

สัญญาและระบบ

และการประยุกต์ใช้โปรแกรม SCILAB

ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์

โปรแกรมวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

สัญญาณและระบบ

และการประยุกต์ใช้โปรแกรม SCILAB

(Signals and Systems with SCILAB Applications)

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์

ห้ามลอกเรียนแบบไม่ว่าส่วนใด ส่วนหนึ่งในหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนเท่านั้น

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

สัญญาณและระบบ / ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์. --นครปฐม:

โปรแกรมวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, 2552

สำหรับ

พญ. ศิริสุดา โควินท์ทวีวัฒน์ และครอบครัว

คำนำ

วิชาสัญญาณและระบบ (signal and system) ถือว่าเป็นวิชาที่สำคัญมากต่อการเรียนทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เนื่องจากวิชานี้จัดว่าเป็นพื้นฐานของการเรียนรู้ในหลายๆ วิชา เช่น วิชาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า วิชาระบบควบคุม และวิชาการสื่อสารดิจิทัล เป็นต้น ดังนั้นความรู้และความเข้าใจทางการวิเคราะห์สัญญาณและระบบจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับผู้สนใจที่ต้องการนำความรู้ทางด้านนี้ไปประยุกต์ใช้ในการทำงานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์

จากประสบการณ์การสอนของข้าพเจ้าพบว่า วิชาสัญญาณและระบบเป็นวิชาที่ค่อนข้างยาก เพราะว่ามีปริมาณที่เกี่ยวเนื่องกับสมการคณิตศาสตร์จำนวนมาก ซึ่งบางครั้งทำให้ผู้เรียนไม่สามารถทำความเข้าใจได้อย่างลึกซึ้ง นอกจากนี้สัญญาณต่างๆ ที่ใช้ก็จะอยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ จึงทำให้ผู้เรียนมองไม่เห็นความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ต่อลักษณะของการเกิดของสัญญาณ กล่าวคือโดยทั่วไปจะอธิบายลักษณะของสัญญาณในรูปของสมการคณิตศาสตร์และมีรูปภาพของสัญญาณนั้นประกอบคำอธิบาย โดยที่ผู้เรียนไม่สามารถทดลองเองได้ว่า ถ้าตัวแปรของสัญญาณเปลี่ยนไป รูปร่างของสัญญาณนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ดังนั้นจึงส่งผลให้ผู้เรียนไม่ได้รับความรู้จากการเรียนวิชาสัญญาณและระบบได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

หนังสือเล่มนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชาสัญญาณและระบบ ที่เปิดสอนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ของมหาวิทยาลัยต่างๆ โดยจะเหมาะกับนักศึกษาที่ผ่านการเรียนวิชาแคลคูลัส 1, 2, และ 3 (หรือกำลังศึกษาวิชาแคลคูลัส 3) รวมทั้งผู้ที่สนใจทางการวิเคราะห์สัญญาณและระบบ นอกจากนี้หนังสือเล่มนี้ได้มีการนำโปรแกรม SCILAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ให้ฟรี (สามารถดาวน์โหลดคู่มือการใช้งานโปรแกรม SCILAB ได้ที่ <http://home.npru.ac.th/piya/webscilab>) มาประยุกต์ใช้ประกอบคำอธิบายของเนื้อหาในแต่ละบทเรียน ซึ่งช่วยทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจเนื้อหาต่างๆ ในบทเรียนได้มากยิ่งขึ้น กล่าวคือในแต่ละบทเรียนจะมีการแสดงชุดคำสั่งของโปรแกรม SCILAB ที่ใช้ในการวาดรูปภาพของสัญญาณ รวมทั้งการคำนวณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณและระบบที่อธิบายในหนังสือเล่มนี้ เช่น อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series), การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform), การแปลงลาปลาซ (Laplace transform), และการแปลงซี (Z transform) เป็นต้น

