ครอบคลุมเนื้อหาที่เกี่ยวกับระบบการสื่อสารเชิงแสงของไทย
ทั้งการออกแบบ ติดตั้ง และใช้เครื่องมือวัดเชิงแสง

การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

Optical Communication

ผศ. ดร. วิทวัส สิฏฐกุล

ซีเอ็ด

การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

โดย ผศ.ดร. วิทวัส สิฏฐกุล

สงวนลิขสิทธิ์ในประเทศไทยตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2560 โดย ผศ.ดร. วิทวัส สิฏฐกุล
ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ
ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาต

พิมพ์ครั้งที่ 1: วันที่ 5 มกราคม 2560

SE-ED

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

วิทวัส สิฏฐกุล.
การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง. - - กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2560.
310 หน้า.
1. การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง.
I. ชื่อเรื่อง.
621.3827

Barcode (e-book) : 5522840056283

ผลิตและจัดจำหน่ายโดย

บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260
โทรศัพท์ 0-2739-8000

หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ comment@se-ed.com

คำนำ

ในอดีตนั้นมนุษย์เราจะคุ้นเคยกับการสื่อสารโดยใช้เสียงในการปฏิสัมพันธ์กัน จนถึงยุคที่ระบบสื่อสารเชิงไฟฟ้าได้ถูกนำพัตนาเพื่อให้สามารถนำพาสัญญาณเสียงได้ และถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก อันทำให้เกิดการพัฒนาของระบบการสื่อสารชนิดต่างๆ อย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น ระบบโทรศัพท์บ้านพื้นฐาน โทรสาร ระบบสื่อสารไร้สาย ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น ในยุคดังกล่าวระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงนั้นยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากพฤติกรรมของมนุษย์ในขณะนั้น จะนิยมสื่อสารกันผ่านทางระบบเสียงและรูปภาพเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อไม่นานมานี้เอง โลกเราเข้าสู่ระบบโลกาภิวัตน์อย่างเต็มรูปแบบ กล่าวคือ วิถีชีวิตของผู้คนจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก เด็กรุ่นใหม่ที่เติบโตมาพร้อมกับโลกดิจิทัลมีความต้องการระบบการสื่อสารที่รวดเร็วมากขึ้น เช่น ความนิยมในการรับชมวีดิทัศน์ความคมชัดสูง ทั้งผ่านทางโทรศัพท์สมาร์ทโฟนและอินเตอร์เน็ต ทำให้มีความต้องการที่จะยกระดับความเร็วในการสื่อสารข้อมูลดังกล่าวให้สูงมากขึ้นผ่านทางมาตรฐานการสื่อสารแบบใหม่ เช่น เทคโนโลยี 4G หรือ 5G ซึ่งพยายามจะรวบรวมมาตรฐานระบบสื่อสารต่างๆ ที่มีอยู่ทั่วโลกเข้าด้วยกันเป็นหนึ่งเดียวกัน ทั้งนี้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่ายังไม่มีสิ่งใดในปัจจุบันที่สามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่าแสง ทำให้ระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงถูกนำประยุกต์ใช้เป็นระบบศูนย์กลางในการสื่อสารในปัจจุบัน ทำให้เรามิอาจปฏิเสธได้ว่าระบบเส้นใยนำแสงนั้นเข้ามาใกล้ตัวเรามากขึ้น และคงยังไม่มีระบบใดที่สามารถมาทดแทนระบบการสื่อสารเชิงแสงได้ หากยังไม่มีสิ่งใดที่เคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่าแสง

ดังนั้น หนังสือเล่มนี้จึงถูกจัดทำขึ้นสำหรับนิสิต นักศึกษา วิศวกร และผู้สนใจ โดยผู้เขียนได้รวบรวมแหล่งความรู้จาก หนังสือ ตำราทั้งในประเทศและต่างประเทศ งานวิจัย ตลอดจนประสบการณ์สอนในระดับมหาวิทยาลัยและการทำงานในบริษัทเอกชนและภาครัฐของผู้เขียนเอง ที่มีมากกว่าสิบปี ซึ่งผู้เขียนเห็นว่ามีความจำเป็นสำหรับนิสิตและนักศึกษาที่กำลังจะจบไปทำงานในบริษัทหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารเชิงแสงในประเทศไทย ทั้งในด้านการออกแบบ ติดตั้งและใช้เครื่องมือวัดเชิงแสง ซึ่งผู้เขียนมั่นใจว่าเนื้อหาจะครอบคลุมหัวข้อที่จำเป็นเกือบทั้งหมด เนื่องจากผู้เขียนได้ทำการสำรวจความต้องการของตลาดงานทางด้านนี้ผ่านการศึกษาดูงานและสอบถามความต้องการจริง อีกทั้งเนื้อหายังถูกออกแบบและปรับปรุงให้สอดคล้องกับหัวข้อในรายวิชา Optical Communication สำหรับหลักสูตรวิศวกรรมควบคุม สาขาไฟฟ้าสื่อสารอีกด้วย

ผศ. ดร. วิทวัส สิฏฐกุล

SE-ED

สารบัญ

บทที่ 1 ประวัติและความสำคัญของระบบสื่อสารเส้นใยนำแสง 1

วัตถุประสงค์ 1

บทนำ 2

1.1 คำจำกัดความของการสื่อสาร (Definitions of Communication) 2

1.2 การสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunication) 3

1.3 องค์ประกอบของการสื่อสาร 4

1.4 องค์ประกอบเพิ่มเติมในการสื่อสาร 5

1.5 วิวัฒนาการของการสื่อสาร 5

1.6 การสื่อสารทางเสียง 9

1.7 การสื่อสารทางภาพ 10

1.8 การสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ 12

1.9 การสื่อสารระบบเส้นใยนำแสง 13

1.10 ข้อมูลเครือข่ายระดับพื้นฐาน 14

1.11 วิวัฒนาการของระบบเส้นใยนำแสง 17

1.12 ความรู้เบื้องต้นของการถ่ายทอดข้อมูลโดยระบบเส้นใยนำแสง 21

1.13 การสื่อสารด้วยใยนำแสงไปยังที่พักอาศัย (Fiber-to-Home; FTTH) และที่ใดก็ตาม (Fiber-to-X; FTTX) 26

1.14 เครือข่ายใยนำแสงประเภทแอคทีฟ (Active Optical Network; AON) 28

1.15 เครือข่ายใยนำแสงประเภทพาสซีฟ (Passive Optical Network; PON) 28

1.16 ระบบการมัลติเพล็กซ์เชิงเวลากับเครือข่ายใยนำแสงประเภทพาสซีฟ (TDM PON) 29

1.17 ระบบการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแสงกับเครือข่ายใยนำแสงประเภทพาสซีฟ (WDM PON) 29

สรุป 30

โจทย์ปัญหาบทที่ 1 31

SE-ED

บทที่ 2 ทฤษฎีของคลื่นและเส้นใยนำแสง.....33

วัตถุประสงค์..... 33

บทนำ..... 34

2.1 ธรรมชาติของแสง.....34

2.1.1 สภาวะการเกิดโพลาไรเซชันเชิงเส้นตรง.....35

2.1.2 สภาวะการเกิดโพลาไรเซชันเชิงเส้นตรงรูปวงรีและวงกลม.....37

2.1.3 ธรรมชาติทางควอนตัมของแสง.....39

2.2 กฎและคำจำกัดความเบื้องต้นของแสง.....40

2.2.1 การสะท้อนกลับและการหักเห.....40

2.3 โครงสร้างและรูปแบบของเส้นใยนำแสง.....43

2.3.1 ชนิดของเส้นใยนำแสง.....43

2.3.2 รังสีและโหมดของแสง.....43

2.3.3 โครงสร้างของเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว.....47

2.3.4 การแสดงรังสีของแสงภายในเส้นใยนำแสง.....47

2.3.5 การเกิดคลื่นในแผ่นฉนวนตัวนำคลื่น.....49

2.4 ทฤษฎีท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอก.....52

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของโหมด.....52

2.4.2 สมการแบบจำลองจำนวนโหมด.....54

2.4.3 สมการของแม็กซ์เวลล์ (Maxwell's Equation).....55

2.4.4 สมการท่อนำคลื่น.....56

2.4.5 สมการของคลื่นสำหรับเส้นใยนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....58

2.4.6 สมการของโหมดนำแสง.....60

2.4.7 โหมดของเส้นใยนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Modes in Step-Index Fiber).....61

2.4.8 โหมดการเกิดโพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linearly Polarized Mode).....66

2.4.9 พลังงานที่ส่งผ่านในเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Power Flow in Step-Index Fiber).....69

2.5 เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Single-Mode Fiber).....73

2.5.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนาม (Mode-Field Diameter; MFD).....73

2.5.2 โหมดการแพร่กระจายแสงในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว (Propagation Mode in Single-Mode Fiber).....74

2.6 โครงสร้างของเส้นใยนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Graded-index Fiber Structure).....76

2.7 วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสง (Fiber Materials).....78

