

บทที่ 6

การรวมสัญญาณ (Multiplexing)

Multiplexing is a process where multiple messages are combined into one signal. The aim is to share transmitting resource.

ในกรณีที่ Bandwidth ของตัวกลางส่งผ่านกว้างกว่า Spectrum ของสัญญาณระหว่างคู่สื่อสาร ตัวกลางดังกล่าวสามารถใช้ส่งสัญญาณหลายชุดรวมกันได้ เพื่อให้การใช้ตัวกลางนั้นเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

Multiplexing คือเทคนิคที่ใช้สำหรับบริหารจัดการตัวกลางการสื่อสาร 1 เส้นทาง เพื่อให้สามารถใช้ส่งสัญญาณ หลายสัญญาณ รวมกันได้ ส่วน ณ ปลายทางจะมีการแยกสัญญาณ (Demultiplex) เพื่อกระจายสัญญาณที่รวมไว้ ไปยังคู่สื่อสารด้านรับที่เหมาะสม ดังรูปที่ 6.1



FIGURE 6.1 กระบวนการรวมสัญญาณ (Multiplex) ที่ต้นทาง จำนวน 3 ช่อง และแยกสัญญาณ (Demultiplex) ที่ปลายทาง

การรวมสัญญาณโดยการจัดสรรความถี่

การรวมสัญญาณโดยการจัดสรรความถี่ (Frequency Division Multiplex: FDM) เหมาะสำหรับกรณี Bandwidth ของตัวกลาง กว้างกว่า Spectrum รวมของสัญญาณที่ต้องการส่งทั้งหมด ด้วยวิธีนี้ สัญญาณข่าวสารจะถูก Modulate ด้วย Carrier Signal ที่มีความถี่ต่างกัน เรียกว่า Channel ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสัญญาณ Composite ซึ่งผ่านไปในตัวกลางโดยมีเงื่อนไขดังนี้

- Carrier Signal แต่ละความถี่ต้องมี ระยะห่างที่พอเหมาะ สำหรับผสมสัญญาณข่าวสารได้
- Carrier Signal ต้องมีความถี่ ไม่ซ้อนทับกับช่วงของ Spectrum ของข่าวสาร

กระบวนการรวมสัญญาณ (FDM)

กระบวนการรวมสัญญาณเริ่มจาก อุปกรณ์ Multiplex ด้านส่งให้กำเนิดข่าวสารในรูปสัญญาณ Analog ที่มี Spectrum ใกล้เคียงกัน (อยู่ในย่านเดียวกัน) สัญญาณข่าวสารจะถูก Modulate กับสัญญาณพาหะ (Carrier) ที่มีความถี่ต่างๆ กัน (f_1, f_2, f_3, \dots) สัญญาณผลลัพธ์ที่ได้จะนำมา **บวก** กันเป็น Composite Signal ส่งไปในตัวกลาง ดังรูป

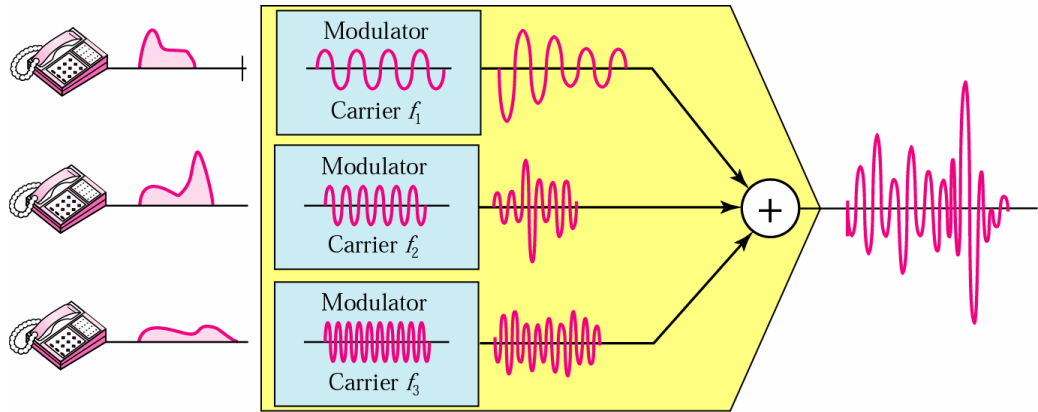


FIGURE 6.2 การรวมสัญญาณ Analog ด้วยสัญญาณ Carrier 3 ความถี่ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นสัญญาณ Composite ส่งไปในตัวกลาง