หนังสือเล่มนี้จะเริ่มต้นอธิบายเกี่ยวกับประเภทของสัญญาณและระบบ การแปลงลักษณะของสัญญาณ และสัญญาณต่างๆ ที่น่าสนใจ จากนั้นบทที่ 2 และบทที่ 3 จะกล่าวถึงการหาผลตอบสนองของระบบ คุณสมบัติ แผนภาพบล็อก และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ของระบบเชิงเส้น ที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (LTI: linear time-invariant) ที่ต่อเนื่องทางเวลาและที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา สำหรับบทที่ 4 และบทที่ 5 อธิบายอนุกรมฟูเรียร์ คุณสมบัติของอนุกรมฟูเรียร์ และผลตอบสนองของระบบ ของสัญญาณคาบ ที่ต่อเนื่องทางเวลาและที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ในทำนองเดียวกันบทที่ 6 และบทที่ 7 จะกล่าวถึงการแปลงฟูเรียร์ คุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ และผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ ของสัญญาณไม่เป็นคาบที่ต่อเนื่องทางเวลาและที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา บทที่ 8 อธิบายกระบวนการชักตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา บทที่ 9 จะกล่าวถึงการแปลงลาปลาซ คุณสมบัติการแปลงลาปลาซ และการแปลงลาปลาซ แบบด้านเดียว และบทที่ 10 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายจะอธิบายการแปลงซี คุณสมบัติการแปลงซี และการแปลงซี แบบด้านเดียว

หนังสือเล่มนี้จะไม่สามารถทำให้สำเร็จขึ้นมาได้ ถ้าหากขาดบุคคลต่างๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและ เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำปรึกษาตลอด ระยะเวลาการศึกษา รวมทั้งทุกๆ คนในครอบครัวของข้าพเจ้า นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้รหัสโครงการ NT-B-22-FR-98-50-08 ที่ให้การสนับสนุน ในการจัดพิมพ์หนังสือเล่มนี้ สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมที่ให้การสนับสนุนและ ให้ความสะดวกแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาในการเขียนหนังสือเล่มนี้

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าได้พยายามอย่างยิ่งในการที่จะทำให้นี้หนังสือเล่มนี้ง่ายต่อการเรียนรู้ เพื่อให้ผู้อ่าน สามารถทำความเข้าใจได้ด้วยตนเองอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ หากหนังสือเล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ามีความยินดีและจักขอบพระคุณยิ่ง หากท่านผู้ใช้นี้หนังสือเล่มนี้จะส่งข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็น ประโยชน์สำหรับการปรับปรุงหนังสือเล่มนี้มาที่อีเมล piya@npru.ac.th เพื่อที่ข้าพเจ้าจะได้ดำเนินการปรับปรุง และแก้ไขในการพิมพ์ครั้งต่อไป



ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

ตุลาคม พ.ศ. 2552

สารบัญ

บทที่ 1 พื้นฐานของสัญญาณและระบบ.....	1-1
1.1 สัญญาณ	1-1
1.2 ประเภทของสัญญาณ.....	1-2
1.2.1 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	1-2
1.2.2 สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล.....	1-3
1.2.3 สัญญาณคาบและสัญญาณไม่เป็นคาบ	1-5
1.2.4 สัญญาณเชิงกำหนดและสัญญาณสุ่ม	1-7
1.2.5 สัญญาณพลังงานและสัญญาณกำลัง	1-7
1.2.6 สัญญาณคอซอซ แอนไทคอซอซ และนอนคอซอซ.....	1-11
1.2.7 สัญญาณคู่และสัญญาณคี่.....	1-12
1.2.8 สัญญาณฝั่งซ้ายและสัญญาณฝั่งขวา.....	1-12
1.3 การแปลงลักษณะของสัญญาณ	1-13
1.3.1 การย่อและการขยายขนาดของสัญญาณ.....	1-14
1.3.2 การเลื่อนเวลาของสัญญาณ	1-14
1.3.3 การสเกลเวลาของสัญญาณ	1-15
1.3.4 การพับสัญญาณ	1-15
1.3.5 การผสมระหว่างการเลื่อนเวลาและการพับสัญญาณ.....	1-16
1.3.6 การผสมระหว่างการเลื่อนเวลาและการสเกลเวลาของสัญญาณ.....	1-17
1.4 สัญญาณเลขชี้กำลังเชิงซ้อน.....	1-19
1.4.1 สัญญาณเลขชี้กำลังเชิงซ้อนที่ต่อเนื่องทางเวลา	1-19
1.4.2 สัญญาณเลขชี้กำลังเชิงซ้อนที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	1-22
1.5 สัญญาณพื้นฐานที่น่าสนใจ	1-26