2.7.1 เส้นใยนำแสง (Glass Fiber).....79

2.7.2 สารประกอบในเส้นใยนำแสง.....80

SE-ED

2.7.3 เส้นใยนำแสงแก้วนำแสงแบบแอคทีฟ (Active Glass Fiber) 81
2.7.4 เส้นใยนำแสงชนิดแชลโคเจน (Chalgenide) 81
2.7.5 เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก (Plastic Optical Fiber) 81
2.8 การประดิษฐ์เส้นใยนำแสง (Fiber Fabrication) 82
2.8.1 วิธีการหลอมละลายโดยตรงโดยใช้เบ้าหลอมเดี่ยว 82
2.8.2 การเคลือบด้วยไอระเหยภายนอก (Outside Vapor-Phase Oxidation) 83
2.8.3 การก่อตัวเป็นไอตามแกน (Vapor-Phase Axial Deposition) 84
2.8.4 กระบวนก่อตัวจากไอด้วยวิธีการทางเคมี (Modified Chemical Vapor Deposition) 85
2.8.5 กระบวนก่อตัวทางเคมีโดยไอของพลาสมา 86
2.8.6 การหลอมละลายโดยตรงโดยใช้เบ้าหลอมสองชั้น (Double-Crucible Method) 86
2.9 คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยนำแสง (Mechanical Properties of Fibers) 87
2.10 เคเบิลใยนำแสง 92
โจทย์ปัญหาบทที่ 2 95

บทที่ 3 แหล่งกำเนิดแสง (Optical Source) 99
วัตถุประสงค์ 99
บทนำ 100
3.1 ทฤษฎีของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ 101
3.1.1 แถบพลังงาน (Energy Band) 101
3.1.2 วัสดุแบบอินทรินซิก (วัสดุเนื้อแท้) และเอ็กซ์ทรินซิก (วัสดุเนื้อไม่แท้) (Intrinsic and Extrinsic Material) 104
3.1.3 รอยต่อพีเอ็น (pn Junction) 105
3.1.4 แถบพลังงานชนิดโดยตรงและโดยอ้อม (Direct and Indirect Band Gaps) 107
3.1.5 การสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device Fabrication) 108
3.2 ไดโอดเปล่งแสง หรือ LED (Light-Emitting Diode) 109
3.2.1 โครงสร้าง LED 109
3.2.1.1 โครงสร้างที่ปล่อยแสงจากพื้นผิว (Surface Emitter) 110
3.2.1.2 โครงสร้างปล่อยแสงออกทางด้านข้าง (Edge Emitter) 111
3.2.2 วัสดุที่ใช้สร้างแหล่งกำเนิดแสง (Light Source Materials) 112
3.2.3 ประสิทธิภาพทางควอนตัม และกำลังแสงของ LED 116
3.2.4 การมอดูเลตสัญญาณโดยใช้ LED (Modulation of LED) 120
3.3 เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) 122
3.3.1 ประเภทของเลเซอร์ไดโอด 123

SE-ED

3.3.1.1 เลเซอร์ไดโอดแบบฟาบรี-เปรอต (Fabry-Perot) 123
3.3.1.2 เลเซอร์ไดโอดที่มีการป้อนกลับแบบกระจาย (Distributed Feedback Laser; DFB) 124
3.3.1.3 เลเซอร์ไดโอดชนิดปล่อยแสงในแนวตั้ง (Vertical Cavity Emitting Laser; VCEL) 125
3.4 โหมดและเงื่อนไขการกำเนิดแสงของเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode Modes and Threshold Conditions) 126
3.5 สมการอัตราของเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode Rate Equation) 129
3.6 ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External Quantum Efficiency) 131
3.7 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) 132
3.8 โครงสร้างและรูปแบบการแผ่รังสีของเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode Structure and Radiation Pattern) 134
3.9 เลเซอร์แบบโหมดเดี่ยว (Single-Mode Laser) 139
3.10 การมอดูเลตของเลเซอร์ไดโอด (Modulation of Laser Diode) 143
3.11 ผลกระทบของอุณหภูมิ (Temperature Effects) 145
3.12 ภาวะเชิงเส้นของแหล่งกำเนิดแสง (Light Source Linearity) 148
3.13 สัญญาณรบกวนในระบบเส้นใยนำแสง 152
3.13.1 สัญญาณรบกวนโหมด สัญญาณรบกวนโหมดบางส่วน และสัญญาณรบกวนสะท้อน (Modal, Partition and Reflection Noises) 152
3.13.2 สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise) 154
3.13.3 สัญญาณรบกวนช็อตนอยส์ (Shot Noise) 155
3.13.4 สัญญาณรบกวนจากความเข้มแสงสัมพัทธ์ (Relative Intensity Noise; RIN) 155
3.13.5 วิธีการวัดค่า RIN ในระบบเส้นใยนำแสง 156
3.14 ข้อพิจารณาด้านเสถียรภาพ (Reliability Consideration) 158
โจทย์ปัญหาบทที่ 3 162

บทที่ 4 อุปกรณ์รับแสง (Photodetector) 169
วัตถุประสงค์ 169
บทนำ 170
4.1 หลักการของโฟโต้ไดโอด (Principles of Photodiode) 171
4.1.1 โฟโต้ไดโอดชนิดพิน (Pin Photodiode) 171
4.1.2 อวาแลนช์โฟโต้ไดโอด (Avalanche Photodiode) 177
4.2 สัญญาณรบกวนของอุปกรณ์รับแสง (Photodetector Noise) 181
4.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Noise Source) 182
4.3.1 สัญญาณรบกวนสำหรับอุปกรณ์รับแสง 184

SE-ED

4.3.1.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อตนอยส์ 184
4.3.1.2 สัญญาณรบกวนจากกระแสมืด (Dark Current) 184
4.3.1.3 สัญญาณรบกวนจากกระแสมืดในเนื้อสาร (i_{DB}) 184
4.3.1.4 สัญญาณรบกวนจากกระแสมืดที่รั่วบริเวณพื้นผิว (i_{DS}) 185
4.3.2 อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) 187
4.4 ระยะเวลาตอบสนองของตัวรับแสง (Detector Response Time) 188
4.4.1 กระแสแสงของชั้นปลอดพาหะหรือชั้นดีพลีชัน (Depletion Layer Photo Current) 188
4.4.2 ระยะเวลาตอบสนอง (Response Time) 190
4.5 สัญญาณรบกวนทวีคูณอวาแลนช์ (Avalanche Multiplication Noise) 194
4.6 โครงสร้างอวาลานช์โฟโต้ไดโอดชนิด InGaAs (InGaAs APD) 197
4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราขยายอวาแลนช์ (Temperature Effect on Avalanche Gain) 199
4.8 การเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์รับแสง (Comparison of Photodetectors) 200
โจทย์ปัญหาบทที่ 4 202

บทที่ 5 อุปกรณ์คัปปลิ้งและมัลติเพล็กซ์แสง 207
วัตถุประสงค์ 207
บทนำ 208
5.1 หลักการทำงานของ WDM (Operational Principles of WDM) 208
5.2 Dense WDM (DWDM) 212
5.3 ส่วนประกอบชนิดพาสซีฟ (Passive Component) 212
5.4 อุปกรณ์คัปปลิ้งแสงขนาด N×M 213
5.5 การแสดงในรูปเมตริกซ์การกระจาย (Scattering Matrix Presentation) 217
5.6 อุปกรณ์คัปปลิ้งแสงแบบท่อนำคลื่นขนาด 2×2 (2×2 Waveguide Coupler) 220
5.7 อุปกรณ์คัปปลิ้งแสงรูปดาว (Star Coupler) 223
5.8 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณชนิดมาร์ซ-แซนเดอร์ อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ 226
โจทย์ปัญหาบทที่ 5 231

บทที่ 6 การลดทอนผิดรูปของสัญญาณแสงและอุปกรณ์ขยายแสง 233
วัตถุประสงค์ 233
บทนำ 234
6.1 การลดทอนของสัญญาณแสง (Optical Attenuation) 234
6.1.1 หน่วยของการลดทอนของสัญญาณแสง (Optical Attenuation Unit) 234

SE-ED

6.2 การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง (Optical Fiber Connection) 236
6.2.1 หัวต่อเส้นใยนำแสงเชิงกล 236
6.2.2 หัวต่อแบบลำแสงขยาย (Expanded Beam) 239
6.2.3 การเชื่อมต่อสายด้วยวิธีการหลอมละลาย (Splice Loss) 239
6.2.4 การลดทอนจากการโค้งงอ (Bending Loss) 241
6.2.4.1 การโค้งงอขนาดใหญ่ (Macro Bending) 241
6.2.4.2 การโค้งงอขนาดเล็ก (Micro Bending) 243
6.2.4.3 การโค้งงอขนาดเล็กจากการกดทับ 244
6.2.4.4 การสูญเสียกำลังแสงในคอร์และแคลดดิ้ง 244
6.3 การตรวจวัดระยะทางและรอยต่อในระบบใยนำแสง 245
6.4 ดิสเพอร์ชันของสัญญาณในระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง 248
6.4.1 อินทราโมดัลดิสเพอร์ชัน (Intramodal Dispersion) 248
6.4.1.1 ดิสเพอร์ชันจากวัสดุ (Material Dispersion) 249
6.4.1.2 ดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion) 250
6.4.2 ดิสเพอร์ชันจากโหมดโพลาไรเซชัน (Polarization-Mode Dispersion; PMD) 252
6.4.3 ดิสเพอร์ชันเชิงโหมด (Intermodal Distortion หรือ Modal Dispersion) 253
6.5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) 254
6.5.1 การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 255
6.5.2 ชนิดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Amplifier Type) 256
6.5.2.1 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงสารกึ่งตัวนำ (SOA) 257
6.5.2.2 อัตราขยายแสงของ SOA (SOA Amplifier Gain) 258
6.5.2.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณด้วยการเจือปนบนเส้นใยนำแสง (DFA) 260
6.5.3 อุปกรณ์ขยายแสงที่คอร์เส้นใยนำแสงถูกเจือด้วยธาตุออร์เบียม (EDFA) 261
6.5.3.1 อัตราขยายแสงของ EDFA (EDFA Amplifier Gain) 261
6.5.3.2 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ EDFA ในระบบสื่อสารเส้นใยนำแสง 263
6.6 งบประมาณกำลังของระบบเชื่อมต่อ (Link Power Budget) 264
6.7 งบประมาณเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget) 267
โจทย์ปัญหาบทที่ 6 270

