

การสร้างสายอากาศแถวลำดับปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่
โดยเทพฟ้าเจ

IMPLEMENTATION OF THE CONSTANT MODULUS ALGORITHM
ADAPTIVE ARRAY ANTENNA BY FPGA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9700-52-X

การสร้างสายอากาศแถวลำดับปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่
โดยเอฟพีจีเอ

IMPLEMENTATION OF THE CONSTANT MODULUS ALGORITHM
ADAPTIVE ARRAY ANTENNA BY FPGA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547
ISBN 974-9700-52-X

IMPLEMENTATION OF THE CONSTANT MODULUS ALGORITHM
ADAPTIVE ARRAY ANTENNA BY FPGA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004
ISBN 974-9700-52-X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างสายอากาศแถวลำดับปรับตัวด้วยอัลกอริทึม การมอดูเลชันที่โดยเอฟพีจีเอ
นักศึกษา	นายเอกรัฐ บุญภูงา
รหัสนักศึกษา	45061078
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. ไมโนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสร้างสายอากาศแถวลำดับปรับตัวโดยการใช้สนามแถวลำดับ
เกทที่โปรแกรมได้ (เอฟพีจีเอ) ซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณที่ทำงานได้ในเวลาจริง เพื่อ
แก้ปัญหาการจางหายจากคลื่นหลายวิถี และสัญญาณแทรกสอดของสัญญาณร่วมในระบบ
การสื่อสารเคลื่อนที่ เอฟพีจีเอได้ถูกสร้างเป็นวงจรรวมเดียว การทำงานแบบสายท่อ และเลข
ทศนิยม ซึ่งสามารถลดความผิดพลาดเนื่องจากการตัดบิตได้ อัลกอริทึมการมอดูเลชันที่ได้ถูก
นำมาใช้สร้างเป็นส่วนประมวลผลปรับตัวเอฟพีจีเอ ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถปรับลดสัญญาณแทรก
สอดได้โดยไม่ต้องอาศัยทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมนี้จะถูกประยุกต์ใช้
กับสัญญาณส่งที่มีขนาดคงที่ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงผลแบบรูปการแพร่กระจาย
คลื่น และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนที่ได้จากการจำลอง
สายอากาศแถวลำดับปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลชันที่ โดยโครงสร้างสายอากาศเป็น
สายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสสี่องค์ประกอบ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบสายอากาศ
แถวลำดับปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลชันที่โดยเอฟพีจีเอที่ทำการออกแบบ

Thesis Title	Implementation of the Constant Modulus Algorithm Adaptive Array Antenna by FPGA
Student	Mr. Akkarat Boonpoonga
Student ID	45061078
Degree	Master of Engineering
Programme	Telecommunications Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Prof. Dr. Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis demonstrates implementation of an adaptive array antenna by using field programmable gate arrays (FPGA) which is a real-time signal processor for suppressing multipath fading and cochannel interference in mobile communication systems. FPGA is implemented as a single chip, pipeline and floating-point number by which truncation can be reduced. The Constant Modulus Algorithm (CMA) is exploited to implement FPGA adaptive processor. This algorithm is blind algorithm that the interference suppression can be done without the acknowledge of direction of arriving signal. However, the CMA is applied to transmitting signal with constant envelope. Furthermore, this thesis presents the simulated results of radiation patterns and signal to interference plus noise ratio (SINR) of the constant modulus algorithm adaptive array antenna that the antenna structure is a four-element circular phased array antenna. Finally, the designed constant modulus algorithm adaptive array antenna by FPGA is test.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ไมโนย ไกรฤกษ์ ที่ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศลวิตร และ ดร.ชวงศ พงศ์เจริญพาณิชย์ ผู้ให้คำแนะนำแนวทางการวิจัย และวิธีการนำเสนอผลงาน

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผ่าภค ศิริสุข อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สำหรับความรู้ทางด้านการประมวลผลสัญญาณคำแนะนำในการวิจัยตลอดจนการเขียนบทความขอขอบพระคุณ อ.วัชระ ภัคมาตร์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับความกรุณาให้หยิบยืมบอร์ด FPGA ในทดสอบ และให้ความรู้ คำแนะนำในการออกแบบ FPGA

และขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย ทุกคนสำหรับมิตรภาพดีๆ ที่หยิบยื่นให้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณไพศาล งามจรรยาภรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน และคุณบุญฤทัย เครือแก้ว ที่สอนวิธีการใช้โปรแกรม MS WORD

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณ ครอบครัว บุญงา ทุกคน ที่ให้ความรัก ความห่วงใย กำลังใจ และกำลังทรัพย์ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขออุทิศให้คุณยายผู้ล่วงลับ ส่วนข้อเสียผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้ และขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

เอกภรัฐ บุญงา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอฟพีจีเอและทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 เอฟพีจีเอ.....	6
2.2.1 วิธีการออกแบบ.....	8
2.2.1.1 การอธิบายแบบ.....	8
2.2.1.2 การออกแบบเป็นชั้นลำดับ.....	11
2.2.1.3 การออกแบบที่มีความอิสระจากเทคโนโลยี.....	11
2.2.1.4 การออกแบบด้วยวิธี Mead-Conway.....	12
2.2.1.5 การออกแบบเพื่อให้ได้ความเร็วของการทำงานที่เหมาะสม.....	13
2.2.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาวีเอชดีแอล.....	15
2.2.2.1 หน่วยการออกแบบเอกลักษณ์.....	15
2.2.2.2 หน่วยการออกแบบโครงสร้าง.....	16
2.2.2.3 หน่วยการออกแบบกลุ่ม.....	19
2.2.2.4 หน่วยการออกแบบรูปร่างภายนอก.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 พืชคณิตเชิงเส้น.....	21
2.3.1 เวกเตอร์.....	21
2.3.2 เมตริกซ์.....	22
2.3.3 รูปแบบควอดเรติกและเซอร์มิเชียน.....	22
2.4 การประมวลผลสัญญาณไม่ต่อเนื่อง.....	24
2.4.1 สัญญาณ.....	24
2.4.2 ระบบ.....	24
2.4.2.1 Memoryless System.....	25
2.4.2.2 Linear System.....	25
2.4.2.3 Time-Invariant System.....	25
2.4.2.3 Time-Invariant System.....	25
2.4.2.4 Causality.....	25
2.4.2.5 Stability.....	25
2.4.3 A Digital Differentiator.....	26
2.4.4 การประมวลผลสัญญาณสุ่ม.....	26
2.4.4.1 ค่าเฉลี่ยทั้งชุดเชิงสถิติ.....	26
2.4.4.2 ค่าเฉลี่ย.....	27
2.4.4.3 Correlation and Covariance.....	27
2.4.4.4 Independence.....	28
2.4.4.5 Orthogonality.....	28
2.4.4.6 Stationarity.....	28
2.4.4.7 Cross-correlation.....	29
2.5 คำตอบวินเนอร์.....	29
2.6 วิธีของการลดคลื่นสูงสุด.....	33
2.7 สรุป.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 สายอากาศปรับตัว	
3.1 บทนำ.....	37
3.2 ความเป็นมาของสายอากาศปรับตัว	37
3.3 ระบบสายอากาศปรับตัว.....	38
3.4 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศปรับตัว	41
3.5 สายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้และแบบจำลองสัญญาณ	43
3.6 อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองต่ำสุด.....	50
3.7 อัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่.....	53
3.8 สรุป	56
บทที่ 4 การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับสายอากาศแถวลำดับปรับตัว ด้วยอัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่	57
4.1 บทนำ.....	57
4.2 เลขทศนิยม.....	57
4.3 การแสดงจำนวนทศนิยม	58
4.4 การบวกและลบจำนวนทศนิยม	59
4.4.1 สมรรถนะของวงจรวกและลบจำนวนทศนิยม.....	61
4.4.2 การทดสอบวงจรวกและลบ	64
4.5 การคูณจำนวนทศนิยม.....	69
4.5.1 สมรรถนะของวงจรมคูณ.....	71
4.5.2 การทดสอบวงจรมคูณ	73
4.6 ตัวแปลงการแสดงจำนวน	75
4.6.1 ตัวแปลงการแสดงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม.....	76
4.6.1.1 สมรรถนะของวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม.....	76
4.6.1.2 การทดสอบวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม	77
4.6.2 ตัวแปลงการแสดงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม.....	78
4.6.2.1 สมรรถนะของวงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม.....	79
4.6.2.2 การทดสอบวงจรเปลี่ยนจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์หรือข้อผิดพลาด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA	81
4.7.1 สมรรถนะของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA	82
4.7.2 การทดสอบส่วนประมวลผลปรับตัว CMA.....	86
4.8 สรุป.....	87
บทที่ 5 คุณสมบัติสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA และการเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่น	88
5.1 บทนำ.....	88
5.2 สายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA และการเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่น	88
5.3 คุณสมบัติของสายแถวลำดับปรับตัว CMA เริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่น.....	89
5.3.1 สัญญาณพึงประสงค์มีมุมตกกระทบอยู่ในจุดภาคที่หนึ่ง	91
5.3.2 สัญญาณพึงประสงค์มีมุมตกกระทบนอกจุดภาคที่หนึ่ง	102
5.4 การทดสอบแถวลำดับปรับตัว CMA โดยใช้ FPGA.....	106
5.4.1 ขั้นตอนการทดสอบ	106
5.4.2 ผลการทดสอบ.....	108
5.5 สรุป.....	112
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	113
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	113
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	113
เอกสารอ้างอิง	114
ประวัติผู้เขียน.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าเฟสสำหรับการกระตุ้นสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ.....	48
3.2 LMS algoritim สำหรับสายอากาศปรับตัว N องค์ประกอบ	50
4.1 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรววกและลบ	63
4.2 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อวงจรววกและลบ	63
4.3 เวลาของการคำนวณของวงจรววกและลบ	64
4.4 ตัวแปรของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการทดสอบ	64
4.5 ตัวอย่างการบวกจำนวนทศนิยม	65
4.6 ตัวอย่างการลบจำนวนทศนิยม	67
4.7 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรรคูณ	73
4.8 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อของวงจรรคูณ	73
4.9 เวลาของการคำนวณของวงจรรคูณ	73
4.10 ตัวอย่างการคูณจำนวนทศนิยม	74
4.11 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม.....	77
4.12 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็น จำนวนทศนิยม	77
4.13 เวลาของการคำนวณวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม.....	77
4.14 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม.....	79
4.15 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อวงจรแปลงจำนวนทศนิยม เป็นจำนวนเต็ม	80
4.16 เวลาของการคำนวณวงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม.....	80
4.17 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA.....	84
4.18 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อ ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA.....	85
4.19 เวลาของการคำนวณของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA.....	85
4.20 ตัวแปรของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการทดสอบ	87
5.1 สัญญาณพึงประสงค์มีมุมตกกระทบในจุดภาคที่หนึ่ง	91
5.2 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อ $\phi_b = 30^\circ$ $\phi_r = 80^\circ$	93
5.3 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อ $\phi_b = 30^\circ$ $\phi_r = 120^\circ$	96

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาที่ได้รับการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.4 การลู่เข้าหาคำตอบของการปรับตัว CMA	98
5.5 สัญญาณเอคาร์ทพิวเมื่อ $\phi_o = 80^\circ$ $\phi_i = 30^\circ$	99
5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับลำคลื่น.....	104
5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับลำคลื่น (ต่อ).....	105
5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับลำคลื่น (ต่อ).....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัว	4
1.2 การปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว	4
2.1 กลุ่มต่างๆของการอธิบายแบบ	9
2.2 แผนภาพ Gajski-Kuhn diagram.....	10
2.3 ชั้นลำดับการแบ่งส่วนของ datapath	12
2.4 รูปแบบของ Register transfer model.....	14
2.5 โครงสร้างพื้นฐานของการกำหนดหน่วยการออกแบบเอกลักษณ์	15
2.6 ตัวอย่างการออกแบบด้วยสัญลักษณ์ ของวงจร 2 to 1 multiplexer	16
2.7 โครงสร้างพื้นฐานของการกำหนดหน่วยการออกแบบโครงสร้าง	16
2.8 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 Mux ตามสมการจริง	17
2.9 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 MUX ในลักษณะโครงสร้างของลอจิกเกต	18
2.10 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 MUX ในลักษณะโครงสร้างด้วย VHDL.....	18
2.11 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 MUX ในลักษณะพฤติกรรม	19
2.12 หลักการกำหนดกลุ่ม	20
2.13 รูปแบบการกำหนดตัวกลุ่ม	20
2.14 รูปแบบหน่วยการออกแบบองค์ประกอบ	20
2.15 บล็อกไดอะแกรมของการแทนสมการอนุพันธ์ $y(k) = x(k) + y(k-1)$	26
2.16 โครงสร้างทั่วไปของปัญหาของ Wiener solution	30
2.17 ตัวอย่างฟังก์ชันควอดเรติกของค่าถ่วงน้ำหนัก	34
3.1 ระบบสายอากาศปรับตัวทั่วไป	40
3.2 การจัดลำดับคลื่นแอนะล็อก ลดแถวลำดับของสายอากาศจาก K เป็น 1	40
3.3 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศปรับตัว	40
3.4 สายอากาศแถวลำดับสององค์ประกอบใช้ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด	41
3.5 โครงสร้างเรขาคณิตของสายอากาศแถวลำดับวงกลม N องค์ประกอบ	43
3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อรัศมีแถวลำดับเป็น	47
3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อรัศมีของแถวลำดับเป็น $\frac{3\lambda_0}{8}$	48
3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลม	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ ปรับเฟสได้.....	50
3.11 โครงสร้างทั่วไปของ Blind Algorithm.....	55
4.1 การแสดงจำนวนทศนิยม.....	58
4.2 ผังงานของการบวกหรือลบจำนวนทศนิยม.....	60
4.3 รูปแบบของวงจรคอมบินชันและรีจิสเตอร์.....	61
4.4 ผังงานเลขคณิตของการบวกและลบจำนวนทศนิยม.....	62
4.5 การเชื่อมต่อภายนอกของวงจรบวกและลบ.....	63
4.6 ผลการทดสอบการบวกของวงจรบวกและลบจำนวนทศนิยม โดย $A = 25$ และ $B = 18$	66
4.7 ผลการทดสอบการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของการบวก.....	67
4.8 ผลการทดสอบการลบของวงจรบวกและลบจำนวนทศนิยม โดย $A = 25$ และ $B = 18$	68
4.9 ผลการทดสอบการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของการลบ.....	69
4.10 ผังงานของการคูณจำนวนทศนิยม.....	71
4.11 ผังงานเลขคณิตของการคูณทศนิยม.....	72
4.12 แสดงการเชื่อมต่อสู่ภายนอกของวงจรมคูณจำนวนทศนิยม.....	72
4.13 ผลการทดสอบของวงจรมคูณ โดย $A = 5$ และ $B = 11$	75
4.14 ผลการทดสอบการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของการลบ.....	75
4.15 ผังงานเลขคณิตของตัวแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม.....	76
4.16 ผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม.....	78
4.17 ผังงานเลขคณิตของการแปลงสัญญาณจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม.....	79
4.18 การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม.....	81
4.19 ผังงานของการประมวลผล CMA.....	83
4.20 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA.....	83
4.21 การเชื่อมต่อของวงจรสะสม.....	84
4.22 การเชื่อมต่อภายนอกของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA.....	86
4.23 ผลการทดสอบส่วนประมวลผลปรับตัว CMA.....	87
5.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้.....	89
5.2 สายอากาศปรับตัว CMA ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 Constellation diagram ของ CMA เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_I = 80^\circ$ ไม่ใช้การปรับลำคลื่น	91
5.4 Constellation diagram ของ CMA เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_I = 80^\circ$ ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$	92
5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_I = 80^\circ$	94
5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_I = 80^\circ$	95
5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_I = 120^\circ$	96
5.8 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_I = 120^\circ$	97
5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$	100
5.10 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$	100
5.11 Constellation diagram ของ CMA เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$ ใช้การปรับลำคลื่น	101
5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$	102
5.13 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$ ด้วยการปรับลำคลื่น $\phi_0 = 135^\circ$...	102
5.14 ระบบการทดสอบสอบการปรับตัว CMA โดยใช้ FPGA	107
5.15 constellation diagram ของการทดสอบการปรับตัว CMA ด้วย FPGA	109
5.16 การลู่เข้าของการปรับตัวซึ่งได้จากการจำลอง	110
5.17 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA ซึ่งได้จากการทดสอบ FPGA	111
5.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลังการลู่เข้าของการทดสอบ	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีต ได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวเพื่อใช้ในระบบโซนาร์ [1] และเรดาร์ [2] ต่อมา สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้เน้นการศึกษานบนพื้นฐานของแนวความคิดและทฤษฎีที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในชีวิตประจำวัน การนำเทคโนโลยี monolithic microwave integrated circuit (MMIC) และ digital signal processing (DSP) มาใช้เพื่อลดขนาดของระบบเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ระบบมีความก้าวหน้ามากขึ้น หลังจากนั้นเมื่อระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสารเพื่อเพิ่มความสามารถของระบบสื่อสาร ดังนั้นการพัฒนาสายอากาศปรับตัวไปใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายจึงไม่เป็นเพียงแค่อีกต่อไป ปัจจัยสำคัญที่ทำให้มีการนำสายอากาศปรับตัวไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สาย คือความต้องการในการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศชนิดนี้ขึ้นอย่างแพร่หลาย

โดยทั่วไป การปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอ้างอิง (reference signal) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเรียกว่า training sequence อัลกอริทึมที่นิยมใช้ในการปรับตัวคือ Least Mean Square (LMS), Recursive Least Square (RLS) ต่อมาได้มีการพัฒนา blind adaptive algorithm [3] ขึ้นซึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากอัลกอริทึมนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงเพื่อช่วยในการปรับตัว อัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่ (Constant Modulus Algorithm; CMA) เป็น blind adaptive algorithm ชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจมากที่สุด นำเสนอครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1980 โดย Godard [4] เพื่อประยุกต์ใช้ในการปรับเท่า (equalization) โดยใช้คุณสมบัติของขนาดที่คงที่ของสัญญาณส่ง แต่ไม่ใช้สัญญาณอ้างอิงช่วยในการปรับตัว

ปี ค.ศ. 1993 [5] ได้สร้างสายแถวลำดับปรับตัว CMA สำหรับการส่ง Gaussian filtered minimum shift keying (GMSK) ความเร็วสูงในการสื่อสารเคลื่อนที่ โดยใช้ DSP ในการประมวลผล ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 [6] ได้นำเสนอวิธีลดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม (cochannel interference) ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้ง โดยใช้สายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ปี ค.ศ. 1998 [7] ได้มีการนำ CMA ไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสาร CDMA (Code Division Multiple Access) และปี ค.ศ. 2001 [8] ได้นำเสนอวิธีการ

ลดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม โดยใช้สายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA และพัฒนาให้มีประสิทธิภาพด้วยการใช้สเปกตรัมเชิงความถี่ (frequency spectrum)

ข้อเสียของการนำ CMA ไปประยุกต์ใช้ในระบบสายอากาศปรับตัวคือ ความล่าช้าในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของการปรับตัว ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการเริ่มต้น (initialization) CMA ค.ศ. 1985 [9] ได้อธิบายข้อจำกัดของสัญญาณมอดูเลตซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CMA ปี ค.ศ. 1993 [10] ได้นำเสนออัลกอริทึมใหม่โดยนำคุณสมบัติบางอย่างของ CMA ไปช่วยลดเวลาในการคำนวณอัลกอริทึม แต่อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมนี้มีความซับซ้อนของคณิตศาสตร์สูงซึ่งไม่เหมาะจะนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ปี ค.ศ. 1996 [11] ได้นำวิธีของเรขาคณิตมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ CMA และความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด (Minimum Mean Square Error; MMSE) แสดงการวิเคราะห์เงื่อนไขบางเงื่อนไขของ CMA ที่สามารถปรับตัวได้ดีเหมือน MSE ค.ศ. 1997 [12] ได้นำ CMA ไปใช้ในการจัดลำคลื่นเชิงเลข (Digital Beam Forming; DBF) ในระบบการสื่อสารดาวเทียม โดยใช้สายอากาศแถวลำดับระนาบ 16 องค์ประกอบ อย่างไรก็ตาม DBF นี้ไม่เหมาะสำหรับการสื่อสารเคลื่อนที่เนื่องจากส่วนของสายอากาศและส่วนประมวลผลสัญญาณที่นำ FFT มาใช้ในขั้นตอนแรกของกระบวนการปรับตัว CMA มีความซับซ้อน ปี ค.ศ. 1999 [13] ได้วิเคราะห์เงื่อนไขและคุณสมบัติการลู่เข้า รูปร่างฟังก์ชันความผิดพลาด ผลกระทบของเงื่อนไขการลู่เข้า และพฤติกรรมการเก็บ (lock) และการเข้ายึด (capture) ของ CMA เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบสายอากาศฉลาด (smart antenna) ค.ศ. 2001 [14] ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาคำตอบที่การปรับตัวของ CMA ลู่เข้าหาคำตอบที่ผิด คือสัญญาณรับเป็นสัญญาณแทรกสอดมากกว่าสัญญาณที่ประสงค์ โดยใช้วิธีเริ่มต้นด้วยโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับเชบิเชฟ (Chebyshev array antenna) อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยทิศทางของสัญญาณเพื่อช่วยในการปรับตัว ดังนั้นจึงถือว่ามีวิธีนี้ไม่เป็น Blind Adaptive Algorithm ค.ศ. 2001 [15] ได้นำเสนอการแก้ปัญหาคำตอบที่การลู่เข้าของ CMA โดยการนำอัลกอริทึม Sample Matrix Inversion (SMI) มาใช้ร่วมกับ CMA ซึ่งเป็นการนำคำตอบของ SMI ไปเริ่มต้นกระบวนการปรับตัว CMA แต่มีข้อเสียที่สำคัญสองข้อ คือ 1. การคำนวณอินเวอร์สในขั้นตอนของ SMI ทำให้วิธีที่นำเสนอมีการคำนวณที่ซับซ้อนซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานจริง 2. SMI เป็นอัลกอริทึมที่อาศัยสัญญาณอ้างอิงช่วยในการปรับตัว ดังนั้นวิธีที่นำเสนอจึงไม่เป็น Blind Algorithm

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการสร้างส่วนประมวลผลปรับตัว CMA ของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว และนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาคำตอบที่การลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของการปรับตัว CMA โดยยังคงไม่ใช้สัญญาณอ้างอิงเพื่อช่วยในการปรับตัว และสามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างสรรค์ส่วนประมวลผลปรับตัวของสัญญาณดิจิทัลโดยการใช้เฟลด์พีจีเอ (Field Programmable Gate Array; FPGA) ให้สามารถทำงานได้ในเวลาจริง (real time) เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากช่องสัญญาณร่วม (cochannel interference) และการจางหายจากคลื่นหลายวิถี (multipath fading) อัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่ (Constant Modulus Algorithm; CMA) ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประมวลผลปรับตัวเฟลด์พีจีเอซึ่งส่วนประมวลผลปรับตัวเฟลด์พีจีเอนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสสี่องค์ประกอบ [16] นอกจากนี้ได้นำเสนอการแก้ปัญหาความล่าช้าในการลู่อู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับค่าคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับวงกลมสี่องค์ประกอบ เพื่อเป็นส่วนเริ่มต้นกระบวนการปรับตัว CMA

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ปัญหาสำคัญของการนำ CMA ไปประยุกต์ใช้ในระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัว คือ ความล่าช้าในการลู่อู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของการปรับตัว ซึ่งบางครั้ง CMA จะลู่อู่เข้าหาคำตอบที่ผิดส่งผลให้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแทรกสอดมากกว่าสัญญาณที่ประสงค์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการแก้ปัญหา โดยมีข้อสมมติฐานว่าเมื่อปรับค่าคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับวงกลมสี่องค์ประกอบให้ชี้ในทิศที่มีกำลังงานของสัญญาณรับมากที่สุดจะสามารถเพิ่มอัตราการลู่อู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของการปรับตัว CMA ได้

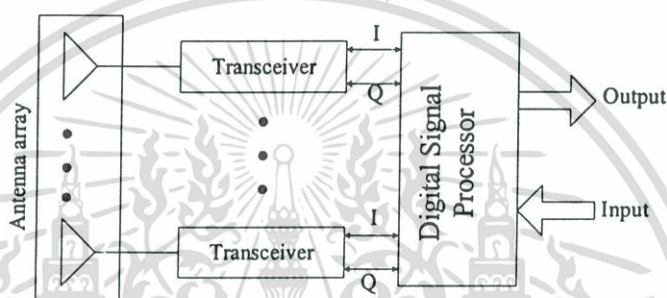
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวเป็นการรวมกันระหว่างเทคโนโลยีของสายอากาศและเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล รูปที่ 1.1 แสดงระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัล (digital transceivers) และส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processor)

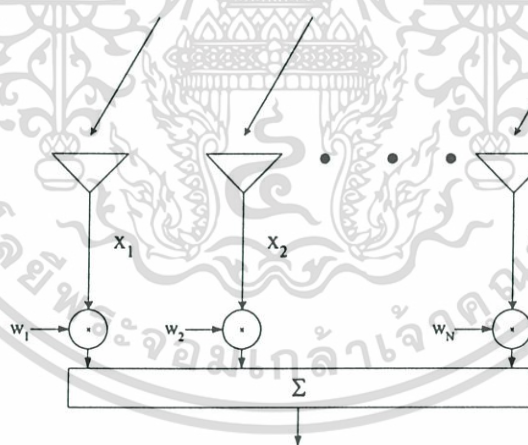
ในระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัว สัญญาณรับจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ การนำสัญญาณดิจิทัลที่เกิดจากการเปลี่ยนสัญญาณความถี่สูงมาประมวลผลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณและอัลกอริทึมที่สามารถหาข้อมูลที่ต้องการได้โดยใช้คุณสมบัติของย่านอวกาศ (spatial domain) สัญญาณดิจิทัลจะถูกประมวลผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสัญญาณความถี่วิทยุแต่ละองค์ประกอบจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ 2 ช่อง คือ สัญญาณ I (in-phase) และสัญญาณ Q (quadrature-phase) สัญญาณดิจิทัลแบบ 2 ช่อง ประกอบด้วยขนาดและเฟส สัญญาณทั้งสองได้จากการรวมกันระหว่างสัญญาณที่ถูกถ่วงน้ำหนักแล้วในแต่ละองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 1.2 ค่าถ่วงน้ำหนักสามารถหาได้จากอัลกอริทึมการปรับตัว เช่น LMS RLS และ CMA

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างสรรค์ส่วนประมวลผลของสัญญาณดิจิทัล ให้สามารถปรับสัญญาณรับด้วยการถ่วงน้ำหนัก โดยโครงสร้างของสายอากาศรับเป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสสี่องค์ประกอบ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัว



รูปที่ 1.2 การปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างสรรค์ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA โดยใช้ FPGA โครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสสี่องค์ประกอบ และนำเสนอการแก้ปัญหาความล่าช้าในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับลำคลื่นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแถวลำดับวงกลมในการเริ่มต้นกระบวนการปรับตัว CMA รายละเอียดของวิทยานิพนธ์มีดังนี้

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีพื้นฐานของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจในอัลกอริทึมของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว นอกจากนี้ได้อธิบายสาเหตุผลที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำ FPGA มาใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศแถวลำดับปรับตัว ตลอดจนได้อธิบายวิธีการออกแบบ FPGA และภาษา VHDL ที่ใช้ในการออกแบบ

บทที่ 3 อธิบายระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัว ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว รวมถึงได้อธิบายสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้ ซึ่งเป็นโครงสร้างของสายอากาศที่จะนำมาใช้ร่วมกับส่วนประมวลผลปรับตัว รวมทั้งอัลกอริทึมการปรับตัวที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ LMS และ CMA

บทที่ 4 ออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลปรับตัว CMA โดยใช้ FPGA เริ่มต้นด้วยการออกแบบวงจรพื้นฐานซึ่งประกอบด้วย วงจรบวกและลบ วงจรคูณ และวงจรแปลงจำนวน หลังจากนั้นได้นำวงจรเหล่านี้ไปสร้างส่วนประมวลผลปรับตัว CMA โดยใช้ FPGA นอกจากนี้ได้ทดสอบการทำงานของวงจรที่ทำการสร้างด้วยโปรแกรม ModelSim การทดสอบการทำงานจะใช้พารามิเตอร์จริงในการจำลองการทำงาน

บทที่ 5 นำเสนอการแก้ปัญหาความล่าช้าในการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับค่าคลื่นหลักในการเริ่มต้นกระบวนการปรับตัว CMA และวิเคราะห์การลู่เข้าของสายอากาศที่นำเสนอ รวมทั้งได้ทดสอบการปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับ CMA ซึ่งสร้างโดย FPGA โดยการจำลองสัญญาณตามเงื่อนไขที่ได้วิเคราะห์ไปแล้ว

บทที่ 6 ในบทนี้จะสรุปผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์รวมถึงวิจารณ์และเสนอแนะผลการวิจัย

บทที่ 2

เอฟพีจีเอและทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

2.1 บทนำ

ในการออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลปรับตัวของสายอากาศปรับตัว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้ส่วนประมวลผลที่มีประสิทธิภาพ วิทยานิพนธ์บทนี้ได้อธิบาย ความเป็นมา ข้อดี และวิธีการออกแบบของอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลปรับตัว นอกจากนี้ยังได้อธิบายพื้นฐานของการประมวลผลสัญญาณไม่ต่อเนื่อง รวมถึงการใช้สัญลักษณ์ต่างๆ แทนสัญญาณ คุณสมบัติต่างๆ ของสัญญาณ การประมวลผลสัญญาณสุ่ม คำตอบ และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมของสายอากาศปรับตัว

2.2 เอฟพีจีเอ

เทคโนโลยี ASIC (application specific integrated circuit) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการออกแบบและสร้างระบบในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยี ASIC ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงวิธีการออกแบบ การผลิต และการดำเนินการตลาดของอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ จุดสำคัญของการเปลี่ยนแปลง คือ ในช่วงก่อนการใช้เทคโนโลยี ASIC วิศวกรได้ทำการออกแบบระบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ไมโครโปรเซสเซอร์ และวงจรรวมพื้นฐาน ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างระบบโดยใช้ชิพ แต่ในช่วงการออกแบบเทคโนโลยี ASIC วิศวกรได้ออกแบบระบบให้รวมอยู่ในชิพ สามารถสรุปประโยชน์ของเทคโนโลยี ASIC ได้ดังนี้

1. โดยทั่วไป ราคาต่อเกทของวงจรรวม ASIC จะถูกกว่าราคาของเกทสมมูลของไอซีพื้นฐาน รวมถึงราคาของไอซีขนาดเล็ก (small scale integration; SSI) และไอซีขนาดกลาง (medium size integration; MSI) ด้วย ดังนั้นการใช้เทคโนโลยี ASIC จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนประกอบของสารกึ่งตัวนำ และระบบโดยรวมได้

2. ระบบที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสำคัญมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ SSI และ MSI แล้ว สามารถใช้ ASIC แทนอุปกรณ์ต่างๆ ได้ โดยรวมไว้ในชิพเพียงชิพเดียว นอกจากนี้ยังสามารถลดการใช้พลังงานในอุปกรณ์ได้ด้วย ซึ่งถือว่าเป็นหนึ่งในวิธีการลดรายจ่าย

3. การใช้อุปกรณ์ ASIC จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีกว่า เนื่องจากความต้องการในการเปลี่ยนแปลงการประยุกต์ใช้ ระบบหลายๆระบบมีฟังก์ชันที่ไม่จำเพาะเจาะจง จึงสามารถแทนไมโครโปรเซสเซอร์ทั่วไป ด้วยการใช้อุปกรณ์ ASIC ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้อุปกรณ์ ASIC เพื่อลดการเชื่อมต่อของสายบนบอร์ดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การใช้อุปกรณ์ ASIC สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือให้ระบบได้ การเชื่อมต่อทางด้านกลศาสตร์ เช่น สายทองแดงและเคเบิล จะทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำ วงจรของ ASIC สามารถลดการเชื่อมต่อทางด้านกลศาสตร์ได้มากกว่า 10 %

ถึงแม้การออกแบบอุปกรณ์ ASIC ที่สมบูรณ์ (Full-custom) จะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง และมีขนาดเล็ก แต่การออกแบบด้วยวิธีกึ่งกำหนด (semi-custom) จะมีประโยชน์มากกว่า เนื่องจากการออกแบบด้วยวิธี semi-custom สามารถลดรายจ่ายในการออกแบบ ใช้เวลาในการพัฒนาน้อย และโอกาสในการออกแบบให้สำเร็จมีสูง การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ ASIC ด้วย semi-custom แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ เซลล์มาตรฐาน (standard cell) เป็นการออกแบบส่วนประกอบลอจิกพื้นฐานให้เซลล์เป็นไปตามต้องการ (customize cell) โดยกระบวนการแต่ละระดับเหมือนกันหมด ผู้ออกแบบวงจรสามารถเลือกเซลล์มาตรฐานจากห้องสมุดเซลล์มาตรฐาน (standard cell library) ได้ สามารถจัดเซลล์มาตรฐานให้อยู่ในแถวและคอลัมน์ คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงความสูงหรือความกว้างของกลุ่มอาคาร หลังการจัดเซลล์แล้ว จะทำการเชื่อมต่อเซลล์มาตรฐานเข้าด้วยกัน เพื่อสร้างส่วนประกอบกึ่งกำหนดระดับสูง (high level semi-custom component) การสร้าง ASIC ด้วย semi-custom อีกวิธีคือ mask programmable gate array (MPGA) ประกอบด้วยแถวลำดับวงจรมาตรฐานหลายๆวงจรที่กระจายในชิพ ผู้ออกแบบวงจรจะทำการผลิตด้วยรูปแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ โดยจะเปลี่ยนเป็นเกทพื้นฐานในวงจรที่กำหนดฟังก์ชัน (functional custom circuit) อย่างไรก็ตามการใช้เซลล์มาตรฐานและ MPGA มีข้อเสีย 2 ข้อคือ

1. ใช้เวลานานในการทำต้นแบบ (prototype) หลังจากทีส่งแผนงาน (layout) ไปยังโรงงาน

2. ราคาแพง ถ้าผลิตชิพในปริมาณน้อย

เมื่อเร็วๆนี้ การใช้ FPGA ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ ASIC ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ประโยชน์ในการใช้ FPGA สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ใช้เวลาเพียงไม่กี่นาทีในการทำต้นแบบ
2. ต้นทุนในการผลิตต่ำ ถึงแม้จะทำการผลิตในปริมาณน้อย
3. ความผิดพลาดในการผลิตต่ำ

โดยทั่วไป โครงสร้างของ FPGA มีลักษณะที่คล้ายกับโครงสร้างของ MPGA ซึ่งประกอบด้วยแถวลำดับของกุ่มลอจิก (logic block) โดยสามารถโปรแกรมการเชื่อมต่อในรูปแบบการออกแบบที่แตกต่างกัน ความแตกต่างระหว่าง MPGA และ FPGA คือ MPGA ถูกโปรแกรมด้วยการสร้างวงจรรวม เพื่อจัดการกับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ ขณะที่ FPGA ถูกโปรแกรมผ่าน

สวิตช์ที่สามารถโปรแกรมได้ด้วยไฟฟ้า (electrically programmable switch) ซึ่งคล้ายกับ PLD (programmable logic device) อย่างไรก็ตาม FPGA มีลักษณะที่แตกต่างจาก PLD ดังนี้

1. สถาปัตยกรรมเส้นทางของ PLD มีลักษณะไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามการใช้โครงสร้างคล้ายครอสบาร์ ซึ่งเอาต์พุตทุกตัวจะต่อตรงกับอินพุตทุกตัวโดยตรงผ่านสวิตช์ 1 ตัว ทำให้ไม่มีประสิทธิภาพ ขณะที่สถาปัตยกรรมเส้นทางของ FPGA จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า คล้ายกับ MPGA โดยการเชื่อมต่อแต่ละส่วนจะถูกเชื่อมผ่านสวิตช์หลายๆตัว

2. การสร้างลอจิกของ PLD จะใช้ลอจิกแอนด์และออร์สองระดับที่ซ้อนกัน ด้วยอินพุตที่เป็นแอนด์เกต การสร้างลอจิกของ FPGA ด้วยเกตที่กระจายในหลายระดับ เป็นชั้นๆ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการสร้างเพียงแค่สองชั้น

ดังนั้นการออกแบบ FPGA ในระดับสูง จะได้ผลที่ดีกว่า PLD เนื่องจาก มีสถาปัตยกรรมเส้นทางที่ซับซ้อนกว่า และวิธีการสร้างลอจิกที่ดีกว่า

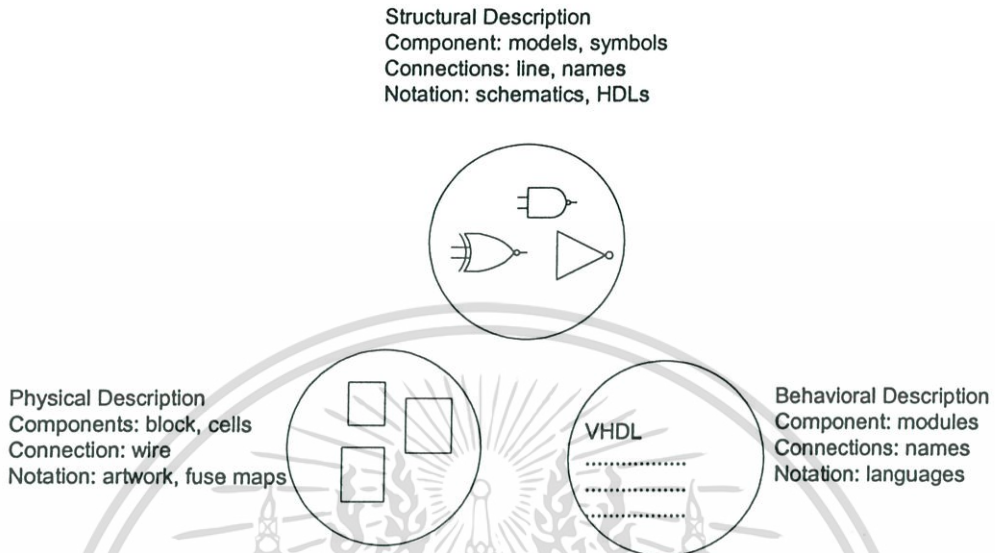
2.2.1 วิธีการออกแบบ (Design methodologies)

วิธีการออกแบบระบบด้วยการใช้อุปกรณ์ FPGA เพื่อให้ได้ชิ้นงานต้นแบบที่เหมาะสม จะต้องพิจารณาสิ่งสำคัญต่างๆ ที่มีอยู่หลายประการคือ

2.2.1.1 การอธิบายแบบ (Describing a design)

การอธิบายแบบมีอยู่หลายรูปแบบ โดยเฉพาะเมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าและซับซ้อนมากขึ้น จึงได้ทำการแทนแบบของแผนภาพ (Diagramming templates) และบอร์ดภาพร่าง (Drawing boards) ด้วยโปรแกรมการทำงานของระบบออกแบบที่เรียกว่า CAD ทำให้การอธิบายวงจรพื้นฐานที่เป็นอุปกรณ์ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทานและคาปาซิเตอร์ อยู่ในรูปแบบของฐานข้อมูลที่ถูกรวบรวมไว้ในรูปของแผนภาพชั้นลำดับ (Hierarchical schematics) นอกจากนี้ยังมีการใช้โปรแกรมภาษาที่อธิบายฮาร์ดแวร์ (Hardware description language program: HDL program) โดยใช้แบบจำลอง (Simulation model) การออกแบบแผนงานศิลป์ (Layout artwork) และแผนแบบทดสอบ (Test pattern) ต่างๆ เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของการให้คำอธิบายแบบ (Design description) กับบันทึกหมายเหตุ (Notation) โดยความหมายของการให้คำอธิบายแบบที่ชัดเจนนั้นข้อมูลจะต้องถูกออกแบบหรือสร้างให้อยู่ใน 3 กลุ่มต่อไปนี้ คือ กลุ่มโครงสร้าง (Structural domain) กลุ่มพฤติกรรม (Behavioral domain) และกลุ่มกายภาพ (Physical domain) รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพของเวรน์และลักษณะเฉพาะของส่วนประกอบภายในของการอธิบายแบบแต่ละกลุ่ม การออกแบบที่อยู่ในระดับลอจิก สามารถอธิบายด้วยการเขียนเป็นลอจิกไดอะแกรมได้ การอธิบายแบบในเชิงพฤติกรรม (Behavioral description) สามารถแสดงเป็นกลุ่มของสมการทางลอจิก (Logic equation) ได้ และการอธิบายแบบด้วยทางกายภาพ (Physical description) ซึ่งอธิบายด้วยกลุ่มของแผนภาพเซลล์มาตรฐาน (Standard cell layout) ของ ASIC

แต่ละตัว บันทึกรายการเหตุการณ์นั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ในการบรรยายสิ่งเหล่านี้ โดยบันทึกรายการเหตุการณ์ที่แตกต่างกันก็อาจจะใช้สร้างส่วนย่อยๆ ที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนของตัวแบบงาน



รูปที่ 2.1 กลุ่มต่างๆของการอธิบายแบบ

นอกจากนี้แบบงานที่มีความซับซ้อนจะถูกสร้างโดยการอธิบายแบบในรูปแบบต่างๆ จากหลายระดับ ในทางปฏิบัติแบบงานในเชิงวิศวกรรมมักเป็นการดำเนินงานแบบแบ่งส่วนงานให้แยกย่อยก่อนการเข้าไปแก้ปัญหา (Divide and conquer) ทำให้เกิดแบบแผนทางความคิด (Conceptual) การทำงานของระบบงานที่มีขนาดใหญ่จะถูกแบ่งให้เป็นหน่วยที่เล็กลงจนกระทั่งเหมาะสมต่อการสร้างเป็นชิ้นงานจริงในระดับอุปกรณ์ทางกายภาพได้ ตัวอย่างของระดับแบบแผนความคิด (Conceptual levels) ปกติจะประกอบด้วย แผนผังวงจร อุปกรณ์ลอจิก อุปกรณ์ Register transfer และ Processor-Memory-Switch (PMS) ในระดับที่เป็นทางกายภาพจะประกอบด้วย อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นต้น ดังนั้นการอธิบายดังรูปที่ 2.1 เพียงมิติเดียว จึงมีลักษณะที่เข้าใจง่ายและสามารถถูกปรับเปลี่ยนและแก้ไขเพื่อให้มีการอธิบายแบบในระดับที่แตกต่างแยกย่อยไปได้เท่าที่ต้องการโดยไม่จำกัดจำนวนลำดับชั้นของการอธิบาย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นวิธีที่ดีสำหรับการนิยามภาพและดูการไหล (Flow) ของกระบวนการออกแบบ รูปที่ 2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์กันบน 3 แกน (Gajski-Kuhn diagram) โดยให้ Y แทนการอธิบายแบบทั้งสามกลุ่ม แต่ละแกนแทนสเกลระดับของการออกแบบ ในแผนภาพนี้ขั้นตอนของกระบวนการออกแบบจะถูกแสดงในรูปของการผ่านจุด (transition) จากจุดบนแกนหนึ่งไปยังจุดที่อยู่บนแกนอื่น เช่น การสร้างแผนภาพจากลอจิกไดอะแกรม ซึ่งมีลักษณะการอธิบายแบบในเชิงพฤติกรรม เป็นต้น กระบวนการไหลของการออกแบบ (Design process flow) เปรียบเหมือนการหมุนรอบแกนทั้ง

