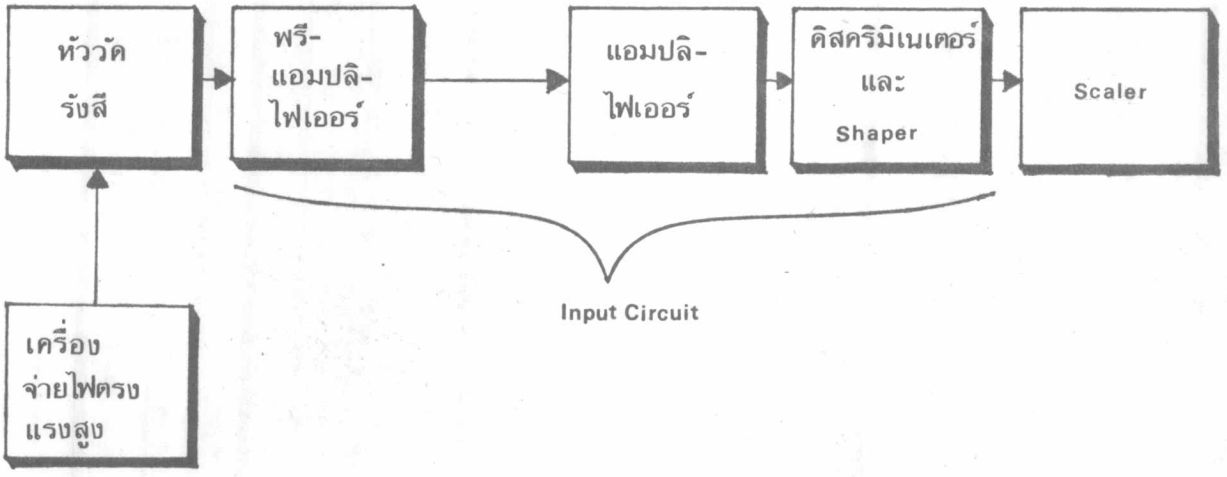
บทที่ ๓

วงจรนับสัญญาณรังสี (Counting System)

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านไอซี (IC) ก้าวไปไกลขึ้นทุกที IC Operational Amplifier (IC OP AMP)ที่ผลิตออกมาบางแบบ โดยเฉพาะพวกออพแอมป์เอนกประสงค์ มีราคาต่ำมาก ราคาต่ำกว่าทรานซิสเตอร์บางเบอร์เสียอีก และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป อีกทั้งเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก อุปกรณ์ที่จะนำมาต่อประกอบเพื่อให้เป็นวงจรที่ใช้งานได้ ก็ไม่ซับซ้อนยุ่งยากจึงง่ายต่อการออกแบบให้เป็นวงจรที่มีขนาดเล็กกระทัดรัด ข้อดีอีกประการหนึ่งของไอซีออพแอมป์ ก็คือสามารถนำไปดัดแปลงใช้งานได้กว้างขวางหลายรูปแบบ ด้วยประโยชน์ดังที่ได้ยกมาพอเป็นสังเขปนี้ ในงานวิจัยนี้จึงจะได้ลองดัดแปลงใช้ไอซีออพแอมป์เป็นวงจรนับสัญญาณรังสีแทนวงจรทรานซิสเตอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

005290

๓.๑ วงจรนับสัญญาณรังสีโดยทั่วไป

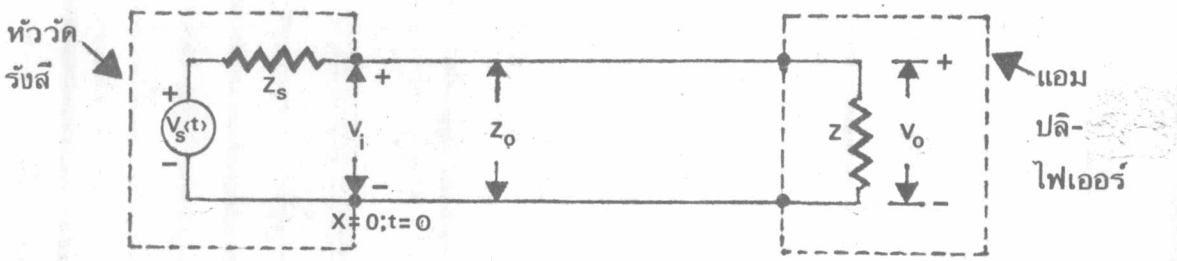


รูปที่ ๓.๑ แผนภาพของระบบนับสัญญาณรังสี

I 17766370

สำหรับพวก Pulse Type Detector วงจรนับสัญญาณพัลส์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยวงจรส่วนต่าง ๆ ดังแสดงเป็นแผนภาพไว้ในรูปที่ ๓.๑ จำนวนสัญญาณพัลส์ที่ออกมาจากหัววัดรังสีจะมีค่าเท่ากับจำนวนอนุภาครังสีที่วิ่งผ่านหลอดคูณด้วยประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอง สัญญาณพัลส์ที่ออกมาจากหัววัดจะเข้าสู่พรี-แอมปลิไฟเออร์ ซึ่งโดยปกติจะอยู่ใกล้กับหัววัดรังสี หน้าที่หลักของพรี-แอมปลิไฟเออร์ก็คือ เป็นตัวเชื่อมโยงอิมพีแดนซ์ของหัววัดรังสี ซึ่งมีค่าสูงมากเข้ากับอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลหรือสาย Coaxial ซึ่งมีค่าต่ำ ด้วยเหตุนี้บางครั้งจึงเรียกพรี-แอมปลิไฟเออร์ว่าเป็นตัว Impedance Transformer