บทที่ 7 การประยุกต์ใช้งานระบบเส้นใยนำแสง 271
วัตถุประสงค์ 271
บทนำ 272
7.1 การประยุกต์ใช้งานระบบเส้นใยนำแสงในการส่งสัญญาณดิจิทัล 273
7.2 การประยุกต์ใช้งานระบบเส้นใยนำแสงในการส่งสัญญาณแอนะล็อก (Radio over fiber; RoF) 274

7.2.1 วิธีการเลือกใช้อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง 275
7.2.1.1 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง 275
7.2.1.2 อุปกรณ์รับแสง 276
7.2.2 วิธีการทดสอบแบนด์วิดท์ของระบบเส้นใยนำแสง 278
7.2.3 การส่งผ่านสัญญาณบนระบบเส้นใยนำแสงโดยการมอดูเลตแบบเชิงเฟส (PSK) และเชิงขนาดและเฟส (QAM) 279
7.3 การประยุกต์ใช้ระบบเส้นใยนำแสงกับสายอากาศ 281
7.3.1 การประยุกต์ใช้ระบบเส้นใยนำแสงกับสายอากาศสำหรับแพร่กระจายสัญญาณในอาคาร 281
7.3.2 สายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสง (Photonic Active Integrated Antennas: PhAIAs) 283
7.3.3 การประยุกต์ใช้ระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงกับสายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสงสำหรับแพร่กระจายสัญญาณไร้สายในอาคาร 286
7.3.4 การประยุกต์ใช้ระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงกับสายอากาศโดยใช้เทคโนโลยี MIMO 287
7.3.5 การส่งผ่านสัญญาณแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับจัดรูปแบบลำคลื่น (Beamforming) 289
สรุป 291
โจทย์ปัญหาบทที่ 7 292

บรรณานุกรม 293

ประวัติผู้เขียน 295

SE-ED

SE-ED

ประวัติและความสำคัญของระบบสื่อสารเส้นใยนำแสง

วัตถุประสงค์

ในบทนี้เรามีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายถึงประวัติความเป็นมาของระบบการสื่อสาร ตั้งแต่ระบบการสื่อสารในสมัยโบราณ เช่น การใช้ควันไฟและสัญญาณมือ จนกระทั่งเกิดการวิวัฒนาการครั้งใหญ่ทางด้านการสื่อสาร ได้แก่ การกำเนิดเครื่องโทรพิมพ์ โทรเลข และโทรศัพท์ ทำให้ระยะห่างระหว่างเส้นทางการสื่อสารของมนุษย์ในโลกปัจจุบันนั้นใกล้ชิดกันมากขึ้น รวมถึงการอธิบายถึงองค์ประกอบหลักในการสื่อสารและหลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารความสำคัญและวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารเชิงแสง และในตอนท้ายของบทนี้จะอธิบายถึงระบบเทคโนโลยีการสื่อสารสมัยใหม่โดยการเดินเส้นใยนำแสงเข้าถึงอุปกรณ์โดยตรง (FTTX) ที่ใช้หลักการแพร่กระจายสัญญาณแสงผ่านทางระบบเส้นใยนำแสงแบบทั้งพาสซีฟและแอคทีฟไว้อย่างครบถ้วน

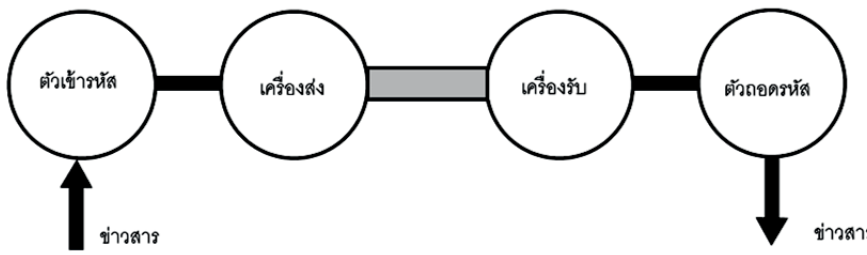
บทนำ

ปัจจุบันระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคมโลก เนื่องจากมันสามารถรองรับการสื่อสารความเร็วสูง ที่ต้องการแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่ได้ ไม่ว่าจะเป็นระบบอินเทอร์เน็ต หรือระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G และ 5G ในอนาคต เนื่องจากปัจจุบันไม่มีสิ่งใดเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าแสง อีกทั้งเส้นใยนำแสงยังมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก จึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในระบบการสื่อสารโทรคมนาคมของโลก ดังนั้นในบทนี้เราจะเริ่มต้นโดยการอธิบายถึงคำจำกัดความของการสื่อสารโทรคมนาคม รวมทั้งองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของการสื่อสาร และอธิบายถึงประวัติความเป็นมาของระบบสื่อสารเส้นใยนำแสงรวมถึงความสำคัญและการประยุกต์ใช้งานของระบบสื่อสารใยแก้วในปัจจุบัน

1.1 คำจำกัดความของการสื่อสาร (Definitions of Communication)

ก่อนที่จะกล่าวถึงการสื่อสารในอนาคตนั้น เราจำเป็นต้องเข้าใจถึงคำจำกัดความของการสื่อสารเสียก่อน ทั้งนี้คำจำกัดความของการสื่อสารคือ การส่งข้อมูลหรือข้อความจากที่แห่งหนึ่งไปยังที่อื่นๆ โดยผ่าน 3 ขั้นตอนหลักคือ

1. ข้อมูลต้นทางที่ภาคส่ง
2. ข้อมูลปลายทางที่ภาครับ
3. การเชื่อมโยงระหว่างภาคส่งและภาครับ



รูปที่ 1.1 แผนภาพของระบบสื่อสาร

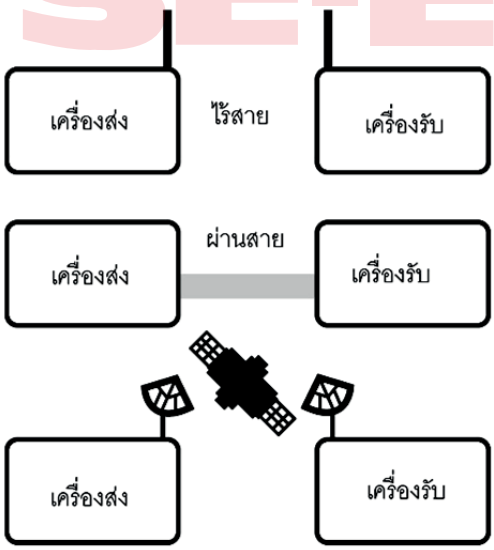
รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพของระบบสื่อสารโดยทั่วไป เริ่มจากภาคส่ง ข่าวสารที่ต้องการส่งจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องส่งเพื่อส่งต่อไปยังเครื่องรับสัญญาณที่ภาครับต่อไป ในขั้นตอนนี้อาจมีการเข้ารหัสของข่าวสารด้วยก็ได้ เพื่อเป็นการปกปิดข่าวสารให้เป็นความลับและป้องกันการรั่วไหลของข่าวสารในขณะส่งข้อมูลออกจากภาคส่ง โดยที่ภาครับจะต้องมีการถอดรหัสที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ข่าวสารที่ถูกต้องกลับคืนมา

1.2 การสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunication)

การสื่อสารโทรคมนาคมคือเทคโนโลยีในการสื่อสารที่ระยะทางไกล คำว่า “เทเล (Tele)”มาจากภาษากรีก แปลว่า ระยะไกล คำว่า “โทรคมนาคม” ตามปกติจะกล่าวถึงการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสารชนิดนี้พลังงานจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วส่งออกไปในรูปสัญญาณข่าวสารทางอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องส่งจะทำการส่งข้อความโดยการเชื่อมโยงไปยังเครื่องรับ หลักพื้นฐานของของการโทรคมนาคมจะมีด้วยกัน 2 ขั้นตอนดังรูปที่ 1.2 คือการส่งข่าวสารจากภาคส่งไปยังผ่านตัวกลางใดๆ ก็ตาม โดยทั่วไปตัวกลางในการสื่อสารจะมี 2 ลักษณะดังนี้คือ

1. การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อส่งสัญญาณผ่านสุญญากาศ หรืออากาศ ในเส้นทางนี้ข้อความจะแพร่กระจายจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ ทั้งการส่งโดยตรงไปยังสถานีทวนสัญญาณ หรือส่งผ่านดาวเทียม
2. การส่งผ่านสายเคเบิลที่มีความยาวมากๆ จะเรียกการสื่อสารแบบนี้ว่า ระบบการสื่อสารด้วยสายเคเบิล (Cable Line) ซึ่งสายเคเบิลจะเป็นสายไฟ หรือเส้นใยนำแสงก็ได้

ที่ภาครับของระบบการส่งผ่านข้อมูลข้อมูลจะถูกส่งบนสัญญาณคลื่นพาห์ในรูปแบบของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังที่เครื่องรับ จากนั้นข้อมูลก็จะแปรกลับมาในรูปของข้อมูลต้นฉบับพร้อมใช้งาน เช่น การส่งผ่านข่าวสารแบบไร้สาย การส่งผ่านข่าวสารแบบผ่านสาย และการส่งผ่านข่าวสารผ่านดาวเทียม



รูปที่ 1.2 วิธีการเชื่อมต่อในระบบการสื่อสาร

1.3 องค์ประกอบของการสื่อสาร

องค์ประกอบที่สำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพของการสื่อสารแต่ละชนิดคือปริมาณของข่าวสาร (Information) ความเร็ว (Speed) และ พิสัยความถี่ (Frequency range) นอกจากนี้การพัฒนาการสื่อสารจะต้องคำนึงถึง ราคา (Cost) ความเชื่อมั่น (Reliability) และ ความสะดวก (Convenience) อีกด้วย โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ระยะทาง (Range) ความเร็ว (Speed) และปริมาณ (Volume) ซึ่งคำจำกัดความขององค์ประกอบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

ปริมาณข่าวสาร (Information) คือ ข้อมูลที่เราจะทำการส่ง โดยจะต้องส่งไปในรูปแบบมาตรฐานเดียวกันทั้งภาครับและภาคส่ง เครื่องรับจะเข้าใจถึงมาตรฐานที่ใช้แบบเดียวกับเครื่องส่ง หากเทียบกับการสื่อสารของมนุษย์ ข้อมูลจะออกมาในรูปแบบของเสียง ท่าทาง แต่ในการสื่อสารของคอมพิวเตอร์ข้อมูลจะถูกส่งไปในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลโดยข้อมูลที่ส่งควรที่จะชัดเจน เช่น 0 หรือ 1 และไม่คลุมเครือ (Fuzzy logic)

ระยะทาง (Range) คือ ระยะทางที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูล โดยในสมัยก่อน จะใช้คนในการวิ่งส่งสารโดยใช้วิธีจำคำพูดไปบอกกล่าว แต่เดี๋ยวนี้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งระยะทางก็คือพื้นโลกอันกว้างไกล

ความเร็ว (Speed) คือ ความเร็วของการส่งข้อมูล โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของวิธีการส่งสาร ซึ่งจะมีความแตกต่างกัน เช่น ความเร็วของข้อความหรือข่าวสาร ในอดีตจะใช้ผู้ส่งสารซึ่งจะถูกจำกัดที่ความเร็วของการเคลื่อนที่ เช่น การวิ่ง หรือ การใช้ม้าพาหนะ ต่อมาได้มีการพัฒนามาใช้รถไฟ หรือยานพาหนะอื่นๆ (สำหรับการเขียนจดหมาย) และปัจจุบันถูกพัฒนามาเป็นการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งใช้ความเร็วได้เท่ากับแสง (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) รวมถึงการใช้ระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง

ปริมาณ (Volume) คือจำนวนข้อมูลของข้อความที่เราส่งไป โดยปริมาณของข้อมูลตามจะคิดตามลักษณะการใช้งานจริง ยกตัวอย่างเช่น การส่งไฟสัญญาณบนภูเขา จะมีข้อจำกัดในเชิงปริมาณ เพราะว่าสามารถส่งข้อความสื่อสารได้ฝ่ายเดียว

ปัจจัยสำคัญหนึ่งทางด้านเทคโนโลยีในการพัฒนาการสื่อสารนั้นจะต้องให้ความสำคัญกับการที่ว่าทำอย่างไรจึงสามารถส่งข้อมูลปริมาณมากๆ จากที่หนึ่งไปยังที่ต่างๆ โดยใช้ช่วงเวลาที่น้อยมากๆ ในที่นี้เราจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ตัวใหม่ขึ้นมาแทนพารามิเตอร์ปริมาณและความเร็ว ซึ่งถูกเรียกว่า อัตราการส่งข้อมูล (Data rate) หรือระดับของข้อมูลในการส่ง

อัตราการส่งข้อมูล (Data rate) คือ จำนวนของข้อมูลที่จะสื่อสารในช่วงเวลาที่แน่นอน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการสื่อสารข้อมูล เพราะอัตราการส่งข้อมูลจะเป็นตัวแปรที่สามารถอธิบายได้ในเชิงฟิสิกส์และเทคนิค เพื่อที่จะนำมาปรับใช้ที่เครื่องรับและเครื่องส่งได้อย่างถูกต้อง

1.4 องค์ประกอบเพิ่มเติมในการสื่อสาร

ในปัจจุบันนอกจากองค์ประกอบพื้นฐานของข่าวสารดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ ยังมีองค์ประกอบเพิ่มเติมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยดังต่อไปนี้

ความเชื่อมั่น (Reliability) คือ ระบบการทำงานที่ไม่มีข้อผิดพลาด อาจจะพูดได้ว่าระบบมีความน่าเชื่อถือมาก ในหลายๆ กรณีที่องค์ประกอบอื่นอาจมีผลต่อค่าความน่าเชื่อถือของระบบ ไม่ว่าจะเป็นองค์ประกอบภายนอกของระบบ ทั้งในภาคเข้ารหัส และถอดรหัส ระดับของสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้องค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณภาพสัญญาณที่ส่งออกไปการใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง และเหมาะสมกับการเข้ารหัส และถอดรหัสของระบบ จะทำให้มีสัญญาณรบกวนต่ำที่สุด ซึ่งผลที่ได้คือระบบจะมีความน่าเชื่อมั่นสูงขึ้น

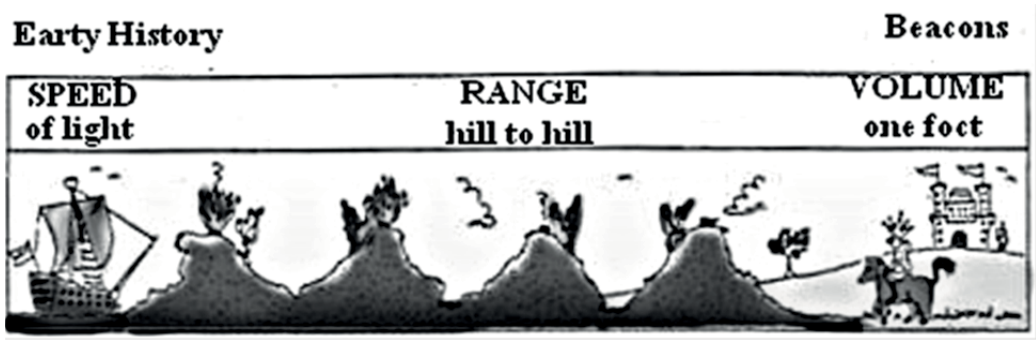
ราคา (Cost) คือ ค่าใช้จ่ายในระบบการสื่อสาร เป็นที่ทราบกันดีว่า สำหรับผู้ใช้นั้นมีความต้องการที่จะได้สิ่งที่ราคาถูกที่สุดเสมอ และมีคุณภาพมีความสะดวกในการใช้งานส่วนมากแล้วราคาของระบบสื่อสารจะต้องคิดเปรียบเทียบระหว่างราคาต่อปริมาณของการส่งข้อมูลทั้งนี้แม้ระบบการสื่อสารจะแตกต่างกัน ก็สามารถที่จะคำนวณราคาและทำการเปรียบเทียบกันได้

ความสะดวกในการใช้งาน (Convenience) คือ ความพร้อมใช้งานของระบบสื่อสาร ระบบการสื่อสารไม่ใช่จะมีเพียงความน่าเชื่อถือและราคาที่เหมาะสมเท่านั้น แต่จะต้องมีความสะดวกในการใช้งานรวมอยู่ด้วยเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 วิวัฒนาการของการสื่อสาร

ความก้าวหน้าทางวิวัฒนาการของการสื่อสารมีผลกระทบโดยตรงกับความสามารถของการสื่อสาร ในอดีตมนุษย์จะสื่อสารด้วยกิริยา ท่าทาง ทางหน้าตา และวาจา ดังนั้นในสมัยมนุษย์ถ้ำ นักล่าของชนกลุ่มหนึ่งจะติดต่อสื่อสารกับนักล่าชนกลุ่มอื่นได้ลำบาก ความก้าวหน้าของภาษาทำให้คนเราตกลงกันได้ โดยเริ่มจากครอบครัวไปเป็นกลุ่มชน และประเทศ ในอดีตชาวโรมันและจักรพรรดิเอสเทค ต่างเห็นด้วยกับการปรับปรุงความเร็วของการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงพื้นถนนให้ดีขึ้นเพื่อที่จะเพิ่มความเร็วให้แก่คนส่งสาร

