เอกสารประกอบการสอน

การสื่อสารข้อมูล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.พรภวิษย์ บุญศรีเมือง

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

๒๕๖๖

บทที่ 1

แนะนำเกี่ยวกับการสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัล

1.1 บทนำ

หลักการและหัวใจสำคัญของการสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัลคือ“ทุกเวลา ทุกที่ และเป็นทุกอย่าง”ทุกเวลาหมายถึงสามารถใช้งานได้ตลอด24ชั่วโมงทุกที่หมายถึงสามารถเกิดขึ้นได้ ทุกสถานที่ในโลกนี้ส่วน ทุกอย่าง

ในที่นี้หมายถึงไม่เพียงแต่เสียงและวีดีโอเท่านั้น แต่ยังรวมถึงข้อมูลต่างๆ สามารถส่งผ่านไปในช่องสัญญาณเดียวกันได้ โดยไม่เพียงแค่ส่งผ่านแบบสัญญาณเดี่ยวๆ แต่ยังหมายถึงการรวมกันของข้อมูลต่างๆ เพื่อส่งในเวลาเดียวกันช่องสัญญาณเดียวกันในภาพรวมของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลตลอดระยะเวลา3ทศวรรตได้มีการพัฒนาจนสำเร็จสามารถให้บริการทั้งสามด้านข้างต้น ข้อมูลข่าวสารในรูปแบบของตัวอักษร เช่น อีเมลสามารถใช้งานได้จริงส่วนเว็บคาสติ้ง(webcasting)เป็นสื่อกลางที่ใช้กระจายข่าวสารข้อมูลทางอินเตอร์เน็ตและพ็อดคาสติ้ง(podcasting)เป็นสื่อกลางสำหรับผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้โดยตรงทั้งอัพโหลดและดาวโหลดไฟล์ จึงกลายมาเป็นพื้นฐานของการสื่อสารยุคดิจิทัลที่ทุกๆส่วนของโลกสารมารถสื่อสารถึงกันได้ด้วยระบบการสื่อสารโดยอินเตอร์เน็ต

ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า”ทุกคน”เพื่อเป็นความสำคัญอันดับที่สี่ ถึงแม้ว่าอาจจะยังไม่ได้รับการพัฒนาในด้านนี้เมื่อสามอย่างแรกพัฒนาในด้านพัฒนาในด้านนี้เมื่อสามอย่างแรก การสื่อสารแบบดิจิทัลที่มีศักยภาพเพื่อให้การสื่อสารที่เหมาะสมกับทุกคนคุณสมบัติหนึ่งของวงจรดิจิทัลคือราคาลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นแม้ว่าการสื่อสารแบบอนาล็อกสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งสี่ด้าน ดังกล่าวข้างต้น แต่การสื่อสารแบบดิจิทัลมีข้อดีที่ค่าใช้จ่ายต่ำและความยืดหยุ่นของความทนทานและความสะดวกในการดำเนินงานจึงได้กลายเป็นเทคโนโลยีที่มีความต้องการและขาดไม่ได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ข้อความนี้เป็นการนำไปสู่พื้นฐานของการสื่อสารแบบดิจิทัลและมีความหมายสำหรับผู้ที่ต้องการความเข้าใจพื้นฐานของการออกแบบการสื่อสารแบบดิจิทัลก่อนที่จะกล่าวถึงเนื้อหา โดยละเอียดเราจะกล่าวถึงประวัติโดยสังเขปของการสื่อสารแบบดิจิทัลก่อน

แม้ว่าจะไม่ปรากฏอยู่ในลำดับขั้นความต้องการของมาสโลว์(Maslow's hierarchy of needs)หรือลำดับขั้นของความต้องการของมนุษย์(Maslow,1943) การสื่อสารเป็นสิ่งสำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตใดๆรวมทั้งมนุษย์เพื่อพัฒนากระบวนการการสื่อสารมนุษย์และสังคมมนุษย์ได้มีการพัฒนาเทคนิคและเทคโนโลยีต่างๆ ซึ่งเป็นเพียงในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ยี่สิบที่ระบบการสื่อสารเริ่มที่จะบรรลุความน่าเชื่อถือและความเป็นสากลหรือเป็นการสื่อสารระดับโลกหลายปัจจัยที่มีส่วนร่วมกับเรื่องนี้คือ การยอมรับอย่างรวดเร็วของการสื่อสารแบบดิจิทัล

การสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัลคือ ในคำนิยามนั้นอาจมีแตกต่างกัน แต่อย่างหนึ่งที่ง่ายที่สุดคือเป็น การสื่อสารหรือการส่งข้อความโดยใช้ตัวอักษรที่แน่นอนหรือชุดสัญลักษณ์ ในช่วง ช่วงเวลาที่จำกัดหรือช่วงสัญลักษณ์ เช่น ยกคิ้ว การพยักหน้าหรือยักไหล่อาจได้รับการพิจารณาให้เป็นการสื่อสารดิจิทัลก็ได้ อย่างไรก็ตามทั้งข้อความที่ถูกกำหนดและระยะทางจะถูกจำกัดในตัวอย่างเหล่านี้ ระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลได้รับการพัฒนาเริ่มแรกโดย กองทัพโรมันใช้โล่และดวงอาทิตย์ในการที่จะส่งสัญญาณในระยะทางระดับของสายตาและในทำนองเดียวกันชาวพื้นเมืองในทวีปอเมริกาเหนือใช้สัญญาณควันในการสื่อสารก่อนยุคอุตสาหกรรมแต่การสื่อสารในทุกวันนี้ ซึ่งมีการใช้ในชีวิตประจำวันได้นำมาใช้ช่วงศตวรรษที่สิบเก้า โดยเริ่มต้นด้วย"การควบคุม"ไฟฟ้าการควบคุมนี้ ซึ่งเริ่มต้นขึ้นในช่วงกลางศตวรรษที่สิบแปดนั้น จึงได้มีสมมุติฐานว่าการสื่อสารในระยะทางไกลกว่าที่ระยะหูและตาคนเราจะสามารถได้เห็นหรือได้ยินได้นั้นมีความเป็นไปได้

ในปี ค.ศ.1729 นักวิทยาศาสตร์ สตีเฟ่น เก(Stephan Gray)แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าสถิตย์สามารถนำพาข่าวสารไปได้ โดยบางวัสดุ เช่น สายเชือก(twine)ที่

เปียก และความคิดแรกสำหรับโทรเลขไฟฟ้าในปีค.ศ.1753ในจดหมายถึงนิตยสารก็อต (*Scots Magazine*) จดหมายลงนาม"C.M."และชื่อผู้เขียนเชื่อว่าเป็น คาเลส เมอริสัน (Charles Morrison) ศัลยแพทย์ เขาเสนอการใช้ สายไฟเท่าตัวอักษร ข้อความถูกส่งไปตามลำดับช่วงเวลาด้วยตัวอักษรที่เฉพาะเจาะจงที่ระบุโดยการส่งประจุไฟฟ้าในช่วงที่เหมาะสมกับสายที่ใช้ในการส่ง และข้อความจะถูกส่งไปในระยะ 1 หรือ 2 ไมล์ด้วยความเร็วมาก แม้ว่าได้มีการพัฒนาต่างๆ เพื่อปรับปรุงก็ตาม แนวความคิดนี้ได้มีการสารต่อและคิดค้นพัฒนาเรื่อยมาจนกระทั่ง 80 ปี หลังจากนั้นระบบการสื่อสารดิจิทัล โทรเลขไฟฟ้าได้รับการพัฒนาและจดสิทธิบัตรขึ้น ซึ่งที่จริงแล้วทั้งสองได้รับการจดสิทธิบัตร หนึ่งในนั้นคือ คาเลอร์ เวสตั้น (Charles Wheatstone) ในปีค.ศ.1837ในลอนดอน ส่วนอีกสิทธิบัตรคือ สามัล มอส (Samuel Morse) และนำมาใช้ในปีค.ศ.1840 และในเวลาต่อมาในปีค.ศ.1837เขาจึงได้รับสิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกาในปีค.ศ.1849