ในกรณีที่แอมปลิไฟเออร์มิได้อยู่ใกล้กับหัววัดรังสี ย่อมจะต้องใช้สาย Coaxial นำสัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีไปยังแอมปลิไฟเออร์ แต่โดยที่สาย Coaxial เองก็มีอิมพีแดนซ์ประจำตัวเรียกว่า Characteristic Impedance (Z_o) ดังนั้นเมื่อต่อสาย Coaxial เข้ากับหัววัดรังสี ซึ่งจะเขียนเป็นวงจรได้ดังนี้



เมื่อ Z_S คืออิมพีแดนซ์ขาออกของหัววัดรังสี

Z คืออิมพีแดนซ์ขาเข้าของแอมปลิไฟเออร์

V_i คือขนาดของสัญญาณพัลส์ที่จะส่งไปตามสาย Coaxial

เมื่อมองจากทางหัววัดรังสีไปทางขวามือ ก็จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์ Z_o ต่อคร่อมอยู่ ดังนั้นขนาดของสัญญาณพัลส์ที่จุดต่อระหว่างหัววัดรังสีกับสาย Coaxial เมื่อเวลา t = 0 จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$V_i(t) = \frac{Z_o}{Z_o + Z_S} V_S(t)$$

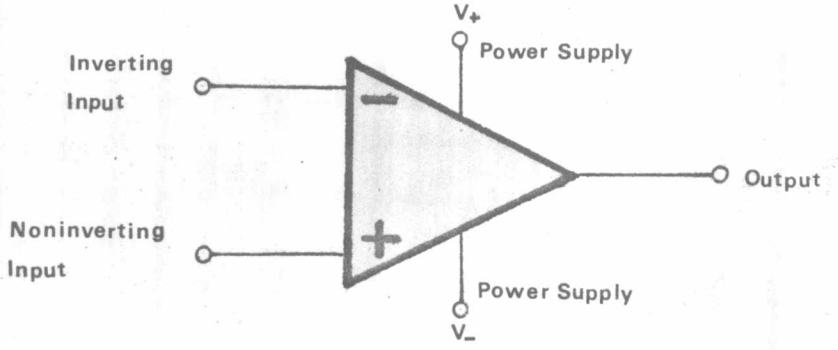
จะเห็นได้ว่า Z_o มีค่าน้อยกว่า Z_S มากเท่าใด $V_i(t)$ ก็จะมีค่าน้อยกว่า $V_S(t)$ ลงไปด้วย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ วงจรพรี-แอมปลิไฟเออร์โดยทั่วไป จึงมักจะเป็นวงจร Emitter-Follower เพราะวงจรชนิดนี้มีคุณสมบัติว่า อิมพิแดนซ์ขาเข้ามีค่าสูงมาก แต่อิมพิแดนซ์ขาออกมีค่าต่ำมาก

วงจรถัดไปก็คือ วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรแอมปลิไฟเออร์ ซึ่งจะมีหน้าที่ขยายสัญญาณเพื่อให้สัญญาณพัลส์โตพอที่จะไปขับให้ Scaler ทำงานได้ ทั้งนี้จะมีปุ่มเลือกปรับค่า Gain โดยปกติวงจรแอมปลิไฟเออร์ จะต้องเป็นวงจรที่เรียกว่า Linear Amplifier โดยเฉพาะในกรณีที่หัววัดเป็นพวก Ionization Chamber หรือ Proportional Counter เป็นต้น

ดิสคริมิเนเตอร์ (Discriminator) เป็นวงจรที่ใส่เข้ามาเพื่อลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ใช่สัญญาณพัลส์จากอนุภาครังสี สัญญาณรบกวนนี้มีต้นตออยู่หลายแห่งด้วยกัน เช่นสัญญาณรบกวน ๕๐ เฮิรตซ์จากแหล่งจ่ายไฟ สัญญาณรบกวนจากแหล่งภายนอกอื่น ๆ เช่น จากหลอดฟลูออร์เรสเซนต์ เป็นต้น โดยทั่วไปดิสคริมิเนเตอร์จะทำหน้าที่เป็น Shaper ด้วย โดยสัญญาณที่ออกมาจากวงจรส่วนนี้จะเป็นสัญญาณที่มีความสูงคงที่ และมีความกว้างของสัญญาณคงที่ด้วยเช่นกัน ซึ่งโดยปกติจะเป็นสัญญาณรูป Square Pulse จากนี้สัญญาณรูป Square Pulse จะผ่านเข้าสู่ Scaler ซึ่งจะนับสัญญาณพัลส์ออกมาเป็นตัวเลขในช่วงหนึ่งของเวลา