กระบวนการแยกสัญญาณ (FDM)

ณ ปลายทางด้านรับ อุปกรณ์ Demultiplex จะใช้อุปกรณ์ของ Filter ที่ความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่พาหะของฝั่งด้านรับ (f_1, f_2, f_3, \dots) เพื่อแยกสัญญาณ Composite ออกเป็นชุดของสัญญาณที่ Modulate ก่อนทำการรวมสัญญาณ ถัดมาอุปกรณ์ Demodulator ทำหน้าที่แยกสัญญาณ Carrier ออกจากสัญญาณข่าวสารในสัญญาณที่ Modulate แต่ละชุด ผลลัพธ์ที่ได้ถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์ด้านรับ

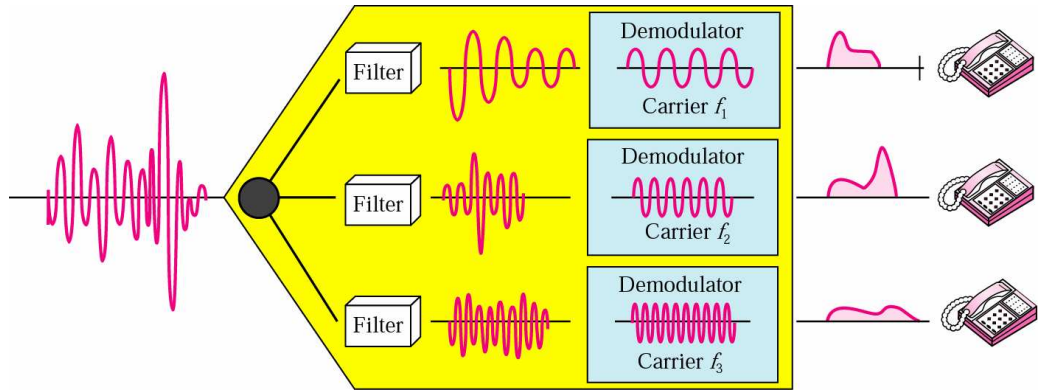


FIGURE 6.3 การแยกสัญญาณ Analog ด้วย Filter 3 ความถี่ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นสัญญาณ Analog ต้นฉบับส่งไปยังผู้รับปลายทาง

แถบความถี่ป้องกัน

ในการ Multiplex สัญญาณที่ Modulate ในแต่ละช่วง อาจต้องเว้นระยะแถบความถี่ป้องกัน (Guard Band) พอสมควร เพื่อป้องกันการรบกวน/ซ้อนทับกันระหว่างช่อง เช่น ถ้าสัญญาณ 5 ช่อง ในแต่ละช่อง มี BW 100 kHz และต้องการ GB = 10 kHz แล้ว $BW_{medium} = 5 \times 100 + 4 \times 10 = 540$ kHz ดังแผนผังในรูปที่ 6.4

