

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 พื้นฐานระบบสื่อสาร	1
1.2 ประวัติความเป็นมาของการสื่อสารดิจิทัล	2
1.3 ทำไมต้องใช้การสื่อสารดิจิทัล	4
1.4 แบบจำลองโอเอสไอ	8
1.5 แบบจำลองระบบสื่อสารดิจิทัล	10
1.5.1 ตัวชี้บอกสมรรถนะของระบบ.....	15
1.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสื่อสาร	16
1.6.1 ช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบขาว.....	16
1.6.2 ช่องสัญญาณ AWGN.....	16
1.6.3 ช่องสัญญาณตัวกรองเชิงเส้น.....	17
1.6.4 ช่องสัญญาณตัวกรองเชิงเส้นที่แปรเปลี่ยนตามเวลา.....	17
1.7 สรุปท้ายบท	18
1.8 แบบฝึกหัดท้ายบท	18
บทที่ 2 พื้นฐานสัญญาณและระบบ.....	19
2.1 ประเภทของสัญญาณ	19
2.1.1 สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล.....	19
2.1.2 สัญญาณคาบและสัญญาณไม่เป็นคาบ.....	21
2.1.3 สัญญาณเชิงกำหนดและสัญญาณสุ่ม	22
2.1.4 สัญญาณพลังงานและสัญญาณกำลัง.....	22
2.2 สัญญาณพื้นฐานที่น่าสนใจ	24
2.2.1 สัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย.....	24
2.2.2 สัญญาณอิมพัลส์หนึ่งหน่วย	24

2.2.3 สัญญาณซิงก์.....	25
2.3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณ	27
2.3.1 การย่อและการขยายขนาดของสัญญาณ.....	27
2.3.2 การเลื่อนเวลาของสัญญาณ	27
2.3.3 การพับสัญญาณ	28
2.3.4 การผสมระหว่างการเลื่อนเวลาและการพับสัญญาณ	28
2.4 คอนโวลูชัน	29
2.5 ระบบ	30
2.5.1 ประเภทของระบบ	30
2.5.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ	31
2.6 สหสัมพันธ์	34
2.6.1 สหสัมพันธ์ข้าม.....	34
2.6.2 อัตสหสัมพันธ์.....	36
2.6.3 การประยุกต์ใช้สหสัมพันธ์.....	37
2.7 อนุกรมฟูเรียร์.....	39
2.7.1 อนุกรมฟูเรียร์ในรูปของเลขชี้กำลังเชิงซ้อน.....	40
2.7.2 เงื่อนไขการคู่เข้าของอนุกรมฟูเรียร์.....	44
2.7.3 ปรากฏการณ์กิบส์.....	45
2.7.4 คุณสมบัติของอนุกรมฟูเรียร์.....	47
2.7.5 สรุปคู่อนุกรมฟูเรียร์.....	49
2.7.6 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง.....	50
2.8 การแปลงฟูเรียร์.....	53
2.8.1 เงื่อนไขการคู่เข้าของการแปลงฟูเรียร์.....	59
2.8.2 คุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์.....	60
2.8.3 ทฤษฎีบทพลังงานของเรย์ลี.....	61
2.8.4 การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณคาบ.....	63
2.8.5 สรุปคู่การแปลงฟูเรียร์.....	67
2.8.6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ	69
2.9 สรุปท้ายบท	71
2.10 แบบฝึกหัดท้ายบท	71

บทที่ 3 ตัวแปรสุ่มและกระบวนการสุ่ม	73
3.1 ความน่าจะเป็นและปริภูมิตัวอย่าง	73
3.2 ตัวแปรสุ่ม	78
3.2.1 ฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม.....	80
3.2.2 ตัวแปรสุ่มหลายตัว.....	82
3.2.3 ค่าเฉลี่ยเอนเซมเบิล	83
3.2.4 โมเมนต์.....	85
3.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่ม.....	87
3.2.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน	89
3.2.7 ตัวแปรสุ่มวิยุตที่น่าสนใจ.....	94
3.3 กระบวนการสุ่ม	96
3.3.1 ค่าเฉลี่ยและฟังก์ชันอัตโนมัติ.....	96
3.3.2 สเตชันนารี.....	98
3.3.3 อัตสหสัมพันธ์ของกระบวนการสุ่มสเตชันนารีแบบไวต์เซนส์.....	99
3.3.4 กระบวนการเออร์กอดิก.....	102
3.3.5 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง.....	103
3.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการสุ่มและระบบ LTI.....	109
3.3.7 สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร	110
3.4 สรุปท้ายบท	114
3.5 แบบฝึกหัดท้ายบท	114
บทที่ 4 การกล่ารหัสพัลส์.....	117
4.1 การชักตัวอย่าง.....	117
4.1.1 ทฤษฎีบทการชักตัวอย่างของไนควิสต์.....	118
4.1.2 กระบวนการชักตัวอย่าง.....	119
4.1.3 การชักตัวอย่างด้วยวงจรกรองต่ำอันดับศูนย์.....	121
4.1.4 กระบวนการสร้างสัญญาณแอนะล็อกให้กลับคืนมา.....	124
4.1.5 ความผิดเพี้ยนภาพ.....	127
4.2 การแจกหน่วย	131
4.2.1 วงจรแจกหน่วยเอกรูป.....	131

