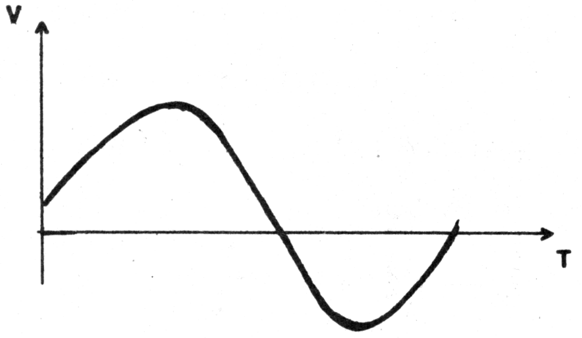
ใบความรู้ที่ 4

เรื่อง หลักการระบบ Pulse Code Modulation (PCM)

4.1 สัญญาณ Analog และการส่ง

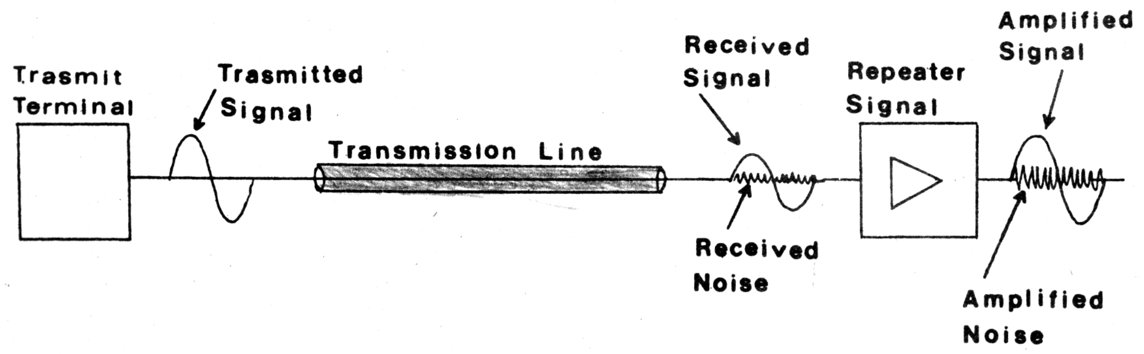
สัญญาณ Analog ในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้าหมายถึงสัญญาณที่ Amplitude ของมันแปรผันตามเวลาต่อเนื่องกันกับเวลา ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สัญญาณ Analog

สัญญาณ Analog ที่ใช้กันโดยทั่วไปในการรับส่งได้แก่ สัญญาณโทรทัศน์ สัญญาณวิทยุกระจายเสียง สัญญาณโทรศัพท์ เป็นต้น เมื่อวิเคราะห์รูปคลื่นของสัญญาณ Analog อันหนึ่งจะพบว่าประกอบด้วย Sine Wave ที่ความถี่ต่างๆ กันโดยทั่วไปแล้วความถี่ของสัญญาณ Analog ที่ใช้กับโทรศัพท์ จะใช้ในย่านตั้งแต่ 300 Hz ถึง 3,400 Hz เท่านั้น

การส่งสัญญาณ Analog นั้น ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องส่งสัญญาณข่าวสารทาง Amplitude ต่อเนื่องกันไปตลอดเวลา จากการทดลองค้นคว้าพบว่า ถ้าทำการสุ่มตัวอย่าง สัญญาณ Analog ด้วยช่วงเวลาที่สม่ำเสมอในอัตราอย่างน้อยเป็น 2 เท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณนั้นๆ แล้ว ตัวอย่างที่สุ่มมาได้จะบรรจุข่าวสารของสัญญาณเดิมครบถ้วน เช่นสัญญาณ Analog ที่ใช้กับโทรศัพท์มีความถี่สูงสุด 3,400 Hz ดังนั้นถ้าทำการสุ่มตัวอย่างเป็นช่วงสม่ำเสมอในอัตรา อย่างน้อย = 2 x 3400 = 6800 ตัวอย่างต่อวินาทีแล้ว ตัวอย่างที่สุ่มมาได้จะบรรจุไว้ด้วย Amplitude ของสัญญาณเดิมครบถ้วน วิธีการนี้เรียกว่า ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างและจะนำไปใช้ในวิธีการ Pulse Code Modulation