๓.๒ ออพ แอมป์ (OP AMP - Operational Amplifier)

ออพแอมป์เป็น แอมปลิไฟเออร์ที่มีอัตราขยายสูงมาก โดยทั่วไปไอซีออพแอมป์จะมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง ๒๐,๐๐๐ ถึง ๑,๐๐๐,๐๐๐ เขียนแทนได้ด้วยสัญญลักษณ์

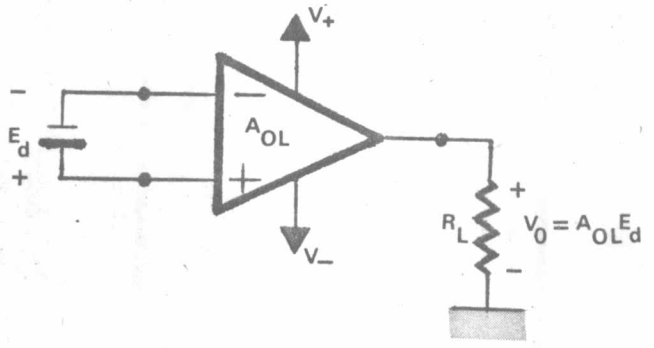


รูปที่ ๓.๒ สัญญลักษณ์ของ ออพ แอมป์

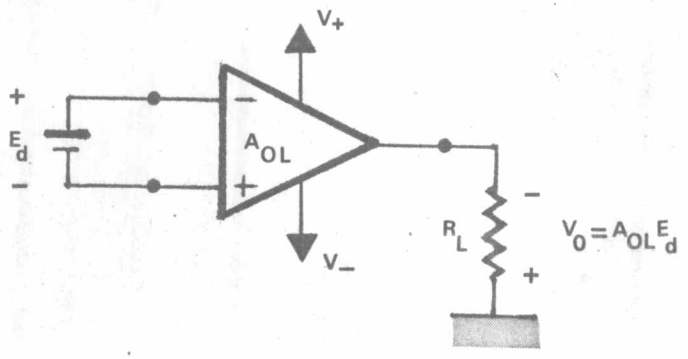
จากรูปที่ ๓.๒ จะเห็นได้ว่าออพแอมป์มีทางเข้าของสัญญาณ ๒ ทาง ทางเข้าด้านที่มีเครื่องหมายลบ เรียกว่า Inverting Input ทางเข้าด้านที่มีเครื่องหมายบวก เรียกว่า Noninverting Input ในกรณีที่สัญญาณถูกป้อนเข้าทางขาลบ โดยที่ต่อขาบวกลงกราวน์ สัญญาณขาออกจะมีขั้วตรงข้ามกับสัญญาณขาเข้า แต่ถ้าป้อนสัญญาณเข้าทางขาบวก สัญญาณขาออกจะมีขั้วเหมือนกับสัญญาณขาเข้า นั่นคือ ถ้าสมมุติว่า สัญญาณที่ป้อนเข้าเป็นสัญญาณไฟสลับ แสดงว่าสัญญาณที่ป้อนเข้าทางด้านขาลบ จะต่างเฟส (Phase) กับสัญญาณขาออก ๑๘๐ องศา แต่สัญญาณที่ป้อนเข้าทางด้านขาบวก จะไม่แตกต่างจากสัญญาณขาออก ดังนั้น ถ้าป้อนสัญญาณที่เหมือนกันทุกประการเข้าไปที่ขาบวกและขาลบพร้อมกัน สัญญาณขาออกก็จะมีเฟสต่างกัน ๑๘๐ องศา ซึ่งสัญญาณจะหักล้างกันหมด

นั่นคือ สำหรับออพแอมป์แล้ว สัญญาณขาออกจะปรากฏให้เห็นได้ก็ต่อเมื่อสัญญาณขาเข้าที่ขาบวกและขาลบจะต้องไม่เหมือนกัน ด้วยเหตุนี้จึงเรียกขาเข้าทั้งสองว่า Differential Input Terminals ความต่างศักย์ระหว่างขาบวกเมื่อเทียบกับขาลบเรียกว่า Differential Input Voltage

ส่วนขาออกของออพแอมป์จะมีขาเดียว เรียกว่า Single-ended Output กระแสที่จะถูกดึงออกจากขาออกนี้มีขีดจำกัด สำหรับออพแอมป์โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ ๕ ถึง ๑๐ มิลลิแอมป์ แต่สำหรับออพแอมป์บางเบอร์ เช่น เบอร์ ๗๔๑ ซึ่งมีวงจรป้องกันการลัดวงจรอยู่ภายใน กระแสสูงสุดสามารถทนได้ถึง ๒๕ มิลลิแอมป์ ศักดาไฟฟ้าที่ขาออกนี้ (เมื่อเทียบกับกราวน์) จะขึ้นอยู่กับระดับความต่างศักย์ระหว่างขา Inverting (-) กับขา Noninverting (+) ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