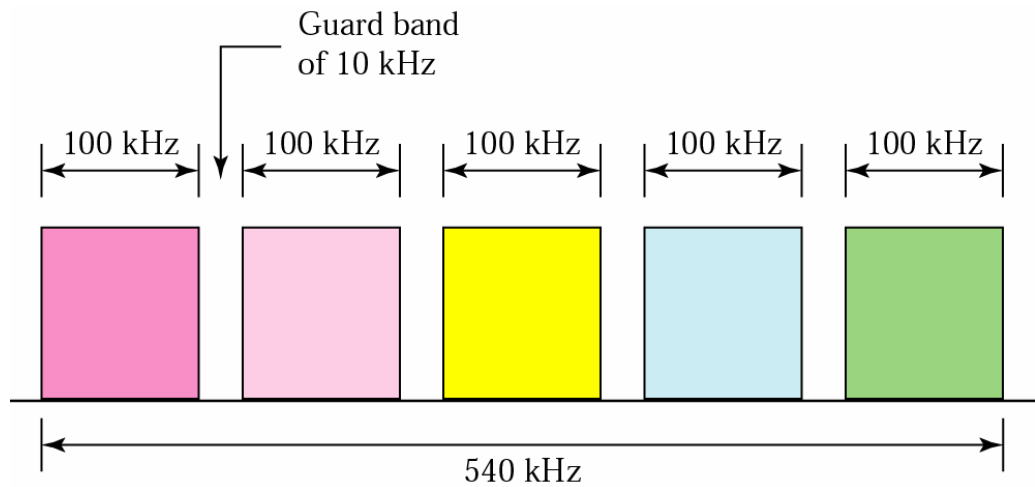


FIGURE 6.4 Spectrum ของการรวมสัญญาณ 5 ช่อง โดยที่แต่ละช่องมี BW 100 kHz และ Guard Band ระหว่างช่อง 10 kHz

การประยุกต์ใช้งาน (FDM)

การรวมสัญญาณเชิงความถี่มีการประยุกต์ใช้งานทั่วไป เช่น สัญญาณเสียงในวิทยุ AM แต่ละสถานีต้องการ Bandwidth 10 kHz ในการสื่อสารโทรคมนาคม ระบบวิทยุ AM ได้รับการจัดสรรตัวกลาง (คลื่นความถี่ในอากาศ) ในช่วง 530 ถึง 1700 kHz (BW = 1170) โดยที่เครื่องรับสามารถเลือกรับสัญญาณเสียงจากสถานีที่ต้องการด้วยการ Tuning ในทำนองเดียวกันสำหรับระบบวิทยุ FM ได้รับการจัดสรรความถี่ในช่วง 88 ถึง 108 MHz แต่ละสถานีมี Bandwidth 200 kHz (ครอบคลุมย่านความถี่กว้างกว่า ทำให้สัญญาณเสียงชัดเจนกว่า) ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคแรกๆ ผู้ใช้แต่ละรายจะได้รับการจัดสรร BW ขนาด 30 kHz จำนวน 2 ช่อง (รับและส่ง) โดยที่แต่ละช่องได้จากการ Modulate กับสัญญาณเสียง BW 3 kHz นอกจากนี้ สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ออกเป็นหลายช่วงความถี่ เช่น VHF และ UHF โดยที่แต่ละสถานีได้รับการจัดสรร BW 6 MHz เป็นต้น



ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่งภาพเคลื่อนไหวด้วยอัตรา 25 ภาพ/วินาที (25 Hz) ใน 1 ภาพประกอบด้วยจำนวนเส้นสแกน 625 เส้น (64 μ s/เส้น) โดยในช่วง 52 μ s ของเส้นสแกนแต่ละเส้นประกอบด้วย 384 จุดภาพ (คิดเป็น 7 MHz) ในทางปฏิบัติส่งภาพด้วยความถี่ 5.5 MHz ไม่ปรากฏการลดทอนที่เห็นได้ชัด เมื่อรวมกับสัญญาณสี (Chromatic) และเสียงแล้ว ทำให้แต่ละสถานีมี BW ประมาณ 6 MHz

การรวมสัญญาณโดยการจัดสรรคลื่น

การรวมสัญญาณโดยการจัดสรรคลื่น (Wave Division Multiplex: WDM) ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ในระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง แนวคิดของ WDM คล้ายกับ FDM กล่าวคือใช้การรวมสัญญาณข่าวสารโดยใช้สัญญาณพาหะที่มีความถี่ต่างกัน หากแต่ในกรณี WDM ความถี่มีค่าสูงมากอยู่ในย่านความถี่แสงหลักการของ WDM ใช้วิธีการผสมแสงซึ่งมีแถบความถี่แคบ (ความยาวคลื่นสั้น) เข้าด้วยกันเป็นแสงที่มีแถบความถี่กว้าง

เทคโนโลยีการทำ WDM (เช่นในระบบ SONET) มีความซับซ้อนมาก แต่สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีฟิสิกส์ของแสงพื้นฐานดังนี้ ทางด้านส่ง (MUX) ต้องการรวมแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเข้าด้วยกัน และทางด้านรับ (DEMUX) ต้องการแยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันออกจากกัน อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ Prism ที่หักเหแสงความถี่ต่างกัน ด้วยมุมต่างกัน ดังรูปที่ 6.5

