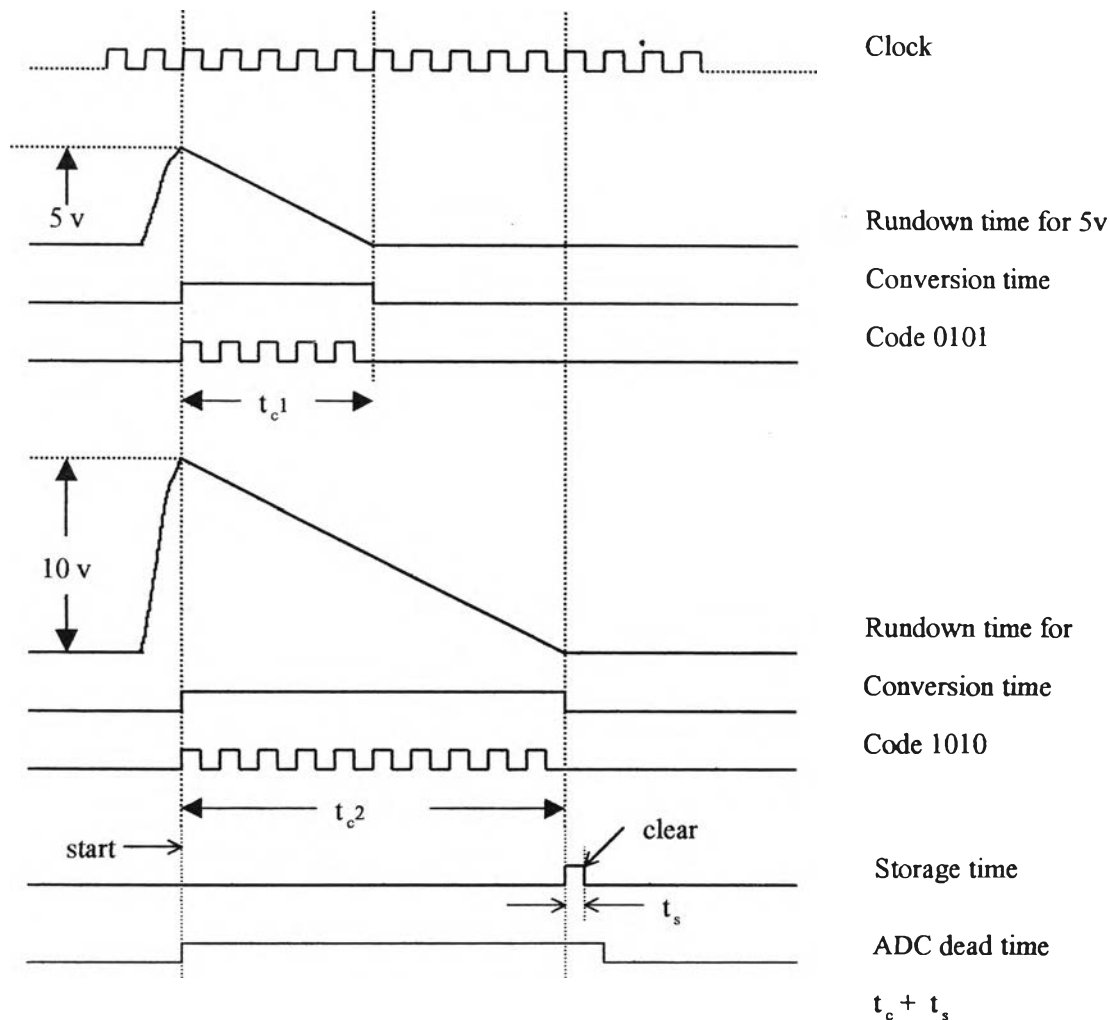
- ก. แบบ ramp type หรือ Wilkinson
- ข. แบบ fixed conversion time ซึ่งใดแก่
  - ข.1 Successive approximation ADC
  - ข.2 Flash type ADC

### 2.3.1 ADC แบบวิลคินสัน (Wilkinson ADC)

วิลคินสัน ADC เป็นวงจรแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์ โดยใช้หลักการเก็บประจุบนตัวเก็บประจุจนมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับความสูงของพีคของสัญญาณพัลส์ แล้วจึงคายประจุในอัตราคงที่ด้วยวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ เพื่อสร้างช่วงเวลาในการเปิดของวงจรมับสัญญาณนาฬิกา (clock) ความถี่สูง ช่วงเวลานี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูงของสัญญาณพัลส์ที่ได้จาก อุปกรณ์ขยายสัญญาณ และจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่ได้จะอยู่ในรูปรหัสแอสเครตของหน่วยความจำ ดังแสดงแผนภาพการทำงานในรูปที่ 2.7 และแผนภาพเวลาในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แผนภาพการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแบบวิลคินสัน



รูปที่ 2.8 แสดงเวลาที่สูญเสียในการแปลงสัญญาณพัลส์ 5V และ 10V

ขั้นตอนการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแบบวิลคินสัน เริ่มจากในขณะที่มีสัญญาณพัลส์เข้ามาวงจรจะเริ่มตรวจจับสัญญาณอนาล็อกที่เพิ่มขึ้นด้วยการเก็บประจุบนตัวเก็บประจุ โดยปริมาณประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุจะเป็นสัดส่วนกับความสูงของสัญญาณพัลส์ เมื่อวงจรตรวจสอบความสูงของสัญญาณพัลส์ (peak detector) พบค่าพีคของสัญญาณ จะสร้างสัญญาณลจิกพัลส์เพื่อนำไปเปิดเกตของวงจรรนับไบนารี (binary counter) เพื่อนับสัญญาณนาฬิกาความถี่สูง พร้อมกันนี้จะเริ่มทำการคายประจุไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุด้วยอัตราคงที่ของวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ (constant current source) เมื่อตัวเก็บประจุคายประจุจนกระทั่งศักดาไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุลดลงถึงระดับฐานของสัญญาณ (threshold level) วงจรตรวจระดับสัญญาณศูนย์ (zero crossing detector) จะสร้างสัญญาณเปิดเกตไปยังวงจรถ่ายสัญญาณเกต (gate generator) ช่วงเวลาเปิดถึงปิดเกตนี้จะเป็นสัดส่วนตรงกับขนาดความสูงของพัลส์ และข้อมูลเชิงตัวเลขบนวงจรรนับไบนารีจะกำหนดตำแหน่งแอสครสบนหน่วยความจำของขนาดพัลส์นั้น หลังสิ้นสุดการแปลงสัญญาณพัลส์วงจรควบคุมจะส่งสัญญาณเก็บ