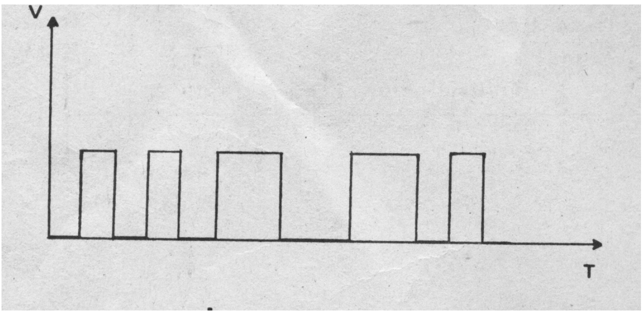


รูปที่ 4.2 ลักษณะการส่งสัญญาณ Analog

การส่งสัญญาณ Analog สามารถกระทำได้ในรูปเดิมของมัน เช่นการส่งสัญญาณโทรศัพท์ระหว่างผู้เช่าโทรศัพท์ในชุมสายเป็นต้น สำรับการส่งสัญญาณ Analog ในระยะทางไกล สิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ก็คือ สัญญาณที่ส่งอ่อนกำลังลงหรือถูกลดทอนและสิ่งรบกวน ที่เสริมเข้ามาตลอดเส้นทางของการส่ง เราจะต้องรักษาระดับของสัญญาณที่ส่งให้สูงกว่าระดับกำลังของสิ่งรบกวนมากๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยการขยายกำลังของสัญญาณที่ส่งเป็นระยะที่เหมาะสมตามเส้นทางการส่ง แต่อย่างไรก็ตามสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นที่ Input ของเครื่องขยายกำลังย่อมจะได้รับการขยายกำลังให้สูงขึ้นไปพร้อมกับตัวสัญญาณที่ส่งด้วยดังรูปที่ 1.2 นอกจากนี้การส่งสัญญาณ Analog ในระยะทางไกลๆ ผ่านตัวกลาง และเครื่องขยายเสียงกำลังย่อมจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นอีกด้วย ในการรักษาให้สิ่งรบกวนและความผิดเพี้ยนของสัญญาณ Analog ที่ได้รับปลายทางอยู่ในขอบเขตจำกัดอันพึงยอมให้ได้นั้นจึงต้องมีการออกแบบที่ดีทั้งระบบและอุปกรณ์ที่ใช้

4.2 สัญญาณ Digital และการส่ง

สัญญาณ Digital หมายถึงสัญญาณที่ Amplitude ของมันถูกจัดระดับให้แปรผันไปกับเวลาตามค่าที่กำหนดให้เช่น ถ้าแปรผันอยู่ระหว่าง 2 ค่า เรียกว่า Binary Signal ถ้าแปรผันอยู่ระหว่าง 3 ค่า เรียกว่า Ternary Signal เป็นต้น ดังแสดงตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัญญาณ Digital

สัญญาณ Digital ที่ใช้กันในงานด้านโทรคมนาคมโดยทั่วไปจะเป็นแบบ Binary Signal ทั้งสิ้น ซึ่งลักษณะของพัลซ์ที่มีอยู่ 2 ค่าคือ 0 และ 1 โดยที่ 0 หมายถึงไม่มีพัลซ์ และ 1 หมายถึงมีพัลซ์ เราสามารถจัดกลุ่มของ Binary Signal ให้อยู่ในรูปรหัสเพื่อใช้แทนค่าระดับของแรงดันในการกำหนดจำนวน Bit ของ Binary Code นั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนระดับแรงดันเช่น