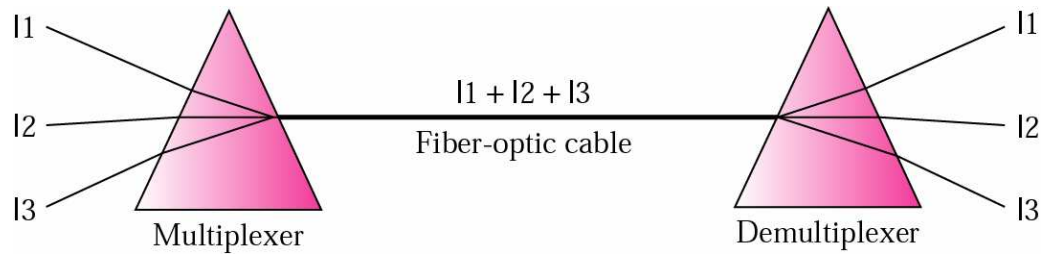


FIGURE 6.5 แผนผังแสดงการรวมสัญญาณ (Multiplexing) และแยกสัญญาณ (Demultiplexing) ในระบบ WDM โดยใช้ปริซึม

การรวมสัญญาณโดยการจัดสรรเวลา

การรวมสัญญาณเชิงเวลา (Time Division Multiplex: TDM) คือกระบวนการทางดิจิทัล สำหรับการใช้งาน Bandwidth ของตัวกลางร่วมกัน การเชื่อมต่อ (Connection) ในแต่ละคู่การสื่อสารจะใช้ **ช่องเวลา** (Timeslot) หนึ่งช่องในตัวกลาง ดังรูปที่ 6.6 สังเกตว่ามีเพียงการเชื่อมต่อเดียวเหมือนกับ FDM ทว่าแต่ละส่วนจะถูกจัดสรรทางเวลา แทนที่จะเป็นความถี่

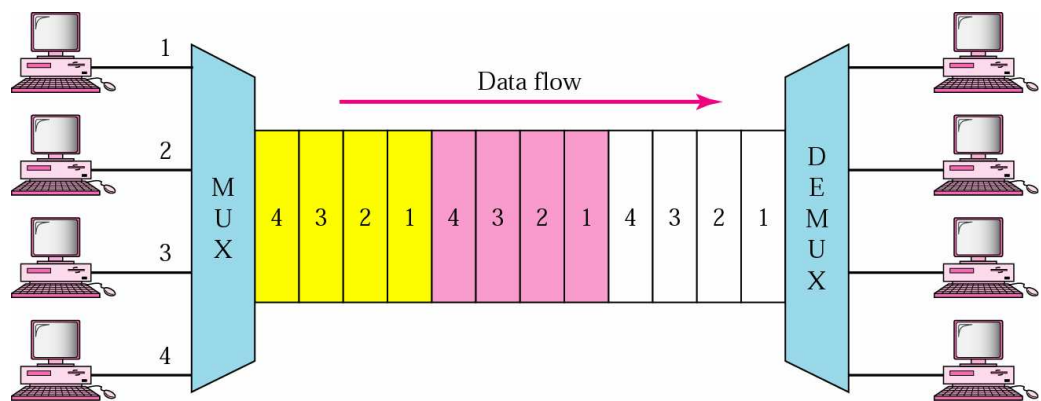


FIGURE 6.6 การรวมสัญญาณ ด้วยวิธี TDM จำนวน 3 ช่อง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นข้อมูลที่รับจัดสรรให้ใช้ตัวกลางแต่ละช่วงเวลา