ข้อมูลนับของขนาดพัลส์มายังรีจิสเตอร์ข้อมูลให้อ่านข้อมูลเดิมแล้วบวกเพิ่มไปอีกครั้งในช่วงเวลา  $t_s$  ดังนั้นเวลาที่สูญเสียไปกับการวิเคราะห์ข้อมูล 1 ครั้งจะมีค่า

$$\text{ADC dead time} = \frac{1}{f} \cdot n + t_s \quad \dots\dots\dots(7)$$

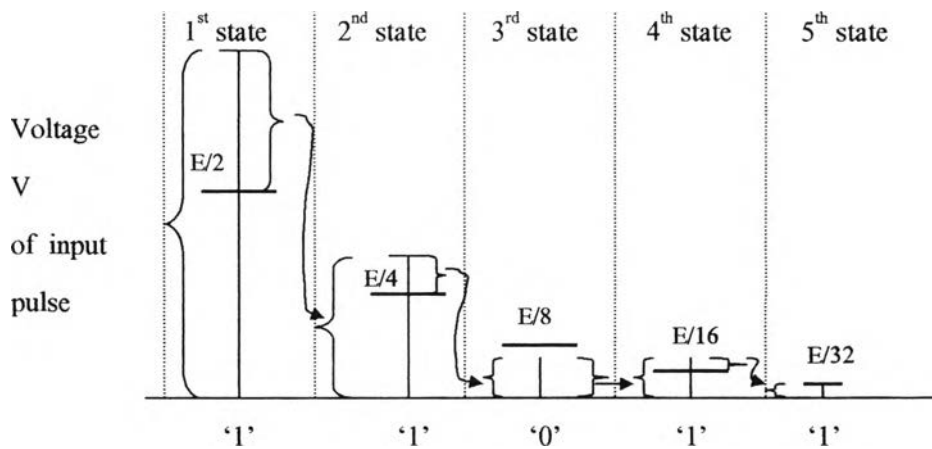
- เมื่อ  $f$  = ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา
- $n$  = ตำแหน่งช่องวิเคราะห์
- $t_s$  = เวลาในการเก็บข้อมูล

จะเห็นว่าวงจรแปลงผันสัญญาณพัลส์ชนิดบิตซินคลินคินั้น ช่วงเวลาแปลงผัน ( $t_c$ ) จะขึ้นกับพลังงานหรือตำแหน่งช่องวิเคราะห์ รวมกับเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

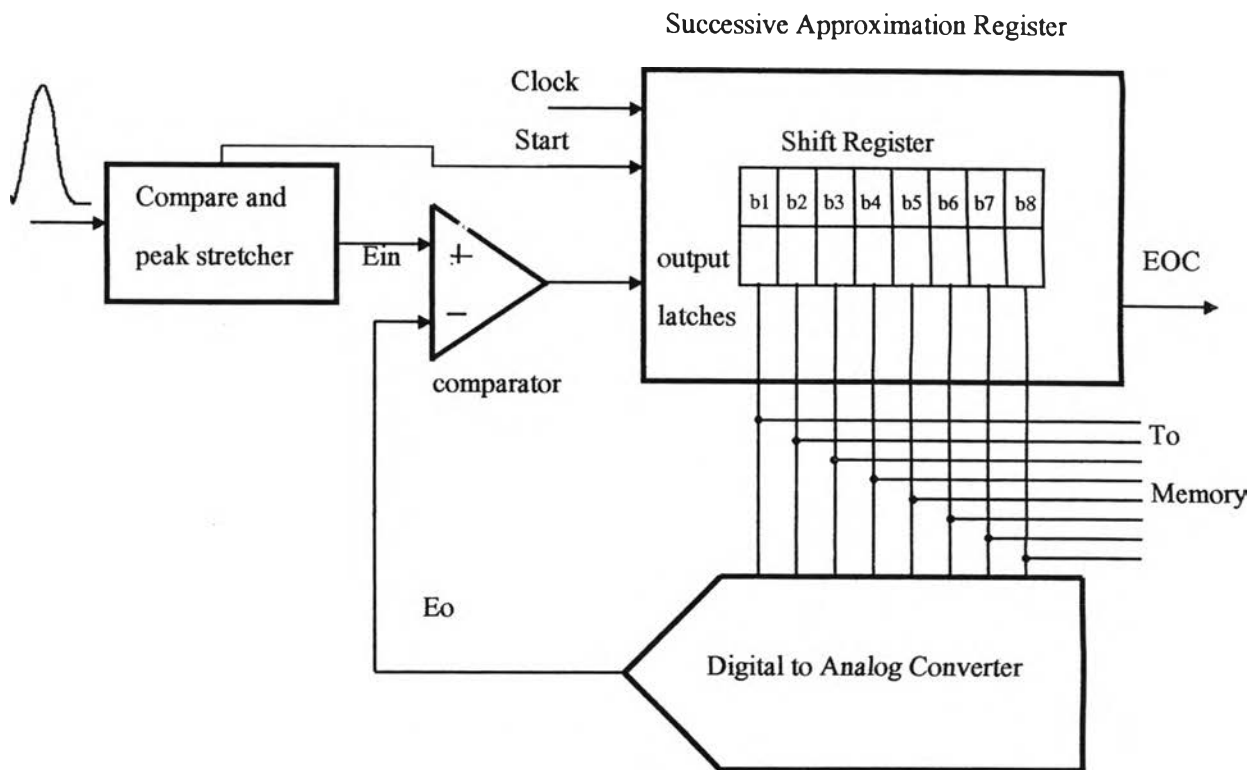
### 2.3.2 ADC แบบเวลาแปลงผันสัญญาณคงที่ (fixed-conversion time)