1.5.1 สัญญาณขึ้นบันไดหนึ่งหน่วย.....	1-26
1.5.2 สัญญาณอิมพัลส์หนึ่งหน่วย	1-27
1.5.3 สัญญาณทางลาด.....	1-29
1.5.4 สัญญาณซิงก์.....	1-30
1.6 ระบบ.....	1-32
1.6.1 ระบบที่ต่อเนื่องทางเวลาและระบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	1-33
1.6.2 ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น	1-33
1.6.3 ระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาและระบบที่แปรเปลี่ยนตามเวลา.....	1-34
1.6.4 ระบบที่ไม่มีหน่วยความจำและระบบที่มีหน่วยความจำ	1-35
1.6.5 ระบบที่หาตัวผกผันได้และระบบที่ไม่สามารถหาตัวผกผันได้.....	1-35
1.6.6 ระบบคอขวดและระบบนอนคอขวด	1-36
1.6.7 ระบบเสถียรและระบบไม่เสถียร	1-37
1.7 การต่อกันของระบบ.....	1-38
1.8 สรุปท้ายบท.....	1-40
1.9 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	1-41
บทที่ 2 ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	2-1
2.1 การแสดงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	2-2
2.2 ปริพันธ์คอนโวลูชัน	2-3
2.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์และผลตอบสนองขึ้นบันได	2-10
2.4 คุณสมบัติของระบบ LTI.....	2-11
2.4.1 คุณสมบัติการสลับที่.....	2-11
2.4.2 คุณสมบัติการแจกแจง	2-12
2.4.3 คุณสมบัติการเปลี่ยนหมู่.....	2-13
2.4.4 คุณสมบัติการมีและไม่มีหน่วยความจำ	2-14
2.4.5 คุณสมบัติในการหาตัวผกผันได้	2-14
2.4.6 คุณสมบัติคอขวด	2-15
2.4.7 คุณสมบัติเสถียร	2-17
2.5 สมการเชิงอนุพันธ์.....	2-18
2.5.1 สมการเชิงอนุพันธ์ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงตัวแบบเชิงเส้น	2-18
2.5.2 คุณสมบัติเชิงเส้น.....	2-21

2.5.3 คุณสมบัติคอชอล	2-23
2.5.4 คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา.....	2-23
2.5.5 ผลตอบสนองอิมพัลส์.....	2-24
2.6 แผนภาพบล็อก	2-25
2.7 สหสัมพันธ์.....	2-29
2.7.1 สหสัมพันธ์ข้าม	2-29
2.7.2 อัตสหสัมพันธ์	2-29
2.8 สรุปท้ายบท	2-32
2.9 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	2-32
บทที่ 3 ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	3-1
3.1 การแสดงสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	3-1
3.2 ผลรวมคอนโวลูชัน	3-3
3.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์และผลตอบสนองขั้นบันได	3-12
3.4 คุณสมบัติของระบบ LTI.....	3-13
3.4.1 คุณสมบัติการสลับที่.....	3-13
3.4.2 คุณสมบัติการแจกแจง	3-13
3.4.3 คุณสมบัติการเปลี่ยนหมู่.....	3-15
3.4.4 คุณสมบัติการมีและไม่มีหน่วยความจำ	3-17
3.4.5 คุณสมบัติการหาตัวผกผันได้.....	3-17
3.4.6 คุณสมบัติคอชอล	3-19
3.4.7 คุณสมบัติเสถียร	3-19
3.5 สมการเชิงผลต่าง	3-20
3.5.1 สมการเชิงผลต่างที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงตัวแบบเชิงเส้น.....	3-20
3.5.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์.....	3-24
3.6 แผนภาพบล็อก	3-26
3.7 สหสัมพันธ์.....	3-28
3.7.1 สหสัมพันธ์ข้าม	3-29
3.7.2 อัตสหสัมพันธ์	3-29
3.7.3 ประโยชน์ของสหสัมพันธ์.....	3-33