จนกระทั่งในปีค.ศ.1877การสื่อสารทางไกลอย่างรวดเร็วทั้งหมดขึ้นอยู่กับโทรเลขในการสื่อสารแบบดิจิทัล สาระสำคัญคือเฉพาะข้อความเท่านั้นจึงสามารถส่งได้ แต่ในปีค.ศ.1877โทรศัพท์ถูกคิดค้นโดย อเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบลล์ (Alexander Graham Bell) และนี่เป็นการประกาศถึงการมาของการสื่อสารทางไกลแบบอนาล็อกควบคู่ไปกับการค้นพบ เฮิรตซ์ (Hertz) ย่านของการแพร่กระจายคลื่นความถี่ของแม่เหล็กไฟฟ้าและตามมาด้วย มาโคนี่ (Marconi) ค้นพบว่าปรากฏการณ์ที่ช่วยเพิ่มระยะทางในการสื่อสารเพราะฉะนั้นการสื่อสารแบบอนาล็อกจึงมีการพัฒนามาตามลำดับและมีการพัฒนามากที่สุดในศตวรรษที่ยี่สิบ

อย่างไรก็ตามในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ยี่สิบโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาเห็นการฟื้นฟูในการสื่อสารแบบดิจิทัลในปีค.ศ.1948 ครอส แชนแนล (Claude Shannon)ตีพิมพ์งานวิจัยที่สำคัญในประวัติศาสตร์ของวิทยาศาสตร์ที่เขาแสดงให้เห็นว่าการใช้การสื่อสารแบบดิจิทัลนั้นเป็นไปได้และทนทานที่จะอยู่ในสภาวะของสัญญาณรบกวนได้ โดยสัญญาณรบกวนจะลดลงด้วย ซึ่งมีความน่าจะเป็นเล็กน้อย ในอัตราที่จำกัดของการสื่อสารหรือแบนด์วิดท์จำกัดและมีกำลังสัญญาณจำกัดและผล

ในทางทฤษฎีของเขาและโฮรี่ กิวล์(Holy Grail) วิศวกรการสื่อสารได้ดำเนินการตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ในช่วงเวลาเดียวกัน ริชาร์ด แฮมมิง(Richard Hamming) เสนอรหัสแฮมมิง (Hamming code)สำหรับการตรวจหาข้อผิดพลาดและการแก้ไขของข้อมูลดิจิทัล การประดิษฐ์ของทรานซิสเตอร์ก็อยู่ในช่วงปีค.ศ.1948 เช่นเดียวกันและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของอุปกรณ์วงจรภายในของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัล อีกทั้งยังได้มีแนวคิดแรกเริ่ม โดยนำระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลนั้นได้รับการพัฒนาสำหรับการสื่อสารในอวกาศ ซึ่งสิ่งสำคัญคือ ความน่าเชื่อถือของข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญยิ่งอย่างยิ่งยวดและในช่วงการพัฒนานำร่องนี้ไม่ได้คำนึงถึงรายจ่ายการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นผลให้ใช้งบประมาณในการวิจัยและพัฒนาอย่างมากและเริ่มเป็นครั้งแรกในปีค.ศ.1962 เมื่อระบบเบลล์ (Bell) นำระบบการส่งT1สำหรับเครือข่ายโทรศัพท์มาใช้งาน

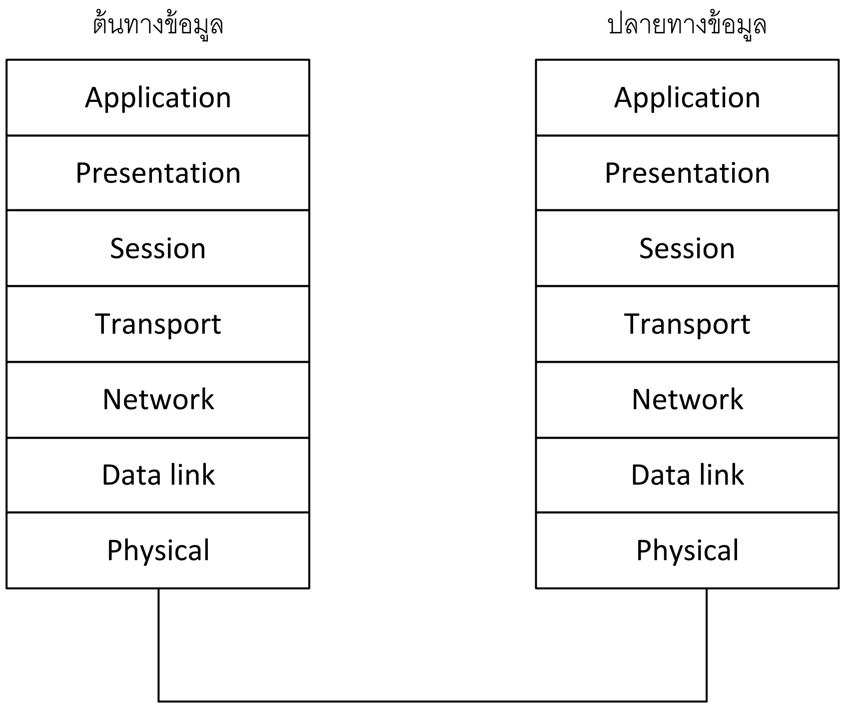
แต่การสื่อสารแบบอนาล็อกยังคงเป็นที่โดดเด่นในยุคนั้นและระบบโทรศัพท์มือถือเปิดตัวครั้งแรกในอเมริกาเหนือในช่วงปีค.ศ.1980เป็นสัญญาณแบบอนาล็อก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนความหนาแน่นของชิปเข้าไปในอุปกรณ์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและยังเท่ากับว่าเพิ่มความเร็วในการประมวลผลสัญญาณก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย และในปีค.ศ.1980และปลายทศวรรษ สุดท้ายของศตวรรษที่ยี่สิบก็เริ่มเห็นการสื่อสารแบบดิจิทัลหลายๆ ระบบมีการพัฒนาระบบโทรศัพท์มือถือแบบเคลื่อนที่จีเอสเอ็ม(Global System for Mobile Communications:GSM)เป็นที่รู้จักในยุโรปและดีเออาร์พีเอ(Defense Advanced Research Projects Agency:DARPA) โดยการสนับสนุนของเครือข่ายคอมพิวเตอร์นำไปสู่การมาของอินเทอร์เน็ต ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเหตุผลในตอนท้ายของสหัสวรรษที่จะระบุได้ว่าระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลเป็นที่โดดเด่นอีกครั้ง

1.2 เปิดระบบเชื่อมต่อโครงข่ายโอเอสไอ (Open Systems Interconnection model:OSI)