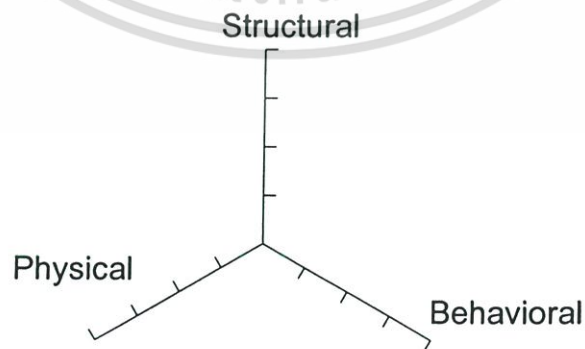
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามแกน (Spiral path) จากจุดเริ่มต้นของกราฟซึ่งเป็นแบบเชิงพหุติกรรม พัฒนาต่อไปเป็นแบบโครงสร้างและแบบทางกายภาพในที่สุด นอกจากนี้การอธิบายแบบทั้ง 3 กลุ่มนี้จะมีรูปแบบเฉพาะที่แตกต่างกันคือ

Structural design เป็นแบบที่แสดงในเชิงโครงสร้างการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น การเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสายไฟ การใช้หมุดย้ำหรือเกี่ยวเพื่อยึดโครงของอุปกรณ์เข้าไว้ด้วยกัน เป็นต้น จะพบว่าตำแหน่งทางโครงสร้างถูกกำหนดโดยสถาปัตยกรรมที่ทำให้ระบบมีลักษณะเป็นไปตามต้องการ เช่น สมรรถนะ ความสมบูรณ์ของโครงสร้าง (Structural integrity) และอื่นๆ สำหรับ FPGA แบบที่แสดงในเชิงโครงสร้างเพื่อใช้งานจะใช้โปรแกรมประเภท schematic drawing tool เพื่อช่วยในการออกแบบ เชื่อมต่ออุปกรณ์

Physical design เป็นแบบที่แสดงในเชิงกายภาพที่ต้องมีการรวมการสร้างข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการออกแบบเพื่อการผลิตรวมถึงการทดสอบไว้ด้วย แบบเชิงกายภาพสำหรับ FPGA จำเป็นจะต้องมีการกำหนดหรือนิยามฟังก์ชันสำหรับลอจิกบล็อกและส่วนของการเชื่อมต่อที่เชื่อมต่ออยู่ภายในด้วย เหมือนกับการสร้างแผนภาพไว้ในการทำ VLSI ส่วนข้อมูลสำหรับการผลิตชิ้นงานจะอยู่ในรูปของแฟ้มข้อมูลแบบไบนารีสำหรับการทำโปรแกรม เครื่องมือที่ใช้ออกแบบเชิงกายภาพจะต้องมีทั้ง Symbolic editor, Generator และซอฟต์แวร์สำหรับกำหนดเส้นทางและตำแหน่งแบบอัตโนมัติ (Automatic place-and-route software)

Behavioral design เป็นแบบที่แสดงในเชิงพหุติกรรม รายละเอียดของแบบชิ้นงานจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันการทำงาน โดยอาจจะรวมไว้ในตัวแบบจำลอง (Simulation model) โปรแกรม HDL ในกลุ่มของสมการลอจิก หรือในตารางความจริง (Truth table) แม้กระทั่งการอธิบายด้วยลอจิกไดอะแกรมก็สามารถแสดงในแบบเชิงพหุติกรรมได้ด้วยการใช้แบบแผนการเขียนภาพวาด (Drawing) อย่างง่าย



รูปที่ 2.2 แผนภาพ Gajski-Kuhn diagram

2.2.1.2 การออกแบบเป็นชั้นลำดับ (Hierarchical design)

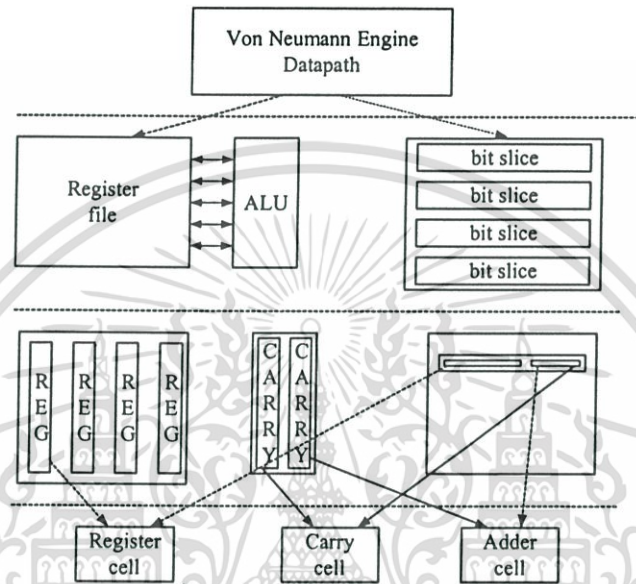
ในด้านการผลิต เมื่อในการออกแบบที่เป็น Full-custom มีความซับซ้อนมากขึ้น จะส่งผลกระทบต่อวิศวกรผู้สร้างซอฟต์แวร์ ที่จะต้องปรับวิธีการเขียนโปรแกรมโดยใช้เทคนิคการแบ่งย่อยงานแล้วเข้าไปแก้ปัญหา เพื่อผลิตซอฟต์แวร์ให้รองรับการสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงได้มีการคิดค้นการออกแบบเป็นชั้นลำดับหรือเชิงโครงสร้าง ได้มีการนำแนวคิดเกี่ยวกับการแยกส่วน (Modularization) การซ่อนสาระสำคัญ (Information hiding) และการตรวจสอบอย่างเป็นขั้นตอน (Stepwise refinement) มาใช้ในการออกแบบ VLSI จึงทำให้มีการนำวิธีการเขียนโปรแกรมมาประยุกต์ใช้กับการทำเลย์เอาต์ของ VLSI เนื่องจากโครงสร้างการเขียนโปรแกรมยอมให้มีการแยกรายละเอียดต่างๆ ของอาร์ตเวิร์กได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการทำซ้ำหรือการทำงานอย่างมีเงื่อนไข ในรูปที่ 2.3 แสดงการออกแบบที่มีลักษณะชั้นลำดับซึ่งแสดงการแยกส่วนแบบมีชั้นลำดับของเส้นทางข้อมูลที่ถูกกำหนดขึ้นให้อยู่ในรูปของเครื่องคำนวณแบบ Von Neumann โดยสามารถแจกแจงแบบงานให้เห็นรายละเอียดด้วยกลุ่มของแบบแผนวงจรที่ระดับต่ำสุดได้เป็นวงจรหรือลอจิกไดอะแกรมของเซลล์ต่างๆ และแบ่งส่วนรายละเอียดจริงของแบบงานและความแตกต่างของแต่ละส่วนด้วยทางเลือกที่อยู่ในแผนผังการแบ่ง ส่วนที่อยู่ในแนวแกนนอน เป็นการให้ความสำคัญกับการออกแบบของ Bit slice หรือในแนวแกนตั้ง เป็นการให้ความสำคัญกับการออกแบบของ Functional unit จากรูปจะเป็นแบบแผนการแบ่งส่วนที่เป็นทางเลือกในการแสดงด้วยแผนผังการเชื่อมต่อของสาย ในตัวอย่างนี้เป็นบัสที่ใช้ในการสื่อสารระหว่าง Operands และส่งผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างรีจิสเตอร์ไฟลท์กับ ALU การออกแบบที่ถูกต้องของแบบที่เป็นชั้นลำดับจะต้องแบ่งส่วนๆ ของกลุ่มสายเหล่านี้ไปยังเซลล์ที่อยู่ด้านใต้ของเส้นแบ่งชั้นเสมอ เพราะจะแสดงให้เห็นถึงระดับความซับซ้อนที่แตกต่างกันในการเชื่อมต่อข้อมูลเพื่อนำไปจำลองการทำงาน

2.2.1.3 การออกแบบที่มีความอิสระจากเทคโนโลยี (Technology-independent design)

การออกแบบที่มีความเป็นอิสระจากเทคโนโลยีจะใช้ได้เฉพาะกับแบบงานที่เป็นการออกแบบขั้นสูงเท่านั้นโดยใช้โปรแกรมภาษา HDL (Hardware Description Language) และจะแปลงเป็นรูปแบบของข้อมูลอย่างอัตโนมัติด้วยโปรแกรมสังเคราะห์เพื่อให้อยู่ในรูปของตัวกลาง (Intermediate form) ที่สามารถนำไปกำหนดอุปกรณ์เป้าหมายให้มีรูปแบบในการสร้าง (Implement styles) ที่แตกต่างกันหรือผู้ผลิตที่แตกต่างกันไป จึงมีลักษณะคล้ายกับเทคโนโลยีตัวแปลภาษาระดับสูง (High level language compiler technology) ที่เป็นตัวสร้างรหัสการทำงานจากข้อมูลในรูปแบบตัวกลางไปสร้างเป็นรหัสสำหรับเครื่องจักร (Machine) ที่ต้องการ สิ่งที่จะกำหนดว่าเป็นการออกแบบที่มีความเป็นอิสระจากเทคโนโลยีก็คือ สามารถรวมเอาสิ่งที่ผู้ใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบขึ้นเองด้วยการทำงานในภาษาระดับสูงเข้าไปเป็นฐานข้อมูลในระบบได้ด้วย แต่ข้อเสียของการออกแบบที่มีความเป็นอิสระจากเทคโนโลยีก็คือ มีการสูญเสียสูงในเรื่องของประสิทธิภาพการแมพจากแบบซึ่งเป็นการออกแบบขั้นสูงให้เป็นชิ้นงานจริง และการสูญเสียจากการที่ผู้ออกแบบสามารถควบคุมค่าของเวลาที่ใช้ในการทำงานและขนาดของเกตในแบบงานได้โดยตรงซึ่งเหตุผลทั้งสองจะเป็นกุญแจที่นำไปสู่ความสำเร็จหรือไม่สำเร็จในการสร้างชิ้นงานจริงได้



รูปที่ 2.3 ชั้นลำดับการแบ่งส่วนของ datapath

2.2.1.4 การออกแบบด้วยวิธี Mead-Conway

การออกแบบด้วยวิธี Mead-Conway นิยมใช้ในการออกแบบวงจร VLSI ซึ่งมีลักษณะเป็นการออกแบบที่เป็นขั้นลำดับที่มีการมุ่งเน้นในเรื่องของการจัดการเกี่ยวกับความซับซ้อนในการสื่อสารภายในหรือการเชื่อมต่อของสายตัวนำในชิ้นงาน ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญมากเพราะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายข้อมูลไปรอบๆ วงจรของ VLSI อาจจะมีผลมากต่อการทำงานทั้งหมดวัตถุประสงค์ของเทคนิคการออกแบบคือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงานที่ออกแบบซึ่งจะประกอบไปด้วยหลักเกณฑ์ดังนี้

1. การเชื่อมต่อของสายจะเป็นกุญแจสำคัญในการออกแบบขั้นสูง
2. ใช้กฎพื้นฐานในการออกแบบในการทำให้ส่วนที่เป็นนามธรรมหมดไปจากรายละเอียด
3. ใช้ Building block เป็นส่วนของทางเดินข้อมูลและ PLA (Two-level logic block)

เนื่องจากจะมีโครงสร้างของการเชื่อมต่อของตัวนำที่ดี

วิธีการนี้จะจัดวางตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆ ภายในวงจร VLSI โดยคำนึงถึงโครงสร้าง

และรูปแบบทางกายภาพเป็นหลัก การพยายามรักษารายละเอียดรูปแบบของโครงสร้างและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบทางกายภาพให้เหมือนเดิมที่สุด จะช่วยหลีกเลี่ยงการเกิดข้อบกพร่อง (bug) ที่อาจจะเป็นกับดักที่ซับซ้อนในการออกแบบ หากจำเป็นต้องมีการแยกโครงสร้างกับชั้นลำดับทางกายภาพออกจากกัน

เทคนิคนี้สามารถนำมาใช้ได้กับ FPGA ได้เป็นอย่างดีภายใต้เงื่อนไขคือ FPGA จะต้องมีความเหมือนกันอย่างแท้จริงกับตัวสื่อกลางหรือโปรแกรมที่ใช้สำหรับการออกแบบและสร้างวงจร ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าสถาปัตยกรรมของ FPGA และ Fine-grain จะมีความคล้ายกันกับลอจิกอาร์เรย์ที่โปรแกรมได้ เนื่องจากชิ้นส่วนในระดับเกทอาร์เรย์เป็นแบบเซลล์ลาร์เรย์ ซึ่งมีความเหมาะสมกับอุปกรณ์เวดล้อมมากกว่าสถาปัตยกรรมแบบ Coarse-grain channeled ซึ่งผู้จัดรูปแบบนั้นสามารถที่จะคาดหวังได้จากการเตรียมทางเลือกต่างๆ ในการสร้างได้โดยตรง

2.2.1.5 การออกแบบเพื่อให้ได้ความเร็วของการทำงานที่เหมาะสม (Temporal design)

เนื่องจากการใช้ FPGA หรือสื่อกลางที่ช่วยในการสร้างชิ้นงานใดๆ ก็ตามยังคงต้องมีการตัดสินใจในเรื่องเวลาการทำงานของตัวชิ้นงานเสมอ โดยเป็นการพิจารณาเลือกกระหว่างขนาดของพื้นที่ใช้งานภายใน FPGA ที่จะทำให้มีเวลาในการทำงานได้ดีที่สุดกับสมรรถนะของชิ้นงาน ดังนั้นการเตรียมหรือเลือกลักษณะเฉพาะของ Storage element ในส่วนที่เป็นเซลล์พื้นฐานของ FPGA อาจจะเป็นสิ่งที่จำกัดขอบเขตทางเลือกต่างๆ ที่จะใช้ในการออกแบบซึ่งจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

1. ระบบสัญญาณนาฬิกา (Clocked)

สัญญาณนาฬิกาจะเป็นตัวกำหนดจังหวะการทำงานทุกๆ เซลล์ให้ทำงานแบบซิงโครนัสกับสัญญาณนาฬิกาของระบบ ตัวอย่างของวงจรแสดงในรูปที่ 2.4 มีการทำงานเป็นแบบลำดับของวงจรคำนวณที่เป็นแบบส่งผ่านตัวรีจิสเตอร์ ในวงจรจะพบว่าช่วงเวลาของสัญญาณนาฬิกาเป็นสิ่งที่กำหนดการไหลของข้อมูลที่ผ่านระบบ ดังนั้นผลลัพธ์จากการคำนวณที่เสร็จสิ้นในช่วงหนึ่งๆ ด้วยวงจรที่เป็นคอมบิเนชันลอจิกจะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ที่อยู่ตรงกลางก่อนที่จะส่งต่อไปให้ช่วงถัดไป จึงเกิดปัญหาขึ้นได้เมื่อมีการหน่วงเวลาบนสายสัญญาณที่อยู่ในระบบ คือทำให้เกิดการเบี่ยงเบน (Skew) ของสัญญาณนาฬิกา ส่งผลให้เกิดการเลื่อนเวลาในการทำงานของรีจิสเตอร์ ดังนั้นใน FPGA บางกลุ่มจึงได้มีการเตรียมระบบที่เป็นโครงข่ายพิเศษที่ครอบคลุมทั้ง FPGA ไว้โดยเฉพาะเพื่อให้เกิดค่าของเวลาหน่วงน้อยที่สุดส่งผลให้การทำงานของระบบเป็นแบบซิงโครนัสมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ถ้าในกรณีที่เซลล์ของ FPGA ถูกใช้งานเป็นแบบ Smart-memory ที่อยู่ภายในระบบคอมพิวเตอร์ แผนผังของระบบสัญญาณนาฬิกา (Clocked scheme) อาจจะเป็นเทคนิคที่ถูกเลือกมาใช้ได้ เนื่องจากจะยอมให้ไมโครโปรเซสเซอร์ทำการอ่านหรือเขียนบนจุดใดๆ ของวงจรที่สร้างขึ้น

ไว้ภายในได้โดยที่เซลล์ไม่ไปรบกวนการคำนวณของระบบ เนื่องจากจะมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์คู่
เอกลี... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

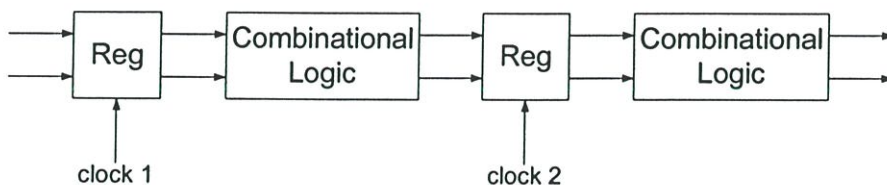
อาร์เรย์ จึงเป็นที่น่าสังเกตว่าการที่มีระบบสัญญาณนาฬิกาสามารถเลือกได้ จะทำให้ผู้ใช้งานไม่ต้องกังวลเรื่องการทำจัดสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการมีเวลาเหลื่อมกันของสัญญาณ (Timing hazard) และแนวทางการใช้สัญญาณนาฬิกาเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องมี 2 แนวทางคือ

1) การใช้ Single-phase clocking เป็นการใช้อุปกรณ์ที่มีการกระตุ้นการทำงานแบบ Master-slave storage element และมีสัญญาณนาฬิกาแบบ Single-phase ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ที่สัญญาณนาฬิกาทั้งสองตัวต้องเป็นสัญญาณเดียวกัน รูปแบบเช่นนี้ได้มีการกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ที่ใช้ในระบบ TTL แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ FPGA ก็สนับสนุนรูปแบบนี้ด้วยกัน

2) การใช้ Two-phase clocking เป็นการใช้สัญญาณนาฬิกาแบบ Two-phase ที่ไม่มีการเหลื่อมทับกัน (Overlap) ให้กับตัวแลชท์ การทำเช่นนี้ก็จะทำให้นำไปประยุกต์ใช้ในวงจรในรูปที่ 2.4 ได้ และการที่ไม่มีความเหลื่อมกันของสัญญาณนาฬิกาทั้งสองจะช่วยป้องกันการเคลื่อนย้ายข้อมูลมากกว่าหนึ่งช่วงในแต่ละวงรอบสัญญาณนาฬิกา ดังนั้นถ้าใน FPGA มีการเตรียมแลชท์ที่สามารถควบคุมได้โดยตรงจากสัญญาณนาฬิกาของระบบ ซึ่งจะทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้สายสัญญาณพิเศษเพิ่มขึ้นมาสำหรับใช้ในการป้อนสัญญาณนาฬิกา

2. ระบบการกำหนดเวลา Self-timed

ข้อกำหนดเรื่องเวลานี้หากในแต่ละเซลล์สร้างสัญญาณที่ชัดเจนของ "go" และ "done" ขึ้นมา โดยที่มีเส้นทางขนานกับสัญญาณที่เป็นข้อมูลและมีการใช้การเปลี่ยนขอบ (Edge transition) ของตัวสัญญาณมาเป็นการทำ Handshake ซึ่งจะพบว่าเป็นแนวทางที่น่าสนใจมาก เพราะจะช่วยลดปัญหาได้มากในเรื่องของเวลาในขณะที่มีความถูกต้องของการทำงานสูงมาก อย่างไรก็ตามการสร้าง Self-time FPGA มีต้นทุนที่สูงมากในเรื่องของขนาดพื้นที่ของเซลล์ เนื่องจากความซับซ้อนของเซลล์จะมากกว่าการสร้างด้วยเทคโนโลยีแบบซิงโครนัสในส่วนที่เป็นสายสัญญาณ "go" และ "done" และต้องมีจำนวนของเกตที่มากพอ การใช้งานหากจะต้องมีการแบ่งหรือแยกสายสัญญาณที่ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์ ที่สำคัญคือฟังก์ชันการทำงานของมันจะต้องถูกคำนวณไว้ก่อนเพื่อเตรียมไว้สำหรับสิ่งที่จำเป็นต่อการควบคุมด้วย



รูปที่ 2.4 รูปแบบของ Register transfer model

2.2.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาวีเอชดีแอล

ภาษาวีเอชดีแอล (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language; VHDL) เป็นภาษาที่ใช้ในการบรรยายพฤติกรรมของฮาร์ดแวร์ประเภทหนึ่ง ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา (DoD: Department of Defense) ในปี ค.ศ. 1980 โดยมีเป้าหมายหลัก 2 ประการคือ

1. ต้องการภาษาที่สามารถรองรับการออกแบบวงจรที่มีความซับซ้อนได้
2. ต้องการภาษาที่เป็นมาตรฐานหรือเป็นภาษากลางที่ทำให้สามารถเผยแพร่ผลงานการออกแบบกันภายในกลุ่มนักออกแบบด้วยกันได้

DoD ได้มอบหมายให้บริษัท IBM, Texas Instruments และ Intermetrics เป็นผู้ออกแบบตัวภาษา โดยในระยะแรกยังเป็นความลับทางการทหาร และเมื่อปี ค.ศ. 1985 ITAR ได้ยกเลิกการถ่ายทอดเทคโนโลยีทางการทหาร และหลังจากนั้นจึงได้มีการนำ VHDL มาใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยในปี ค.ศ. 1987 IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineering) ได้ทำการศึกษา VHDL และกำหนดเป็นมาตรฐานที่เรียนว่า IEEE 1076-1987 (VHDL' 87) และในปี ค.ศ. 1993 IEEE ได้ปรับปรุงและเพิ่มเติม VHDL เป็นมาตรฐาน IEEE 1076-1993 (VHDL' 93)

การเขียนโปรแกรมเพื่อบรรยายพฤติกรรมด้วย VHDL จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการเขียนรูปแบบของระบบดิจิทัล 4 หน่วยคือ

2.2.2.1 หน่วยการออกแบบเอกลักษณ์ (Entity Design Unit)

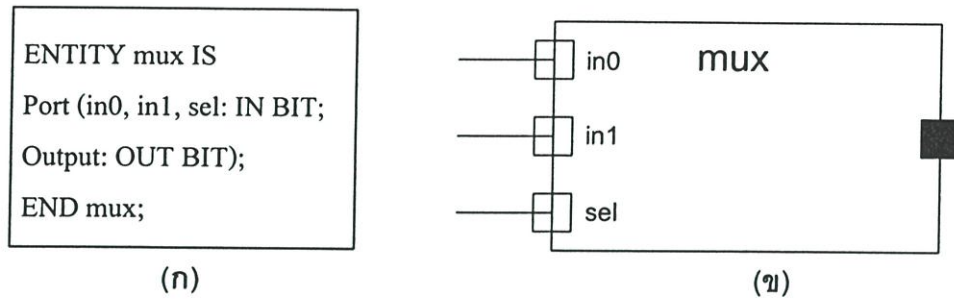
ส่วนนี้เป็นส่วนที่กำหนดการเชื่อมต่อและทิศทางของสัญญาณซึ่งมีรูปแบบการกำหนดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.5

```
ENTITY component_name IS
    Input and output ports
    Physical and other parameters
END [component_name];
```

รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของการกำหนดหน่วยการออกแบบเอกลักษณ์

ส่วนนี้จะขึ้นต้นด้วยคำว่า Entity ต่อด้วยชื่อของ Entity ซึ่งการตั้งชื่อจะต้องเป็นไปตามกฎการตั้งชื่อ ตามด้วย IS ต่อมาเป็นการกำหนดสัญญาณต่างๆ รวมทั้งทิศทางของสัญญาณ และพารามิเตอร์อื่นๆ และที่สำคัญส่วน Entity นี้จะต้องลงท้ายด้วย End ตามด้วยชื่อของ Entity และปิดด้วยเครื่องหมายอัฒภาค (;)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

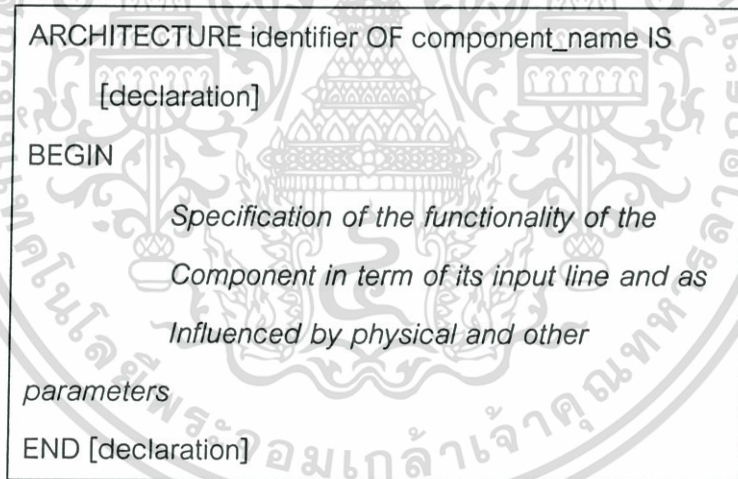


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการออกแบบด้วยสัญลักษณ์ ของวงจร 2 to 1 multiplexer

(ก) การออกแบบโดยใช้ภาษาวีเอชดีแอล

(ข) มุมมองในการเชื่อมต่อของวงจรเซอร์ 2 ออก 1

จากรูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการกำหนดวงจรมัลติเพลกเซอร์ 2 ออก 1 โดยรูป (ก) เป็นการกำหนดโดยใช้ภาษา VHDL ส่วนรูป (ข) เป็นมุมมองในการเชื่อมต่อของวงจร โดยวงจรมัลติเพลกเซอร์ตามที่กำหนดโดย VHDL ในรูปที่ (ก) นั้น จะมีพอร์ตอินพุต 3 พอร์ต เอาต์พุต 1 พอร์ต ดังแสดงได้ในรูป (ข)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างพื้นฐานของการกำหนดหน่วยการออกแบบโครงสร้าง

2.2.2.2 หน่วยการออกแบบโครงสร้าง (Architecture Design Unit)

เป็นส่วนที่ใช้บรรยายพฤติกรรมและฟังก์ชันต่างๆ ของวงจร โดยการบรรยายนั้นจะมีความสัมพันธ์กับสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในส่วนของออกแบบเอกลักษณ์ โดยมีรูปแบบการกำหนดค่าต่างๆ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.7

ส่วนนี้จะเริ่มต้นด้วยคำว่า Architecture และตามด้วยชื่อ (Identifier) สิ่งที่ต้องกำหนดลงไปได้แก่ สิ่ง que แสดงให้เห็นว่า Architecture นั้นใช้บรรยายหน่วยการออกแบบเอกลักษณ์ใด (OF <entity design unit> IS) ส่วนที่อยู่ระหว่าง Architecture และ Begin เป็นส่วนประกาศที่กำหนดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Architecture declarative area) โดยส่วนนี้เป็นเพียงส่วนเพื่อเลือก (Option) สามารถเขียนประกาศที่กำหนดค่าต่างๆ ในส่วนนี้ เพื่อจะนำไปใช้ภายใน Architecture ส่วนที่ใช้บรรยายความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุต และเอาต์พุต จะถูกบรรยายระหว่างคำว่า BEGIN กับ END ของหน่วยการออกแบบโครงสร้าง นอกจากนี้ชุดคำสั่งที่อยู่ในส่วนนี้จะทำงานพร้อมกัน (Concurrent statement) หน่วยการออกแบบโครงสร้างจะต้องลงท้ายด้วยคำสั่ง END และชื่อของ Architecture ซึ่งเป็นส่วนเพื่อเลือก

โดยทั่วไปการเขียนอธิบายพฤติกรรมของวงจรด้วย VHDL สามารถออกแบบหน่วยการออกแบบโครงสร้าง ในลักษณะต่างๆ ดังนี้

- ลักษณะการไหลข้อมูล (Dataflow description)
- ลักษณะพฤติกรรม (Behavioral description)
- ลักษณะโครงสร้าง (Structure description)
- ลักษณะรวมแต่ละโครงสร้าง (Mixed model description)

รูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างการแสดงพฤติกรรมของวงจร 2:1 MUX โดยจะมีส่วนที่บรรยายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุตด้วยชุดคำสั่งแบบพร้อมกันชุดเดียว ในลักษณะการไหลของข้อมูล

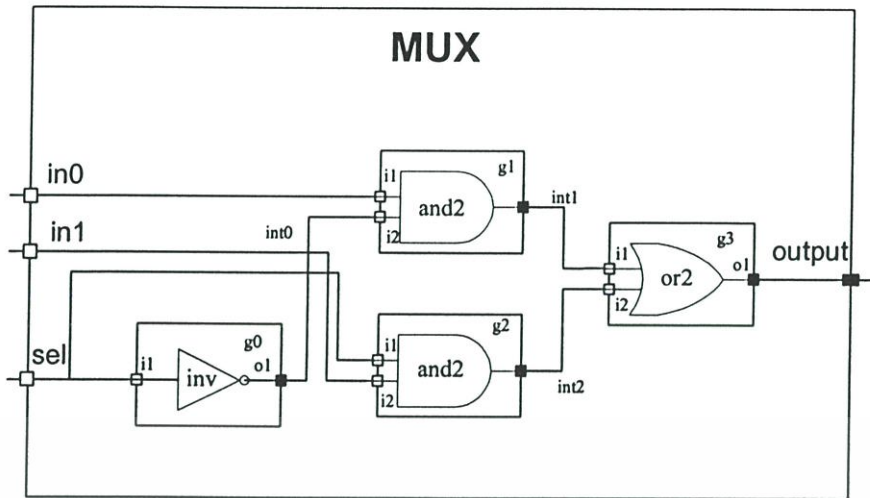
```

ARCHITECTURE data_flow OF mux IS
BEGIN
    Output <= ((NOT sel) AND in0) OR (sel AND
in1);
END data_flow;
    
```

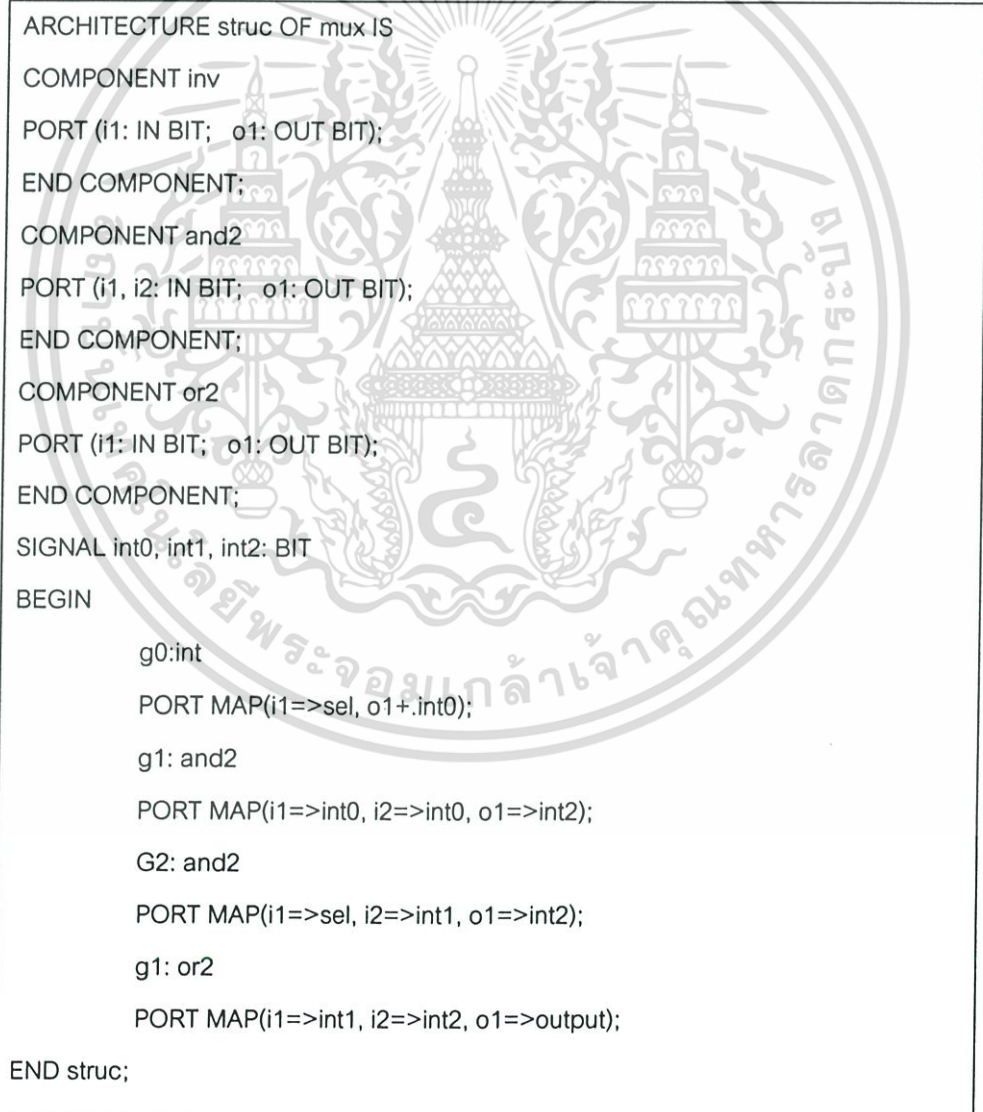
รูปที่ 2.8 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 Mux ตามสมการจริง

$$\text{output} = (\overline{\text{sel}}.\text{in0})+(\text{sel}.\text{in1})$$

รูปที่ 2.9 เป็นตัวอย่างโครงสร้างของการบรรยายวงจร 2:1 MUX ที่บรรยายไว้ในรูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างจะเป็นการนำเกทมาเชื่อมต่อกัน รูปที่ 2.10 เป็นตัวอย่าง VHDL ที่บรรยายในลักษณะโครงสร้าง โดยมี int0, int1 และ int2 เป็นสัญญาณภายในที่ใช้ในการเชื่อมต่อ (Netlist) รูปที่ 2.11 เป็นตัวอย่างการบรรยายพฤติกรรมวงจร 2:1 MUX ในลักษณะพฤติกรรม จากรูปที่ 2.8-2.11 หน่วยการออกแบบโครงสร้าง จะมีลักษณะฟังก์ชันและหน้าที่ที่ทำงานได้เหมือนกัน



รูปที่ 2.9 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 MUX ในลักษณะโครงสร้างของลอจิกเกต



รูปที่ 2.10 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 MUX ในลักษณะโครงสร้างด้วย VHDL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ARCHITECTURE behav OF mux IS
BEGIN
    PROCESS
    BEGIN
        IF(sel= '1' ) THEN
            output <= in0;
        ELSE
            output <= in1;
        END IF;
    END PROCESS;
END behav;

```

รูปที่ 2.11 หน่วยการออกแบบโครงสร้างของ 2:1 MUX ในลักษณะพฤติกรรม

2.2.2.3 หน่วยการออกแบบกลุ่ม (Package Design Unit)

ข้อมูลต่างๆ ตลอดจนโปรแกรมย่อย (Subprogram) ที่เป็นประโยชน์ต่อการเขียนบรรยายวงจร สามารถเก็บไว้ในส่วนที่เรียกว่า Package ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้โดย หน่วยการออกแบบเอกลักษณ์, หน่วยการออกแบบโครงสร้าง หรือแม้กระทั่งจากหน่วยการออกแบบกลุ่มอื่นๆ ด้วยชุดคำสั่ง USE statement สิ่งที่สามารถประกาศหรือเก็บไว้ใน Package ได้แก่ โปรแกรมย่อย ชนิด (Type) ค่าคงที่ (Constants) สัญญาณ (Signals) นามแฝง (Aliases) คุณลักษณะ (Attributes) ส่วนประกอบ (Component) และรายละเอียดการแยกออก (Disconnection specification) โดยปกติแล้ว Package จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การประกาศกลุ่ม (Package declaration) และตัวของกลุ่ม (Package body) โดยการเรียกใช้นั้นจะเรียกใช้ผ่านคำสั่ง USE statement

1. การประกาศกลุ่ม (Package declaration)

เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของ Package เพราะจะเป็นส่วนที่ประกาศชื่อ (Identifier) ของสิ่งที่ประกาศอยู่ภายใน Package สำหรับนำไปใช้นอก Package ถ้าสิ่งใดก็ตาม ถูกประกาศในส่วนของตัวกลุ่ม แต่ไม่ถูกประกาศในการประกาศกลุ่ม จะไม่สามารถนำไปใช้นอก Package ได้รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างทั่วไปของการประกาศกลุ่ม ส่วนที่อยู่ระหว่าง PACKAGE และ END เป็นการกำหนดขอบเขตของการประกาศกลุ่ม เป็นส่วนที่ใช้ประกาศ โปรแกรมย่อย ชนิด ค่าคงที่ สัญญาณ นามแฝง คุณลักษณะ ส่วนประกอบ และรายละเอียดการแยกออก

```
PACKAGE package_name IS
    Package_declarative_port
END package_name;
```

รูปที่ 2.12 หลักการกำหนดกลุ่ม

2. ตัวของกลุ่ม (Package body)

เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคำสั่งต่างๆ ในรูปคำสั่งลำดับ (Sequential statement) ที่ใช้บรรยายฟังก์ชันการทำงานโปรแกรมย่อยทั้งหลาย โดยที่ชื่อของโปรแกรมย่อยนั้น ถูกประกาศไว้ในส่วนของการประกาศกลุ่มแล้ว โดยจะถูกเก็บไว้ในตัวกลุ่ม รวมทั้ง เป็นตัวแปรค่าคงที่ที่ถูกประกาศไว้ในส่วนของการกำหนด แต่ถูกกำหนดค่าในส่วนของตัว Deferred constants ดังนั้นส่วนของตัวกลุ่ม จึงไม่จำเป็นต้องมี ถ้าในส่วนของการประกาศกลุ่ม ไม่มีการประกาศชื่อที่เป็นโปรแกรมย่อยหรือ Deferred constants รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของหน่วยการออกแบบกลุ่ม โดยชื่อของกลุ่มจะต้องเป็นชื่อเดียวกับชื่อที่ประกาศไว้ในการประกาศกลุ่ม

```
PACKAGE BODY package_name IS
    Package_declarative_port
END package_name;
```

รูปที่ 2.13 รูปแบบการกำหนดตัวกลุ่ม

2.2.2.4 หน่วยการออกแบบรูปร่างภายนอก (Configuration Design Unit)

ส่วนนี้ทำหน้าที่เชื่อมหน่วยการออกแบบเอกลักษณ์ เข้ากับหน่วยการออกแบบโครงสร้าง ในกรณีที่มีหน่วยการออกแบบโครงสร้างมากกว่าหนึ่งหน่วย รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบของหน่วยการออกแบบรูปร่างภายนอก