3.8 สรุปท้ายบท	3-33
3.9 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	3-34
บทที่ 4 อนุกรมฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	4-1
4.1 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของระบบ LTI ที่ต่อเนื่องทางเวลา	4-1
4.2 อนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณคาบที่ต่อเนื่องทางเวลา	4-4
4.2.1 สัญญาณคาบที่ต่อเนื่องทางเวลา	4-4
4.2.2 อนุกรมฟูเรียร์ในรูปของเลขชี้กำลังเชิงซ้อน	4-5
4.2.3 อนุกรมฟูเรียร์ในรูปของฮาร์มอนิก	4-7
4.2.4 อนุกรมฟูเรียร์ในรูปของตรีโกณมิติ	4-7
4.2.5 ตัวอย่างการหาอนุกรมฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	4-9
4.2.6 เงื่อนไขการลู่เข้าของอนุกรมฟูเรียร์	4-22
4.2.7 ปรัชญาการณีกิบส์.....	4-24
4.3 คุณสมบัติของอนุกรมฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา	4-24
4.3.1 คุณสมบัติเชิงเส้น.....	4-24
4.3.2 คุณสมบัติการเลื่อนเวลา	4-25
4.3.3 คุณสมบัติการเลื่อนความถี่.....	4-25
4.3.4 คุณสมบัติการพับทางเวลา	4-26
4.3.5 คุณสมบัติการสเกลทางเวลา	4-26
4.3.6 คุณสมบัติการคูณ.....	4-27
4.3.7 คุณสมบัติการทำคอนโวลูชัน	4-27
4.3.8 คุณสมบัติการสังยุค	4-27
4.3.9 ความสัมพันธ์ของพาร์ซีวาล	4-28
4.3.10 สรุปคุณสมบัติของอนุกรมฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	4-29
4.3.11 สรุปคู่อนุกรมฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา	4-29
4.4 สเปกตรัมกำลัง	4-35
4.5 ผลตอบสนองของระบบ LTI ต่อสัญญาณคาบที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	4-37
4.6 ข้อควรทราบเกี่ยวกับความถี่.....	4-39
4.7 สรุปท้ายบท.....	4-40
4.8 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	4-40

บทที่ 5 อนุกรมฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	5-1
5.1 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของระบบ LTI ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	5-1
5.2 อนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณคาบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	5-4
5.2.1 สัญญาณคาบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	5-4
5.2.2 ผลรวมเชิงเส้นของเลขชี้กำลังเชิงซ้อน.....	5-5
5.2.3 การหาอนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณคาบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	5-5
5.2.4 การลู่เข้าของอนุกรมฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	5-12
5.3 คุณสมบัติของอนุกรมฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	5-14
5.3.1 ความเป็นคาบของอนุกรมฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	5-14
5.3.2 คุณสมบัติเชิงเส้น	5-15
5.3.3 คุณสมบัติการเลื่อนเวลา	5-15
5.3.4 คุณสมบัติการเลื่อนความถี่.....	5-16
5.3.5 คุณสมบัติการพับทางเวลา	5-16
5.3.6 คุณสมบัติการสเกลทางเวลา	5-16
5.3.7 คุณสมบัติการคูณ	5-17
5.3.8 คุณสมบัติการทำคอนโวลูชัน	5-17
5.3.9 คุณสมบัติผลต่างลำดับที่หนึ่ง	5-18
5.3.10 คุณสมบัติผลสะสม.....	5-18
5.3.11 ความสัมพันธ์ของพาร์ซีวาล	5-19
5.3.12 สรุปคุณสมบัติของอนุกรมฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	5-19
5.3.13 สรุปคู่อนุกรมฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	5-19
5.4 หลักการทวิภาวะ	5-25
5.5 ผลตอบสนองของระบบ LTI ต่อสัญญาณคาบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	5-28
5.6 สรุปท้ายบท	5-30
5.7 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	5-31
บทที่ 6 การแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา	6-1
6.1 การแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลาของสัญญาณไม่เป็นคาบ.....	6-1
6.1.1 สูตรการแปลงฟูเรียร์.....	6-2
6.1.2 คู่การแปลงฟูเรียร์.....	6-4
6.1.3 สเปกตรัมฟูเรียร์.....	6-4