OSIโมเดลได้รับการพัฒนาอย่างอย่างเด่นชัดสำหรับการสื่อสารภายในคอมพิวเตอร์ผ่านเครือข่ายสาธารณะOSIโมเดลก็ยังถูกใช้เป็นแบบจำลองสำหรับการสื่อสารอื่น ๆ ด้วยเครือข่ายการสื่อสารเช่น พีเอสทีเอ็น(public switched telephone

network :PSTN) และระบบอินเทอร์เน็ตที่ซับซ้อน ซึ่งสามารถให้การสื่อสารที่ไร้รอยต่อระหว่างเมืองที่ต่างประเทศ ต่างภาษาและต่างวัฒนธรรมได้OSIโมเดลทำหน้าที่พื้นฐานของระบบดังกล่าวได้ดีและOSI โมเดลนั้นมีการแบ่งออกเป็น7ชั้นของหน้าที่การทำงานในกระบวนการสื่อสารดังจะกล่าวต่อไปนี้

รูปที่1.1แสดงให้เห็นถึงชั้นที่แตกต่างกัน แต่ละชั้นจะดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือมากกว่านั้นในกระบวนการสื่อสารการใช้คำศัพท์เพื่อเรียก7ชั้นของการทำงานและหน้าที่ย่อยๆของOSIโมเดลเกิดขึ้นจากการสื่อสารภายในคอมพิวเตอร์มักจะเรียกว่าโปรโตคอล(protocol)ในชั้นการทำงานเดียวกันจะเรียกว่ากระบวนการเพีย(peer processes)หน้าที่การทำงานของแต่ละชั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 1.1 แสดงถึงความแตกต่างของแต่ละระดับชั้นของOSIโมเดล

1.2.1 ชั้นกายภาพ(Physical layer)ในชั้นแรกนี้จะเป็นกลไกทางกายภาพสำหรับการส่งบิตระหว่างคู่ของโหนดใด ๆ โมดูลสำหรับการทำงานนี้มักจะเรียกว่า มอดูเลเตอร์และดีมอดูเลเตอร์(modulator and demodulator)โมเด็ม

1.2.2 ชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (Data link layer) นี้เป็นชั้นที่สองดำเนินการแก้ไขข้อผิดพลาดหรือการตรวจสอบเพื่อที่จะทำให้การเชื่อมโยงปราศจากข้อผิดพลาดและน่าเชื่อถือในชั้นสูงขึ้น บ่อยครั้งที่ชั้นนี้จะทำการวนส่งแพ็กเกจข้อมูลที่ได้รับและมีความผิดพลาด แต่ในการใช้งานบางอย่างการทำงานในชั้นนี้กลับทิ้งข้อมูลเหล่านั้นและเชื่อในการทำงานของชั้นที่สูงขึ้นในการ วนส่งแพ็กเกจข้อมูลอีกรอบ ชั้นเชื่อมโยงข้อมูลยังมีความรับผิดชอบสำหรับการเรียงลำดับแพ็กเกจข้อมูลเพื่อให้แน่ใจว่าแพ็กเกจทั้งหมดจะถูกนำส่งไปให้ชั้นที่สูงขึ้นในลำดับที่เหมาะสม บทบาทของชั้นเชื่อมโยงข้อมูลมีความซับซ้อนมากขึ้น เมื่อหลายๆโหนดร่วมกันแบ่งปันข้อมูลเดียวกัน มักจะเกิดขึ้นในระบบไร้สาย ส่วนประกอบของชั้นเชื่อมโยงข้อมูลที่ควบคุมการเข้าถึงแบบหลายเส้นทาง (multiple-access) เป็นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในการส่งข้อมูลเอ็มเอซี (medium access control :MAC) ซึ่งเป็นชั้นการทำงานย่อยและวัตถุประสงค์ของชั้นนี้คือช่วยให้เฟรมข้อมูลสามารถส่งได้โดยปราศจากการรบกวนในสภาวะที่แตกต่างจากโหนดอื่น ๆ

1.2.3 ชั้นเครือข่าย(Network layer)มีหลายหน้าที่เป็นฟังก์ชันหนึ่งในการตรวจสอบ การกำหนดเส้นทางของแพ็กเกจ หน้าที่ที่สองคือการกำหนด คุณภาพของบริการ (Quality of service:QoS) ซึ่งมักจะควบคุม โดยการเลือกการบริการแบบไม่มีการเชื่อมต่อ (connectionless) หรือการเชื่อมต่อแบบกำหนดตำแหน่ง (connection-oriented) หน้าที่ที่สามคือ การควบคุมการไหล ซึ่งทำให้มั่นใจว่าเครือข่าย ไม่ได้เข้าสู่สภาวะที่แออัดในการส่งข้อมูล ในชั้นการทำงาน นี้สามารถสร้างแพ็กเกจ ของตัวเองเพื่อการควบคุม โดยเฉพาะ ซึ่งโดยปกติมักจะมีความจำเป็นในการเชื่อมต่อเครือข่ายย่อย การเชื่อมต่อจะสำเร็จโดยการเพิ่มจำนวน

ของอินเตอร์เน็ตสับชั้นย่อย (internet sublayer)ให้กับชั้นเครือข่าย (Network layer) โดยที่ชั้นการทำงานย่อยนี้จะมีสิ่งอำนวยความสะดวกที่จำเป็น ของการแปลข้อมูลระหว่างทั้งสองเครือข่าย

1.2.4 ชั้นการขนส่ง (Transport layer) ซึ่งเป็นชั้นที่สี่โดยชั้นนี้จะแยกข้อความเป็นแพ็กเกจสำหรับการส่งและรวมกันอีกครั้งของแพ็กเกจที่ฝั่งรับ ถ้าชั้นเครือข่ายไม่น่าเชื่อถือชั้นการขนส่งจะเพิ่มความน่าเชื่อถือของ การสื่อสารโดยการส่งข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์หรือมีความผิดพลาดนั้นอีกรอบ ในชั้นการทำงานนี้ ก็ยังเริ่มส่งสัญญาณอีกครั้งหลังจากเกิดความล้มเหลวในการเชื่อมต่อขึ้น นอกจากนี้ชั้น การขนส่งอาจจัดให้มีฟังก์ชันการมัลติเพล็กซ์ (multiplexing function) โดยการรวมกันของชุดข้อมูล มีแหล่งที่มาและปลายทางเดียวกัน ตัวอย่างเช่น มีการทำงานที่คู่ขนานประกอบด้วย หรือในการประยุกต์ใช้ในการเล่นเกมและการประยุกต์ใช้การส่งข้อความ

1.2.5 ชั้นเซตของข้อมูล (Session layer)เป็นชั้นที่ห้าทำหน้าที่ในการส่งมอบบริการที่เหมาะสมและกำหนดสิทธิในการเข้าถึง

1.2.6 ชั้นการนำเสนอ(Presentation layer)หลักการที่สำคัญของชั้นการนำเสนอมีการเข้ารหัสข้อมูล การบีบอัดข้อมูลและการแปลงรหัส

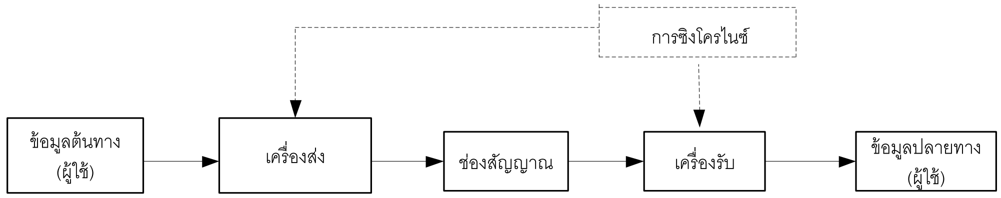
1.2.7 ชั้นการประยุกต์ใช้งาน(Application layer)เป็นชั้นสุดท้ายและมีการเข้าถึงการเชื่อมต่อ (Graphical user interface:GUI) ให้กับผู้ใช้