การสื่อสารโทรคมนาคมนั้นถูกวิวัฒนาการอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเริ่มตั้งแต่การจุดกองไฟบนยอดเขาเพื่อให้เห็นควันที่ลอยสูงขึ้น การใช้คนเดินข่าว หนังสือพิมพ์ โทรเลข โทรศัพท์ จนกระทั่งวันนี้ มีการนำไปใช้ประยุกต์กับสถานีวิทยุ และสถานีโทรทัศน์ ระบบคอมพิวเตอร์ระบบดาวเทียม และการสื่อสารเส้นใยนำแสงและได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 1.3



ยุคอดีตโดยการใช้สัญญาณควัน

ยุคเริ่มต้นประวัติศาสตร์โดยใช้คนวิ่งสาร

ยุคศตวรรษที่ 19 โดยใช้โทรเลข

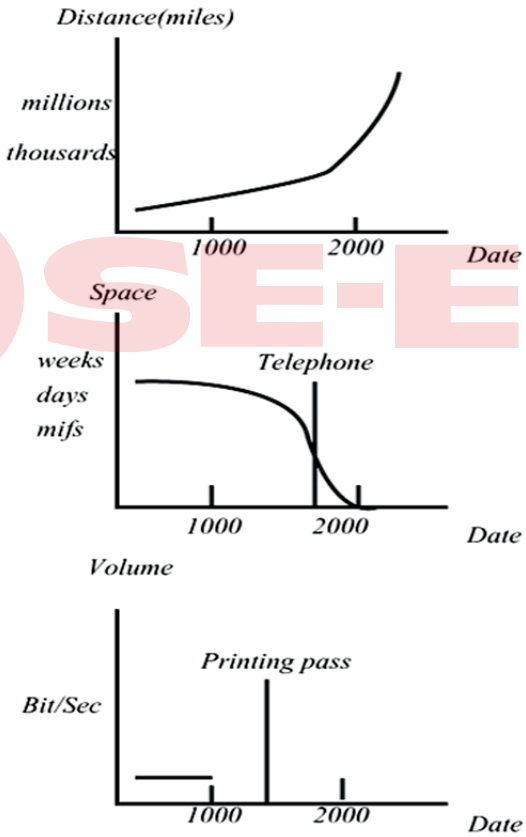
ยุคปัจจุบัน โดยใช้การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

ยุคปัจจุบัน โดยใช้การสื่อสารผ่านระบบสัญญาณดาวเทียม

รูปที่ 1.3 ความเจริญก้าวหน้าในระบบการสื่อสารตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

ตั้งแต่สมัยโบราณกาลเรื่อยมา สิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อมนุษย์คือการสื่อสาร ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นประดิษฐ์ระบบการสื่อสาร เพื่อส่งผ่านข่าวสารข้อความระยะทางไกลไปยังสถานที่อื่น จึงปรากฏรูปแบบของการสื่อสารเกิดขึ้นมากมายให้เห็นได้ดังปัจจุบัน ปัจจัยพื้นฐานที่กระตุ้นให้เกิดการสื่อสารรูปแบบใหม่ๆ คือการพัฒนาเพื่อที่จะปรับปรุงการส่งผ่านข้อมูลให้เที่ยงตรงแม่นยำและได้ข้อมูลที่มากขึ้นกว่าเดิม หรืออีกนัยหนึ่งคือ การพยายามถ่ายทอดข้อมูลให้ได้ระยะทางที่ไกลขึ้นในระหว่างแต่ละสถานี

ก่อนศตวรรษที่ 19 ระบบการสื่อสารทั้งหมดจะดำเนินการได้ค่อนข้างช้าและซับซ้อนโดยใช้ระบบพื้นฐานแสง หรือการกระจายเสียงเป็นหลัก เช่น สัญญาณกองไฟ หรือเขาสัตว์ ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณอย่างง่ายๆ ที่รู้จักกันโดยทั่วไป ดังตัวอย่างการใช้สัญญาณกองไฟที่ประเทศกรีก ก่อนช่วงศตวรรษที่ 8 เพื่อส่งสัญญาณเตือนภัยร้องขอความช่วยเหลือหรือป่าวประกาศเหตุการณ์สำคัญ



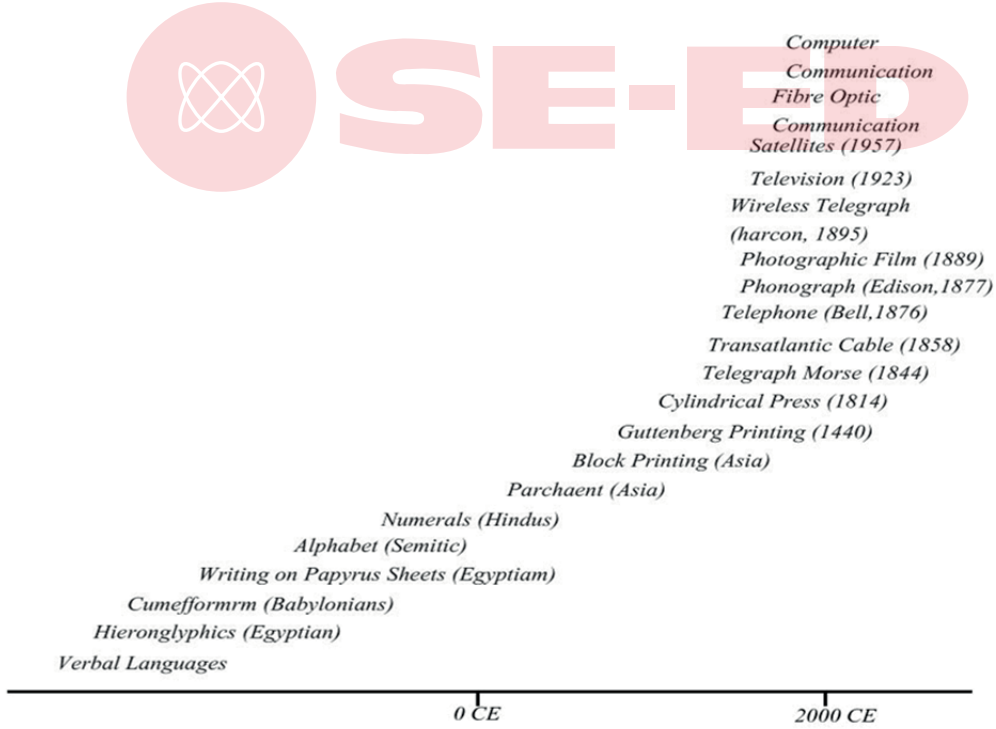
รูปที่ 1.4 ปัจจัยที่ทำให้ดีขึ้นในการสื่อสาร

การประดิษฐ์โทรเลขโดย ซามูเอล เอฟ. บี. มอร์ส ในปี พ.ศ. 2436 ซึ่งถือได้ว่าเป็นผู้นำในการสื่อสารที่สำคัญในอดีต ด้วยการสื่อสารด้วยระบบไฟฟ้าที่มีกระบวนการซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นการถ่ายทอดข้อมูลจากสถานที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง จึงเป็นเหตุให้ระบบไฟฟ้าเป็นที่นิยมในช่วงนั้น โดยปกติช่องทางการ

ถ่ายทอดข้อมูลการสื่อสารนั้น มีระบบที่ซับซ้อนแตกแขนงออกไปมากมาย โดยแบ่งแยกตามลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้เป็นตัวส่งข้อมูลและตามความต้องการ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้สามารถถ่ายทอดข้อมูลนั้นแม่นยำ และใช้พิสัยความถี่ที่ชัดเจนมากขึ้น

หากเราย้อนไปถึงจุดเริ่มต้นของการวิวัฒนาการของระบบสื่อสารในอดีตแล้ว เราจะพบว่าสาเหตุหลักเกิดจากการพัฒนาของเครื่องพิมพ์ในช่วงปี พ.ศ. 2043 (ดังรูปที่ 1.4 รูปล่าง) ทำให้มนุษย์สามารถส่งข้อมูลได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นและเกิดประโยชน์ต่อสาธารณะเป็นอย่างสูง จนกระทั่งการพัฒนาทางโทรเลขและโทรศัพท์ในช่วงปี พ.ศ. 2343 (ดังรูปที่ 1.4 รูปกลาง) ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนแปลงอย่างมากถัดจากการพัฒนาของเครื่องพิมพ์ ทำให้ความสามารถในการสื่อสารระยะทางไกลๆ นั้นรวดเร็วมากขึ้น (ดังรูปที่ 1.4 รูปบน) เราจะพบว่าระยะทางในการสื่อสารนั้นเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก จนเป็นบ่อเกิดให้เกิดการติดต่อค้าขายระหว่างประเทศได้