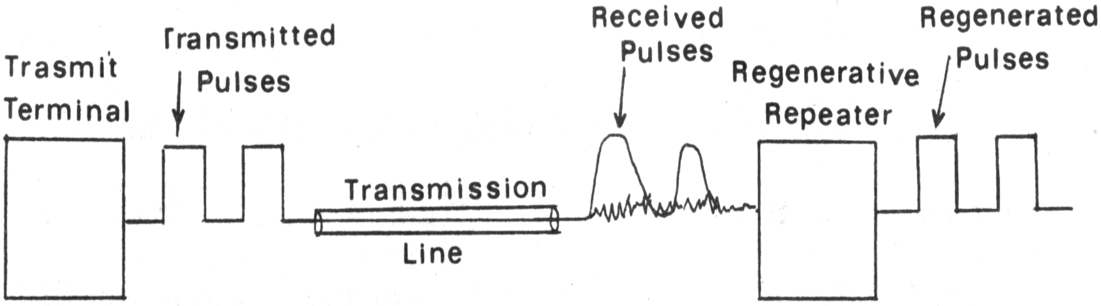
1 Bit Code แทนได้ 2 ค่า คือ 0 และ 1

2 Bit Code แทนได้ 4 ค่า คือ 00, 01 , 10 และ 11

3 Bit Code แทนได้ 8 ค่า คือ 000, 001, 010 ,011 ,100 ,101 ,110 และ 111

โดยทั่วไปแล้ว n Bit Code สามารถแทนจำนวนระดับของแรงดันได้เป็นจำนวน 2 n ค่า เช่น 8 Bit Code สามารถแทนจำนวนระดับของแรงดันได้ 2 8 = 256 ค่า เป็นต้น

ในการส่งสัญญาณ Digital Amplitude ของ Binary Signal จะมีค่าได้เพียงค่าใดค่าหนึ่งใน 2 ค่าเท่านั้นซึ่งแทนด้วยเลข Binary ได้คือ 1 หรือ 0 การตรวจหาว่ามีพัลซ์หรือไม่มีพัลซ์ของ Binary Signal สามารถทำได้ภายใต้ภาวะที่มีสิ่งรบกวนและความเพี้ยนมากกว่าที่จะพึงยอมให้เกิดขึ้นได้ในการส่งสัญญาณ Analog การยอมให้มีสิ่งรบกวนและความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นได้มากกว่า จึงนับได้ว่าเป็นข้อได้เปรียบประการหนึ่งของวิธีการส่งสัญญาณ Digital ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งก็คือการผลิตสัญญาณ Digital ขึ้นมาใหม่ที่ Regeneartive Repeater โดยที่ Binary Signal มีค่าได้เพียงค่าใดค่าหนึ่งใน 2 ค่าคือมีพัลซ์และไม่มีพัลซ์ เมื่อ Binay Signal ถูกส่งมาถึง Regeneartive Repeater มันจะตรวจดูว่ามีพัลซ์หรือไม่มีพัลซ์ ที่อินพุตของมันถ้ามีพัลซ์มันก็จะผลิตพัลซ์ที่ปราศจากสิ่งรบกวนและความเพี้ยนขึ้นมาใหม่ ถ้าตรวจพบว่าไม่มีพัลซ์ มันก็จะไม่ผลิตพัลซ์ออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะการส่งสัญญาณ Digital

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าการส่งสัญญาณ Digital มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการส่งสัญญาณ Analog อยู่ 2 ประการคือ

- มีภูมิคุ้มกันต่อสิ่งรบกวนและความผิดเพี้ยนได้มากกว่า
- สามารถผลิตสัญญาณ Digital ที่ปราศจากสิ่งรบกวนและความผิดเพี้ยนขึ้นมาใหม่ที่ Regeneartive Repeater ได้

เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ Digital ที่ปราศจากการรบกวนและความผิดเพี้ยนขึ้นมาใหม่ที่ Regeneartive Repeater ได้