แม้ว่าแบบจำลองOSIมีแนวคิดที่เป็นระบบ แต่มีสิ่งหนึ่งที่ควรรู้คือ ในทางปฏิบัติสำหรับระบบการสื่อสารแบบดิจิทัล การใช้ของแบบจำลองOSIจะค่อนข้างคลุมเครือ หากไม่ได้ทำความเข้าใจอย่างจริงจัง เพื่อที่จะทำให้ง่ายแต่สำคัญในการพิจารณาความผิดพลาด และตรวจสอบความผิดพลาด แม้ว่าจะมอบหมายให้ชั้นเชื่อมโยงข้อมูลแต่ ก็ยังพบข้อผิดพลาดได้อย่างง่ายดายที่ชั้นกายภาพ เมื่อฮาร์ดแวร์ทำการแก้ไขความผิดพลาดหรือการออกแบบวงจรตรวจสอบ ยิ่งในการเข้ารหัสและถอดรหัส การบีบอัดข้อมูลและ

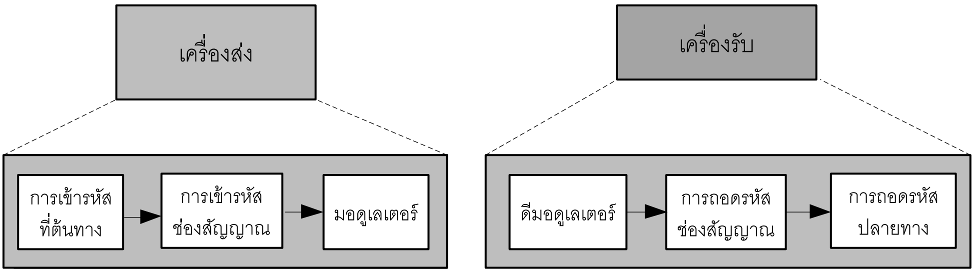
แปลงรหัสสามารถกำเนินการในระดับชั้นทางกายภาพ ดังนั้นแม้ว่าOSIจะถูกใช้เพื่ออธิบายฟังก์ชันที่แตกต่างกันในการใช้งานจริงของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลและถูกพิจารณาเป็นอย่างมากสำหรับวัตถุประสงค์ทางด้านวิศวกรรมต่างๆ บล็อกไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลจะกล่าวถึงในบทต่อไป บล็อกไดอะแกรมส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการทำงานและปัญหาในชั้นทางกายภาพของOSIโมเดลทั้งเจ็ดชั้น

1.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลทั่วไป

รูป1.2(a)แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลทั้งแบบอนาล็อกและดิจิทัล เพื่อความแม่นยำในการทำให้เข้าจังหวะกัน(synchronization) โดยปกติจะจำเป็นต้องใช้เฉพาะในระบบดิจิทัล และเป็นสิ่งที่ยากสำหรับนักออกแบบเพราะระบบที่จะควบคุมช่องสัญญาณและควบคุมแหล่งที่มาของข้อมูลนั้นทำได้อย่างยากลำบากมาก ดังนั้น การออกแบบและการวิเคราะห์จึงเป็นการมุ่งเน้นไปที่เครื่องส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ ในการออกแบบแน่นอนว่าต้องใช้ความเข้าใจในคุณลักษณะของข้อมูลและช่องสัญญาณในการพิจารณา สำหรับระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลนั้นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณสามารถแบ่งออกไปตามแต่วัตถุประสงค์ที่เราต้องการดังแสดงในรูปที่ 1.2 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 1.2 (a) บล็อกไดอะแกรมของระบบสื่อสารทั่วไป (b) แสดงองค์ประกอบย่อยของบล็อกทางด้านเครื่องส่งและด้านเครื่องรับของระบบสื่อสารแบบดิจิทัล

พิจารณาตัวส่งสัญญาณ ข้อมูลมักจะถูกส่งในรูปแบบของการเข้ารหัส ซึ่งเป็นขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูล ส่วนรายละเอียดการเข้ารหัสขึ้นอยู่กับข้อมูล และอาจจะ ถูกแบ่งออกไปได้อีก สำหรับข้อมูลเสียงหรือวิดีโออย่างน้อย จะประกอบด้วยตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลแป้นพิมพ์อาจจะมีตัวเชื่อมโยงกับรหัสแอสกี้(ASCII)หรือรหัสมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาเพื่อการแลกเปลี่ยนสารสนเทศ เป็นต้น ดังนั้นการเข้ารหัสข้อมูล อาจได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่ง และแนวคิดของการเข้ารหัสข้อมูลมีดังนี้คือ ควรจะกำจัดความซ้ำซ้อนทั้งหมดจากข้อมูลและนำเสนอด้วยสัญลักษณ์ที่ได้มาจากการกำหนดขอบเขตลำดับอักษร(finite alphabet)และสัญลักษณ์นี้จะถูกส่งทุกๆ คาบเวลา T_s วินาที โดยปกติแล้วตัวอักษรจะเป็นเลขฐานสองและเอาต์พุตจะเป็นบิตหรือลำดับการกำจัดความซ้ำซ้อน แสดงให้เห็นว่าอัตราการส่งข้อมูล โดยปกติจะวัดในหน่วย (บิต/วินาที)จะลดลง ซึ่งในทางกลับกันจะหมายความได้ว่าความต้องการความถี่ของแบนด์วิดท์สเปกตรัมจะลดลงด้วย

เนื่องจากมีการกำจัดความผิดพลาดบางส่วนโดยการเข้ารหัสข้อมูลแต่ความซ้ำซ้อนอาจจะกลับมาเพิ่มในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตามความซ้ำซ้อนนี้จะเพิ่มเข้ามาภายใต้ การควบคุมของ วัตถุประสงค์การตรวจสอบข้อผิดพลาดและการแก้ไขข้อผิดพลาดดังนั้นการเข้ารหัสช่องสัญญาณจึงเป็นการเชื่อมข้อมูลอินพุตไปเป็นสัญลักษณ์เอาต์พุต ในการส่งสัญลักษณ์นี้ผ่านช่องสัญญาณ กายภาพต้องใช้พลังงาน

และนี่คือการทำงานของมอดูเลเตอร์(modulator) โดยสัญลักษณ์จะเกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลา Ts ของช่วงสัญลักษณ์และเชื่อมโยงสัญลักษณ์นี้ลงในรูปแบบของคลื่นอย่างต่อเนื่องทางเวลา(*continuous-time*) และจะถูกส่งผ่านไปทางช่องสัญญาณ สิ่งสำคัญคือในช่วงเวลาจำกัดใด ๆ รูปแบบของคลื่น อย่างต่อเนื่องทางเวลาที่เอาต์พุตของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลจะ เป็นเซตจำกัดของรูปคลื่น ที่เป็นไปได้และสิ่งนี้เป็นทางตรงกันข้ามกับระบบที่เป็นอนาล็อกซึ่งมอดูเลเตอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงข้อมูลอนาล็อกสู่รูปแบบของคลื่นอย่างต่อเนื่องทางเวลาโดยตรงแล้วทำการส่งสัญญาณ เนื่องจากข้อมูลแบบอนาล็อก มีคุณะลักษณะที่มีค่าเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่อง ดังนั้นเอาต์พุตของระบบการสื่อสารแบบอนาล็อกจึงเป็นแบบไม่จำกัดจำนวนของรูปคลื่นที่เป็นไปได้จากทฤษฎีแล้วคุณสมบัติของข้อมูลดิจิทัลจึงเป็นแบบจำกัดและรูปคลื่นที่ผ่านการมอลดูเลตสัญญาณ(modulated waveform)แล้วนั้นก็นับว่าเป็นแบบจำกัดด้วย ซึ่งทำให้ระบบการสื่อสารมีความน่าเชื่อถือ