จากจุดนี้เราสามารถอธิบายพัฒนาการของการสื่อสารตามกาลเวลาโดยมนุษย์สู่สังคม และเศรษฐกิจ โดยเริ่มจากการสื่อสารด้วยระหว่างคำพูดของบุคคลทั้งสองข้ามทวีปโดยการสื่อสารผ่านดาวเทียม จนถึงการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการสื่อสาร เช่น ระบบอินเทอร์เน็ต เป็นต้น โดยรูปที่ 1.5 จะแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการทางด้านเทคนิคของการสื่อสารตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 1.5 การพัฒนาการทางด้านเทคนิคของการสื่อสาร[1,2]

1.6 การสื่อสารทางเสียง

การสื่อสารทางเสียงคือ การส่งต้นฉบับเสียงไปยังภาครับ โดยส่วนใหญ่เรามักจะพูดถึงความสะดวกในการสื่อสาร กำลังเสียงที่สร้างด้วยลำโพงก่อให้เป็นเสียงระดับต่างๆ ที่คนรับสามารถรับฟังได้วิธีนี้จะมีข้อจำกัดทั้งด้านความเร็ว และความถี่ที่ใช้ในการส่ง

ยกตัวอย่างเช่น เสียงของกลองสามารถอธิบายทางเทคนิคได้เป็นกำลังเสียงและค่าความถี่ ผลกระทบต่างๆ เช่น การเคาะจังหวะ จะทำให้เสียงเดินทางไปที่เครื่องรับ และทำให้ผู้รับสามารถรับฟังได้ สำหรับในประเทศอินเดีย จะใช้วิธีนี้ในการส่งสัญญาณเตือนภัย

อีกตัวอย่างหนึ่งคือ เครื่องส่งโทรเลข ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนจังหวะการเคาะให้เป็นเสียง หลักการของเทคโนโลยีนี้คือ การผลิตของสัญญาณไฟฟ้าในลักษณะสั้นและยาวในรหัสมอร์สโดยการปิดและเปิดสวิตช์ ในส่วนของวงจรภาครับ สัญญาณภาครับจะถูกแปลงกลับเป็นต้นฉบับของสัญญาณเสียง ภายหลังจากถูกถอดรหัสกลับมาเป็นข้อความ โดยรหัสโทรเลขสามารถดูได้ดังรูปที่ 1.6

*ข้อมูลจาก International Morse Code Recommendation ITU-R M.1677-1

รูปที่ 1.6 รหัสมอร์สของเครื่องส่งโทรเลข

เครื่องโทรเลขไร้สายคือ สิ่งประดิษฐ์ภายหลังจากการใช้งานระบบโทรเลขแบบมีสายจนแพร่หลาย ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย กูกลิเอลโม มาร์โคนีในปี พ.ศ. 2438 ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารทางโทรเลขได้ในระยะทางไกลๆ และที่สำคัญระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับเคลื่อนที่ การติดต่อสื่อสารเชื่อมโยงระหว่างกันด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ข้อความถูกส่งจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับได้ แต่วิธีการนี้จะมีข้อจำกัดในเรื่องของความชำนาญของผู้ส่งโทรเลข หรือผู้รับข้อความที่ภาครับ หลังจากนั้นไม่นานเทคโนโลยีของการสื่อสารก็ได้ถูกพัฒนาโดย อเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบลล์ในปี พ.ศ. 2419 และสิ่งนี้ก็เป็นพื้นฐานของการแปลงข้อมูลเสียงออกจากลำโพง ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า ทั้งนี้การส่งระยะทางไกลนั้นจะต้องส่งผ่านสายตัวนำไฟฟ้า

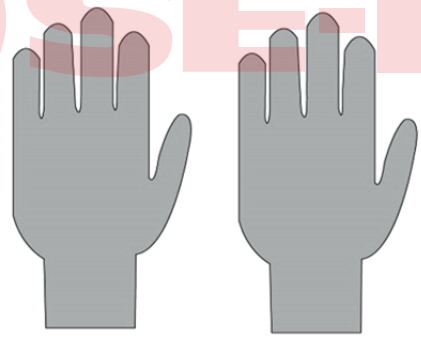
แล้วแปลงกลับไปเป็นข่าวสารที่เครื่องรับในรูปของสัญญาณเสียง สำหรับระบบนี้จะใช้สายสองเส้นสำหรับสัญญาณที่เชื่องโยงทั้งที่เครื่องรับและเครื่องส่ง ปัญหาหลักของระบบนี้คือกำลังส่งข้อมูลที่จำกัด เนื่องจากการถูกลดทอนในสาย และการถอดรหัสด้วยมนุษย์ นอกจากนั้นยังมีปัญหาอื่นๆ เช่น ในส่วนของระบบสายส่งที่เกิดเป็นประจำคือการเกิดเสียงแทรก

การสื่อสารทางวิทยุคือ เทคนิคของการสื่อสารข้อความที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยข้อความจะมีการเข้ารหัสที่สถานีเครื่องส่งและส่งในระยะทางไกลถึงสถานีเครื่องรับ โดยรูปแบบของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะถูกถอดรหัสและเปลี่ยนรูปไปเป็นสัญญาณเสียงที่มนุษย์สามารถรับฟังได้

1.7 การสื่อสารทางภาพ

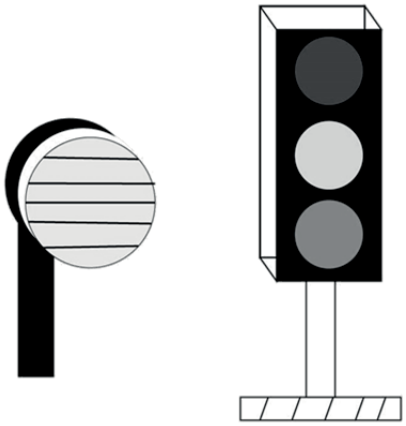
การสื่อสารทางภาพโดยการมองเห็นนั้น สายตาของมนุษย์จะสามารถมองเห็นแสงและแปลความหมายได้อย่างชัดเจน

การสื่อสารนี้สื่อความหมายออกทางรูปร่าง หน้าตา และเป็นการสื่อสารที่ง่ายที่สุด การสื่อสารแบบง่ายๆ ในระยะแรกของการสื่อสารทางภาพ และรหัสต่างๆ นั้นได้ถูกพัฒนาโดยมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ ในระหว่างกลุ่มคนหูหนวก โดยการแสดงความแตกต่างทางมือและนิ้วมือเป็นการบ่งบอกถึงข้อความและคำต่างๆ ดังรูปที่ 1.7



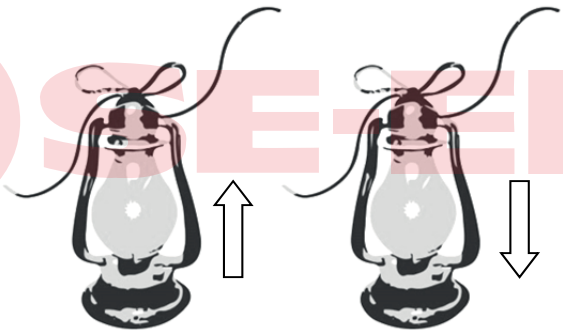
รูปที่ 1.7 สัญญาณมือ

การสื่อสารทางอื่นไม่ว่าจะเป็นไฟกะพริบ ได้ถูกนำมาใช้โดยการใช้เทคนิคต่างๆระหว่างสงครามโลกครั้งที่สองโดยกองทัพทหารได้ใช้วิธีส่งข้อความทางรหัสมอร์ส เกิดเป็นต้นแบบของไฟกะพริบซึ่งภายหลังถูกนำมาใช้ในการควบคุมการจราจร ดังรูปที่ 1.8



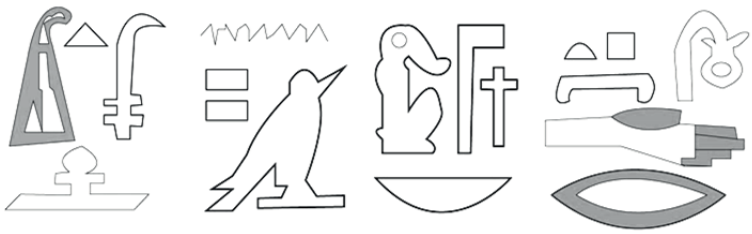
รูปที่ 1.8 ต้นแบบไฟจราจร

ในเรื่องของการรถไฟ วิศวกรจะใช้โคมไฟเพื่อเป็นสัญญาณให้กับคนขับ ถ้ายกโคมไฟขึ้นลง หมายความว่าให้ขับต่อไปได้และถ้าแกว่งโคมไฟไปมาแสดงว่าให้หยุด ดูจากรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 สัญญาณแสงทางรถไฟ

ต่อมาได้พัฒนาให้มีการเขียนเรียกว่า ภาษาอียิปต์โบราณ แต่ละสัญลักษณ์จะมีความหมายที่แตกต่างกันตามรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 สัญลักษณ์อียิปต์โบราณ

ในกรณีที่คล้ายๆ กัน ชาวบาบิโลนได้พัฒนาการเขียนเรียกว่า คูนิฟอร์ม (รูปที่ 1.11)