6.1.4 การรู้เข้าของการแปลงฟูเรียร์.....	6-5
6.2 การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณคาบที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	6-11
6.3 คุณสมบัติการแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	6-17
6.3.1 คุณสมบัติเชิงเส้น.....	6-18
6.3.2 คุณสมบัติการเลื่อนเวลา.....	6-18
6.3.3 คุณสมบัติการสเกลทางเวลา.....	6-19
6.3.4 คุณสมบัติการสังยุค.....	6-21
6.3.5 คุณสมบัติทวิภาวะ.....	6-23
6.3.6 คุณสมบัติการเลื่อนความถี่.....	6-25
6.3.7 คุณสมบัติการหาอนุพันธ์.....	6-25
6.3.8 คุณสมบัติการหาปริพันธ์.....	6-27
6.3.9 คุณสมบัติการทำคอนโวลูชัน.....	6-28
6.3.10 คุณสมบัติการคูณ.....	6-30
6.3.11 พื้นที่ใต้กราฟ.....	6-31
6.3.12 ความสัมพันธ์ของพาร์ซีวาล.....	6-31
6.3.13 สรุปคุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	6-32
6.3.14 สรุปคู่การแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	6-32
6.4 ทฤษฎีบทพลังงานของเรย์ลี.....	6-32
6.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ LTI ที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	6-36
6.5.1 การหาผลตอบสนองเชิงความถี่.....	6-36
6.5.2 การส่งสัญญาณที่ไม่มีความผิดเพี้ยน.....	6-38
6.6 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน.....	6-39
6.7 การกรองสัญญาณ.....	6-43
6.7.1 วงจรกรองเลือกความถี่อุดมคติ.....	6-44
6.7.2 วงจรกรองเลือกความถี่ในทางปฏิบัติ.....	6-45
6.8 สรุปท้ายบท.....	6-51
6.9 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	6-51
บทที่ 7 การแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	7-1
7.1 การแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาของสัญญาณไม่เป็นคาบ.....	7-1
7.1.1 สูตรการแปลงฟูเรียร์.....	7-1

7.1.2	คู่การแปลงฟูเรียร์.....	7-4
7.1.3	สเปกตรัมฟูเรียร์.....	7-4
7.1.4	การคู่เข้าของการแปลงฟูเรียร์.....	7-12
7.2	การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณคาบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	7-14
7.3	คุณสมบัติการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	7-17
7.3.1	คุณสมบัติความเป็นคาบ	7-17
7.3.2	คุณสมบัติเชิงเส้น.....	7-17
7.3.3	คุณสมบัติการเลื่อนเวลา	7-18
7.3.4	คุณสมบัติการเลื่อนความถี่.....	7-18
7.3.5	คุณสมบัติการพับทางเวลา	7-19
7.3.6	คุณสมบัติการขยายเวลา.....	7-19
7.3.7	คุณสมบัติการสังยุค	7-22
7.3.8	คุณสมบัติผลต่างและผลสะสมอันดับหนึ่ง	7-23
7.3.9	คุณสมบัติการหาอนุพันธ์ในโดเมนความถี่.....	7-23
7.3.10	คุณสมบัติการทำคอนโวลูชัน	7-24
7.3.11	คุณสมบัติการคูณ.....	7-27
7.3.12	ความสัมพันธ์ของพาร์ซีวาล	7-29
7.3.13	สรุปคุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	7-29
7.3.14	สรุปคู่การแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	7-29
7.4	หลักการทวิภาวะ	7-29
7.4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอนุกรมฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์	7-33
7.5	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ LTI ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	7-33
7.5.1	การหาผลตอบสนองเชิงความถี่	7-34
7.6	สรุปท้ายบท.....	7-37
7.7	แบบฝึกหัดท้ายบท.....	7-37
บทที่ 8	กระบวนการชักตัวอย่าง	8-1
8.1	ทฤษฎีบทการชักตัวอย่าง.....	8-1
8.2	การชักตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา	8-3
8.2.1	กระบวนการชักตัวอย่าง	8-4
8.2.2	การชักตัวอย่างด้วยวงจรกรองค้ำอันดับศูนย์.....	8-7

8.2.3 กระบวนการสร้างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้กลับคืนมา.....	8-9
8.2.4 ความผิดเพี้ยนภาพ	8-13
8.3 การประมวลผลแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา	8-17
8.3.1 การแปลงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	8-17
8.3.2 การแปลงสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาให้เป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	8-19
8.4 การชักตัวอย่างสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	8-21
8.4.1 กระบวนการชักตัวอย่าง	8-21
8.4.2 การสร้างสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาให้กลับคืนมา.....	8-24
8.5 การชักตัวอย่างแบบหลายอัตรา	8-25
8.6 ตัวอย่างการคำนวณ	8-28
8.7 สรุปท้ายบท.....	8-32
8.8 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	8-32