การเข้ารหัสช่องสัญญาณและการมอดูเลตสามารถรวมเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำงานเป็นการเข้ารหัสและมอดูเลตพาราแกรมและทั้งหมดประกอบไปด้วยสามส่วน คือการเข้ารหัสข้อมูล การเข้ารหัสช่องสัญญาณ และการมอดูเลต

เมื่อมาพิจารณาที่ตัวรับสัญญาณหากจะอธิบายอย่างง่าย คือกระบวนการกลับกัน(Inverse)ของตัวส่งสัญญาณ แต่ไม่ได้ง่ายอย่างคิดเพราะมีการรบกวนจากช่องสัญญาณ ถ้าช่องสัญญาณไม่มีการลดทอนของสัญญาณ ไม่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวนและไม่มีการรบกวนจากผู้ใช้งานรายอื่นๆ การรับสัญญาณจะเป็นเรื่องที่ง่ายอย่างไรก็ตาม การลดทอนเหล่านี้เกิดขึ้นในกายภาพของช่องสัญญาณ ดังนั้นจึงมีการพยายามจะเอาชนะการลดทอนด้วยการออกแบบต่างๆ สำหรับการออกแบบและ การวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้ ความรู้ทางวิศวกรรมโมเดลช่องสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวกลางที่สัญญาณมอดูเลตถูกส่งผ่าน เมื่อพิจารณาตัวกลางที่ใช้ในการส่ง เช่น สายเกลียวแบบคู่(twisted-pair wire)สายโคแอ็กเชียล(coaxial cable)และไฟเบอร์ออฟติก(optical fiber)ซึ่งส่วนใหญ่จะมีสัญญาณรบกวนเป็นแบบเก๊าซ์เซียน(Gaussian)อย่างไรก็ตามสื่อเหล่านี้

ก็อาจจะทำการลดทอนสัญญาณโดยการรบกวนของสัญลักษณ์เองเช่น สัญญาณข้างเคียงหรือสัญญาณที่มีระยะเวลาการส่งใกล้ๆ กันอาจจะเกิดการรบกวนกันเองในสายเกลียวแบบคู่และสายโคแอ็กเชียลเกิดปัญหานี้เพราะคุณสมบัติของแบนด์วิดท์ที่จำกัดในขณะที่ไฟเบอร์ออฟติกนั้นปัญหานี้จะเกิดจากการกระจายตัวของแสงที่เดินทางภายในของสายไฟเบอร์ออฟติกเอง

ในช่องสัญญาณอวกาศ เช่นการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยปกติจะถูกรบกวนจากสัญญาณเก๊าซ์เซียนในขณะเดียวกันการส่งสัญญาณภาคพื้นดินอย่างช่องสัญญาณไมโครเวฟก็ถูกรบกวนด้วยสัญญาณเก๊าซ์เซียนด้วยเช่นกัน แต่ตัวส่งสัญญาณอาจจะทำการสะท้อนหรือหักเหซึ่งจะนำไปสู่การเฟดดิ้ง(Fading) หรือการจางหายของช่องสัญญาณ การเฟดดิ้งเกิดขึ้นเป็นอย่างมากกับการสื่อสารโดยโทรศัพท์มือถือที่สัญญาณส่งจากตัวส่งไปตัวรับอย่างรวดเร็ว ในการสื่อสารผ่านโทรศัพท์นั้นมีผู้ใช้งานอย่างมาก เพราะฉะนั้นสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้งานด้วยกันเองกลายเป็นอีกปัจจัยของการพิจารณาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณและรวมถึงการเลือกวิธีการมอดูเลตและดีมอดูเลตด้วย

ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น การออกแบบระบบการสื่อสารนั้นสามารถที่ จะควบคุมข้อมูล หรือช่องสัญญาณได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ได้เลย ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญในการออกแบบของตัวส่งและตัวรับสัญญาณ โดยต่อไปในการมอดูเลตและดีมอดูเลต หรือที่เรียกรวมกันว่า โมเด็ม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลดังจะกล่าวต่อไปเป็นลำดับ

1.4 โมเดลคณิตศาสตร์สำหรับช่องสัญญาณสื่อสาร (Mathematical models for communication channels)

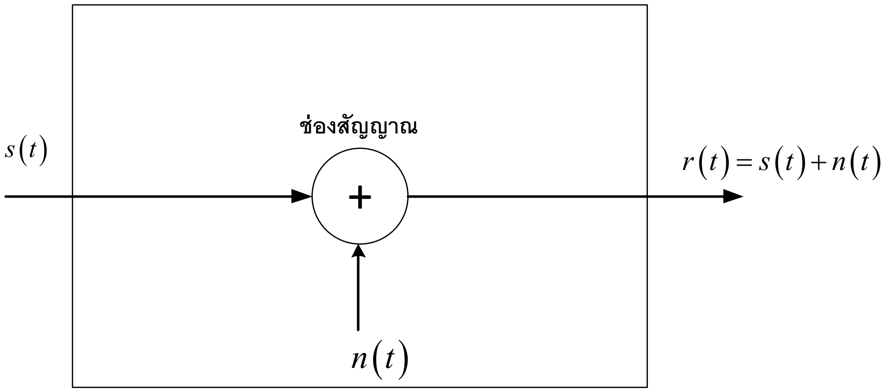
ในการออกแบบระบบสื่อสารสำหรับการส่งผ่านข้อมูล เพื่อกำหนดโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณลักษณะของตัวกลางในการส่งผ่านและเป็นโครงสร้างสำคัญที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (channel encoder) มอดูเลเตอร์ทางด้านเครื่องส่ง และดีมอดูเลเตอร์ทางด้านเครื่องรับ และการ

ถอดรหัสช่องสัญญาณ (channel decoder) ทางด้านเครื่องรับ จึงต้องกำหนดโครงสร้างช่องสัญญาณดังต่อไปนี้

1.4.1 **ช่องสัญญาณรบกวนแบบแอ็ตดิทีฟ** (Additive Noise Channel)

โครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายที่สุดสำหรับช่องสัญญาณคือ แบบแอ็ตดิทีฟหรือช่องสัญญาณแบบ(Additive White Gaussian Noise: AWGN)นั่นเอง โดยที่สัญญาณ $s(t)$ จะถูกรบกวนจากกระบวนการสุ่มของสัญญาณรบกวน $n(t)$ ซึ่งจากคุณสมบัติทางกายภาพ สัญญาณรบกวนนี้จะเพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และเมื่อ α เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณ

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t) \qquad (1.1)$$



รูปที่ 1.3 แสดงช่องสัญญาณรบกวนแบบแอ็ตดิทีฟ

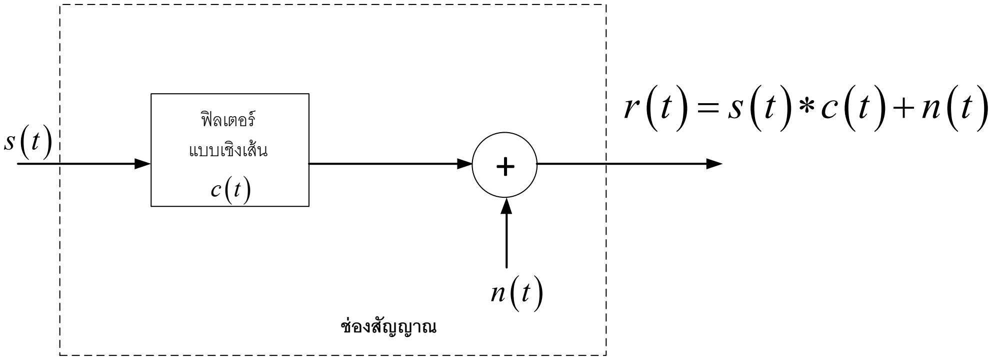
1.4.2 **ช่องสัญญาณฟิลเตอร์แบบเป็นเชิงเส้น** (Linear Filter Channel)