ช่องเวลา และกรอบข้อมูล

ข้อมูลในแต่ละเส้นทางการเชื่อมต่อ (Link) จะถูกแบ่งเป็นหน่วย (Unit) ซึ่งใช้ช่วงเวลาใน Link 1 ช่องเวลา (Timeslot) อุปกรณ์ Multiplex จะรวมข้อมูลแต่ละหน่วยสำหรับการเชื่อมต่อ เรียกว่ากรอบข้อมูล (Frame) เพื่อควบคุมอัตราการใช้ของข้อมูล อัตราเร็วของ Link ต้องมีขนาดเป็น n เท่าของอัตราเร็วของข้อมูลเมื่อ n คือจำนวนการเชื่อมต่อ หรืออีกนัยหนึ่ง Bit Interval ของข้อมูลที่อุปกรณ์ต้องกว้างเป็น n เท่าของ Bit Interval ของ Link ดังรูปที่ 6.7

การเรียงสลับข้อมูล

จากรูปที่ 6.8 อาจจินตนาการ TDM เหมือนการเชื่อมต่อ ด้วยสวิทช์หมุนสองชุด ซึ่งเรียงสลับข้อมูล (Interleaving) เข้าจังหวะซึ่งกันและกัน กล่าวคือ

- เมื่อสวิทช์อยู่หน้าอุปกรณ์ (ด้าน MUX) อุปกรณ์ตัวนั้นมีโอกาสในการส่งข้อมูลไปใน Link
- เมื่อสวิทช์อยู่หน้าอุปกรณ์ (ด้าน DEMUX) อุปกรณ์ตัวนั้นมีโอกาสในการรับข้อมูลจาก Link

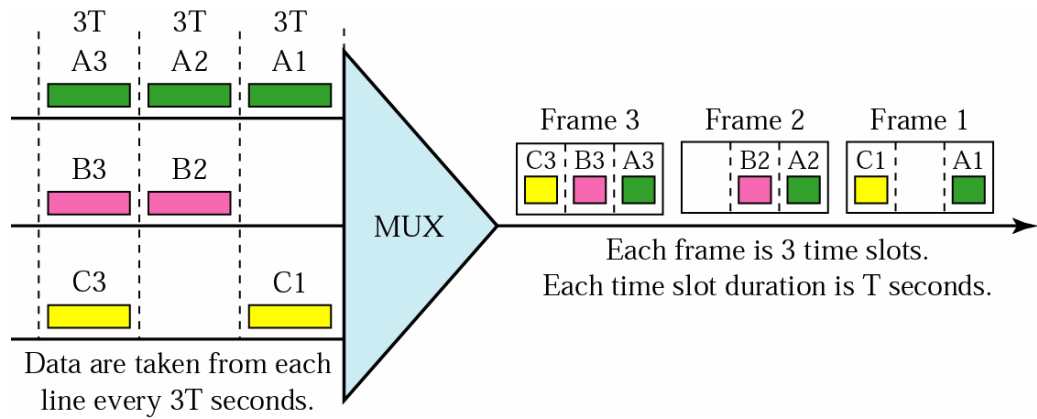


FIGURE 6.7 การรวมสัญญาณ Digital ด้วยวิธี TDM จำนวน 3 ช่องสัญญาณ สังกัด Bit Interval ของแต่ละช่องสัญญาณมีความกว้างเป็น 3 เท่าของ Bit Interval ใน Link

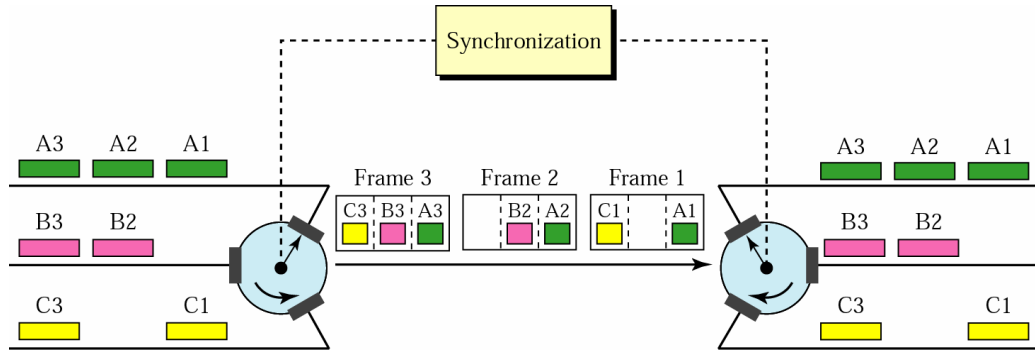


FIGURE 6.8 แนวคิดของการรวมสัญญาณด้วยวิธี TDM จำนวน 3 ช่อง ด้วย Interleaving Switch ที่ด้าน MUX และ DEMUX