```
CONFIGURATION (identifier OF entity)name IS
    Configuration_declarative_port
END;
```

รูปที่ 2.14 รูปแบบหน่วยการออกแบบองค์ประกอบ

2.3 พีชคณิตเชิงเส้น (Linear Algebra)

เวกเตอร์และเมตริกซ์จะถูกใช้เป็นสัญลักษณ์แทนสัญญาณและตัวดำเนินการต่างๆ การแทนสูตรทางคณิตศาสตร์จะง่ายขึ้น ถ้าทำการเขียนหรืออธิบายด้วย linear algebra เพื่อให้ง่ายในการแก้ปัญหา linear algebra จะมีความสำคัญในการวิเคราะห์เวกเตอร์และเมตริกซ์ ในหัวข้อนี้จะอธิบายคณิตศาสตร์และนิยามต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจในทฤษฎีสายอากาศปรับตัว

2.3.1 เวกเตอร์

เวกเตอร์ เป็นแถวลำดับของจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อนหรือฟังก์ชัน จะใช้ตัวอักษรตัวเล็ก หนา ในการแทนสัญลักษณ์ของเวกเตอร์ เช่น \mathbf{x} , \mathbf{a} และ \mathbf{v} การสมมติเวกเตอร์เหล่านี้จะสมมติด้วยเวกเตอร์คอลัมน์ (column vector) เช่น

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}$$

\mathbf{x} เป็นเวกเตอร์คอลัมน์ ประกอบด้วยสเกลาร์ N ตัว ถ้าองค์ประกอบของ \mathbf{x} เป็นจำนวนจริง จะเรียก \mathbf{x} ว่าเป็น เวกเตอร์จำนวนจริง (real vector) ถ้าองค์ประกอบของ \mathbf{x} เป็นจำนวนเชิงซ้อนจะเรียก \mathbf{x} ว่าเป็นเวกเตอร์จำนวนเชิงซ้อน (complex vector) เวกเตอร์ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ N องค์ประกอบ จะเรียกเวกเตอร์นี้เป็น เวกเตอร์ N มิติ (N -dimensional vectors) ทรานโพส (transpose) ของเวกเตอร์ \mathbf{x}^T คือ เวกเตอร์แถว (row vector)

$$\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_N]$$

และHermitian transpose \mathbf{x}^H คือ $\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ คอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนของทรานโพสของ \mathbf{x}

$$\mathbf{x}^H = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้เวกเตอร์แทนค่าของสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete-time signal) เพื่อความง่ายและกะทัดรัด ลำดับของสัญญาณที่มีความยาวจำกัด ซึ่งค่าไม่อยู่ในช่วง $[0, N-1]$ เป็นศูนย์ อาจแทนเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix}$$

เพื่อให้ง่ายขึ้น ในบางครั้งจะพิจารณากลุ่มของเวกเตอร์ $x(n)$ ซึ่งประกอบด้วยค่าของสัญญาณ $x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)$

$$x(n) = \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ \vdots \\ x(n-N+1) \end{bmatrix}$$

$x(n)$ เป็นเวกเตอร์ N องค์ประกอบ ซึ่งขึ้นกับค่าดัชนีเวลา n (time index n)

2.3.2 เมตริกซ์

เมตริกซ์ $m \times n$ มิติ เป็นแถวลำดับของจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อนหรือฟังก์ชัน ซึ่งประกอบด้วย แถว n แถว คอลัมน์ m คอลัมน์ เช่น

$$\mathbf{A} = \{a_{ij}\} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

2.3.3 รูปแบบควอดเรติกและเฮอร์มิเชียน (Quadratic and Hermitian form)

รูปแบบควอดเรติก (Quadratic form) ของเมตริกซ์จำนวนจริงสมมาตร $n \times n$ มิติ \mathbf{A} เป็นสเกลาร์ อธิบายได้ด้วย

$$Q_A(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i a_{ij} x_j$$

โดยที่ $\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรจำนวนจริง n สังเกตว่ารูปแบบควอดเรติกเป็นฟังก์ชันควอดเรติกในตัวแปร n x_1, x_2, \dots, x_n เช่นรูปแบบควอดเรติก

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

โดย

$$Q_A(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} = 3x_1^2 + 2x_1x_2 + 2x_2^2$$

รูปแบบเฮอร์มิเซียน (Hermitian form) มีลักษณะที่คล้ายกัน อธิบายรูปแบบเฮอร์มิเซียนได้ด้วยสมการ

$$Q_A(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^H \mathbf{A} \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i^* a_{ij} x_j$$

ถ้ารูปแบบควอดเรติกของเมทริกซ์ \mathbf{A} เป็นบวก ทุกค่าของเวกเตอร์ \mathbf{x} จะไม่เป็นศูนย์

$$Q_A(\mathbf{x}) > 0$$

แล้วจะเรียก \mathbf{A} ว่าเป็น positive definite และเขียนได้ว่า $\mathbf{A} > 0$ เช่น

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$$

มีรูปแบบควอดเรติกเป็น

$$Q_A(\mathbf{x}) = [x_1 \quad x_2] \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 2x_1^2 + 3x_2^2$$

ซึ่งเป็น positive definite $Q_A(\mathbf{x}) > 0$ โดย $\mathbf{x} \neq 0$ ทุกๆตัว

รูปแบบควอดเรติกจะเป็น nonnegative สำหรับทุกเวกเตอร์ \mathbf{x} ไม่เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_1(\mathbf{x}) \geq 0$$

และจะเรียก A ว่าเป็น positive semidefinite เช่น

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ซึ่งเป็น positive semidefinite $Q_1(\mathbf{x}) = 2x_1^2 \geq 0$ แต่จะไม่ใช่ positive definite

ในทำนองเดียวกันเมทริกซ์จะเป็น negative definite ถ้า $Q_1(\mathbf{x}) < 0$ สำหรับ x ทุกตัวไม่เป็นศูนย์ และจะเป็น negative semidefinite ถ้า $Q_1(\mathbf{x}) \leq 0$ สำหรับ x ทุกตัวไม่เป็นศูนย์ เมทริกซ์ที่ไม่เป็นดังนิยามข้างต้น ซึ่งไม่สามารถนิยามเมทริกซ์ได้ (indefinite)

2.4 การประมวลผลสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Time Signal Processing)

2.4.1 สัญญาณ

ได้มีการอธิบายสัญญาณ (Signal) ว่าเป็นฟังก์ชันของตัวแปรตั้งแต่หนึ่งตัวแปร ซึ่งแสดงข้อมูลของปรากฏการณ์ธรรมชาติทางฟิสิกส์ โดยที่ตัวแปรอิสระสามารถเป็นได้ทั้งเวลาหรือตัวแปรอวกาศ (Spatial variable) แต่ในที่นี้จะหมายความถึงตัวแปรที่เป็นเวลา สามารถแบ่งสัญญาณได้เป็นกลุ่มๆ ดังนี้

- สัญญาณต่อเนื่อง (Continuous-time signal) / หรือสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time signal)
- สัญญาณคู่ (Even signal) / สัญญาณคี่ (Odd signal)
- สัญญาณคาบ (Periodic signal) / สัญญาณไม่คาบ (Nonperiodic signal)
- สัญญาณแอนะล็อก (Analog signal) / สัญญาณดิจิทัล (Digital signal)
- สัญญาณดีเทอร์มินิสติก (Deterministic) / สัญญาณสุ่ม (Random signal)

ในที่นี้การแบ่งสัญญาณตามเวลาจะกล่าวถึงเฉพาะสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องหรือสัญญาณดิจิทัลเท่านั้น

2.4.2 ระบบ

ระบบ (system) เป็นสิ่งที่สามารถเปลี่ยนจากสัญญาณใดๆ ไปเป็นสัญญาณใหม่ได้ ส่วนระบบไม่ต่อเนื่อง (discrete-time system) นั้น เป็นการแปลงหรือดำเนินการที่เชื่อมโยงลำดับ

อินพุต $x(k)$ ไปเป็นลำดับเอาต์พุต $y(k)$ อธิบายได้ดังสมการ
 เอกสารวิชาการฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นให้ท่านนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(k) = T\{x(k)\} \quad (2.1)$$

ข้อจำกัดของคุณสมบัติของระบบ ทำให้สามารถแยกและแทนระบบด้วยคณิตศาสตร์ดังนี้

2.4.2.1 Memoryless System

จะเรียกระบบว่าเป็น memoryless ถ้าเอาต์พุตที่ทุกค่าของ k ขึ้นอยู่กับเพียงแค่อินพุตที่ค่า k เดียวกัน

2.4.2.2 Linear System

ทฤษฎีการซ้อนทับ (Superposition) ใช้อธิบายระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear System) ได้ ถ้า $y_1(k)$ และ $y_2(k)$ เป็นผลตอบสนองของระบบ โดยที่ $x_1(k)$ และ $x_2(k)$ เป็นอินพุต ตามลำดับ ระบบจะเป็นเชิงเส้นถ้า

$$T\{ax_1(k) + bx_2(k)\} = aT\{x_1(k)\} + bT\{x_2(k)\} = y_1(k) + y_2(k) \quad (2.2)$$

โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ใดๆ

2.4.2.3 Time-Invariant System

ระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-Invariant System) เป็นระบบที่ลำดับอินพุตถูกหมุนหรือเลื่อนเวลาแล้วลำดับเอาต์พุตจะถูกเลื่อนเช่นเดียวกัน

2.4.2.4 Causality

ระบบจะเป็น Causality ถ้าสำหรับทุกช่วงเวลา k_0 ลำดับเอาต์พุตที่เวลา $k = k_0$ จะขึ้นกับลำดับอินพุตที่เวลา $k \leq k_0$ เพียงอย่างเดียว

2.4.2.5 Stability

ระบบจะเสถียร (Stable) ในกรณีที่อินพุตมีขอบเขต (Bounded-input) และเอาต์พุตมีขอบเขต (Bounded-output) (BIBO) ถ้าลำดับอินพุตมีขอบเขตทุกค่าทำให้ลำดับเอาต์พุตมีขอบเขต อินพุต $x(k)$ จะมีขอบเขตถ้า

$$|x(k)| \leq B_x < \infty \quad (2.3)$$

สำหรับทุกค่า k โดยที่ B_x เป็นจำนวนบวกที่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบจะเสถียร สำหรับอินพุตมีขอบเขตทุกค่า แล้วทำให้

$$|y(k)| \leq B_y < \infty \tag{2.4}$$

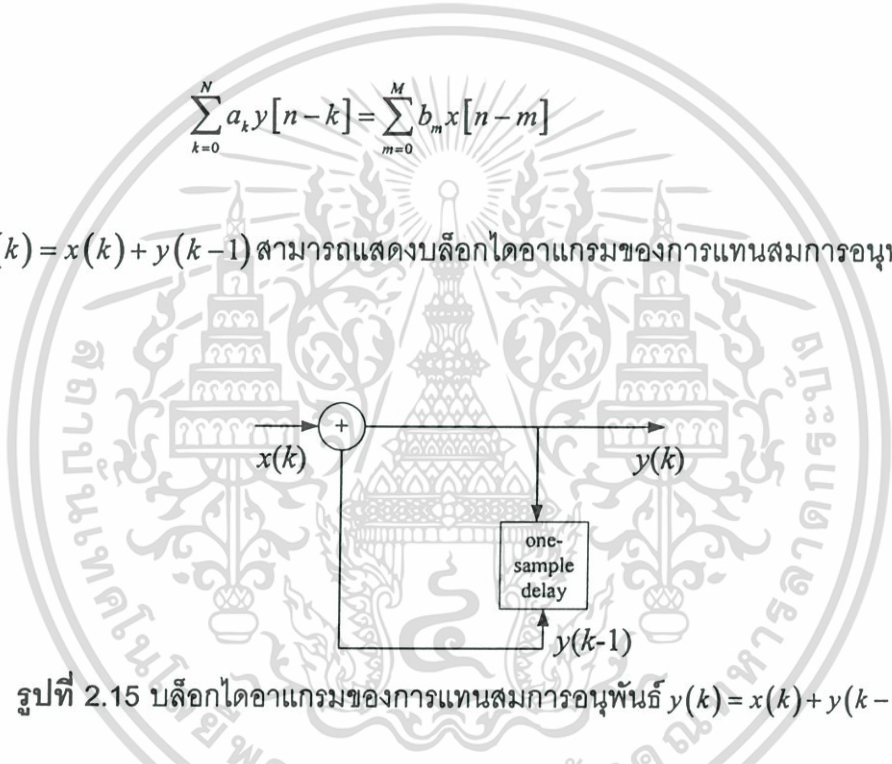
โดย B_y เป็นจำนวนบวกที่จำกัด

2.4.3 A Digital Differentiator

กลุ่มย่อยที่สำคัญของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเป็นเชิงเส้น ประกอบด้วยระบบที่มีอินพุต $x(k)$ และเอาต์พุต $y(k)$ ที่เป็นไปตามเงื่อนไขสมการอนุพันธ์สัมประสิทธิ์คงที่เชิงเส้นอันดับ N ดังนี้

$$\sum_{k=0}^N a_k y[n-k] = \sum_{m=0}^M b_m x[n-m] \tag{2.5}$$

เช่น $y(k) = x(k) + y(k-1)$ สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของการแทนสมการอนุพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมของการแทนสมการอนุพันธ์ $y(k) = x(k) + y(k-1)$

2.4.4 การประมวลผลสัญญาณสุ่ม (Random Signal Processing)

2.4.4.1 ค่าเฉลี่ยทั้งชุดเชิงสถิติ (Ensemble Averages)

ถ้ามีการทดลองสุ่มสัญญาณหลายๆ การทดลองแล้ว ค่าเฉลี่ยทั้งชุดเชิงสถิติ (Ensemble Averages) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น $f(x(k_0))$ (probability density Function; p.d.f.) โดยที่ $x_1(k_0), x_2(k_0), x_i(k_0)$ หรือ

$$\text{Ensemble Averages} = x_1(k_0) \text{Prob}(x_1(k)) + x_2(k_0) \text{Prob}(x_2(k)) + \dots + x_i(k_0) \text{Prob}(x_i(k)) \tag{2.6}$$

2.4.4.2 ค่าเฉลี่ย (Mean Value)

การหาค่าเฉลี่ย (Mean Value) ของสัญญาณสุ่มสามารถหาได้ดังสมการ

$$m_x(k) = E\{x(k)\} \quad (2.7)$$

โดย $E\{x(k)\}$ เป็น Ensemble average หรือ Expected value สามารถหาได้จาก

$$E\{x(k)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(k) f(x(k)) dx(k) \quad (2.8)$$

$f(x(k))$ เป็น p.d.f. ของ $x(k)$ สามารถหาค่าเฉลี่ยที่อยู่ในรูปของความถี่สัมพัทธ์ (Relative frequency) ได้ดังนี้

$$m_x(k) = \lim_{K \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K x(k) \right\} \quad (2.9)$$

คุณสมบัติของการดำเนินการ $E\{y\}$ ที่สำคัญมีดังนี้

- ความเป็นเชิงเส้น โดย $E\{ax(k) + by(k)\} = aE\{x(k)\} + bE\{y(k)\}$
- $E\{x(j)y(k)\} \neq E\{x(j)\}E\{y(k)\}$ ยกเว้นในกรณีที่ $x(j)$ เป็นอิสระจาก $y(k)$

2.4.4.3 Correlation and Covariance

สหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นตัวบอกระดับความเหมือนของตัวแปรสุ่มสองตัว เช่น ถ้ามีตัวแปรสุ่ม $x(j)$ และ $x(k)$ แล้ว ความเกี่ยวเนื่องของ $x(j)$ กับ $x(k)$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$r(j, k) = E\{x(j) \cdot x(k)\} \quad (2.10)$$

Covariance เป็นข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างตัวแปรสุ่มสองตัว ซึ่งอยู่ในกระบวนการสุ่มที่แตกต่างกัน สามารถหาได้จากสมการ

$$C(j, k) = E\{(x(j) - m_x(j))(x(k) - m_x(k))\} \quad (2.11)$$

ในกรณีที่ค่าเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยทั้งหมดเชิงสถิติมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียก Covariance กรณีนี้ว่าเป็น อัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างตัวแปรสุ่มสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัว ซึ่งอยู่ในกระบวนการสุ่มเดียวกัน และสัญญาณที่ไม่มีสหสัมพันธ์ (Uncorelation) จะมีคุณสมบัติดังนี้

$$E\{x(j) \cdot x(k)\} = E\{x(j)\} E\{x(k)\} \quad (2.12)$$

2.4.4.4 Independence

จะกล่าวว่า $x_1(k)$ และ $x_2(k)$ เป็นอิสระกัน (Independence) ก็ต่อเมื่อ

$$f(x_1(k)x_2(k)) = f(x_1(k))f(x_2(k)) \quad (2.13)$$

และ

$$E\{x_1(k), x_2(k)\} = E\{x_1(k)\} E\{x_2(k)\} \quad (2.14)$$

$x_1(k)$ และ $x_2(k)$ อาจจะเป็นสัญญาณเดียวกันได้ โดยที่ $x_1(k) = x(j)$ และ $x_2(k) = x(j+k)$ สังเกตว่าถ้า $x(k)$ และ $x(j)$ เป็นอิสระต่อกันแล้ว Covariance จะเป็นศูนย์ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ สัญญาณจะไม่มีสหสัมพันธ์ ซึ่งก็หมายความว่า ถ้าสัญญาณเป็นอิสระกันแล้วสัญญาณจะไม่มีสหสัมพันธ์กันด้วย แต่ถ้าสัญญาณไม่มีสหสัมพันธ์ กัน แล้วสัญญาณอาจจะไม่เป็นอิสระกัน

2.4.4.5 Orthogonality

ถ้า $x(k)$ และ $x(j)$ ไม่มีสหสัมพันธ์ กัน และค่าเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียกสัญญาณว่า สัญญาณนั้น Orthogonal กัน สัญลักษณ์ที่ใช้คือ \perp หรือสามารถเขียนในรูปของการดำเนินการของ $E\{x\}$ ได้ว่า

$$E\{x(k)x(j)\} = 0 \quad (2.15)$$

2.4.4.6 Stationarity

โดยปรกติแล้วสถิติ และค่าเฉลี่ยทั้งชุดเชิงสถิติ ของกระบวนการสุ่มจะไม่ขึ้นกับเวลา ของระบบ ตามเงื่อนไขนี้ เรียกว่า Statistical time-invariant หรือ Stationarity ซึ่งหมายความว่า "ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น $f(x(k))$ มีค่าเท่ากันสำหรับทุกๆ ช่วงเวลา k " หรือจะเรียกว่าเป็น Strictly Stationary แต่โดยทั่วไปแล้ว ในทางปฏิบัติสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ซึ่งจะไม่เป็น Strictly Stationary ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดให้เป็น wide-sense-stationary (WSS) โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- ค่าเฉลี่ยมีค่าคงที่ $E\{x(j)\} = E\{x(k)\} = m$
- อัตราสหสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับช่วงความแตกต่างของเวลาเพียงอย่างเดียว นั่นคือ $r(j) = E\{x(j) \cdot x(j+k)\}$
- ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean square value) มีค่าจำกัด $E|x_k|^2 < \infty$

2.4.4.7 Cross-correlation

สหสัมพันธ์ข้าม (Cross-correlation) นิยามด้วยสมการ

$$r_{xy}(j) = E\{x(j)y(j+k)\} = r_{yx}(-j) \quad (2.16)$$

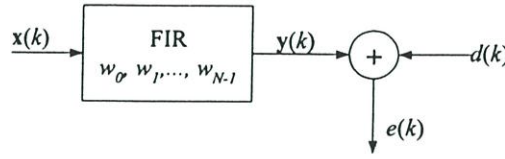
2.5 คำตอบวินเนอร์ (Wiener solution)

ในหัวข้อนี้ทำการพิจารณาคำตอบที่เหมาะสม (optimum solution) ของอัลกอริทึมการปรับตัว นำมาซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังสองต่ำสุด (Minimum mean-square error; MMSE) อัลกอริทึมการปรับตัวจะลู่อู่เข้าหา Wiener solution โดยจะเป็นคำตอบที่เหมาะสม การพิจารณาหา Wiener solution โดยสมมติให้สัญญาณอินพุต $x(k)$ และสัญญาณอ้างอิง $d(k)$ เป็น WSS ร่วม และค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สัญญาณเอาต์พุต $y(k)$ เป็นดังสมการ

$$y(k) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n x_n(k) \quad (2.17)$$

การปรับตัวเพื่อให้ได้ Wiener solution จำเป็นต้องหาค่าถ่วงน้ำหนัก $w(k)$ เพื่อให้ Cost function ξ ของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean-Square Error; MSE) มีค่าต่ำสุด cost function นี้จะไม่ขึ้นอยู่กัเวลา k ตามสมการ

$$\xi = E\{|e(k)|^2\} = E\{e(k)e^*(k)\} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.16 โครงสร้างทั่วไปของปัญหาของ Wiener solution

จากรูปที่ 2.16 สัญญาณเฉลี่ย $e(k)$ เป็นตามสมการ

$$\begin{aligned} e(k) &= d(k) - y(k) = d(k) - \sum_{n=0}^{N-1} w_n x_n(k) \\ &= d(k) - \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (2.19)$$

โดย เวกเตอร์อินพุต และเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก เป็นดังสมการ (2.20) (2.21) ตามลำดับ

$$\mathbf{x}(k) = [x_0(k), x_1(k), \dots, x_{N-1}(k)]^T \quad (2.20)$$

$$\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_{N-1}]^T \quad (2.21)$$

จากสมการ 2.19 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} e(k)e^*(k) &= d(k)d^*(k) - \sum_{n=0}^{N-1} d(k)x_n^*(k)w_n \\ &\quad - \sum_{n=0}^{N-1} d^*(k)x_n(k)w_n^* + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x_n(k)x_m^*(k)w_n^*w_m \end{aligned} \quad (2.22)$$

จากสมการ 2.18 และ 2.22 จะได้สมการ 2.23

$$\begin{aligned} \xi(\mathbf{w}) &= E\{e(k)e^*(k)\} \\ &= \sigma_d^2 - \mathbf{p}^H \mathbf{w} - \mathbf{w}^H \mathbf{p} + \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (2.23)$$

สมการ 2.23 เป็นสมการควอดเรติกในตัวแปร \mathbf{w} โดย $\sigma_d^2 = E\{d(k)d^*(k)\}$ เป็นกำลังงานของสัญญาณอ้างอิง $d(k)$, $\mathbf{p} = E\{d^*(k)\mathbf{x}(k)\}$ เป็นเวกเตอร์สหสัมพันธ์ข้าม (Cross-correlation vector) และ $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)\}$ เป็นเมตริกซ์อัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation matrix) การปรับค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ Cost function ต่ำที่สุด ทำโดยการ เกรเดียนต์ Cost function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \nabla \xi(\mathbf{w}) &= \frac{\partial \xi(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} = 2E \left\{ e^*(k) \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{w}} \right\} \\
 &= -2E \{ e^*(k) x(k) \} \\
 &= -2\mathbf{p} + 2R\mathbf{w}
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

แล้วให้เวกเตอร์ของการเกรเดียนต์เท่ากับศูนย์ $\nabla \xi(\mathbf{w}) = 0$ จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด \mathbf{w}_{opt}

$$\mathbf{w}_{opt} = R^{-1}\mathbf{p} \tag{2.25}$$

สมการ 2.25 นี้เป็น Wiener solution ในกรณีนี้คำตอบที่เหมาะสมมีเพียงคำตอบเดียว ดังนั้นจุดที่ $\nabla \xi(\mathbf{w}) = 0$ จึงเป็นจุดต่ำสุด จากสมการ 2.24 จะเห็นว่า

$$E \{ e^*(k) x(k) \} = 0 \tag{2.26}$$

หรือ

$$E \{ e_{opt}^*(k) x_n(k) \} = 0, n = 0, 1, \dots, N-1 \tag{2.27}$$

หรือถ้าเป็นรูปแบบสเกลาร์ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อ ทฤษฎีออร์โทกอนอลิตี้ (Orthogonality principle) หรือทฤษฎีการฉาย (Projection theorem) จากทฤษฎีนี้จะได้ Corollary ของ Orthogonality principle ตามสมการ

$$E \{ e_{opt}^*(k) y_{opt}(k) \} = 0 \tag{2.28}$$

จาก $\xi(\mathbf{w}) = E \{ e(k)(d(k) - y(k))^* \}$ และที่ตำแหน่งจุดต่ำสุด

$$\xi_{min} = E \{ e_{opt}^*(k) d^*(k) \} - E \{ e_{opt}^*(k) y_{opt}^*(k) \} \tag{2.29}$$

จาก Corollary ของ Orthogonality principle เทอมที่สองของขวามือของสมการ 2.29 จะเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าต่ำสุดของ MSE จะเป็นดังสมการ

$$\begin{aligned}\xi_{\min} &= E \left\{ \left(d(k) - \sum_{n=0}^{N-1} w_{opt,n}^* x_n(k) \right) d^*(k) \right\} \\ &= \sigma_d^2 - \sum_{n=0}^{N-1} w_{opt,n}^* p_n\end{aligned}\quad (2.30)$$

สามารถแสดงสมการ 2.30 ในสัญลักษณ์ของเวกเตอร์ได้

$$\begin{aligned}\xi_{\min} &= \sigma_d^2 - \mathbf{w}_{opt}^H \mathbf{p} \\ &= \sigma_d^2 - (\mathbf{R}^{-1} \mathbf{p})^H \mathbf{p} \\ &= \sigma_d^2 - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}\end{aligned}\quad (2.31)$$

จะเห็นว่า Cost function $\xi(\mathbf{w})$ จะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก w_0, w_1, \dots, w_{N-1} คือ Error Performance Surface (EPS) หรือพื้นผิว Cost function ของ MSE ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นผิวรูปถ้วย $N+1$ มิติ และ EPS นี้สามารถแสดงให้เห็นได้แค่ 2 มิติเท่านั้น

พิจารณาสมการ 2.23 อีกครั้ง โดยใช้วิธี Completing the square

$$\xi(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} - \mathbf{p}^H \mathbf{w} - \mathbf{w}^H \mathbf{p} + \sigma_d^2$$

แทรก $\mathbf{R} \mathbf{R}^{-1}$ และ $\mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}$ โดยที่ \mathbf{R} เป็น Positive definite ซึ่งหาค่าอินเวอร์สได้

$$\xi(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{w} - \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} + \sigma_d^2 \quad (2.32)$$

แทรก $-\mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}$ และ $+\mathbf{p}^H \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}$

$$\begin{aligned}\xi(\mathbf{w}) &= (\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{w} - \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} + \mathbf{p}^H \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}) - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} + \sigma_d^2 \\ &= J(\mathbf{w}) = (\mathbf{w}^H - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1}) (\mathbf{R} \mathbf{w} - \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}) - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} + \sigma_d^2 \\ &= (\mathbf{w}^H - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1}) \mathbf{R} (\mathbf{w} - \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}) - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} + \sigma_d^2 \\ &= (\mathbf{w} - \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p})^H \mathbf{R} (\mathbf{w} - \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}) - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} + \sigma_d^2\end{aligned}\quad (2.33)$$

จุดที่ทำให้ Cost function มีค่าต่ำสุดคือ $\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}$ ดังนั้น $(\mathbf{w} - \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p})^H \mathbf{R} (\mathbf{w} - \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}) = 0$ และ

$$\xi_{\min} = \sigma_d^2 - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกับสมการ 2.31 จากสมการ 2.33 จะได้ว่า

$$\xi(\mathbf{w}) = \xi_{\min} + (\mathbf{w} - \mathbf{w}_{opt})^H \mathbf{R} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_{opt}) \quad (2.35)$$

หรือ

$$\begin{aligned} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_{opt})^H \mathbf{R} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_{opt}) &= \xi(\mathbf{w}) - \xi_{\min} \\ &= \xi_1(\mathbf{w}) \end{aligned} \quad (2.36)$$

พิจารณาเฉพาะค่า $\xi_1(\mathbf{w})$ สามารถอธิบายสมการ (2.36) ได้ว่า

“วงรี (ellipse) N มิติ มีจุดศูนย์กลางที่ \mathbf{w}_{opt} ปรกติแล้วจะมีแกนอยู่ในทิศทางของ eigenvector ของเมตริกซ์ \mathbf{R} ที่เป็น positive definite”

2.6 วิธีของการลดขั้นสูงสุด (Method of Steepest Descent)

การหา Wiener solution โดยตรง มีข้อเสียที่สรุปได้ดังนี้

1. การหา Wiener solution จำเป็นต้องมีข้อมูลและรายละเอียดทางสถิติของสัญญาณอินพุตและสัญญาณพึงประสงค์ที่ครบถ้วน เพื่อหาเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ และ เวกเตอร์สหสัมพันธ์ข้าม
2. ในการทำอินเวอร์สเมตริกซ์ \mathbf{R}^{-1} จำเป็นต้องมีการดำเนินการคูณ $O(N^3)$ ครั้ง ซึ่งถือว่ามีความซับซ้อนในการคำนวณสูง
3. การทำอินเวอร์สเมตริกซ์ \mathbf{R}^{-1} อาจจะไม่ถูกต้องหรือไม่เสถียรภาพได้ ถ้าเมตริกซ์ \mathbf{R} มีองค์ประกอบเมตริกซ์ ซึ่งก็คือ ค่า eigenvalue ต่างกันมากๆ λ_{\max} ? λ_{\min} เรียกเงื่อนไขนี้ว่า ill-condition
4. ต้องมีการสมมติ WSS นั่นคือ ต้องสมมติให้สัญญาณทั้งหมดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ในความเป็นจริง ข้อสมมติฐานนี้ไม่ถูกต้อง เนื่องจาก Wiener solution จะถูกสมมติในกรอบของเวลาที่จำกัดที่ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

เป้าหมายที่สำคัญในระบบสายอากาศปรับตัวคือ ต้องการหาเวกเตอร์ค่าต่อวงนำหนัก $\mathbf{w}(k)$ ที่เวลา k ซึ่งทำให้ค่าฟังก์ชันควอดเรติก (quadratic function) มีค่าต่ำสุด

$$\xi(k) = E \{ |e(k)|^2 \}$$