ในทางกายภาพของช่องสัญญาณบางประเภท เช่น สายโทรศัพท์(wireline telephone)จะใช้ฟิลเตอร์เป็นตัวกำหนดสัญญาณที่ทำการส่งผ่านนั้นไม่มีค่าสัญญาณเกินจากแบนด์วิดท์และไม่มีการแทรกสอดจากผู้ใช้ช่องสัญญาณข้างเคียงดังนั้นเราจึง

ต้องกำหนดคุณลักษณะโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของช่องสัญญาณให้เป็นฟิลเตอร์แบบเชิงเส้นด้วยสัญญาณรบกวนแบบแอ็ตดิทีฟดังแสดงในรูปที่1.4 ถ้าสัญญาณอินพุตเข้ามาที่ช่องสัญญาณเป็นสัญญาณ $s(t)$ และสัญญาณเอาต์พุตจะแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t)*c(t)+n(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau)s(t-\tau)d\tau + n(t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

เมื่อ $c(t)$ เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ของฟิลเตอร์แบบเชิงเส้น และ *หมายถึงคอนโวลูชัน

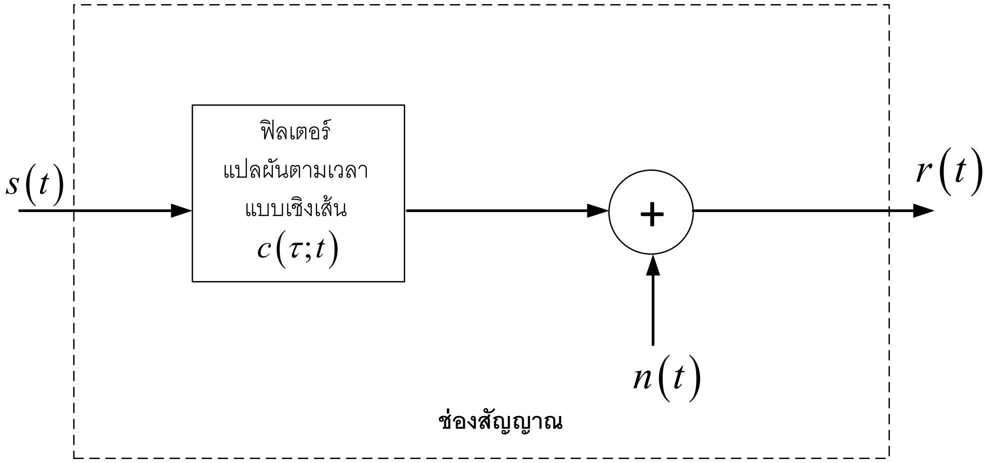


รูปที่ 1.4 แสดงช่องสัญญาณรบกวนฟิลเตอร์แบบเชิงเส้น

1.4.3 **ช่องสัญญาณฟิลเตอร์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา** (Linear Time-Variant Filter Channel)

ในทางกายภาพของช่องสัญญาณคลื่นวิทยุจะมีผลของการแพร่กระจายคลื่นแบบหลายเส้นทางโดยขึ้นกับเวลา ซึ่งโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กำหนดคุณลักษณะผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณที่ขึ้นกับเวลา $c(\tau;t)$ เมื่อ $c(\tau;t)$ เป็นผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่เวลา t โดยขึ้นอยู่กับค่าอิมพัลส์ที่เวลา $t-\tau$ ดังนั้น τ แสดงถึงช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปและช่องสัญญาณฟิลเตอร์ทางเวลาแบบเป็นเชิงเส้นมีความสัมพันธ์กับค่าสัญญาณรบกวนแบบแอ็ตดิทีฟแสดงได้ดังรูปที่1.5 $s(t)$ สัญญาณเอาต์พุตจากช่องสัญญาณแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) * c(\tau;t) + n(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau;t)\, s(t-\tau)\, d\tau + n(t) \end{aligned} \tag{1.3}$$



รูปที่ 1.5 แสดงช่องสัญญาณรบกวนฟิลเตอร์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ซึ่งโครงสร้างของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณแบบหลายเส้นทางผ่านช่องสัญญาณทางกายภาพ เช่น ไอโอโนตเฟีย (ionosphere)นั้นความถี่จะอยู่ที่30MHz และช่องสัญญาณของการสื่อสารเคลื่อนที่ผลตอบสนองอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาแสดงได้ดังสมการ

$$c(\lambda;t) = \sum_{k=1}^{L} a_k(t)\,\delta(\lambda - \lambda_k) \tag{1.4}$$

เมื่อค่า $\{a_k(t)\}$ แสดงค่าความเป็นไปได้ของสัมประสิทธ์การลดทอนของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา L เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นแบบหลายวิถี และ $\{\tau_k\}$ เป็นผลตอบสนองของเวลาดีเลย์ และเมื่อนำสมการที่1.4 ไปลบสมการที่ 1.3 ค่าสัญญาณที่รับได้จะมีรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$r(t)=\sum_{k=1}^{L} a_k(t)\,s(t-\lambda_k)+n(t) \tag{1.5}$$

ซึ่งสัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วย L องค์ประกอบของหลายเส้นทาง เมื่อค่า k_{th} เป็นค่าการลดทอนสัญญาณโดย $a_k(t)$ และเวลาดีเลย์โดย τ_k

1.4.4 **ช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบเคลื่อนที่** (Mobile radio channel)

ช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบเคลื่อนที่สามารถกำหนดคุณลักษณะได้ด้วย $h(\tau,t)$ ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือแทนด้วยฟังก์ชันการส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา $H(f,t)$ ซึ่งเป็นการแปลงฟูเรียร์ค่าของผลตอบสนอง $h(\tau,t)$ โดยที่ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณแสดงผลของช่วงเวลา t ที่ขึ้นอยู่กับค่าของ $t-\tau$

การกำหนดช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบเคลื่อนที่นั้นช่องสัญญาณจะมีการจางหายแบบหลายวิถีที่มีการจางหายแบบสถิติ ซึ่งคุณลักษณะของสัญญาณในช่วงเวลาสั้นๆ จะยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง และสเปกตรัมของสัญญาณจะข้อยๆลดลงเมื่อช่วงเวลามากขึ้น

ในสภาวะแวดล้อมของการแพร่กระจายคลื่น(propagation)ด้วยหลายเส้นทาง (multi-path)ผลตอบสนองอิมพัลส์จากช่องสัญญาณจะมีองค์ประกอบของจำนวนสัญญาณที่หลากหลายของอิมพัลส์ที่กระจัดกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบจากสัญญาณที่รับมาได้จำนวนหลากหลายเส้นทาง N_p เส้น

$$h(\tau,t)=\sum_{p=0}^{N_p-1} a_p e^{j\left(2\pi f_{D,p}t+\varphi_p\right)}\delta\left(\lambda-\lambda_p\right) \tag{1.6}$$