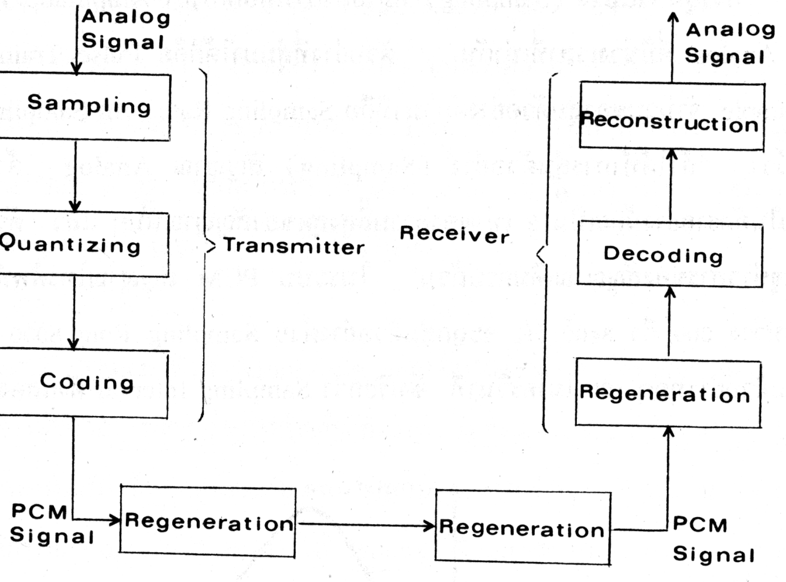
เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ Digital มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการส่งสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital มากขึ้นตามลำดับด้วยวิธีการนี้จำเป็นต้องแปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital ที่ปลายทางด้านส่งแลแปลงกลับเป็นสัญญาณ Analog ตามเดิมที่ปลายทางด้านรับ วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือวิธีการของ Pulse Code Modulation (PCM)

4.3 หลักการของระบบ Pulse Code Modulation

Pulse Code Modulation เป็นวิธีที่เปลี่ยน Analog Speech Signal ให้เป็นสัญญาณ Digital ซึ่งแต่ละสัญญาณจะถูกกำหนดให้เป็นกระบวนของ Pulse ในรูปของ Binary Code การเปลี่ยนสัญญาณดังกล่าว จะต้องประกอบด้วยหลักการที่สำคัญ 3 ประการเรียงตามลำดับคือ

- การสุ่มตัวอย่าง (Sampling)
- การแบ่งย่าน Amplitude ออกเป็นระดับต่างๆ (Quantizing)
- การเข้ารหัส (Coding)

รูปที่ 4.5 แสดง Block Diagram ของระบบ PCM วิธีการขั้นแรกคือการสุ่มตัวอย่างสัญญาณโทรศัพท์แต่ละช่องด้วย Sampler จะทำให้ได้พัลซ์ที่แอมปลิจูดเท่ากับสัญญาณ ณ เวลาที่ทำการสุ่มนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า PAM Signal จากนั้น PAM Signal จะถูกป้อนเข้าที่ Quantizer และในกรณีนี้แอมปลิจูดของแต่ละตัวอย่างที่สุ่มมาได้จะถูกจัดให้อยู่ในระดับที่ตรงกันหรือใกล้เคียงกับระดับที่กำหนดไว้ ขั้นตอนต่อไปคือการให้ Binary Code กับตัวอย่างที่สุ่มมาได้โดยตัวเข้ารหัสซึ่ง Binary Code ที่ให้นี้จะตรงกับระดับของแอมปลิจูดที่ถูกกำหนดไว้แล้วในตอนแรก กระบวนพัลซ์ในรูปของ Binary Code ของสัญญาณโทรศัพท์หลายๆ ช่อง ซึ่งเรียกว่า PCM Signal จะถูกส่งข้าไปในสายส่ง