การเข้าจังหวะ

ประเด็นสำคัญของการรวมสัญญาณด้วยวิธี TDM คือ การทำงานที่เข้าจังหวะกันระหว่างด้านส่งและรับ มิฉะนั้นการสื่อสารอาจผิดพลาดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตีความหมายของบิตข้อมูล ดังนั้นวิธีการควบคุมให้เกิดเข้าจังหวะ (Synchronization) ที่เที่ยงตรง ได้แก่ การเพิ่มบิตจำนวนหนึ่งที่จุดเริ่มต้นของ Frame (Framing Bits) ตามรูปแบบที่กำหนด (Synchronization Pattern) ซึ่งโดยมากมักกำหนดให้วนซ้ำรูปแบบ 1 Bit/Frame ตามลำดับ เช่น ถ้ากำหนด Synchronization Pattern มีขนาด 3 บิต เป็น 101 แล้วที่ตำแหน่งต้น Frame ที่ 1 ถึง 3 จะมีการแทรกบิต 1 0 และ 1 ตามลำดับ และวนซ้ำเป็นคาบสำหรับเฟรมถัดมา (ความยาวคาบเท่ากับ 3 เฟรม)

บิตเสริมท้ายข้อมูล

การเสริมบิตท้าย (Bit Padding) Frame คือเทคนิคในการปรับความเร็วของข้อมูลในการรวมสัญญาณด้วยวิธี TDM ในกรณีที่ความเร็วของแหล่งกำเนิดไม่เท่ากัน กล่าวคือ ในกรณีปกติถ้าอุปกรณ์ A มีความเร็ว N เท่าของอุปกรณ์ B ในแต่ละ Frame จะประกอบด้วยข้อมูลจาก A จำนวน N Timeslot และจากอุปกรณ์ B 1 Timeslot (โดยที่ขนาดของ Timeslot มีค่าคงที่เท่ากับ Timeslot ของอุปกรณ์ที่เร็วกว่า) นอกจากนี้ ในกรณีพิเศษถ้าอุปกรณ์ทั้งสองมีอัตราส่วนความเร็ว ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่า จะต้องมีการเพิ่ม Bit Padding เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไข

ตัวอย่างเช่น ถ้าอุปกรณ์ A มีความเร็ว 120 kbps อุปกรณ์ B มีความเร็ว 200 kbps ต้องเพิ่ม Bit Padding ที่อุปกรณ์ A จำนวน 20 kbits ทุกๆ 1 วินาที เพื่อหน่วงความเร็วให้เหลือ 100 kbps ซึ่งทำให้ความเร็วของ อุปกรณ์ B เป็นจำนวนเต็ม (2) เท่าของอุปกรณ์ A ระบบ MUX/DEMUX จัดสรร Timeslot สำหรับ A 1 Bit และสำหรับ B 2 Bit ดังนั้น 1 Frame มีข้อมูล 3 บิต และ Frame Rate เท่ากับ 100 000 Frame ต่อวินาที โดยที่ Frame Duration เท่ากับ 1 ms และ Bit Rate ของ Link เท่ากับ 300 kbps (เสมือนว่า Timeslot ของ B มาจาก อุปกรณ์ 2 ตัว)

การประยุกต์ใช้งาน (TDM) ในบริการสัญญาณดิจิทัล

ตัวอย่างการใช้งาน TDM ได้แก่บริการสัญญาณดิจิทัล (Digital Service: DS) แบบลำดับชั้น