เนื่องจากการหา Wiener solution โดยตรงมีข้อเสียดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว จึงมีการนำ Method of Steepest Descent มาใช้หาคำตอบ ซึ่งเป็นกระบวนการทำซ้ำ สามารถใช้กับฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้ วิธีการนี้มีแนวคิดดังนี้คือ ถ้า $w(k)$ เป็นการประมาณของเวกเตอร์ซึ่งทำให้ความผิดพลาดกำลังสองมีค่าต่ำสุด ที่เวลา k แล้ว ที่เวลา $k+1$ การประมาณของเวกเตอร์ค่าใหม่จะได้อาจจากการรวมสหสัมพันธ์ กับ $w(k)$ เพื่อให้ได้ค่า $w(k+1)$ ที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ต้องการ การคิดสหสัมพันธ์นั้นจะรวมค่าคงที่ μ ในทิศทางที่ชี้ลงของพื้นผิวความผิดพลาดควอดเรติก (Quadratic error surface) ที่มีความชันมากที่สุด รูป 2.17 (ก) แสดงตัวอย่างของฟังก์ชันกำลังสอง 3 มิติ ของสัมประสิทธิ์จำนวนจริงสองจำนวน $w(0)$ และ $w(1)$ รูปที่ 2.17 (ข) แสดงเส้นรูปร่างของความผิดพลาดคงที่ ซึ่งได้จากการฉาย รูป 2.17 (ก) ในระนาบ $w(0)$ และ $w(1)$ เป็นรูปกลุ่มของวงรีที่ซ้อนกัน ทิศทางของ steepest descent ที่จุดต่างๆในระนาบเป็นทิศทางที่เหมือนกับกรรนำลูกแก้วมาปล่อยลงในฟังก์ชัน กำลังสอง ที่มีรูปร่างเป็นถ้วย ในวิธีทางคณิตศาสตร์ ทิศทางดังกล่าวสามารถหาได้จากการทำ เกรเดียนต์ ซึ่งก็คือเวกเตอร์ของการหาอนุพันธ์ย่อยของ $\xi(k)$ เทียบกับสัมประสิทธิ์ $w(k)$



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างฟังก์ชันควอดเรติกของค่าถ่วงน้ำหนัก (ก) 3มิติ (ข) ภาพฉาย

จากตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.17 (ข) สำหรับค่า w ใดๆ เกรเดียนต์จะต้องฉากกับเส้นวงรี นั่นคือ จะเป็นเส้นสัมผัสของคอนทัวร์ของความผิดพลาดที่คงที่ ณ w นั้นๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อเกรเดียนต์ชี้ในทิศทางของความชันที่ชันมากที่สุด (steepest ascent) แต่ทิศทางของ steepest descent จะชี้ไปในทิศทางตรงกันข้ามกับเกรเดียนต์ ดังนั้นสมการปรับตัวของ $w(k)$ คือ

$$w(k+1) = w(k) - \mu \nabla \xi(k) \quad (2.37)$$

ค่าคงที่ μ (step size) มีผลต่ออัตราการการเปลี่ยนของค่าถ่วงน้ำหนักบนพื้นผิวควอดเรติก เอกส (Quadratic surface) ถ้า μ จะมีค่าบวก (ถ้า μ เป็นลบ การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น) อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก จะมีทิศทางที่ชี้ขึ้นในพื้นที่ผิวดอเดเรติก ซึ่งจะทำให้ความผิดพลาดมากขึ้น) ถ้า μ มีค่าน้อยๆ และมีสหสัมพันธ์กับ $w(k)$ ต่ำ การลู่เข้าหาคำตอบจะช้า ในทางกลับกันถ้า μ มีค่ามากๆ อัตราการลู่เข้าจะเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม μ มีข้อจำกัดเช่นกัน ถ้าค่า μ มีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนด จะทำให้เส้นทางการเปลี่ยนแปลงของ $w(k)$ ไม่เสถียร จึงสรุป Method of Steepest Descent ได้ดังนี้

1. Steepest Descent Algorithm เริ่มต้นด้วยการประมาณการเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม

2. หาค่าเกรเดียนต์ของ $\xi(k)$ ที่การประมาณค่าถ่วงน้ำหนักขณะนั้น

3. ปรับการประมาณที่เวลา k โดยการรวมสหสัมพันธ์และกับ μ ในทิศทางตรงกันข้ามกับเกรเดียนต์ $w(k+1) = w(k) - \mu \nabla \xi(k)$

4. กลับไปทำซ้ำข้อ 2

ในการหาค่าเกรเดียนต์ $\nabla \xi(k)$ จะสมมติให้ w เป็นจำนวนเชิงซ้อน เกรเดียนต์คือการหาอนุพันธ์ของ $E\{|e(k)|^2\}$ เทียบกับ w^*

$$\nabla \xi(k) = \nabla E\{|e(k)|^2\} = E\{\nabla |e(k)|^2\} = E\{e(k) \nabla e^*(k)\} \quad (2.38)$$

จาก

$$\nabla e^*(k) = -x^*(k) \quad (2.39)$$

ดังนั้น

$$\nabla \xi(k) = -E\{e(k) x^*(k)\} \quad (2.40)$$

เมื่อรวมค่าคงที่ μ แล้ว จะทำให้ได้ steepest descent algorithm

$$w(k+1) = w(k) + \mu E\{e(k) x^*(k)\} \quad (2.41)$$

สมการนี้จะแสดงให้เห็นกระบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก $w(k)$ ของอัลกอริทึม

2.7 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายข้อดีของ FPGA ซึ่งเป็นเหตุผลที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำ FPGA มาใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศปรับตัว ตลอดจนได้อธิบายการออกแบบ FPGA ด้วยวิธีต่างๆ ภาษา VHDL ที่ใช้ในการออกแบบ และทฤษฎีพื้นฐานของการประมวลผลสัญญาณไม่ต่อเนื่อง เพื่อเป็นพื้นฐานของความเข้าใจในอัลกอริทึมของสายอากาศปรับตัว Wiener Solution ซึ่งเป็นคำตอบที่เหมาะสม และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วย Method of Steepest Descent



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สายอากาศปรับตัว

3.1 บทนำ

โดยทั่วไป สายอากาศแถวลำดับปรับตัว (Adaptive array antenna) สามารถแยกสัญญาณที่ต้องการได้ในเชิงอวกาศ (spatial domain) แต่ไม่สามารถแยกสัญญาณได้ในเชิงความถี่ (frequency domain) กระบวนการปรับตัวทำงานด้วยพื้นฐานของอัลกอริทึมความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองต่ำสุด (LMS) สายอากาศแถวลำดับปรับตัวเป็นการรวมกันระหว่างแถวลำดับของสายอากาศและอัลกอริทึมการปรับตัว เพื่อความสามารถในการแยกสัญญาณที่ต้องการได้ในเชิงอวกาศ ซึ่งหมายความว่าสามารถแยกสัญญาณที่ประสงค์ (desired signal) จากสัญญาณแทรกสอด (interference signal) สายอากาศแถวลำดับปรับตัวสามารถปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (pattern) ให้เหมาะสมได้โดยอัตโนมัติและมีความยืดหยุ่น โดยควบคุมการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ในแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณ โดยการใช้ฟังก์ชันที่กำหนดไว้ ฟังก์ชันที่เหมาะสมนี้ถูกกำหนดด้วยอัลกอริทึมที่ออกแบบสำหรับวัตถุประสงค์นั้นๆ โดยเฉพาะ

การจัดลำดับปรับตัวเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจมากกว่า 30 ปีแล้ว และได้พัฒนาไปสู่เทคโนโลยีที่สามารถทำงานได้จริง มีหนังสือและบทความมากมายที่สนใจทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ของการปรับลำดับปรับตัว วิทยานิพนธ์ที่นี้จะอธิบายระบบสายอากาศปรับตัว ทฤษฎีพื้นฐานสายอากาศปรับตัว สายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้ ซึ่งเป็นสายอากาศเป้าหมายที่จะนำไปใช้ร่วมกับส่วนประมวลผลปรับตัว รวมทั้งได้อธิบายอัลกอริทึมการปรับตัวที่ทำให้สายอากาศสามารถปรับสัญญาณที่รับให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น

3.2 ความเป็นมาของสายอากาศปรับตัว

ในอดีต ได้มีการออกแบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวเพื่อใช้ในระบบโซนาร์ (sonar) และเรดาร์ (radar) ของทหาร ในปี ค.ศ. 1959 Howells [17] ได้ริเริ่มการกำจัดพูข้าง (side lobe) ของความถี่กลาง (intermediate frequency) ต่อมาในปี ค.ศ. 1965 Applebeam [18] ได้ทำการพัฒนาทฤษฎีแถวลำดับปรับตัวให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยหาที่มาของการควบคุมการทำงานหรือกฎการบังคับ (governing) ของกระบวนการที่ได้คิดค้นบนพื้นฐานของปัญหาต่างๆไป เพื่อให้ค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (SIR) ที่เอาต์พุตของแถวลำดับมีค่ามากที่สุด Widrow และ Hoff [19] ทำการปรับปรุงอัลกอริทึมอื่นๆที่แตกต่างจากที่กล่าวมา โดยใช้

อัลกอริทึม LMS ถึงแม้ว่าอัลกอริทึม LMS จะเป็นอัลกอริทึมที่ง่ายและสามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามถ้าไม่ระวังใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ก็ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ถูกระบุไว้ จึงได้มีการพัฒนาข้อจำกัดของอัลกอริทึม LMS โดย [20]-[21] ได้นำข้อจำกัดนี้ไปใช้เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณที่ประสงค์จะไม่ถูกรบกวนพร้อมกับสัญญาณที่ไม่ต้องการ ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว กระบวนการที่เหมาะสม (optimization process) จะได้รับการดำเนินการก่อน เช่น การรักษาอัตราขยายของสายอากาศให้มีค่าคงที่ในทิศทางของสัญญาณที่ประสงค์ ถึงแม้ Applebaum จะคิดอัลกอริทึมที่ทำให้ค่า SIR มีค่ามากที่สุด แต่อัลกอริทึม LMS ของ Widrow ก็ไม่มีความเกี่ยวข้องและมีลักษณะที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมทั้งสองก็ใช้พื้นฐานที่คล้ายกัน สำหรับสัญญาณนิ่ง (stationary signal) อัลกอริทึมทั้งสองนี้จะลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ Wiener solution [22]

ในปี ค.ศ. 1969 Capon [23] นำเสนอวิธีที่แตกต่างออกไป เพื่อแก้ปัญหาการจัดลำคลื่นปรับตัว วิธีนี้ทำให้ได้การจัดลำคลื่นปรับตัวด้วยผลตอบสนองที่ไม่มีการบิดเบือนค่าการเบี่ยงเบนต่ำที่สุด (minimum-variance distortionless response; MVDR) ได้มีการกล่าวถึงอัลกอริทึมนี้ โดยนักเขียนบางท่านว่าเป็น maximum likelihood เนื่องจากอัลกอริทึมนี้ให้ค่าฟังก์ชันของเวกเตอร์สัญญาณอินพุตมากที่สุด และยังเป็นหนึ่งในวิธีการจัดลำคลื่นปรับตัวที่ถือกำเนิดก่อน โดยใช้การกระจายสัญญาณ สัญญาณจะถูกแยกโดยส่วนหนึ่งของความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ (antenna beamwidth) ในปี ค.ศ. 1974 Reed และคณะผู้ร่วมงานนำเสนอวิธีการปรับตัวที่เร็วขึ้น โดยการใช้ sample-matrix inversion (SMI) [24] วิธีนี้ค่าถ่วงน้ำหนักปรับตัวสามารถคำนวณได้โดยตรง ซึ่งแตกต่างจากอัลกอริทึม LMS ซึ่งการลู่เข้าหาคำตอบอาจจะช้า แต่ถ้า eigenvalue ของ sample covariance matrix (SCM) มีความแตกต่างกันมากๆ SMI จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง เนื่องจากอาจเกิดการผิดพลาดจากการทำการอินเวอร์สเมตริกซ์ ได้

ในปี ค.ศ. 1980 อัลกอริทึมปรับตัวที่ได้รับความสนใจมากคือ อัลกอริทึมการปรับตัวโดยไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงเพื่อช่วยในการปรับตัว หนึ่งในอัลกอริทึมดังกล่าวก็คือ Constant Modulus Algorithm (CMA) คิดค้นครั้งแรกโดย Godard ในปี ค.ศ. 1980 [4] เป็นอัลกอริทึมที่ใช้คุณสมบัติบางอย่างของสัญญาณส่งเพื่อช่วยในการปรับตัว

3.3 ระบบสายอากาศปรับตัว

ในระบบสายอากาศปรับตัว สิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในระบบนี้ก็คือ ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล มีหน้าที่ปรับสัญญาณให้เหมาะสม การปรับสัญญาณนี้จะเป็นไปตามอัลกอริทึมที่ใช้ อัลกอริทึมปรับตัวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. Nonblind algorithm เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ปรับสัญญาณโดยการใช้สัญญาณอ้างอิง (reference signal) เพื่อช่วยให้อัลกอริทึมลู่เข้า เช่น Least Mean Square algorithm (LMS), Recursive Least Square algorithm (RLS) เป็นต้น

2. blind algorithm เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ปรับสัญญาณโดยไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิง แต่จะอาศัยคุณสมบัติบางอย่างของสัญญาณที่ส่ง เช่น Busnag algorithm, Sato algorithm, Constant Modulus Algorithm (CMA)

สายอากาศแถวลำดับปรับตัวเป็นเทคนิคชนิดหนึ่งของสายอากาศฉลาด โดยสายอากาศฉลาดเป็นการรวมกันระหว่างสายอากาศแถวลำดับกับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งสามารถปรับการรับส่งสัญญาณได้อย่างอัตโนมัติ สายอากาศฉลาดแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

1. การสวิตช์ลำคลื่น (switched beam) เป็นการกำหนดจำนวนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ตายตัวและมีการคาดเดาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แน่นอน

2. แถวลำดับปรับตัว (adaptive array) จำนวนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีไม่จำกัดซึ่งสามารถปรับและทำงานได้ในเวลาจริง (real-time)

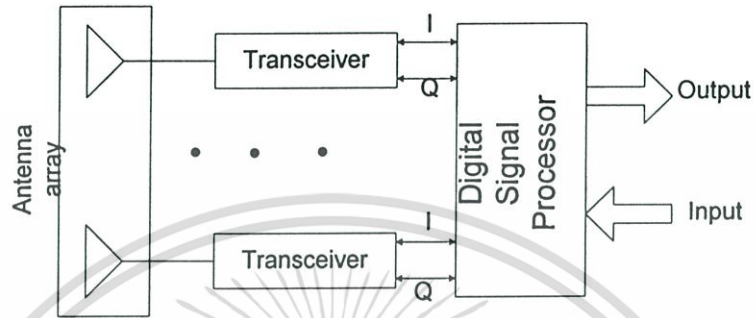
3. สายอากาศไดเวอร์ซิตี (diversity antenna) เป็นการใช้ธรรมชาติของการแพร่กระจายคลื่นในการหาวิถีของคลื่นที่เป็นอิสระ เพื่อเลือกสัญญาณที่ดีที่สุด

ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวเป็นการรวมกันระหว่างเทคโนโลยีของสายอากาศกับเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล รูปที่ 3.1 แสดงระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัล (digital transceivers) และส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processor)

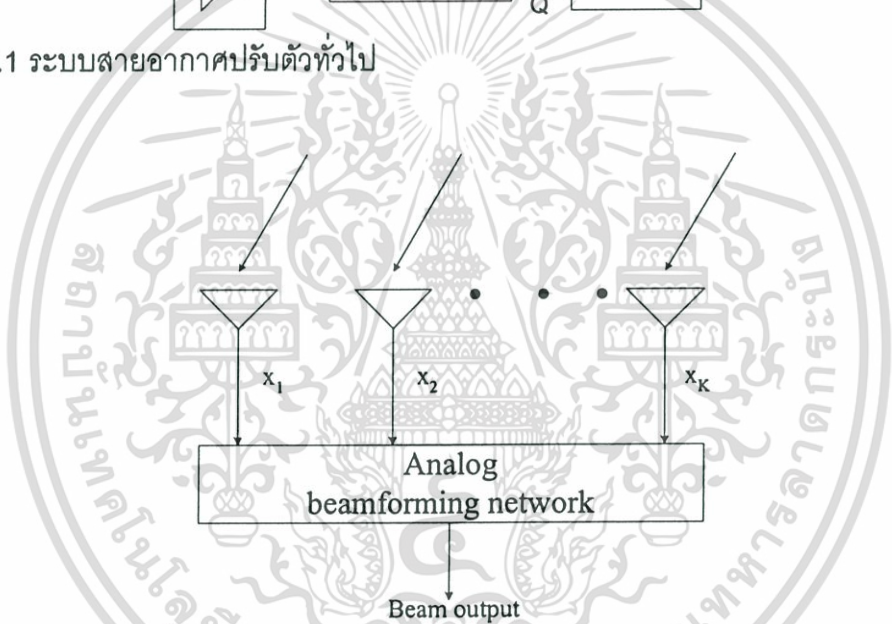
ในระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัว สัญญาณที่รับได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลในแต่ละองค์ประกอบ การนำสัญญาณดิจิทัลที่เกิดจากการแปลงสัญญาณความถี่สูงมาทำการประมวลผลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณและอัลกอริทึมที่สามารถหาข้อมูลที่ต้องการได้ โดยใช้ข้อมูลในย่านอวกาศ (spatial domain data) สัญญาณดิจิทัลจะถูกประมวลผลโดยสัญญาณความถี่วิทยุแต่ละองค์ประกอบจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลเบสแบนด์ 2 ช่อง คือ สัญญาณ I (in-phase) และสัญญาณ Q (quadrature-phase) สัญญาณดิจิทัลเบสแบนด์ในแต่ละองค์ประกอบจะประกอบด้วยขนาดและเฟสของสัญญาณ สัญญาณจะถูกปรับโดยการถ่วงน้ำหนักซึ่งสามารถปรับได้ทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณ สัญญาณที่ต้องการได้จากรวมกันของสัญญาณแต่ละองค์ประกอบ ปกติกระบวนการเหล่านี้จะสำเร็จได้ ต้องใช้โครงข่ายการจัดลำคลื่นแอนะล็อก (analog beamforming network) แต่ปัจจุบันได้มีการนำส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่สร้าง

โดยเฉพาะมาใช้แทน วิธีนี้จะรักษาข้อมูลแต่ละองค์ประกอบให้เหมือนเดิม โดยแตกต่างจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

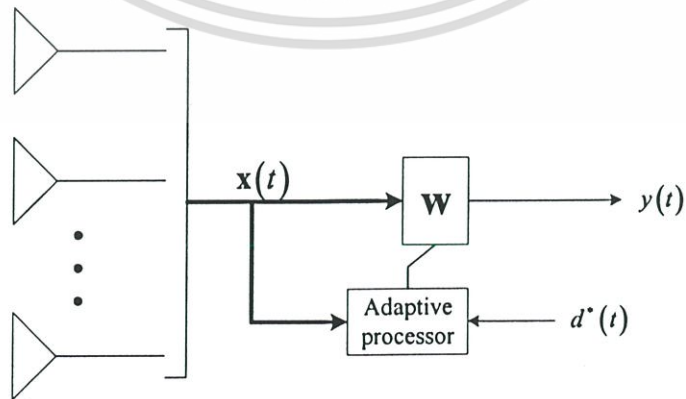
analog beamformer ซึ่งเป็นการรวมการดัดแปลงน้ำหนักของสัญญาณและลดองค์ประกอบของสัญญาณจาก K เป็น 1 องค์ประกอบซึ่งแสดงได้ในรูป 3.2 เงื่อนไขที่สำคัญของเทคโนโลยีนี้คือความแม่นยำของการเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อความถูกต้องของการประมวลผลสัญญาณ



รูปที่ 3.1 ระบบสายอากาศปรับตัวทั่วไป



รูปที่ 3.2 การจัดลำดับคลื่นแอนะล็อก ลดแวลวลำดับของสายอากาศจาก K เป็น 1

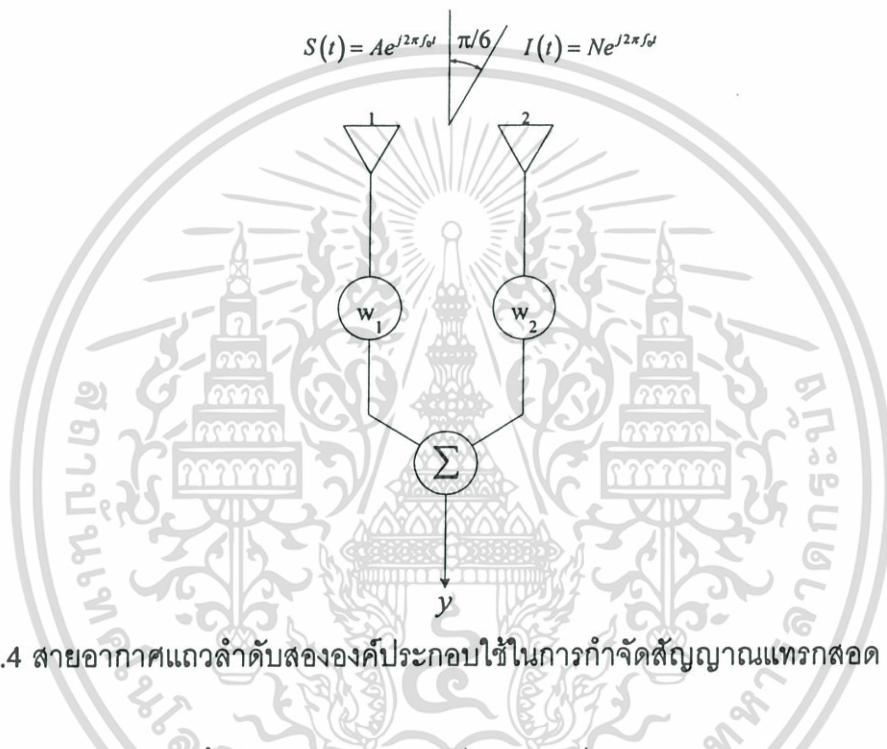


รูปที่ 3.3 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศปรับตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศปรับตัว

รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศปรับตัว สัญญาณที่รับจากสายอากาศแถวลำดับแต่ละองค์ประกอบจะถูกปรับโดยการคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสม สามารถหาและปรับค่าถ่วงน้ำหนักได้ด้วยอัลกอริทึมการปรับตัว เอาต์พุตของสายอากาศปรับตัวได้จากการรวมกันของสัญญาณแต่ละองค์ประกอบที่ถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อนแล้ว



รูปที่ 3.4 สายอากาศแถวลำดับสององค์ประกอบใช้ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด

การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อนเป็นวิธีที่ใช้ในการสั่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีการชี้ทิศและการเปลี่ยนแปลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสัญญาณพึงประสงค์ และลดสัญญาณแทรกสอด รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างการพิจารณาสายอากาศปรับตัว ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับสององค์ประกอบ โดยแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (omnidirectional antenna) ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็น $\frac{\lambda}{2}$ สัญญาณพึงประสงค์ตกกระทบบำมุม $\theta_s = 0$ กับระนาบของสายอากาศ และสัญญาณแทรกสอดตกกระทบบำมุม $\theta_I = \frac{\lambda}{6}$ กับระนาบของสายอากาศ สัญญาณทั้งคู่มีความถี่ที่เท่ากัน สัญญาณที่รับได้แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อน และสัญญาณเอาต์พุตได้จากการรวมกันของสัญญาณแต่ละองค์ประกอบที่ถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อนแล้ว เอาต์พุตที่เกิดจากสัญญาณพึงประสงค์แสดงในสมการ (3.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_d(t) = Ae^{j2\pi f_0 t} (w_1 + w_2) \quad (3.1)$$

เมื่อเอาต์พุตของแวลำดับเป็นสัญญาณพียงประสงค์ ($y_d = S(t)$) จะได้

$$\left. \begin{aligned} \Re[w_1] + \Re[w_2] &= 1 \\ \Im[w_1] + \Im[w_2] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

เมื่อ $\Re[\]$ และ $\Im[\]$ เป็นการดำเนินการของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพตามลำดับ สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบที่สายอากาศองค์ประกอบที่ 2 จะมีเฟสที่นำหน้าสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบที่สายอากาศองค์ประกอบที่ 1 ด้วยค่า $2\pi \frac{1}{\lambda_0} d \sin(\pi/6) = \pi/2$ เอาต์พุตของแวลำดับที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดเป็นดังสมการ (3.3)

$$y_I(t) = Ne^{j2\pi f_0 t} w_1 + Ne^{j(2\pi f_0 t + \pi/2)} w_2 \quad (3.3)$$

ผลตอบสนองที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดต้องเป็นศูนย์ ($y_I(t) = 0$) ดังนั้น

$$\left. \begin{aligned} \Re[w_1] + \Re[jw_2] &= 0 \\ \Im[w_1] + \Im[jw_2] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.2) และ (3.4) จะได้

$$w_1 = \frac{1}{2} - j\frac{1}{2}, w_2 = \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}$$

การคูณสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเหล่านี้ ทำให้สายอากาศแวลำดับสามารถรับสัญญาณพียงประสงค์และกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้

จากตัวอย่างข้างต้นเป็นเพียงการกำจัดสัญญาณแทรกสอดหนึ่งสัญญาณ โดยมีการใช้ข้อมูลนำร่อง (p priori information) ซึ่งเกี่ยวกับความถี่และทิศทางของสัญญาณทั้งคู่ ในทางปฏิบัติ ส่วนประมวลผลสัญญาณไม่ควรให้มีความต้องการในรายละเอียดของข้อมูลนำร่อง เช่น ตำแหน่งจำนวน และพฤติกรรมของแหล่งจ่ายสัญญาณหรือสถานีฐาน (base station) ตัวอย่างดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าระบบสายอากาศปรับตัวจะประกอบด้วย สายอากาศแวลำดับรวมกับค่าถ่วง

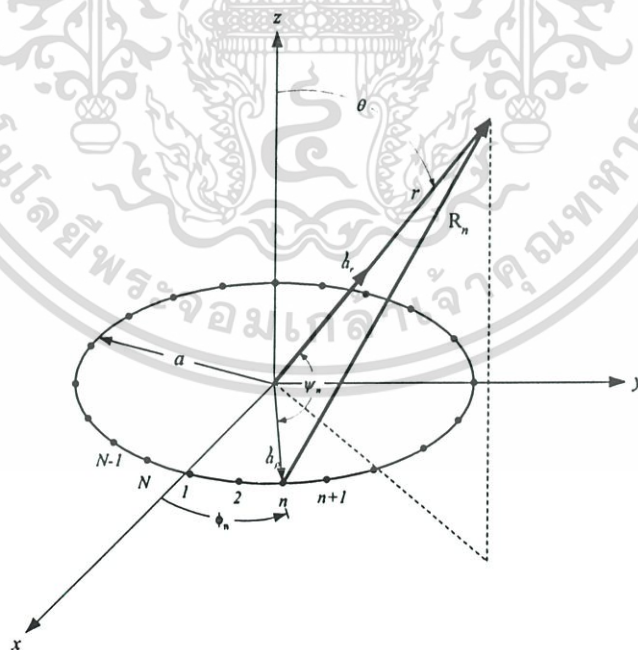
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อนักศึกษาเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักเชิงซ้อน ซึ่งในทางปฏิบัติได้มีความพยายามพัฒนาส่วนประมวลผลปรับตัวให้สามารถปรับค่าถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อนให้สามารถทำงานได้ในเวลาจริง

ในการเลือกเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก w จะเป็นไปตามทฤษฎีทางสถิติของเวกเตอร์สัญญาณ $x(t)$ ที่รับจากสายอากาศแถวลำดับ วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับขึ้นโดยปกติแล้วต้องการให้ลำดับมีความเหมาะสมตามข้อกำหนดในการใช้งาน ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้จากสายอากาศแถวลำดับจะมีสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันจะได้สัญญาณที่ประสงค์ที่ดีที่สุด

3.5 สายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้และแบบจำลองสัญญาณ

สายอากาศแถวลำดับวงกลม (Circular Array) เป็นการวางสายอากาศเดี่ยวหลายองค์ประกอบเป็นวงกลม สายอากาศแถวลำดับวงกลมมีองค์ประกอบเรียงกันในระนาบเดียวกัน สามารถปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของระนาบเพื่อกำหนดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ และได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความสมมาตรและมีรูปร่างต่ำ และในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมการกวาดลำคลื่นหลัก (main beam) ของสายอากาศไปยังทิศทางที่ต้องการได้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างเรขาคณิตของสายอากาศแถวลำดับวงกลม N องค์ประกอบ

ในการคำนวณหาตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สายอากาศไอโซทรอปิกจำนวน N องค์ประกอบวางบนระนาบ x - y ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันเป็นวงกลมที่มีรัศมี a ค่าอนุกรมเมลโลร์ของสนามของแถวลำดับสามารถเขียนได้ [25]

$$E_n(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \quad (3.5)$$

เมื่อ a_n เป็นสัมประสิทธิ์ของการกระตุ้น (แอมพลิจูดและเฟส) ขององค์ประกอบที่ n

k เป็นค่าคงตัวการแพร่กระจาย (Propagation Constant)

R_n เป็นระยะทางจากองค์ประกอบที่ n ไปยังจุดสังเกต

โดย

$$R_n = (r^2 + a^2 - 2ar \cos \psi_n)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

เมื่อ ψ_n เป็นมุมระหว่างเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{a}_p และ \hat{a}_r

$\phi_n = 2\pi \left(\frac{n}{N} \right)$ เป็นตำแหน่งเชิงมุมขององค์ประกอบที่ n บนระนาบ x-y

เมื่อระยะจากตำแหน่งกึ่งกลางของแถวลำดับไปยังจุดสังเกต r มีค่ามากกว่ารัศมีของแถวลำดับ a มากๆ จะได้

$$R_n \cong r - a \cos \psi_n = r - a (\hat{a}_p \cdot \hat{a}_r) = r - a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \quad (3.7)$$

โดย

$$\begin{aligned} \hat{a}_p \cdot \hat{a}_r &= (\hat{a}_x \cos \phi_n + \hat{a}_y \sin \phi_n) \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \end{aligned} \quad (3.8)$$

สมการ 3.5 สามารถลดรูป เมื่อกำหนดให้ระยะห่างจากองค์ประกอบที่ n ไปยังจุดสังเกต R_n ใกล้เคียงกับระยะห่างจากกึ่งกลางของแถวลำดับไปจุดสังเกต r

$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^N a_n e^{+jka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (3.9)$$

โดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์การกระตุ้นของสายอากาศองค์ประกอบที่ n สามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_n = I_n e^{j\alpha_n} \quad (3.10)$$

เมื่อ I_n เป็นแอมพลิจูดของการกระตุ้นของสายอากาศองค์ประกอบที่ n

α_n เป็นเฟสของการกระตุ้น (เทียบกับกึ่งกลางแถวลำดับ) ของสายอากาศองค์ประกอบที่ n

จากสมการ 3.10 สามารถแสดงสมการ 3.9 ได้เป็น

$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} [AF(\theta, \phi)] \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n e^{j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \alpha_n]} \quad (3.12)$$

สมการ 3.12 เป็นตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับวงกลม N องค์ประกอบ ด้วยระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่เท่ากัน เมื่อต้องการให้ลำคลื่นหลักชี้ในทิศ (θ_0, ϕ) สามารถกระตุ้นเฟสขององค์ประกอบลำดับที่ n โดย

$$\alpha_n = -ka \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n) \quad (3.13)$$

ดังนั้นตัวประกอบแถวลำดับของสมการ 3.11 สามารถเขียนเป็น

$$\begin{aligned} AF(\theta, \phi) &= \sum_{n=1}^N I_n e^{j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - ka \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)]} \\ &= \sum_{n=1}^N I_n e^{jk a (\cos \psi - \cos \psi_0)} \end{aligned} \quad (3.14)$$

สมการ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่ละองค์ประกอบของสายอากาศและทิศทาง การปรับลำคลื่นของสายอากาศ

$$\alpha_n = -ka \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)$$

เมื่อ α_n เป็นเฟสของกระแสที่ป้อนให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_0 เป็นทิศทางการกวาดลำคลื่นของสายอากาศในแนวเอซิมัท

θ_0 เป็นทิศทางการกวาดลำคลื่นของสายอากาศในแนวอีลิเวชัน

ϕ_n เป็นมุมของตำแหน่งขององค์ประกอบสายอากาศลำดับที่ n ซึ่งมีค่า $2\pi\left(\frac{n}{N}\right)$

k เป็นค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น

a เป็นรัศมีของแฉกลำดับ

N เป็นจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศแฉกลำดับ

การกำหนดพารามิเตอร์ของสายอากาศแฉกลำดับวงกลม [26] เป็นดังนี้

1. สายอากาศแฉกลำดับออกแบบให้กวาดลำคลื่นในแนวเอซิมัท ดังนั้นกำหนดให้มุมอีลิเวชันอยู่ในแนวระนาบ $\theta_0 = 30^\circ$ เนื่องจากสายอากาศที่ติดบนยานพาหนะและสายอากาศของสถานีฐานซึ่งติดตั้งบนเสา (Tower) ส่วนใหญ่จะมีความสูงจากระดับพื้นดินมาก (มากกว่า 30 เมตร) มุมระหว่างสายอากาศทั้งสองจึงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา ดังนั้นจึงกำหนดให้ลำคลื่นหลักที่ทำมุม 30 องศา ในแนวอีลิเวชัน ซึ่งเป็นมุมระหว่างสายอากาศที่อยู่บนยานพาหนะและสายอากาศที่สถานีฐาน ห่างกันประมาณ 20 เมตร