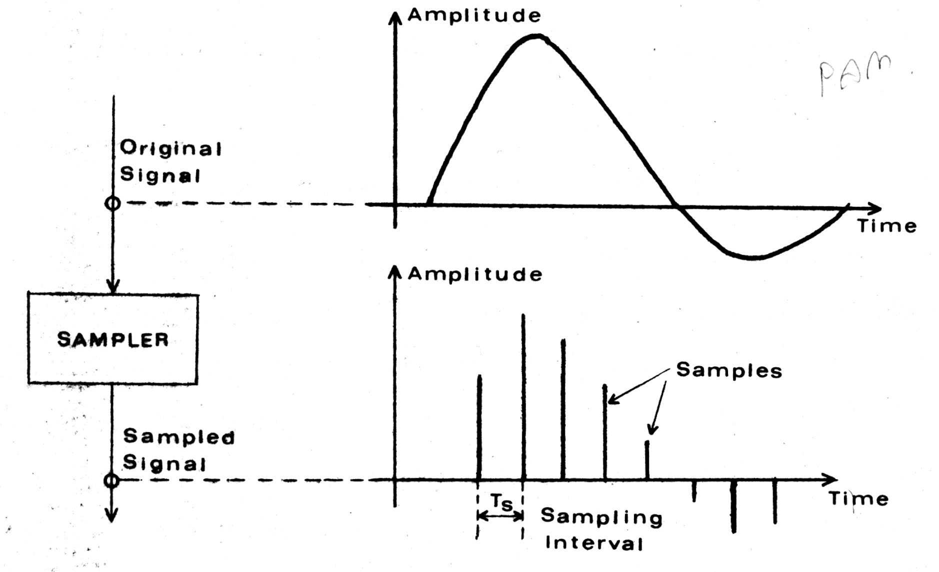


รูปที่ 4.5 Block Diagram ของระดับ PCM

หากสายส่งมีความยาวมากก็จะใช้ Regeneartive Repeater ติดตั้งในระยะทางที่เหมาะสม (ประมาณ 2 กิโลเมตร) เพื่อทำการผลิต PCM Signal ตัวเดิมที่ปราศจากสิ่งรบกวนและสัญญาณผิดเพี้ยนขึ้นมาใหม่ และที่ปลายทางด้านรับก็จะมี Regeneartive Repeater ติดตั้งไว้ด้วยเช่นเดียวกัน Output ที่ได้จาก Regeneartive Repeater นี้จะมีรูปร่างลักษณะเหมือนกับ PCM Signal ที่ถูกส่งมาจากด้านส่ง จากนั้น PCM Signal ดังกล่าว จะถูกส่งไปยังตัวถอดรหัสเพื่อทำการถอดรหัส PCM Signal ให้ได้เป็น PAM Signal แล้วจึงส่งผ่าน Sampler ไปยังช่องโทรศัพท์ที่ตรงกัน จึงทำให้ได้สุ่มตัวอย่างของสัญญาณโทรศัพท์แต่ละช่องในขั้นสุดท้ายจะเป็นการสร้าง Analog Speech Signal ตัวเดิมด้วย Low Psaa Filter เรียกว่า Reconstruction

4.3.1 การสุ่มตัวอย่าง (Smpling)

การสุ่มตัวอย่าง (Smpling) หมายถึงการเลือกเอาค่าแอมปลิจูดที่จุดใดๆ ของสัญญาณ Analog ที่มีช่วงเวลาที่เท่ากัน ตัวอย่างที่สุ่มมาได้ก็คือ Pulse Train หรือเรียกว่า PAM Sample จำนวนของสุ่มตัวอย่างต่อวินาทีคือ Smpling Rate จาก Smpling Theorem ที่กล่าวไว้ว่า ถ้าได้ทำการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) สัญญาณ Analog ด้วยช่วงเวลาที่สม่ำเสมอในอัตราอย่างน้อยเป็น 2 เท่า ของความถี่สูงสุดของสัญญาณนั้นๆ แล้ว ตัวอย่างที่สุ่มมาได้บรรจุข่าวสารของสัญญาณเดิมครบถ้วน ในระบบ PCM สัญญาณโทรศัพท์ซึ่งใช้ความถี่ในช่วงระหว่าง 300 ถึง 3400 Hz จะถูกสุ่มตัวอย่างด้วย Sampling Rate 8000 ครั้งต่อวินาที หรือสุ่มตัวอย่างทุกๆ ไมโครวินาที ซึ่งเรียกว่า Sampling Interval ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การสุ่มตัวอย่าง (Sampling)