(ก) V_o จะมีศักย์เป็นบวกเมื่อขา Noninverting (+) เป็นบวกเมื่อเทียบกับขา Inverting (-)



(ข) V_o จะมีศักย์เป็นลบเมื่อขา Noninverting (+) เป็นลบเมื่อเทียบกับขา Inverting (-)

<u>รูปที่ ๓.๓</u> แสดงให้เห็นว่าขั้วของ V_o ขึ้นอยู่กับขั้วของ Differential Input Voltage (E_d)

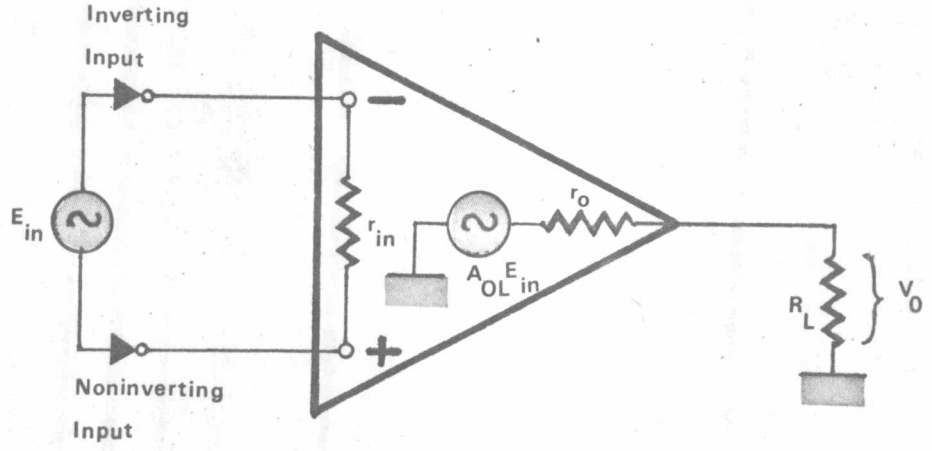
ในที่นี้ E_d คือ Differential Input Voltage

V_o คือ Output Voltage

และ A_{OL} คือ อัตราขยายของออพแอมป์เรียกว่า Open-Loop Voltage Gain (เพราะไม่ได้ต่อวงจร Feed Back)

จากรูปที่ ๓.๓ จะเห็นได้ว่า V_o ขึ้นอยู่กับ E_d และ A_{OL} แต่ถึงแม้ว่าค่า A_{OL} ของออพแอมป์จะมีค่ามาก ดังที่กล่าวมาแล้วก็ตาม ค่าของ V_o ก็จะมีขีดจำกัด ขีดจำกัดสูงสุดของ V_o เรียกว่า Positive Saturation Voltage ($+V_{sat}$) และขีดจำกัดต่ำสุดของ V_o เรียกว่า Negative Saturation Voltage ($-V_{sat}$) ซึ่ง V_{sat} นี้จะมีค่าได้อย่างมากที่สุดก็เท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้เลี้ยงออพแอมป์ (V_{supply})

ในการนำออพแอมป์ไปใช้งานจำเป็นต้องใช้คุณสมบัติในอุดมคติของออพแอมป์บางประการ ซึ่งกำหนดไว้ว่า



รูปที่ ๓.๔ วงจรสมมูลย์ของออพแอมป์ในอุดมคติ

๑. อัตราขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าอนันต์ ($A_{OL} = \alpha$) ด้วยข้อกำหนดนี้ทำให้มีผลตามมาว่า แม้มีสัญญาณเข้า (E_{in}) ต่ำ ๆ ก็จะมีสัญญาณทางขาออก (V_o) แล้ว

๒. ความต้านทานขาเข้ามีค่าอนันต์ ($r_{in} = \alpha$) ข้อกำหนดนี้ทำให้มีผลว่าจะไม่มีกระแสไหลเข้าไปในขาบวกและขาลบของออพแอมป์เลย

๓. ความต้านทานขาออกมีค่าเป็นศูนย์ ($r_o = 0$)

๓.๓ คอมแพแรเตอร์ (Comparator)