2. การกวาดลำคลื่นของสายอากาศมีสี่ทิศทางโดยแต่ละทิศทางกัน 90 องศา เท่าๆ กัน

3. จำนวนของสายอากาศ N เท่ากับ 4

4. แอมพลิจูดที่ป้อนให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีขนาดเท่ากัน

5. การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบเอซิมัทของแฉกลำดับ ในรัศมีต่างๆ ใช้สมการ 3.12 เพื่อใช้พิจารณาเลือกรัศมีของสายอากาศแฉกลำดับวงกลมให้สายอากาศมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานคือ ครอบคลุมทิศทางในระนาบเอซิมัทได้ไม่น้อยกว่า 90 องศา เนื่องจากสายอากาศสามารถปรับทิศทางได้ทั้งหมดสี่ทิศทางดังนั้นลำคลื่นหลักของสายอากาศต้องสามารถครอบคลุมทิศทางในระนาบเอซิมัทไม่น้อยกว่า 90 องศา และกำลังงานระหว่างลำคลื่นหลักและพุดคลื่นเล็ก (minor lobe) มีความแตกต่างกันอย่างน้อย 10 dB เพื่อให้สายอากาศสามารถกำหนดทิศทางของการสื่อสารได้อย่างถูกต้อง

รูปที่ 3.6 (ก) (ข) (ค) (ง) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยมีทิศทางของลำคลื่นหลักเป็น 45 องศา การวิเคราะห์ความเหมาะสมของรัศมีแฉกลำดับให้เป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการ

รูปที่ 3.6 (ก) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกลำดับวงกลม เมื่อ $a = \frac{\lambda_0}{4}$ จะ

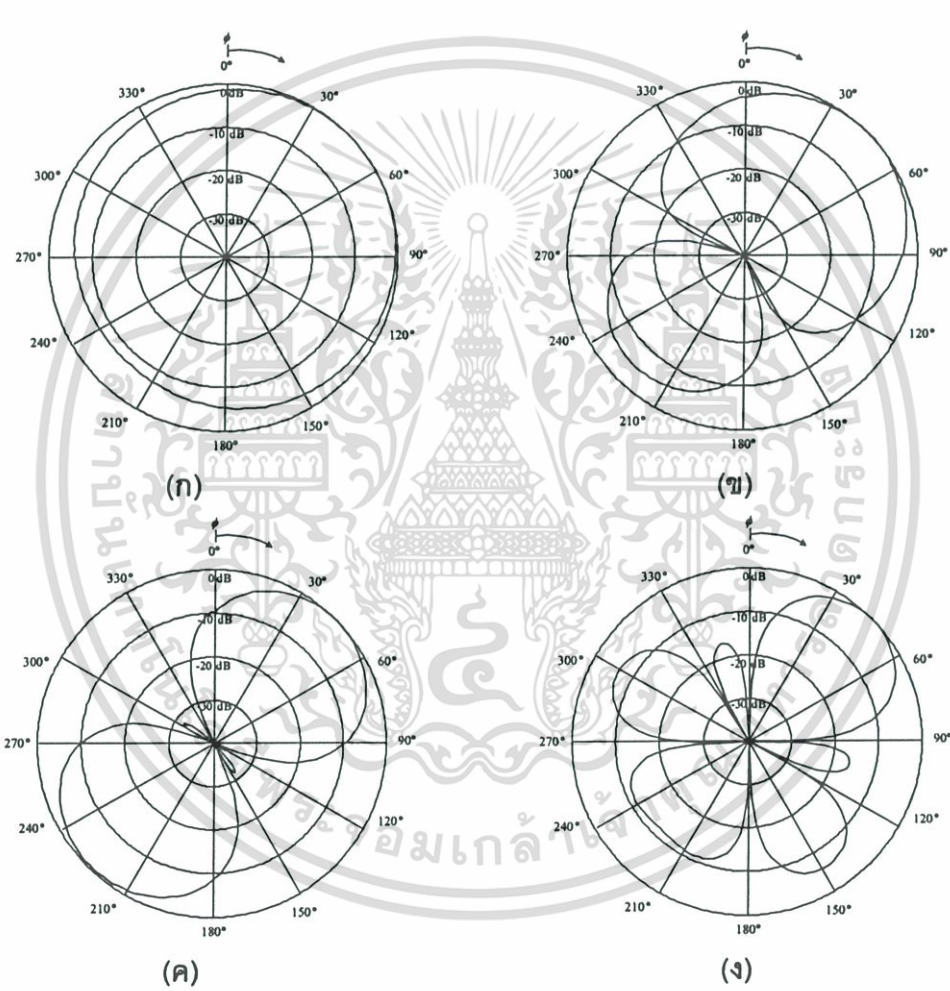
เห็นว่า ลำคลื่นหลักมีความกว้างมาก ทำให้มีอัตราส่วนของลำคลื่นหลักด้านหน้าและด้านหลังน้อยกว่า 3 dB แต่จะไม่มีส่วนของพุดคลื่นเล็ก และมีการชี้ทิศไม่ชัดเจนจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการ

ปรับเฟสเพื่อเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปที่ 3.6 (ข) (ค) (ง) แสดง

ความกว้างของลำคลื่นที่ -3 dB น้อยกว่า 90 องศา ทำให้ไม่สามารถครอบคลุมทิศทางหลักที่

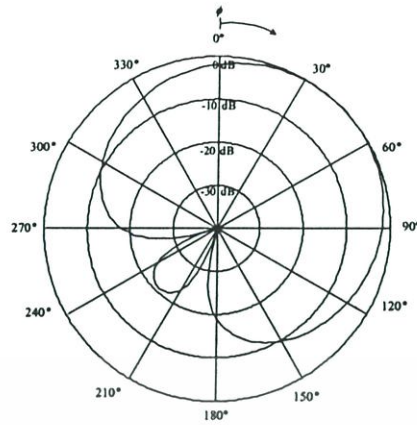
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นของแอมพลิจูดที่รัศมีของแอมพลิจูดระหว่าง $\frac{\lambda_0}{4}$ และ $\frac{2\lambda_0}{4}$ โดยกำหนดให้เป็น $\frac{3\lambda_0}{8}$ จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแอมพลิจูดวงกลมเป็นดังรูป 3.7 จะเห็นว่า เมื่อ $a = \frac{3\lambda_0}{8}$ ลำคลื่นหลักมีความกว้างประมาณ 120 องศา ซึ่งสามารถครอบคลุมทิศทางที่ต้องการได้ และมีพหุคลื่นเล็กซึ่งมีขนาดเล็กเพียงลำคลื่นเดียวทางด้านหลัง ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นด้านหน้าและด้านหลังมากกว่า 10 dB ซึ่งเพียงพอที่สายอากาศแอมพลิจูดวงกลมสามารถกำหนดทิศทางได้อย่างถูกต้อง

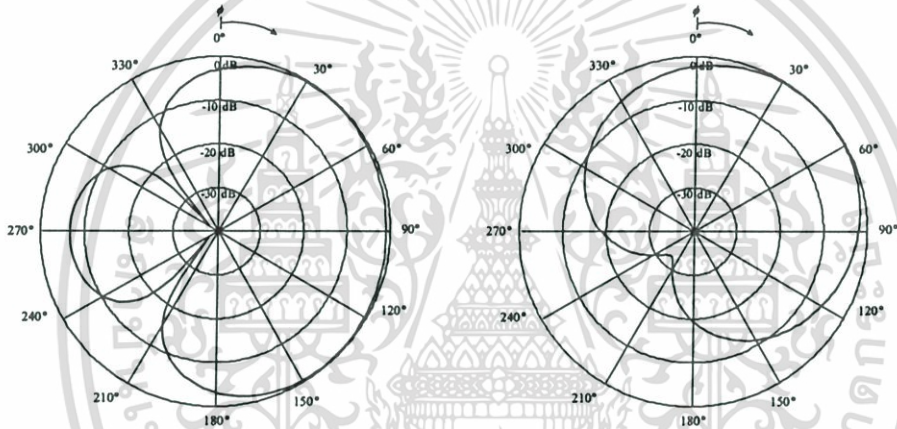


รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อรัศมีแอมพลิจูดเป็น (ก) $\frac{\lambda_0}{4}$ (ข) $\frac{2\lambda_0}{4}$ (ค) $\frac{3\lambda_0}{4}$ (ง) $\frac{4\lambda_0}{4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อรัศมีของแฉกลำดับเป็น $\frac{3\lambda_0}{8}$



รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกลำดับวงกลม (ก) 2 องค์ประกอบ (ข) 8 องค์ประกอบ

6. ค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่นเป็น $\frac{2\pi}{\lambda_0}$

จากพารามิเตอร์ข้อ 3 ถ้าเปลี่ยนสายอากาศแฉกลำดับวงกลมจาก 4 องค์ประกอบ เป็น 2 และ 8 องค์ประกอบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกลำดับวงกลม 2 และ 8 องค์ประกอบแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) และ 3.8 (ข) ตามลำดับ โดยมีลำคลื่นหลักชี้ในทิศ 45° รูปที่ 3.8 (ก) แสดงให้เห็นว่าลำคลื่นหลักจะชี้สองทิศทางคือ 45° และ 135° และมีอัตราส่วนกำลังงานระหว่างลำคลื่นหลักและพู่ข้าง (ในที่นี้ก็คือพู่หลัง) น้อยกว่า 10 dB ดังนั้นสายอากาศแฉกลำดับ 2 องค์ประกอบจึงไม่เป็นไปตามจุดประสงค์ ที่ต้องการ และไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานในการปรับเฟส รูปที่ 3.8 (ข) แสดงให้เห็นว่าไม่มีพู่หลังของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งถือว่าเป็นข้อดี แต่อย่างไรก็ตาม แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นก็ไม่มี ความแตกต่างจากกรณี ใช้สายอากาศ 4 องค์ประกอบมากนัก ซึ่งในกรณีนี้ อัตราส่วนกำลังงานระหว่างลำคลื่นหลักและพู่ข้างมีมากกว่า 10 dB ซึ่งเพียง

พอต่อการใช้งานอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มสายอากาศเป็น 8 องค์ประกอบ ซึ่งจะทำร้ายง่ายในการสร้างสายอากาศเพิ่มตามไปด้วย ไม่ว่าจะเป็นรายจ่ายในตัวสายอากาศและรายจ่ายในวงจรปรับเฟส

พารามิเตอร์จากข้อ 1-6 นำมาแทนในสมการที่ 3.13 จะได้

$$\begin{aligned}\alpha_n &= -\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)\left(\frac{3\lambda_0}{8}\right)\sin(30^\circ)\cos\left(\phi_0 - \frac{\pi n}{4}\right) \\ &= -\frac{3\pi}{4}\sin(30^\circ)\cos\left(\phi_0 - \frac{\pi n}{4}\right)\end{aligned}$$

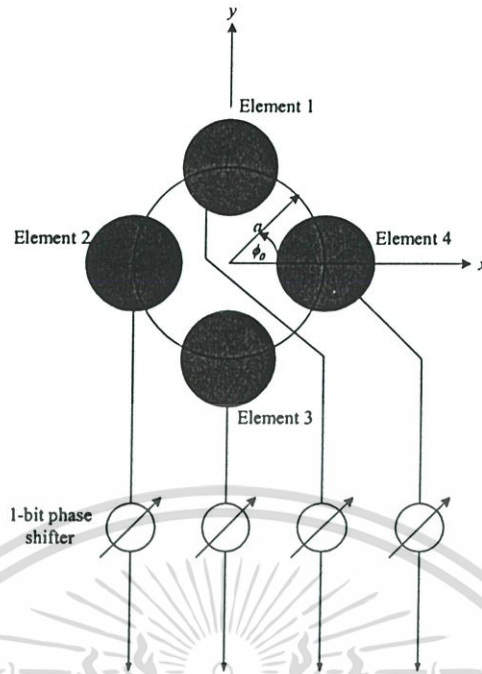
สามารถคำนวณหาเฟสของกระแสที่สะท้อนให้แก่สายอากาศแต่ละองค์ประกอบในทิศทางทั้งสี่ทิศทาง โดยให้ทิศทางเริ่มต้นในแนวแอสิมัท (ϕ_0) เป็น 90° 180° 270° 0° ตามลำดับ ค่าเฟสของกระแสที่กระตุ้นให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบ และทิศของลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับวงกลม แสดงในตาราง 3.1 [16]

ตารางที่ 3.1 ค่าเฟสสำหรับการกระตุ้นสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

เฟส ทิศทาง ลำคลื่นหลัก(ϕ_0)	องค์ประกอบที่ 1	องค์ประกอบที่ 2	องค์ประกอบที่ 3	องค์ประกอบที่ 4
45°	-40	40	40	-40
135°	-40	-40	40	40
225°	40	-40	-40	40
315°	40	40	-40	-40

การปรับเฟสสามารถปรับได้โดยการใช้วงจรเลื่อนเฟส เพียงแค่ 1 บิต 2 เ็อนไซ $\pm 40^\circ$ สามารถลดการสูญเสียแทรกสอดของวงจรปรับเฟสได้ ลดรายจ่ายในการสร้างวงจรเลื่อนเฟส

รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบปรับเฟสได้ สายอากาศองค์ประกอบที่ 1 2 3 4 วางที่ตำแหน่ง 0° 90° 180° 270° ตามลำดับ ทิศของลำคลื่นหลักจะอยู่ระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ ปรับเฟสได้

3.6 อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองต่ำสุด (LMS Algorithm)

จากหัวข้อ method of steepest descent ได้สมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักเป็น

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu E\{e(k)\mathbf{x}^*(k)\} \quad (3.15)$$

ในทางปฏิบัติอัลกอริทึมนี้มีข้อจำกัดคือ โดยทั่วไปแล้ว Expected value $E\{e(k)\mathbf{x}^*(k)\}$ เป็นค่าที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงได้มีการแทน $E\{e(k)\mathbf{x}^*(k)\}$ ด้วยการประมาณ เช่นแทนด้วยค่าเฉลี่ยการสุ่มตัวอย่าง (sample mean)

$$\hat{E}\{e(k)\mathbf{x}^*(k)\} = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e(k-l)\mathbf{x}^*(k-l) \quad (3.16)$$

น้าการประมาณนี้แทนในสมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของ method of steepest descent ทำให้ได้สมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักเป็น

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \frac{\mu}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e(k-l)\mathbf{x}^*(k-l) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเฉพาะของสมการ 3.17 ถ้าให้ค่าเฉลี่ยการสุ่มตัวอย่าง ณ จุดเดียว ($L=1$)

$$\hat{E}\{e(k)\mathbf{x}'(k)\} = e(k)\mathbf{x}'(k) \quad (3.18)$$

ในกรณีนี้ รูปแบบเฉพาะอย่างง่ายของสมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก เป็นดังนี้

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu e(k)\mathbf{x}'(k) \quad (3.19)$$

สมการ 3.19 เป็นที่รู้จักในชื่ออัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองต่ำสุด (Least Mean Square algorithm; LMS) สมการดังกล่าวมีการคูณหนึ่งครั้ง บวกหนึ่งครั้ง (มีการคูณ $\mu e(k)$ เพียงครั้งเดียว และจะถูกใช้สำหรับทุกๆ องค์ประกอบ) ดังนั้นในสายอากาศปรับตัวที่ใช้ LMS ที่มี N องค์ประกอบ จะมีการคูณ N ครั้ง และบวก N ครั้ง ในการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก นอกจากนี้การบวกยังมีความจำเป็นในการคำนวณหาค่าความผิดพลาด $e(k) = d(k) - y(k)$ มีการคูณหนึ่งครั้งสำหรับ $\mu e(k)$ และมีการคูณ N ครั้ง บวก $N-1$ ครั้ง ในการคำนวณหาเอาต์พุต $y(k)$ ของอัลกอริทึม ดังนั้นอัลกอริทึมนี้ ต้องคูณ $2N+1$ ครั้ง และบวก $2N$ ครั้ง ต่อการคำนวณให้ได้เอาต์พุตหนึ่งครั้ง สามารถสรุปการคำนวณ LMS algorithm ได้ดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 LMS algorithm สำหรับสายอากาศปรับตัว N องค์ประกอบ

ตัวแปร	N เป็นจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ μ เป็นค่าคงที่ (step size)
การเริ่มต้น	$\mathbf{w}_0 = 0$
การคำนวณ	For $k=0, 1, 2, \dots$ (a) $y(k) = \mathbf{w}_k^T \mathbf{x}(k)$ (b) $e(k) = d(k) - y(k)$ (c) $\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu e(k)\mathbf{x}'(k)$

ในการประมาณค่าเฉลี่ยเชิงสถิติทั้งหมด $E\{e(k)\mathbf{x}'(k)\}$ ด้วยค่าเฉลี่ยการสุ่มหนึ่งจุด $e(k)\mathbf{x}'(k)$ ดังนั้น LMS algorithm สามารถแทนการทำเกรเดียนต์ใน method of steepest descent

$$\nabla \xi(k) = -E\{e(k) \mathbf{x}^*(k)\} \quad (3.20)$$

ด้วยการประมาณเกรเดียนต์

$$\nabla \xi(k) = -e(k) \mathbf{x}^*(k) \quad (3.21)$$

เนื่องจากการประมาณดังกล่าว โดยทั่วไปจะทำให้ความถูกต้องของการประยุกต์ใช้กับ $\mathbf{w}(k)$ มีทิศทางไม่เหมือนกับทิศทาง steepest descent อย่างไรก็ตามทิศทางโดยเฉลี่ยยังคงเป็นไปตามทิศทางของ steepest descent

$\mathbf{w}(k)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรสุ่ม ซึ่งต้องพิจารณาการลู่เข้าของ LMS algorithm ในการทำงานเป็นเฟรมทางสถิติ ดังนั้นจึงทำการสมมติว่า $x(k)$ และ $y(k)$ เป็นกระบวนการ WSS ร่วม และพิจารณาสมบัติ $\mathbf{w}(k)$ ลู่เข้าหา ค่าเฉลี่ยของ $\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p}$ นั่นคือ

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\{\mathbf{w}(k)\} = \mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p} \quad (3.22)$$

แทน $e(k) = d(k) - \mathbf{w}_k^T \mathbf{x}(k)$ ในสมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของ LMS

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu [d(k) - \mathbf{w}_k^T \mathbf{x}(k)] \mathbf{x}^*(k) \quad (3.23)$$

หา expected value จะได้

$$E\{\mathbf{w}(k+1)\} = E\{\mathbf{w}(k)\} + \mu E\{d(k) \mathbf{x}^*(k)\} - \mu E\{\mathbf{x}^*(k) \mathbf{x}^T(k) \mathbf{w}(k)\} \quad (3.24)$$

ถึงแม้จะเป็นการยุ่งยากที่จะคำนวณพจน์สุดท้ายของสมการ 3.24 แต่สามารถพิจารณาให้ง่ายขึ้น โดยการใช้สมมติฐานการเป็นอิสระกัน (independence assumption) สมมติฐานนี้กล่าวไว้ว่า "ข้อมูล $x(k)$ และเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของ LMS ในทางสถิติจะเป็นอิสระกัน"

จากข้อสมมติฐาน และสมการ 3.24 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E\{\mathbf{w}(k+1)\} &= E\{\mathbf{w}(k)\} + \mu E\{d(k) \mathbf{x}^*(k)\} - \mu E\{\mathbf{x}^*(k) \mathbf{x}^T(k)\} E\{\mathbf{w}(k)\} \\ &= (\mathbf{I} - \mu \mathbf{R}) E\{\mathbf{w}(k)\} + \mu \mathbf{p} \end{aligned} \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจาก [27] จะได้คุณสมบัติที่กล่าวว่า "สำหรับกระบวนการ WSS LMS จะลู่เข้าถ้า $0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}}$ และเป็นไปตามข้อสมมติฐานเรื่องความเป็นอิสระ"

3.7 อัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่ (Constant Modulus Algorithm)

ในปี ค.ศ. 1980 Godard เป็นผู้ที่ริเริ่มการใช้คุณสมบัติของการมอดุลัสคงที่ (Constant Modulus Algorithm; CMA) เพื่อนำไปใช้การปรับเท่าโดยไม่ต้องอาศัยทิศทางของสัญญาณ (blind equalization) ในระบบการสื่อสารดิจิทัล 2 มิติ [4] Godard ใช้การเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณไม่มากหรือสัญญาณที่มีขนาดคงที่ของสัญญาณที่สื่อสารโดยส่วนมาก เช่นสัญญาณที่มีการมอดูเลตด้วยความถี่ (frequency modulation; FM) หรือการมอดูเลตแบบดิจิทัลทางเฟส (phase-shift keying; PSK) หรือการมอดูเลตแบบดิจิทัลทางความถี่ (frequency-shift keying; FSK) หรือการมอดูเลตขนาดแบบควอดเรเจอร์ (quadrature amplitude modulation; QAM) ถึงแม้ว่าอัลกอริทึมของ Godard จะได้มีการพัฒนาเพื่อใช้ใน equalization แต่อัลกอริทึมนี้ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสายอากาศแถวลำดับปรับตัว โดยไม่อาศัยทิศทางของสัญญาณหรือสัญญาณอ้างอิงใดๆ เพียงแค่ใช้คุณสมบัติบางอย่างของสัญญาณส่งนั้นก็คือ ขนาดที่คงที่ของสัญญาณส่ง เออร์พุด ของ CMA เป็นดังสมการ

$$y(k) = w^H(k) x(k) \quad (3.26)$$

โดยที่ H เป็นการทรานโพสของการคอนจูเกต (conjugate transpose) และ $x(k)$, $w(k)$ เป็นเวกเตอร์อินพุตและเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแถวลำดับ ตามลำดับ

$$x(k) = [x_0(k), x_1(k), \dots, x_{N-1}(k)]^T \quad (3.27)$$

$$w(k) = [w_0(k), w_1(k), \dots, w_{N-1}(k)]^T \quad (3.28)$$

ภายใต้เงื่อนไขที่สัญญาณส่งมีขนาดคงที่ดังนั้นเออร์พุดแถวลำดับ $y(k)$ ควรจะมีขนาดคงที่เช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อมีการลดทอนเนื่องจากสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากช่องสัญญาณร่วม หรือการจางหายจากคลื่นหลายวิถี ทำให้สัญญาณเออร์พุดแถวลำดับ $y(k)$ มีขนาดไม่คงที่ จุดประสงค์ของกระบวนการ CMA คือสามารถปรับขนาดของเออร์พุดแถวลำดับ $y(k)$ ให้มีค่าเฉลี่ยของขนาดคงที่ โดยปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก $w(k)$ ซึ่งทำให้ค่า cost function มีค่าต่ำสุด cost function เป็นดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi(\mathbf{w}) = E\{|y(k)|^p - \sigma^p\}^q \quad (3.29)$$

เมื่อ p และ q เป็นจำนวนเต็มบวก และ σ เป็นขนาดของสัญญาณที่ต้องการที่เอาต์พุตของสายอากาศแถวลำดับเมื่อไม่มีสัญญาณแทรกสอด เพื่อความง่ายในการสร้างส่วนประมวลผล ได้เลือก p และ q เป็น 2 ใช้ steepest descent algorithm ในการทำซ้ำเพื่อให้ cost function มีค่าต่ำสุด

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \mu \nabla \xi(\mathbf{w}) \quad (3.30)$$

μ เป็นค่าคงที่ขนาดเล็กที่ใช้ควบคุมอัตราการลู่เข้าของอัลกอริทึม $\nabla \xi(\mathbf{w})$ เป็นเกรเดียนต์ ของ cost function เมื่อเทียบกับ $\mathbf{w}(k)$

$$\nabla \xi(\mathbf{w}) = E\left\{qp\mathbf{x}^*(k)y(k)|y(k)|^{p-2}(|y(k)|^p - \sigma^p)^{q-1}(\text{sgn}(|y(k)|^p - \sigma^p))^q\right\} \quad (3.31)$$

ใช้การประมาณขณะใดขณะหนึ่งของเกรเดียนต์ ดังนั้นจะได้สมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักเป็น

$$\text{"1-1"} \quad \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \mu \mathbf{x}^*(k) \frac{y(k)}{|y(k)|} \text{sgn}(|y(k)| - \sigma) \quad (3.32)$$

$$\text{"2-1"} \quad \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - 2\mu \mathbf{x}^*(k) y(k) \text{sgn}(|y(k)|^2 - \sigma^2) \quad (3.33)$$

$$\text{"1-2"} \quad \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - 2\mu \mathbf{x}^*(k) \frac{y(k)}{|y(k)|} (|y(k)| - \sigma) \quad (3.34)$$

$$\text{"2-2"} \quad \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - 4\mu \mathbf{x}^*(k) y(k) (|y(k)|^2 - \sigma^2) \quad (3.35)$$

ในทางปฏิบัติของกระบวนการปรับตัว จะใช้การประมาณขณะใดขณะหนึ่งของเกรเดียนต์ โดย $p = q = 2$ สมการ 3.35 มีลักษณะคล้ายกับสมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของ LMS โดยที่

$$e(k) = y(k)(|y(k)|^2 - \sigma^2) \quad (3.36)$$

สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการ CMA ควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีสองเงื่อนไขที่อาจจะทำให้ตำแหน่งของการเกรเดียนต์เป็นศูนย์ซึ่งจะทำให้อัลกอริทึมหยุดปรับตัว เงื่อนไขแรกคือ $|y(k)|^2 = \sigma^2$, ซึ่งแสดงว่าอัลกอริทึมได้มีการลู่เข้าหาตำแหน่งที่

เหมาะสม เงื่อนไขข้อสองคือ $y(k)=0$ ซึ่งจะทำให้ค่าการ gradient เป็นศูนย์เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขในข้อสอง จะเกิดความสับสนในการปฏิบัติเพราะเหตุผลสองข้อดังนี้

- ก. ที่จุด $y(k)=0$ เป็นจุดที่ไม่เสถียรภาพ การปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักจากจุดที่เกรเดียนต์เป็นศูนย์จะเกิดจากสัญญาณรบกวนของระบบเท่านั้น
- ข. ถ้าให้อินพุตของสายอากาศแวลลำดับไม่เป็นศูนย์แล้ว (เช่น $x(k) \neq 0$) มีวิธีเดียวที่ทำให้เงื่อนไขเอาต์พุตเป็นศูนย์ คือค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักต้องมีค่าเป็นศูนย์ $w(k)=0$ เงื่อนไขนี้สามารถใช้เช็คด้วยความถูกต้องของระบบได้ง่ายๆ

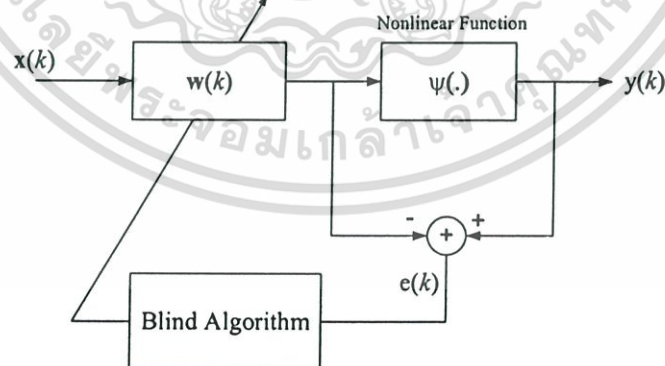
2. ผลตอบสนองย่านอวกาศของสายอากาศปรับตัวมีลักษณะเฉพาะ ถูกกำหนดให้เป็นไปตามเกณฑ์ของเหมาะสมของขนาด

3. ถ้ากระบวนการ CMA ลู่เข้าแล้ว CMA จะลู่เข้าหา Wiener solution โดยทำให้ค่าฟังก์ชันประเมินประสิทธิภาพของขนาดหรือ cost function ของ CMA จะมีค่า MSE น้อยที่สุด

4. ในกระบวนการของ CMA สมมติสัญญาณพึงประสงค์ให้มีขนาดเป็นหนึ่ง ซึ่งโดยปกติจะไม่เป็นดังกรณีนี้ เพื่อว่าหลักเกณฑ์นี้ยังคงใช้ได้ ทำการเปลี่ยนระดับของเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักด้วยอัลกอริทึมของการปรับอัตราขยายของระดับที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังทำการควบคุมขนาด ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะทำให้อัลกอริทึมลู่เข้า

5. กระบวนการ CMA อาจจะไม่ลู่เข้าได้ เนื่องจาก รูปร่างของ cost function อาจจะไม่โค้ง และไม่มีจุดต่ำสุด

บล็อกไดอะแกรมของ CMA แสดงในรูป 3.11 ซึ่งเป็นโครงสร้างทั่วไปของ blind algorithm



รูปที่ 3.10 โครงสร้างทั่วไปของ Blind Algorithm

CMA เป็น blind algorithm ชนิดหนึ่ง ที่สมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักมีความซับซ้อนเพียงแค่ $O(N)$ และให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับ Wiener Solution แต่ก็มีข้อเสียเนื่องจากฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของอัลกอริทึม จะทำให้พื้นผิวของประสิทธิภาพของความผิดพลาด (error เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

performance surface; EPS) มีจุดที่ทำให้เกรเดียนต์เป็นศูนย์หลายจุด แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม อาจจะลู่เข้าหาคำตอบที่ไม่ดีที่สุด

เมื่อนำ CMA ไปใช้ในระบบสายอากาศปรับตัวแล้วสามารถลดการส่งสัญญาณอ้างอิงหรือ training signal ได้ มีผลทำให้ความจุของระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เครื่องรับยังสามารถทำงานอย่างอิสระได้ เมื่อ synchronization เกิดล้มเนื่องจากการจางหายหรือการส่งต่อ (hand-off)

3.8 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายระบบสายอากาศปรับตัว ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศปรับตัว โดยอธิบายว่าสายอากาศปรับตัวสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้อย่างไร รวมถึงได้อธิบายสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้ ซึ่งเป็นเป้าหมายที่สำคัญที่จะนำส่วนประมวลผลปรับตัวมาใช้ร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สุดท้ายได้อธิบาย LMS algorithm ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่นิยมใช้กันมากในการปรับตัว และ CMA ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงเพื่อช่วยในการปรับตัว



บทที่ 4

การออกแบบเอฟพีจีเอสำหรับสายอากาศแถวลำดับ ปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการมอดุลัสคงที่

4.1 บทนำ

การออกแบบ FPGA สำหรับสายอากาศแถวลำดับปรับตัว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบโดยใช้ภาษา VHDL ในการบรรยายพฤติกรรมการทำงานของอัลกอริทึมการปรับตัว FPGA ที่ใช้เป็น FPGA VertexE รุ่น XCV400E-7QP240 ใช้โปรแกรม Xilinx ISE เป็นเครื่องมือ (tool) ในการออกแบบ สังเคราะห์ (synthesis) วาง (Place) และเชื่อมต่อ (Route) วงจร ใช้โปรแกรม ModelSim ในการจำลองการทำงานและทดสอบวงจร การทดสอบการทำงานจะใช้พารามิเตอร์จริงในการจำลองการทำงาน ในบทนี้จะแสดงการออกแบบวงจรบวก วงจรลบ และวงจรคูณ ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานของการออกแบบส่วนประมวลผลของอัลกอริทึมการปรับตัว การบวก ลบ และคูณจะดำเนินการด้วยจำนวนทศนิยมซึ่งเป็นการแสดงจำนวนที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้อธิบายการออกแบบวงจรแปลงจำนวนระหว่างจำนวนเต็มและจำนวนทศนิยมด้วย นอกจากนี้จะทำการอธิบายสมรรถนะ และการทดสอบการทำงานของวงจรต่างๆ ที่ออกแบบและสร้าง

วงจรพื้นฐานที่ออกแบบจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและส่วนประมวลผลของอัลกอริทึมการปรับตัว ซึ่งในบทนี้ได้อธิบายวิธีการออกแบบ สมรรถนะ และการทดสอบการทำงานของอัลกอริทึมด้วย

4.2 เลขทศนิยม (Floating-Point arithmetic)

การออกแบบส่วนประมวลผลของอัลกอริทึมต่างๆมีความจำเป็นต้องแทนสัญญาณด้วยตัวเลขรูปแบบต่างๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลซึ่งคำนวณอัลกอริทึมด้วยจำนวนทศนิยม(Floating-Point number) จำนวนทศนิยมนี้เป็นการแทนค่าตัวเลขในลักษณะสัญลักษณ์ทางวิทยาศาสตร์ (scientific notation) โดยมีข้อดี 3 ข้อคือ

1. สัญลักษณ์ทางวิทยาศาสตร์จะง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงข้อมูลรวมทั้งจำนวนทศนิยมด้วย
2. สัญลักษณ์ทางวิทยาศาสตร์สามารถเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณโดยยังคงจำนวนเวิร์ด(word)ของจำนวนไว้ได้

3. เนื่องจากกลุ่มของบิตที่เป็นศูนย์ของจำนวนเต็มไม่มีความจำเป็นต้องแสดง ดังนั้นจึงสามารถใช้การแทนค่าจริงเหล่านี้หลังจุดทศนิยมได้

อย่างไรก็ตามการออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลอัลกอริทึมด้วยจำนวนทศนิยมจะมีความซับซ้อนสูงและยากต่อการออกแบบและสร้างตัวดำเนินการจำนวนทศนิยม

4.3 การแสดงจำนวนทศนิยม (Floating Point Number Representation)

การออกแบบการแสดงจำนวนทศนิยม (Floating Point Number Representation) ต้องให้มีความเหมาะสมระหว่างขนาดของนัยสำคัญ (significand) และเลขชี้กำลัง (exponent) เนื่องจากขนาดดังกล่าวเป็นขนาดที่แน่นอนมีผลต่อการนำบิตของกลุ่มหนึ่งไปเพิ่มอีกกลุ่มหนึ่ง ซึ่งก็เป็นการชดเชยข้อดีข้อเสีย (trade-off) ระหว่างความถูกต้องและขนาดของการแสดง ขนาดของนัยสำคัญที่เพิ่มขึ้นจะทำให้นัยสำคัญมีความถูกต้องมากขึ้น ขณะที่ถ้าเพิ่มขนาดเลขชี้กำลังจะสามารถแสดงจำนวนได้มากขึ้น



รูปที่ 4.1 การแสดงจำนวนทศนิยม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลด้วยการแทนจำนวนทศนิยมตามมาตรฐาน IEEE754 และความถูกต้องเดียว (single precision) การแสดงจำนวนทศนิยมแสดงได้ในรูป 4.1 โดย s เป็นเครื่องหมาย (sign) ของจำนวนทศนิยม (0 คือบวก 1 คือลบ) exponent เป็นค่าของเลขชี้กำลังซึ่งแทนด้วยจำนวนบิต 8 บิต (รวมเครื่องหมายของเลขชี้กำลังด้วย) significand เป็นค่าของนัยสำคัญซึ่งแทนด้วยจำนวนบิต 23 บิต การแสดงจำนวนดังกล่าวเรียกได้ว่าเป็นการแสดงทั้งเครื่องหมายและขนาด (sign and magnitude) โดยจะแยกเครื่องหมายออกจากกลุ่มของขนาด กลุ่มของการแสดงจำนวนทศนิยมนี้จะอยู่ในรูปแบบที่ซ่อนค่า 1 ที่ต้องบวกกับนัยสำคัญไว้ ซึ่งรูปแบบการแสดงจำนวนทศนิยมที่แสดงในรูปที่ 4.1 มีค่าเป็น

$$(-1)^S \times (1 + \text{Significand}) \times 2^{(\text{Exponent} - \text{Bias})} \quad (4.1)$$