วิธีการสุ่มตัวอย่างในระบบ Time Division Multiplex (TDM) นั้นกระทำกันเป็นจำนวนหลาย ช่องโทรศัพท์เรียงกันตามลำดับ โดยใช้ Electronoc Switch หรือ Gate จากผลการสุ่มตัวอย่างจำนวนหลายช่องโทรศัพท์ดังกล่าว จึงทำให้ได้ PAM Signal ที่มีขนาดของแอมปลิจูดต่างๆ กันของแต่ละช่องเรียงกันตามลำดับ ในระบบ PAM แบบ 24 Time Slots การสุ่มตัวอย่างจาก Time Slot ที่ 24 จะต้องกรำให้เสร็จภายใน 125

ไมโครวินาที (ช่วงเวลาใน 1 Frame) หรือกล่าวได้ว่าต้องทำการสุ่มตัวอย่างทุกๆ 125/24 = 5.2 ไมโครวินาที ส่วนระบบ PCM แบบ 32 Time Slots การสุ่มตัวอย่างจาก Time Slots ที่ 1 ถึง Time Slots ที่ 32 จะต้องกระทำให้เสร็จภายใน 125 ไมโครวินาที หรือกล่าวได้ว่าต้องทำการสุ่มตัวอย่างทุกๆ 125/3 = 3.9 ไมโครวินาที

4.3.2 การแบ่งย่าน Amplitude ออกเป็นระดับต่างๆ (Quantizing)

การสุ่มตัวอย่างสัญญาณโทรศัพท์ในอัตราที่สม่ำเสมอนั้น จะทำให้ได้ PAM Signal ที่

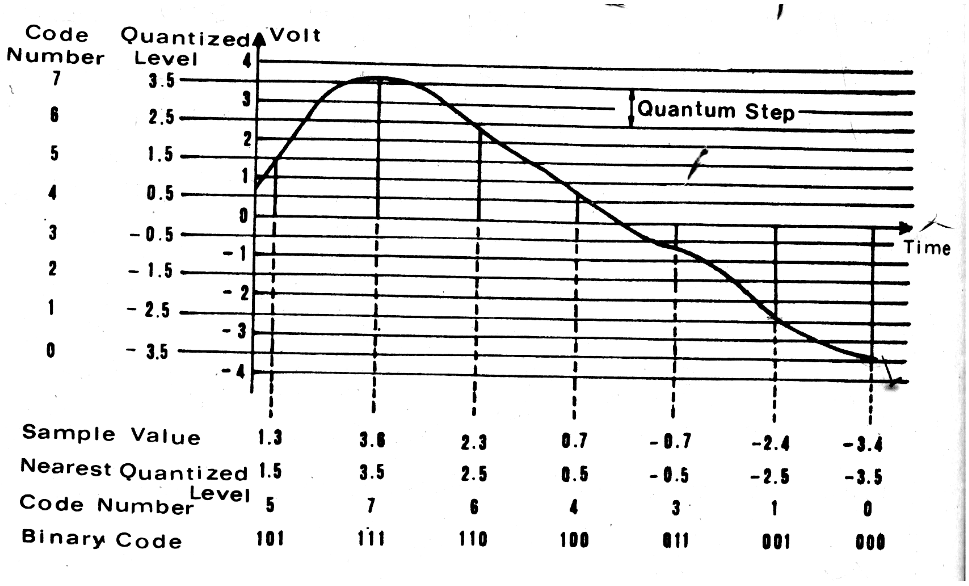
แอมปลิจูด ของมันเป็นสัดส่วน กับระดับของสัญญาณ ณ เวลาที่ได้ทำการสุ่มนั้น แอมปลิจูดดังกล่าวอาจมีค่าได้มากมายไม่จำกัด การให้ Binary Code กับสุ่มตัวอย่างที่มีแอมปลิจูดจำนวนมากในทุกตัวนั้น ก็จำเป็นที่จะต้องใช้จำนวน Bit ในกลุ่มรหัสมากตามไปด้วย ทำให้ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ดีการแบ่งย่านแอมปลิจูดออกเป็นระดับต่างๆ ด้วยจำนวนที่จำกัด เราสามารถที่จะแทนแอมปลิจูด ค่าต่างๆ ของสัญญาณที่สุ่มมาได้ด้วยจำนวนจำกัดของระดับที่ได้แบ่งไว้ ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง การให้ Binary Code ก็กำหนดเอาค่าที่ตรงกันหรือใกล้เคียงที่สุดกับระดับที่ได้แบ่งไว้ กรรมวิธีในการแบ่งย่านแอมปลิจูดของตัวอย่างที่สุ่มมาได้ออกเป็นระดับต่างๆ ที่มีจำนวนจำกัด และกำหนดระดับที่แน่นอนให้กับ PAM Signal นั้นเรียกว่า Quantizing โดยเรียกระดับหนึ่งๆ ที่แบ่งไว้ว่า Quantizing Level และจะเรียกช่วงห่างระหว่าง Quantizing Level ว่า Quantizing Intervel หรือ Quantum Step

สัญญาณที่จะทำการสุ่มตัวอย่างมีย่านแอมปลิจูดอยู่ระหว่าง + 4 โวลท์ และ – 4 โวลท์ โดยสามุติว่าเราแบ่งย่านแอมปลิจูดนี้ออกเป็น 8 ระดับคือที่ -3.5 , -2.5, -1.5, -0.5, 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 โวลท์ (Quantizing Intervel = 1) การสุ่มตัอย่างครั้งแรกตรงกับแอมปลิจูด 1.3 โวลท์ เรากำหนดให้อยู่ในรูป Quantizing Level ที่ 3.5 โวลท์ การสุ่มตัวอย่างครั้งต่อๆ ไปก็เป็นเช่นเดียวกัน จึงเห็นได้ว่า Quantizing Level ที่เรากำหนดให้นั้นเป็นเพียงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าของแอมปลิจูดจริงที่ได้มาจากการสุ่มตัวอย่าง ความคลาดเคลื่อนจากการ Quantizing ย่อมจะต้องเกิดขึ้นบ้างเช่นกัน จากการสุ่มตัวอย่างในครั้งแรก Quantizing Level ที่กำหนดให้จะคลาดเคลื่อนไป 0.2 โวลท์ เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่แน่นอนและเราเรียกความคลาดเคลื่อนนี้ว่า Quantizing Error หรือ Quantizing Noise ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของความผิดเพี้ยน ในขั้นตอนการ Quantizing ถ้าเพิ่มจำนวนของ Quantizing Level ให้มากขึ้นจะทำให้ Binary Code มีจำนวน Bit มากขึ้นตามไปด้วยและเป็นผลทำให้การส่งสัญญาณ Binary Code ต้องการ Bandwidth กว้างมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วเราจะต้องกำหนดให้จำนวน Quantizing Level และจำนวน Bit ในกลุ่มรหัสหนึ่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การส่งสัญญาณ Binary Code ได้ผลเป็นที่พอใจโดยใช้ Bandwidth น้อยที่สุดเป็นหลัก

4.3.3 การเข้ารหัส (Coding)

เมื่อได้ทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ Analog เรียบร้อยแล้ว เราจะได้ PAM Signal ที่มีขนาดของแอมปลิจูดต่างๆ กัน ส่งเข้าไปยังQuantizer โดยกำหนดให้ Quantizing Level อันใดซึ่งตรงกันหรือใกล้เคียงที่สุดกับ