บทที่ 9 การแปลงลาปลาซ9-1

9.1 การแปลงลาปลาซ	9-1
9.2 บริเวณการลู่อู่เข้าของการแปลงลาปลาซ.....	9-8
9.3 การแปลงลาปลาซผกผัน	9-10
9.4 คุณสมบัติการแปลงลาปลาซ	9-13
9.4.1 คุณสมบัติเชิงเส้น.....	9-14
9.4.2 คุณสมบัติการเลื่อนเวลา	9-14
9.4.3 คุณสมบัติการเลื่อนในโดเมน S	9-14
9.4.4 คุณสมบัติการสเกลทางเวลา	9-15
9.4.5 คุณสมบัติการสังยุค	9-16
9.4.6 คุณสมบัติการทำคอนโวลูชัน	9-16
9.4.7 คุณสมบัติการหาอนุพันธ์ในโดเมนเวลา.....	9-18
9.4.8 คุณสมบัติการหาอนุพันธ์ในโดเมน S	9-18
9.4.9 คุณสมบัติการหาปริพันธ์ในโดเมนเวลา	9-19
9.4.10 ทฤษฎีบทค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้าย	9-20
9.4.11 สรุปคุณสมบัติของการแปลงลาปลาซ	9-22
9.4.12 สรุปคู่การแปลงลาปลาซ	9-22
9.5 การวิเคราะห์ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา.....	9-24

9.5.1 คอชอลิติ.....	9-24
9.5.2 ความเสถียร	9-25
9.5.3 ระบบตามสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงตัวแบบเชิงเส้น	9-28
9.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนและแผนภาพบล็อก.....	9-31
9.6.1 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากแผนภาพบล็อก	9-31
9.6.2 การหาแผนภาพบล็อกจากฟังก์ชันถ่ายโอน	9-34
9.7 การแปลงลาปลาซแบบด้านเดียว.....	9-37
9.7.1 คุณสมบัติของการแปลงลาปลาซแบบด้านเดียว	9-40
9.8 สรุปท้ายบท.....	9-43
9.9 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	9-43
บทที่ 10 การแปลงซี	10-1
10.1 การแปลงซี	10-1
10.2 บริเวณการลู่อู่เข้าของการแปลงซี.....	10-7
10.3 การแปลงซีผกผัน	10-10
10.4 คุณสมบัติการแปลงซี	10-14
10.4.1 คุณสมบัติเชิงเส้น	10-14
10.4.2 คุณสมบัติการเลื่อนเวลา.....	10-15
10.4.3 คุณสมบัติการสเกลในโดเมน Z	10-15
10.4.4 คุณสมบัติการพับทางเวลา.....	10-17
10.4.5 คุณสมบัติการขยายเวลา	10-17
10.4.6 คุณสมบัติการสังยุค.....	10-18
10.4.7 คุณสมบัติการทำคอนโวลูชัน	10-18
10.4.8 คุณสมบัติการหาอนุพันธ์ในโดเมน Z	10-19
10.4.9 ทฤษฎีบทค่าเริ่มต้น	10-20
10.4.10 สรุปคุณสมบัติของการแปลงซี.....	10-21
10.4.11 สรุปคู่การแปลงซี.....	10-21
10.5 การวิเคราะห์ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา.....	10-21
10.5.1 คอชอลิติ	10-23
10.5.2 ความเสถียร	10-25
10.5.3 ระบบตามสมการเชิงผลต่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงตัวแบบเชิงเส้น	10-25

10.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนและแผนภาพบล็อก.....	10-30
10.6.1 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากแผนภาพบล็อก.....	10-30
10.6.2 การหาแผนภาพบล็อกจากฟังก์ชันถ่ายโอน.....	10-32
10.7 การแปลงซีแบบด้านเดียว.....	10-35
10.7.1 คุณสมบัติของการแปลงซีแบบด้านเดียว.....	10-37
10.8 สรุปท้ายบท.....	10-41
10.9 แบบฝึกหัดท้ายบท.....	10-42
ภาคผนวก ก - สูตรคณิตศาสตร์ที่น่าสนใจ	ก-1
ภาคผนวก ข - พื้นฐานการใช้งานโปรแกรม SCILAB.....	ข-1
บรรณานุกรม	ค-1
ประวัติผู้เขียน.....	ง-1