#### 2.3.2.1 ADC แบบซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชัน (Successive approximation ADC)

การแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นรหัสเชิงตัวเลขแบบซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชัน เป็นวิธีประมาณค่าเปรียบเทียบระหว่างขนาดสัญญาณพัลส์กับศักดาไฟฟ้าอ้างอิงจากการแปลงจำนวนไบนารีที่สร้างขึ้น โดยการเลื่อนขนาดสัญญาณเปรียบเทียบกับความเร็วเท่ากับขนาดของสัญญาณนาฬิกาที่ควบคุม ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.9 ไม่ว่าสัญญาณจะมีขนาดเท่าใดจะต้องเปรียบเทียบจำนวนหลักไบนารีที่กำหนดขึ้นเท่านั้น จึงใช้เวลาแปลงผันสัญญาณคงที่



รูปที่ 2.9 การเลื่อนข้อมูลเปรียบเทียบค่าอ้างอิงไบนารี



รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของระบบแปลงผันสัญญาณแบบ ซักเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชัน

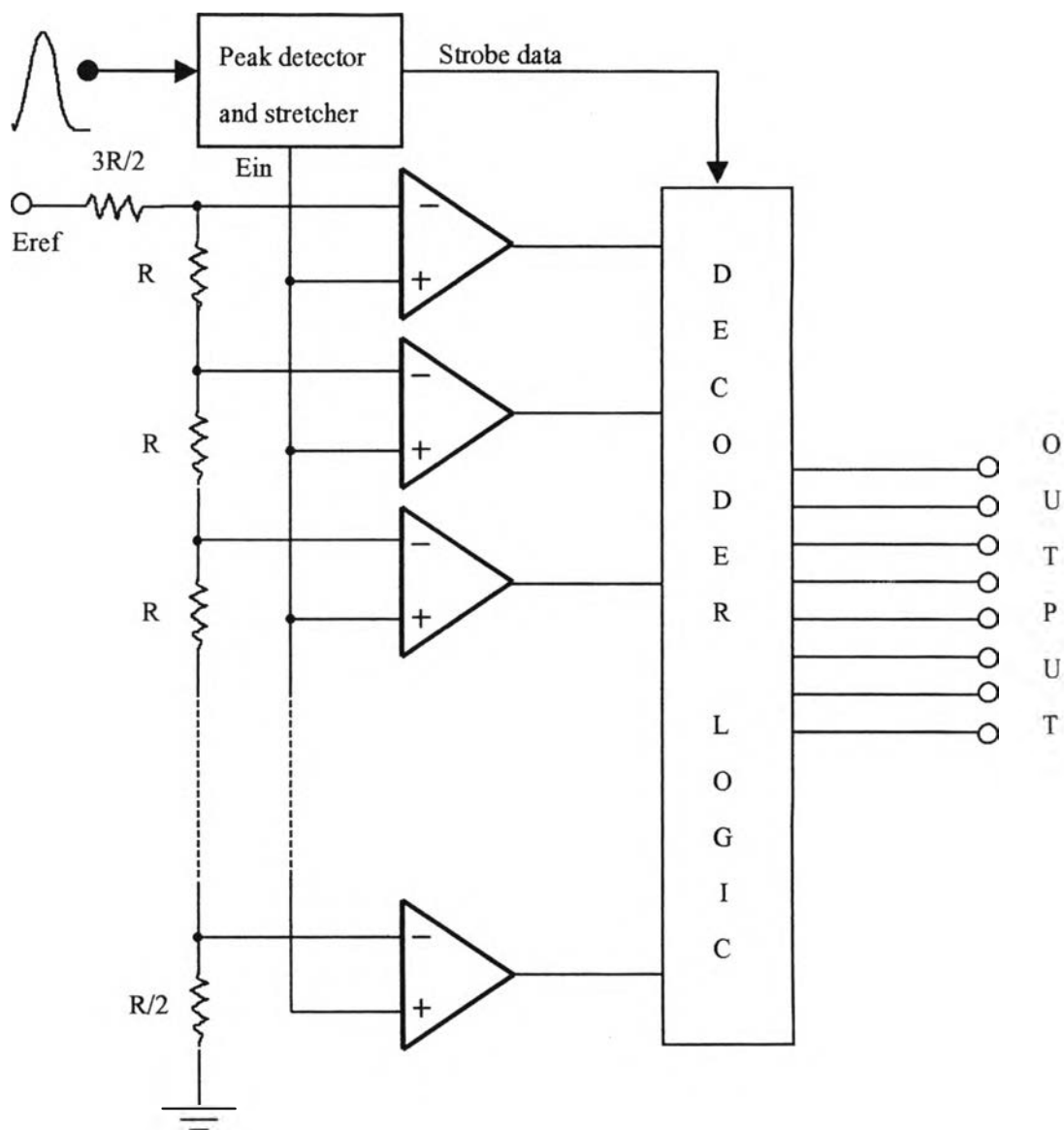
ระบบการแปลงผันสัญญาณแบบซักเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชัน ประกอบด้วย ซักเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชันรีจิสเตอร์ (SAR) ซึ่งภายในมีการควบคุมสัญญาณลอจิก (control logic) ชิฟรียิสเตอร์ (shift register) รวมทั้งชุดของเอาต์พุตแลตช์ (output latches) วงจรแปลงสัญญาณเชิงตัวเลขเป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog Converter, DAC) และวงจรเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.10 เมื่อวงจรตรวจค่าพิกของสัญญาณส่งสัญญาณ start เข้ามา การทำงานเริ่มที่ บิต 1 ของชิฟรียิสเตอร์ จะถูกเซ็ทเป็น high DAC มองเห็นจำนวนไบนารีเป็น 10000000, และจะให้ศักดาไฟฟ้าที่ทางออก (Eo) เป็นครึ่งหนึ่งของศักดาไฟฟ้าอ้างอิงสูงสุด (Efs) ถ้าขนาดสัญญาณพัลส์ (Ein) มากกว่า (Ein>Eo) วงจรแลตช์บิต1 จะถูกเซ็ทเป็น high เมื่อสัญญาณนาฬิกาถูกค่อไปเข้ามา บิต 2 ของชิฟรียิสเตอร์จะถูกเซ็ทเป็น high ศักดาไฟฟ้าทางออกของDAC จะมีแรงดันเป็น 3/4 ของ Efs ถ้า Ein<Eo วงจรแลตช์ บิต 2 จะถูกเซ็ทเป็น low เป็นลักษณะเช่นนี้จนกระทั่งจบบิตสุดท้ายวงจรควบคุมสัญญาณลอจิกจะกำเนิดสัญญาณ EOC (End-Of-Conversion) เพื่อเป็นการบอกว่าจบกระบวนการแปลงสัญญาณ รหัสเชิงตัวเลขที่ค้างอยู่บนทางออกของรีจิสเตอร์จะเป็นรหัสแอสเคตของหน่วยความจำ ไม่ว่าสัญญาณจะมีขนาดใดจะต้องเลื่อนค่าเปรียบเทียบจนถึงบิตสุดท้ายเสมอ เวลาที่สูญเสียในการวิเคราะห์ขนาดสัญญาณจึงมีค่า