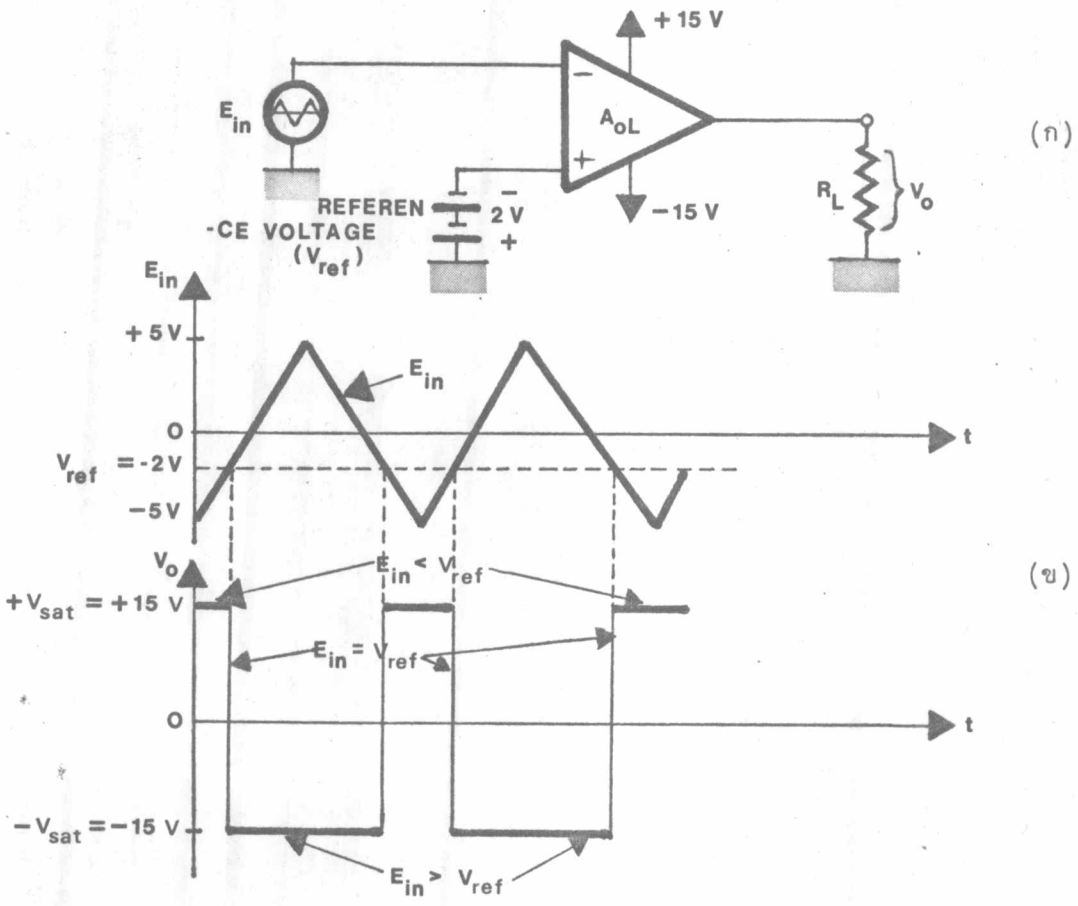
โดยอาศัยหลักการของออพแอมป์ที่ว่า

ก. จะมีสัญญาณขาออก ($V_o \neq 0$) ก็ต่อเมื่อสัญญาณที่เข้าขา Inverting กับ Noninverting แตกต่างกัน ($Ed \neq 0$)

ข. ขั้วของ V_o ขึ้นอยู่กับขั้วของ E_d ระหว่างขา Inverting กับขา Noninverting

สามารถนำออพแอมป์มาใช้ในงานทางด้าน Nonlinear ได้เช่น ใช้ทำเป็นวงจรคอมแพแรเตอร์ ในงานทางด้าน Nonlinear ที่ไม่ต้องเกี่ยวเนื่องกับความเร็ว (ของสัญญาณ) ที่สูงมากนัก การใช้ไอซีออพแอมป์แทนดิจิตอลไอซี ก็มีข้อดีอยู่บ้าง กล่าวคือ สามารถนำวงจรออพแอมป์ที่ทำงานแบบ Nonlinear ไปต่อใช้กับวงจรออพแอมป์ที่ทำงานแบบ Linear ได้โดยง่าย เพราะสัญญาณขาเข้าและขาออกเข้ากันได้ อีกทั้งสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟรวมกันได้

วงจรคอมแพแรเตอร์เป็นวงจรที่นำเอาสัญญาณขาเข้าไปเปรียบเทียบกับ Reference Voltage ที่ตั้งไว้ที่อีกขาหนึ่ง ยกตัวอย่าง เช่น ในวงจรต่อไปนี้