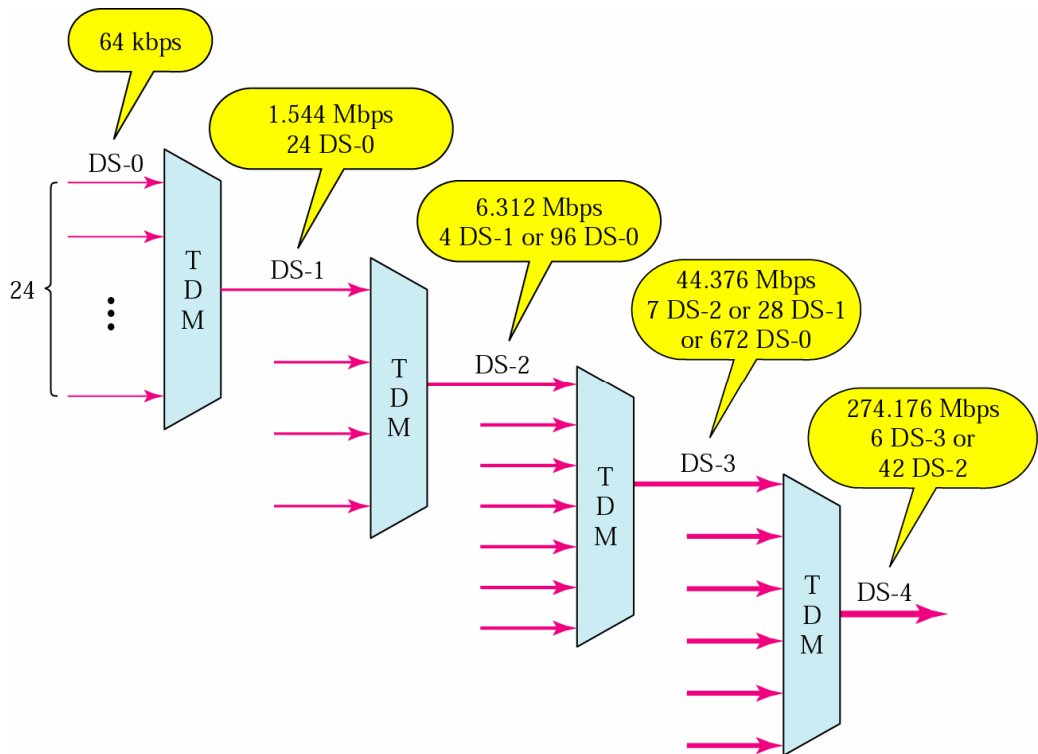


FIGURE 6.9 แผนผังแสดงลำดับชั้นของบริการสัญญาณดิจิทัล (DS) ด้วยวิธี TDM โดยแต่ละลำดับชั้นจะมีอัตราเร็วของข้อมูลเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับช่องสัญญาณจำนวนหลายช่องจากลำดับชั้นที่ต่ำกว่า

สำหรับแต่ละลำดับชั้นจะมีการกำหนดอัตราเร็วของ Link ไว้เป็น 64 kbps (DS – 0) 1.544 Mbps (DS – 1) 6.312 Mbps (DS – 2) 44.376 Mbps (DS – 3) และ 274.176 Mbps (DS – 4) โดยมีการกำหนดคุณสมบัติของ Link เรียกว่า T Line เป็น T – 1 T – 2 T – 3 และ T – 4 ตามลำดับ (เนื่องจากไม่นับ DS – 0 เป็น Service ดังนั้นจึงไม่มีข้อกำหนดของ T – 0)

โดยมาตรฐานแล้ว T Line ถูกออกแบบมาสำหรับข้อมูลดิจิทัล แต่ด้วยลักษณะการทำ TDM สายสัญญาณ T Line สามารถนำมาใช้ส่งสัญญาณอนาล็อก จำนวนหลายคู่สายได้ ถ้าสัญญาณอนาล็อกนั้นๆ มีการสุ่มด้วยเทคนิค PCM กล่าวคือ สัญญาณอนาล็อก (เสียงพูด) ของโทรศัพท์มี Spectrum 4 kHz ดังนั้นถ้าทำ PCM ด้วยอัตราเร็ว 8 000 Sample/วินาที ด้วยความละเอียด 8 Bit/Sample จะสามารถทำ TDM ใน T – 1 ได้ 24 ช่อง

กระบวนการ (TDM) ย้อนกลับ

การรวม/แยกสัญญาณด้วยวิธี TDM ย้อนกลับ (Inverse TDM) ใช้สำหรับการกระจายภาระของการส่งในกรณีที่ไม่มีทรัพยากร Link ความเร็วสูง จะใช้ Link ความเร็วต่ำจำนวนหลายเส้นทาง มาทำ Inverse TDM แทน (Bandwidth on Demand – ใช้จำนวน Link เท่าที่จำเป็น) ดังรูป