เมื่อ

$$\delta\left(\lambda-\lambda_p\right)=\begin{cases}1 & if\ \lambda=\lambda_p\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{1.7}$$

โดยที่ $a_p, f_{D,p}, \varphi_p,$ และ τ_p เป็นค่าแอมพลิจูดความถี่ด็อปเปอร์ เฟส และค่าดีเลย์การแพร่กระจายคลื่นตามลำดับ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับเส้นทาง $p,\ p=0,\ldots,N_p-1$

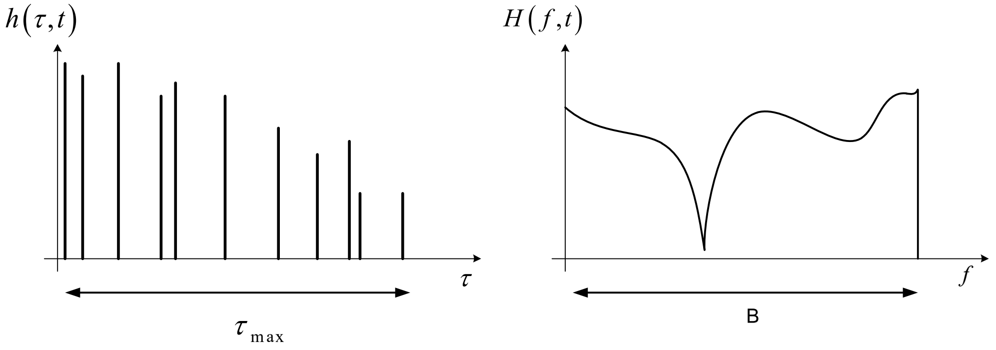
จึงสามารถกำหนดฟังก์ชันการส่งผ่านช่องสัญญาณได้ดังสมการ

$$H(f,t)=\sum_{p=0}^{N_p-1} a_p e^{j\left(2\pi f_{D,p}{}^{t-f\lambda_p}\right)+\varphi_p} \tag{1.8}$$

การดีเลย์จะวัดด้วยเส้นทางแรกของสัญญาณที่รับได้จากทางเครื่องรับ ซึ่งสัญญาณความถี่ด็อปเปอร์แสดงได้ดังสมการ

$$f_{D,p}=\frac{vf_c\cos(\alpha_p)}{c} \tag{1.9}$$

โดยที่ค่าความเร็ว v ขึ้นอยู่กับสถานะจุดรับสัญญาณ (terminal station) และค่าของความเร็วแสง c ค่าความถี่คลื่นพาห์ f_c และมุม α_p ของรูปคลื่นสัญญาณของเส้นทาง p และผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณด้วยฟังก์ชันการแปลงของช่องสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่1.6



รูปที่1.6ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและฟังก์ชันการส่งผ่านช่องสัญญาณแบบมีการเลือกช่องความถี่ที่มีการจางหายแบบหลายวิถี

ค่าดีเลย์กำลังความหนาแน่นสเปกตรัม $\rho(\tau)$ นั้นเป็นการกำหนดคุณลักษณะของการเลือกช่วงความถี่ของช่องสัญญาณการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังงานของเอาต์พุตช่องสัญญาณเป็นฟังก์ชันของดีเลย์ τ ค่าดีเลย์เฉลี่ย $\bar{\tau}$ ค่าเฉลี่ยอาร์เอ็มเอส (RMS)ดีเลย์การแพร่กระจายคลื่น τ_{RMS} และค่าดีเลย์สูงสุด $\tau_{\max}$ เป็นคุณลักษณะพารามิเตอร์ของสเปกตรัมความหนาแน่นของกำลังงานที่เกิดการดีเลย์ไป จึงแสดงค่าเฉลี่ยการดีเลย์ได้ดังสมการ

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{p=0}^{N_p-1} \tau_p \Omega_p}{\sum_{p=0}^{N_p-1} \Omega_p} \tag{1.10}$$

$$\Omega_p = |a_p|^2 \tag{1.11}$$

Ω_p เป็นกำลังงานของสัญญาณ p เส้นทางและดีเลย์การค่าการแพร่กระจายอาร์เอ็มเอสกำหนดได้ดังสมการ

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{p=0}^{N_p-1} \tau_p^2 \Omega_p}{\sum_{p=0}^{N_p-1} \Omega_p} - \bar{\tau}^2} \tag{1.12}$$

และในกรณีของความหนาแน่นกำลังงานสเปกตรัมแบบด็อปเปอร์ $S(f_D)$ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเวลาของช่องสัญญาณแบบเคลื่อนที่ เช่น การใช้โทรศัพท์มือถือขณะโดยสารรถยนต์ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วนั้นเป็นปัจจัยให้สัญญาณที่รับได้เกิดปรากฏการณ์ด็อปลงได้ โดยการกำหนดกำลังงานเฉลี่ยเอาต์พุตของ

ช่องสัญญาณเป็นฟังก์ชันความถี่ด็อปเปอร์ f_D (Doppler frequency)และค่าคุณสมบัติการแพร่กระจายความถี่ของช่องสัญญาณแบบหลายเส้นทางโดยทั่วไปจะกำหนดค่าด้วยความถี่ด็อปเปอร์สูงสุดที่เกิดขึ้น $f_{D\max}$ และค่าการแพร่กระจายด็อปเปอร์ $f_{Dspread}$ ซึ่งเป็นค่าแบนด์วิดท์ของกำลังความหนาแน่นสเปกตรัมด็อปเปอร์ดังนั้นจึงแสดงค่าเป็นสองเท่าของค่า $|f_{D\max}|$ ดังสมการ

$$f_{Dspread} \le 2|f_{D\max}| \tag{1.13}$$

1.5 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (channel coding)

สาระสำคัญในการสื่อสารคือสัญญาณที่ทำการส่งจะเป็นสัญญาณแบบสุ่มเพราะทางด้านเครื่องรับไม่สามารถจะกำหนดการรับรู้ได้ในส่วนของการส่งผ่านบิตข้อมูลผ่านข้ามช่องสัญญาณและสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้นั้น สัญญาณรบกวนที่จะต้องเกิดจากอินพุตและเอาต์พุตของลำดับบิตข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบดิจิทัล ซึ่งความผิดพลาดจะเกิดขึ้นเมื่อ สัญญาณเดิมเป็น 1 แต่กลายมาเป็น 0 หรือสัญญาณ 0 แต่กลายมาเป็น 1 ดังนั้นการเข้ารหัสช่องสัญญาณจะขึ้นอยู่กับการแมพลำดับบิตข้อมูลอินพุตไปในลำดับบิตอินพุตของช่องสัญญาณ โดยการเข้ารหัสช่องสัญญาณทางเครื่องส่งและทำการแมพผกผันกับทางลำดับบิตเอาต์พุตช่องสัญญาณไปยังลำดับบิตเอาต์พุตด้วยตัวเข้ารหัสช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของช่องสัญญาณนั้นดีขึ้นและในการปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลคือการลดอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล(bit error rate)ให้กับระบบ

การเข้ารหัสช่องสัญญาณคือ การควบคุมความซ้ำซ้อน(redundancy) ซึ่งเราเรียกว่า บิตพาลิตี้(parity bits)และการเข้ารหัสช่องสัญญาณรวมถึงการค้นหาหรือการดี

เทค(detection)และการตรวจแก้(correction)ความผิดพลาดของบิตข้อมูลเพื่อที่จะกำหนดลำดับบิตอินพุตของการส่งผ่านข้อมูลเข้าไปในช่องสัญญาณ