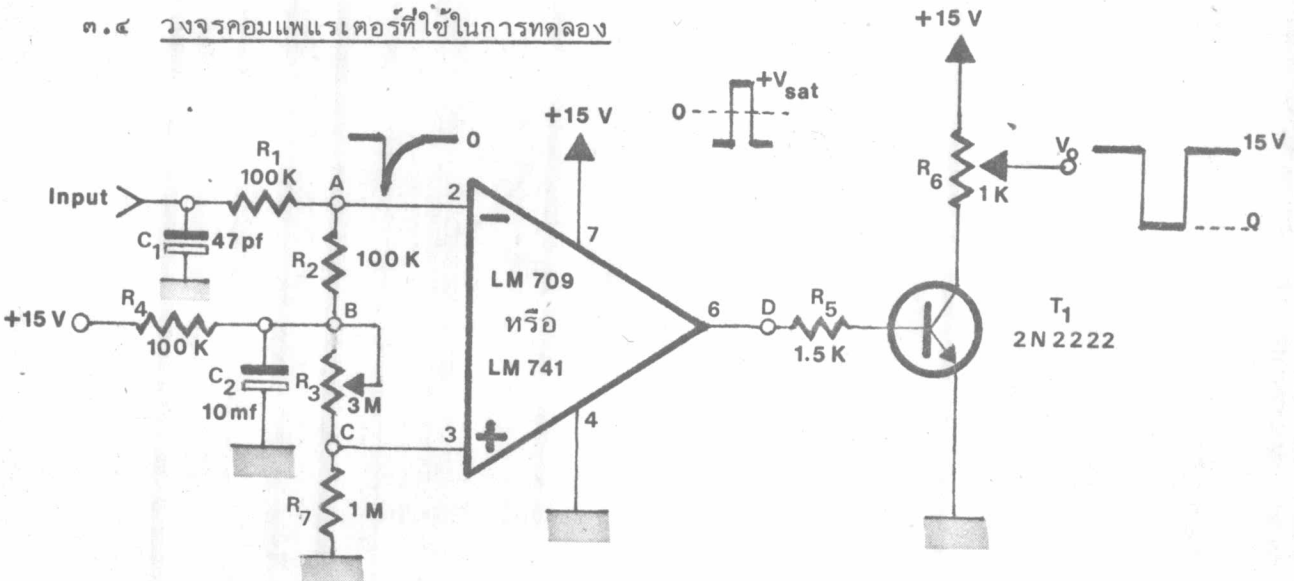
รูปที่ ๓.๕ (ก) วงจรคอมแพแรเตอร์

(ข) รูปสัญญาณของ E_{in} กับ V_o

สัญญาณ E_{in} ซึ่งเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ถูกป้อนเข้าที่ขาลบมีความสูงของสัญญาณ ±๕ โวลต์ ส่วนที่ขาบวก ตั้ง Reference Voltage ไว้ที่ -๒ โวลต์ เมื่อสัญญาณ E_{in} มีค่ามากกว่า V_{ref} นั่นคือ ขาลบมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อเทียบกับขาบวก เพราะฉะนั้น V_o จะมีชั้วเป็นลบ มีค่าเท่ากับ (-) V_{sat} แต่เมื่อ E_{in} มีค่าน้อยกว่า V_{ref} เมื่อใด เมื่อนั้นขาลบจะมีศักดาไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับขาบวก เพราะฉะนั้น V_o จะเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางบวก มีค่าเท่ากับ (+) V_{sat}

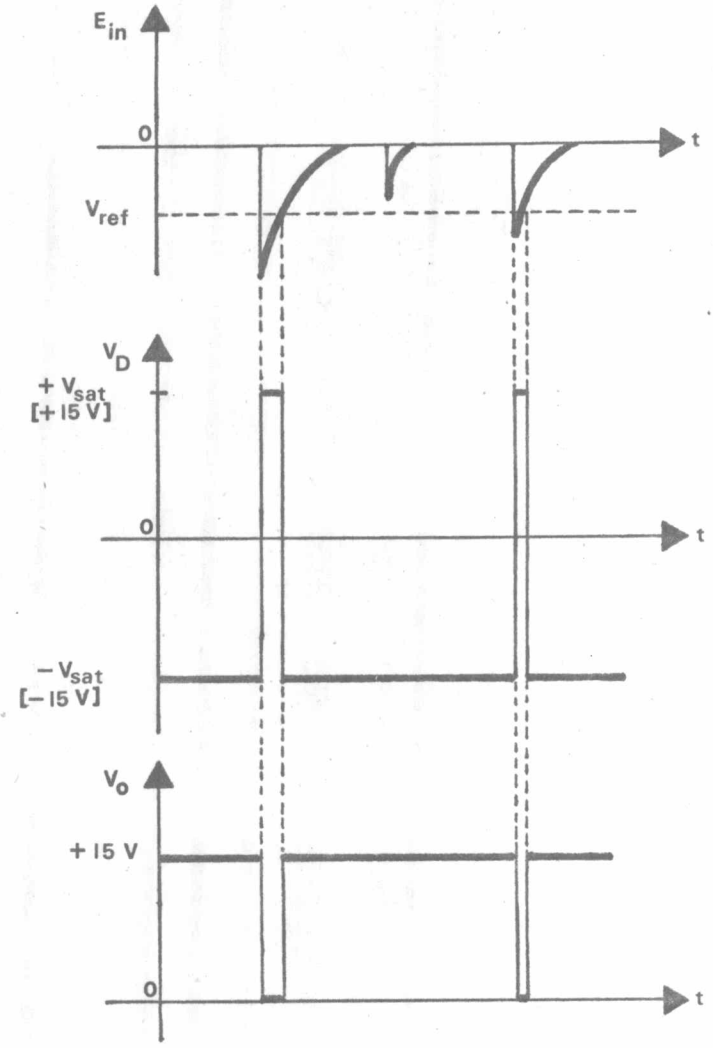
ด้วยแนวทางการทำงานของไอซีออพแอมป์ในลักษณะนี้ จึงสามารถนำไอซีออพแอมป์มาทำเป็นวงจร ส่วน Input Circuit ในระบบนับสัญญาณรังสีตามรูปที่ ๓.๑ ได้เพราะโดยการเลือกปรับค่า Reference Voltage ก็สามารถตัดสัญญาณรบกวนออกไปได้ ซึ่งทำหน้าที่เช่นเดียวกับวงจรดิสคริมิเนเตอร์ นอกจากนั้นโดยคุณสมบัติของไอซีออพแอมป์เองคือมีความต้านทานขาออกต่ำมาก ส่วนความต้านทานขาเข้ามีค่าสูง จึงทำหน้าที่เป็นพรี-แอมปลิไฟเออร์ไปในตัว สัญญาณที่ออกจากไอซีออพแอมป์ นอกจากจะมีความสูงเท่ากับ $\pm V_{sat}$ แล้ว ยังมีลักษณะเป็น Square Pulse ซึ่งเปรียบเสมือนทำหน้าที่เป็นแอมปลิไฟเออร์ และ Wave Shaper ด้วยอีกโสตหนึ่ง

๓.๔ วงจรคอมแพแรเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ๓.๖ แสดงวงจรคอมแพแรเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เลขที่ประจำขาไอซีออพแอมป์กำหนดตามไอซี ชนิด Dual - In - Line Package ๘ ขา

ในการทดลองนี้ ได้ใช้ไอซีออพแอมป์เบอร์ LM 709 เพราะเป็นไอซีออพแอมป์เอนกประสงค์ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปและราคาก็ไม่แพงนัก ไอซีเบอร์ 709 นี้สามารถใช้เบอร์ LM 741 แทนได้ เพราะมีขาตรงกันทุกประการ Reference Voltage (V_{BC}) สามารถเลือกตั้งได้ตั้งแต่ ๐ - ๑๐ โวลต์ โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานของ R_3 ศักดาไฟฟ้าที่จุด A ถือว่าเท่ากับที่จุด B เพราะใช้คุณสมบัติของออพแอมป์ที่ว่า ความต้านทานขาเข้ามีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงถือว่าไม่มีกระแสไหลเข้าไปในขา Inverting (-) E_{in} คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R_2 T_1 เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N 2222 ทำหน้าที่เป็น Switching Transistor, เพื่อให้ V_o เป็นสัญญาณพัลส์ทางลบแต่อย่างเดียว ผลตอบสนองของคอมแพแรเตอร์ต่อสัญญาณพัลส์จากหัววัดไกเกอร์มีลักษณะดังนี้

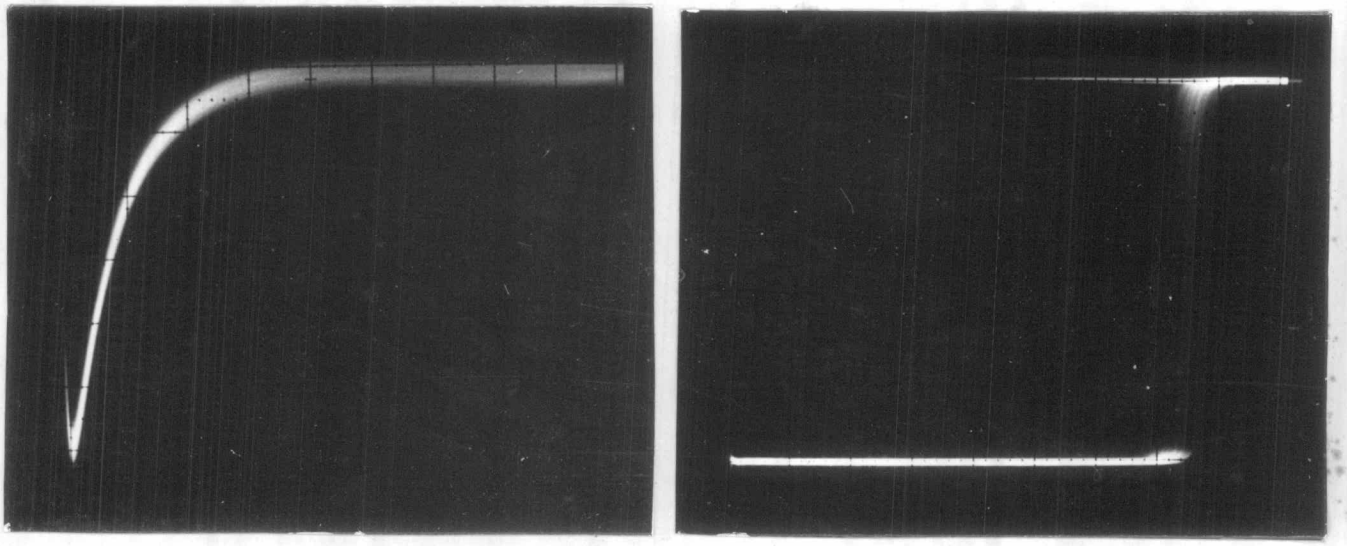


(ก) ลักษณะสัญญาณพัลส์ตกคร่อม R_2 (100 kΩ)