4.2.2	วงจรแรงหน่วยเหมาะสมที่สุด.....	135
4.2.3	วงจรแรงหน่วยไม่เชิงเส้น	138
4.2.4	วงจรแรงหน่วยเชิงอนุพันธ์	146
4.2.5	การกล้ำรหัสพัลส์เชิงอนุพันธ์.....	151
4.2.6	การกล้ำสัญญาณเดลตา.....	152
4.3	การเข้ารหัสพีซีเอ็ม.....	157
4.4	สรุปท้ายบท	159
4.5	แบบฝึกหัดท้ายบท	159
บทที่ 5	การกล้ำสัญญาณแถบความถี่ฐาน	161
5.1	ระบบการส่งสัญญาณแถบความถี่ฐาน	161
5.2	การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบแอนะล็อก	162
5.2.1	การกล้ำแอมพลิจูดของพัลส์.....	163
5.2.2	ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ PAM	164
5.3	การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบดิจิทัล	170
5.3.1	รหัสไบนารีโค้ด.....	172
5.3.2	การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบเอ็ม-อาร์รี.....	183
5.4	สรุปท้ายบท	183
5.5	แบบฝึกหัดท้ายบท	184
บทที่ 6	วงจรภาครับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการส่งข้อมูลไบนารี	185
6.1	บทนำ.....	185
6.2	กระบวนการงานแกรม-ซมิตท์	186
6.2.1	พลังงานของสัญญาณ.....	190
6.2.2	ระยะทางยुकليت.....	191
6.3	การแทนเชิงเรขาคณิตของสัญญาณข้อมูล.....	196
6.4	การแทนเชิงเรขาคณิตของสัญญาณรบกวน	204
6.5	วงจรภาครับที่เหมาะสมที่สุด	206
6.6	การลดความซับซ้อนวงจรภาครับที่เหมาะสมที่สุด	217
6.7	สมรรถนะของวงจรภาครับที่เหมาะสมที่สุด	219
6.7.1	การหาความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดจากปริภูมิสัญญาณ.....	229

6.7.2 ขอบเขตบนของความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาด.....	232
6.8 สรุปท้ายบท	234
6.9 แบบฝึกหัดท้ายบท	234
บทที่ 7 พื้นฐานการกล้ำสัญญาณผ่านแถบ.....	239
7.1 สัญญาณแถบความถี่ฐานและสัญญาณผ่านแถบ	240
7.1.1 ฟังก์ชันฐานหลักสำหรับการส่งผ่านสัญญาณผ่านแถบ.....	243
7.2 การตรวจหาแบบโคฮีเรนต์	244
7.2.1 การกล้ำสัญญาณแบบ BASK.....	244
7.2.2 การกล้ำสัญญาณแบบ BFSK.....	247
7.2.3 การกล้ำสัญญาณแบบ BPSK.....	249
7.2.4 สมรรถนะของการกล้ำสัญญาณไบนารีแบบต่างๆ	251
7.3 การตรวจหาแบบนอนโคฮีเรนต์.....	252
7.3.1 การกล้ำสัญญาณเชิงตั้งฉากแบบนอนโคฮีเรนต์.....	252
7.3.2 ระบบ BFSK แบบนอนโคฮีเรนต์.....	257
7.3.3 ระบบ BPSK ที่ถูกเข้ารหัสเชิงอนุพันธ์.....	259
7.4 การกล้ำสัญญาณดิจิทัลที่ใช้แบนด์วิดท์คุ้มค่า.....	267
7.4.1 การกล้ำสัญญาณแบบ QPSK.....	267
7.4.2 การกล้ำสัญญาณแบบ QPSK แบบควอดเรเจอร์.....	274
7.4.3 การกล้ำสัญญาณแบบ OQPSK.....	280
7.4.4 การกล้ำสัญญาณแบบ MSK.....	281
7.5 สรุปท้ายบท	287
7.6 แบบฝึกหัดท้ายบท	289
บทที่ 8 การกล้ำสัญญาณผ่านแถบแบบเอ็ม-อารี	291
8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์และบิต.....	291
8.2 การกล้ำสัญญาณแบบ M-ASK	293
8.3 การกล้ำสัญญาณแบบ M-PSK.....	299
8.3.1 ระบบ M-PSK ที่ถูกเข้ารหัสเชิงอนุพันธ์.....	306
8.4 การกล้ำสัญญาณแบบ M-QAM.....	308
8.5 การกล้ำสัญญาณแบบ M-FSK.....	318