ทฤษฎีของการเข้ารหัสช่องสัญญาณคือหน่วยพลังงานหรือเอนโทรปี(entropy)ของบิตข้อมูล $H(X)$ เป็นค่าของบิตต่อสัญลักษณ์ที่แพร่ออกมาในช่วงเวลา $1/T_s$ สัญลักษณ์ต่อวินาที(symbols per second)ของอัตราข้อมูลเฉลี่ยต่อแหล่งข้อมูล และความสามารถในปริมาณความจุของช่องสัญญาณ โดยแหล่งข้อมูลนี้จะไม่มีเมโมรี่แบบดีสครีต(discrete memoryless source:DMS) คือ C/T_s เป็นอัตราการส่งผ่านเข้าไปในช่องสัญญาณและค่า C แทนค่าความจุของช่องสัญญาณ(channel capacity) ซึ่งจะมีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ถ้า $H(X)/T_s \le C/T_s$ และเป็นไปไม่ได้ที่ในการส่งผ่านจะส่งผ่านสัญญาณไปโดยไม่มีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาด จึงส่งผลต่อหลักทฤษฎีที่ว่าประสิทธิภาพของช่องสัญญาณจะเป็นข้อจำกัดให้กับอัตราการส่งผ่านในช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณนี้จะไม่มีเมโมรี่แบบดีสครีต(discrete memoryless channel:DMC)

1.6 ปริมาณสูงสุดของช่องสัญญาณเก๊าซ์เซียน (Gaussian channel capacity)

จากทฤษฎีของแชนแนล(Shannon, C.E.)แสดงปริมาณความจุของระบบในหน่วยบิตต่อวินาที(bits/second)ในช่องสัญญาณแบบAWGNเป็นฟังก์ชันของกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณคือ P_{av} และค่าของกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนคือ N_0 ในช่องสัญญาณแบนด์วิดท์คือ W จะมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นหลักทฤษฎีความจุช่องสัญญาณของแชนแนลดังแสดงสมการต่อไปนี้

$$C = W\log_2\left(1+\frac{Pav}{WN_0}\right) \tag{1.14}$$

โดยที่ค่าของ $N_0/2$ เป็นค่าสองด้าน(two-side)ความหนาแน่นกำลังงานของสเปกตรัม(Power spectral density:PSD)ของสัญญาณรบกวน

จากสมการที่(1.14)เราทำการนอลมอลไลซ์ปริมาณของช่องสัญญาณ C/N (บิต/วินาที)/เฮิรตซ์((bits/second)/hertz)แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{C}{W}=\log_2\left(1+\frac{Pav}{WN_0}\right) \tag{1.15}$$

จากการทำนอลมอลไลซ์ปริมาณของช่องสัญญาณนั้นเป็นการแสดงฟังก์ชันของอัตราส่วนของสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณ(Signal-to-noise ratio : SNR)

กำหนดให้ $P_{av}=CE_b$ เมื่อค่า E_b เป็นค่าพลังงานต่อบิต(energy per bit)ดังนั้นจึงแสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{C}{W}=\log_2\left(1+\frac{C}{W}\frac{E_b}{N_0}\right) \tag{1.16}$$

จัดรูปสมการจึงได้สมการตามลำดับ

$$\frac{E_b}{N_0}=\frac{2^{C/W}-1}{C/W} \tag{1.17}$$

จากสมการที่(1.17)เมื่อกำหนดให้ $x=\left(C/W\right)\left(E_b/N_0\right)$ จึงได้สมการดังนี้

$$\frac{C}{W}=x\log_2\left(1+x\right)^{1/x} \tag{1.18}$$

และเมื่อแทนเลขชี้กำลังผกผัน

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-1}=\log_2\left(1+x\right)^{1/x} \tag{1.19}$$

แทนการใช้ลิมิตด้วย $\lim_{x\to 0}\left(1+x\right)^{1/x}=e$ ไปยังสมการที่(1.19)ดังนั้นจึงได้ค่าของ $C/W\to 0$ จึงได้

$$\frac{E_b}{N_0}=\frac{1}{\log_2 e}=In2=0.693=-1.6 \text{ เดซิเบล(decibles)} \tag{1.20}$$

ค่าของ $\frac{E_b}{N_0}$ จึงเรียกว่าค่าลิมิตของแชลแนล(Shannon limit)

ซึ่งทฤษฎีของแชนแนลใช้ได้ดีกับการบอกประสิทธิภาพของระบบที่มีเทคนิคการมอดูเลชั่นกับการเข้ารหัสนั้นเอง

1.7 สรุป

ในบทนี้เป็นบทกล่าวนำของความเป็นมาของการสื่อสารแบบดิจิทัลและการเชื่อมโยงระบบสื่อสาร ซึ่งโครงสร้างที่สำคัญคือOSIโมเดลและในส่วนที่สำคัญในการศึกษาระบบสื่อสารแบบดิจิทัลคือ ชั้นกายภาพจะเป็นกลไกสำหรับการส่งบิตระหว่างคู่ของโหนดใด ๆ โมดูลสำหรับการทำงานนี้มักจะเรียกว่า มอดูเลเตอร์และดีมอดูเลเตอร์ นั้นเป็นหัวใจสำคัญของระบบดิจิทัล จากนั้นจะกล่าวนำถึงโครงสร้างช่องสัญญาณเนื่องจากการรับส่งสัญญาณนั้นสัญญาณจะถูกลดทอนประสิทธิภาพจากช่องสัญญาณรวมถึงเหตุผลการเข้ารหัสช่องสัญญาณและหลักทฤษฎีของแชนแนล ดังนั้นเราจึงต้องทำความเข้าใจช่องสัญญาณเพื่อหาวิธีการส่งสัญญาณจากจุดส่งไปยังจุดรับสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทางโดยมีการสูญเสียพลังงานของสัญญาณให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

1.8 โจทย์คำถามท้ายบท

1.1 จงยกตัวอย่างและอธิบายการติดต่อสื่อสารผ่านสาย

1.2 จงยกตัวอย่างและอธิบายการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย

1.3 จงอธิบายช่องสัญญาณแบบ AWGN

1.4 จงให้ความหมาย มอดูเลชั่น ดีมอดูเลชั่น

1.5 จงอธิบายความหมายของสัญญาณรบกวน

1.6 จงอธิบายช่องสัญญาณแบบมีการจางหายแบบหลายเส้นทาง

1.7 จงอธิบายช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบเคลื่อนที่

1.8 จงอธิบายช่องสัญญาณฟิลเตอร์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา

1.9 จงอธิบายโครงสร้างของ OSI โมเดลในชั้นกายภาพว่ามีความสำคัญอย่างไรในการสื่อสารแบบดิจิทัล

1.10 จงแสดงบล็อกไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ OSI โมเดล พร้อมอธิบายในแต่ละชั้น มาพอเข้าใจ

หนังสืออ้างอิง

ETSI TR 101 475,(2000). **Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type2; Physical (PHY) Layer,** ETSI BRAN.

Fazel,k. and Kaiser,S.(2008). **Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems From OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX,** (2^{nd} ed.) John Wiley.& Son,Ltd.

Grami, Ali.(2016) **Introduction to Digital Communications,**(1^{st} ed.) Elsevier Inc.

Maslow, A.H.(1943). **A theory of human motivation.** Psychological Review, vol. 50, pp.370-396.

Nguyen, Ha.H., and Shwedyk,Ed.(2009). **A First Course in Digital Communications.** Cambridge University. Press.

Shannon, C.E. (1949). **A mathematical theory of communication.** Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423.