$$ADC \text{ dead time} = t_c + t_s, \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อ  $t_c =$  successive approximation time  
 $t_s =$  เวลาในการเก็บข้อมูล

### 2.3.3.2 ADC แบบแฟลช (Flash ADC)

วงจรแปลงผันสัญญาณแบบแฟลชคอนเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2.11 เป็นวงจรที่ให้ความสามารถในการแปลงสัญญาณเร็วมากมีการทำงานในลักษณะขนานกัน บางทีเรียกวงจรนี้ว่าวงจรแปลงสัญญาณแบบขนาน (parallel ADC) แต่ต้องการส่วนประกอบวงจรมากกว่าวงจรแปลงสัญญาณชนิดอื่นเช่นถ้าต้องการความละเอียด 10บิตจะต้องมีวงจรเปรียบเทียบสัญญาณทั้งหมด 1023 วงจร ( $2^n - 1$  โดยที่  $n$ =จำนวนบิตของรหัสไบนารีที่ต้องการกำหนดตำแหน่งของหน่วยความจำ)



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบการแปลงสัญญาณแบบแฟลชคอนเวอร์เตอร์

สัญญาณพัลส์อนาล็อกที่อินพุต (Ein) จะเปรียบเทียบกับระดับศักดาอ้างอิงที่วงจรเปรียบเทียบพร้อมกันทุกระดับ และผลการเปรียบเทียบที่ทางออกของวงจรเปรียบเทียบทุกตัวจะถูกนำไปถอดรหัส (decode) เพื่อกำเนิดสัญญาณเชิงตัวเลขในทันที จะเห็นว่าระบบแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์ชนิดนี้ คล้ายกับระบบการวิเคราะห์แบบช่องเคียวเรียงต่อซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยแต่ละชั้นจะเปรียบเทียบที่ระดับศักดาไฟฟ้าต่างๆกัน เวลาในการเปรียบเทียบจะสั้นมาก การสูญเสียเวลาในการวิเคราะห์จะอยู่ที่เวลาในการเก็บข้อมูลเท่านั้น

## 2.4 ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรแปลงผันสัญญาณ

เนื่องจากอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องเป็นอุปกรณ์หลักในการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ ซึ่งจะต้องให้ตำแหน่งของการวิเคราะห์พลังงานที่ถูกต้องและสามารถรับอัตรานับรังสีได้รวดเร็ว ความต้องการดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณภาพของวงจรแปลงผันสัญญาณพัลส์อนาล็อกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข ดังนั้นจึงมีการพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของวงจรแปลงผันสัญญาณพัลส์ใน 2 ส่วนคือ

- ก. ความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณ (linearity) ซึ่งมีผลกระทบต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์ตำแหน่งพีคพลังงาน และลดความสามารถในการแยกแยะพลังงานของระบบ (resolution degradation)
- ข. การสูญเสียเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณ (dead time) ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตรานับรังสีของระบบ และความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ปริมาณนับรังสี

### 2.4.1 การสูญเสียเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณ (dead time)

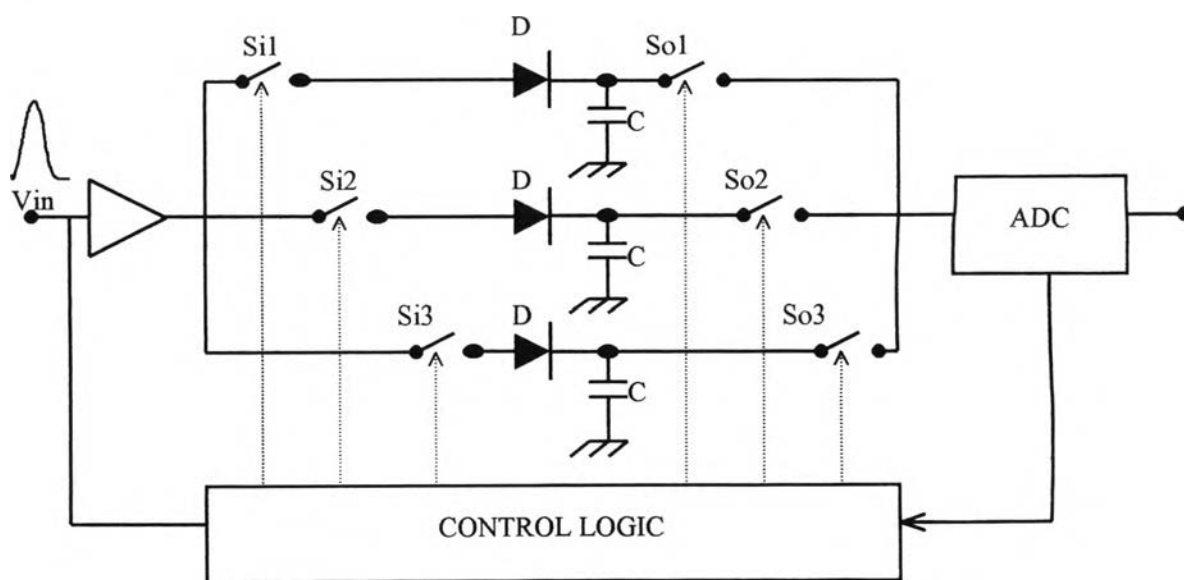
วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขชนิดซิงโครไนซ์แอสซิงโครไนซ์และแฟลชคอนเวอร์เตอร์นั้นเวลาในการแปลงผันสัญญาณจะคงที่ ไม่ขึ้นกับขนาดสัญญาณหรือพลังงาน ความรวดเร็วของการแปลงผันขึ้นกับคุณสมบัติของวงจร ในเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องที่ใช้วงจรแปลงผันชนิดซิงโครไนซ์แอสซิงโครไนซ์ จะใช้เวลาระหว่าง 5-6  $\mu\text{s}$  ส่วนแฟลชคอนเวอร์เตอร์ ใช้เวลาในระดับ ms สำหรับการสูญเสียเวลาในการแปลงผันสัญญาณชนิดวิลคินสันจะขึ้นกับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาและพลังงาน ดังนั้นช่วงเวลาการวิเคราะห์สัญญาณจึงไม่คงที่ การปรับปรุงเวลาในการแปลงผันสัญญาณทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของสัญญาณนาฬิกาดังแสดงในตารางที่ 2.1<sup>(3)</sup>

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าเวลาที่ใช้ในระบบการแปลงผันสัญญาณแบบวิตคินสันปกติ<sup>(3)</sup>

Clock Rate	Conversion Formula ( Time in $\mu s$ )	Conversion Times ( $\mu s$ ) for		
		Ch 1024	Ch 2048	Ch 4095
50 MHz	$T = .02 * Ch \#$	20.48	40.96	81.92
100 MHz	$T = .01 * Ch \#$	10.24	20.48	40.96
450 MHz	$T = .0022 * Ch \#$	2.25	4.50	9.0

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าเมื่อใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการแปลงผันสัญญาณจะลดลงที่ตำแหน่งของหน่วยความจำหรือช่องวิเคราะห์พลังงาน (channel number) เท่ากัน ปัจจุบันมีการเพิ่มความถี่ของสัญญาณนาฬิกาขึ้นไปถึง 450 MHz แต่ข้อจำกัดในการเพิ่มความถี่สูงขึ้นนี้จะขึ้นกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ต้องตอบสนองความเร็วสัญญาณสูง และต้องออกแบบวงจรเป็นพิเศษ ซึ่งทำให้หาอุปกรณ์ยากและราคาสูงมาก เช่นถ้าใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกาในช่วง 100 MHz ไอซีประเภท TTL ยังสามารถตอบสนองการทำงานได้ แต่เมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้นกว่านี้จะต้องใช้อิซีประเภท ECL ซึ่งราคาสูงขึ้นและไม่แพร่หลาย

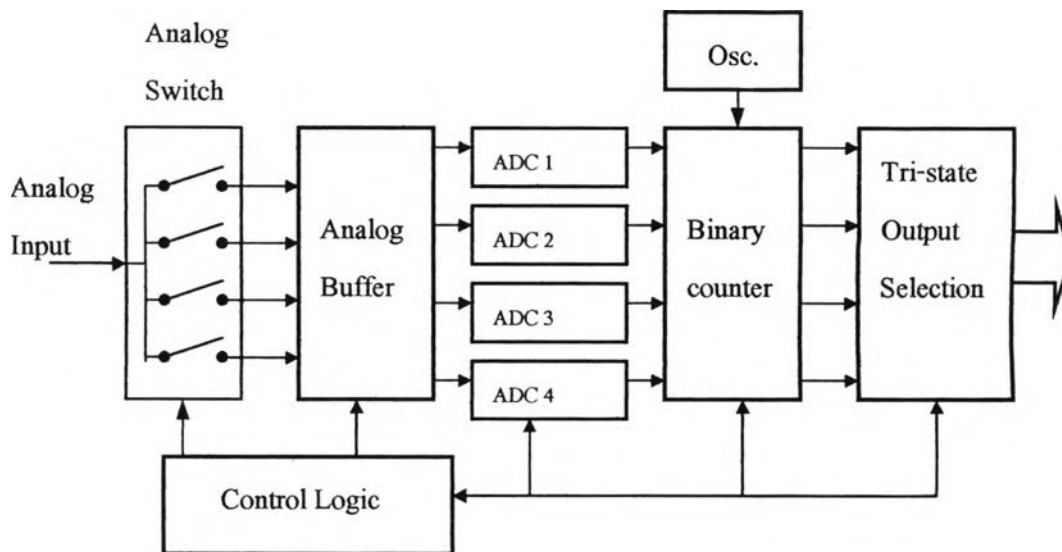
ดังนั้นจึงมีกลุ่มวิจัยที่เสนอแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณพัลส์ทางเข้าให้รวดเร็ว โดยไม่ต้องรอกการแปลงข้อมูลเชิงตัวเลข โดยการสร้าง analog buffer register ไว้หน้าวงจรแปลงผันสัญญาณ ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ต่อเนื่องกัน ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.12



Operating principle of an analog buffer register (derandomizer)

รูปที่ 2.12 แผนภาพการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ ADC ชนิดวิตคินสัน

แต่ในเชิงพาณิชย์ยังไม่พบว่ามีการใช้เทคนิคนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจรแปลงผันสัญญาณชนิดวิตคินสัน เนื่องจากปัญหาเรื่องการสูญเสียประจุบนตัวเก็บประจุที่เวลาอ่านค่าต่างกันทั้งนี้เพราะ ADC จะต้องใช้เวลาแปลงข้อมูลต่างกันจะมีผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสูงและเทคโนโลยีทางด้าน analog memory ปัจจุบันไม่มีการพัฒนา ให้หักเหกับทางดิจิทัล ในงานวิจัยนี้จึงนำแนวทางการเพิ่มความสามารถในการรับสัญญาณพัลส์ ด้วยการสร้างวงจรแปลงผันสัญญาณมากกว่า 1 ชุด ทำงานขนานกัน ในลักษณะวงจรแปลงผันชนิดวิตคินสันอาร์เรย์



รูปที่ 2.13 แผนภาพแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ ADC วิตคินสันอาร์เรย์ 4 ชุด

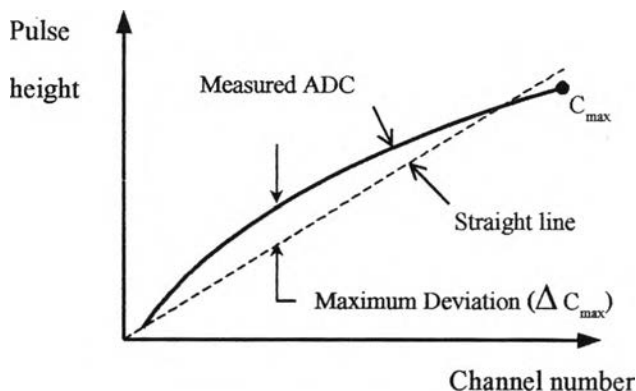
#### 2.4.2 ความเป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงผันความสูงของพัลส์ (linearity)

ความเป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงผันความสูงของพัลส์มีความสำคัญมากกับระบบวิเคราะห์อนุภาคนิวเคลียร์ ถ้าระบบวัดมีความเป็นเชิงเส้นสูงเมื่อแปลงสัญญาณพัลส์ไปเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข แสดงเป็นสเปกตรัมของการแจกแจงพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์แล้วจะสามารถอ่านค่าของพลังงานและปริมาณของอนุภาคนิวเคลียร์จากสเปกตรัมได้ถูกต้องมากกว่า การวัดความเป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงผันความสูงของสัญญาณพัลส์ จะวัดในรูปของความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแบ่งออกเป็น ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอินติกรัล (Integral Non-linearity) และความไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Non-linearity)

ก . ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอินติกรัล (Integral Non-linearity; INL) เป็นการทดสอบการทำงานของระบบ ด้วยการอ่านค่าของช่องการวัด (channel number) ที่ได้จากพัลส์ที่ทราบค่าความสูง (pulse amplitude) โดยทำการเปลี่ยนค่าความสูงของพัลส์ และนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูง

ของพัลส์กับช่องการวัดที่ได้ดังรูปที่ 2.14 แล้วหาค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดที่เกิดขึ้นเทียบกับกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบที่ได้จากการทำ least square fitting ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นคำนวณได้จาก <sup>(4)</sup>

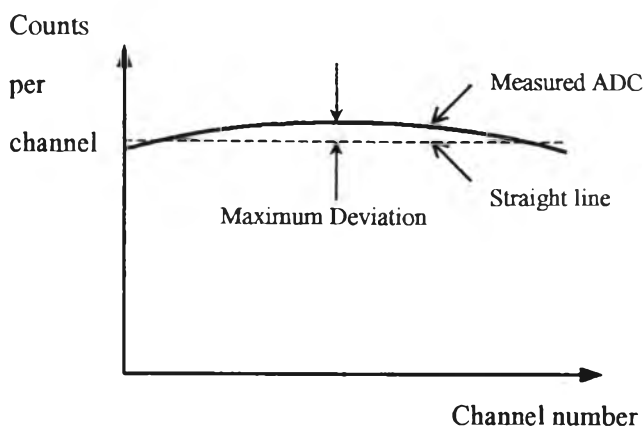
$$INL = \frac{\Delta C_{max}}{C_{max}} \times 100\% \dots\dots\dots(10)$$



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของพัลส์กับตำแหน่งช่องวิเคราะห์ในการพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอินติกรัล

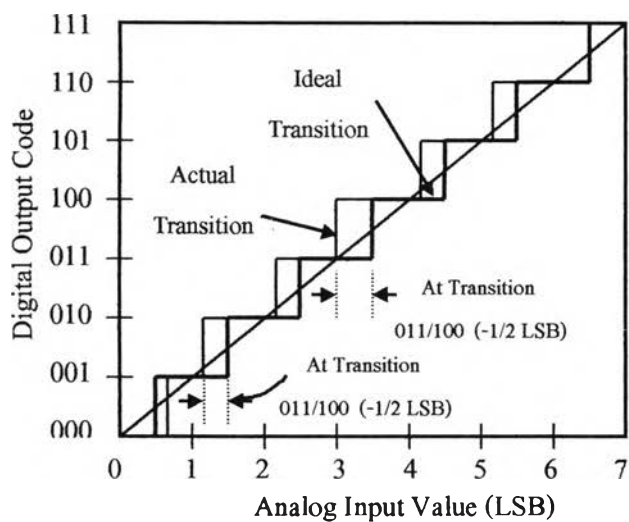
ข. ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Non-linearity; DNL) เป็นการทดสอบการทำงานของระบบที่ใช้การวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ที่มีการกระจายความสูงของพัลส์เปลี่ยนแปลงจาก 0-10 โวลต์ เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของความกว้างช่องวิเคราะห์ โดยจะทำการแปรเปลี่ยนความสูงของพัลส์ 0-10 โวลต์ ที่อัตราพัลส์คงที่แบบต่อเนื่อง ด้วยเวลาที่คงที่สแกนไปและกลับ แล้วนำค่าที่อ่านได้ของปริมาณวิเคราะห์ในแต่ละช่องการวัดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการวัดในแต่ละช่องวิเคราะห์กับช่องวิเคราะห์ เพื่อหาค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของความกว้างช่องวิเคราะห์เทียบกับเส้นกราฟเปรียบเทียบจากการทำ least square fitting ดังรูปที่ 2.15 ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นคำนวณได้จาก

$$DNL = \frac{\text{maximum width} - \text{minimum width}}{\text{Average width}} \dots\dots\dots(11)$$

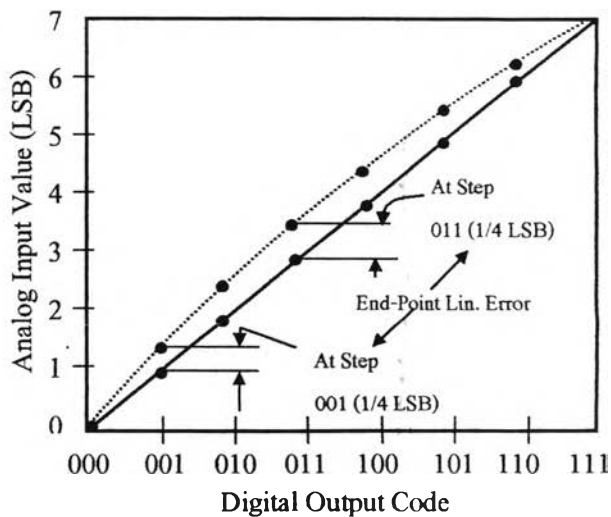


รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับพัลส์กับตำแหน่งช่องวิเคราะห์ในการพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นแบบคิฟเฟอร์เรนเซียล

วงจรแปลงผันสัญญาณชนิดแฟลชคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ใช้เวลาในการแปลงผันสัญญาณสั้นที่สุด แต่มีข้อเสียที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นชนิดคิฟเฟอร์เรนเซียล (DNL) สูงมาก ไม่สามารถนำมาใช้กับระบบที่วิเคราะห์ที่ต้องการความสามารถในการแจกแจงพลังงานสูงได้ ในขณะที่วงจรแปลงผันสัญญาณชนิดซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชันเวลาที่ใช้ในการแปลงผันคงที่ ความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของการประมาณค่าการปัดเศษในหลักสุดท้ายจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการแปลงค่า ทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นทั้ง DNL และ INL ดังในรูปที่ 2.16 และ 2.17<sup>(5)</sup>



(a) ADC

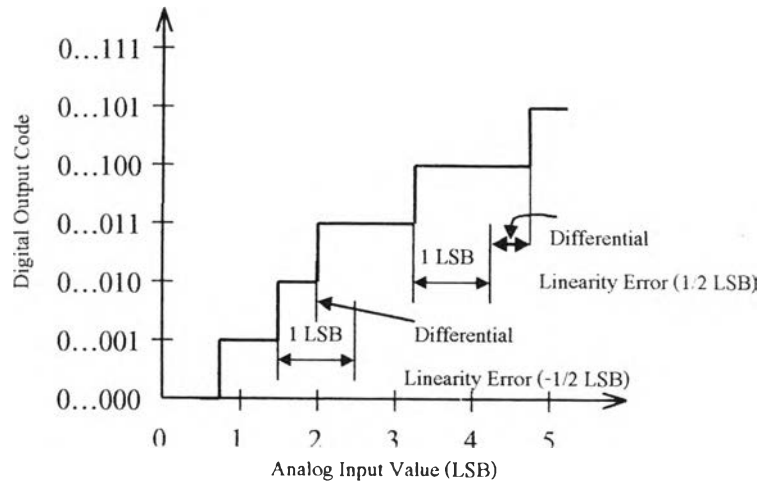


(b) DAC

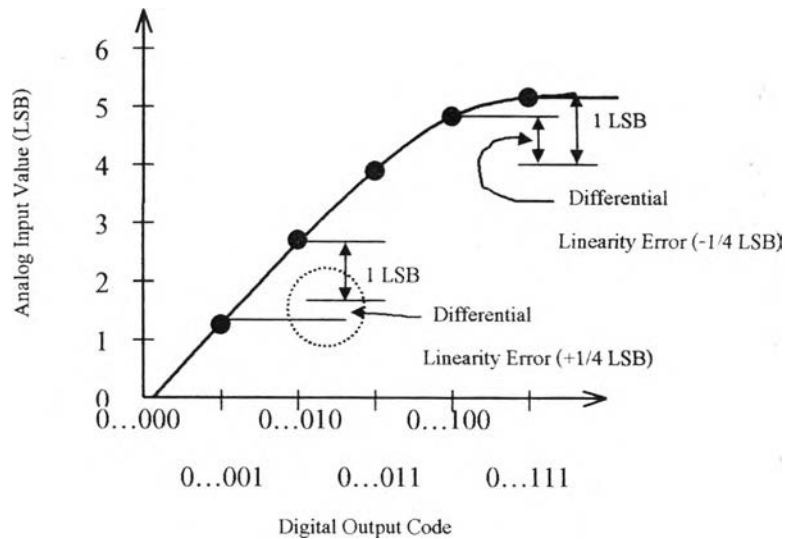
End-Point Linearity Error of a linear 3-Bit Natural Binary-coded ADC or DAC

รูปที่ 2.16 Integral Nonlinearity (INL) Error





(a) ADC

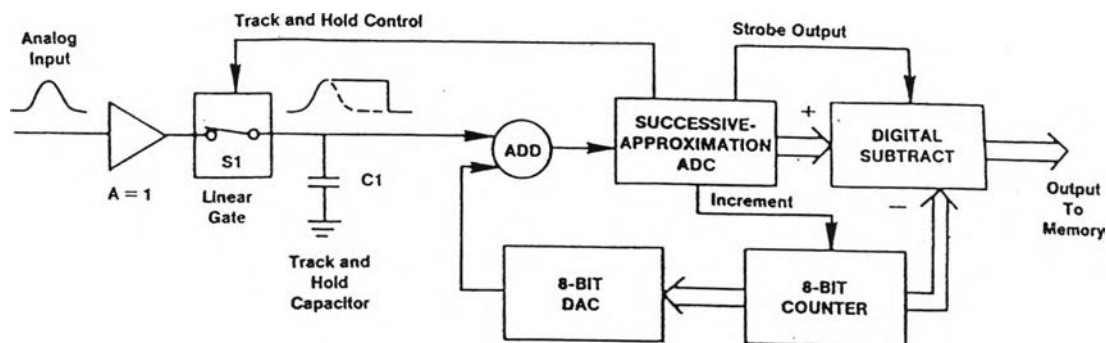


(b) DAC

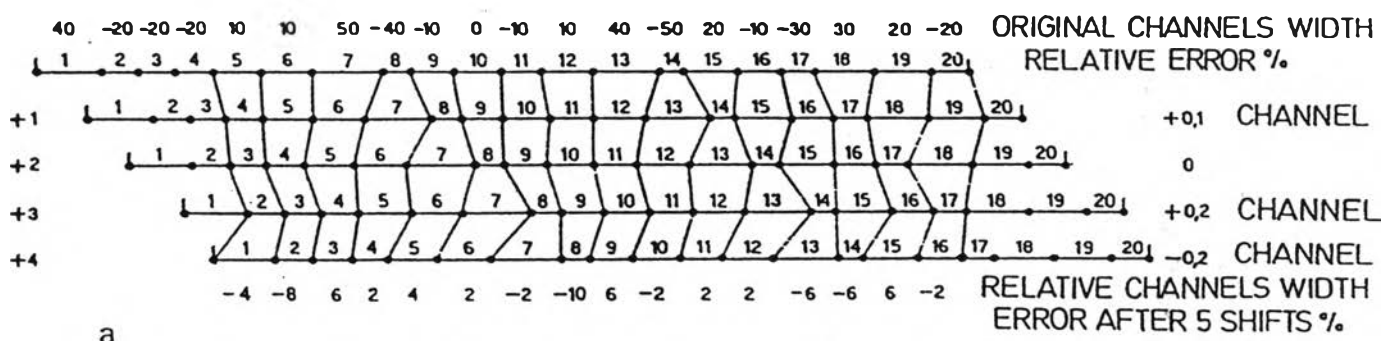
Differential Linearity Error of a Linear ADC or DAC

### รูปที่ 2.17 Differential Nonlinearity (DNL)

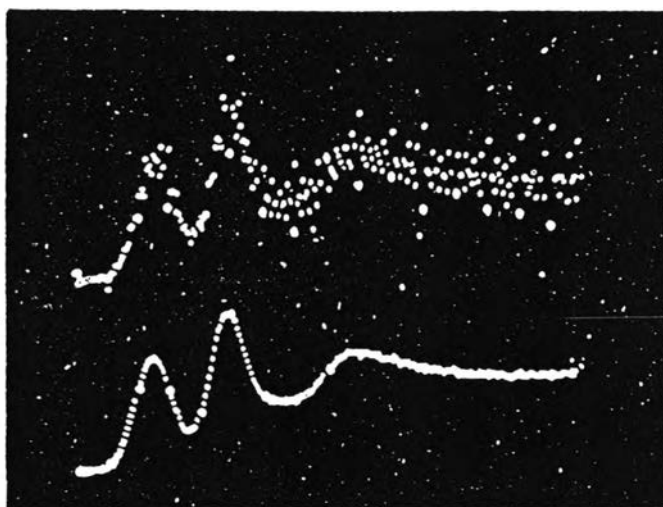
การปรับแก้ความไม่เป็นเชิงเส้น ของวงจรแปลงผันสัญญาณแบบซัคเซสซีฟแอสซิมเมตริกที่ใช้ในเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องซึ่งผลิตในเชิงพาณิชย์จะใช้เทคนิค sliding scale หรือ wobble scale เพื่อทำให้เกิดความเบี่ยงเบนในการแปลงผันค่าไบนารีน้อยที่สุด จึงจำเป็นต้องเพิ่มวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้าไปเพื่อช่วยให้มีความเป็นเชิงเส้นดีขึ้น ดังแสดงภาพการทำงานในรูปที่ 2.18 และผลของการวิเคราะห์สเปกตรัมในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 The successive - Approximation ADC with Sliding Scale Linearization. <sup>(6)</sup>



a



b

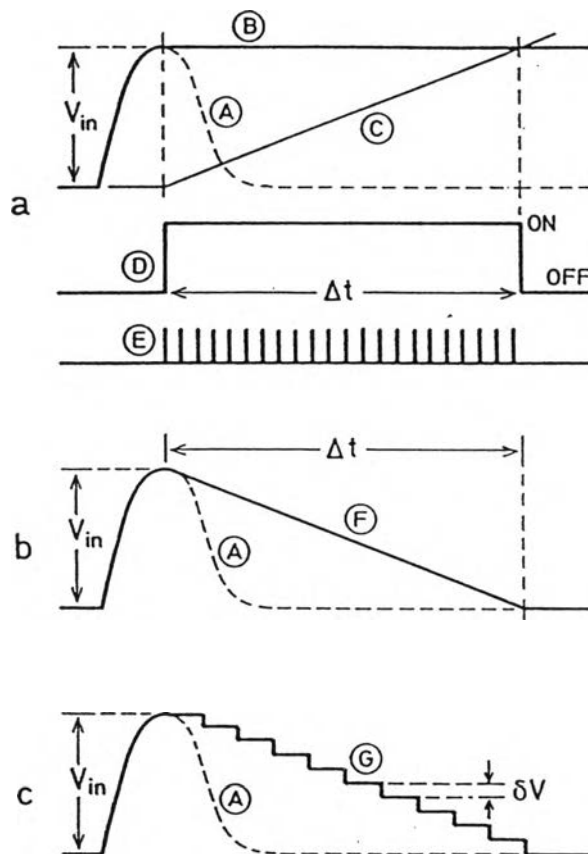
a and b. Channel width smoothing by means of the sliding scale principle according to COTTINI et al. [4.089]. Left side, top: Spectrum display without smoothing; bottom: improved by smoothing

รูปที่ 2.19 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมจากวงจรแปลงผันสัญญาณแบบซิกเซสซีฟแอฟพรอกซิมชัน

อย่างไรก็ตามวงจรแปลงสัญญาณชนิดวิดิคินสัน ยังคงรักษาข้อดีของการให้ความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณสูง เนื่องจากการกำเนิดข้อมูลเชิงตัวเลข(digitizing) ด้วยการนับสัญญาณนาฬิกา ความคลาดเคลื่อนจะเกิดได้จากตัวแปร 3 ส่วนคือ ขนาดสัญญาณพัลส์ที่รับเข้ามาในวงจร pulse stretcher ความเสถียรของการกำเนิดสัญญาณแรมพ์(slope) และความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณแรมพ์ ดังแผนภาพในรูปที่ 2.20

$$DNL = \frac{(d_{vin} - d_{vin}')}{d_{vin}'} \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อ  $d_{vin} = \text{pulse height ในช่วง } \delta v$   
 $d_{vin}' = \text{channel width ที่วิเคราะห์ที่ } \delta v$



รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงความคลาดเคลื่อนในการแปลงผันสัญญาณและก่อให้เกิด DNL