8.6	สมรรถนะของการกล้ำสัญญาณแบบเอ็ม-อาร์รี	325
8.7	สรุปท้ายบท	331
8.8	แบบฝึกหัดท้ายบท	332
บทที่ 9 การส่งผ่านสัญญาณพัลส์แถบความถี่ฐาน.....		335
9.1	การส่งสัญญาณที่ไม่มีความผิดเพี้ยน	335
9.2	การแทรกสอดระหว่างสัญญาณ.....	338
9.2.1	การตรวจสอบระดับความรุนแรงของ ISI.....	340
9.2.2	การคำนวณหาค่าระดับความรุนแรงของ ISI.....	341
9.2.3	ผลกระทบของ ISI ต่ออัตราข้อผิดพลาดบิต.....	342
9.3	ทฤษฎีบทของโนควิสต์.....	343
9.3.1	สัญญาณพัลส์ในควิสต์อุดมคติ.....	344
9.3.2	แบนด์วิดท์น้อยสุด.....	346
9.3.3	สัญญาณพัลส์ RC	347
9.3.4	สัญญาณพัลส์ RRC.....	349
9.4	การเข้ารหัสสหสัมพันธ์.....	350
9.4.1	ระบบสัญญาณแบบ Duobinary.....	350
9.4.2	ระบบสัญญาณแบบ Modified Duobinary.....	353
9.5	อีควอไลเซอร์.....	356
9.5.1	อีควอไลเซอร์แบบ ZF.....	358
9.5.2	อีควอไลเซอร์แบบ DFE.....	361
9.5.3	อีควอไลเซอร์แบบ MMSE	362
9.5.4	อีควอไลเซอร์แบบปรับตัว.....	366
9.6	สรุปท้ายบท	375
9.7	แบบฝึกหัดท้ายบท	375
บทที่ 10 ทฤษฎีข่าวสารและการเข้ารหัสแหล่งต้นทาง.....		377
10.1	การวัดปริมาณข่าวสาร.....	377
10.2	เอนโทรปี.....	378
10.3	ช่องสัญญาณที่ไม่มีหน่วยความจำแบบไม่ต่อเนื่อง	382
10.3.1	ข่าวสารร่วมกัน	384

10.4 ความจุช่องสัญญาณ	385
10.4.1 ช่องสัญญาณที่ไม่มีการสูญเสีย.....	391
10.4.2 ช่องสัญญาณเชิงกำหนด.....	392
10.4.3 ช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวน.....	393
10.4.4 ช่องสัญญาณสมมาตรแบบไบนารี	393
10.5 ความจุช่องสัญญาณ AWGN.....	393
10.5.1 ขีดจำกัดแชนนอน	395
10.6 การเข้ารหัสแหล่งต้นทาง	398
10.6.1 ประเภทของรหัส.....	399
10.6.2 อสมการของคราฟต์.....	400
10.6.3 ความยาวเฉลี่ยน้อยสุดของคำรหัส.....	403
10.7 รหัสฮัฟฟ์แมน	405
10.8 รหัส Ziv-LEMPER	411
10.9 สรุปท้ายบท	414
10.10 แบบฝึกหัดท้ายบท	414
บทที่ 11 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ	417
11.1 บทนำ.....	417
11.2 รหัสบล็อกเชิงเส้น.....	419
11.2.1 เมทริกซ์ตัวกำเนิด	419
11.2.2 เมทริกซ์พาริตีเช็ก	420
11.2.3 ระยะทางน้อยสุดของรหัส	421
11.2.4 การถอดรหัสบล็อกเชิงเส้น	422
11.2.5 การสร้างวงจรเข้ารหัสและถอดรหัส	424
1.3 รหัสวน	427
11.3.1 การเข้ารหัส.....	428
11.3.2 เมทริกซ์ตัวกำเนิด	431
11.3.3 เมทริกซ์พาริตีเช็ก	432
11.3.4 การสร้างวงจรเข้ารหัส.....	434
11.3.5 การถอดรหัส.....	436
11.3.6 รหัสแฮมมิง.....	439

11.4 รหัสคอนโวลูชัน.....	441
11.4.1 การเข้ารหัส.....	441
11.4.2 การถอดรหัส.....	448
11.5 รหัสช่องสัญญาณที่น่าสนใจ	452
11.6 สรุปท้ายบท	453
11.7 แบบฝึกหัดท้ายบท	454
ภาคผนวก ก สูตรคณิตศาสตร์ที่สำคัญ	457
ภาคผนวก ข ตารางฟังก์ชัน Q	461
ภาคผนวก ค พื้นฐานพีชคณิตเชิงเส้น	465
ภาคผนวก ง วงจรกรองเข้าคู่.....	471
บรรณานุกรม	475
ดัชนี.....	479