รูปที่ 1.11 ต้นแบบภาษาคูนิฟอร์มของชาวบาบิโลน

ครั้งแรกที่มีการเขียนตัวอักษรได้ถูกพัฒนาโดยชาวอาหรับ ประมาณช่วงปี พ.ศ. 2043 ต่อมาเกิดการเปลี่ยนแปลงทางตัวอักษรโดยชาวกรีก ทั้งนี้ชาวโรมันได้มีการเขียนหนังสือและบันทึกเป็นเหตุการณ์ไว้ การพัฒนาข้อมูลการเขียนได้มีการกระทำอย่างต่อเนื่อง และได้มีการประดิษฐ์เครื่องพิมพ์โดย โยฮันน์ กูเทนเบิร์ก และในปี พ.ศ. 2343 ได้มีการพัฒนาเป็นการถ่ายภาพคนเพื่อใช้ในการสื่อสาร ทุกวันนี้รูปเหล่านั้นได้มีการส่งโดยทางโทรศัพท์และทางเครื่องรับโทรทัศน์

1.8 การสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์

การสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์คือ เทคนิคของการส่งข้อมูลชนิดต่างๆ ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วแสง ในการส่งโดยข้อมูลจะต้องแปลงจากข้อมูลต้นฉบับเป็นรูปแบบพลังงานไฟฟ้าผ่านสายตัวนำ ไม่ว่าจะเป็นการใช้สายไฟ สายเคเบิล หรือการกระจายออกอากาศ เครื่องรับจะแปลงพลังงานไฟฟ้าให้กลับมาในรูปแบบเดิม หรือในรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ถูกถอดรหัสได้โดยมนุษย์หรือเครื่องจักรดังรูปที่ 1.12

ข้อมูลจากแหล่งต้นกำเนิดในรูปแบบของต้นฉบับ จะสามารถถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเสียง (เช่น เสียงพูดของใครคนหนึ่ง) พลังงานแสง (เช่น รูปภาพ หรือภาพถ่าย) เครื่องจักร (เช่น การปิดสวิตช์ หรือการตรวจสอบข้อมูลอุณหภูมิ ทางด้านความร้อน และความไว เป็นต้น) ข้อมูลที่จะส่งในภาครับเพื่อถอดรหัสจะต้องอยู่ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้า

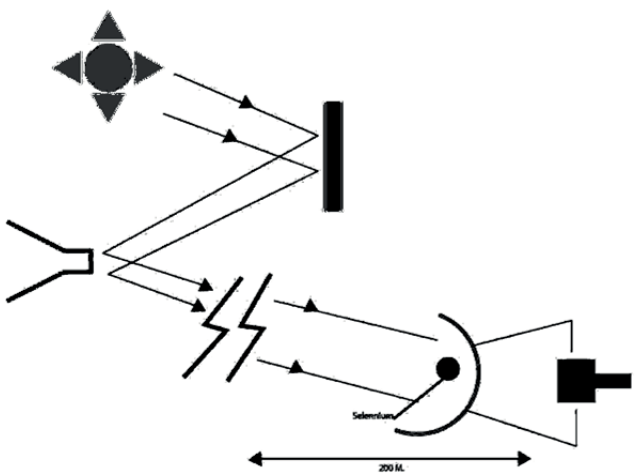
รูปที่ 1.12 ระบบการสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์

รูปแบบของพลังงานไฟฟ้านี้อาจจะขยายหรือเปลี่ยนแปลงรูปแบบก่อนที่จะส่งออกจากเครื่องส่ง ถ้าใช้การส่งผ่านในอากาศ เครื่องส่งจะส่งข้อมูลโดยการแพร่กระจายผ่านทางอากาศ ในระยะทางไกลขึ้นสัญญาณจะลดขนาดลง จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องทวนสัญญาณ เพื่อที่จะไม่ทำให้สัญญาณที่ส่งออกมีกำลังอ่อนกำลังลง เครื่องทวนสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พักทางเดินสัญญาณ เพื่อที่ยกระดับสัญญาณที่อ่อนกำลังลงก่อนที่จะส่งออกไปยังเครื่องทวนสัญญาณตัวต่อไป หรือส่งตรงไปยังเครื่องรับปลายทาง

ปัจจุบันมีการนำวิธีสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ประยุกต์ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ การเมือง และในหมู่ประชาชน ข้อมูลข่าวสารที่สร้างโดยมนุษย์จะแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงในทางการเมืองและธุรกิจ โดยทำให้เกิดการตัดสินใจการดำเนินธุรกิจในระยะทางไกลๆ ได้ทันที และมีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่อไปเรื่อยๆการสื่อสารนั้นไม่มีขอบเขตไม่ว่าจะใช้กับงานทางด้านดนตรี เสียง ภาพ วิทยาศาสตร์ ข่าวสาร การเมืองการติดต่อทางธุรกิจ การทหาร ทางการแพทย์ ความบันเทิง การศึกษา เป็นต้น ทั้งหมดที่กล่าวมานี้สามารถปรับใช้กับเทคโนโลยีทางการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ได้

1.9 การสื่อสารระบบเส้นใยนำแสง

แสงถูกนำมาใช้ในการสื่อสารข้อมูล โดยมีต้นกำเนิดมาตั้งแต่อดีตกาล นับตั้งแต่มนุษย์เริ่มรู้จักที่จะใช้แสงในการสื่อสาร เช่น การใช้พลุสัญญาณ การส่งสัญญาณด้วยไฟของชาวเขา จนกระทั่งการสะท้อนแสงด้วยวัตถุที่เรียบมันวาว หรือการใช้กระจกเงาในการสะท้อนแสงจากดวงอาทิตย์ จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง การสื่อสารข้อมูลแบบนี้ แสงจะเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ ทำให้ประสบปัญหาในการนำข้อมูล เพราะแสงเดินทางเป็นเส้นตรง ทำให้แนวทางการเดินทางของแสงจะต้องไม่มีอุปสรรคขวางกั้น อีกทั้งในช่วงที่แสงเดินทาง อาจจะประสบกับสภาพอากาศที่ถูกเจือด้วยฝุ่นละออง องค์ประกอบเหล่านี้ล้วนทำให้แสงไม่สามารถนำข่าวสารไปได้ไกล



รูปที่ 1.13 โทรศัพท์แสงที่สร้างโดย อเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบลล์

ในปี พ.ศ. 2423 อเล็กซานเดอร์ เกรแฮมเบลล์ผู้คิดประดิษฐ์ระบบโทรศัพท์ ได้กล่าวถึงวิธีการส่งข้อมูลด้วยโทรศัพท์ที่ใช้แสง ในปี พ.ศ. 2473 (รูปที่ 1.13) โดยเริ่มมีการนำเส้นใยนำแสงมามัดรวมกันเป็นท่อที่ใหญ่ขึ้น เพื่อใช้นำแสงจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลด้วยแสงเริ่มเป็นที่สนใจ จนในปี พ.ศ. 2491 มีการสร้างโครงสร้างของเส้นใยนำแสงขนาดเล็กๆ นำมามัดรวมเป็นเส้นที่ใหญ่ขึ้น และได้ถูกพัฒนาให้ใช้ได้ดีกับอุปกรณ์ที่เรียกว่า *เอ็นโดสโคป (Endoscope)*

ในส่วนของท่อนำสัญญาณแสง จะมีโครงสร้างที่สร้างด้วยแก้ว และแบ่งเป็นสองส่วน ในลักษณะเช่นเดียวกับเส้นใยนำแสง ซึ่งถูกวิจัยและนำเสนอในหลักการในปี พ.ศ. 2509 อ้างอิงจากบทความของ เคา (Kao) กับฮอกเกอร์แฮม (Hockerham) และบทความของเวิร์ต (Werts) ในยุคแรกๆ เส้นใยนำแสงที่ผลิตขึ้นจะมีค่าการลดทอนสัญญาณสูงมากที่ประมาณ 1,000 เดซิเบลต่อกิโลเมตร ทำให้ไม่เป็นที่สนใจในการนำมาใช้เป็นสายส่งสัญญาณ เฉกเช่นเดียวกับสายทองแดง อีกทั้งยังมีปัญหาการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงที่ทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณที่สูง ในปีพ.ศ. 2513 บริษัท คอร์นนิ่ง (Corning) ของสหรัฐอเมริกา ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตเส้นใยนำแสงจากเนื้อแก้วบริสุทธิ์ และสามารถนำมาใช้ในการสื่อสารข้อมูลเชิงพานิชย์ได้เป็นรายแรกของโลก และมีค่าการลดทอนสัญญาณสูงถึง 20 เดซิเบลต่อกิโลเมตร และอีกไม่กี่ปีต่อมาเส้นใยนำแสงได้ถูกพัฒนาให้มีค่าการลดทอนสัญญาณที่ต่ำลงเหลือเพียง 5 เดซิเบลต่อกิโลเมตร

เทคโนโลยีของเส้นใยนำแสงเริ่มมีบทบาทในการสื่อสารข้อมูลอย่างมาก เนื่องมาจากเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์ ในการผลิตแหล่งกำเนิดแสงได้พัฒนาไปมาก เช่น หลอดแอลอีดี (LED) และเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) รวมทั้งการผลิตอุปกรณ์รับแสงหรือโฟโต้ดีเทคเตอร์ (Photo detector) ซึ่งมีขนาดเล็กลง และเหมาะกับการนำมาใช้งานร่วมกับเส้นใยนำแสง