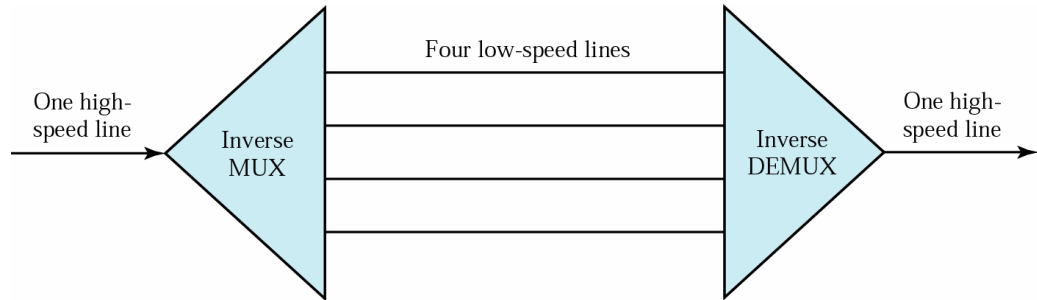


FIGURE 6.10 ระบบ Inverse MUX จะกระจาย Bit ข้อมูลที่ได้จากการ MUX ใน Link ความเร็วสูง แจกจ่ายไปยัง Link ที่มีความเร็วต่ำกว่า ในขณะที่ระบบ Inverse DEMUX จะรวม Bit ข้อมูลเพื่อส่งไปยัง Link ความเร็วสูงกว่า

แบบฝึกหัด

- อธิบายหลักการและเหตุผลในการทำ Multiplex และ Demultiplex ของสัญญาณ
- ระบุและอธิบายเงื่อนไขของความถี่ของสัญญาณพาหะในการทำ FDM มาพอสังเขป
- อธิบายหลักการของ FDM ทางฝั่งด้านส่ง (MUX) และด้านรับ (DEMUX) ประกอบแผนภาพ
- กำหนดให้สัญญาณเสียงที่มนุษย์ได้ยินมีความกว้างของ Spectrum ประมาณ 20 kHz หากต้องการรวมสัญญาณดังกล่าว 50 ช่องทาง เพื่อส่งผ่านตัวกลางซึ่งมี Bandwidth อยู่ในช่วง 1 MHz ถึง 2 MHz เขียน Frequency Diagram ของการทำ MUX และ DEMUX
- จากข้อ 4 หากเพิ่ม Guard Band ซึ่งกว้างช่วงละ 5 kHz สามารถรวมสัญญาณได้สูงสุดกี่ช่องทาง
- กำหนดตัวกลางมี Bandwidth อยู่ในช่วง 1 MHz ถึง 3 MHz ต้องการส่งข้อมูลดิจิทัลซึ่งผ่านการทำ Modulation ด้วยวิธี 4 – PSK จำนวน 40 ช่องทาง แต่ละช่องจะมีอัตราเร็วสูงสุดเท่าไร
- จากข้อ 6 หากต้องการเพิ่มจำนวนช่องทางเป็น 2 เท่า โดยที่อัตราเร็วสูงสุดของข้อมูลคงเดิม จงออกแบบวิธีการ Modulation ที่เหมาะสม
- อธิบายหลักการ Wave Division Multiplex มาพอสังเขป
- ต้องการทำ TDM ของการสื่อสาร 4 ช่องทาง โดยที่แต่ละช่องทางมีอัตราเร็ว 10 kbps กำหนดให้ ข้อมูล 1 หน่วยมีขนาด 4 บิต คำนวณหา ก) Bit Duration ของข้อมูลก่อนทำ TDM ข) Transmission Rate ของ Link ค) ช่วงเวลาของ Time Slot และ ง) ช่วงเวลาของ Frame
- จากข้อ 9 หากเพิ่ม Synchronizing Bit จำนวน 1 บิตในแต่ละ Frame คำนวณหา Transmission Rate ของ Link ที่ต้องการ และอภิปรายเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในข้อ 9