ในกรณีความถูกต้องเดียว Bias มีค่าเป็น 127

4.4 การบวกและลบจำนวนทศนิยม

การบวกและลบจำนวนทศนิยม สามารถแบ่งการคำนวณออกเป็น 4 ส่วนได้แก่

1. การตรวจสอบความเป็นศูนย์ของจำนวนทศนิยม
2. การจัดเรียงนัยสำคัญของจำนวนทศนิยม
3. การบวกหรือลบนัยสำคัญของจำนวนทศนิยม
4. การนอร์มัลไลซ์ผลลัพธ์ของการบวกและลบ

ไม่สามารถนอร์มัลไลซ์จำนวนที่เป็นศูนย์ได้ ถ้ามีการบวกหรือลบจำนวนทศนิยมที่เป็นศูนย์อาจจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นจึงต้องเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบว่าจำนวนทศนิยมทั้งสองเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าเป็นศูนย์จะสามารถหาผลลัพธ์ได้ทันที แต่ถ้าไม่เป็นศูนย์จะทำการเรียงนัยสำคัญของจำนวนทศนิยม หลังจากนั้นจะบวกหรือลบนัยสำคัญของจำนวนทั้งคู่ อาจจะนอร์มัลไลซ์ผลลัพธ์เพื่อให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นถูกต้องแน่นอน

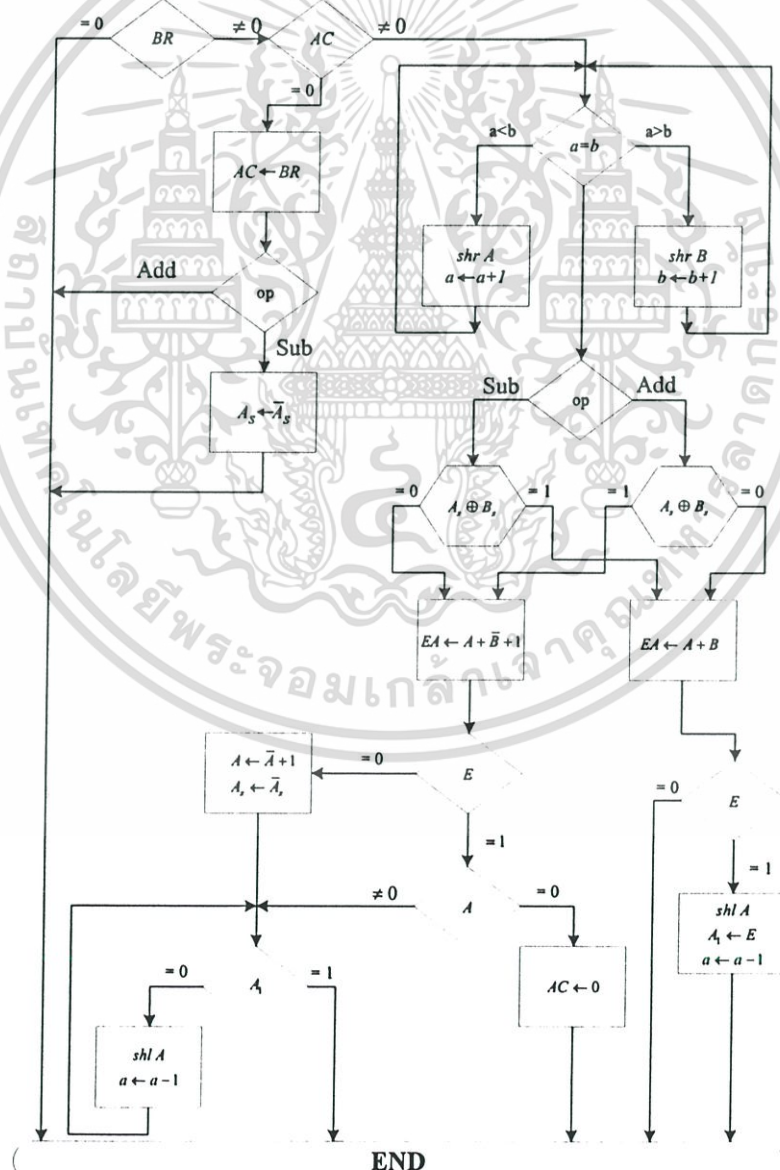
รูปที่ 4.2 แสดงผังงาน (Flow chart) ของการบวกหรือลบจำนวนทศนิยม โดย AC และ BR เป็นจำนวนทศนิยมของตัวตั้งและตัวบวกหรือลบตามลำดับ a และ b เป็นเลขชี้กำลังของตัวตั้งและตัวบวกหรือลบตามลำดับ A_s และ B_s เป็นเครื่องหมายของตัวตั้งและตัวบวกหรือลบตามลำดับ A และ B เป็นนัยสำคัญของจำนวนทศนิยมของตัวตั้งและตัวบวกหรือลบตามลำดับ E เป็นตัวทศของการบวก

ถ้า BR เป็นศูนย์ไม่จำเป็นต้องคำนวณในขั้นตอนอื่นโดยไม่ว่าจะเป็นการบวกหรือลบผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าเป็น AC แต่ถ้า BR ไม่เป็นศูนย์จึงจะพิจารณา AC ในกรณีที่ AC เป็นศูนย์ผลลัพธ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับตัวดำเนินการว่าเป็นบวกหรือลบ ในกรณีที่เป็นบวกผลลัพธ์จะมีค่าเป็น BR แต่ถ้าเป็นลบผลลัพธ์ที่ได้จะเป็น $-BR$ ซึ่งได้จากการกลับปิดเครื่องหมายของ BR

ในกรณีที่ AC และ BR ไม่เป็นศูนย์ทั้งคู่จะเปรียบเทียบขนาดของ AC และ BR ด้วยการลบกันระหว่างเลขชี้กำลัง a และ b ผลลัพธ์จากการลบนี้อาจเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่เลขชี้กำลังเท่ากัน เลขชี้กำลังของตัวตั้งมากกว่าตัวบวกหรือตัวลบ และเลขชี้กำลังของตัวบวกหรือตัวลบมากกว่าตัวตั้ง ถ้าเลขชี้กำลังของทั้งคู่ไม่เท่ากันค่านัยสำคัญที่มีเลขชี้กำลังที่น้อยกว่าจะถูกเลื่อนบิดไปทางขวาจำนวนครั้งการเลื่อนจะเท่ากับความแตกต่างของเลขชี้กำลังของทั้งคู่ หลังจากนั้นจะเพิ่มเลขชี้กำลังโดยการเพิ่มจะเพิ่มเท่ากับความแตกต่างของเลขชี้กำลังของทั้งคู่เช่นเดียวกันเพื่อให้ได้เลขชี้กำลังที่เท่ากัน เมื่อได้นัยสำคัญในขณะที่เลขชี้กำลังเท่ากันแล้วก็บวกหรือลบนัยสำคัญ โดยตรวจสอบว่าการดำเนินการเป็นการบวกหรือลบ และทำ exclusive-OR สำหรับปิดเครื่องหมายของทั้งคู่ ถ้าเอาต์พุตของ exclusive-OR เป็นศูนย์แสดงว่าตัวตั้งและตัวบวกหรือลบมีเครื่องหมาย (เป็นบวกหรือลบ) ที่เหมือนกัน แต่ถ้าเป็นหนึ่งแสดงว่ามีเครื่องหมายที่ต่างกัน สำหรับการบวกที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

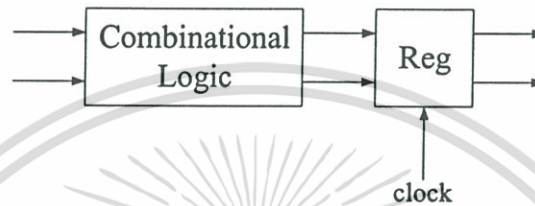
เครื่องหมายเหมือนกัน ต้องบวกลบด้วย (บวกแบบขนาดไม่มีเครื่องหมาย) สำหรับการลบที่มีเครื่องหมายต่างกัน ต้องบวกลบด้วยเช่นกัน ผลการบวกจะถูกแทนด้วย $EA \leftarrow A+B$ โดย E เป็นตัวบ่งชี้ของการบวก ถ้ากรณี E เป็นหนึ่งแสดงว่าจะเกิดการล้น (overflow) เนื่องจากการบวกแสดงได้ว่าจะมีการบวกลบด้วยของทั้งคู่ก็ต่อเมื่อเป็นการดำเนินการเป็นบวกและเครื่องหมายของจำนวนทั้งคู่ต่างกัน หรือการดำเนินการเป็นลบและเครื่องหมายของจำนวนทั้งคู่เหมือนกัน สำหรับการลบจะใช้วิธีการรวม A กับ 2' complement ของ B ในกรณีนี้จะไม่เกิดการล้น (จะเกิดการล้นของจำนวนก็ต่อเมื่อมีการบวกของบวกลบด้วย) ถ้า E เป็นหนึ่งจะนำ E มารวมไว้กับ A ให้เป็น MSB (บิตที่มีความสำคัญสูงสุด) และเลื่อนบวกลบด้วยที่ได้ไปทางขวาหนึ่งบิต และเพิ่มเลขชี้กำลังหนึ่งค่า ในกรณีที่ไม่เกิดการล้นก็ไม่จำเป็นต้องทำการนอร์เมลไลซ์ดังที่กล่าวมา



รูปที่ 4.2 ผังงานของการบวกหรือลบจำนวนทศนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีการลบกักระหว่างนัยสำคัญ ผลลัพธ์ที่ได้ อาจจะเป็นศูนย์หรืออาจจะเป็นน้อยเกินเก็บ (underflow) ถ้านัยสำคัญที่ได้เป็นศูนย์ผลลัพธ์ที่ได้ต้องเป็นศูนย์ โดยให้ทุกบิตของผลลัพธ์ของจำนวนทศนิยมเป็นศูนย์ ในทางกลับกันถ้านัยสำคัญที่ได้จากการลบบิตอย่างน้อยหนึ่งบิตไม่เป็นศูนย์ นัยสำคัญจะเกิดเป็นการน้อยเกินเก็บ ถ้า MSB ในตำแหน่ง A, เป็นศูนย์ ต้องเลื่อนบิตของนัยสำคัญที่ได้ไปซ้าย และลดเลขชี้กำลังลงหนึ่ง จากนั้นตรวจบิต A, อีกครั้งและทำซ้ำจนกว่า A, จะเป็นหนึ่ง เมื่อ A, เป็นหนึ่งจะเสร็จสิ้นการนอร์แมลไลซ์



รูปที่ 4.3 รูปแบบของวงจรคอมบิเนชันและรีจิสเตอร์

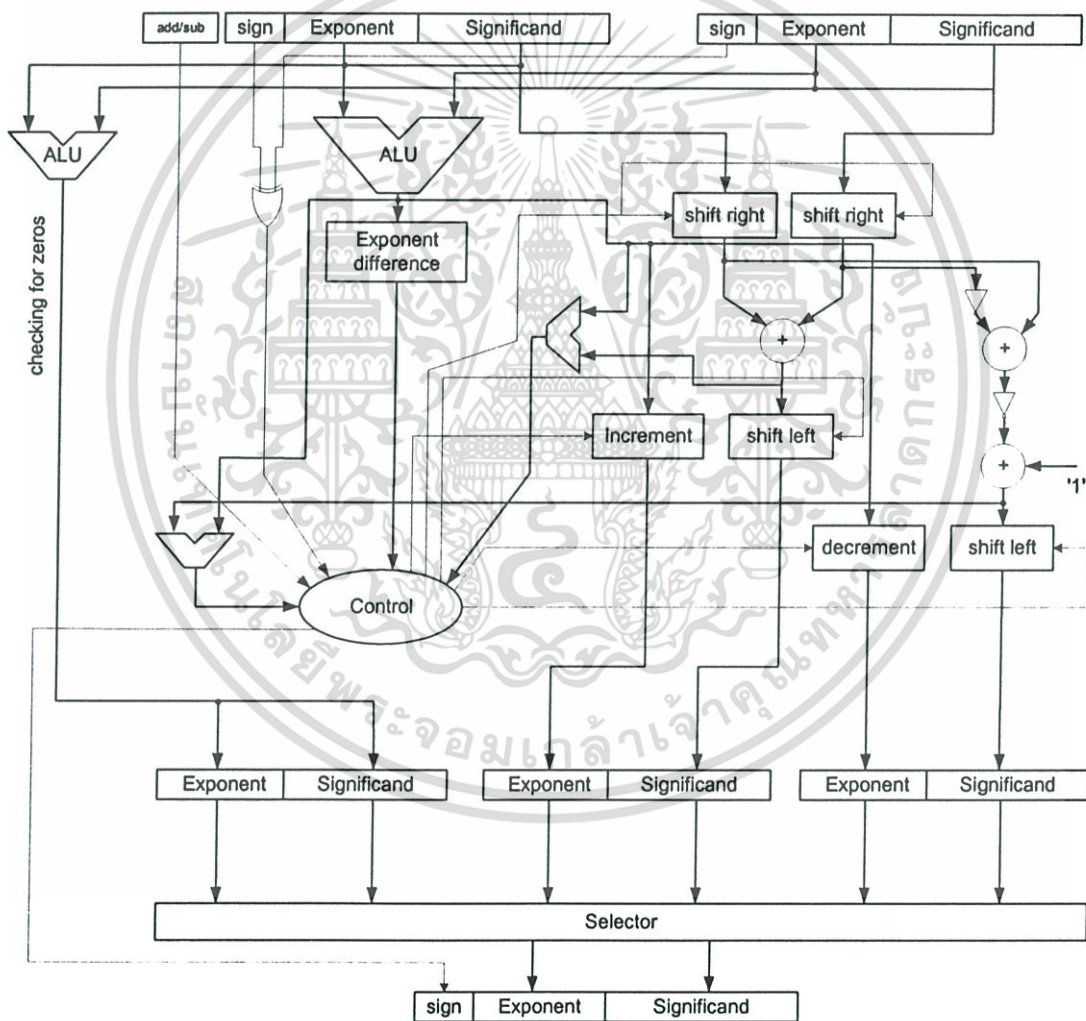
การออกแบบและสร้างวงจรวกและลบด้วยวิธีการดำเนินการในรูปแบบจำนวนทศนิยมด้วยมาตรฐาน IEEE754 และความถูกต้องเดียว (single precision) ซึ่งออกแบบและสร้างด้วย FPGA โดยการใช้ภาษา VHDL ลักษณะของจรเป็นวงจรคอมบิเนชันลอจิก โดยจะเก็บวงจรวกคอมบิเนชันลอจิกไว้หลังรีจิสเตอร์ซึ่งทำงานเป็นจังหวะตามสัญญาณนาฬิกา ก่อนที่จะส่งต่อไปให้ช่วงถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แสดงผังงานของเลขคณิต (arithmetic) ของการบวกและลบจำนวนทศนิยม Selector เป็นส่วนที่ทำงานเป็นจังหวะตามสัญญาณนาฬิกาหรือเปรียบเสมือนรีจิสเตอร์ในรูปที่ 4.3 ซึ่งทำงานด้วยหนึ่งคาบของสัญญาณนาฬิกา ที่เหลือจะเป็นวงจรวกคอมบิเนชันลอจิก Selector เป็นส่วนที่ใช้พิจารณาเอาต์พุตที่ได้ของการดำเนินการบวกหรือลบควรจะเป็นไปตามเงื่อนไขใด โดยส่งงานจากส่วนควบคุม ส่วนควบคุมนี้จะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือการดำเนินการต่างๆ โดยเงื่อนไขการควบคุมเป็นไปตามผังงานที่ 4.2

4.4.1 สมรรถนะของวงจรวกและลบจำนวนทศนิยม

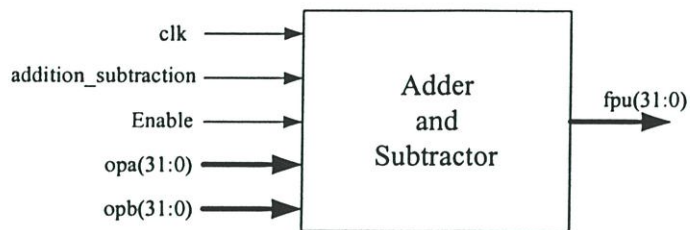
วงจรวกและลบเป็นวงจรพื้นฐานที่สำคัญที่จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลของอัลกอริทึม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรวกและลบของจำนวนทศนิยมด้วยมาตรฐาน IEEE 754 และความถูกต้องเดียว (single precision) ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว การเชื่อมต่อภายนอกของวงจรวกและลบแสดงในรูป 4.5 โดย clk เป็นสัญญาณนาฬิกา addition_subtraction เป็นอินพุตสำหรับเลือกการดำเนินการว่าจะให้เป็นบวกหรือลบ (หนึ่งเป็นการบวก ศูนย์เป็นการลบ) Enable เป็นอินพุตสำหรับการเริ่มต้นการทำงาน opa เป็นตัวตั้ง opb เป็นตัวบวกหรือลบของวงจรวกและลบ fpu เป็นเอาต์พุตที่ได้จากวงจรวกหรือลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากสังเคราะห์วงจรรวมและลบด้วยโปรแกรม Xilinx ISE จะได้กลุ่มของเน็ตลิสต์ในระดับเกต ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดิจิทัลประเภทต่างๆ แสดงได้ในตารางที่ 4.1 เมื่อนำอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรมาทำการวาง (Place) และเชื่อมต่อ (Route) FPGA อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกรวมเป็นกลุ่มๆ ในรูปแบบของโครงสร้างของ FPGA แต่ละรุ่นหรือแต่ละบริษัท รายละเอียดของการใช้ FPGA VertexE รุ่น XCV400E-7QP240 แสดงได้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งประกอบด้วย จำนวนการใช้ Slice ฟลิปฟลอป (Slice Flip Flop) ตัวเปิดตารางสี่อินพุต (4 input LUTs) บล็อกอินพุตเอาต์พุต (bonded IOBs) และจำนวนของสัญญาณนาฬิกาทั้งหมด (GCLKs) วงจรรวมและลบจำนวนทศนิยมของ FPGA นี้ใช้เกตทั้งหมด 4,990 เกต



รูปที่ 4.4 ผังงานเลขคณิตของการบวกและลบจำนวนทศนิยม



รูปที่ 4.5 การเชื่อมต่อภายนอกของวงจรววกและลบ

ตารางที่ 4.1 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรววกและลบ

อุปกรณ์	จำนวน
Registers	1
32-bit register	1
Logic shifters	3
24-bit shifter logical left	1
24-bit shifter logical right	2
Adders/Subtractors	5
24-bit adder	1
25-bit adder carry in	1
8-bit adder	1
8-bit subtractor	2
Comparators	1
8-bit comparator greatequal	1
Xors	1
1-bit xor3	1

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อวงจรววกและลบ

ประเภทอุปกรณ์	จำนวนทั้งหมด	จำนวนที่ใช้	จำนวนที่ใช้ (%)
Slices	4800	386	8
Slice Flip Flops	9600	32	0
4 input LUTs	9600	692	7
bonded IOBs	162	98	60
GCLKs	4	1	25

เวลาของการคำนวณของวงจรวกและลบสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.3 โดยเวลาที่น้อยที่สุดที่สัญญาณอินพุตต้องมาก่อนสัญญาณนาฬิกา (Minimum input arrival time before clock) เป็น 63.312 ns ซึ่งหมายความว่าต้องป้อนสัญญาณอินพุตก่อนการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนาฬิกาเป็นเวลา 63.312 ns เวลาที่มากที่สุดที่สัญญาณเอาต์พุตเกิดหลังสัญญาณนาฬิกา (Maximum output required time after clock) เป็น 6.140 ns ซึ่งหมายความว่าหลังจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนาฬิกา 6.140 ns จึงจะได้สัญญาณเอาต์พุต วงจรวกและลบที่สร้างโดยการใช้ FPGA นั้นจะใช้กำลังงานรวมเป็น 547 mW

ตารางที่ 4.3 เวลาของการคำนวณของวงจรวกและลบ

ประเภทของเวลา	เวลา (ns)
Minimum input arrival time before clock	63.312
Maximum output required time after clock	6.140

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการทดสอบ

ประเภทของเวลา	เวลา(ns)
Clock high time	50
Clock low time	50
Input setup time	10
Output valid delay	10
Offset	0

4.4.2 การทดสอบวงจรวกและลบ

การทดสอบการทำงานของวงจรวกและลบจำนวนทศนิยม ทำโดยการแบ่งกรณีการบวกและลบออกเป็นกรณีต่างๆ ตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงการบวกและลบกรณีต่างๆ กรณีที่ 1-4 ของการบวก แบ่งโดยเปลี่ยนเครื่องหมายของตัวถูกดำเนินการเป็นกรณีต่างๆกัน กรณีที่ 5-7 เป็นกรณีที่ให้ทดสอบความเป็นศูนย์ของการบวก นอกจากนี้ตารางที่ 4.5 แสดงตัวอย่างการบวกเมื่อ A มีค่าเป็น 25 และ B เป็น 18 รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงผลการทดสอบของการบวกโดยการใช้โปรแกรม ModelSim และใช้พารามิเตอร์จริงในการทดสอบ เช่น การประวิงเวลาของสัญญาณ สัญญาณนาฬิกาที่ใช้เป็นไปตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.4 อินพุตและเอาต์พุตของวงจรวกเป็นดังรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 (ก) (ข) (ค) (ง) แสดงผลการทดสอบโดยการเปลี่ยนเครื่องหมายของตัวถูกดำเนินการ รูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) (ข) (ค) แสดงผลการทดสอบการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของตัวถูกดำเนินการ ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการบวกจำนวนทศนิยม สามารถแสดงเป็นเลขฐานสิบโดยใช้สมการ 4.1 ถ้านับบิตของนัยสำคัญจากซ้ายไปขวาแล้วได้บิต s_1, s_2, s_3, \dots จำนวนทศนิยมจะมีค่าเป็น

$$(-1)^E \times (1 + (s_1 \times 2^{-1}) + (s_2 \times 2^{-2}) + (s_3 \times 2^{-3}) + \dots) \times 2^E \quad (4.2)$$

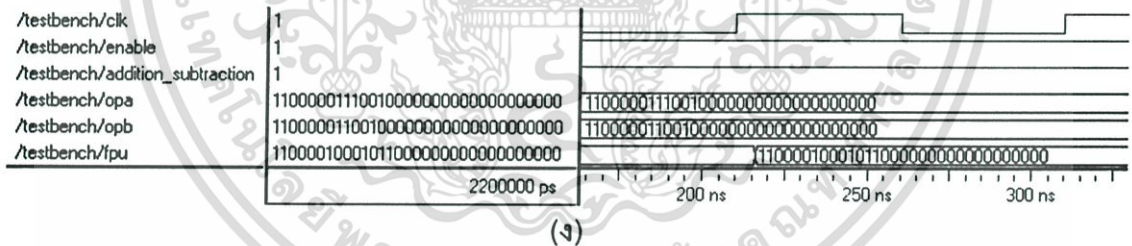
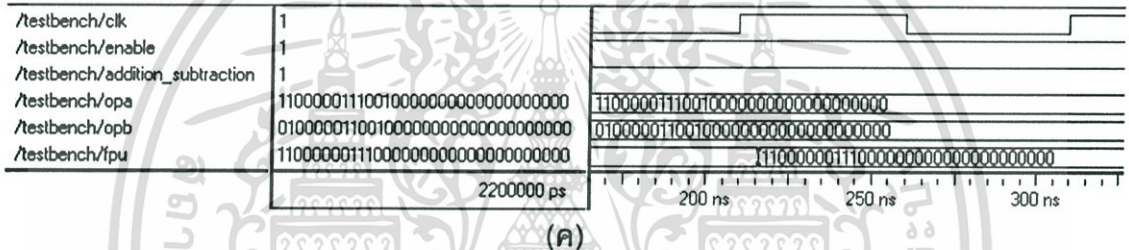
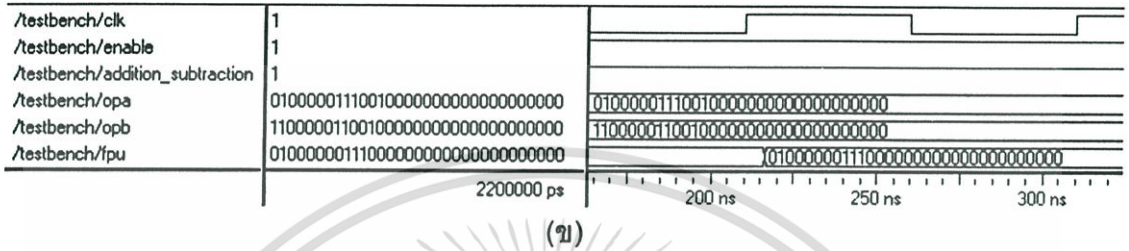
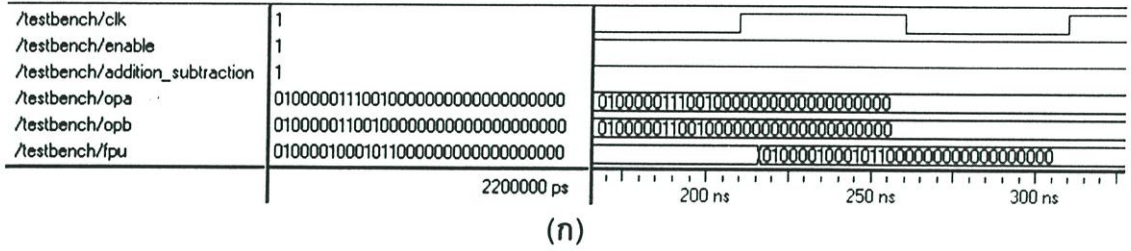
โดยที่ E เป็น Exponent-Bias

เช่นในกรณีที่ 1 ของตารางที่ 4.5 เครื่องหมายของผลลัพธ์ที่ได้จากการบวกเป็น '0' แสดงว่าเป็นจำนวนลบ เลขชี้กำลังเป็น "10000100" แสดงเป็นเลขฐานสิบได้ 132 และนัยสำคัญเป็น "010110000000000000000000" ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการบวกในกรณีที่ 1 ของตารางที่ 4.5 เป็น $(-1)^0 + (1 + (1 \times 2^{-2}) + (1 \times 2^{-4}) + (1 \times 2^{-5})) \times 2^{132-127} = 43$ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 เรียบร้อยแล้ว

ในทำนองเดียวกันสามารถทดสอบวงจรถอบโดยแบ่งการลบออกเป็น 7 กรณีดังที่แสดงในตารางที่ 4.6 ตัวอย่างในการทดสอบจะกำหนดให้ A มีค่าเป็น 25 B มีค่าเป็น 18 ผลการทดสอบโดยการใช้โปรแกรม ModelSim โดยใช้พารามิเตอร์จริงในการทดสอบและสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 รูปที่ 4.8 (ก) (ข) (ค) (ง) แสดงผลการทดสอบเมื่อเปลี่ยนเครื่องหมายของตัวดำเนินการเป็นกรณีต่างๆ รูปที่ 4.9 (ก) (ข) (ค) แสดงการทดสอบความเป็นศูนย์ของตัวดำเนินการ และสามารถสรุปผลการทดสอบได้ในตารางที่ 4.6

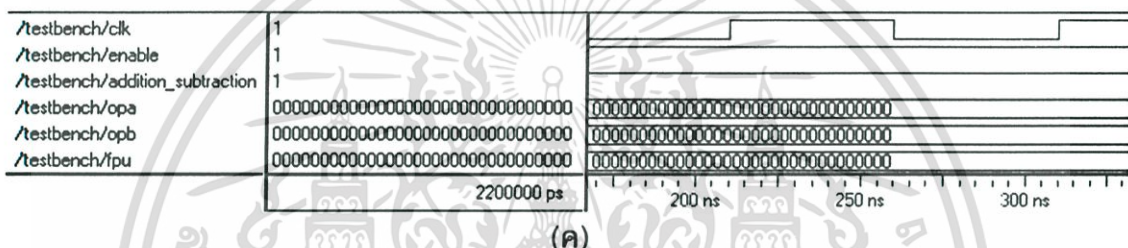
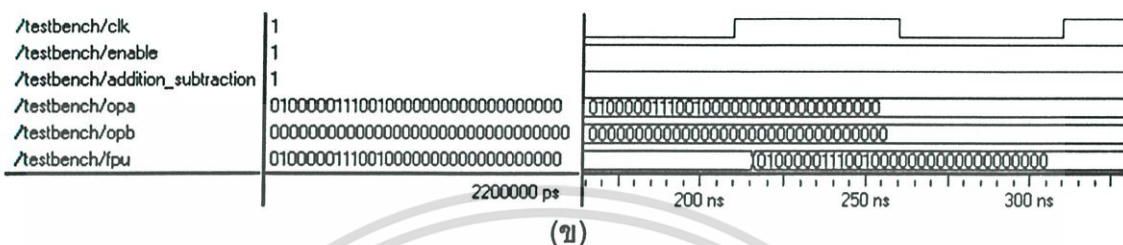
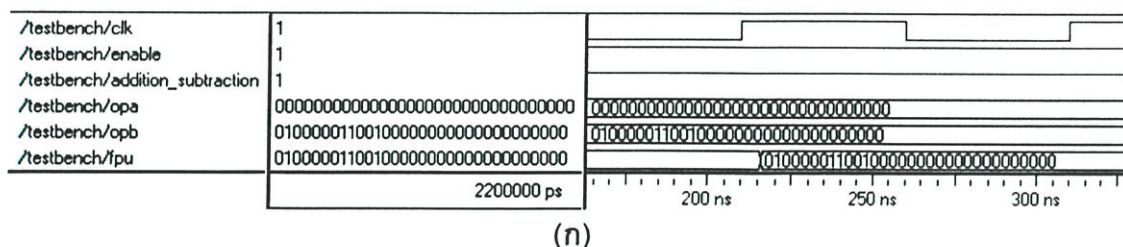
ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างการบวกจำนวนทศนิยม

กรณี ที่	การ ดำเนินการ	ผลลัพธ์			
		จำนวนทศนิยม			ฐาน สิบ
		เครื่องหมาย	เลขชี้กำลัง	นัยสำคัญ	
1	(+A) + (+B)	0	10000100	010110000000000000000000	43
2	(+A) + (-B)	0	10000001	110000000000000000000000	7
3	(-A) + (+B)	1	10000001	110000000000000000000000	-7
4	(-A) + (-B)	1	10000100	010110000000000000000000	-43
5	(0) + (B)	0	10000011	001000000000000000000000	18
6	(A) + (0)	0	10000011	100100000000000000000000	25
7	(0) + (0)	0	00000000	000000000000000000000000	0



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบการบวกของวงจรวกและลบจำนวนทศนิยม โดย A = 25 และ B = 18

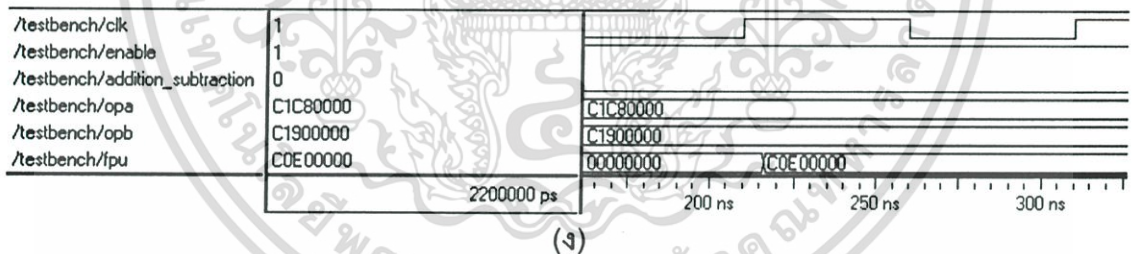
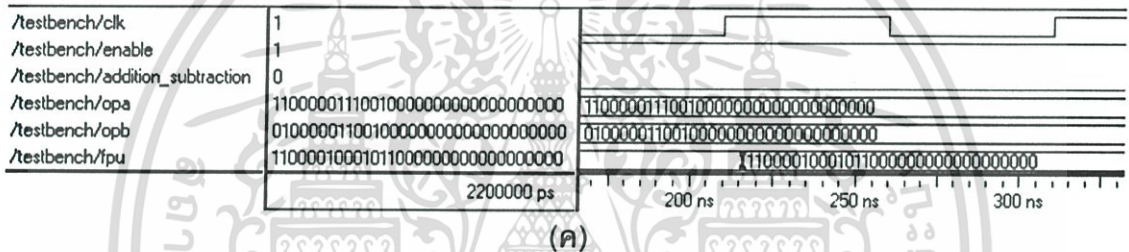
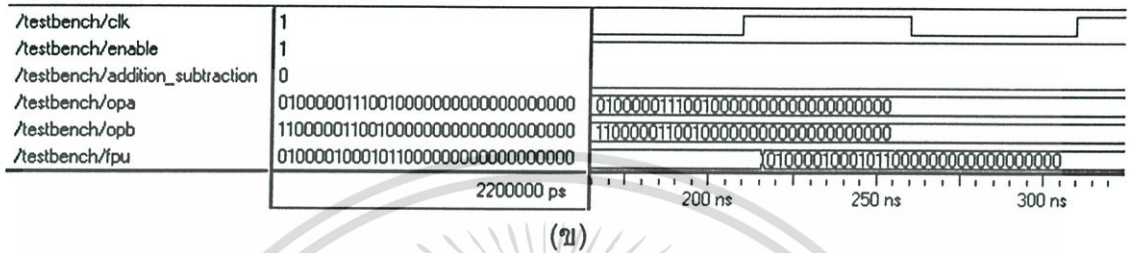
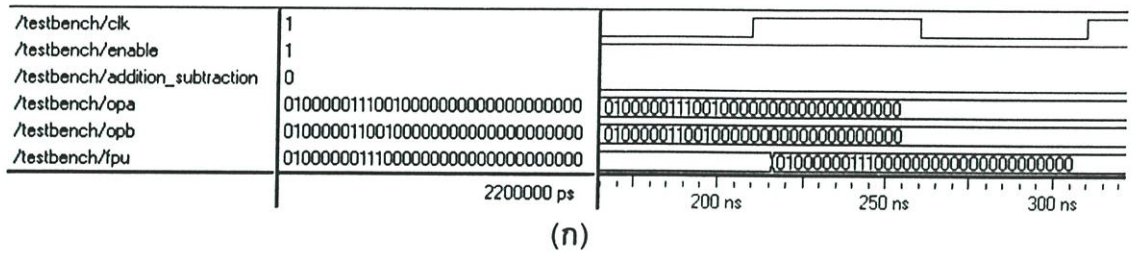
(ก) (+A) + (+B) (ข) (+A) + (-B) (ค) (-A) + (+B) (ง) (-A) + (-B)



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของการบวก (ก) $(0) + (B)$ (ข) $(A) + (0)$ (ค) $(0) + (0)$

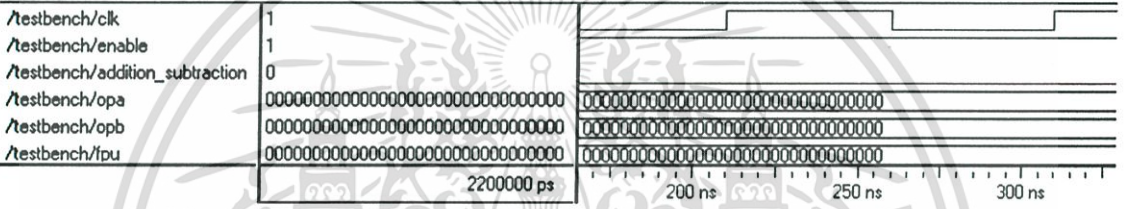
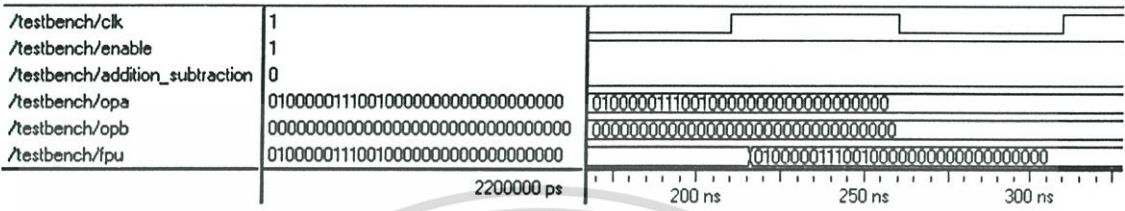
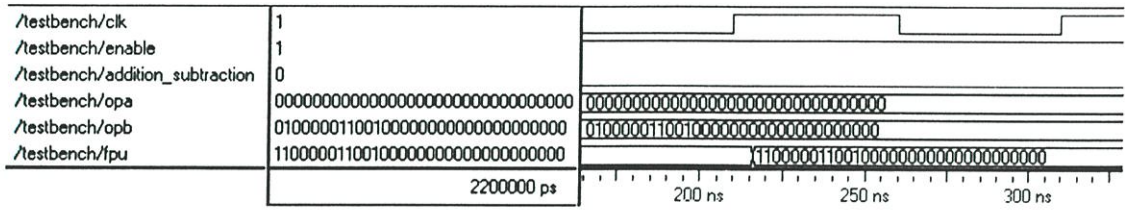
ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างการลบจำนวนทศนิยม

กรณี ที่	การ ดำเนินการ	ผลลัพธ์			
		จำนวนทศนิยม			ฐาน สิบ
		เครื่องหมาย	เลขชี้กำลัง	นัยสำคัญ	
1	$(+A) - (+B)$	0	10000001	110000000000000000000000	7
2	$(+A) - (-B)$	0	1000100	010110000000000000000000	43
3	$(-A) - (+B)$	1	1000100	010110000000000000000000	-43
4	$(-A) - (-B)$	1	10000001	110000000000000000000000	-7
5	$(0) - (+B)$	1	1000011	001000000000000000000000	18
6	$(+A) - (0)$	0	1000011	100100000000000000000000	25
7	$(0) - (0)$	0	00000000	000000000000000000000000	0



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการลบของวงจรวกและลบจำนวนทศนิยม โดย A = 25 และ B = 18

(ก) (+A)-(+B) (ข) (+A)-(-B) (ค) (-A)-(+B) (ง) (-A)-(-B)



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของการลบ (ก) (0) - (B) (ข) (A) - (0) (ค) (0) - (0)

ผลการทดสอบการบวกและการลบของวงจรวกและลบที่ออกแบบ ปรากฏว่าได้ผลถูกต้องตามการแบ่งการทดสอบกรณีต่างๆ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสามารถนำวงจรวกและลบนี้ไปใช้ในการออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลของอัลกอริทึมปรับตัวได้

4.5 การคูณจำนวนทศนิยม

การคูณจำนวนทศนิยมสองจำนวนนั้นต้องคูณนัยสำคัญและบวกเลขชี้กำลัง ไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบเลขชี้กำลังหรือจัดเรียงนัยสำคัญเหมือนกับการบวกหรือลบจำนวนทศนิยม การคูณนัยสำคัญจะท่าเหมือนกับการคูณจำนวนเต็ม (fixed-point number) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีความถูกต้องเป็นสองเท่า (double precision) ซึ่งจะทำให้จำนวนเต็มมีความถูกต้องมากขึ้น ปกติแล้วขอบเขตของนัยสำคัญที่มีความถูกต้องเดียวเมื่อรวมกับเลขชี้กำลังของจำนวนทศนิยมจะมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับที่จะรักษาความถูกต้องของจำนวนให้มีความถูกต้องเดียวได้ ดังนั้น MSB ของผลคูณนัยสำคัญครึ่งหนึ่งสามารถรวมกับเลขชี้กำลังแล้วได้ผลลัพธ์เป็นจำนวนทศนิยมความถูกต้องเดียวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคูณจำนวนทศนิยมสามารถแบ่งการคำนวณออกได้เป็น 4 ส่วนคือ

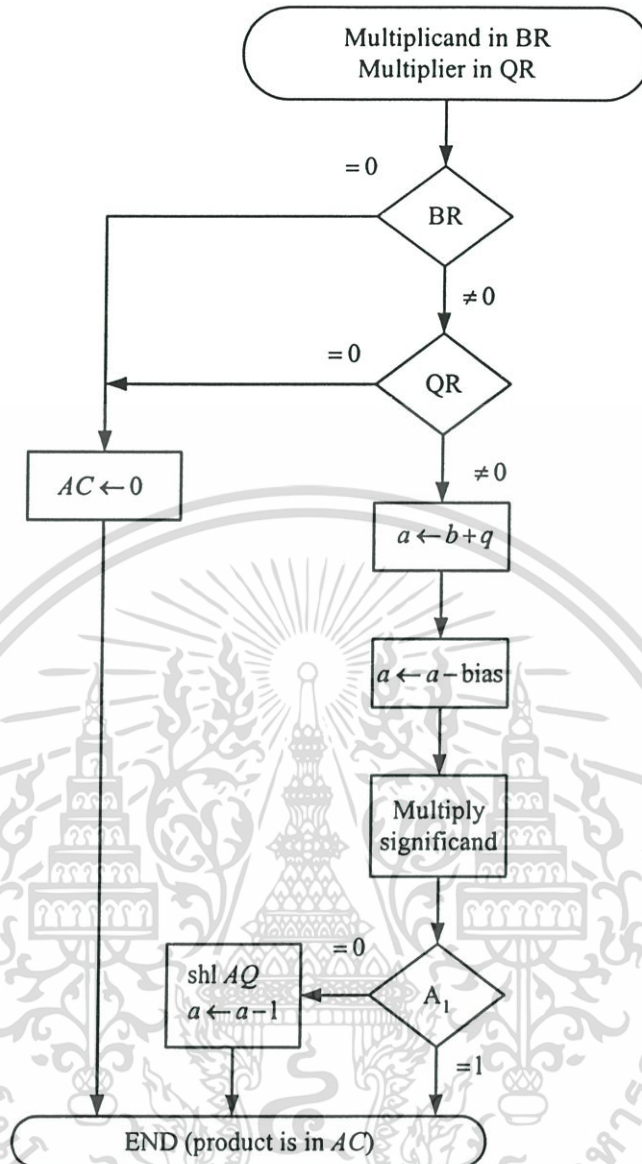
1. การตรวจสอบความเป็นศูนย์ของจำนวนทศนิยม
2. การบวกเลขชี้กำลัง
3. การคูณนัยสำคัญ
4. การนอร์มัลไลซ์ผลคูณ

ในขั้นตอนที่ 2 และ 3 สามารถทำงานได้ด้วยวงจรวกและคูณแบบจำนวนเต็มได้

รูปที่ 4.10 แสดงผังงานของการคูณจำนวนทศนิยม โดยที่ BR และ QR เป็นตัวตั้งและตัวคูณตามลำดับ b และ q เป็นเลขชี้กำลังของตัวตั้งและตัวคูณตามลำดับ AQ เป็นผลลัพธ์ของการคูณนัยสำคัญ A , เป็น MSB ของ AQ และ AC เป็นผลลัพธ์การคูณจำนวนทศนิยม ในการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของจำนวนทศนิยมถ้าตัวถูกดำเนินการตัวใดตัวหนึ่งเป็นศูนย์ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นศูนย์ด้วย ในกรณีที่ทั้งคู่ไม่เป็นศูนย์จะบวกเลขชี้กำลังต่อไป หลังจากบวกเลขชี้กำลังแล้วต้องลบผลของการบวกด้วยค่า bias เนื่องจากเมื่อบวกเลขชี้กำลังแล้วค่า bias ของผลการบวกจะมีค่าเป็นสองเท่า ผลคูณที่ถูกต้องจึงได้จากการลบผลการบวกเลขชี้กำลังด้วยค่า bias

การคูณนัยสำคัญสามารถคูณได้เหมือนการคูณของจำนวนเต็ม A และ Q เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคูณ การล้นจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากการคูณ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องตรวจสอบการล้นของการคูณ แต่การคูณนี้อาจจะเกิดการน้อยเกินเก็บได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบ MSB ของ A ซึ่งถ้าเป็นหนึ่งจะไม่ต้องนอร์มัลไลซ์ แต่ถ้าเป็นศูนย์ต้องเลื่อนนัยสำคัญ AQ ไปทางขวา 1 บิต และลดเลขชี้กำลังลงหนึ่งด้วย สังเกตว่าการเลื่อนเพื่อการนอร์มัลไลซ์จะทำเพียงครั้งเดียว ปกติตัวตั้งและตัวคูณจะถูกนอร์มัลไลซ์และเก็บไว้เป็นส่วนๆ อยู่แล้ว ค่าที่น้อยที่สุดคือ 0.1 ดังนั้นผลคูณที่เป็นไปได้ที่น้อยที่สุดคือ 0.01 ดังนั้นจึงทำการเลื่อนบิตเพียงครั้งเดียว

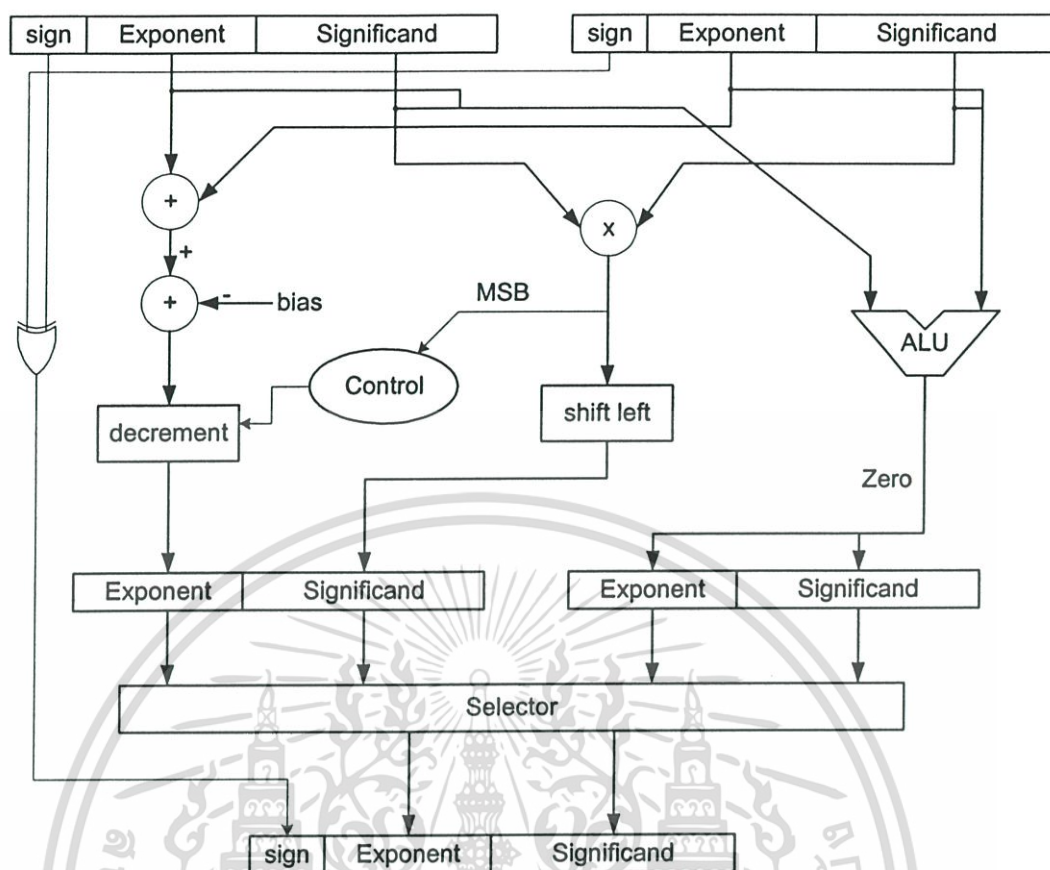
ถึงแม้ว่า LSB ครึ่งหลังของนัยสำคัญจะเก็บไว้ใน Q แต่จะไม่ถูกนำไปเป็นผลการคูณจำนวนทศนิยมด้วย รูปที่ 4.11 แสดงผังงานของเลขคณิต (arithmetic) ของการคูณจำนวนทศนิยม Selector ทำหน้าที่เลือกเอาต์พุตตามเงื่อนไขการตรวจสอบว่าเป็นศูนย์หรือไม่เป็นศูนย์ซึ่งจะทำหน้าที่ตามจังหวะสัญญาณนาฬิกา ที่เหลือจะเป็นวงจรรวมบิเนชันลอจิก วงจรคูณนี้จะทำงานด้วยหนึ่งคาบของสัญญาณนาฬิกา เช่นเดียวกับวงจรวกและลบจำนวนทศนิยม



รูปที่ 4.10 ผังงานของการคูณจำนวนทศนิยม

4.5.1 สมรรถนะของวงจรรคูณ

วงจรรคูณเป็นอีกวงจรถูกพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปใช้สร้างส่วนประมวลผลต่างๆ การออกแบบวงจรรคูณนั้นเป็นไปตามข้อกำหนดที่ได้อธิบายไปแล้ว โดยใช้มาตรฐานเดียวกับการออกแบบวงจรวกและลบ การเชื่อมต่อภายนอกของวงจรรคูณแสดงได้ในรูปที่ 4.12 โดย clk เป็นสัญญาณนาฬิกา เพื่อกำหนดจังหวะการทำงานของวงจรร Enable เป็นอินพุตสำหรับการเริ่มต้นการทำงาน opa และ opb เป็นตัวตั้งและตัวคูณ ตามลำดับ fpu เป็นเอาต์พุตของวงจรรคูณ การทำงานของวงจรรคูณสามารถทำงานในหนึ่งคาบของสัญญาณนาฬิกา กำหนดการทำงานด้วย clk



รูปที่ 4.11 แผนผังเลขคณิตของการคูณทศนิยม



รูปที่ 4.12 แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณภายนอกของวงจรถคูณจำนวนทศนิยม

ตารางที่ 4.7 แสดงรายการของอุปกรณ์ที่ใช้ใน FPGA หลังจากการสังเคราะห์วงจร ซึ่งแสดงในกลุ่มของเน็ตลิสต์ในระดับเกต และตารางที่ 4.8 แสดงกลุ่มของโครงสร้างของ FPGA ที่ถูกใช้งานในการสร้างวงจรถคูณ ตารางนี้ได้หลังจากการวางและเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในตารางที่ 4.7 วงจรถคูณจำนวนทศนิยมนี้ใช้เกตทั้งหมด 252 เกต สังเกตว่าการใช้อุปกรณ์ของ FPGA ในการสร้างวงจรถคูณจะน้อยกว่าวงจรถวนและลบ เนื่องจากอัลกอริทึมของการคูณจำนวนทศนิยมมีความซับซ้อนน้อยกว่า โดยไม่ต้องเปรียบเทียบเลขชี้กำลังและจัดเรียงนัยสำคัญดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

เวลาการคำนวณของวงจรถคูณแสดงในตารางที่ 4.9 และวงจรถคูณนี้จะใช้กำลังงานทั้งสิ้น

เอกสาร 547 mW กสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรคุณ

อุปกรณ์	จำนวน
Registers	1
32-bit register	1
Adders/Subtractors	3
8-bit adder	1
9-bit adder	1
9-bit subtractor	1
Multipliers	1
13x13-bit multiplier	1

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อของวงจรคุณ

ประเภทอุปกรณ์	จำนวนทั้งหมด	จำนวนที่ใช้	จำนวนที่ใช้ (%)
Slices	4800	144	3
Slice Flip Flops	9600	32	0
4 input LUTs	9600	250	2
bonded IOBs	162	97	59
GCLKs	4	1	25

ตารางที่ 4.9 เวลาของการคำนวณของวงจรคุณ

ประเภทของเวลา	เวลา (ns)
Minimum input arrival time before clock	16.319
Maximum output required time after clock	6.140

4.5.2 การทดสอบวงจรคุณ

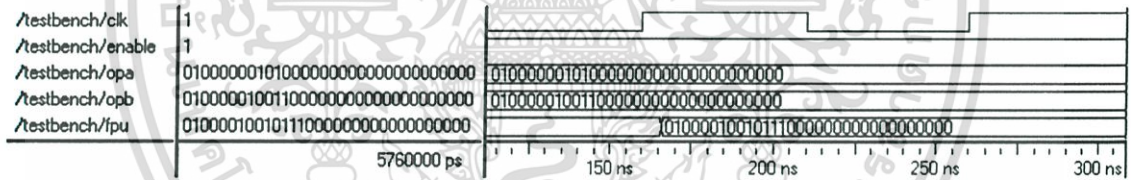
การทดสอบการทำงานของวงจรคุณจำนวนทศนิยมสามารถแบ่งการทดสอบเป็น 7 กรณี เช่นเดียวกับการบวกหรือการลบจำนวนทศนิยม ตารางที่ 4.10 แสดงตัวอย่างการคูณจำนวนทศนิยมในกรณีต่างๆ โดยกำหนดให้ $A = 5$ และ $B = 11$ กรณีที่ 1-4 แบ่งโดยการเปลี่ยนเครื่องหมายตัวถูกดำเนินการ กรณีที่ 5-7 เป็นกรณีที่ใช้ตรวจสอบความเป็นศูนย์ของการคูณ รูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

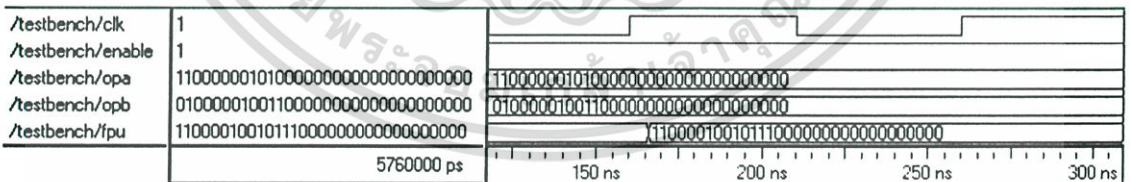
4.13 และ 4.14 แสดงผลการทดสอบของการคูณจำนวนทศนิยม โดยการใช้โปรแกรม ModelSim และใช้พารามิเตอร์จริงในการทดสอบ สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์การคูณจะสรุปในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.10 ตัวอย่างการคูณจำนวนทศนิยม

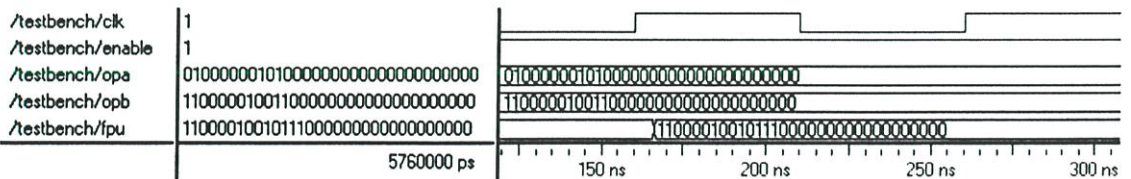
กรณี ที่	การ ดำเนินการ	ผลลัพธ์			
		จำนวนทศนิยม			ฐาน สิบ
		เครื่องหมาย	เลขชี้กำลัง	นัยสำคัญ	
1	(+A) × (+B)	0	10000100	1011100000000000000000	55
2	(+A) × (-B)	1	10000100	1011100000000000000000	-55
3	(-A) × (+B)	1	10000100	1011100000000000000000	-55
4	(-A) × (-B)	0	10000100	1011100000000000000000	55
5	(0) × (+B)	0	00000000	0000000000000000000000	0
6	(+A) × (0)	0	00000000	0000000000000000000000	0
7	(0) × (0)	0	00000000	0000000000000000000000	0



(ก)

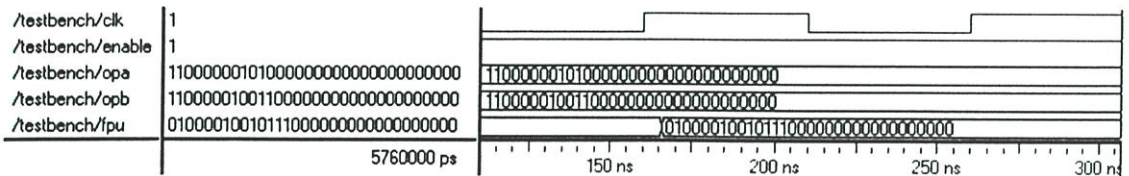


(ข)



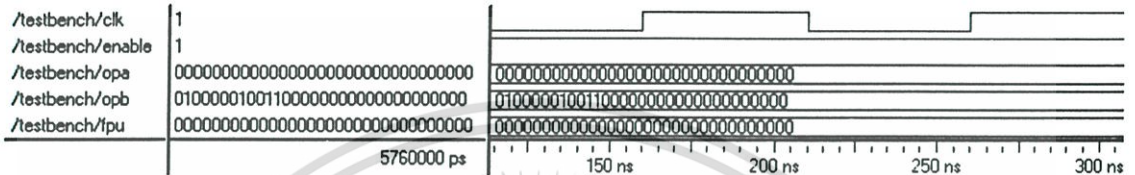
(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

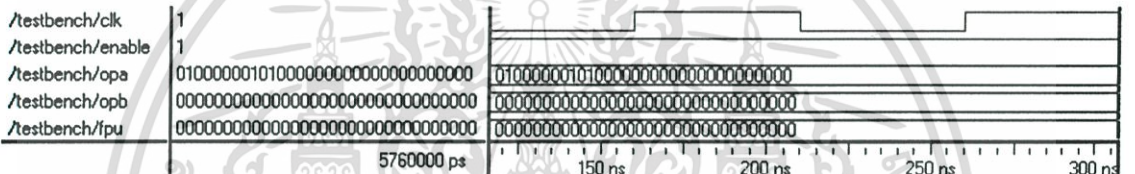


(จ)

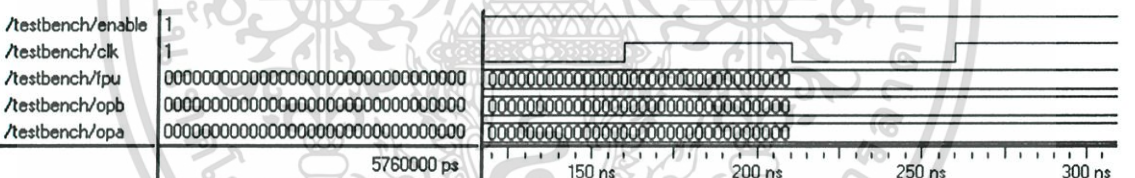
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบของวงจรคูณ โดย A = 5 และ B = 11 (ก) (+A)×(+B) (ข) (+A)×(-B) (ค) (-A)×(+B) (ง) (-A)×(-B)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการตรวจสอบความเป็นศูนย์ของการลบ (ก) (0)×(B) (ข) (A)×(0) (ค) (0)×(0)

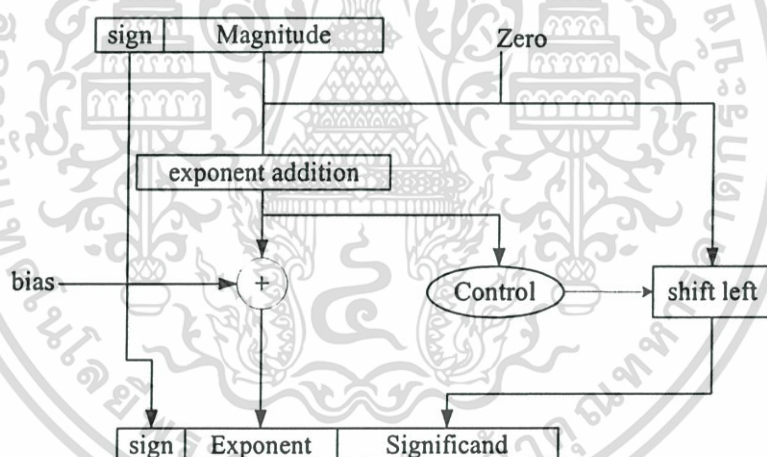
4.6 ตัวแปลงการแสดงผลจำนวน

การเปลี่ยนการแสดงผลจำนวนมีความสำคัญเป็นอย่างมากในส่วนประมวลผลซึ่งทำงานด้วยจำนวนทศนิยม เนื่องจากส่วนประมวลผลดังกล่าวจำเป็นต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (DAC) เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วอุปกรณ์เหล่านี้รองรับทำงานของจำนวนเต็มทั้งสิ้น ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงออกแบบตัวแปลงการแสดงผลจำนวนระหว่างจำนวนทศนิยมและจำนวนเต็ม เพื่อประโยชน์ในการนำส่วนประมวลผลปรับตัวไปใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 ตัวแปลงการแสดงผลจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

การแปลงการแสดงผลจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยมจะถูกนำไปใช้ในการแปลงสัญญาณ อินพุต ปกติแล้วอินพุตที่เข้ามาจะเป็นสัญญาณที่ถูกแทนด้วยจำนวนเต็ม สัญญาณอินพุตที่เข้ามา จะถูกแปลงเป็นสัญญาณที่แทนด้วยจำนวนทศนิยมก่อนที่จะนำไปใช้ในการประมวลผล วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบเพื่อรองรับสัญญาณอินพุต 8 บิต ที่แทนด้วยจำนวนเต็มที่แสดง เครื่องหมายและขนาด (sign and magnitude) รูปที่ 4.15 แสดงผังงานเลขคณิตของตัวแปลงการ แสดงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม ในการแปลงนั้นขนาดของจำนวนเต็มจะถูกเลื่อนเพื่อนำไป แสดงในบิตนัยสำคัญของจำนวนทศนิยม ก่อนที่จะทำการเลื่อนบิตต้องนำกลุ่มของบิตศูนย์มา แทรกไว้ขวามือสุด เพื่อให้ได้จำนวนบิตของเลขทศนิยมครบตามข้อกำหนด จำนวนครั้งการเลื่อน นั้นขึ้นอยู่กับบิตแรกที่เป็นหนึ่งของขนาดของจำนวนเต็มเมื่อนับจากซ้ายไปขวา ถ้าบิตที่เป็นหนึ่งบิต แรกเป็น MSB ของขนาดของจำนวนเต็มแล้วจะไม่จำเป็นต้องเลื่อนบิต ส่วนเลขชี้กำลังนั้นขึ้นอยู่กับ จำนวนครั้งของการเลื่อนบิต ถ้ามีการเลื่อนบิตหลายครั้งเลขชี้กำลังก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าเลื่อนบิต น้อยครั้งเลขชี้กำลังจะมีค่ามาก



รูปที่ 4.15 ผังงานเลขคณิตของตัวแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

4.6.1.1 สมรรถนะของวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยมให้เป็นวงจร คอมบิเนชัน ไม่ทำงานเป็นจังหวะตามสัญญาณนาฬิกา เนื่องจากเหตุผลทางด้านการออกแบบ ส่วนประมวลผลซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป ตารางที่ 4.11 แสดงรายการอุปกรณ์ดิจิทัลที่ใช้ของ วงจรหลังจากทำการสังเคราะห์วงจร เมื่อนำอุปกรณ์ที่ได้จากตารางนี้มาทำการวางและเชื่อมต่อกัน วงจร อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกรวมเป็นกลุ่มๆ ในโครงสร้างของ FPGA ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 4.12 วงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยมนี้ใช้เกตทั้งหมด 252 เกต และใช้กำลังงาน 547 mW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

อุปกรณ์	จำนวน
Logic shifters	1
7-bit shifter logical left	1
# Adders/Subtractors	2
4-bit adder	1
7-bit adder carry out	1

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

ประเภทอุปกรณ์	จำนวนทั้งหมด	จำนวนที่ใช้	จำนวนที่ใช้ (%)
Slices	4800	22	1
Slice Flip Flops	9600	0	0
4 input LUTs	9600	34	1
bonded IOBs	162	40	24
GCLKs	4	0	0

ตารางที่ 4.13 เวลาของการคำนวณวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

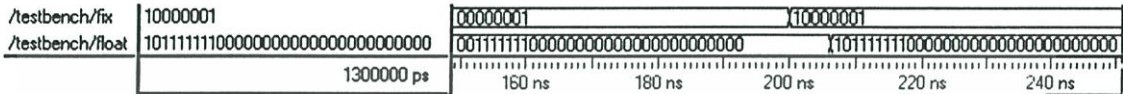
ประเภทของเวลา	เวลา (ns)
Maximum combinational path delay	14.741

ตารางที่ 4.13 แสดงเวลาที่มากที่สุดของการหน่วงเนื่องจากวงจรถอบบิเนชัน (Maximum combinational path delay) ซึ่งหมายความว่าเมื่อป้อนสัญญาณให้แก่วงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยมแล้วจะใช้เวลา 14.741 ns ในการคำนวณจึงจะได้เอาต์พุตออกมา

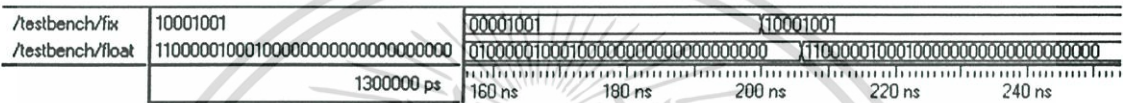
4.6.1.2 การทดสอบวงจรแปลงจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม เมื่อ fix เป็นสัญญาณจำนวนเต็ม และ float เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นจำนวนทศนิยม โดยรูปที่ 4.16 (ก) แสดงการแปลงสัญญาณจำนวนเต็ม 1 และ -1 แสดงในฐานะสองเป็น "00000001" และ "10000001" ตามลำดับ โดยเมื่อทำการแปลงเป็นจำนวนทศนิยม สัญญาณที่มีค่าเป็น 1 จะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงเป็น "001111111000000000000000000000" โดยเมื่อใช้สมการที่ 4.2 แล้วจำนวนทศนิยมมีค่าเป็น 1 ซึ่งเป็นการแปลงสัญญาณที่ถูกต้อง และสัญญาณที่มีค่าเป็น -1 จะถูกแปลงเป็น "101111111000000000000000000000" รูปที่ 4.14 (ข) สัญญาณที่มีค่าเป็น 9 และ -9 จะถูกแปลงเป็น "010000010001000000000000000000" และ "010000010001000000000000000000" ตามลำดับ



(ก)



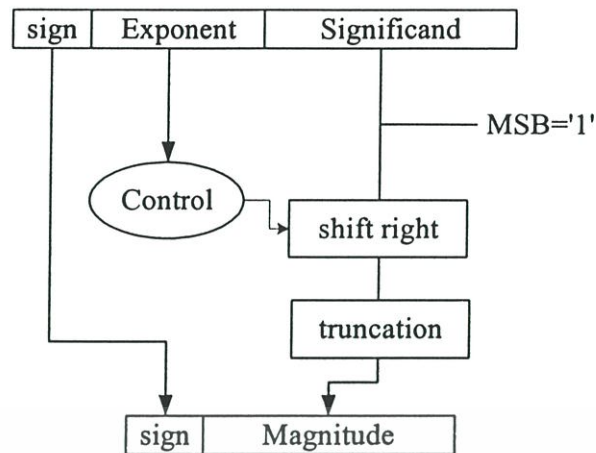
(ข)

รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม

4.6.2 ตัวแปลงการแสดงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

การเปลี่ยนการแสดงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็มจะถูกนำไปใช้เพื่อเปลี่ยนเอาต์พุตที่ได้จากการประมวลผลด้วยจำนวนทศนิยม เพื่อประโยชน์ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกซึ่งใช้ในอุตสาหกรรม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบให้เอาต์พุตของวงจรเป็นการแทนสัญญาณทั้งเครื่องหมายและขนาด 12 บิต รูปที่ 4.17 แสดงผังงานเลขคณิตของตัวแปลงสัญญาณจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม ส่วนสำคัญของการแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็มคือการเลื่อนบิตของนัยสำคัญ การเลื่อนบิตนั้นจะขึ้นอยู่กับเลขชี้กำลัง ก่อนที่จะเลื่อนบิตต้องเพิ่มบิตที่เป็นหนึ่งให้เป็น MSB ของนัยสำคัญ เนื่องจากในการแสดงจำนวนทศนิยมจะซ่อนบิต MSB ที่เป็นหนึ่งไว้หลังจากนั้นตัดบิต LSB ส่วนที่เกินมาจากการแสดงจำนวนเต็มทิ้ง เหลือแต่ส่วนที่ต้องการแสดง นอกจากเลขชี้กำลังจะมีผลต่อการเลื่อนบิตแล้ว ช่วงของการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล (dynamic range) ก็มีความสำคัญเช่นกัน ในกรณีที่เลขนัยสำคัญมีค่ามากที่สุดจากข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดกรณีนี้ไม่ต้องเลื่อนบิต แต่ถ้าเลขชี้กำลังน้อยกว่าเลขชี้กำลังดังกล่าวก็เลื่อนบิตในอัตราส่วนที่กำหนดต่อไป

ได้ออกแบบให้วงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็มทำงานตามจังหวะของสัญญาณนาฬิกา โดยทำงานเพียงหนึ่งคาบของสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 4.17 ผังงานเลขคณิตของการแปลงสัญญาณจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

4.6.2.1 สมรรถนะของวงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

หลังจากสังเคราะห์วงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม จะได้กลุ่มของเน็ตลิสต์ในระดับเกต ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดิจิทัลประเภทต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.14 เมื่อนำอุปกรณ์ที่ได้จากตารางนี้ไปวางและเชื่อมต่อวงจรจะได้ รายละเอียดการใช้ FPGA ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.15 และวงจรนี้จะใช้เกตทั้งหมด 408 เกต

เวลาการคำนวณของวงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็มสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.16 การป้อนสัญญาณอินพุตต้องป้อนก่อนการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนาฬิกาเป็นเวลา 10.130 ns และหลังจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนาฬิกา 6.140 ns จึงจะได้สัญญาณเอาต์พุตออกมา

ตารางที่ 4.14 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

อุปกรณ์	จำนวน
Registers	1
12-bit register	1
Logic shifters	1
24-bit shifter logical right	1
Adders/Subtractors	1
8-bit adder	1

ตารางที่ 4.15 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อบริเวณวงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

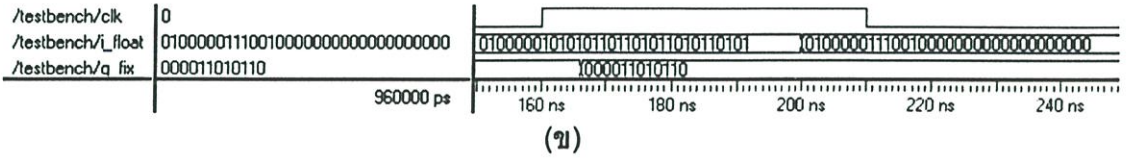
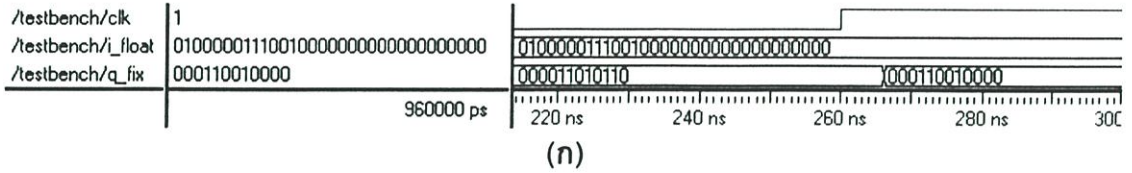
ประเภทอุปกรณ์	จำนวนทั้งหมด	จำนวนที่ใช้	จำนวนที่ใช้ (%)
Slices	4800	25	1
Slice Flip Flops	9600	12	0
4 input LUTs	9600	43	1
bonded IOBs	162	31	19
GCLKs	4	1	25

ตารางที่ 4.16 เวลาของการคำนวณวงจรแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

ประเภทของเวลา	เวลา (ns)
Minimum input arrival time before clock	10.130
Maximum output required time after clock	6.140

4.6.2.2 การทดสอบวงจรเปลี่ยนจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

รูปที่ 4.18 (ก) (ข) แสดงตัวอย่างผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม รูปที่ 4.18 (ก) จำนวนทศนิยมมีค่าเป็น "01000001110010000000000000000000" โดยนัยสำคัญมีค่า 131 ในกรณีนี้มีการเลื่อนบิตนัยสำคัญไปขวามือ 3 บิต และสามารถแปลงเป็นจำนวนเต็มได้เป็น "000110010000" รูปที่ 4.18 (ข) แสดงการแปลงจำนวนทศนิยม "01000001010101101101011010110101" โดยนัยสำคัญมีค่า 130 ในกรณีนี้จะเลื่อนบิตนัยสำคัญไปขวา 4 บิต สามารถแปลงเป็นจำนวนเต็มได้ "000011010110" สังเกตกรณีแรกเลขนัยสำคัญมีค่าเป็น 131 จะเลื่อนบิต 3 บิต แต่ในกรณีที่สอง เลขนัยสำคัญมีค่าเป็น 130 เลื่อนบิต 4 บิต ทั้งสองกรณีนี้จะทำการเลื่อนบิตในอัตราส่วนที่เท่ากันขึ้นอยู่กับเลขนัยสำคัญ ถ้าเลขนัยสำคัญมีค่าน้อยจะเลื่อนบิตน้อยครั้ง แต่ถ้าเลขนัยสำคัญมีค่ามากการเลื่อนบิตก็จะน้อยลง ในกรณีที่สองจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น เนื่องจากกรกรกลุ่มของ LSB ของจำนวนทศนิยมที่เกินกว่าที่จะแสดงได้ในรูปของจำนวนเต็ม 12 บิต ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการแปลงจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม



รูปที่ 4.18 การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม

4.7 ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบส่วนประมวลผลปรับตัวของสายอากาศปรับตัวโดยการใช้ CMA เนื่องจากอัลกอริทึมนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงมาช่วยในการปรับตัว และสมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักง่ายต่อการออกแบบ (ในกรณีนี้ $p = q = 2$) เหาต์พุดของกระบวนการ CMA เป็นดังสมการ

$$y(k) = w^H(k) x(k) \tag{4.3}$$

สมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักคือ

$$w(k+1) = w(k) - \mu x^*(k) y(k) (|y(k)|^2 - \sigma^2) \tag{4.4}$$

สมการเอาต์พุดและสมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักเป็นสมการที่ต้องใช้ในการออกแบบ ส่วนประมวลผล CMA โดยผังงานของ CMA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 จากรูปนี้ได้แบ่งการคำนวณเป็น 5 ขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่ง การคูณกันระหว่างเวกเตอร์อินพุตและเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ผลคูณของแต่ละองค์ประกอบจะถูกสะสมเป็นเอาต์พุดของ CMA ขั้นที่สองเป็นการคำนวณหาค่าคงที่ $\mu(|y(k)|^2 - \sigma^2)$ เพื่อใช้ในการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ขั้นที่สามเป็นการคูณกันระหว่างเวกเตอร์เอาต์พุดของ CMA และคอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนของเวกเตอร์อินพุต ขั้นที่สี่เป็นการคูณกันระหว่างค่าคงที่ซึ่งได้จากขั้นตอนที่สองและค่าที่ได้จากขั้นตอนที่สาม ขั้นที่ห้าเป็นการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักได้จากกันลบกันระหว่างเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักก่อนหน้าและค่าในขั้นตอนที่สี่

จากผังงานของ CMA ข้างต้น สามารถออกแบบโครงสร้างการประมวลผลปรับตัว CMA

เอกสารโดยใช้การออกแบบของวงจรบวกหรือลบ วงจรคูณ และ วงจรแปลงการแสดงผลจำนวน รูปที่ 4.20 คำ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงโครงสร้างสถาปัตยกรรมของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA ส่วนประมวลผลนี้ดำเนินการด้วยจำนวนทศนิยมซึ่งใช้วิธีการคูณและสะสม (Multiply and Accumulate; MAC) การดำเนินการด้วยจำนวนทศนิยมนี้จะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการตัดบิต และค่าคงที่ μ ที่ใช้บังคับการลู่เข้าของ CMA ซึ่งปกติแล้วจะมีค่าน้อยมากๆ ส่วนประมวลผลนี้ประกอบด้วยวงจรถูก วงจรลบ มัลติเพล็กซ์ ดีมัลติเพล็กซ์ แลช ส่วนควบคุมการทำงาน และวงจรถักสะสมซึ่งได้จากการปรับปรุงวงจรถูกหรือลบ โดยนำเอาต์พุตมาป้อนกลับเป็นอินพุตให้ตัวบวกหรือลบดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยเพิ่ม Reset เพื่อกำหนดให้วงจรถักสามารถเริ่มต้นการสะสมใหม่ได้ รายละเอียดการสร้างวงจรถักสะสมบล็อกในรูป 4.20 ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา

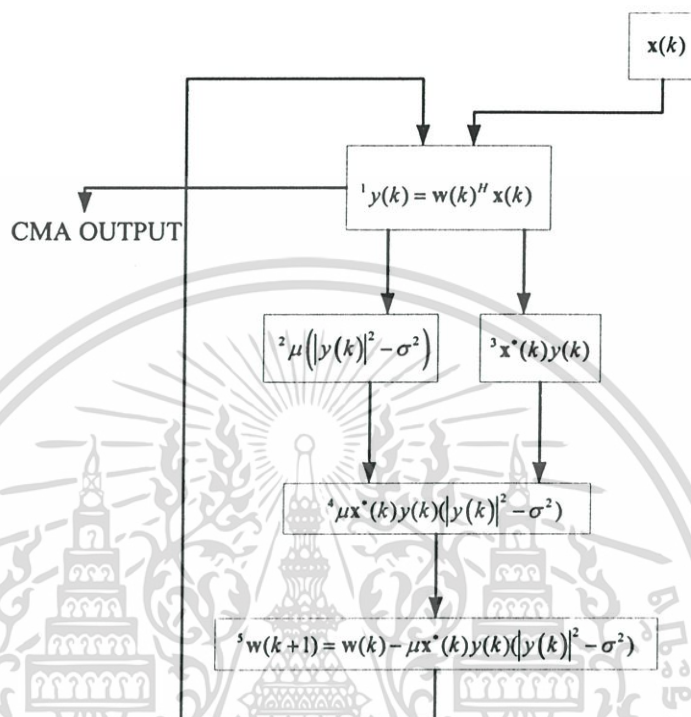
ส่วนที่ควบคุมการทำงานของส่วนประมวลผลจะทำงานตามรูปที่ 4.19 โดยอุปกรณ์แต่ละตัวที่แสดงในรูปที่ 4.20 จะทำงานเป็นจังหวะตามสัญญาณนาฬิกา ยกเว้น Number Conversion ของการแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม ในการควบคุมการทำงานนั้น จะให้อุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ทำงานในช่วงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนาฬิกา (ขอบสัญญาณนาฬิกา) บล็อกที่ใกล้เคียงกันจะทำงานด้วยขอบสัญญาณนาฬิกาที่แตกต่างกัน เพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากการหน่วงของสัญญาณ เช่น ถ้า Accumulator ทำงานที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา Demux 1:2 จะทำงานที่ขอบขาลงของสัญญาณนาฬิกา ดังนั้นสัญญาณที่เดินทางจากบล็อกหนึ่งไปบล็อกหนึ่ง ต้องใช้เวลาในการเดินทางน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของสัญญาณนาฬิกา แต่ Number Conversion ของการแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม ไม่ทำงานตามจังหวะสัญญาณนาฬิกาแต่เป็นวงจรถักสะสม เพราะจะให้ง่ายต่อการควบคุมการไหลของสัญญาณ อุปกรณ์ MUX 8:1 ทั้งสองตัวจะได้ทำงานที่ขอบสัญญาณนาฬิกาเดียวกัน ในทำนองเดียวกัน MUX 4:1 ทั้งสองตัวก็สามารถทำงานที่ขอบสัญญาณนาฬิกาเดียวกันได้ด้วย ตัวแปลงสัญญาณจำนวนเต็มเป็นจำนวนทศนิยม จะถูกวางไว้หลัง MUX 8:1 ของสัญญาณอินพุต เพื่อลดการใช้เกตของอุปกรณ์ MUX 8:1 ส่วนการประมวลผลปรับตัวนี้จะใช้เวลาในการคำนวณ 56 สัญญาณนาฬิกาจึงจะเสร็จสิ้นกระบวนการในหนึ่งตัวอย่าง

4.7.1 สมรรถนะของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

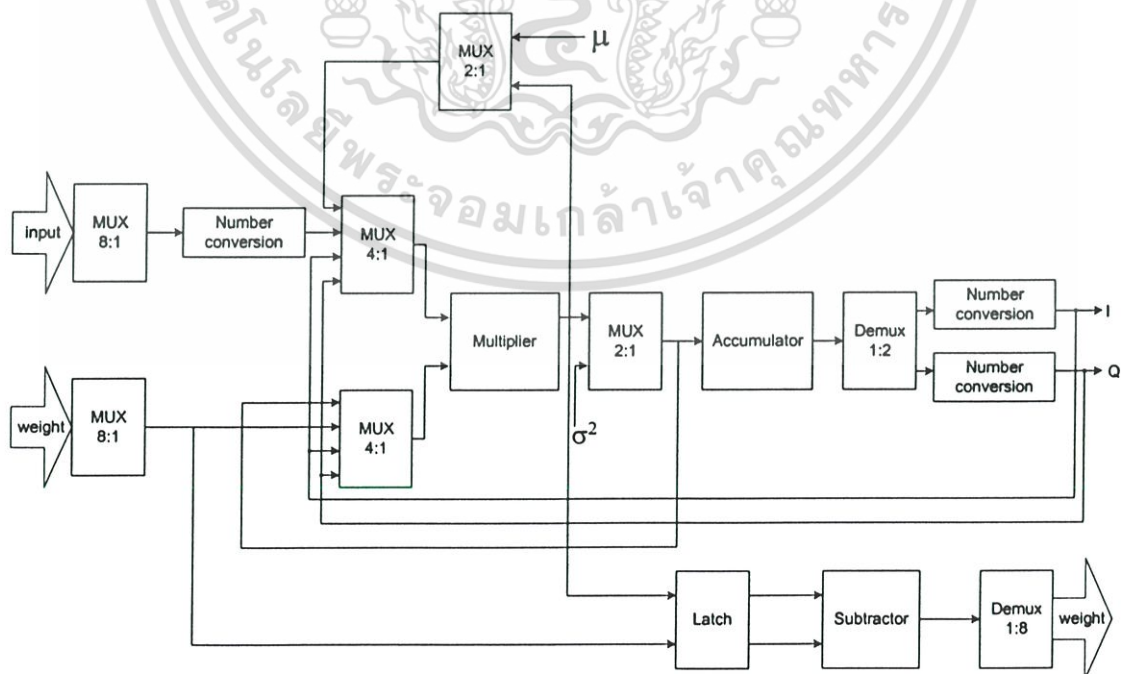
ตารางที่ 4.17 แสดงรายการอุปกรณ์ในระดับเกตที่ได้จากการสังเคราะห์ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA ตารางที่ 4.18 แสดงรายละเอียดการใช้โครงสร้างภายใน FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่ออุปกรณ์ในตารางที่ 4.17 ตารางที่ 4.19 แสดงเวลาการทำงานของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA โดยคาบที่น้อยที่สุด (Minimum period) ของส่วนประมวลผลเป็น 114.800 ns แต่เนื่องจากวงจรที่ออกแบบเป็นวงจรที่ทำงานที่ขอบของสัญญาณนาฬิกาที่แตกต่างกัน ใช้ทั้งขอบขาขึ้นและขาลง ดังนั้นคาบที่น้อยที่สุดของสัญญาณนาฬิกาจึงเป็นครึ่งหนึ่งของ Minimum period ดังนั้นความถี่ที่มากที่สุดของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในส่วนประมวลผลปรับตัว CMA นี้คือ 17.422

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

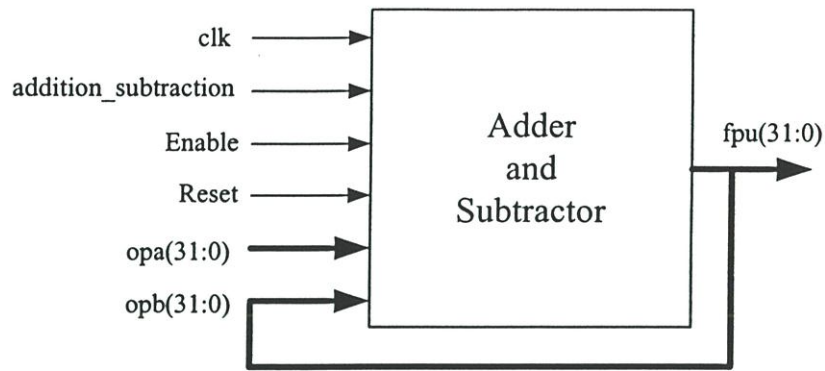
MHz และการสร้างส่วนประมวลผลปรับตัว CMA จะใช้เกทของ FPGA ทั้งหมด 24,878 เกท การ
ใช้จำนวนเกทอาจมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนค่าคงที่ μ และค่าเริ่มต้นเวกเตอร์ถ่วง
น้ำหนัก W_0



รูปที่ 4.19 ผังงานของการประมวลผล CMA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 การเชื่อมต่อของวงจรสะสม

ตารางที่ 4.17 รายการอุปกรณ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

อุปกรณ์	จำนวน
Registers	56
1-bit register	37
12-bit register	2
24-bit register	2
25-bit register	1
32-bit register	11
6-bit register	2
8-bit register	1
Multiplexers	4
32-bit 4-to-1 multiplexer	2
32-bit 8-to-1 multiplexer	1
8-bit 8-to-1 multiplexer	1
Logic shifters	9
24-bit shifter logical left	2
24-bit shifter logical right	6
7-bit shifter logical left	1
Adders/Subtractors	21
11-bit adder	2
24-bit adder	1
25-bit adder carry in	1
4-bit adder	1

6-bit adder	1
7-bit adder carry out	1
8-bit adder	1
8-bit subtractor	1
9-bit adder	1
9-bit subtractor	1
Multipliers	1
13x13-bit multiplier	1
Comparators	1
7-bit comparator greatequal	1
7-bit comparator lessequal	1
8-bit comparator greatequal	1
Xors	1
1-bit xor3	1

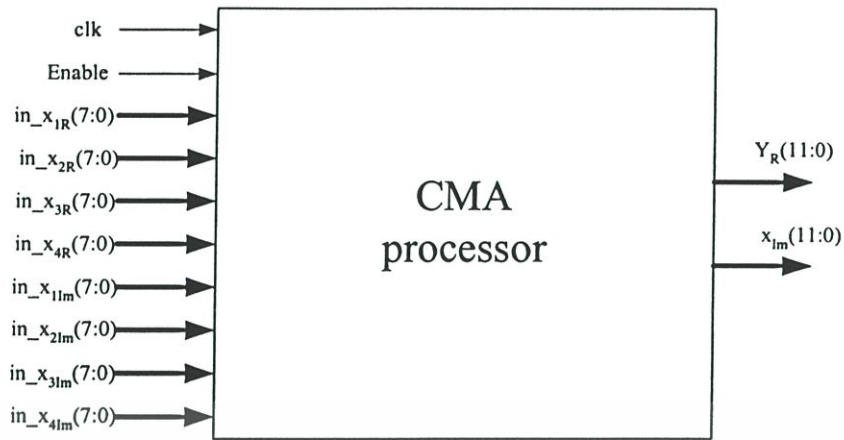
ตารางที่ 4.18 รายละเอียดการใช้ FPGA หลังจากการวางและเชื่อมต่อ ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

ประเภทอุปกรณ์	จำนวน ทั้งหมด	จำนวน ที่ใช้	จำนวนที่ใช้ (%)
Slices	4800	1404	29
Slice Flip Flops	9600	763	7
4 input LUTs	9600	2605	27
bonded IOBs	162	89	54
GCLKs	4	1	25

ตารางที่ 4.19 เวลาของการคำนวณของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

ประเภทของเวลา	เวลา (ns)
Minimum period	114.800
Minimum input arrival time before clock	3.239
Maximum output required time after clock	6.140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การเชื่อมต่อภายนอกของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

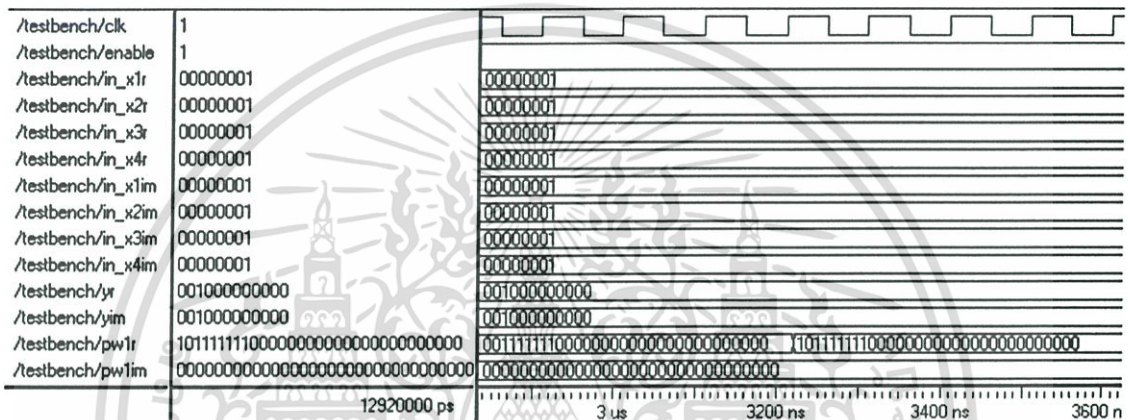
4.7.2 การทดสอบส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

รูปที่ 4.22 แสดงการเชื่อมต่อภายนอกของส่วนประมวลผลปรับตัว CMA โดย clk เป็นสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในระบบ Enable เป็นอินพุตเพื่อกำหนดการเริ่มต้นการทำงานของส่วนประมวลผล in_x1r, in_x2r, in_x3r และ in_x4r เป็นอินพุต 8 บิตของสัญญาณ I ขององค์ประกอบที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ in_x1im, in_x2im, in_x3im, และ in_x4im เป็นอินพุต 8 บิตของสัญญาณ Q ขององค์ประกอบที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ yr และ yim เป็นสัญญาณเอาต์พุต 12 บิตของสัญญาณ I และ Q ตามลำดับ

รูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบส่วนประมวลผลปรับตัว CMA โดยใช้พารามิเตอร์จริงในการทดสอบ สัญญาณนาฬิกาที่ใช้เป็นตามตารางที่ 4.20 กำหนดให้ $\mu=1$ และ $\sigma^2=1$ อินพุตเป็น $x(k)=[1+1j \ 1+1j \ 1+1j \ 1+1j]^T$ ค่าเริ่มต้นของเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักเป็น $w_0(k)=[1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ จากสมการที่ 4.3 จะได้เอาต์พุตเป็น $y(k)=1+1j$ หมายความว่าถ้าการเชื่อมต่อภายนอกเป็นดังรูปที่ 4.22 แล้ว จะได้ $y_r=1$ และ $y_{im}=1$ ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ 4.4 เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักในช่วงเวลาถัดไปเป็น $w(k+1)=[-1 \ -2 \ -2 \ -2]^T$ รูปที่ 4.23 pw1r, pw1im เป็นค่าถ่วงน้ำหนักค่าจริงและค่าจินตภาพขององค์ประกอบที่ 1 ตามลำดับ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าได้ค่าถ่วงน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงถูกต้อง pw1r เปลี่ยนจาก 1 เป็น -1 pw1im ไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงเป็นศูนย์ เอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ y_r และ y_{im} ไม่เป็นหนึ่งตามที่คำนวณเนื่องจากในส่วนของ การแปลงจำนวนทศนิยมกำหนดให้ถ้าเลขนัยสำคัญเป็น 127 จะมีการเลื่อนบิต 3 ครั้ง ดังนั้นจำนวนทศนิยมที่มีค่าเป็นหนึ่งจะแทนด้วย "001000000000" ในจำนวนเต็ม เหตุผลที่ต้องมีการปรับสัญญาณที่แสดงเพื่อให้สัญญาณอยู่ในช่วงการใช้งานของ DAC

ตารางที่ 4.20 ตัวแปรของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการทดสอบ

ประเภทของเวลา	เวลา(ns)
Clock high time	120
Clock low time	120
Input setup time	10
Output valid delay	10
Offset	0



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบส่วนประมวลผลปรับตัว CMA

4.8 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายการออกแบบและสร้างส่วนประมวลผลปรับตัว โดยใช้ CMA เป็นอัลกอริทึมในการออกแบบและสร้าง ด้วยเหตุผลในทางปฏิบัติซึ่งง่ายต่อการออกแบบและสร้าง นอกจากนี้ CMA ยังไม่ต้องการสัญญาณอ้างอิงเพื่อช่วยในการปรับตัวด้วย ในการออกแบบส่วนประมวลผลนี้จะประกอบด้วยวงจรพื้นฐานที่สำคัญ คือ วงจรบวก วงจรลบ และวงจรคูณ ดังนั้นในบทนี้จึงได้ทำการอธิบายวิธีการออกแบบวงจรเหล่านี้ด้วย เพื่อประสิทธิภาพในการคำนวณจึงออกแบบให้ทำงานด้วยจำนวนทศนิยม ดังนั้นจึงได้อธิบายวงจรการแปลงจำนวนระหว่างจำนวนเต็มและจำนวนทศนิยมด้วย นอกจากนี้ยังได้แสดงสมรรถนะของวงจรแต่ละวงจร รวมทั้งแสดงผลการทดสอบการทำงานของวงจรด้วย การทดสอบการปรับตัวของส่วนประมวลผลปรับตัวจะอธิบายให้บทถัดไป

บทที่ 5

คุณสมบัติสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA และการเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่น

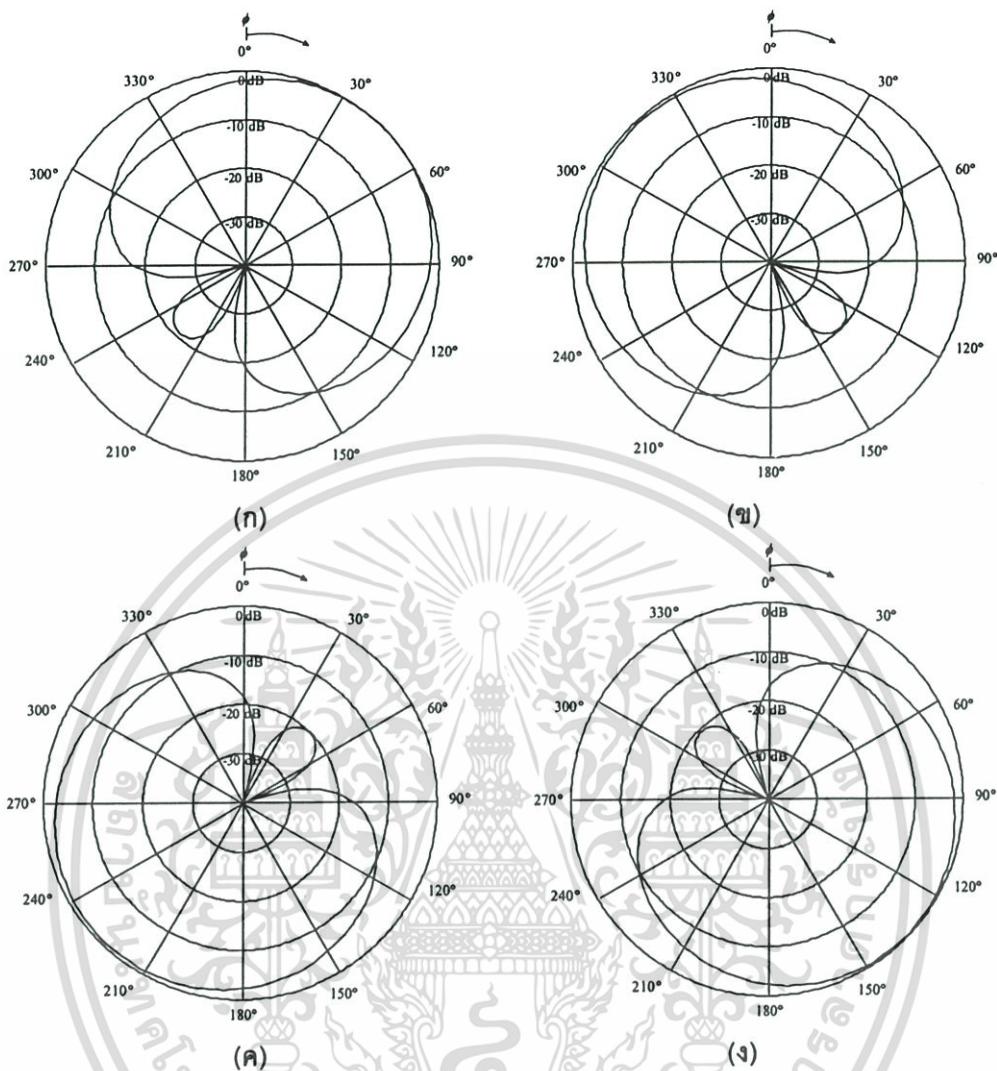
5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์บทนี้จะวิเคราะห์การปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA โดยโครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสสี่องค์ประกอบ และทดสอบสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ซึ่งได้สร้างด้วย FPGA หัวข้อ 5.2 นำเสนอการนำสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสสี่องค์ประกอบมาเป็นส่วนเริ่มต้นการปรับตัว CMA หัวข้อ 5.3 จะวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศที่นำเสนอ หัวข้อ 5.4 จะทดสอบการปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ซึ่งทำการสร้างด้วย FPGA ในการทดสอบจะเป็นไปตามเงื่อนไขในหัวข้อ 5.3 และสรุปผลที่ได้ทั้งหมดในหัวข้อที่ 5.5

5.2 สายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA และการเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่น

ความล่าช้าในการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมเป็นปัญหาที่สำคัญของการปรับตัว CMA ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการแก้ปัญหาการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม โดยใช้การปรับลำคลื่น (beam switching) ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสสี่องค์ประกอบ เพื่อใช้เป็นส่วนเริ่มต้น (initialization) ในการปรับตัว CMA

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสสี่องค์ประกอบ ซึ่งสามารถปรับลำคลื่นได้สี่ทิศทางระหว่างสายอากาศแถวลำดับวงกลมแต่ละองค์ประกอบ รูปที่ 5.1 (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลมสี่องค์ประกอบ โดยมีลำคลื่นหลักชี้ในทิศ 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศาตามลำดับ เฟสของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ [16] แสดงในบทที่ 3 รูปที่ 5.2 แสดงระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA โครงสร้างของสายอากาศเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสสี่องค์ประกอบ สัญญาณที่ได้รับได้จากการปรับลำคลื่นทั้งสี่ทิศทางจะถูกวัดและเปรียบเทียบกันเพื่อหาลำคลื่นที่มีกำลังงานของสัญญาณรับมากที่สุด และปรับลำคลื่นให้ชี้ไปในทิศนั้น เพื่อเป็นส่วนเริ่มต้นการปรับตัว CMA

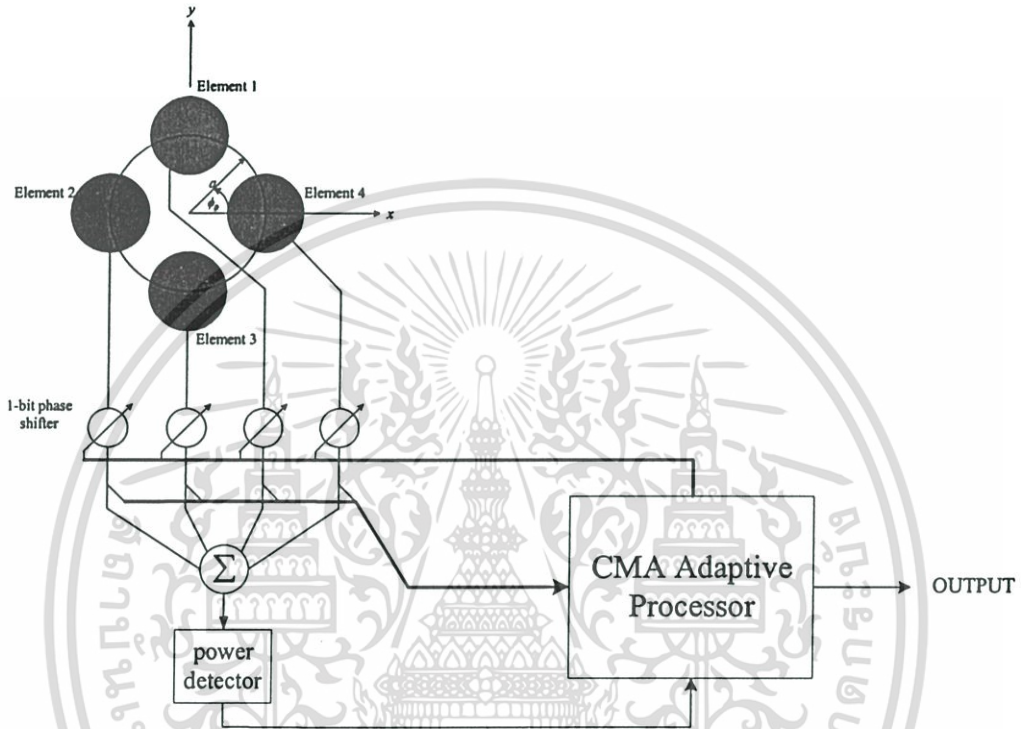


รูปที่ 5.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้ เมื่อ
 (ก) $\phi_0 = 45^\circ$ (ข) $\phi_0 = 135^\circ$ (ค) $\phi_0 = 225^\circ$ (ง) $\phi_0 = 315^\circ$

5.3 คุณสมบัติของสายแถวลำดับปรับตัว CMA เริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่น

คุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA และการเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลมนั้น สามารถวิเคราะห์ด้วยการจำลองระบบของสายอากาศ โดยกำหนดให้สัญญาณพียงประสงค์และสัญญาณแทรกสอดเป็นสัญญาณที่มอดูเลตด้วยวิธี $\frac{\pi}{4}$ QPSK แพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ AWGN (Additive White Gaussian Noise) ในสภาพแวดล้อมต่างๆไปของการสื่อสารไร้สายนั้น กำลังงานของสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม (cochannel interference) ที่รับได้จะน้อยกว่ากำลังงานของสัญญาณพียงประสงค์ และในทำนองเดียวกันสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการจากหายของคลื่นหลายวิถี (multipath fading) จะมี

กำลังงานน้อยกว่าสัญญาณที่รับได้จากคลื่นทางตรง (direct path) ดังนั้นจึงกำหนดให้กำลังงานของสัญญาณพึงประสงค์มากกว่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอด 3 dB ซึ่งข้อกำหนดนี้จะทำให้สายอากาศแถวลำดับวงกลมสามารถปรับลำคลื่นหลักที่ไปยังทิศที่สายอากาศสามารถรับกำลังงานของสัญญาณได้มากที่สุดซึ่งเป็นทิศการตกกระทบบของสัญญาณพึงประสงค์



รูปที่ 5.2 สายอากาศปรับตัว CMA ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับวงกลมปรับเฟสได้

คุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA และการเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลม สามารถแบ่งการวิเคราะห์หรือออกเป็น 2 กรณี ตามมุมตกกระทบบของสัญญาณพึงประสงค์ คือ

1. สัญญาณพึงประสงค์มีมุมตกกระทบบในจุดภาคที่หนึ่ง
2. สัญญาณพึงประสงค์มีมุมตกกระทบบนอกจุดภาคที่หนึ่ง

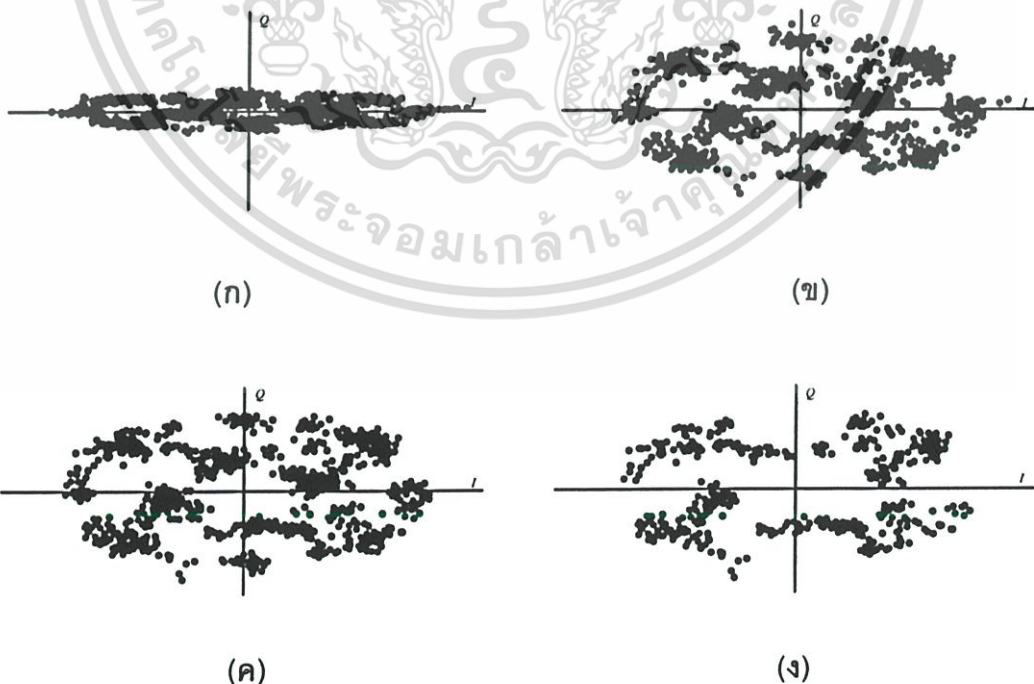
กรณีที่สัญญาณพึงประสงค์มีมุมตกกระทบบในจุดภาค (quadrant) ที่หนึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อสมมติฐานว่าการปรับลำคลื่นเพื่อเป็นส่วนเริ่มต้นของการปรับตัว CMA สามารถเพิ่มอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของการปรับตัว CMA ได้ กรณีที่สองเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปกรณีที่หนึ่งว่าสามารถใช้ได้กับทุกทิศทางของการปรับลำคลื่น

5.3.1 สัญญาณพียงประสงคมีมุมตกกระทบอยู่ในจุดภาคที่หนึ่ง

กรณีนี้สามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้ตามตารางที่ 5.1 กรณีที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สัญญาณพียงประสงคตกกระทบใกล้ลาคลื่นหลักมากกว่าสัญญาณแทรกสอด กรณีที่ 2 เป็นการวิเคราะห์สัญญาณแทรกสอดตกกระทบห่างจากลาคลื่นหลักมากกว่ากรณีที่ 1 กรณีที่ 3 สัญญาณแทรกสอดตกกระทบใกล้ลาคลื่นมากกว่าสัญญาณพียงประสงค และกรณีที่ 4 เป็นการปรับลาคลื่นเพื่อให้อัญญาณพียงประสงคตกกระทบใกล้ลาคลื่นหลักมากกว่าสัญญาณแทรกสอด ทุกกรณีจะเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้การปรับลาคลื่นหลัก

ตารางที่ 5.1 สัญญาณพียงประสงคมีมุมตกกระทบในจุดภาคที่หนึ่ง

กรณี	มุม		
	สัญญาณพียงประสงค (ϕ_D)	สัญญาณแทรกสอด (ϕ)	ลาคลื่นหลักที่ใช้เริ่มต้น (ϕ)
1	30°	80°	45°
2	30°	120°	45°
3	80°	30°	45°
4	80°	30°	135°

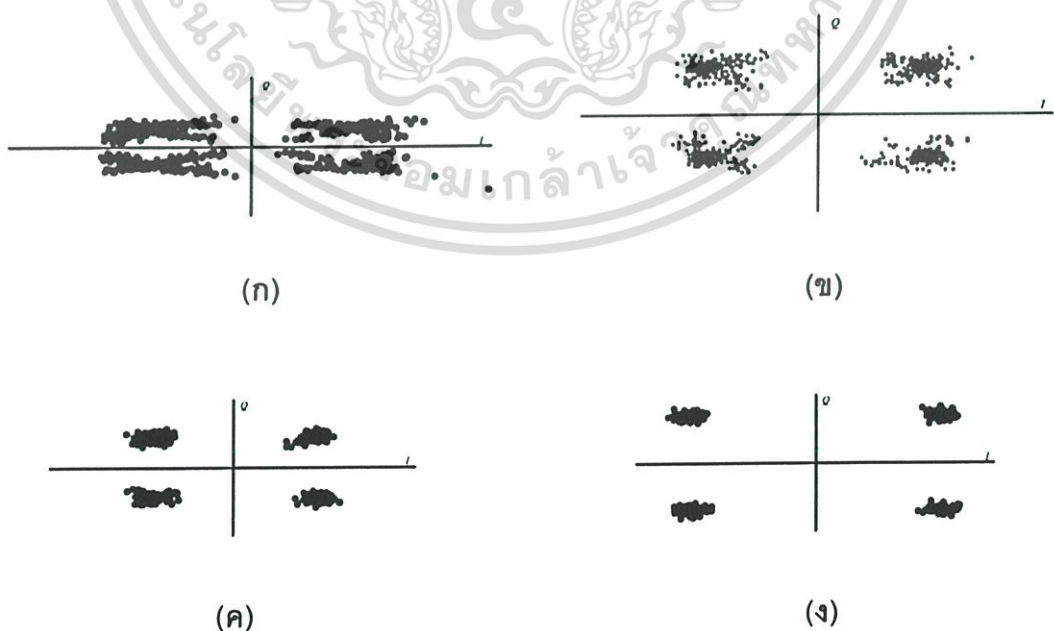


รูปที่ 5.3 Constellation diagram ของ CMA เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi = 80^\circ$ ไม่ใช้การปรับลาคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลังการเข้าครั้งที่ (ก) 0 (ข) 256 (ค) 512 (ง) 1024 จุดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เมื่อสัญญาณพียงประสงค์ตกกระทบทำมุม 30° ($\phi_b = 30^\circ$) กับสายอากาศในแนวแอสซิเมทและ สัญญาณแทรกสอดตกกระทบทำมุม 80° ($\phi_r = 80^\circ$) กับสายอากาศในแนวแอสซิเมท สัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA สามารถแสดงได้โดยใช้ constellation diagram รูปที่ 5.3 เป็นการปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ที่ไม่ใช้การปรับลำคลื่น ในการเริ่มต้นกระบวนการปรับตัว รูปที่ 5.3 (ก) แสดง constellation diagram หลังการทำซ้ำครั้งที่ 0 (0 iterations) ของ CMA แสดงว่าแบบรูปตา (eye pattern) ปิด ซึ่งหมายความว่าสัญญาณที่ได้มีความผิดพลาดสูง เมื่อเพิ่มจำนวนการทำซ้ำขึ้น สัญญาณที่ได้จะมีความผิดพลาดต่ำลง แบบรูปตาจะเปิดมากขึ้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยรูปที่ 5.3 (ข) (ค) และ (ง) ซึ่งแสดง constellation diagram หลังการทำซ้ำครั้งที่ 256 512 และ 1024 ตามลำดับ สัญญาณจะมีการจับกลุ่มกันมากขึ้นเรื่อยๆ

เมื่อทำการปรับเฟสของการกระตุ้นของสายอากาศแถวลำดับวงกลม องค์ประกอบที่ 1 2 3 และ 4 เป็น -40 40 40 และ -40 ตามลำดับ เพื่อปรับลำคลื่นหลักให้ชี้ในทิศ 45 องศา ตามแนวแอสซิเมท ($\phi_0 = 45^\circ$) ลำคลื่นนี้จะถูกใช้ในการเริ่มต้นการปรับตัว CMA รูปที่ 5.4 แสดง constellation diagram ของสัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA สัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศปรับตัว CMA ในรูปที่ 5.4 (ข) มีการจับกลุ่มกันคล้ายสัญญาณ $\frac{\pi}{4}$ QPSK มากกว่า สัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศปรับตัว CMA ในรูปที่ 5.4 (ก) แสดงว่าแบบรูปตาของสัญญาณเอาต์พุตหลังการทำซ้ำครั้งที่ 256 ของ CMA จะเปิดมากกว่าสัญญาณเอาต์พุตหลังการทำซ้ำครั้งที่ 0 ของ CMA แบบรูปตาของสัญญาณเอาต์พุตของ CMA จะเปิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนการทำซ้ำมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ก) (ข) (ค) และ (ง)

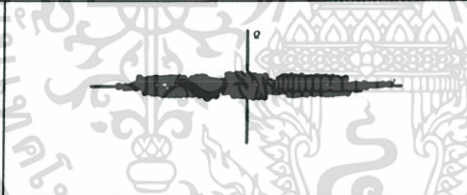
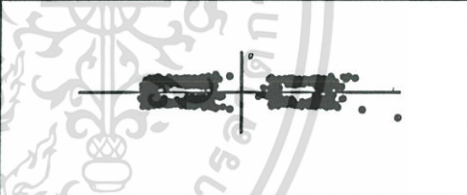

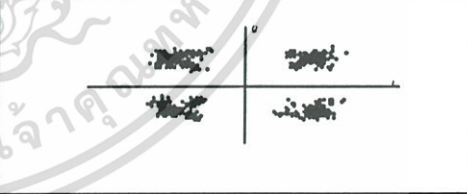
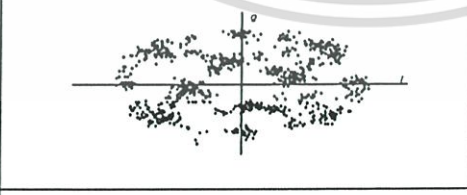
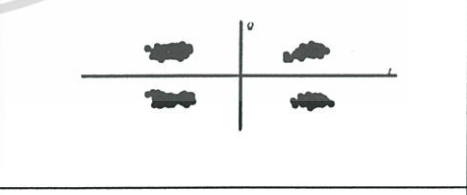
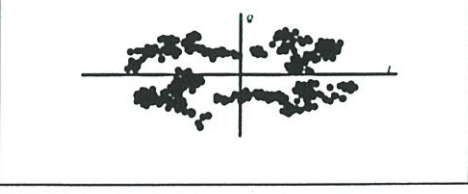
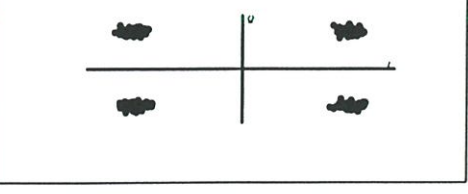


รูปที่ 5.4 Constellation diagram ของ CMA เมื่อ $\phi_b = 30^\circ$ $\phi_r = 80^\circ$ ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$

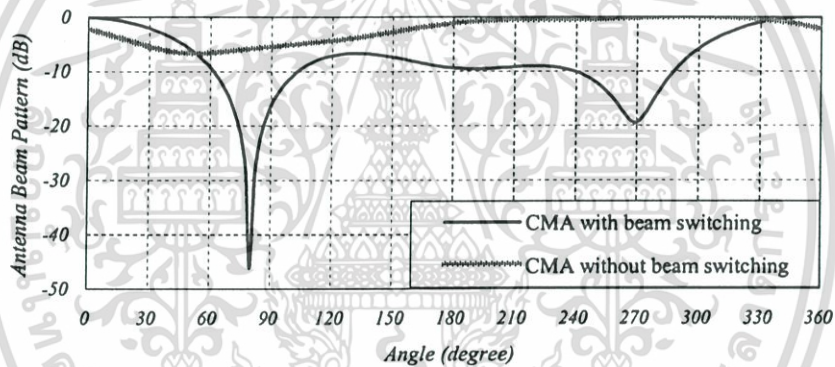
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ภายใต้กฎหมายลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ฉบับที่ 1024 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ระหว่างการไม่ใช้การปรับลำคลื่นและการใช้การปรับลำคลื่นเพื่อเริ่มต้นการปรับตัว CMA ที่จำนวนการทำซ้ำเท่ากัน แบบรูปตาของสัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ที่ใช้การปรับลำคลื่นจะเปิดมากกว่าการไม่ใช้การปรับลำคลื่น สัญญาณเอาต์พุตที่ใช้การปรับลำคลื่นจะมีขนาดของสัญญาณคงที่มากกว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ไม่ใช้การปรับลำคลื่น เฟสของสัญญาณเอาต์พุตที่ใช้การปรับลำคลื่นจะใกล้เคียง $\frac{\pi}{4}$ มากกว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ไม่ใช้การปรับลำคลื่น ซึ่งบอกได้ว่าสัญญาณที่ใช้การปรับลำคลื่นจะเหมือนสัญญาณ $\frac{\pi}{4}$ QPSK มากกว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ไม่ใช้การปรับลำคลื่น จากการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA โดยโครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมสี่องค์ประกอบซึ่งถูกปรับลำคลื่นหลักให้ชี้ไปยังทิศทางที่มีกำลังงานของสัญญาณรับมากที่สุดจะมีการปรับตัวได้ดีกว่าสายอากาศปรับตัว CMA โดยสายอากาศแถวลำดับวงกลมไม่มีการปรับลำคลื่น

ตารางที่ 5.2 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_s = 80^\circ$

หลังการทำซ้ำครั้งที่	ไม่ใช้การปรับลำคลื่น	ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$
0		
256		
512		
1024		

เพื่อให้แน่ใจว่าการปรับตัว CMA สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้ โดยไม่กำจัดสัญญาณพึงประสงค์ จะพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ที่การทำซ้ำครั้งที่ 1024 รูปที่ 5.5 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยเส้นสีดำแทนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA โดยเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นให้ลำคลื่นหลักชี้ในทิศ 45 องศา ($\phi_0 = 45^\circ$) และเส้นสีเทาแทนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งไม่ใช้การปรับลำคลื่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้การปรับลำคลื่นจะเกิดศูนย์ (null) ที่มุม 80° ซึ่งเป็นทิศทางการตกกระทบของสัญญาณแทรกสอด แสดงให้เห็นว่ากระบวนการปรับตัว CMA ซึ่งเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้ โดยมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise Ratio; SINR) เป็น 44.07 dB ในทำนองเดียวกัน การปรับตัว CMA ที่ไม่ใช้การปรับลำคลื่นมี SINR ที่การทำซ้ำครั้งที่ 1024 เท่ากับ 0.35dB

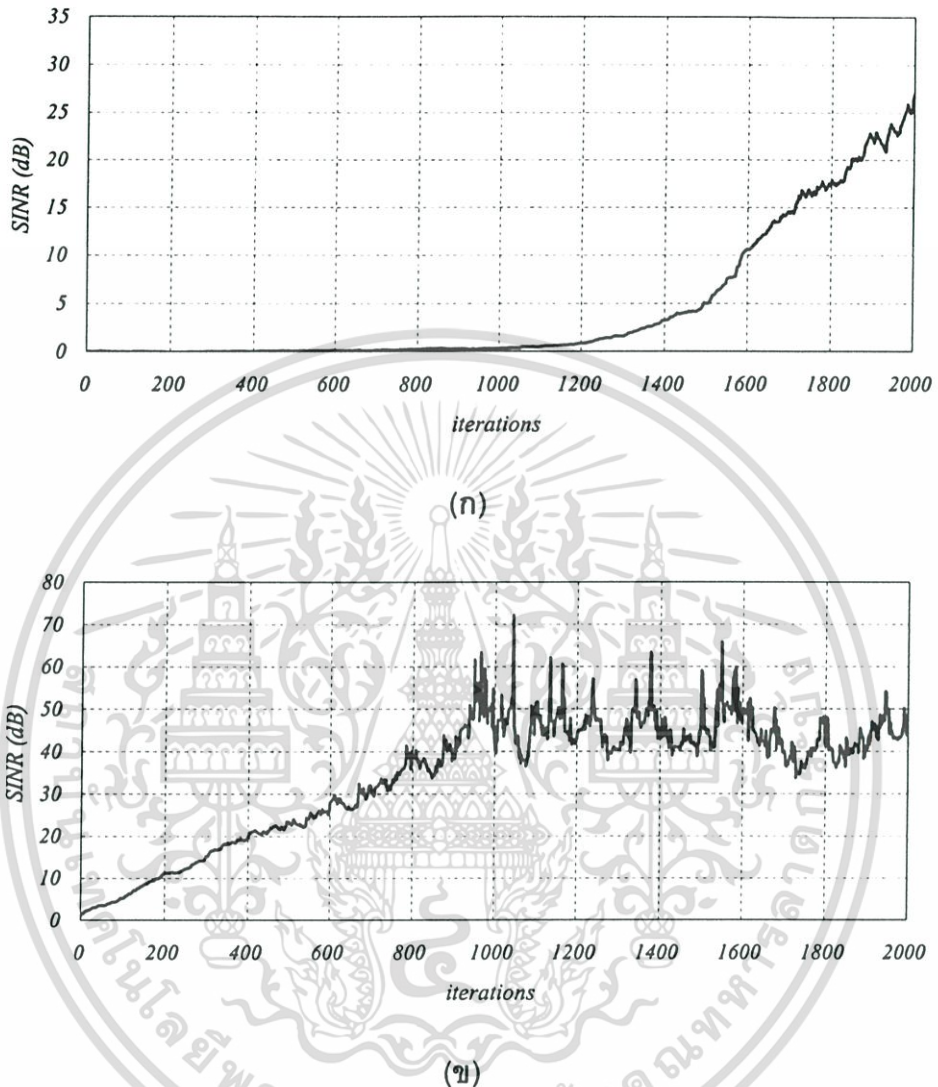


รูปที่ 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_0 = 80^\circ$

รูปที่ 5.6 (ก) และ (ข) แสดงพฤติกรรมกรงูเข้าของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_D = 30^\circ$ $\phi_0 = 80^\circ$ โดยรูปที่ 5.6 (ก) เป็นการกรงูเข้าของสายอากาศโดยไม่ใช้การปรับลำคลื่น ในขณะที่รูปที่ 5.6 (ข) เป็นการกรงูเข้าของสายอากาศโดยใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$ การกรงูเข้าของ CMA คือการกรงูเข้าหาคำตอบที่เหมาะสมซึ่งก็คือ Wiener solution โดยเมื่อเกิดการกรงูเข้าหาคำตอบจุดที่เป็นคำตอบจะทำให้เกรเดียนต์ของ cost function เป็นศูนย์และจะหยุดการปรับตัวเมื่อเกิดการกรงูเข้าแล้ว เนื่องจาก CMA เป็นกรณีเฉพาะชนิดหนึ่งของ LMS ดังนั้นการกรงูเข้าหา Wiener solution จะไม่คงที่ แต่โดยเฉลี่ยแล้วการกรงูเข้าจะเป็นไปตามทิศทางของ steepest descent โดยในรูปที่ 5.6 (ก) และ (ข) การกรงูเข้าจะแสดงด้วยค่า SINR ที่คงที่ และจะเห็นว่าสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ที่ใช้การปรับลำคลื่นให้ลำคลื่นหลักชี้ไปในทิศที่กำลังงานของสัญญาณรับมากที่สุด

จะมีอัตราการกรงูเข้าหาคำตอบสูงกว่าการไม่ใช้การปรับลำคลื่น จึงสามารถสรุปได้ว่าการนำการเอกซารันเป็นเอกซารันที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับลำดับขึ้นมาใช้เพื่อเริ่มต้นการปรับตัว CMA จะทำให้อัตราการลู่เข้าหาคำตอบของการปรับตัวสูงขึ้น



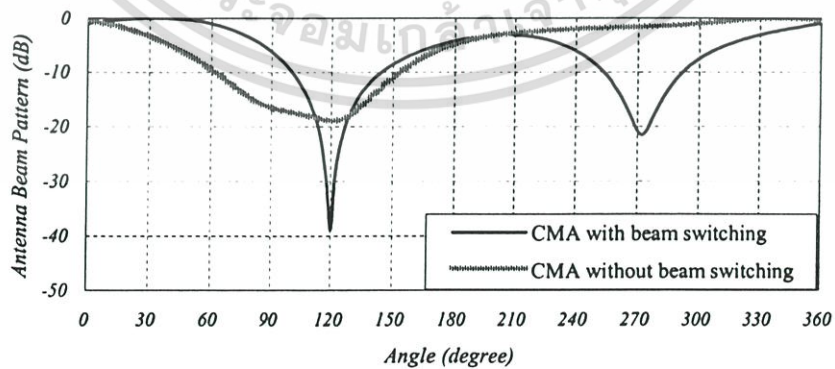
รูปที่ 5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_0 = 30^\circ$, $\phi_1 = 80^\circ$ (ก) ไม่ใช้การปรับลำดับ
(ข) ใช้การปรับลำดับ $\phi_0 = 45^\circ$

2. เมื่อเปลี่ยนมุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดเป็น 120 องศาในแนวเอซิมัท ($\phi_1 = 120^\circ$) และให้มุมตกกระทบของสัญญาณพึงประสงค์เป็น $\phi_0 = 30^\circ$ เช่นเดิม ตารางที่ 5.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของการปรับตัว CMA เมื่อไม่ใช้การปรับลำดับและใช้การปรับลำดับ $\phi_0 = 45^\circ$ เมื่อเปรียบเทียบ constellation diagram ของสัญญาณเอาต์พุตการปรับตัว CMA ระหว่างตารางที่ 5.2 และ 5.3 จะเห็นว่าแบบรูปตาของสัญญาณเอาต์พุตการปรับตัว CMA เมื่อมุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดเป็น $\phi_1 = 120^\circ$ จะเปิดมากกว่าสัญญาณเอาต์พุตการปรับตัว CMA เมื่อมุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดเป็น $\phi_1 = 80^\circ$ สามารถสรุปได้ว่าเมื่อมุมตกกระทบ

ของสัญญาณแทรกสอดอยู่ห่างจากลำคลื่นหลักมากขึ้นแล้วการปรับตัวของ CMA จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

ตารางที่ 5.3 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อ $\phi_0 = 30^\circ$ $\phi_1 = 120^\circ$

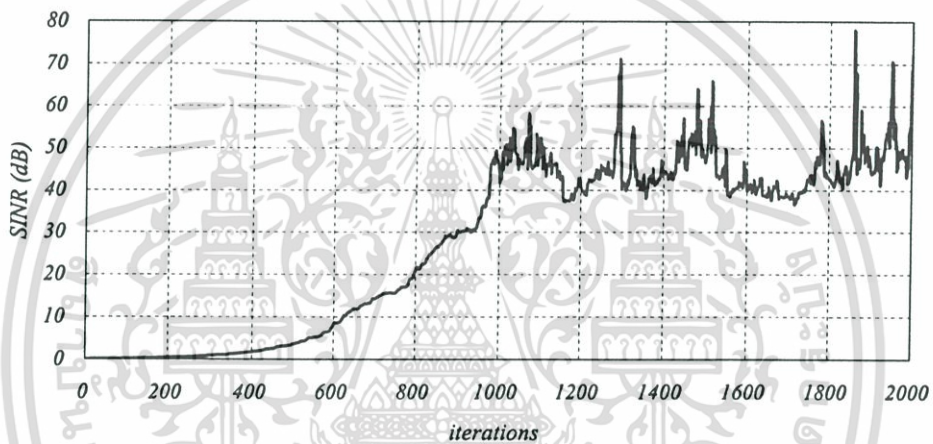
หลังการ ทำซ้ำครั้งที่	ไม่ใช้การปรับลำคลื่น	ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$
0		
256		
512		
1024		



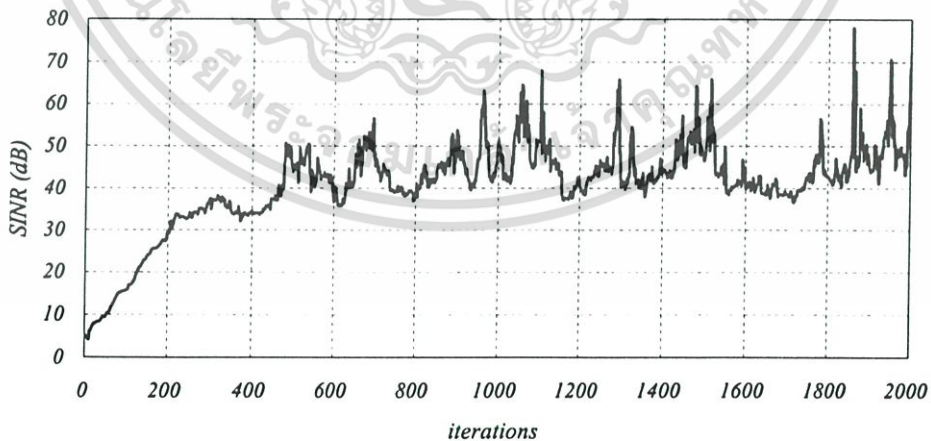
รูปที่ 5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_0 = 30^\circ$ $\phi_1 = 120^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกัน เพื่อให้แน่ใจว่าการปรับตัว CMA สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้ โดยไม่กำจัดสัญญาณพึงประสงค์ ในกรณีที่เปลี่ยนมุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดให้ห่างจากลำคลื่นหลักมากขึ้น จะพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ที่การทำซ้ำครั้งที่ 1024 รูปที่ 5.7 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้การปรับลำคลื่น ให้ลำคลื่นหลักชี้ในทิศ 45° จะเกิด null ที่มุม 120° ซึ่งเป็นมุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอด โดย SINR เท่ากับ 38.89 dB แสดงว่ากระบวนการ CMA สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้ถูกต้อง ในทำงานเดียวกัน SINR ในกรณีของกระบวนการ CMA ซึ่งไม่ได้รับการเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นมีค่าเท่ากับ 15.58 dB



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.8 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_d = 30^\circ$ $\phi_l = 120^\circ$ (ก) ไม่ใช้การปรับลำคลื่น

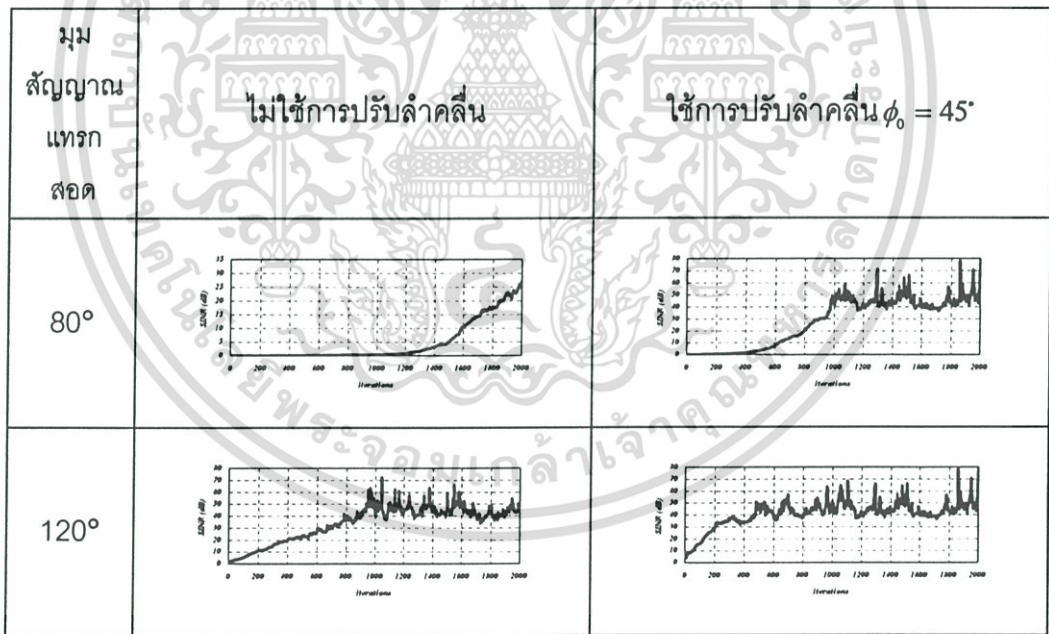
(ข) ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8 (ก) และ (ข) แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_0 = 30^\circ$ $\phi_r = 120^\circ$ โดยรูปที่ 5.8 (ก) เป็นการลู่เข้าของสายอากาศโดยใช้การปรับลำคลื่น ในขณะที่รูปที่ 5.8 (ข) เป็นการลู่เข้าของสายอากาศโดยใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$ แสดงให้เห็นว่าการปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ที่ใช้การปรับลำคลื่นด้วย $\phi_0 = 45^\circ$ จะมีอัตราการลู่เข้าหาคำตอบมากกว่าการปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ที่ไม่ใช้การปรับลำคลื่น

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบการลู่เข้าหาคำตอบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ระหว่างมุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดเป็น $\theta_r = 80^\circ$ และ $\theta_r = 120^\circ$ เมื่อใช้การปรับลำคลื่นสามารถสรุปได้ว่า ถ้ามุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดอยู่ห่างจากลำคลื่นหลักมากขึ้น แล้วอัตราการลู่เข้าหาคำตอบจะเพิ่มขึ้น และเมื่อไม่ใช้การปรับลำคลื่นจะสามารถสรุปได้ว่า ถ้าสัญญาณแทรกสอดอยู่ห่างจากสัญญาณแทรกสอดมากขึ้น อัตราการลู่เข้าหาคำตอบจะเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 5.4 การลู่เข้าหาคำตอบของการปรับตัว CMA


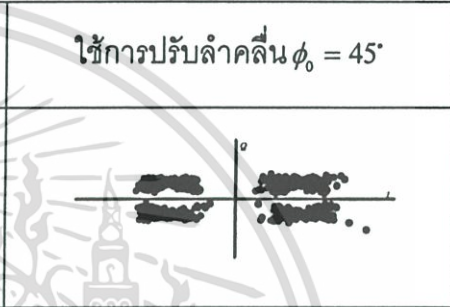

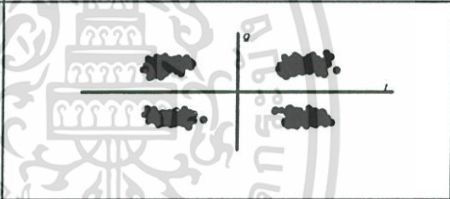
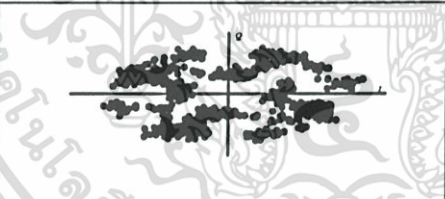





3. เปลี่ยนมุมตกกระทบของสัญญาณพึงประสงค์และสัญญาณแทรกสอดเป็น $\theta_p = 80^\circ$ และ $\theta_r = 30^\circ$ ตามลำดับ ตารางที่ 5.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของการปรับตัว CMA เมื่อไม่ใช้การปรับลำคลื่นและใช้การปรับลำคลื่น เพื่อให้แน่ใจว่าการปรับตัว CMA สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้ โดยไม่กำจัดสัญญาณพึงประสงค์ จะพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและการลู่เข้าหาคำตอบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงแบบรูปการ

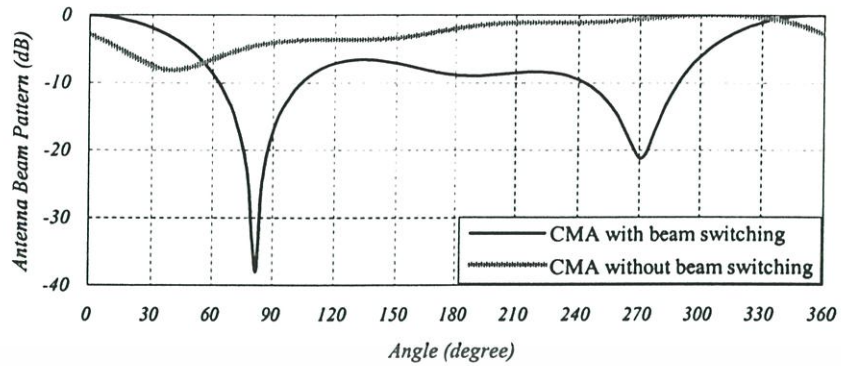
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นาไปไซบะระโยชนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายคลื่นและการรู่เข้าหาคำตอบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ตามลำดับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$ จะเกิด null ที่มุม 80° องศา ซึ่งเป็นมุมตกกระทบของสัญญาณพึงประสงค์ โดย SINR รู่เข้าหาค่าที่เป็นลบ แสดงว่ากระบวนการ CMA ไม่สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้ถูกต้องแต่เป็นการกำจัดสัญญาณพึงประสงค์ ในขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้การปรับลำคลื่นมีค่า SINR รู่เข้าหาค่าที่เป็นบวกและเท่ากับ 2.87 dB ซึ่งดีกว่าในกรณีที่ใช้การปรับลำคลื่นหลัก $\phi_0 = 45^\circ$

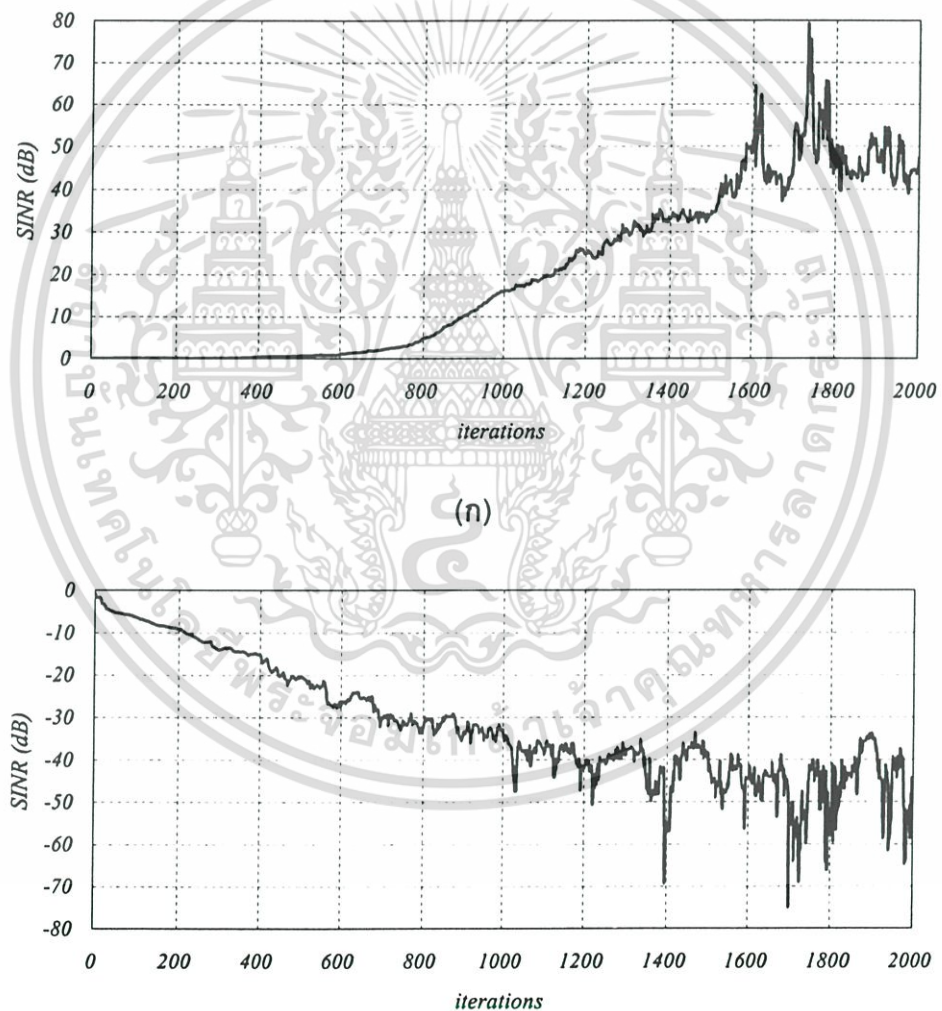
ตารางที่ 5.5 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อ $\phi_0 = 80^\circ$ $\phi_1 = 30^\circ$

หลังการทำซ้ำครั้งที่	ไม่ใช้การปรับลำคลื่น	ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$
0		
256		
512		
1024		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$



(ข)

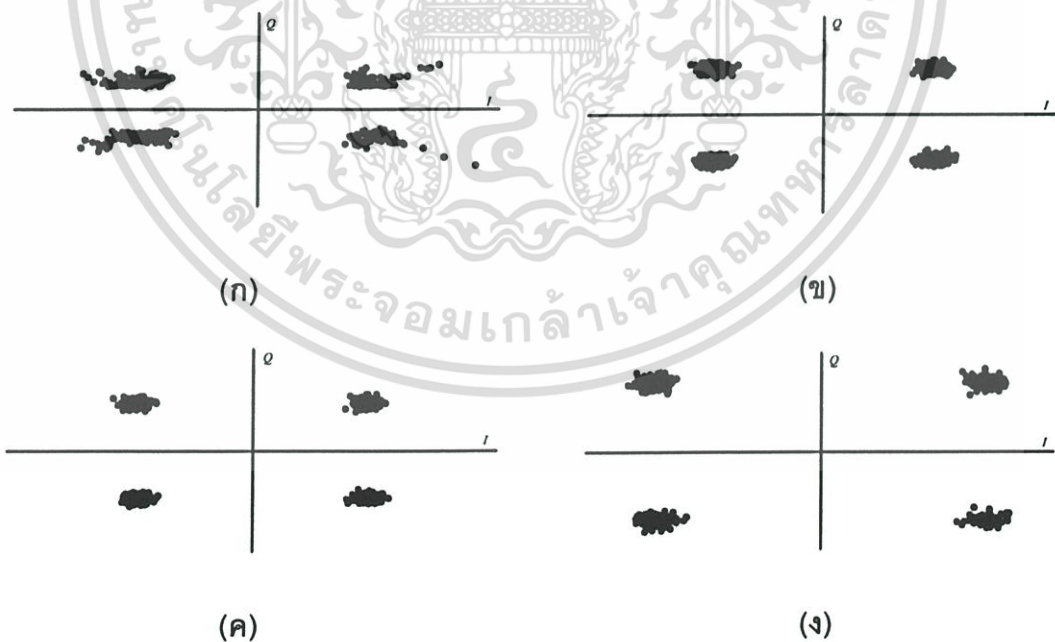
รูปที่ 5.10 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$

(ก) ไม่มีการเริ่มต้นด้วยการปรับลาคคลื่น (ข) เริ่มต้นด้วยการปรับลาคคลื่น $\phi_0 = 45^\circ$

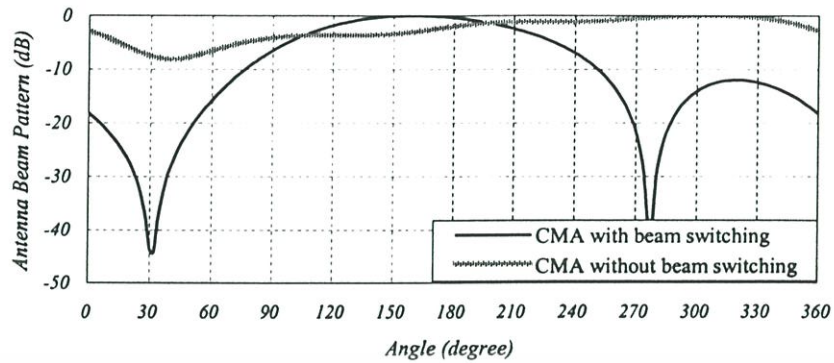
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อมุมตกกระทบของสัญญาณพียงประสงค์และสัญญาณแทรกสอดเป็น $\theta_0 = 80^\circ$ และ $\theta_1 = 30^\circ$ ตามลำดับ และปรับเฟสของการกระตุ้นของสายอากาศแถวลำดับวงกลม องค์ประกอบที่ 1 2 3 และ 4 เป็น -40 -40 40 และ 40 ตามลำดับ ให้ลำคลื่นหลักชี้ในทิศ 135° องศา ($\phi_0 = 135^\circ$) มุมตกกระทบของสัญญาณพียงประสงค์จะอยู่ใกล้ลำคลื่นหลักมากกว่ามุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอด รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของการปรับตัว CMA เมื่อใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 135^\circ$ รูปที่ 5.12 และ 5.13 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและการลู่อเข้าหาคำตอบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ตามลำดับ จะเห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 135^\circ$ จะเกิด null ที่มุม 30° องศา ซึ่งเป็นมุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอด โดย SINR ลู่อเข้าหาค่าที่เป็นบวก

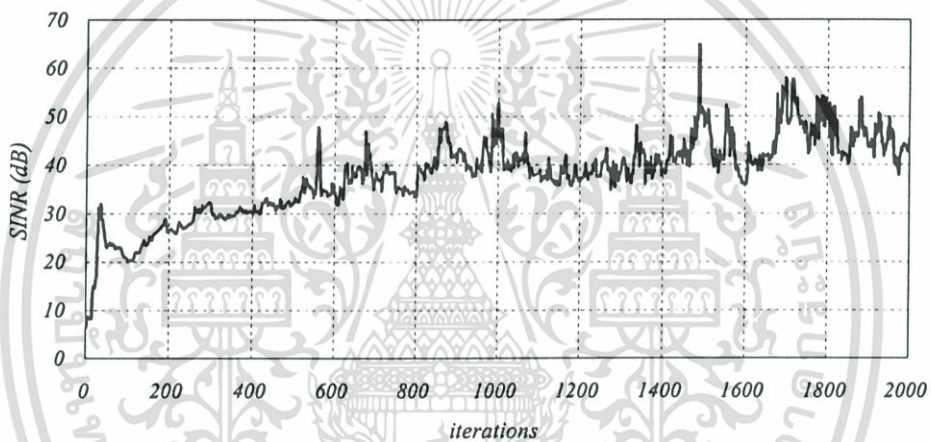
จากสองกรณีที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า ถ้ามุมตกกระทบของสัญญาณพียงประสงค์อยู่ห่างจากลำคลื่นหลักมากกว่ามุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดแล้ว การปรับตัว CMA จะลู่อเข้าหาคำตอบที่ผิด คือสัญญาณที่รับได้จะเป็นสัญญาณแทรกสอดมากกว่าสัญญาณพียงประสงค์ ดังนั้นจึงต้องปรับลำคลื่นหลักให้ชี้ไปในทิศที่ทำให้มุมตกกระทบของสัญญาณพียงประสงค์อยู่ใกล้กับลำคลื่นหลักมากกว่ามุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอด การปรับตัว CMA จึงจะลู่อเข้าหาคำตอบที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.11 Constellation diagram ของ CMA เมื่อ $\phi_0 = 80^\circ$ $\phi_1 = 30^\circ$ ใช้การปรับลำคลื่น $\phi_0 = 135^\circ$ หลังการทำซ้ำครั้งที่ (ก) 0 (ข) 256 (ค) 512 (ง) 1024



รูปที่ 5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$



รูปที่ 5.13 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA เมื่อ $\phi_D = 80^\circ$ $\phi_I = 30^\circ$ ด้วยการปรับลำคลื่น $\phi_0 = 135^\circ$

5.3.2 สัญญาณพึงประสงค์มีมุดตกกระทบบนออกจตุภาคที่หนึ่ง

ในส่วนข้างต้นได้วิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA โครงสร้างของสายอากาศเป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลม และใช้การปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลมเพื่อเป็นส่วนเริ่มการปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA ให้สามารถเพิ่มอัตราการลู่เข้าหาคำตอบได้ อย่างไรก็ตามทุกกรณีที่ทำการวิเคราะห์ไปแล้วได้ทำการจำลองสัญญาณพึงประสงค์ให้มุดตกกระทบบนจตุภาคที่หนึ่งในแนวแอซิมัท ดังนั้นเพื่อความแน่ใจว่าข้อสรุปดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นไปตามเงื่อนไขอื่นด้วย จึงได้วิเคราะห์กรณีที่สัญญาณพึงประสงค์ตกกระทบบนจตุภาคที่หนึ่ง โดยพิจารณาการลู่เข้าของการปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA

ตารางที่ 5.6 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA โดยโครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมสี่องค์ประกอบ เมื่อสัญญาณพึงประสงค์เข้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

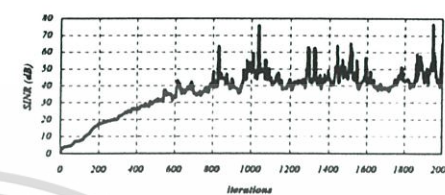
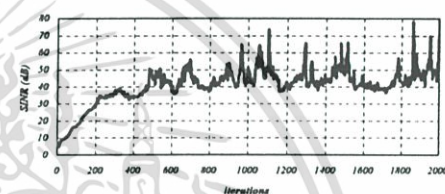
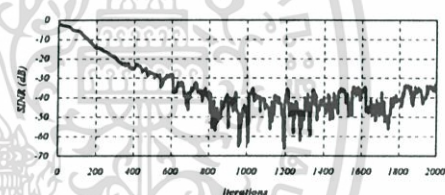
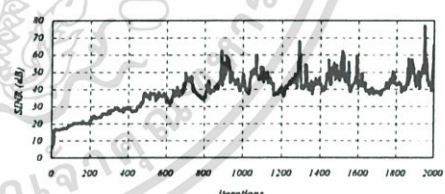
ตกกระทบทำมุมนอกจตุภาคที่หนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามข้อสรุปที่ได้กล่าวมาแล้ว และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. สามารถเพิ่มอัตราการลงทุนเข้าหา Wiener Solution โดยการใช้การปรับลำคลื่นให้ลำคลื่นหลักชี้ในทิศที่มีกำลังงานของสัญญาณรับมากที่สุด
2. ถ้ามุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดอยู่ใกล้กับลำคลื่นหลักมากกว่ามุมตกกระทบของสัญญาณพึงประสงค์ การปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA จะลู่เข้าหาคำตอบที่ผิด โดยสัญญาณที่รับได้จะเป็นสัญญาณแทรกสอดมากกว่าสัญญาณพึงประสงค์
3. ถ้ามุมตกกระทบของสัญญาณพึงประสงค์อยู่ใกล้กับลำคลื่นหลักมากกว่ามุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอด การปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA จะลู่เข้าหาคำตอบที่ถูกต้อง โดยสัญญาณที่รับได้จะเป็นสัญญาณพึงประสงค์มากกว่าสัญญาณ
4. ถ้ามุมตกกระทบของสัญญาณแทรกสอดอยู่ห่างจากลำคลื่นหลักมากขึ้น การปรับตัวของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว CMA จะสามารถลู่เข้าหาคำตอบที่ถูกต้องเร็วขึ้น



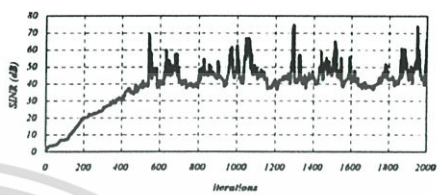
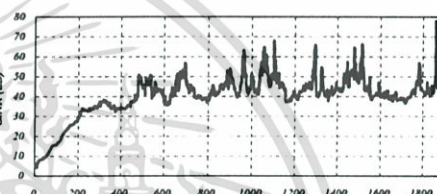
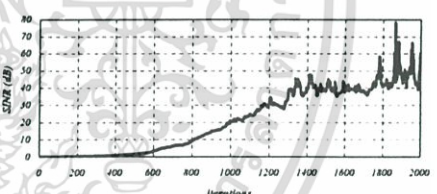
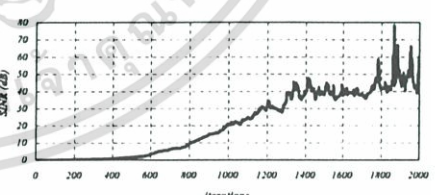
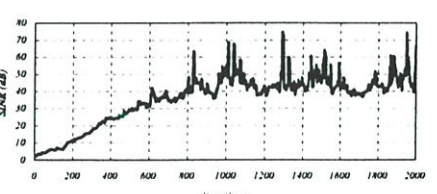
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับลำคลื่น

สัญญาณ พียงประสงค์ (ϕ_o)	มุม		การลู่เข้าของการปรับตัว CMA
	สัญญาณ แทรกสอด (ϕ_i)	ลำคลื่นหลัก ที่ใช้เริ่มต้น (ϕ_c)	
120°	170°	135°	
120°	220°	135°	
170°	125°	135°	
170°	125°	225°	

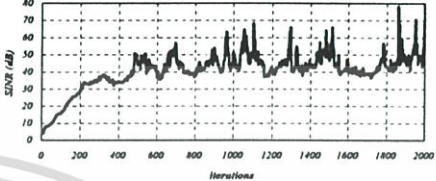
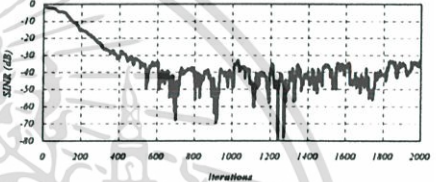
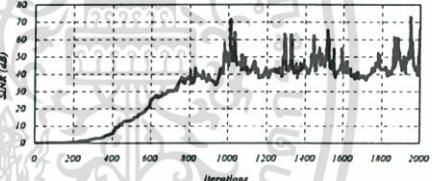
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับลำคลื่น (ต่อ)

สัญญาณ พียงประสงค์ (ϕ_D)	มุม		การลู่เข้าของการปรับตัว CMA
	สัญญาณ แทรกสอด (ϕ)	ลำคลื่นหลัก ที่ใช้เริ่มต้น (ϕ_0)	
210°	260°	225°	
210°	300°	225°	
260°	210°	225°	
260°	210°	315°	
300°	350°	315°	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 การลู่เข้าของการปรับตัว CMA โดยใช้การปรับลำดับ (ต่อ)

สัญญาณ พืงประสงค (ϕ_D)	มุม		การลู่เข้าของการปรับตัว CMA
	สัญญาณ แทรกสอด (ϕ)	ลำดับหลัก ที่ใช้เริ่มต้น (ϕ)	
300°	30°	315°	
350°	300°	315°	
350°	300°	45°	

5.4 การทดสอบแวลลำดับปรับตัว CMA โดยใช้ FPGA

5.4.1 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบแวลลำดับปรับตัว CMA ซึ่งสร้างด้วย FPGA สามารถทดสอบโดยการจำลองสัญญาณรับให้เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนี้

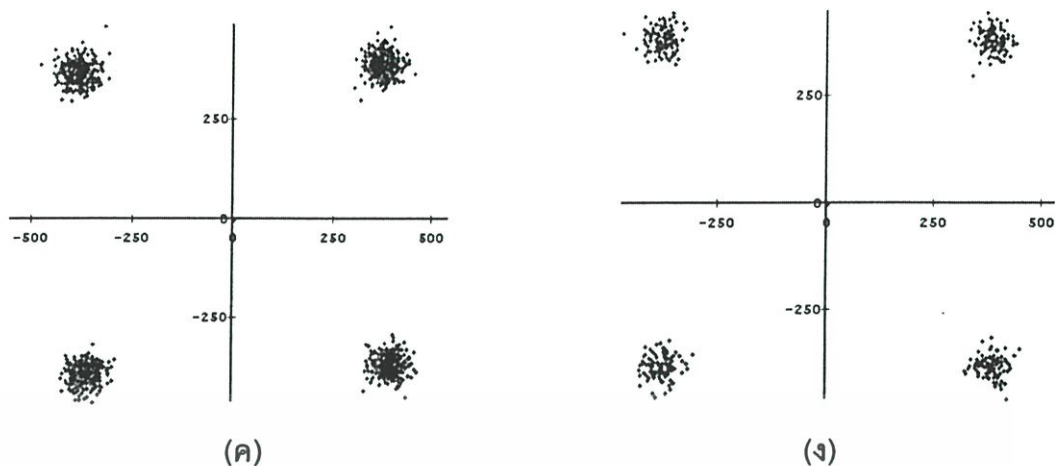
1. โครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศแวลลำดับวงกลมปรับเฟสสี่องค์ประกอบ
2. สัญญาณพืงประสงคตกกระทบทำมุม 30 องศา กับสายอากาศในแนวเอซิมัท
3. สัญญาณแทรกสอดตกกระทบทำมุม 120 องศา กับสายอากาศในแนวเอซิมัท
4. สัญญาณพืงประสงคและสัญญาณแทรกสอดเป็นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตด้วยวิธี

$$\frac{\pi}{4} \text{QPSK}$$

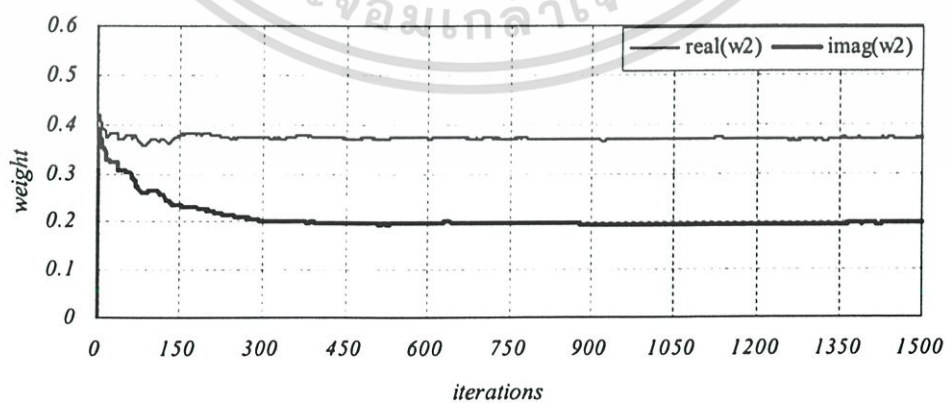
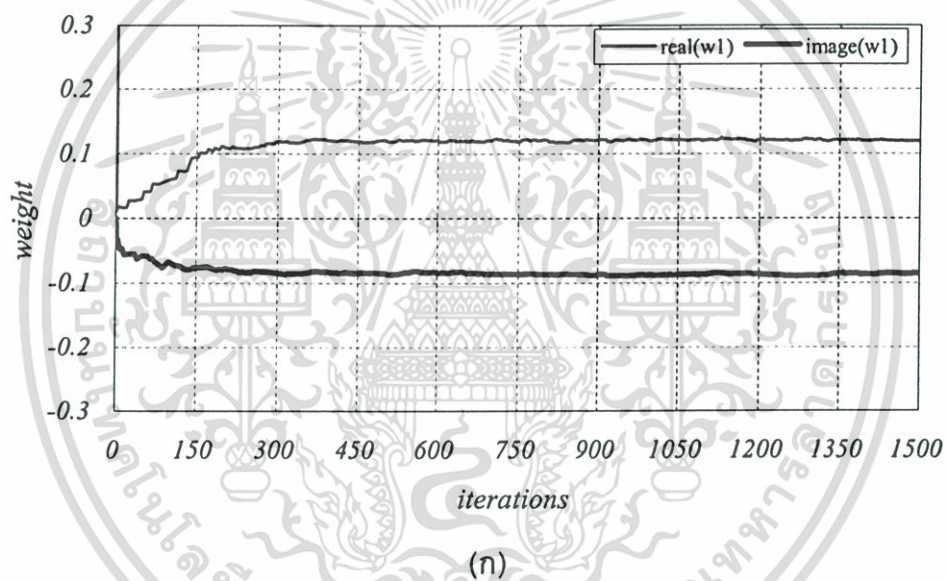
5. กำลังงานของสัญญาณพืงประสงคมากกว่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอด 3 dB

6. สัญญาณพืงประสงคและสัญญาณแทรกสอดแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือขึ้นต้นการอ้าง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

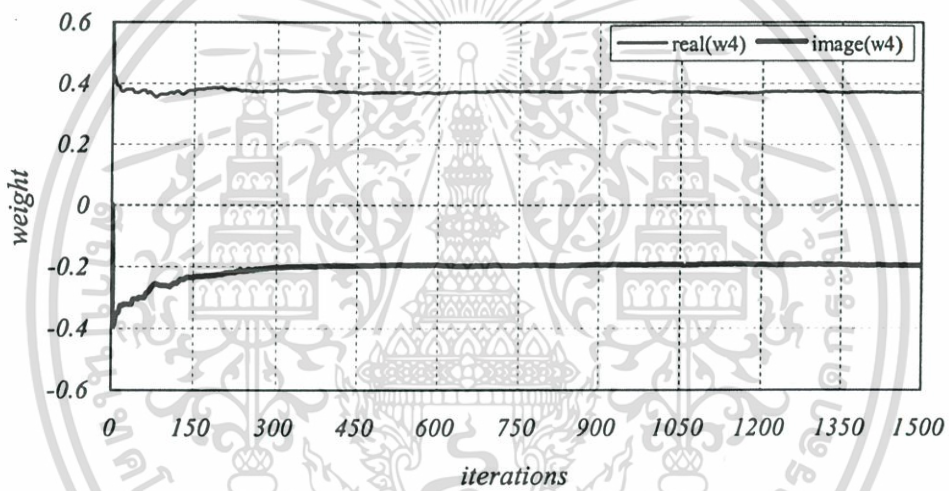
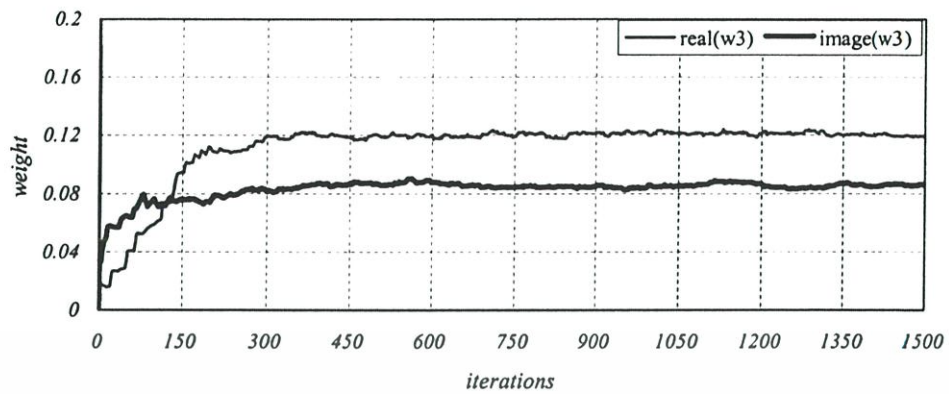


รูปที่ 5.15 constellation diagram ของการทดสอบการปรับตัว CMA ด้วย FPGA

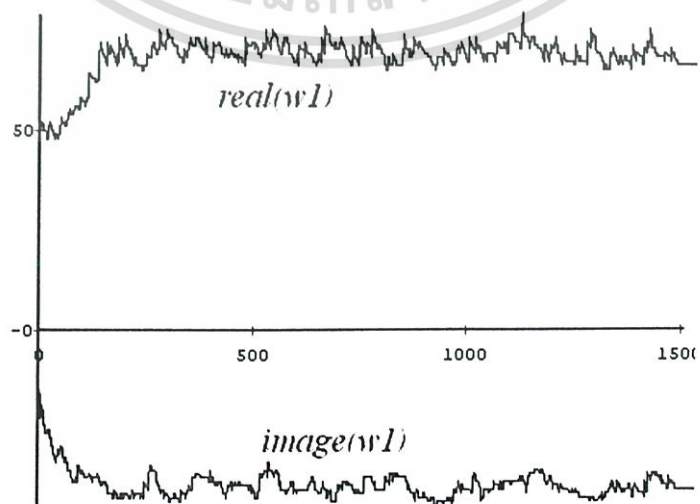


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 การลู่เข้าของการปรับตัวซึ่งได้จากการจำลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

array," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-10, pp. 853-863, Nov.1974.

[25] C. A. Balanis., "Antenna Theory Analysis and Design," 2nded., John Wiley & Sons, 1997.

[26] ไชยวัฒน์ เกษสุวรรณ, "สายอากาศไมโครสตริปแบบเฟสอาร์เรย์ที่ใช้วงจรเลื่อนเฟสน้อยที่สุด," วิทยานิพนธ์ศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2544.

[27] G. Underboeck, "Theroy on the Speed of Convergence in Adaptive Equalizers for Digital Communications", IBM J. RES. DEVELOP., Nov. 1972.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเอกรัฐ บุญญา เป็นคนจังหวัดร้อยเอ็ด เกิดที่จังหวัดสุรินทร์ เมื่อวันที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2523 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ. 2545 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้