ในช่วงแรกของการผลิตเลเซอร์ไดโอด (ซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีบทบาทสำคัญในการใช้งานเส้นใยนำแสง) โดยมักจะใช้สารประกอบระหว่างอะลูมิเนียมและแกลเลียมอะเซไนด์ เช่น AlGaAs ซึ่งสามารถเปล่งแสงออกมาในย่านอินฟราเรดระหว่าง 800-900 นาโนเมตร ในลักษณะของพัลส์ อีกทั้งมีอายุการใช้งานสั้นไม่เกิน 10,000 ชั่วโมง ต่อมาสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเลเซอร์ไดโอดได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันเลเซอร์ไดโอดสามารถผลิตแสงได้หลากหลายย่านความยาวคลื่น ทั้งในช่วงที่ตามองเห็นและช่วงของอินฟราเรด โดยแสงที่ผลิตออกมา มีทั้งลักษณะที่เป็นพัลส์และต่อเนื่อง (Continuous wave) อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นกว่าเดิมมาก

1.10 ข้อมูลเครือข่ายระดับพื้นฐาน

ในช่วงศตวรรษ 1990 เห็นได้ว่าเกิดความต้องการใช้ประโยชน์จากระบบการสื่อสารมากขึ้น ซึ่งถูกแพร่ขยายออกไปเพื่อจุดมุ่งหมายในการกระจายฐานข้อมูลให้ทันสมัย การสั่งซื้อสินค้าที่บ้าน วิดีโอตามสั่ง การศึกษาระยะไกล การแพทย์ระยะไกล การประชุมทางไกล ซึ่งเป็นความต้องการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามยุคสมัยของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PCs) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อและเก็บข้อมูลที่มีความจุมากขึ้นได้อย่างมหัศจรรย์ และแพร่หลายทั่วไปเช่น ระบบอินเทอร์เน็ต และเกิดเป็นตัวเลือกที่ถูกใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นระบบที่เข้าใจง่าย และมีสามารถเก็บฐานข้อมูลได้ อีกนัยหนึ่งคือทำให้เกิดความต้องการที่มาก

ขึ้นของการบริการในด้านการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุความถี่สูงโดยกผู้ใช้ ซึ่งผันแปรจากการใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลธรรมดา กลายเป็นธุรกิจขนาดใหญ่ และทำให้เกิดการวิจัยพัฒนาโดยองค์กรต่างๆ ในด้านการสื่อสารทางไกลอย่างแพร่หลายไปทั่วโลก โดยใช้คลื่นความถี่แสงเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงเป็นตัวหลักในการสื่อสาร การสื่อสารระบบเส้นใยนำแสงขนาดกลางประกอบด้วยเส้นใยนำแสงเส้นเล็กๆ เป็นตัวนำส่งสัญญาณแสงส่งไปยังพื้นที่ระยะไกล

ตารางที่ 1.1 แสดงตัวอย่างอัตราของข้อมูลข่าวสาร ประเภทเสียง วิดีโอ และบริการข้อมูล การส่งต่อบริการจากผู้ใช้ไปยังที่อื่นๆ ผู้จัดการระบบได้รวบรวมสัญญาณจากผู้ใช้ที่แตกต่างกันมากมาย และส่งสัญญาณโดยรวม โดยการส่งสัญญาณถ่ายทอดข้อมูลทางสาย ซึ่งหลักการนี้อธิบายโดยการถ่ายทอดสัญญาณในหลายๆ ช่องสัญญาณ สมมุติให้ N เป็นช่องสัญญาณ ซึ่งดำเนินการส่งที่อัตราข้อมูล R บิตต่อวินาที โดยอัตราการส่งข้อมูลรวมคือ N X R บิตต่อวินาที

ในยุคก่อนวัตถุประสงค์ของการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงคือการใช้งานภายในระบบโทรศัพท์ขนาดใหญ่ ซึ่งในระบบดิจิทัลของช่องทางการสื่อสารจะเป็น 64 kb/s ตารางที่ 1.2 แสดงถึงการส่งผ่านข้อมูลดิจิทัลของระบบโทรศัพท์ในอเมริกาเหนือ โดยอัตราส่งข้อมูลในขั้นแรกจะถูกสร้างขึ้นเป็น 1.544 เมกกะบิตต่อวินาที หรือรู้จักกันในชื่อย่อว่า T1 โดยภายในกล่องแรกของรูปภาพนั้นจะเป็นการส่งข้อมูล จำนวน 24 ช่องสัญญาณดิจิทัลที่อัตราการส่งช่องละ 64 kb/s

ช่องสัญญาณการสื่อสารที่แสดงให้เห็นในตารางที่ 1.2 ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการส่งข้อมูล T1 (1.544 เมกกะบิตต่อวินาที) T2 (6.312 เมกกะบิตต่อวินาที) และ T3 (44.736 เมกกะบิตต่อวินาที) คล้ายกับการใช้เส้นใยแสงเล็กๆ ที่แตกต่างกันในยุโรป และญี่ปุ่นดังที่แสดงในตารางดังกล่าวโดยจะมีการตั้งชื่อระบบให้ถูกต้องตามวิธีการส่งด้วยสัญญาณดิจิทัลเป็น DS1 DS2 และ DS3 ซึ่ง DS นั่นเป็นตัวหลักในระบบดิจิทัลที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำ DSx จะกล่าวถึงและใช้กับรูปแบบการเชื่อมต่อที่มีความเร็วในการส่งจำกัด แต่ Tx กล่าวถึงการถ่ายทอดข้อมูลขนาดกลางที่เร็วกว่า DSx ในการส่งสัญญาณ อย่างไรก็ตามทั้งสองระบบก็สามารถที่จะนำมาใช้สลับสับเปลี่ยนกันได้

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างอัตราการส่งข้อมูลข่าวสาร ประเภทเสียง วิดีโอ และบริการข้อมูล[1,2]

Type of service	Data rate
Video on demand/interaclive TV	1.5-6 Mb/s
Video Games	1-2 Mb/s
Remote education	1.5-3 Mb/s
Electronic shopping	1.5-6 Mb/s
Data transfer or telecommuling	1-3 Mb/s
Videoconferencing	0.384-2 Mb/s
Voiec (single channel)	64 kb/s

การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง
Optical Communication

โลกปัจจุบันได้เข้าสู่ระบบโลกาภิวัตน์อย่างเต็มรูปแบบ ทำให้วิถีชีวิตของผู้คนเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก คนรุ่นใหม่เติบโตมาพร้อมกับโลกดิจิทัลที่มีความต้องการระบบการสื่อสารที่รวดเร็วมากขึ้น เช่น ความนิยมในการรับชมวีดิทัศน์ที่มีความคมชัดสูง ทั้งผ่านทางโทรศัพท์สมาร์ทโฟนและอินเตอร์เน็ต ทำให้มีความต้องการที่จะยกระดับความเร็วในการสื่อสารข้อมูลดังกล่าวให้สูงมากขึ้น ผ่านทางมาตรฐานการสื่อสารแบบใหม่ เช่น เทคโนโลยี 4G หรือ 5G ซึ่งพยายามจะรวบรวมมาตรฐานระบบสื่อสารต่างๆ ที่มีอยู่ทั่วโลกเข้าด้วยกันเป็นหนึ่งเดียวกัน ทั้งนี้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่ายังไม่มีสิ่งใดในปัจจุบันที่สามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่าแสง ทำให้ระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงถูกนำประยุกต์ใช้เป็นระบบศูนย์กลางในการสื่อสารในปัจจุบัน เราจึงมิอาจปฏิเสธได้ว่าระบบเส้นใยนำแสงนั้นเข้ามาใกล้ตัวเรามากขึ้น และคงยังไม่มีระบบใดที่สามารถมาทดแทนระบบการสื่อสารเชิงแสงได้ หากยังไม่มีสิ่งใดที่เคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่าแสง

หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นสำหรับ นิสิต นักศึกษา วิศวกร และผู้สนใจ โดยที่ผู้เขียนได้รวบรวมแหล่งความรู้จาก หนังสือตำราวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ งานวิจัย ตลอดจนประสบการณ์สอนในระดับมหาวิทยาลัย และการทำงานในบริษัทเอกชนและภาครัฐของผู้เขียนที่มีมากกว่าสิบปี ซึ่งผู้เขียนเห็นว่ามีความจำเป็นสำหรับนิสิตและนักศึกษาที่กำลังจะจบไปทำงานในบริษัทหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารเชิงแสงในประเทศไทย ทั้งในด้านการออกแบบ ติดตั้งและใช้เครื่องมือวัดเชิงแสง เนื้อหาของหนังสือเล่มนี้จะครอบคลุมหัวข้อที่จำเป็นเกือบทั้งหมด จากการที่ผู้เขียนได้ทำการสำรวจความต้องการของตลาดงานทางด้านนี้ผ่านการศึกษาดูงานและสอบถามความต้องการจริง อีกทั้งเนื้อหายังถูกออกแบบและปรับปรุงให้สอดคล้องกับหัวข้อในรายวิชา Optical communication สำหรับหลักสูตรวิศวกรรมควบคุมสาขาไฟฟ้าสื่อสารอีกด้วย

SE-ED

ISBN 978-616-08-3032-9
9 786160 830329
320 บาท
วิทยาการและเทคโนโลยี

www.se-ed.com
sbc.fans