ระดับของแอมปลิจูดที่สุ่มมาได้ ตัวเข้ารหัส (Coder) ก็จะผลิต Binary Code Signal ตรงตาม Quantizing Level นั้นๆ แล้วจึงจะส่งออกไปในสายส่งจากรูปที่ 3.6 สมมุติว่าเราได้กำหนดค่าของรหัสที่ใช้กับ Quantizing Level ที่ระดับต่างๆ คือ -3.5, -2.5, -1.5,.............,3.5โวลท์ เป็น 0, 1, 2,.........,7 ตามลำดับแล้วตัวอย่างที่สุ่มมาได้ อันดับแรกคือ 1.3 โวลท์ Quantizing Level ที่ใกล้เคียงที่สุดมันคือค่า 1.5 โวลท์ ซึ่งตรงกับค่าของรหัส 5 ดังนั้นรหัสที่ส่งออกไปเป็น Code Word ขนาด 3 Bits คือ 101 ตังอย่างที่สุ่มมาได้อันดับที่ 2 คือ 3.6 โวลท์ Quantizing Level ที่ใกล้เคียงที่สุดคือ 3.5 โวลท์ซึ่งตรงกับค่าของรหัส 7 ดังนั้นรหัสที่ส่งออกไปเป็น Code Word คือ 111 เช่นนี้เป็นต้น ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การเข้ารหัส (Coding)

ระบบ PCM แบบ30/32 Channals หรือแบบ 24 Channals จะมีจำนวน Quantizing Level เป็น 256 Levelจึงทำให้แต่ละตัวอย่างที่สุ่มมาได้ถูกเข้ารหัสเป็น Code Group หรือ PCM Word จำนวน 8 Bits และ Sampling Rate ที่จะใช้เป็น 8000 Samples/Second ดังนั้น 1 Puls Code Modulated Speech Signal จะผลิตสัญญาณจำนวน 8x 8000 = 64 Kbits/Second ซึ่งเป็น Binary Code

การสุ่มตังอย่างในระบบ PCM จะเริ่มสุ่มตั้งแต่ Channal แรกจนไปถึง Channal สุดท้ายเรียงตามลำดับ และกลับมาทำการสุ่มตัวอย่างที่ Channal แรกใหม่อีกครั้งหนึ่งและเป็นเช่นนี้เรื่อยๆ ไป ตามตัวอย่างที่สุ่มมาได้แต่ละตัวอย่างจะถูกส่งผ่าน Quantizer และนำไปเข้ารหัสดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.4 PCM Bandwidth

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของ Digital หรือ PCM Transmission ก็คือ เราสามารถที่จะทำการผลิตสัญญาณ Digital ที่ปราศจากสิ่งรบกวนและความเพี้ยนที่ Regeneartive Repeater ขึ้นมาได้ แต่ระบบ PCM ก็มีข้อเสียตรงที่ต้องการ Bandwidth ในการส่งกว้าง เช่น ในการส่งสัญญาณโทรศัพท์ 1 ช่อง หากใช้ระบบ FDM จะ

ต้องการ Bandwidth ในการส่งเพียง 4KHz เท่านั้น แต่สำหรับระบบ PCM การส่งสัญญาณโทรศัพท์ 1 ช่อง ด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง 8000Hz และเข้ารหัสเป็นPCM Wordด้วย Binary Code จำวน 8 Bits ดังนั้นในเวลา 1 วินาที จึงมีการถูกเข้ารหัสไปเป็นจำนวน 8000 x 8 = 64 Kbit การส่งสัญญาณด้วยอัตราเร็ว 64 Kbit/S นั้นจำเป็นจะต้องใช้ Bandwidth อย่างน้อยที่สุด 64 KHz เป็นต้น จึงเห็นได้ว่า การส่งสัญญาณในระบบ PCM ต้องการ Bandwidth กว้างมากกว่าการส่งสัญญาณในระบบ FDM มาก

4.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างระบบ PCM กับระบบอื่นๆ

การรับส่งสัญญาณโทรศัพท์ด้วยระบบ PCM นั้นได้เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากระบบ PCM ใช้คู่สายจำนวนน้อยแต่ส่งสัญญาณได้เป็นจำนวนมาก จึงเป็นการทำให้ประหยัดสายเคเบิลโทรศัพท์ซึ่งมีราคาแพงลงไปได้มาก โดยทั่วไปการส่งสัญญาณโทรศัพท์ด้วยระบบ PCM จะใช้คู้สายเพียง 2 คู่สายเท่านั้นและสามารถส่งสัญญาณได้ถึง 24 หรือ 30 Channels แล้วแต่ละระบบ PCM นั้นๆ