(ข) ลักษณะสัญญาณที่ขาออกของออพ แอมป์

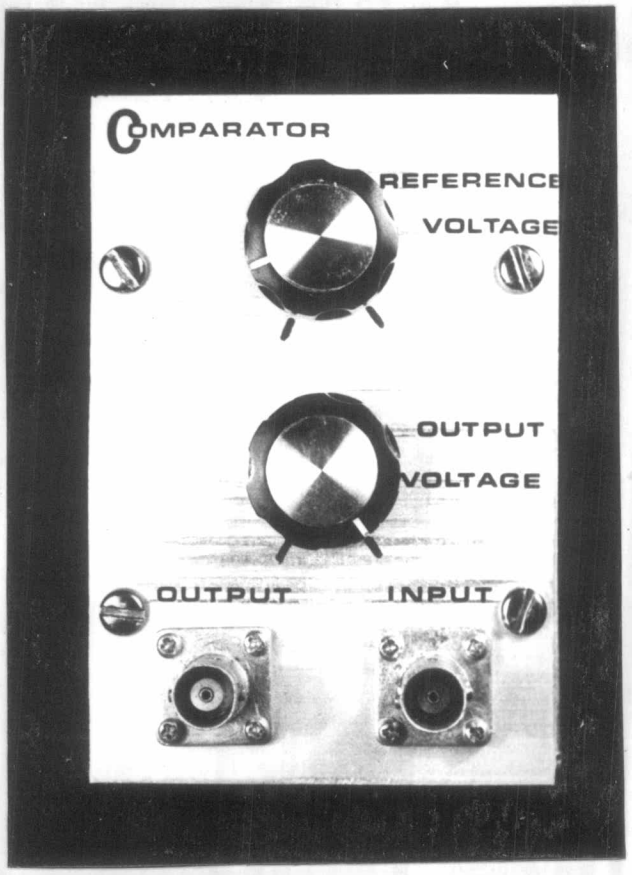
(ค) ลักษณะสัญญาณ V_o

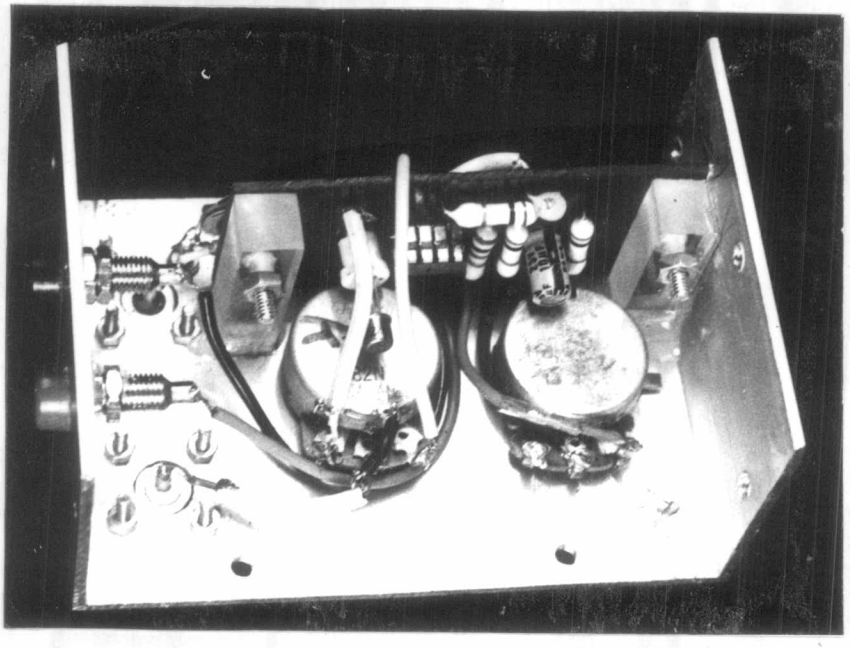
รูปที่ ๓.๗ ผลตอบสนองของวงจรคอมแพแรเตอร์ต่อสัญญาณพัลส์ทางลบจากหลอดไกเกอร์



(ก) สัญญาณพัลส์จากหลอดไกเกอร์ (ข) สัญญาณพัลส์จากคอมแพแรเตอร์

รูปที่ ๓.๘ แสดงลักษณะสัญญาณพัลส์ที่ออกจากหัววัดไกเกอร์ และที่ออกจากคอมแพแรเตอร์





หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

รูปที่ ๓.๙ แสดงลักษณะภายนอกและภายในของคอมแพแรเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง