



การสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นแบบแถวลำดับปรับตัวเพื่อควบคุมการปรับลำคลื่นของ
สายอากาศแถวลำดับแบบแอคทีฟ

Implementation of Adaptive Array Beamforming System for Adjusting Beampattern of
Active Array Antenna



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

การสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นแบบแถวลำดับปรับตัวเพื่อควบคุมการปรับลำคลื่นของ
สายอากาศแถวลำดับแบบแอคทีฟ

Implementation of Adaptive Array Beamforming System for Adjusting Beampattern of
Active Array Antenna



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานวิชา Project I ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นแบบแวลลำดับปรับตัวเพื่อควบคุมการปรับลำคลื่นของสายอากาศแวลลำดับแบบแอทีฟ

Implementation of Adaptive Array Beamforming System for Adjusting Beam Pattern of Active Array Antenna

ผู้จัดทำ

1. นายรุ่งโรจน์ สุขุมศิริมงคล 43010357

2. นายวัชร วงศ์รัตนตรัย 43010386



(ศ.ดร.โมนัย ไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นแบบแวลด์ับปรับตัวเพื่อควบคุมการปรับลำคลื่นของ
สายอากาศแวลด์ับแบบแอคทีฟ

Implementation of Adaptive Array Beamforming System for Adjusting Beam Pattern of
Active Array Antenna

โดย นาย รุ่งโรจน์ สุขุมศิริมงคล 43010357

นาย วัชรระ วงศ์รัตนตรัย 43010386

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของแวลด์ับปรับตัว เพื่อใช้ในการ
ควบคุมแบบรูปลำคลื่นของสายอากาศแวลด์ับแบบแอคทีฟ โดยใช้การควบคุมแรงดันในสายอากาศแอคทีฟ
ซึ่งการสร้างระบบของการจัดรูปแบบลำคลื่นในสายอากาศแอคทีฟ จะช่วยในการกวาดลำคลื่นให้มีการติดตาม
ทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีของภาครับ

ABSTRACT

This project concerns with the implementation of adaptive array beamforming to control the beam
pattern of active array antenna. The operations are carried out by using voltage control active antenna. The
implementation of beamforming system in active array antenna provides the beam scanning to track with the
desired signal direction in order to obtain the efficient performance of the receiver.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 รูปแบบของสัญญาณแบบแวลวลำดับปรับตัว	3
2.2 รูปแบบของแวลวลำดับปรับตัว	5
2.3 เวกเตอร์ เมตริกซ์ สำหรับแวลวลำดับปรับตัว	6
2.4 เวกเตอร์เมตริกซ์สำหรับการคำนวณสัญญาณแบบแวลวลำดับปรับตัว	7
2.5 ระดับขั้นเสรี	10
2.6 คำคำสั่งงานทางด้านออก	11
2.7 การจัดรูปแบบลากลั่นแบบแวลวลำดับปรับตัว	12
2.7.1 วิธีค่าต่ำสุดจำกัดเชิงเส้น	12
2.7.2 แวลวลำดับแอปเปิลบอม	14
2.8 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา	20
2.8.1 วิธีคอนเวนชันนัล	20
2.8.2 วิธีมิวสิก	21
2.8.3 วิธีสปาสีลสมุทริง	23
2.9 การปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์	24
2.9.1 การคำนวณเมตริกซ์โคเวเรียนซ์	25
2.9.2 การวิเคราะห์เมตริกซ์โคเวเรียนซ์	25
2.9.3 วิธีการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์	26
2.10 กระบวนการปรับเทียบ	32
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	34
3.1 การคำนวณหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา	34
3.1.1 วิธีคอนเวนชันนัล	34
3.1.2 วิธีมิวสิก	35
3.1.3 วิธีสปาสีลสมุทริง	35
3.2 การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) เพื่อใช้ในการจัดรูปแบบของลากลั่น	36
3.2.1 วิธีค่าต่ำสุดจำกัดเชิงเส้น	36
3.2.2 แวลวลำดับแอปเปิลบอม	37
3.3 การคำนวณเพื่อปรับค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์	37
3.3.1 วิธีการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์	38
3.4 การสร้างระบบการจัดรูปแบบลากลั่นของสายอากาศแวลวลำดับปรับตัว	39
3.4.1 การจำลองสัญญาณจากสายอากาศเพื่อนำสัญญาณไปประมวลผล	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเชื่อมต่อสัญญาณที่รับได้เข้าสู่การประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์	40
3.4.3 การประมวลผลของสัญญาณภายในโปรแกรม	42
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	43
4.1 การทดลองเพื่อหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) และผลของการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming)	44
4.1.1 สัญญาณอินพุตที่มีเฟสเดียวกัน	45
4.1.2 สัญญาณอินพุตที่มีเฟสต่างกัน	51
4.1.3 สัญญาณอินพุตที่มีเฟสต่างกัน	57
บทที่ 5 สรุป และ วิจัย	64
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว	1
รูปที่ 2.1 การรับสัญญาณของสายอากาศองค์ประกอบ N ตัว ในสนามระยะไกลจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไอโซโทรปิก	3
รูปที่ 2.2 รูปแบบของแถวลำดับปรับตัว N องค์ประกอบ	5
รูปที่ 2.3 รูปแบบของแถวลำดับปรับตัว	6
รูปที่ 2.4 การแปลงรูปเมตริกซ์ A^T	16
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ Applebaum feedback loop	18
รูปที่ 2.6 รูปภาพของผลที่ได้จากวิธี MUSIC ของสัญญาณที่เข้ามาในทิศทางมุม 90° และ 95°	22
รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนในการปรับเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์	28
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับ SNR ทางด้านออกในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการกับค่า B ณ จุดที่มีการเปลี่ยนค่า C ในระดับ SNR ของสัญญาณที่ต้องการที่ $30^\circ, 40dB$ และระดับ INR ของสัญญาณแทรกสอดที่ $60^\circ, 30dB$	29
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับ SNR ทางด้านออกในทิศทางของสัญญาณที่แทรกสอดกับค่า B ณ จุดที่มีการเปลี่ยนค่า C ในระดับ SNR ของสัญญาณที่ต้องการที่ $30^\circ, 40dB$ และระดับ INR ของสัญญาณแทรกสอดที่ $60^\circ, 30dB$	29
รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนของกระบวนการในการปรับค่า เพื่อให้ได้ค่า B และ C ที่เหมาะสม	30
รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ความถี่ 400 เฮิรตซ์	39
รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	41
รูปที่ 3.3 แสดงการอัปเดตข้อมูลทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์	41
รูปที่ 3.4 แสดง toolbox ต่างที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ	42
รูปที่ 4.1 บล็อกไอโอะแกรมในการจำลองสัญญาณอินพุตขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	43
รูปที่ 4.2 รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	44
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 2	45
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 3	45
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 4	46
รูปที่ 4.6 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์	47
รูปที่ 4.7 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	47
รูปที่ 4.8 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	48
รูปที่ 4.10 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์	49
รูปที่ 4.11 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	49
รูปที่ 4.12 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์	50
รูปที่ 4.13 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	50
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 2	51
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 3	51
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 4	52
รูปที่ 4.17 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์	53
รูปที่ 4.18 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	53
รูปที่ 4.19 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์	54
รูปที่ 4.20 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	54
รูปที่ 4.21 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์	55
รูปที่ 4.22 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	55
รูปที่ 4.23 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์	56
รูปที่ 4.24 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	56
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 2	57
รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 3	57
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 4	58
รูปที่ 4.28 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.29 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุท จำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	59
รูปที่ 4.30 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุทมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์	60
รูปที่ 4.31 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุทจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	60
รูปที่ 4.32 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธีแกลวลาคับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุท มาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์	61
รูปที่ 4.33 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธีแกลวลาคับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุท จำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	61
รูปที่ 4.34 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุทมาจากชุดวงจร กำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์	62
รูปที่ 4.35 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beam forming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุทจำลองขึ้นมา จากโปรแกรม simulink ใน MATLAB	62



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันปริมาณการใช้ระบบสื่อสารไร้สาย มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะใช้ระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว (adaptive array antenna) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งระบบสายอากาศนี้ ประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญ โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ พยายามเพิ่มคุณภาพของสัญญาณในภาครับ โดยกำจัดสัญญาณรบกวน เพิ่มขนาดของสัญญาณที่ต้องการ และสามารถรับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนทิศทางที่ไม่แน่นอนได้ ซึ่งมีส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญ คือ การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยมีการใช้เทคนิคในการหาทิศทางของสัญญาณ (direction of arrival) ซึ่งจะทำนาย และประมาณทิศทางของสัญญาณ ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการในการจัดรูปแบบลำคลื่น การจัดรูปแบบลำคลื่นในระบบสายอากาศนี้ จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับสัญญาณ และกำจัดสัญญาณรบกวนต่างๆ อันได้แก่ สัญญาณรบกวนช่องสัญญาณร่วม (co-channel interference) และสัญญาณรบกวนหลายวิถี (multipath interference) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณรบกวนเหล่านี้เป็นปัญหาที่ลดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารไร้สายเป็นอย่างมาก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาในส่วนของการจัดรูปแบบลำคลื่น ซึ่งการจัดรูปแบบลำคลื่น สามารถช่วยให้การทำงานในภาครับ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสัญญาณรบกวนต่างๆ ได้ดีขึ้น



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.1 เป็นการแสดงโครงสร้างการทำงานสำหรับระบบสายอากาศแบบแวลวลำดับปรับตัว ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน โดยในส่วนแรก เป็นส่วนของฮาร์ดแวร์ (hardware) คือ สายอากาศแบบแวลที่ฟีดท่วงตัวเป็นแวลลำดับจำนวน 4 องค์ประกอบ ทำหน้าที่รับสัญญาณ โดยสัญญาณที่รับได้ จะนำไปผ่าน วงจรรับสัญญาณเอฟเอ็ม (FM demodulator) เพื่อให้ได้สัญญาณข่าวสารที่ความถี่ 400 เฮิร์ตซ์ จากนั้นนำสัญญาณอนาล็อก (analog signal) ที่ได้แปลงไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (digital signal) โดยผ่านการคัด A/D (A/D card) สำหรับสัญญาณดิจิทัล จะนำไปทำงานร่วมกับส่วนที่ 2 คือส่วนของซอฟต์แวร์ (software) หรือ ส่วนของการประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณผลเพื่อให้ทราบถึงค่าของสัญญาณที่ต้องการ

ในภาคการศึกษาแรก ได้ทำการศึกษาถึงทฤษฎีทั่วไปของระบบสายอากาศแบบแวลลำดับปรับตัว โดยเน้นในส่วนของการนำไปใช้ในการประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการเขียนโปรแกรม เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลของสัญญาณได้ โดยการสร้าง หรือจำลองสัญญาณที่รับเข้ามาเอง โดยจำลองให้เหมือนสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศ

ส่วนในภาคการศึกษานี้ ได้ทำการรับสัญญาณจริงโดยไม่ใช้การสร้างหรือจำลองสัญญาณที่รับเข้ามาเพื่อนำไปประมวลผล ซึ่งกระบวนการทำงานตั้งแต่การรับสัญญาณจนถึงการนำสัญญาณไปประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะนำไปอธิบายไว้ในส่วนต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัวถูกนำมาใช้เพื่อที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของระบบสื่อสารไร้สาย เนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายนี้จะเกิดสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดขึ้นเป็นจำนวนมาก จึงมีการนำสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัวมาใช้ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการที่มีความถูกต้อง โดยเกิดการรบกวนจากสัญญาณรบกวนต่าง ๆ น้อยที่สุด หรือไม่มีการเกิดการรบกวนขึ้นเลย และสามารถรับสัญญาณที่มีทิศทางที่ไม่แน่นอนได้ ซึ่งในหัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้ จะนำเสนอถึงหลักการโดยทั่วไปของสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว เพื่อที่จะอธิบายถึงวิธีการต่างๆ ที่นำไปใช้ในกระบวนการทำงาน และรวมถึงวิธีการที่ใช้แก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว

2.1 รูปแบบของสัญญาณแบบแถวลำดับ (Array Signal Model)

สายอากาศในระบบแถวลำดับปรับตัว จะมีสายอากาศองค์ประกอบที่ถูกเรียงตัวแบบแถวลำดับตามแนวแกน x_1 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การรับสัญญาณของสายอากาศองค์ประกอบ N ตัว ในสนามระยะไกล จากแหล่งกำเนิดสัญญาณไอโซโทรปิก

สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแถวลำดับทั้งหมด N องค์ประกอบ คือ

$$X = [\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \bar{x}_3(t), \bar{x}_4(t), \dots, \bar{x}_N(t)]^T \quad (2.1)$$

สัญญาณ $\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \dots, \bar{x}_N(t)$ ถูกรับโดยองค์ประกอบที่ $1, 2, \dots, N$ ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณทั้งหมดมีรูปแบบดังนี้ [1,3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = A_0(t)e^{j(\omega_0 t + \psi_0 + \phi_0(t))} \begin{bmatrix} f_1(\theta) \\ f_2(\theta)e^{-j\phi_{d2}} \\ f_3(\theta)e^{-j\phi_{d3}} \\ f_4(\theta)e^{-j\phi_{d4}} \\ \vdots \\ f_N(\theta)e^{-j\phi_{dN}} \end{bmatrix}$$

(2.2)

โดย A_0 คือ การมอดูเลตแอมพลิจูด (amplitude modulation)
 ω_0 คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency)
 t คือ เวลา (time)
 ψ_0 คือ เฟสนำหน้า (progressive phase)
 $\phi_0(t)$ คือ การมอดูเลตเฟส (phase modulation)
 $f_n(\theta)$ คือ รูปแบบขององค์ประกอบตัวที่ n (n^{th} element pattern)
 ϕ_{dn} คือ การเลื่อนเฟสระหว่างองค์ประกอบตัวที่ 1 และตัวที่ n (inter-element phase shift) ซึ่ง
แสดงได้ คือ

$$\phi_{dn} = \frac{2\pi L_n \sin(\theta)}{\lambda}$$

(2.3)

โดย L_n คือ ระยะระหว่างองค์ประกอบตัวที่ n กับตัวที่ 1
 λ คือ ความยาวคลื่น (wavelength)
 θ คือ มุมของสัญญาณที่รับ

เมื่อ

$$a = A_0(t)e^{j(\omega_0 t + \psi_0 + \phi_0(t))}$$

(2.4)

และ

$$U_d = \begin{bmatrix} f_1(\theta) \\ f_2(\theta)e^{-j\phi_{d2}} \\ f_3(\theta)e^{-j\phi_{d3}} \\ f_4(\theta)e^{-j\phi_{d4}} \\ \vdots \\ f_N(\theta)e^{-j\phi_{dN}} \end{bmatrix}$$

(2.5)

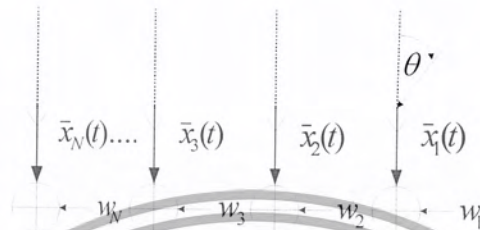
ดังนั้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_d = aU_d$$

(2.6)

2.2 รูปแบบของแถวลำดับปรับตัว (Adaptive Array Model)

จากทฤษฎีของรูปแบบของสัญญาณในหัวข้อที่แล้ว และจากรูปที่ 2.2 ที่แสดงถึงรูปแบบของแถวลำดับปรับตัว [1.3]



รูปที่ 2.2 รูปแบบของแถวลำดับปรับตัว N องค์ประกอบ

สัญญาณที่รับได้จากสมการ (2.1) นั้น มาจากหลายทิศทาง ซึ่งทำให้ได้รับสัญญาณที่เป็นทั้งสัญญาณที่ต้องการ (X_d) และสัญญาณที่ไม่ต้องการ ซึ่งก็คือ สัญญาณแทรกสอด (X_i) และสัญญาณรบกวน (X_n) ดังนั้น

$$X = X_d + X_i + X_n \quad (2.7)$$

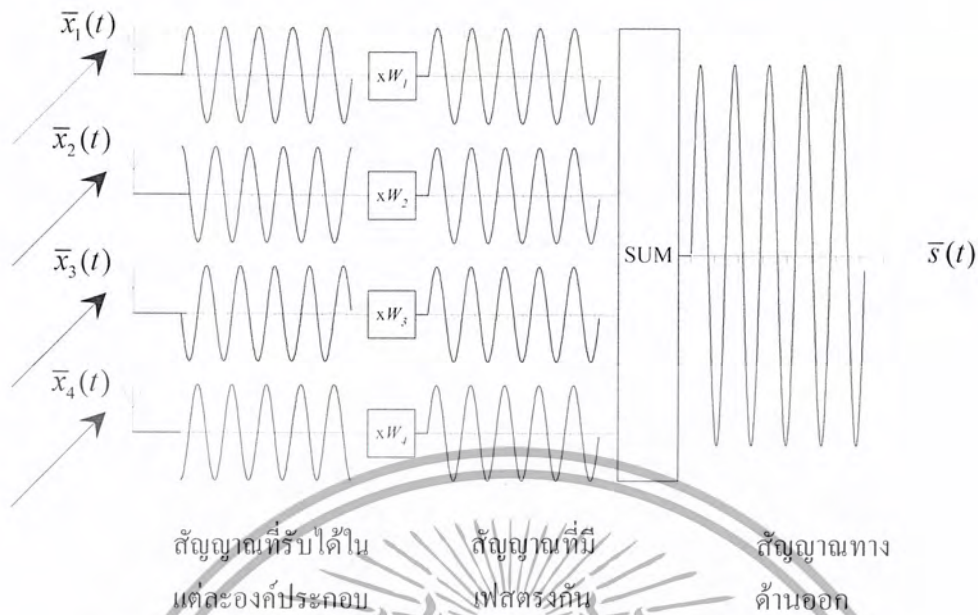
และจากรูปที่ 2.2 สัญญาณที่รับเข้ามา จะถูกนำมาปรับค่าโดยค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) โดย

$$W = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_N]^T \quad (2.8)$$

ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะทำการเปลี่ยนแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่รับเข้ามา และเมื่อทำการรวมสัญญาณที่ปรับค่าโดยค่าถ่วงน้ำหนักแล้ว จะได้ผลลัพธ์ของสัญญาณทางด้านออก (output) คือ

$$\bar{s}(t) = W^T X = \bar{s}_d(t) + \bar{s}_i(t) + \bar{s}_n(t) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปแบบสัญญาณของแถวลำดับปรับตัว

จากรูปที่ 2.3 สัญญาณที่รับโดยองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับจะถูกปรับเฟสและแอมพลิจูด โดยค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนั้นสัญญาณที่ปรับค่าแล้วจึงเป็นสัญญาณที่มีความสอดคล้องกัน (coherent phase signal) ก่อนที่จะนำไปรวม (sum) เพื่อให้ได้สัญญาณทางด้านออก

สำหรับการคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักนั้นก็มีหลายวิธีซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อของการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming)

2.3 เวกเตอร์ เมตริกซ์ ลำหรับแถวลำดับปรับตัว (Adaptive Array Vector Matrix Expression)

จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นว่าสัญญาณรับนั้นมีอยู่หลายสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณในรูปเวกเตอร์และเมตริกซ์จะถูกนำมาใช้ เพื่อง่ายต่อการคำนวณ

สัญญาณที่รับนั้นสามารถแสดงในรูปเวกเตอร์ โดยใช้เวกเตอร์ช่วยที่เรียกว่า เวกเตอร์ปรับค่า (steering vector : $\vec{a}(\theta)$)

เมื่อ

$$\vec{a}(\theta) = [1, e^{-j2\pi f_c \tau_2(\theta)}, e^{-j2\pi f_c \tau_3(\theta)}, \dots, e^{-j2\pi f_c \tau_M(\theta)}]^T \quad (2.10)$$

โดย

$$\tau_i = \frac{(i-1)d \sin(\theta)}{c} \quad (2.11)$$

และ d คือ ระยะระหว่างแต่ละองค์ประกอบ

c คือ ความเร็วคลื่น (wave velocity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $\bar{a}(\theta)$ จากสมการ (2.10) นั้น เป็นค่าเดียวกันกับ U_d ในสมการ (2.5) ซึ่ง $\bar{a}(\theta)$ นั้น จะใช้กับสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบ แต่ U_d จะใช้กับสัญญาณที่ต้องการเท่านั้น ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ของสัญญาณที่รับได้ $\bar{x}(t)$ จาก N องค์ประกอบ กับมุมของสัญญาณที่ตกกระทบ (θ) และสัญญาณรบกวน คือ

$$\bar{x}(t) = \bar{a}(\theta)y(t) + \bar{u}(t) \quad (2.12)$$

เมื่อ $\bar{u}(t)$ คือ เวกเตอร์สัญญาณรบกวน (noise vector)

ถ้าสัญญาณที่เข้ามาเป็น $y_1(t), y_2(t), \dots, y_p(t)$ ตกกระทบที่มุม $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ สัญญาณที่รับได้จะเป็น

$$\bar{x}(t) = \sum_{k=1}^P \bar{a}(\theta_k) y_k(t) + \bar{u}(t) \quad (2.13)$$

เมื่อ $\bar{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_p(t)]^T$ ดังนั้นจะได้เมตริกซ์ปรับค่า (steering matrix) เป็นดังนี้

$$A = [\bar{a}(\theta_1), \bar{a}(\theta_2), \dots, \bar{a}(\theta_p)] \quad (2.14)$$

ดังนั้น สมการ (2.12) สามารถเขียนในรูปเวกเตอร์เมตริกซ์ได้คือ

$$\bar{x}(t) = A\bar{y}(t) + \bar{u}(t) \quad (2.15)$$

2.4 เวกเตอร์เมตริกซ์สำหรับการคำนวณสัญญาณแบบแถวลำดับปรับตัว (Vector Matrix of Adaptive Array Signal Calculation)

ในกระบวนการของแถวลำดับปรับตัวนั้น สัญญาณที่เข้ามาจำเป็นต้องถูกคำนวณในรูปของเวกเตอร์ และเมตริกซ์เสมอ ซึ่งกระบวนการนี้จะขึ้นประโยชน์ต่อความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับโดยสายอากาศองค์ประกอบและสัญญาณอื่นที่เป็นสหสัมพันธ์กัน (correlated signal) และในกรณีของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณนี้ จะถูกอ้างอิงถึงเวกเตอร์ที่เรียกว่า เวกเตอร์โคเวเรียนซ์ (covariance vector) และเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) ดังสมการ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ [1,3,4]

$$\bar{r}_{xd} = E\{\bar{x}(t)d^*(t)\} \quad (2.16)$$

$$R_{xx} = E\{\bar{x}(t)\bar{x}^H(t)\} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (2.15) ใน (2.17) ได้

$$\begin{aligned} R_{xx} &= E\{\bar{x}(t)\bar{x}^H(t)\} \\ &= AE\{\bar{y}(t)\bar{y}^H(t)\}A^H + AE\{\bar{y}(t)\bar{u}^H(t)\} + E\{\bar{u}(t)\bar{y}^H(t)\}A^H + E\{\bar{u}(t)\bar{u}^H(t)\} \end{aligned} \quad (2.18)$$

ค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่เข้ามา และสัญญาณรบกวน คือ

$$Y \equiv E\{\bar{y}(t)\bar{y}^H(t)\} \quad (2.19)$$

และ

$$U \equiv E\{\bar{u}(t)\bar{u}^H(t)\} = \sigma^2 I \quad (2.20)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.18) จะได้

$$R_{xx} = AYA^H + \sigma^2 I \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$R_{xx} = AYA^H + \sigma^2 I = V\Lambda V^H \quad (2.22)$$

โดย V คือ unitary matrix ของค่า eigenvalues

Λ คือ diagonal matrix ของค่า eigenvector

เมื่อ $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M > 0$ แสดงได้ดังนี้

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_M \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

และ

$$V = [\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_M] \quad (2.24)$$

ค่า eigenvalue และ eigenvector นั้น สามารถถูกแยกสัญญาณออกจากสัญญาณรบกวนได้ โดยสมการ (2.22) เขียนได้เป็น

$$R_{xx} = V_y \Lambda_y V_y^H + V_u \Lambda_u V_u^H \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\Lambda_y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_p \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

และ

$$\Lambda_u = \begin{bmatrix} \lambda_{p+1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_M \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

ในขณะที่

$$V_y = [\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_p] \quad (2.28)$$

และ

$$V_u = [\bar{v}_{p+1}, \dots, \bar{v}_M] \quad (2.29)$$

โดย $\bar{v}_{p+1} = \bar{v}_{p+2} = \dots, \bar{v}_M = \sigma^2$

จาก

$$\Pi = V_y V_y^H = A(A^H A)^H \quad (2.30)$$

$$\Pi^\perp = V_u V_u^H = I - A(A^H A)^H \quad (2.31)$$

และ

$$I = \Pi + \Pi^\perp \quad (2.32)$$

ดังนั้น การประมาณค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ จะหาได้จากการคำนวณที่ผ่านมามาทั้งหมด คือ

$$R_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{x}(t) \bar{x}^H(t) \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระดับขั้นเสรี (Degree of Freedom)

ในระบบสายอากาศแถวลำดับ N องค์ประกอบจะมีระดับขั้นเสรี [1,3] ได้ $N-1$ ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของแถวลำดับที่สามารถทำได้ ณ เวลาหนึ่งๆ

เมื่อพิจารณาแถวลำดับจำนวน N องค์ประกอบที่แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยสมมุติว่าสัญญาณขนาดหนึ่งหน่วยความถี่ ω เข้ามาจากมุม θ ดังนั้นจะได้เวกเตอร์สัญญาณในแถวลำดับเป็น

$$X = e^{j\omega t} [1 \quad e^{-j\phi_{d1}} \quad \dots \quad e^{-j\phi_{dN}}]^T \quad (2.34)$$

ในกรณีนี้สมมุติว่าสัญญาณบนองค์ประกอบที่ 1 มีเฟสเป็น 0 และตัวแปร ϕ_{dn} เป็นการเลื่อนเฟสระหว่างองค์ประกอบ 1 และองค์ประกอบ n โดย

$$\phi_{dn} = \frac{2\pi L_n}{\lambda} \sin \theta \quad (2.35)$$

โดย L_n คือระยะระหว่างองค์ประกอบที่ 1 กับองค์ประกอบ n และ λ คือความยาวคลื่นของความถี่ ω ซึ่งสัญญาณที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะถูกคูณด้วยน้ำหนักเชิงซ้อน w_n และจะถูกรวมได้เป็นสัญญาณด้านออกของแถวลำดับ $s(t)$

$$s(t) = [w_1 + w_2 e^{-j\phi_{d2}} + \dots + w_N e^{-j\phi_{dN}}] e^{j\omega t} \quad (2.36)$$

ซึ่งค่าภายในวงเล็บคือ

$$f(\theta) = w_1 + w_2 e^{-j\phi_{d2}} + \dots + w_N e^{-j\phi_{dN}} \quad (2.37)$$

เมื่อฟังก์ชัน $f(\theta)$ คือรูปแบบของศักดาไฟฟ้าของลำถ่วงน้ำหนักแต่ละองค์ประกอบในแถวลำดับ จากสมการ (2.37) เขียนได้เป็น

$$f(\theta) = w_1 \left[1 + \frac{w_2}{w_1} e^{-j\phi_{d2}} + \dots + \frac{w_N}{w_1} e^{-j\phi_{dN}} \right] \quad (2.38)$$

จากสมการ (2.38) มุม θ นั้นจะอ้างอิงถึงค่าที่อยู่ภายในวงเล็บเท่านั้น โดยที่ w_1 ไม่มีผลต่อรูปร่างของแบบรูป (pattern) แต่จะควบคุมแอมพลิจูดและเฟสของแบบรูปทั้งหมด และจะเห็นว่าภายในวงเล็บ มีสัมประสิทธิ์อยู่ $N-1$ ($w_2/w_1, w_3/w_1, \dots, w_N/w_1$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ใน N องค์ประกอบ จะมีระดับขั้นเสรีได้ $N-1$

2.6 ค่ากำลังงานทางด้านออก (Output Power)

จากสมการ (2.9)

$$s(t) = w^T \bar{x}(t) = w^H \bar{a}(\theta) y(t) \quad (2.39)$$

หาค่ากำลังทางด้านออกได้

$$\begin{aligned} E\{s(t)s^*(t)\} &= E\{(w^H \bar{a}(\theta)y(t))(y^*(t)\bar{a}^H(\theta)w)\} \\ &= w^H \bar{a}(\theta) E\{y(t)y^*(t)\} \bar{a}^H(\theta)w \\ &= |w^H \bar{a}(\theta)|^2 \\ &= P(\theta) \end{aligned} \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$w_c = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T \quad (2.41)$$

และ

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{-j2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} (m-1)} \quad (2.42)$$

ดังนั้น ค่ากำลังงานทางด้านออก จะได้

$$P_c(\theta) = w_c^H R_{xx} w_c \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การจัดรูปแบบลำคลื่นแบบแถวลำดับปรับตัว (Adaptive Array Beamforming)

ในระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัวนั้น ประกอบไปด้วยหลายส่วนด้วยกัน ซึ่งส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญที่จะอธิบายในหัวข้อนี้ คือการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) เป็นกระบวนการที่พยายามทำให้ได้สัญญาณที่ต้องการให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และลดทอนสัญญาณแทรกสอด (interference signal) และสัญญาณรบกวน (noise) ลง วิธีในการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming techniques) นั้น มีอยู่หลายวิธี ซึ่งบางวิธีต้องการข้อมูลของรูปแบบคลื่นของสัญญาณที่ต้องการ (desired signal waveform) ในขณะที่บางวิธีต้องการข้อมูลในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ (direction of arrival : DOA) ซึ่งวิธีในการหาทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

ในที่นี้จะอธิบายถึงวิธีในการจัดรูปแบบลำคลื่นที่ต้องใช้ข้อมูลในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ คือ วิธีค่าต่ำสุดจำกัดเชิงเส้น (Linearly constrained minimum-variance method : LCMV) และ แถวลำดับแอปเปิลบอม (Applebaum array)

2.7.1 วิธีค่าต่ำสุดจำกัดเชิงเส้น (Linearly constrained minimum-variance method : LCMV)

วิธี LCMV [2,3] จะทำการลดสัญญาณแทรกสอดจากทิศทางอื่นที่ไม่ใช่ทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ โดยจะทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ให้เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาถึงค่าต่ำสุดของค่ากำลังทางด้านออก (output power) โดยทำการลดค่ากำลังทางด้านออก ดังนั้นจากค่ากำลังในสมการ (2.43)

$$P_o(\theta) = w^H R_{xx} w \quad (2.44)$$

เมื่อลดค่ากำลังทางด้านออก จะได้

$$\min_w P_o(\theta) = \min_w E[|s(t)|^2] = \min_w w^H R_{xx} w \quad (2.45)$$

เมื่อ

$$C^H w = h \quad (2.46)$$

โดย C คือ constraint matrix ซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์ c_i

h คือ constraint response vector

จากเงื่อนไขของการลดค่ากำลังทางด้านออกในสมการ (2.44) และ (2.45) สามารถคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนัก โดยใช้วิธี Lagrange multiplier [3] ได้ดังนี้

จากสมการของ Lagrange multiplier

$$Q_R(w, \lambda) = w^H R_{xx} w + \lambda(h - w^H C) \quad (2.47)$$

เกรเดียน (gradient : ∇) ของสมการ (2.46) เทียบกับ w^H โดยมีค่าเท่ากับศูนย์ คือ

$$\nabla_{(w^H)} Q_R(w, \lambda) = R_{xx} w - \lambda C = 0 \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$w = \lambda R_{xx}^{-1} C \quad (2.49)$$

ค่าอนุพันธ์ (derivative) ของสมการ (2.46) เทียบกับ λ โดยมีค่าเท่ากับศูนย์ คือ

$$\frac{\partial Q_R(w, \lambda)}{\partial \lambda} = h - w^H C = 0 \quad (2.50)$$

ดังนั้น

$$w = (h C^{-1})^H \quad (2.51)$$

จากค่าถ่วงน้ำหนักในสมการ (2.49) และ (2.51) จะได้

$$(h C^{-1})^H = \lambda R_{xx}^{-1} C \quad (2.52)$$

แก้สมการเพื่อหา λ จะได้

$$\lambda = (C^H R_{xx}^{-1} C)^{-1} h \quad (2.53)$$

แทนค่า λ จากสมการ (2.53) ในสมการ (2.49) ได้

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} C (C^H R_{xx}^{-1} C)^{-1} h \quad (2.54)$$

ค่า C (constraint matrix) จะแสดงถึงค่าที่มาจากมุมของสัญญาณที่ต้องการ ซึ่ง $C = a(\theta)$ เมื่อ $a(\theta)$ คือ เวกเตอร์ปรับค่า (steering vector) ในขณะที่ h (constraint response vector) เป็นค่าอัตราขยายคงที่แบบเชิงซ้อน (complex constant gain)

จากสมการ (2.46) เมื่อมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาในทิศทางมุม ϕ จะทำให้อัตราขยายมีค่าเป็นศูนย์ (zero gain : $h = 0$) [2.3] ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.46) ในเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} a^H(\theta, f) \\ a^H(\phi, f) \end{bmatrix} w = \begin{bmatrix} h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

จากสมการ (2.55) จะเห็นได้ว่า ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ จะทำให้อัตราขยายมีค่าเท่ากับ h และจะเป็น 0 ในทิศทางอื่น ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนักจึงสามารถพิจารณาได้ว่า จะยอมให้สัญญาณใดผ่าน หรือตัดสัญญาณใดทิ้ง โดยดูจากทิศทางของมุมของสัญญาณที่เข้ามา คือ ถ้าสัญญาณที่เข้ามาในทิศทางมุม θ ซึ่งเป็นทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ ก็จะทำให้ผ่าน ในขณะที่จะตัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในทิศทางมุม ϕ ทิ้ง

2.7.2 แอลล่าดับแอปเปิลบอม (Applebaum Array)

แนวคิดของวิธีแอลล่าดับแอปเปิลบอม [1,3] คือการพิจารณาถึงค่ามากที่สุดของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ต้องการ (desired signal) กับสัญญาณที่ไม่ต้องการ (undesired signal) คือสัญญาณแทรกสอด (interference signal) และสัญญาณรบกวน (noise signal) วิธีแอลล่าดับแอปเปิลบอมต้องรู้ข้อมูลของทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ ซึ่งหาได้โดยใช้วิธีในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (direction of arrival : DOA)

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วถึงแนวคิดของวิธีแอลล่าดับแอปเปิลบอม ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ที่เหมาะสม สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (signal-to-interference-plus-thermal noise ratio : SINR) [1]

จาก

$$SINR = \frac{P_d}{P_u} = \frac{P_d}{P_i + P_n} \quad (2.56)$$

โดย P_d กำลังของสัญญาณที่ต้องการ (desired signal power)

P_u กำลังของสัญญาณที่ไม่ต้องการ (undesired signal power)

P_i กำลังของสัญญาณแทรกสอด (interference signal power)

P_n กำลังของสัญญาณรบกวน (noise power)

และ P_d, P_u, P_i, P_n มีค่าดังนี้

$$P_d = \frac{1}{2} E\{|\bar{s}_d(t)|^2\} \quad (2.57)$$

$$P_i = \frac{1}{2} E\{|\bar{s}_i(t)|^2\} \quad (2.58)$$

$$P_n = \frac{1}{2} E\{|\bar{s}_n(t)|^2\} \quad (2.59)$$

และ

$$P_u = P_i + P_n \quad (2.60)$$

เมื่อ X_d คือสัญญาณที่ต้องการซึ่งมีค่า คือ

$$X_d = aU_d \quad (2.61)$$

จะได้สัญญาณที่ต้องการทางด้านออก คือ

$$\bar{s}_d(t) = W^T X_d = aW^T U_d \quad (2.62)$$

ดังนั้น กำลังของสัญญาณที่ต้องการทางด้านออก จะได้

$$P_d = \frac{1}{2} E\{|\bar{s}_d|^2\} = \frac{1}{2} E\{|a|^2\} |W^T U_d|^2 \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของกำลังของสัญญาณที่ไม่ต้องการทางด้านออก (P_u) จะแสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์ โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) และค่าเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อน (complex weight matrix) โดย

$$R_{xx} = E(X^* X^T) = E(X_d^* X_d^T) + E(X_i^* X_i^T) + E(X_n^* X_n^T) = R_d + R_i + R_n \quad (2.64)$$

ดังนั้น

$$R_{xx} = R_d + R_u \quad (2.65)$$

โดย

$$R_u = R_i + R_n \quad (2.66)$$

จะได้สัญญาณที่ไม่ต้องการทางด้านออกคือ

$$\bar{s}_u(t) = \bar{s}_i(t) + \bar{s}_n(t) = W^T (X_i + X_n) = (X_i + X_n)^T W \quad (2.67)$$

ดังนั้นกำลังของสัญญาณที่ไม่ต้องการทางด้านออกคือ

$$\begin{aligned} P_u &= \frac{1}{2} E\{\bar{s}_u^2\} = \frac{1}{2} E\{W^T (X_i + X_n)^2\} = \frac{1}{2} E\{W^H (X_i^* + X_n^*) (X_i^T + X_n^T) W\} \\ &= \frac{1}{2} W^H [E(X_i^* X_i^T) + E(X_n^* X_n^T)] W \\ &= \frac{1}{2} W^H [R_i + R_n] W = \frac{1}{2} W^H R_u W \end{aligned} \quad (2.68)$$

โดย H คือ สังกะยพจน์สลับ (transpose conjugate)

และสมการของ SINR จะได้

$$SINR = \frac{P_d}{P_u} = \frac{\frac{1}{2} E\{|a|^2\} |W^T U_d|^2}{\frac{1}{2} W^H R_u W} = E\{|a|^2\} \frac{|W^T U_d|^2}{W^H R_u W} \quad (2.69)$$

ซึ่งในวิธีของแอปเปิลบอม จะอาศัยหลักการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่า SINR มีค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงเริ่มคิดจากการจัดเวกเตอร์น้ำหนัก โดยให้

$$W = AV \quad (2.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเมตริกซ์ A เป็นเมตริกซ์ขนาด $N \times N$ และเมตริกซ์ V เป็นเมตริกซ์ขนาด $N \times 1$ แทนสมการ (2.70) ใน (2.68) ได้

$$P_u = \frac{1}{2} V^H A^H R_u A V \quad (2.71)$$

ซึ่ง A สามารถจัดได้ในลักษณะ

$$A^H R_u A = I \quad (2.72)$$

$$R_u = (A A^H)^{-1} \quad (2.73)$$

สมการ (2.73) จะถูกนำไปใช้ในส่วนอื่นต่อไป

การแปลงรูปสัญญาณ X_d, X_i, X_n ไปอยู่ในรูป K_d, K_i, K_n จะทำโดยการคูณเมตริกซ์ A^T ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และมีสมการเป็นดังนี้

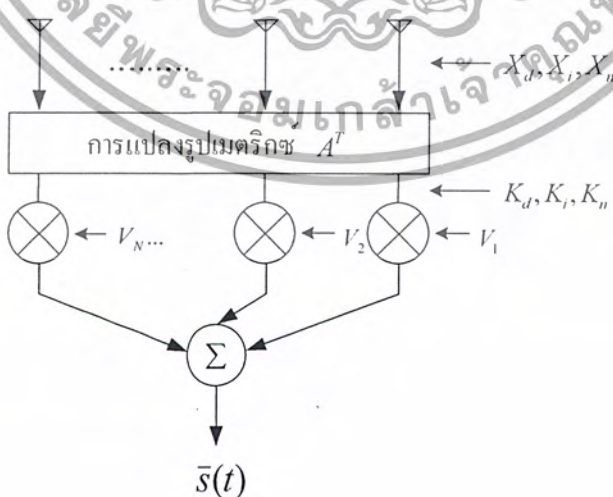
$$K_i = A^T X_i \quad (2.74)$$

$$K_n = A^T X_n \quad (2.75)$$

$$K_d = A^T X_d = a A^T U_d = a Z_d \quad (2.76)$$

เมื่อ

$$Z_d = A^T U_d \quad (2.77)$$



รูปที่ 2.4 การแปลงรูปเมตริกซ์ A^T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการแปลงรูปสัญญาณแล้วก็จะคูณด้วยน้ำหนักหรือเวกเตอร์ V แล้วจึงได้สัญญาณที่ต้องการทางด้านออก

ดังนั้นจากรูปสัญญาณที่ต้องการทางด้านออกและกำลังของสัญญาณที่ต้องการทางด้านออก จะเป็นดังนี้

$$\bar{s}_d(t) = V^T K_d = a V^T Z_d \quad (2.78)$$

$$P_d = \frac{1}{2} E\{|\bar{s}_d(t)|^2\} = \frac{1}{2} E[|a|^2] |V^T Z_d|^2 \quad (2.79)$$

นำสมการ (2.71), (2.72) และ (2.79) แทนลงในสมการ (2.69) ได้

$$SINR = \frac{P_d}{P_u} = E[|a|^2] \frac{|V^T Z_d|^2}{V^H V} \quad (2.80)$$

ซึ่งสมการ (2.80) จะมีค่ามากที่สุดก็ต่อเมื่อ

$$V = V_{opt} = \mu Z_d^* \quad (2.81)$$

เมื่อ μ คือค่าคงที่ใดๆ (arbitrary constant) ซึ่งในการหาค่ามากที่สุด จะใช้หลักความไม่เท่ากันของ Schwarz (Schwarz inequality) จะได้

$$|V^T Z_d|^2 = \left| \sum_{i=1}^N v_i z_{di} \right|^2 \leq \sum_{i=1}^N |v_i|^2 \sum_{i=1}^N |z_{di}|^2 = V^H V Z_d^H Z_d \quad (2.82)$$

โดย v_i และ z_{di} เป็นส่วนประกอบของเมตริกซ์ V และ Z_d ตามลำดับ เมื่อแทนหลักความไม่เท่ากันนี้ลงในสมการ (2.80) จะได้

$$SINR = \frac{P_d}{P_u} \leq E[|a|^2] \frac{V^H V Z_d^H Z_d}{V^H V} = E[|a|^2] Z_d^H Z_d \quad (2.83)$$

และเมื่อ $V = V_{opt} = \mu Z_d^*$ สมการ (2.68) จะได้

$$SINR = \frac{P_d}{P_u} = E[|a|^2] \frac{\mu^2 (Z_d^H Z_d)^2}{\mu^2 (Z_d^T Z_d^*)} = E[|a|^2] Z_d^H Z_d \quad (2.84)$$

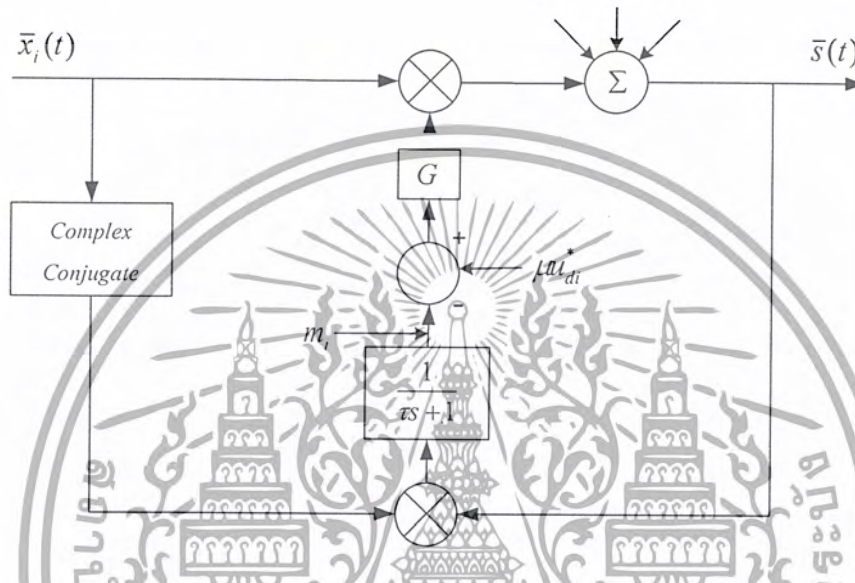
ดังนั้นค่าของ SINR จะมากที่สุดได้ก็ต่อเมื่อ V เป็นดังสมการ (2.81) อย่างไรก็ตาม ค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก V_{opt} นั้น ได้มาจากการแปลงสัญญาณด้วยเมตริกซ์ A^T ซึ่งสมมูลกับค่าถ่วงน้ำหนัก W ดังนี้

$$W = W_{opt} = A V_{opt} = \mu A Z_d^* \quad (2.85)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่า W_{opt} เมื่อใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (2.73) และ (2.77) จะได้

$$W_{opt} = \mu A A^H U_d^* = \mu R_u^{-1} U_d^* \quad (2.86)$$



รูปที่ 2.5 แสดง โครงสร้างของ Applebaum feedback loop [1]

จากค่า W_{opt} ในสมการ (2.86) นั้น จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจากรูป G คือค่าอัตราขยายคงที่ (gain constant) , τ คือค่าคงที่เวลา (time constant) ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (lowpass filter) และ s คือค่าความถี่เชิงซ้อน (complex frequency) สำหรับการหา W_{opt} จะดูจากเอาต์พุตของ lowpass filter (m_i) จะได้

$$\tau \frac{dm_i}{dt} + m_i = \bar{x}_i^*(t) \bar{s}(t) \quad (2.87)$$

เมื่อ w_i สัมพันธ์กับ m_i ดังนี้

$$w_i = G[\mu u_{di}^* - m_i] \quad (2.88)$$

ดังนั้น

$$m_i = \mu u_{di}^* - \frac{1}{G} w_i \quad (2.89)$$

และ

$$\frac{dm_i}{dt} = -\frac{1}{G} \frac{dw_i}{dt} \quad (2.90)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2.89) และ (2.90) ใน (2.87) ได้

$$\frac{\tau}{G} \frac{dw_i}{dt} + \frac{w_i}{G} = \mu u_{di}^* - \bar{x}_i^*(t) \bar{s}(t) \quad (2.91)$$

ดังนั้น

$$\frac{\tau}{G} \frac{dW}{dt} + \frac{W}{G} = \mu U_d^* - X^* \bar{s}(t) \quad (2.92)$$

จาก $\bar{s}(t) = X^T W$ จะได้

$$\frac{\tau}{G} \frac{dW}{dt} + \left[\frac{1}{G} I + X^* X^T \right] W = \mu U_d^* \quad (2.93)$$

เมื่อ

$$X^* X^T \rightarrow E(X^* X^T) = R_{xx} \quad (2.94)$$

จะได้

$$\frac{\tau}{G} \frac{dW}{dt} + \left[\frac{1}{G} I + R_{xx} \right] W = \mu U_d^* \quad (2.95)$$

ดังนั้น ค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \left[\frac{1}{G} I + R_{xx} \right]^{-1} \mu U_d^* \quad (2.96)$$

ถ้าค่า G มาก เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักในสมการ (2.96) จะประมาณได้ดังนี้

$$W \cong \mu R_u^{-1} U_d^* \quad (2.97)$$

โดย

$$R_u \cong R_{xx} \quad (2.98)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Estimation of Direction of Signal Arrival)

ในกระบวนการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) มีอยู่หลายวิธี ซึ่งในบางวิธีต้องรู้ข้อมูลของทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (direction of arrival : DOA) ซึ่งการหา DOA นั้นสามารถที่จะประมาณและทำนายทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้ (arrival signal) [2] หากสัญญาณไม่เป็นสัญญาณสหสัมพันธ์ (noncorrelated signal) คือสัญญาณที่มาจากแหล่งเดียวกัน ดังนั้นถ้าสัญญาณที่เข้ามาเป็นสัญญาณสหสัมพันธ์ (correlated signal) ก็จะไม่สามารถทำนาย DOA ได้

การหา DOA นั้น มีความสัมพันธ์กับค่าเมทริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) ของสัญญาณที่รับเข้ามา (received signal) จากสายอากาศแถวลำดับ (array antenna)

สำหรับวิธีในการหา DOA นั้นมีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะอธิบายถึงวิธีคอนเวนชันนัล (Conventional method), วิธีมิวสิก (Multiple signal classification : MUSIC) และวิธีสเปเชียลสมูทิง (Spatial smoothing)

2.8.1 วิธีคอนเวนชันนัล (Conventional method)

จากสมการ (2.9)

$$s(t) = w^T \bar{x}(t) = w^H \bar{a}(\theta) y(t) \quad (2.99)$$

หากำลังทางด้านออกได้

$$\begin{aligned} E\{s(t)s^*(t)\} &= E\{(w^H \bar{a}(\theta) y(t))(y^*(t) \bar{a}^H(\theta) w)\} \\ &\equiv w^H \bar{a}(\theta) E\{y(t)y^*(t)\} \bar{a}^H(\theta) w \\ &= |w^H \bar{a}(\theta)|^2 \\ &= P(\theta) \end{aligned} \quad (2.100)$$

และ

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{-j2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda_r} (m-1)} \quad (2.101)$$

ดังนั้น ค่ากำลังงานทางด้านออก จะได้

$$P_c(\theta) = w_c^H R_{xx} w_c \quad (2.102)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ (2.42) และ (2.43) จัดเป็นสมการที่ใช้หาค่ากำลังและค่าอวกว้างน้ำหนักรในวิธีคอนเวนชันนัล (Conventional) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหาค่ากำลังในวิธีนี้ ก็คือการหาค่ากำลังทางด้านออกตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ซึ่งวิธีคอนเวนชันนัลจัดเป็นวิธีหนึ่งในกระบวนการจัดรูปแบบลำคลื่นที่เป็นพื้นฐานในการคำนวณค่าอวกว้างน้ำหนักให้มีความถูกต้องมากขึ้นในวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการทำงานของระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว

2.8.2 วิธีมิวสิก (Multiple signal classification : MUSIC)

การได้มาของวิธี MUSIC นั้น [2,3] ลำดับแรก จะพิจารณาจากค่า eigenvalue decomposition ของเมตริกซ์ โคเวเรียนซ์ คือ

$$R_{xx} = AYA^H + \sigma^2 I \quad (2.103)$$

และ

$$R_{xx} = V\Lambda V^H \quad (2.104)$$

โดย V คือ unitary matrix ของค่า eigenvector

Λ คือ diagonal matrix ของค่า eigenvalue

แยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณโดยสมการ (2.104) ดังนั้นจึงเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} R_{xx} &= V_y \Lambda_y V_y^H + V_u \Lambda_u V_u^H \\ &= V_y \Lambda_y V_y^H + \sigma^2 V_u V_u^H \end{aligned} \quad (2.105)$$

เมื่อค่าของ eigenvector ใน V_u ตั้งฉากกับเวกเตอร์ปรับค่า (steering vector) ในเมตริกซ์ปรับค่า (steering matrix : A) จะได้

$$V_u^H a(\theta_i) = 0 \quad (2.106)$$

จากสมการ (2.106) ค่าทิศทางของสัญญาณที่ต้องการสามารถพิจารณาได้จากมุมที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์สัญญาณรบกวน (noise vector) กับ เวกเตอร์ปรับค่าเป็นศูนย์ หรือตั้งฉากกัน

ในการหาทิศทางของสัญญาณทำได้โดยหาค่ามุม θ ที่ทำให้ผลตอบสนองของค่ากำลังในวิธี MUSIC มีค่าสูงสุด โดย

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{a^H(\theta)a(\theta)}{a^H(\theta)V_u V_u^H a(\theta)} \quad (2.107)$$



รูปที่ 2.6 รูปกราฟของผลที่ได้วิธี MUSIC ของสัญญาณที่เข้ามาในทิศทางมุม 90° และ 95° [2]

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีสัญญาณที่เข้ามาทางมุม 90° และ 95° ซึ่งเป็นสัญญาณที่เข้ามาในทิศทางที่ใกล้เคียงกันมาก โดยวิธี MUSIC สามารถแยกสัญญาณทั้งสองได้ เพียงแต่ค่ากำลังที่ได้จากวิธี MUSIC นั้นไม่ใช่ค่ากำลังที่แท้จริง แต่เป็นค่ากำลังเฉลี่ยที่วัดได้จากสเปกตรัม (spectrum power)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 วิธีสแปเชียลสมูทริง (Spatial smoothing technique)

ทั้งวิธี Conventional และ MUSIC นั้น ไม่สามารถที่จะแยกสัญญาณที่มาจากแหล่งเดียวกันได้ (correlated signal) ซึ่งสัญญาณประเภทนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณรบกวนหลายวิถี (multipath signal) ปรากฏการณ์ของสัญญาณรบกวนหลายวิถีนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งกีดขวาง เช่น ดึก ดันไม้ สำหรับวิธี Spatial smoothing เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดอิทธิพลของสัญญาณประเภทนี้ได้ โดยนำมาประยุกต์ใช้กับมาประยุกต์ใช้กับวิธี Spatial smoothing จำเป็นต้องรู้ข้อมูลของสัญญาณที่เข้ามา โดยเป็นข้อมูลที่รับได้จากสายอากาศแถวลำดับ จากสัญญาณไปหน้า (forward) และจากสัญญาณย้อนกลับ (backward) [2,3]

โดย M คือจำนวนขององค์ประกอบทั้งหมดในแถวลำดับ M_0 คือจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับย่อย และ L คือจำนวนของแถวลำดับย่อย

จาก

$$L = M - M_0 + 1 \quad (2.108)$$

ดังนั้น สัญญาณไปหน้า (forward) คือ

$$\mathbf{x}_l^f(t) = [\bar{x}_l(t), \bar{x}_{l+1}(t), \dots, \bar{x}_{l+M_0-1}(t)]^T \quad (2.109)$$

โดย

$$l = 1, 2, \dots, L \quad (2.110)$$

จะได้เมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ของสัญญาณไปหน้าในแถวลำดับย่อย (forward subarray) คือ

$$\mathbf{R}_l^f = E\{\bar{\mathbf{x}}_l^f(t)(\bar{\mathbf{x}}_l^f(t))^H\} \quad (2.111)$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ของสัญญาณไปหน้าในแถวลำดับย่อย (forward subarray) คือ

$$\mathbf{R}^f = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{R}_l^f \quad (2.112)$$

ในการทำงานเดียวกัน ก็จะได้สัญญาณย้อนกลับ (backward) เมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ของสัญญาณย้อนกลับในแถวลำดับย่อย (backward subarray) และค่าเฉลี่ยของเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ของสัญญาณย้อนกลับในแถวลำดับย่อย (backward subarray) คือ

$$x_l^h(t) = [\bar{x}_{M-l+1}(t), \bar{x}_{M-l}(t), \dots, \bar{x}_{L-l+1}(t)]^T \quad (2.113)$$

$$l = 1, 2, \dots, L \quad (2.114)$$

$$R_l^h = E\{\bar{x}_l^h(t)(\bar{x}_l^h(t))^H\} \quad (2.115)$$

$$R^h = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L R_l^h \quad (2.116)$$

ดังนั้นค่าเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์สุดท้ายที่ได้จาก forward และ backward คือ

$$\tilde{R} = \frac{R^f + R^h}{2} \quad (2.117)$$

ซึ่งค่าเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ที่ได้ในสมการ (2.117) จะนำไปใช้ในวิธี MUSIC

2.9 การปรับเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ (Covariance Matrix Adjustment Technique)

จากวิธีการจัดรูปแบบค่าคลิ่นและการหาทิศทางของสัญญาณที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว วิธีการจัดรูปแบบค่าคลิ่นนั้น สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบแบบแถวลำดับปรับตัว แต่จำนวนของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อัตราส่วนของสัญญาณแทรกสอดต่อสัญญาณรบกวน (interference to noise ratio : INR) ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน การตอบสนองค่าศูนย์ (null) ในทิศทางของสัญญาณที่ไม่ต้องการนั้นจะถูกรบกวน หรือไม่สามารถสร้างรูปแบบในการตอบสนองค่าศูนย์ในทิศทางของสัญญาณที่ไม่ต้องการได้เลย [3] ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงวิธีที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวในระบบการจัดรูปแบบค่าคลิ่นของสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัวได้ ซึ่งเป็นวิธีที่มีพื้นฐานที่ขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อน ที่ต้องนำเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์มาใช้ในการคำนวณ

2.9.1 การคำนวณเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (Covariance Matrix Computation)

ตามที่อธิบายไว้แล้วเกี่ยวกับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการคำนวณเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ เพื่อนำมาใช้ในวิธีการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์

เมตริกซ์โคเวเรียนซ์ คือตัวแปรของหนึ่งสัญญาณที่มีความสำคัญต่อการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งแสดงได้โดย

$$R_{xx} = E\{\bar{x}(t)\bar{x}^H(t)\} \quad (2.118)$$

แยกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_{xx} &= E\{\bar{x}(t)\bar{x}^H(t)\} \\ &= E(\bar{x}_d(t)\bar{x}_d^H(t)) + E(\bar{x}_i(t)\bar{x}_i^H(t)) + E(\bar{x}_n(t)\bar{x}_n^H(t)) \end{aligned} \quad (2.119)$$

จากสมการในรูปเวกเตอร์ เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} R_{xx} &= E(\bar{X}\bar{X}^H) = E(X_d X_d^H) + E(X_i X_i^H) + E(X_n X_n^H) \\ &= R_d + R_i + R_n \end{aligned} \quad (2.120)$$

และรูปแบบนี้เอง ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก

2.9.2 การวิเคราะห์เมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (Covariance Matrix Analysis)

จากสมการ (2.120) เมตริกซ์โคเวเรียนซ์นั้น ถูกแยกออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือส่วนของสัญญาณที่ต้องการ สัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวน ซึ่งในทฤษฎีปฏิบัติแล้ว ในการประมาณค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์จะทำได้ทีละตัวเท่านั้น ดังนั้นจากสมการ (2.33) การประมาณค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์จะสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้ คือ

$$R_d = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{x}_d(t) \bar{x}_d^H(t) \quad (2.121)$$

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{x}_i(t) \bar{x}_i^H(t) \quad (2.122)$$

และ

$$R_n = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{x}_n(t) \bar{x}_n^H(t) \quad (2.123)$$

จากสมการคำนวณค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ที่กล่าวมา สัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอดสามารถหาได้จากวิธีการประมาณค่าหาทิศทาง (DOA estimation) ที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งในกรณีนี้ สัญญาณรบกวนจะเข้ามารบกวนสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอดในวิธีของ DOA ด้วยเหตุผลนี้เอง เมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวน จะเกิดขึ้นร่วมกับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอด ดังนั้น ในการคำนวณค่าดังกล่าวนี้ ค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่ต้องการ และของสัญญาณแทรกสอด การประมาณจำนวนของสัญญาณที่แท้จริงในวิธีของ DOA และระดับกำลังของสัญญาณในแต่ละทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา วิธี Conventional จะเป็นวิธีหนึ่งที่นำมาใช้ แต่ถ้าหากสัญญาณที่เข้ามา เป็นสัญญาณสหสัมพันธ์ วิธี Conventional ก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ และในกรณีนี้ วิธี Spatial smoothing ซึ่งเป็นวิธีประยุกต์ที่นำมาใช้กับวิธี MUSIC จะถูกนำมาใช้แทน

2.9.3 วิธีการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (Covariance Matrix Adjustment Technique)

จากข้อเสียต่างๆ ของวิธีที่กล่าวถึงในช่วงต้น เมื่อระดับของ SNR (signal to noise ratio) ของสัญญาณที่รับเข้ามาลดลง หรือมีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ในหัวข้อนี้จึงเสนอวิธีการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น

จากการนำเสนอวิธีการนี้ ได้รับการพัฒนามาจากวิธี AGC (Automatic gain control) Applebaum Array [3] ซึ่งเป็นวิธีที่ประยุกต์มาจากวิธีแวลวลำดับแอปเปิลบอม โดยมีแนวคิดคือ การขยายระดับกำลังของสัญญาณทางด้านออกนั้น สัญญาณแทรกสอดกำลังต่ำจะกลายเป็นสัญญาณแทรกสอดที่มีกำลังสูงได้ จากแนวคิดนี้เอง เทคนิคในการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ ที่นำเสนอนี้ จึงเป็นการปรับการขยายของเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของทั้งสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอด (R_d และ R_i ตามลำดับ) ในการปรับการขยายสำหรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอดนั้น ควรจะสูงขึ้น ในขณะที่การปรับการขยายสำหรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่ต้องการควรต่ำลง ซึ่งวิธี AGC นั้น จะไม่สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่ต้องการกำลังสูงได้ ดังนั้น ทั้งหมดที่กล่าวถึง จะนำไปสู่การควบคุมการตอบสนองอย่างสุ่ม ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอด และผลตอบสนองที่สูงที่สุดทางด้านออกในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการสำหรับค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R_{adj}) มีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{adj} = BR_d + CR_i \quad (2.124)$$

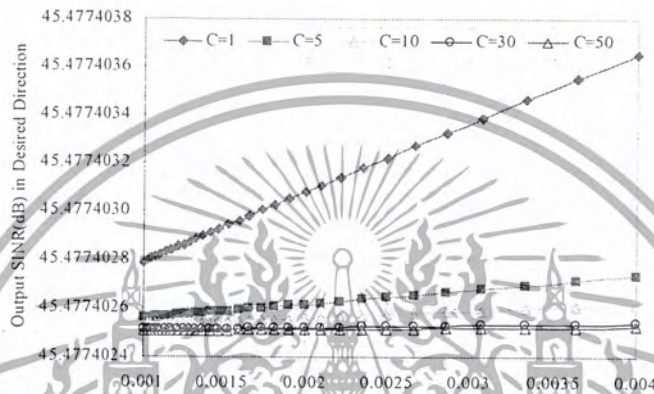
เมื่อ B คือตัวขยายเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่ต้องการ ดังนั้น B จะมีค่าต่ำ ในขณะที่เดียวกัน C คือตัวขยายเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอด ดังนั้น C จะมีค่าสูง สำหรับค่า B และ C จะขึ้นอยู่กับค่า SNR และ INR ทางด้านเข้า ถ้าหากสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามานั้น มาจากหลายๆ ทิศทาง ค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอด ก็จะประกอบไปด้วยหลายๆ เมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอด ตัวอย่างเช่น มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาจาก 3 ทิศทาง ดังนั้น R_i จะประกอบไปด้วย R_{i1}, R_{i2} และ R_{i3} และ C จะประกอบไปด้วย C_1, C_2 และ C_3 ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$R_{adj} = BR_d + C_1 R_{i1} + C_2 R_{i2} + C_3 R_{i3} \quad (2.125)$$

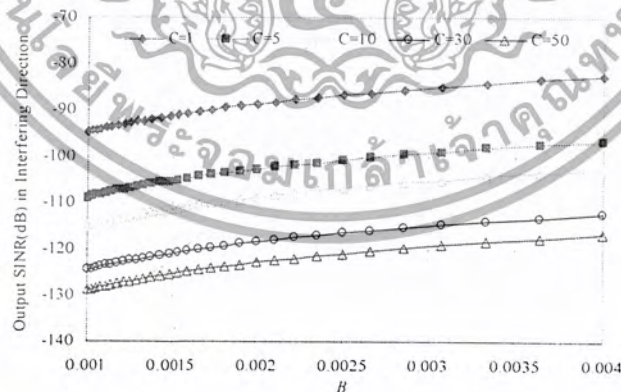
ถ้าค่า INR ของแต่ละสัญญาณแทรกสอด มีค่าแตกต่างกัน ก็จะทำให้ค่า C นั้น เป็นค่าที่ไม่จำกัด หรือเป็นค่าไม่คงที่อีกด้วย

ค่า B และ C นั้น จะพิจารณาได้จากสัญญาณทางด้านเข้าของระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมการเปรียบเทียบของสัญญาณทางด้านเข้ากับค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 การปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์นั้นจะเริ่มจากการหา DOA เพื่อหาทิศทางของสัญญาณ ในกระบวนการต่อไปจะเป็นการพิจารณาถึงจำนวนของสัญญาณแทรกสอด ถ้าหากไม่มีสัญญาณแทรกสอดเลย เมตริกซ์โคเวเรียนซ์ปรับค่าจะมีค่าเท่ากับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่ต้องการได้เลย จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่ามีการทำตัวกำหนด (determinant) ของเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ ที่ทำเช่นนี้ก็เพื่อการตรวจสอบ เนื่องจากเมตริกซ์โคเวเรียนซ์จะถูกทำเป็นเมตริกซ์ผกผัน (invert matrix) ในกระบวนการของการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก [3] ซึ่งค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ไม่ควรจะเป็นเมตริกซ์ที่มีลักษณะแบบเมตริกซ์เอกฐาน (nonsingular หรือ $\det(R) \neq 0$) และสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์เป็นเมตริกซ์เอกฐาน (singular) ก็คือ การมีสัญญาณสลดน้อยลง หรือกำลังของสัญญาณอ่อนลง [3] ซึ่งจะต้องทำการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ใหม่โดยการเพิ่มค่า B และ C ในวิธีนี้ยังต้องคำนึงถึงระดับขั้นเสรีอีกด้วย เพื่อตัดสินใจในการแยกหรือเลือกสัญญาณแทรกสอดในทิศทางที่เหมาะสม เพราะจำนวนของผลการตอบสนองค่าศูนย์นั้น ขึ้นอยู่กับสัญญาณแทรกสอด ถ้าจำนวนของสัญญาณแทรกสอดนั้นมีมากกว่าระดับขั้นเสรีแล้ว ก็จำเป็นต้องทำการเลือกสัญญาณแทรกสอดที่เหมาะสมใหม่ โดยพิจารณาจากระดับ INR ที่สูงกว่า ตามลำดับ

สำหรับตัวอย่างของค่า B และ C นั้น สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับ SINR ทางด้านออกในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ กับค่า B ณ จุดที่มีการเปลี่ยนค่า C ในระดับ SNR ของสัญญาณที่ต้องการที่ 30° , 40° dB และระดับ INR ของสัญญาณแทรกสอดที่ 60° , 30° dB ในขณะที่สายอากาศมีองค์ประกอบอยู่ทั้งหมด 4 องค์ประกอบ และเป็นกราฟที่จะสามารถพิจารณาถึงค่า B และ C ที่เหมาะสมได้



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับ SINR ทางด้านออกในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการกับค่า B ณ จุดที่มีการเปลี่ยนค่า C ในระดับ SNR ของสัญญาณที่ต้องการที่ 30° , 40° dB และระดับ INR สัญญาณแทรกสอดที่ 60° , 30° dB



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับ SINR ทางด้านออกในทิศทางของสัญญาณที่แทรกสอดกับค่า B ณ จุดที่มีการเปลี่ยนค่า C ในระดับ SNR ของสัญญาณที่ต้องการที่ 30° , 40° dB และระดับ INR ของสัญญาณแทรกสอดที่ 60° , 30° dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแต่ละระดับ SNR และ INR ของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดเปลี่ยน จะมีผลทำให้ค่า B และ C เปลี่ยนตามไปด้วย แต่จะเปลี่ยนในทางตรงข้าม กล่าวคือ ถ้าแต่ละระดับ SNR และ INR เพิ่มขึ้น และมากกว่าค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ ค่า B และ C ก็จะต่ำลง หรือเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมในระดับ SNR และ INR นี้ ในทางตรงข้าม ถ้าแต่ละระดับ SNR และ INR ต่ำลงและต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ ค่า B และ C ก็จะสูงขึ้น หรือเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมในระดับ SNR และ INR นี้ แต่ถ้าหากระดับของ SNR และ INR อยู่ระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของค่าที่ยอมรับได้ ค่า B และ C ก็จะเปลี่ยนไปในทิศทางที่เหมาะสมกับค่าระดับของ SNR และ INR นี้

ในทางปฏิบัติค่า B และ C จะถูกพิจารณาจากการเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละระบบ ดังนั้น ค่า B และ C ที่ยอมรับได้ของแต่ละระบบนั้น ควรจะเกิดขึ้นก่อนที่ระบบทำการกระบวนการเสร็จสิ้นไปแล้ว และควรปรับค่าเมื่อระดับกำลังของสัญญาณที่รับเข้ามาเปลี่ยนไป กระบวนการปรับค่า B และ C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนของกระบวนการในการปรับค่าเพื่อให้ได้ค่า B และ C ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีแต่ละระดับของ SNR และ INR เพิ่มขึ้น และสูงกว่าค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ หรือลดต่ำลง และต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ จะได้ค่า B และ C เป็นดังนี้

$$B = B_{ref} \times \frac{Ad_{ref}}{Ad} \quad (2.126)$$

$$C = C_{ref} \times \frac{Ai_{ref}}{Ai_n} \quad (2.127)$$

ส่วนในกรณีของแต่ละระดับของ SNR และ INR ที่อยู่ระหว่างค่าต่ำสุด และสูงสุดของค่าที่ยอมรับได้ ค่า B และ C จะเป็นดังนี้

$$B = B_{ref} \times \frac{Ad}{Ad_{ref}} \quad (2.128)$$

$$C = C_{ref} \times \frac{Ai_n}{Ai_{ref}} \quad (2.129)$$

เมื่อ B_{ref} และ C_{ref} คือ ค่าอ้างอิงของค่า B และ C ตามลำดับ โดยเป็นค่าคงที่
 Ad_{ref} และ Ai_{ref} คือ ค่าอ้างอิงของแอมพลิจูดของสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ โดยหาได้จาก DOA ณ ขณะอ้างอิง

Ad และ Ai_n คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอดตัวที่ n ตามลำดับ โดยหาได้จาก DOA ณ ขณะที่อยู่ในกระบวนการปรับตัว

จากหลักการและทฤษฎีโดยทั่วไปที่กล่าวไว้ในตอนต้น จะสามารถนำมาอธิบายถึงวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการทำงานของระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว คือ กระบวนการจัดรูปแบบลำคลื่น และกระบวนการหาทิศทางของสัญญาณ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการในกระบวนการทำงานของระบบสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัวนั้น จะสามารถลดทอนสัญญาณ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงข้อดี และข้อเสียของวิธีการต่างๆ รวมถึงวิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น เพื่อการนำสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัวมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.10 กระบวนการปรับเทียบ (Calibration Process)

กระบวนการปรับเทียบ เป็นการลดความบกพร่องในการทำงานที่เกิดจากการคลาดเคลื่อนของสัญญาณทางแอมพลิจูดและเฟสในแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อความแม่นยำในกระบวนการจัดรูปแบบลำคลื่นและกระบวนการหาทิศทางของสัญญาณ

กระบวนการปรับเทียบจะเริ่มจากการปรับเทียบทางแอมพลิจูด (amplitude calibration) จากสัญญาณรับในแต่ละองค์ประกอบคั้งสมการ (2.1) สัญญาณที่ได้รับการปรับเทียบทางแอมพลิจูดจะเป็นนี้

$$X_{AmpCal} = X \times \frac{\tilde{x}_m}{\bar{X}} \quad (2.130)$$

โดย คือ $\tilde{x}_m$ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรับขององค์ประกอบที่ m

คือ $\bar{X}$ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรับของแถวลำดับ
ซึ่ง $\tilde{x}_m$ และ $\bar{X}$ มีค่าดังนี้

$$\tilde{x}_m = \frac{1}{NN} \sum_{t=1}^{NN} x_m(t) \quad (2.131)$$

และ

$$\bar{X} = \frac{1}{NN} \sum_{t=1}^{NN} X(t) \quad (2.132)$$

โดย m คือ จำนวนองค์ประกอบตัวที่ m ของแถวลำดับ

NN คือ จำนวนของสัญญาณทั้งหมดที่สุ่มมา

จากสมการ (2.130) จะนำสัญญาณนี้ไปทำการปรับเทียบเฟส (phase calibration) ต่อไป โดยสัญญาณที่ได้รับการปรับเทียบทั้งแอมพลิจูดและเฟสจะเป็นดังนี้

$$X_{output} = X_{AmpCal} \times e^{j\bar{\phi}} \quad (2.133)$$

เมื่อ

$$\bar{\phi} = \text{angle of} \left\{ \frac{X_{AmpCal}^* \times X_{AmpCal_m}}{X_{AmpCal}^* \times X_{AmpCal}} \right\} \quad (2.134)$$

โดย $\bar{\phi}$ คือ เมตริกซ์ของการปรับเทียบเฟส (calibration phase matrix)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.130) และ (2.133) แสดงให้เห็นว่า กระบวนการปรับเทียบเป็นการคูณกันของสัญญาณรับกับตัวประกอบหนึ่ง โดยค่าตัวประกอบจะเป็นค่าที่ได้จากตำแหน่งของสัญญาณรับที่ 0° ซึ่งค่าตัวประกอบของการปรับเทียบทางแอมพลิจูดและค่าตัวประกอบของการปรับเทียบทางเฟส คือ

$$\text{Amplitude Calibration Factor} = \frac{\tilde{x}_{mat0^\circ}}{\tilde{x}_{at0^\circ}} \quad (2.135)$$

และ

$$\text{Phase Calibration Factor} = e^{j\phi_{am}^\circ} \quad (2.136)$$

สัญญาณที่รับได้นั้นควรทำการปรับเทียบก่อนที่จะนำสัญญาณเข้าสู่กระบวนการจัดรูปแบบค่าคลื่นและกระบวนการหาทิศทางของสัญญาณ เพื่อความแม่นยำในการประมวลผล



บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

การสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแอดาปต์ (adaptive array antenna) วิธีการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศเป็นขั้นตอนที่จำเป็นของระบบเมื่อสัญญาณที่รับเข้ามามีสัญญาณแทรกสอด (interference signal) เข้ามาด้วย ซึ่งวิธีการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสัญญาณที่ต้องการและขจัดสัญญาณแทรกสอด (interference signal) โดยจะต้องมีการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมร่วมกับสัญญาณทางด้านนอกเพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ แต่ในวิธีการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศที่ใช้ในโครงการนี้ จำเป็นต้องรู้ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาด้วย ดังนั้นในบทนี้จะเสนอการคำนวณทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) เพื่อใช้ในการจัดรูปแบบของลำคลื่น รวมไปถึงการคำนวณเพื่อปรับค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) เพื่อที่จะตอบสนองการจัดแบบรูปลำคลื่นที่ดีขึ้น และอธิบายถึงกระบวนการสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแอดาปต์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผล

3.1 การคำนวณหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA)

การคำนวณทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) นั้นสามารถที่จะประมาณและทำนายทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้โดยจะมีความสัมพันธ์กับค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) ของสัญญาณที่รับเข้ามา (received signal) จากสายอากาศแอดาปต์ (array antenna)

สำหรับวิธีการคำนวณทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) นั้นมีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะอธิบายถึงวิธี Conventional method, Multiple signal classification (MUSIC) method และวิธี Spatial smoothing ดังต่อไปนี้

3.1.1 Conventional method

จากสมการ (2.39), (2.40), (2.41) และ (2.42) ซึ่งอยู่ในหัวข้อของการหาค่ากำลังงานทางด้านออก สามารถนำไปหาค่ากำลังงานในวิธีคอนเวนชันนัล เพื่อแสดงทิศทางของสัญญาณที่ต้องการในทิศทางที่มีค่ากำลังสูงสุดได้ดังนี้

$$P_c(\theta) = w_c^H R_{xx} w_c \quad (3.1)$$

ในสมการ (3.1) จัดเป็นสมการที่ใช้หาค่ากำลังในวิธีคอนเวนชันนัล (Conventional) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหาค่ากำลังในวิธีนี้ก็คือการหาค่ากำลังทางด้านออกตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งวิธีคอนเวนชันนัล จัดเป็นวิธีหนึ่งในกระบวนการจัดรูปแบบลำคลื่นที่เป็นพื้นฐานในการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักในวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการทำงานของระบบสายอากาศแบบแอดาปต์ให้มีความถูกต้องมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 Multiple signal classification (MUSIC) method

วิธี MUSIC นั้น ลำดับแรก จะพิจารณาจากค่า eigenvalue decomposition ของเมทริกซ์ โคเวเรียนซ์ คือ

$$R_{xx} = AYA^H + \sigma^2 I \quad (3.2)$$

และ

$$R_{xx} = V\Lambda V^H \quad (3.3)$$

ในการหาทิศทางของสัญญาณทำได้โดยหาค่ามุม θ ที่ทำให้ผลตอบสนองของค่ากำลังในวิธี MUSIC มีค่าสูงสุด โดย

$$P_{Music}(\theta) = \frac{a^H(\theta)a(\theta)}{a^H(\theta)V_u V_u^H a(\theta)} \quad (3.4)$$

ค่ากำลังที่ได้จากวิธี MUSIC นั้น ไม่ใช่ค่ากำลังที่แท้จริง แต่เป็นค่ากำลังงานเฉลี่ยที่วัดได้จากสเปกตรัม (spectrum power)

3.1.3 Spatial smoothing technique

ทั้งวิธี Conventional และ MUSIC นั้น ไม่สามารถที่จะแยกสัญญาณที่มาจากแหล่งเดียวกันได้ (correlated signal) ซึ่งสัญญาณประเภทนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณรบกวนหลายวิถี (multipath signal) สำหรับวิธี Spatial smoothing เป็นวิธีที่สามารถลดอิทธิพลของสัญญาณประเภทนี้ได้ โดยนำมาประยุกต์ใช้กับวิธี MUSIC

วิธี Spatial smoothing จำเป็นต้องรู้ข้อมูลของสัญญาณที่เข้ามา โดยเป็นข้อมูลที่รับได้จากสายอากาศแถวลำดับ จากสัญญาณไปหน้า (forward) และจากสัญญาณย้อนกลับ (backward) โดย M คือจำนวนขององค์ประกอบทั้งหมดในแถวลำดับ M_0 คือจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับย่อย และ L คือจำนวนของแถวลำดับย่อย

จาก

$$L = M - M_0 + 1 \quad (3.5)$$

จะได้เมทริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณไปหน้าในแถวลำดับย่อย (forward subarray) คือ

$$R_l^f = E\{\bar{x}_l^f(t)(\bar{x}_l^f(t))^H\} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ของสัญญาณย้อนกลับในแถวลำดับย่อย (backward subarray) คือ

$$R_t^b = E\{\bar{x}_t^b(t)(\bar{x}_t^b(t))^H\} \quad (3.7)$$

ดังนั้นค่าเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์สุดท้ายที่ได้จาก forward และ backward คือ

$$\tilde{R} = \frac{R^f + R^b}{2} \quad (3.8)$$

ซึ่งค่าเมตริกซ์โคแวลเรียนซ์ที่ได้จะนำไปใช้ในวิธี MUSIC

3.2 การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) เพื่อใช้ในการจัดรูปแบบของลำคลื่น

การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) เป็นกระบวนการที่พยายามทำให้ได้สัญญาณที่ต้องการให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และลดทอนสัญญาณแทรกสอด (interference signal) และสัญญาณรบกวน (noise) ลง วิธีในการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming techniques) นั้น มีอยู่หลายวิธีในที่นี้จะอธิบายถึงวิธีในการจัดรูปแบบลำคลื่นที่ต้องใช้ข้อมูลของทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ คือ Linearly constrained minimum-variance method (LCMV) และ แถวลำดับแอปเปิลบอม (applebaum array)

3.2.1 Linearly Constrained Minimum-Variance (LCMV) Method

วิธี LCMV จะทำการลดสัญญาณแทรกสอด (interference signal) จากทิศทางอื่นที่ไม่ใช่ทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ โดยจะทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) เพื่อลดค่ากำลังทางด้านออก (output power) ดังนั้นจากค่ากำลังทางด้านออก

$$P_c(\theta) = w_c^H R_{xx} w_c \quad (3.9)$$

จะได้

$$\min_w P_c(\theta) = \min_w E[|s(t)|^2] = \min_w w^H R_{xx} w \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$C^H w = h \quad (3.11)$$

โดย C คือ constraint matrix ซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์ c_i

h คือ constraint response vector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ได้คือ

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} C (C^H R_{xx}^{-1} C)^{-1} h \quad (3.12)$$

3.2.2 แอลลำดับแอปเปิลบอม (Applebaum Array)

แนวคิดของวิธีแอลลำดับแอปเปิลบอม คือการพิจารณาถึงค่ามากที่สุดของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ต้องการ (desired signal) กับสัญญาณที่ไม่ต้องการ (undesired signal) คือสัญญาณแทรกสอด (interference signal) และสัญญาณรบกวน (noise signal) วิธีแอลลำดับแอปเปิลบอมต้องรู้ข้อมูลของทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ

ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ที่เหมาะสมสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (signal-to-interference-plus-thermal noise ratio : SINR)

ดังนั้นจะคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ได้คือ

$$W = \mu R_u^{-1} U_d^* \quad (3.13)$$

3.3 การคำนวณเพื่อปรับค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix)

การคำนวณเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ เพื่อนำมาใช้ในวิธีในการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ เมตริกซ์โคเวเรียนซ์ คือตัวแปรของหนึ่งสัญญาณที่มีความสำคัญต่อการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งแสดงได้โดย

$$R_{xx} = E\{\bar{x}(t)\bar{x}^H(t)\} \quad (3.14)$$

จากสมการ (3.14) เขียนใหม่ได้เป็น

$$R_{xx} = E(XX^H) = E(X_d X_d^H) + E(X_i X_i^H) + E(X_n X_n^H) \quad (3.15)$$

$$= R_d + R_i + R_n \quad (3.16)$$

เมตริกซ์โคเวเรียนซ์นั้น ถูกแยกออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือส่วนของสัญญาณที่ต้องการ สัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว ในการประมาณค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์จะทำได้ทีละตัวเท่านั้น การประมาณค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์จะสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้ คือ

$$R_d = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{x}_d(t) \bar{x}_d^H(t) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{x}_i(t) \bar{x}_i^H(t) \quad (3.18)$$

และ

$$R_n = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{x}_n(t) \bar{x}_n^H(t) \quad (3.19)$$

3.3.1 วิธีการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (Covariance Matrix Adjustment Technique)

จากข้อเสียต่างๆ ของวิธีที่กล่าวถึงในข้างต้น เมื่อระดับของ SNR (signal to noise ratio) ของสัญญาณที่รับเข้ามามีค่าลดลง หรือมีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ในหัวข้อนี้จึงเสนอวิธีการปรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น จึงมีการปรับการขยายของเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของทั้งสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอด (R_d และ R_i ตามลำดับ) ในการปรับการขยายสำหรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอดนั้นควรจะสูงขึ้น ในขณะที่การปรับการขยายสำหรับเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่ต้องการควรต่ำลง จะนำไปสู่การควบคุมการตอบสนองค่าศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอด และผลตอบสนองที่สูงที่สุดทางด้านนอกในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ

สำหรับค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R_{adj}) มีค่าดังนี้

$$R_{adj} = BR_d + CR_i \quad (3.20)$$

เมื่อ B คือตัวขยายเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณที่ต้องการ ดังนั้น B จะมีค่าต่ำ ในขณะที่เดียวกัน C คือตัวขยายเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอด ดังนั้น C จะมีค่าสูง สำหรับค่า B และ C จะขึ้นอยู่กับค่า SNR และ INR ทางด้านเข้า ถ้าหากสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามานั้น มาจากหลายๆ ทิศทาง ค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอด ก็จะประกอบไปด้วยหลายๆ เมตริกซ์โคเวเรียนซ์ของสัญญาณแทรกสอด ตัวอย่างเช่น มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาจาก 3 ทิศทาง ดังนั้น R_i จะประกอบไปด้วย R_{i1} , R_{i2} และ R_{i3} และ C จะประกอบไปด้วย C_1 , C_2 และ C_3 ซึ่งแสดงได้ดังนี้

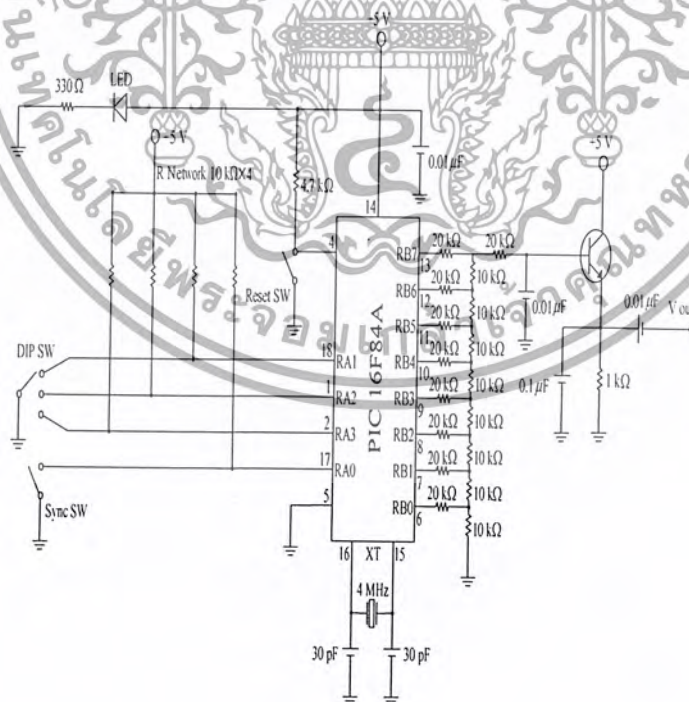
$$R_{adj} = BR_d + C_1R_{i1} + C_2R_{i2} + C_3R_{i3} \quad (3.21)$$

3.4 การสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแกลวลำดับปรับตัว

เมื่อทราบถึงวิธีการคำนวณค่าต่างๆใน 3.1 ถึง 3.3 แล้ว ในรายงานฉบับนี้จะทำการสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแกลวลำดับปรับตัว (adaptive array antenna) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการประมวลผลของสัญญาณ ซึ่งมีการนำเอาค่าอัลกอริทึม (algorithm) ของวิธีการคำนวณการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแกลวลำดับปรับตัว [3] มาทำการเขียนโปรแกรมใหม่ให้อยู่ในรูปของ S-Function (โดยสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวกและ help ใน simulink ของโปรแกรม MATLAB) เพื่อสร้างเป็น toolbox ต่างๆ สำหรับการประมวลผลเมื่อมีการรับสัญญาณเข้ามา โดยจะทำการสร้างระบบการจัดแบบรูปลำคลื่นของสายอากาศรับแบบแกลวลำดับปรับตัวที่มี 4 องค์ประกอบและมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบภายในเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น (half wave length) โดยใช้ความถี่คลื่นพาหะ (carrier frequency) ที่ 1.9 GHz

3.4.1 การจำลองสัญญาณจากสายอากาศเพื่อนำสัญญาณไปประมวลผล

เนื่องจากสัญญาณอินพุตที่ได้จากสายอากาศรับนั้น ไม่เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับการ์ด A/D จึงจำเป็นต้องใช้การจำลองสัญญาณอินพุตขึ้นมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณชาแนลความถี่ 400 เฮิร์ตซ์เพื่อใช้ในการทดสอบกับระบบการจัดรูปแบบของลำคลื่นของสายอากาศแทนสัญญาณอินพุตจริงที่ได้รับจากสายอากาศรับ โดยชุดของวงจรกำเนิดสัญญาณชาแนลความถี่ 400 เฮิร์ตซ์มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณชาแนลความถี่ 400 เฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเชื่อมต่อสัญญาณที่รับได้ เข้าสู่การประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

หลังจากได้สัญญาณอินพุตจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณชายน์ความถี่ 400 เฮิรตซ์จำนวน 4 ช่องสัญญาณที่มีเฟสแตกต่างกันในเวลาเดียวกัน แล้วจะนำสัญญาณเหล่านั้นไปทำการประมวลผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการประมวลผลภายในคอมพิวเตอร์จะเป็นการประมวลผลในลักษณะของสัญญาณดิจิทัล (digital) ดังนั้น สัญญาณที่ได้ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก (analog signal) จึงควรถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (digital signal) โดยนำสัญญาณที่ได้ผ่านการแปลง A/D ซึ่งการ์ด A/D จะมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

การเชื่อมต่อสัญญาณที่ผ่านการแปลง A/D มาเข้าสู่การประมวลผลภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในโครงงานนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ในโหมดของ real-time windows target ในการประมวลผล

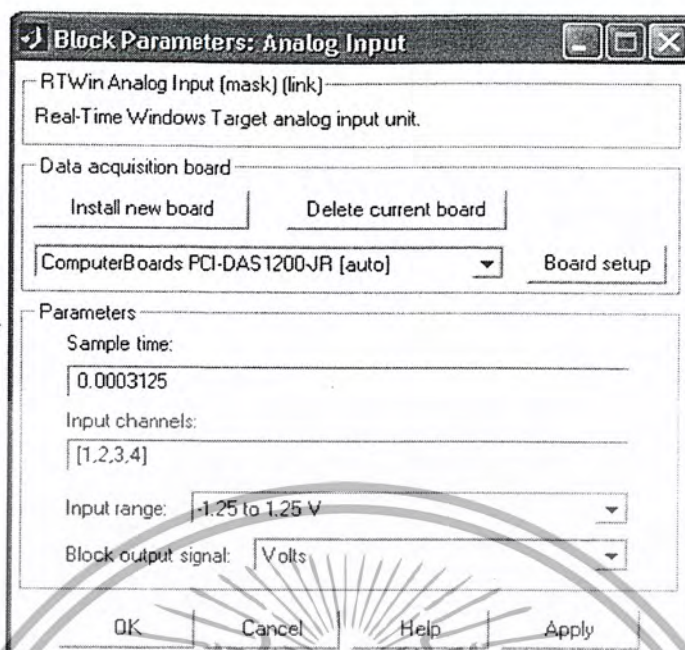
ความต้องการในโหมด real-time windows target ประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ

- 1.) MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณมาเข้าสู่การประมวลผลในโหมดของ real-time windows target
- 2.) Simulink จะแสดงในรูปแบบของ block diagram หรือเป็น toolbox ของระบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการประมวลผล
- 3.) Real-Time Workshop ทำหน้าที่ในการเปลี่ยน toolbox ของระบบใน simulink ให้เป็นภาษา C (C code) ซึ่งสอดคล้องกับหน้าที่ของ toolbox แต่ละ toolbox ของระบบ
- 4.) C Compiler ทำหน้าที่ในการประมวลผลของภาษา C ใน real-time workshop ซึ่งจะทำให้ระบบสามารถทำงานได้ตาม toolbox ที่สร้างขึ้น โดยโปรแกรมที่ใช้ในการ compile คือ microsoft visual C/C++ หรือ watcom C/C++

การตั้งค่าภายในโปรแกรมเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ในโหมด real-time windows target มี 2 ส่วน คือ

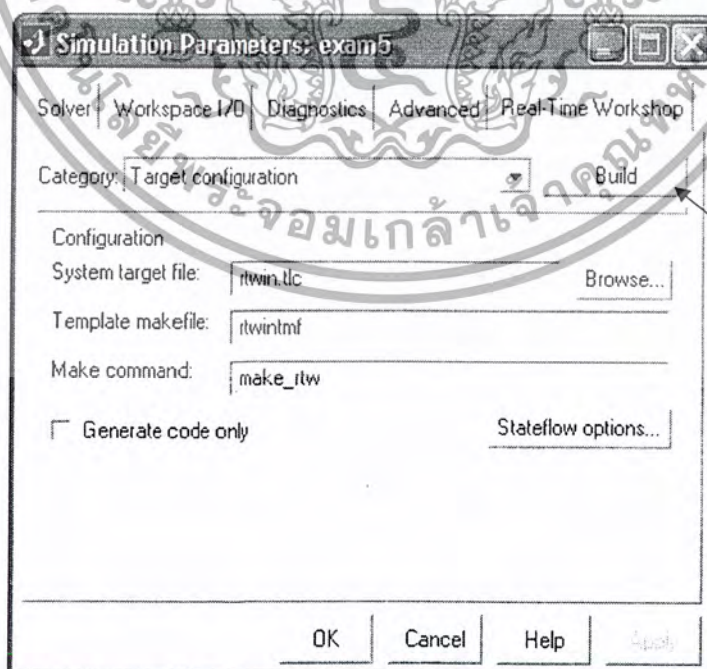
- 1.) Third Party C Compiler เป็นการตั้งค่าสำหรับการ compile ภาษา C ที่ใช้ใน toolbox ของระบบ โดยเลือกโปรแกรมที่จะนำมาใช้ในการ compile ซึ่งคำสั่งที่ใช้ในการตั้งค่าคือ mex -setup และทำการเลือกโปรแกรมที่ใช้ในการ compile โดยในโครงงานนี้จะเลือกใช้ microsoft visual C/C++
- 2.) Installing the Kernel เป็นการตั้งค่าเพื่อให้ระบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ในโหมด real-time windows target โดยใช้คำสั่ง rtwintgt -install

ในการตั้งค่าตามที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้นนั้น เป็นการตั้งค่าทั่วๆ ไปก่อนการนำสัญญาณที่ผ่านการแปลง A/D มาเข้าสู่การประมวลผล ส่วนการตั้งค่ากรณีอื่นนอกเหนือจากการตั้งค่าแบบทั่วๆ ไป จะขึ้นอยู่กับชนิด คุณสมบัติและการใช้งานของการ์ดแต่ละรุ่น ซึ่งในโครงงานนี้ใช้การ์ด A/D รุ่น PCI-DAS 1200/JR โดยรูปที่ 3.2 จะแสดงตัวอย่างในการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (โดยสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวกและ help ใน simulink ของโปรแกรม MATLAB)



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

หากมีการเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าไม่ว่าจะเป็นค่าพารามิเตอร์ตัวใดตัวใดก็ตาม จะต้องมีการอัปเดต (update) ข้อมูลทุกครั้งโดยการคลิกที่ปุ่ม build ดังรูปที่ 3.3 เพื่อให้โปรแกรมรับรู้ค่าก่อนที่จะนำไปใช้ในการประมวลผล



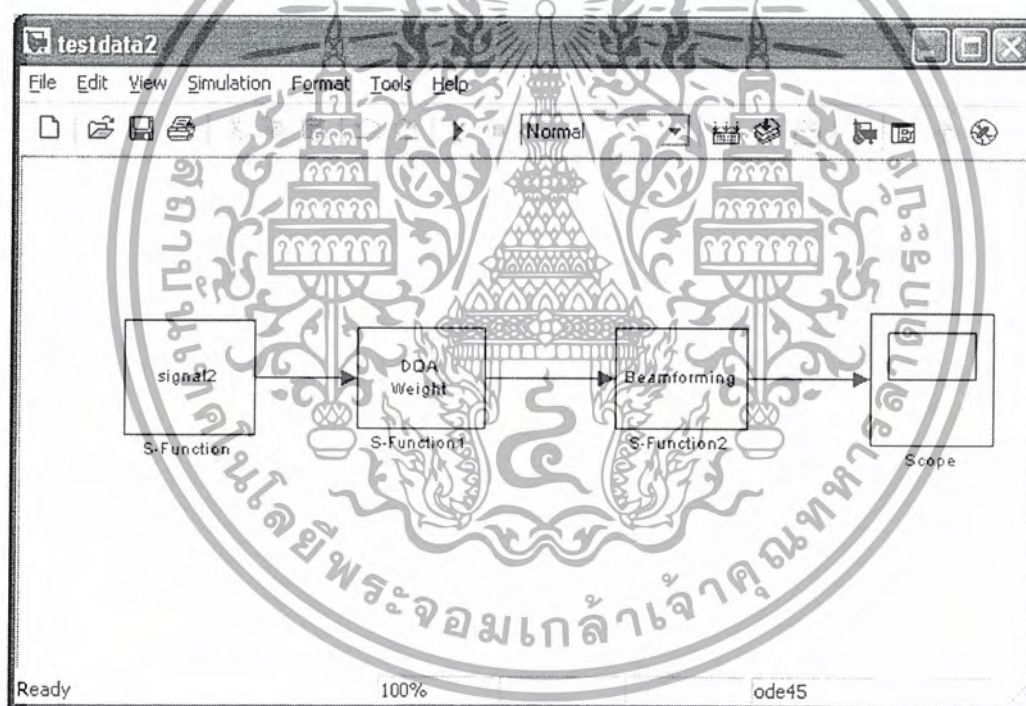
รูปที่ 3.3 แสดงการอัปเดตข้อมูลทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การประมวลผลของสัญญาณภายในโปรแกรม

เมื่อได้สัญญาณอินพุตจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณชาแนลความถี่ 400 เฮิร์ตซ์จำนวน 4 ช่องสัญญาณที่มีเฟสแตกต่างกันในเวลาเดียวกันผ่านการ์ด A/D สัญญาณที่ได้ก็จะนำไปสู่การประมวลผลภายในโปรแกรม โดยจะทำการคำนวณหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) เพื่อให้ทราบทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ (desired signal direction) พร้อมทั้งคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) เพื่อใช้ในการจัดรูปแบบลำคลื่น ซึ่งอยู่ใน toolbox ของ DOA, Weight และจะนำค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ไปทำการจัดรูปแบบลำคลื่นให้ตอบสนองในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้จาก toolbox ของ Beamforming โดยทำการคำนวณเพื่อปรับค่าเมตริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการจัดรูปแบบลำคลื่นตอบสนองค่าสูงสุดในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ

โดยหน้าต่างของ simulink ที่แสดงการประมวลผลสัญญาณใน toolbox ต่างๆมีดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดง toolbox ต่างๆที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

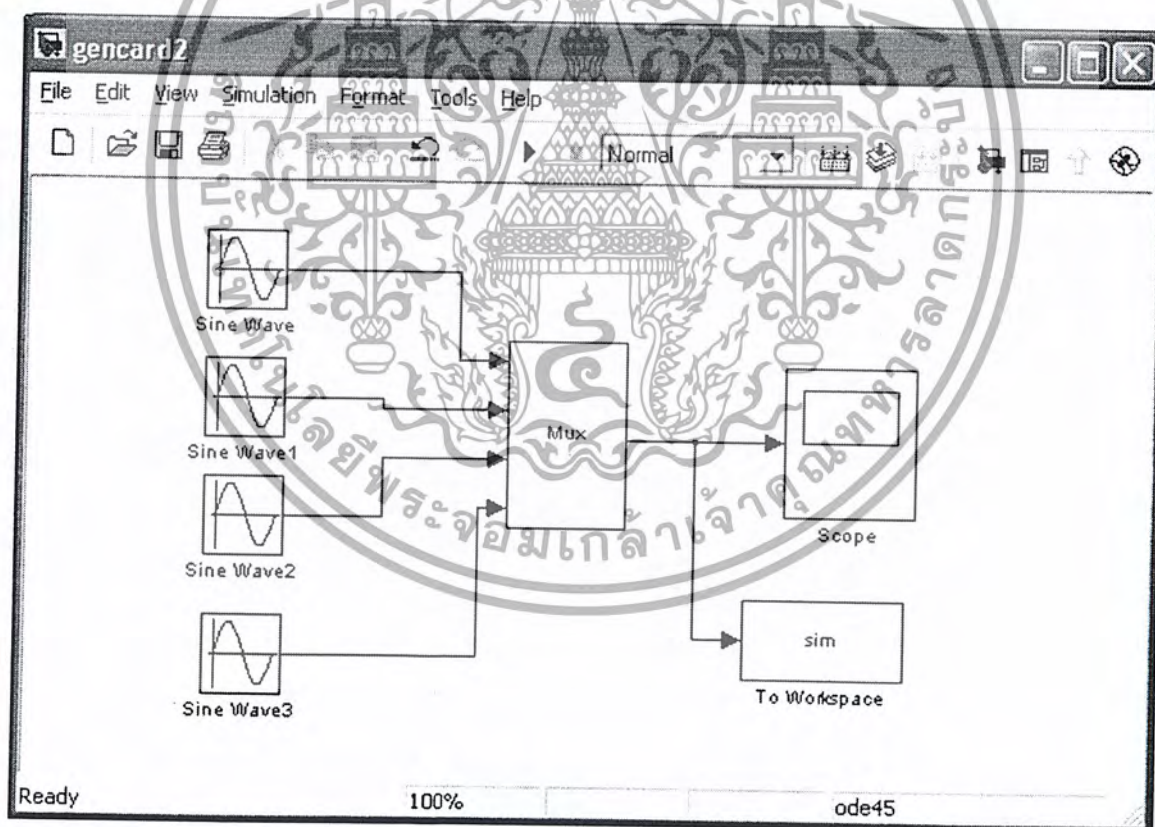
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

จากที่ได้ศึกษาทฤษฎีในบทที่ 2 ทฤษฎีของการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) ทฤษฎีการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) และการคำนวณและการสร้างในบทที่ 3 แล้ว ในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่เปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุตที่จำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB กับสัญญาณอินพุตที่มาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณชาแนลความถี่ 400 เฮิรตซ์โดยทำการทดสอบกับ toolbox ต่างๆที่มาจากการเขียน S-Function ในโปรแกรม MATLAB ตามทฤษฎีต่างๆ โดยผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (direction - of - arrival, DOA)
2. การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming)

ในส่วนของสัญญาณอินพุตที่จำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมในการจำลองสัญญาณอินพุตขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 จะได้สัญญาณชาวนความถี่ 400 เฮิร์ตซ์ที่มีเฟสต่างกันในเวลาเดียวกัน เพื่อใช้ในการทดสอบกับค่าอัลกอริทึม (algorithm) ต่างๆของระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว

4.1 การทดลองเพื่อหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) และผลของการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์
2. การ์ด A/D รุ่น PCI-1200/JR
3. คอมพิวเตอร์

ขั้นตอนการทดลอง

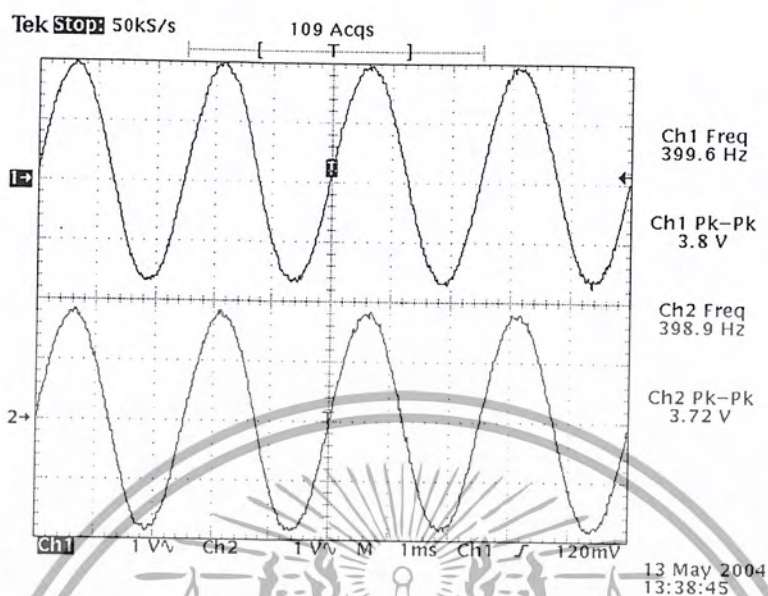
นำสัญญาณที่ได้จากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์จำนวน 4 ช่องสัญญาณป้อนผ่านการการ์ด A/D แล้วทำการประมวลผลในคอมพิวเตอร์เพื่อหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) และผลการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยจะทำการเปรียบเทียบผลระหว่างสัญญาณที่จำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB กับสัญญาณที่มาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณชาวนความถี่ 400 เฮิร์ตซ์



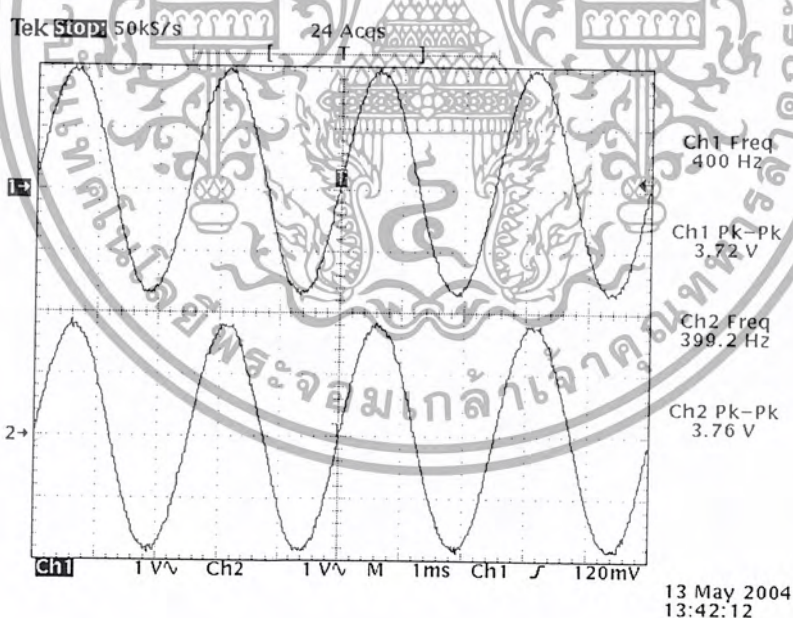
รูปที่ 4.2 รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเครือข่ายเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 สัญญาณอินพุตที่มีเฟสเดียวกัน

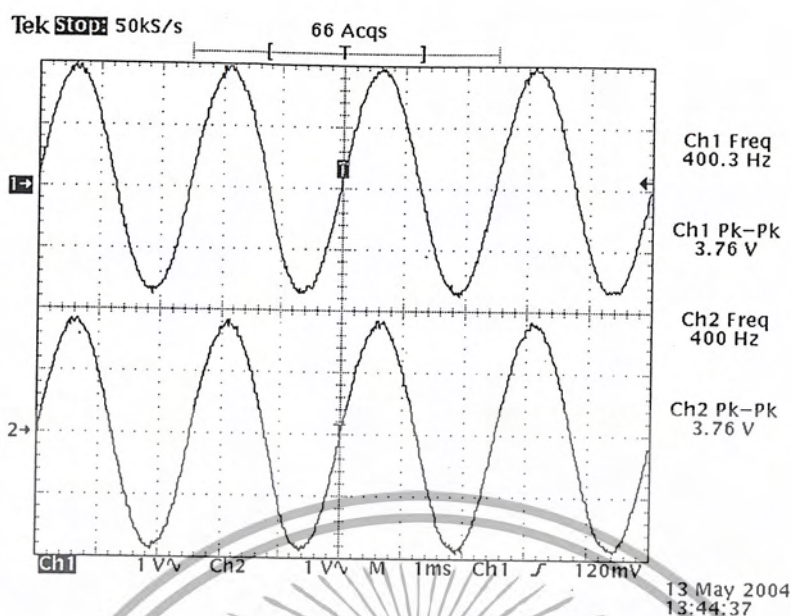


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 2

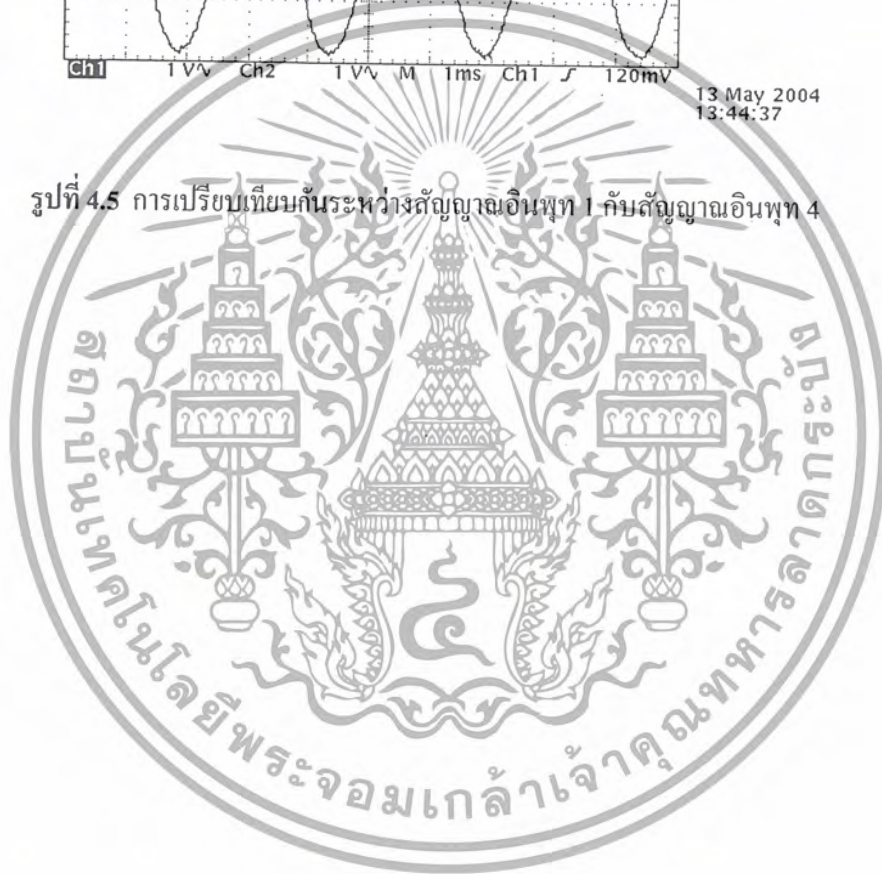


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



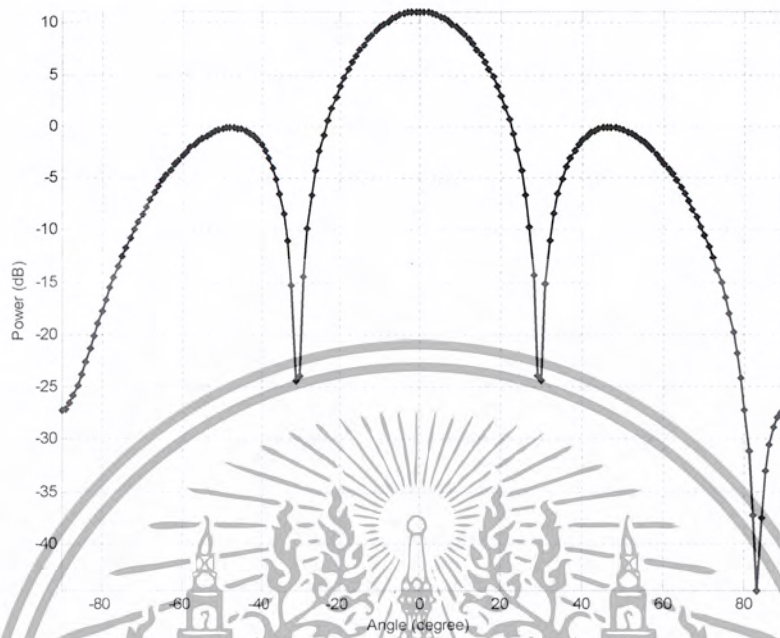
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 4



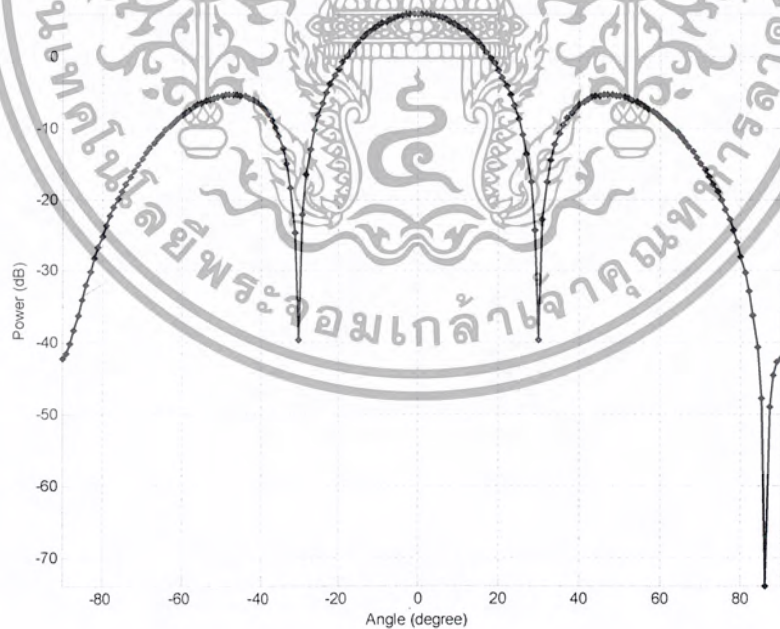
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

- การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA)

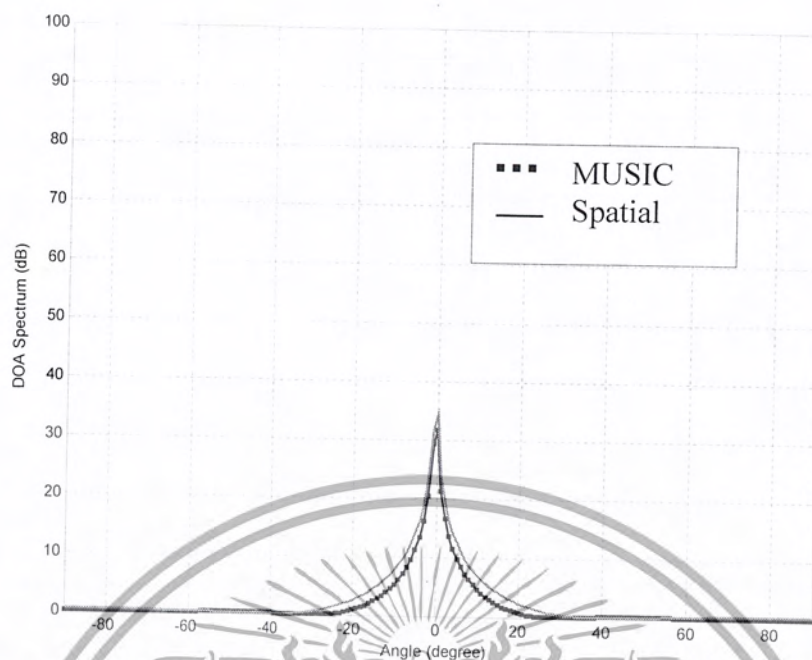


รูปที่ 4.6 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์

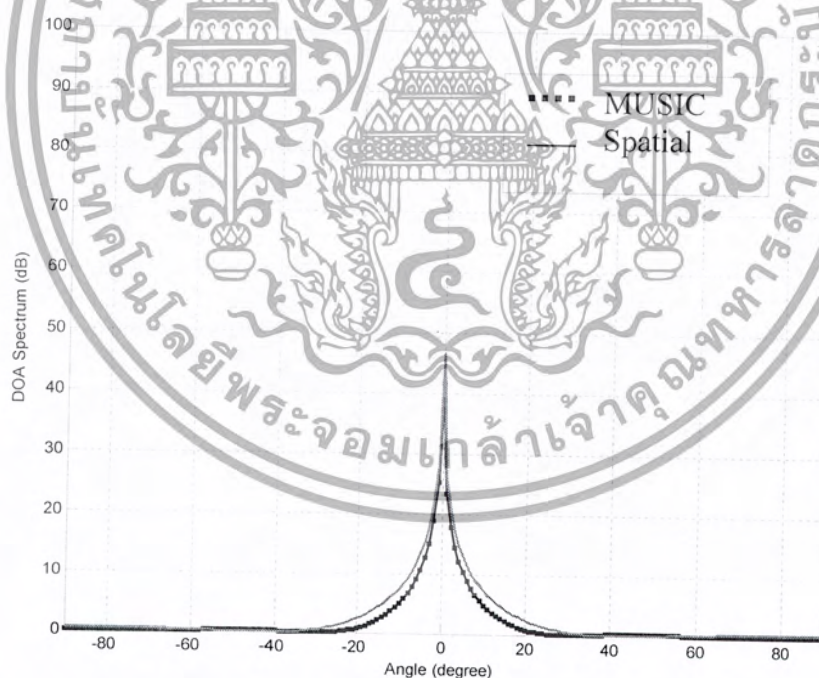


รูปที่ 4.7 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



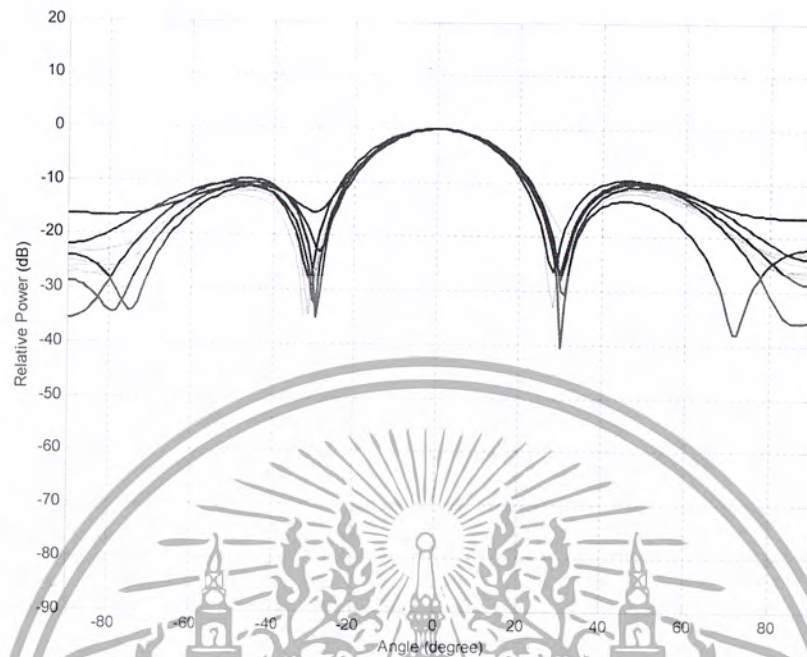
รูปที่ 4.8 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์



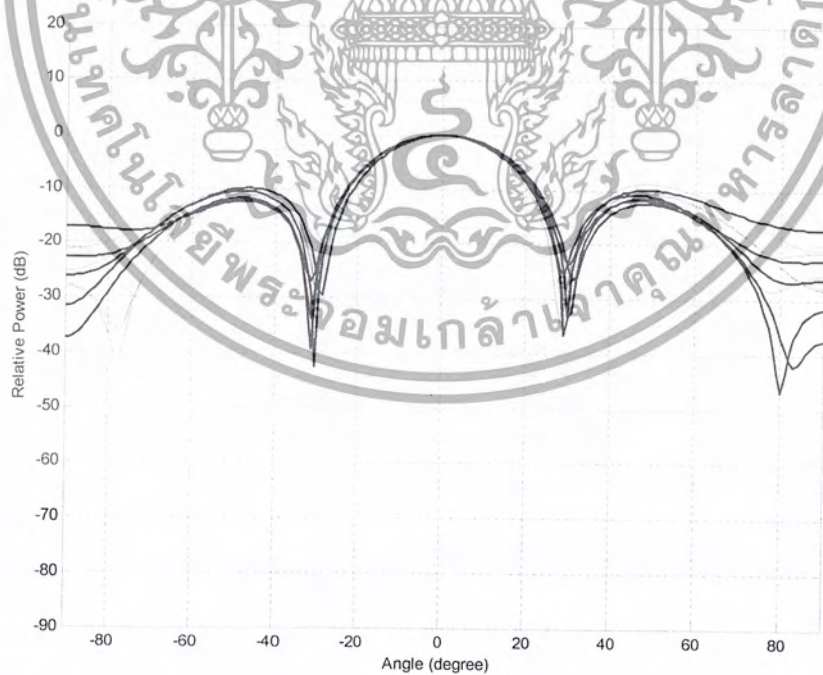
รูปที่ 4.9 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming)

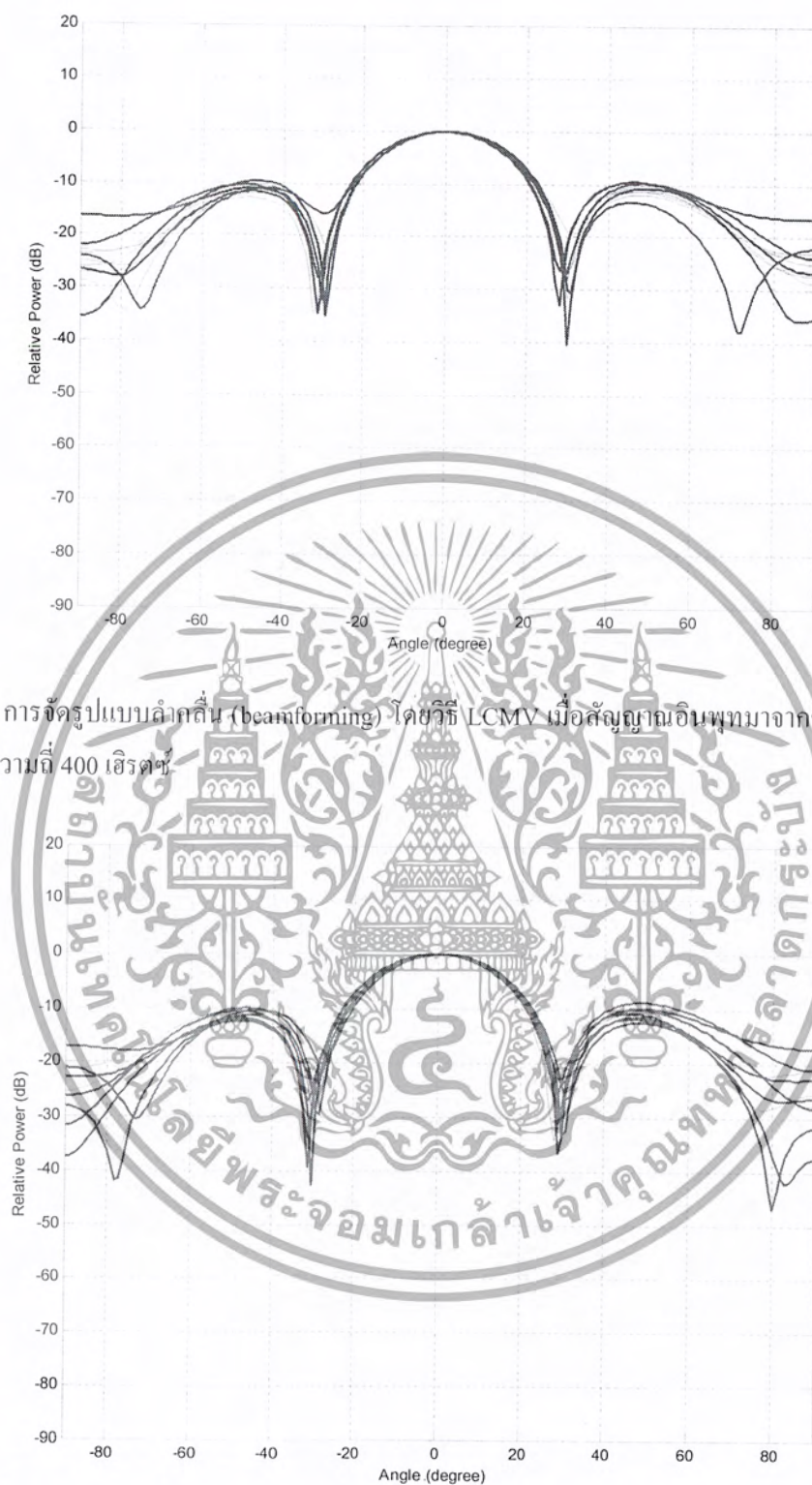


รูปที่ 4.10 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธีแวลด์ับแอบเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.11 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธีแวลด์ับแอบเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

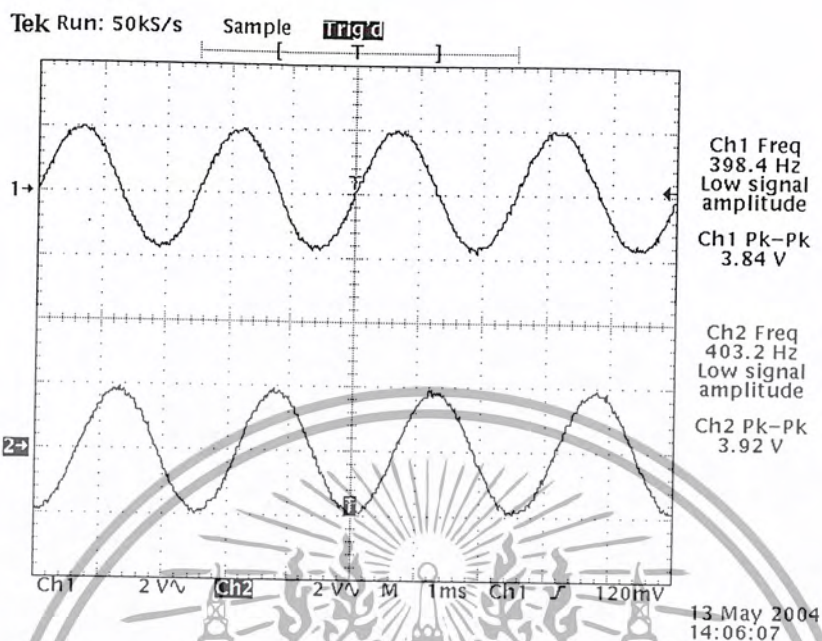


รูปที่ 4.12 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์

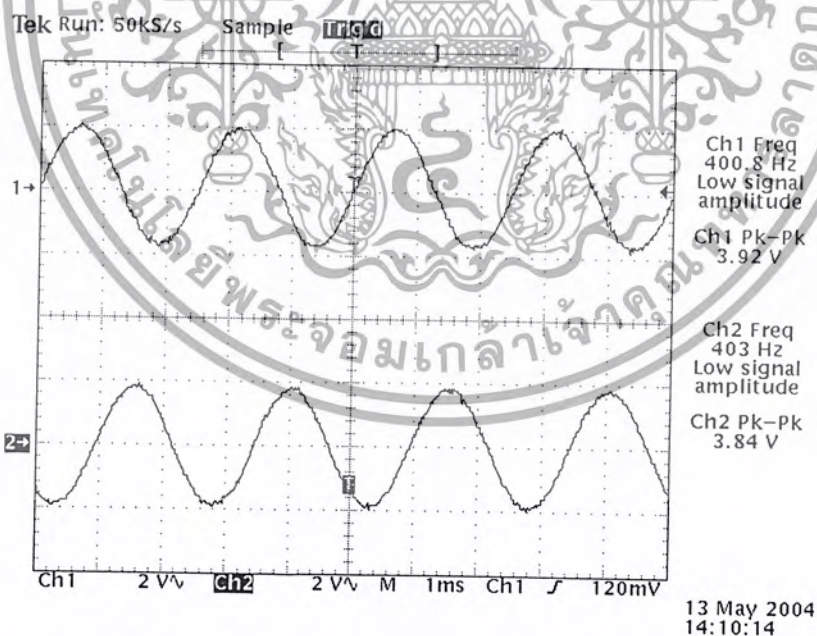
รูปที่ 4.13 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สัญญาณอินพุตที่มีเฟสต่างกัน

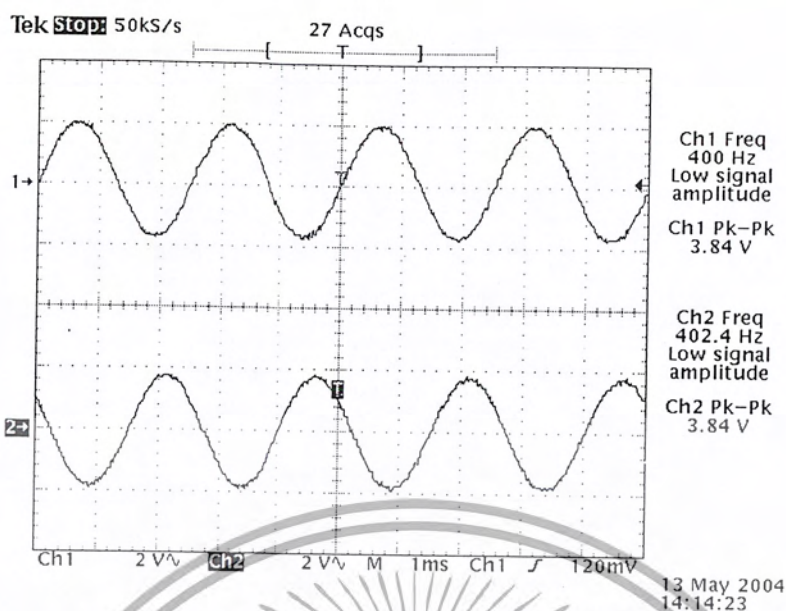


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 2



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



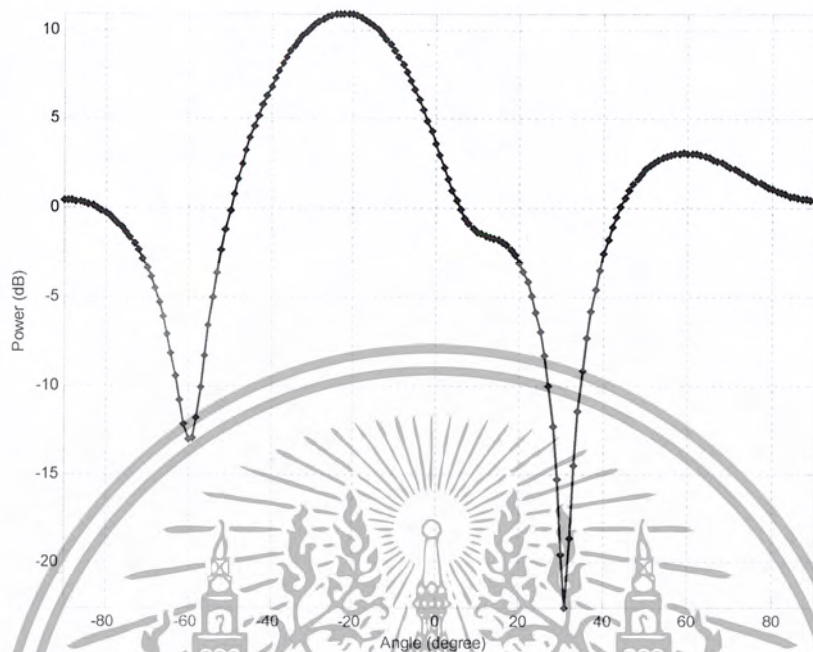
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 4



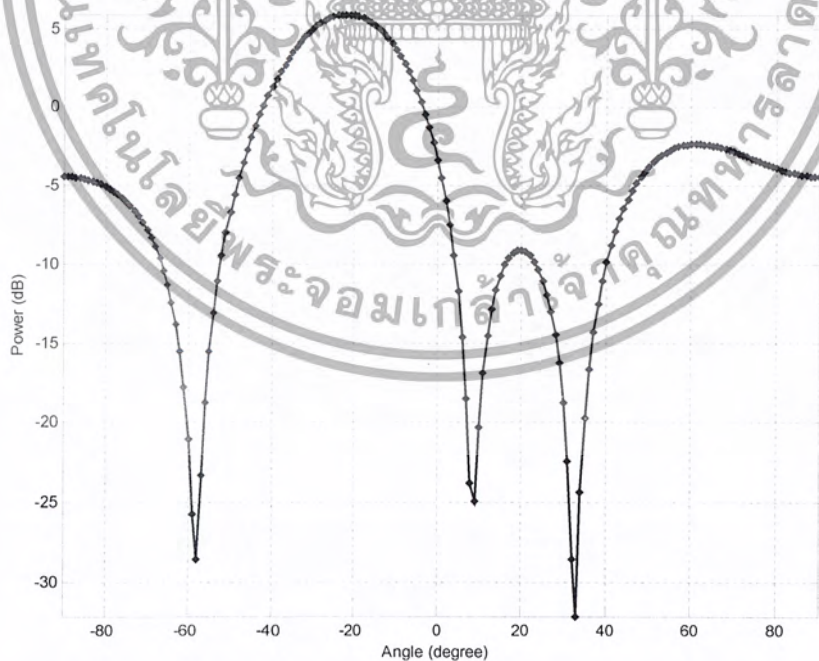
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

- การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA)

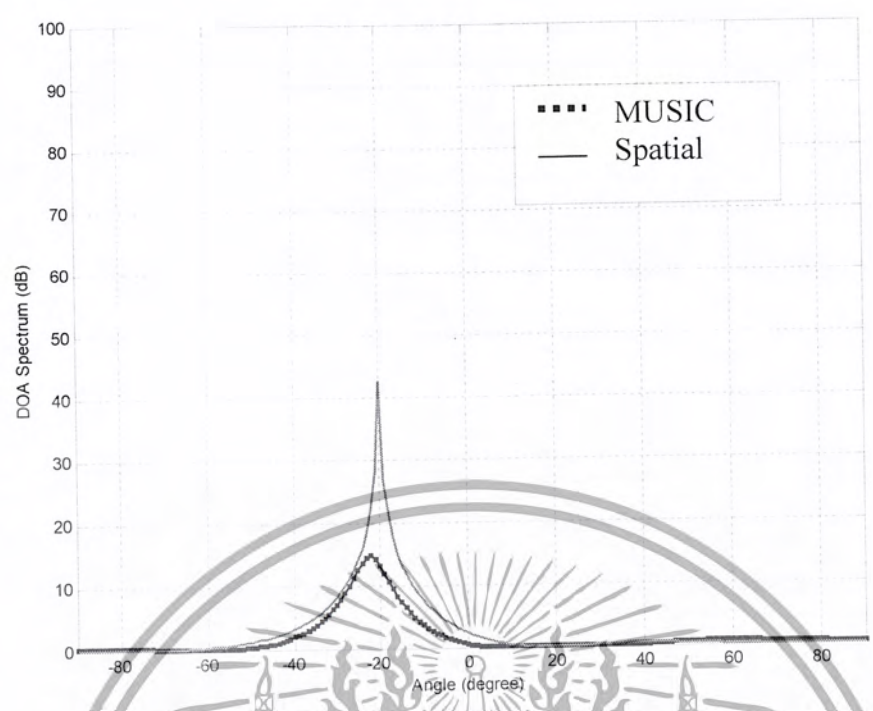


รูปที่ 4.17 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์

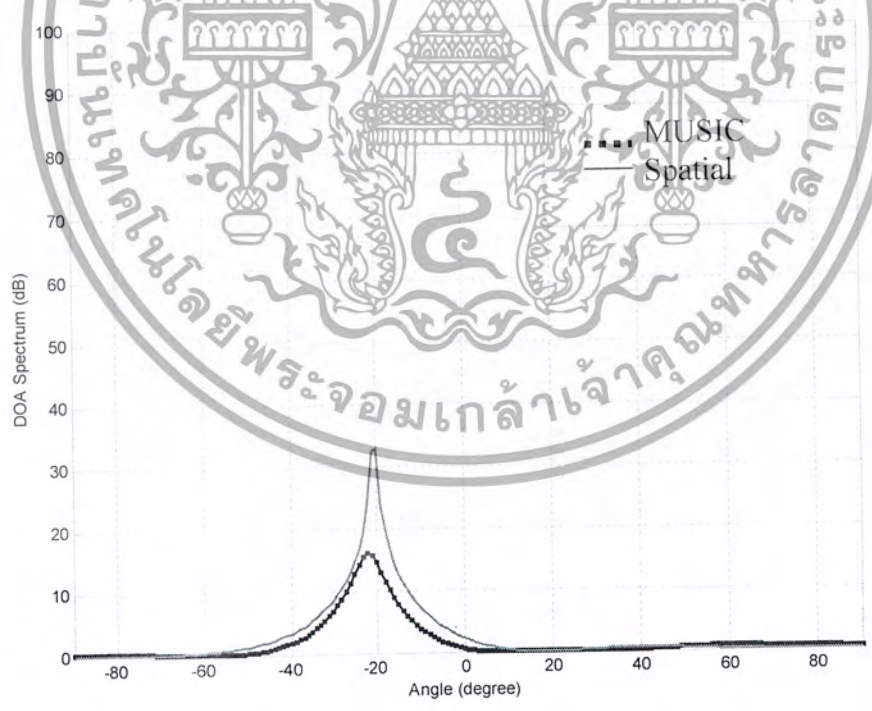


รูปที่ 4.18 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



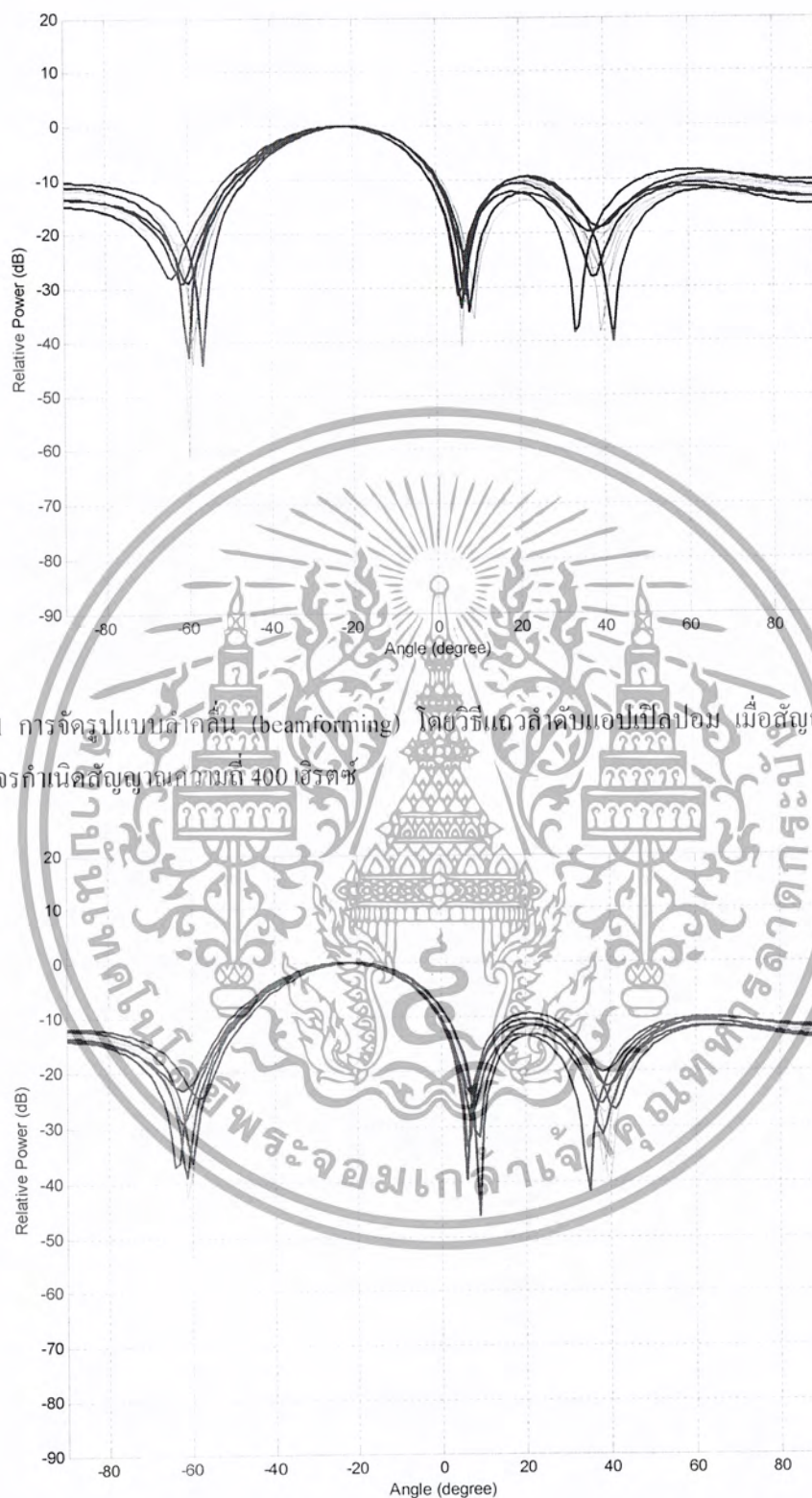
รูปที่ 4.19 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกวนเนตสัญญาณความถี่ 400 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.20 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming)



รูปที่ 4.21 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์

รูปที่ 4.22 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

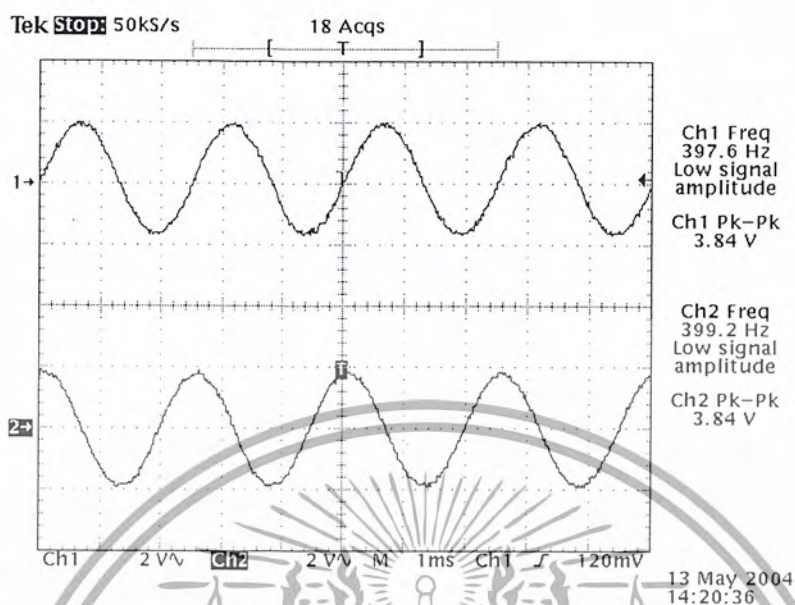


รูปที่ 4.23 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรถ่ายทอดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์

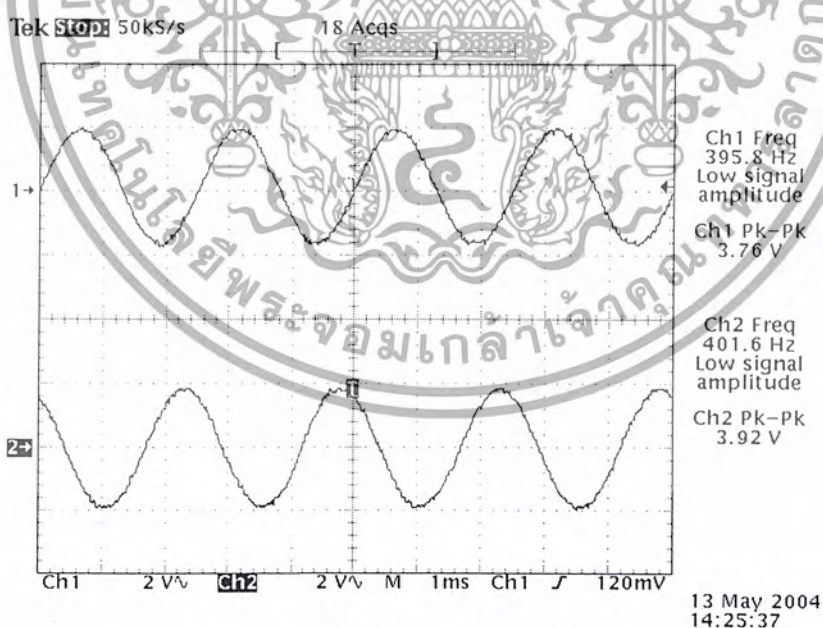
รูปที่ 4.24 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สัญญาณอินพุตที่มีเฟสต่างกัน

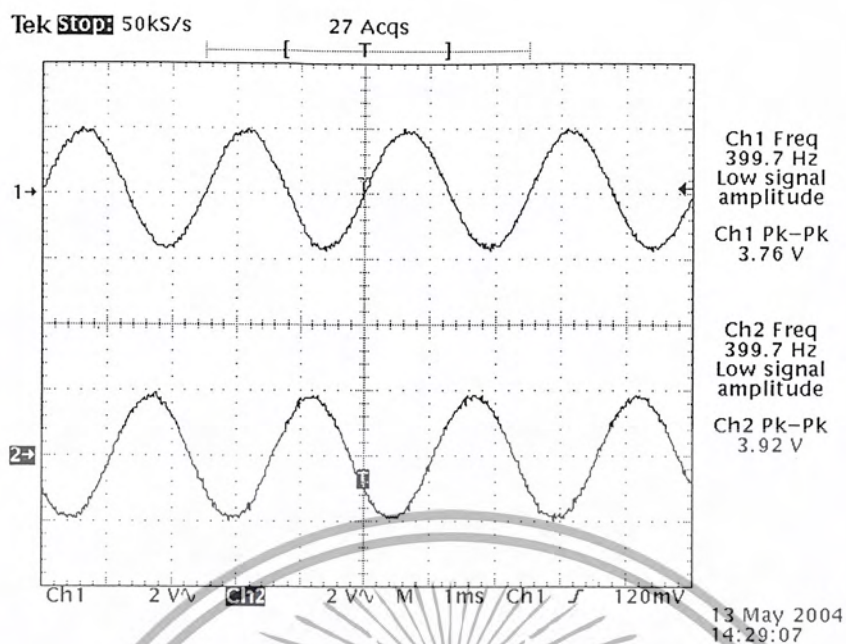


รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 2



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



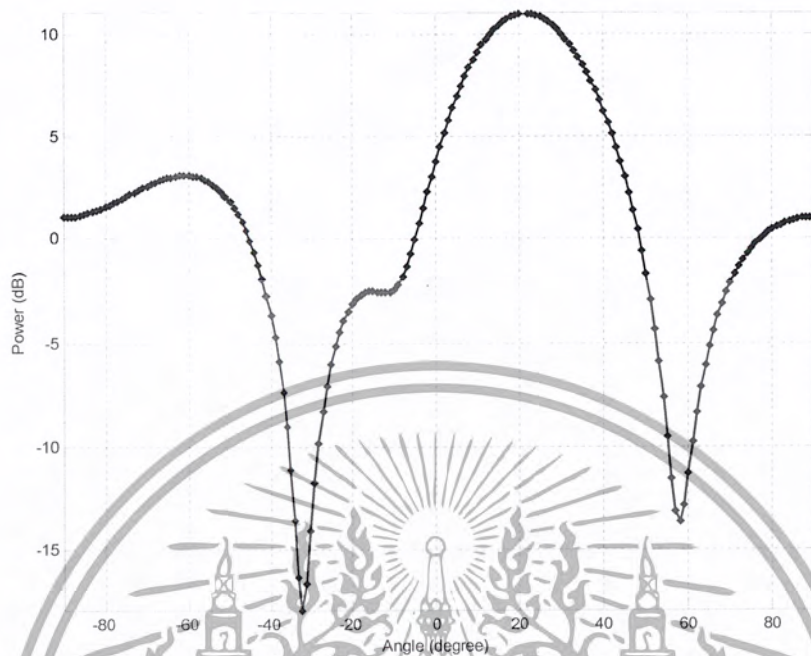
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุต 1 กับสัญญาณอินพุต 4



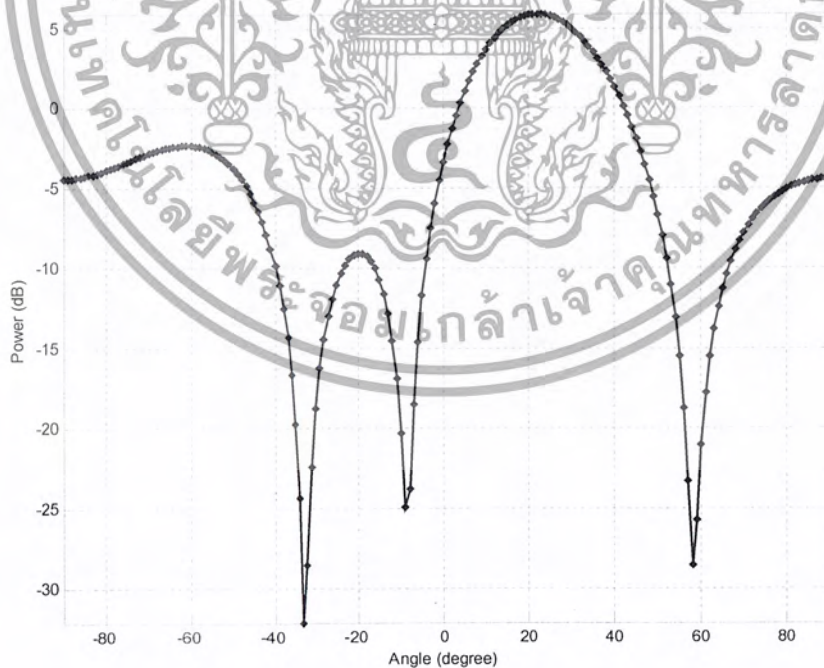
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

- การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA)

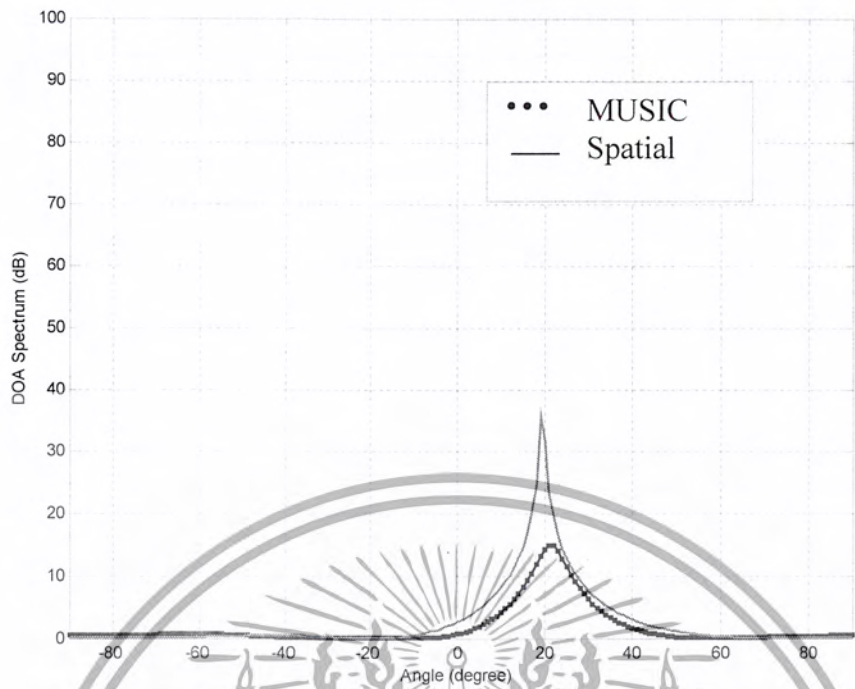


รูปที่ 4.28 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์

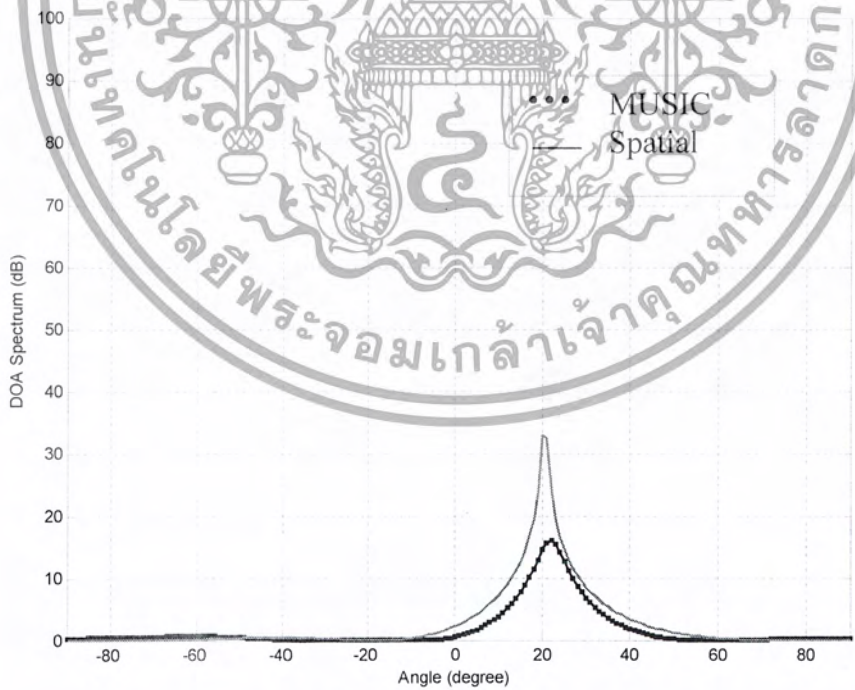


รูปที่ 4.29 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี Conventional เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์



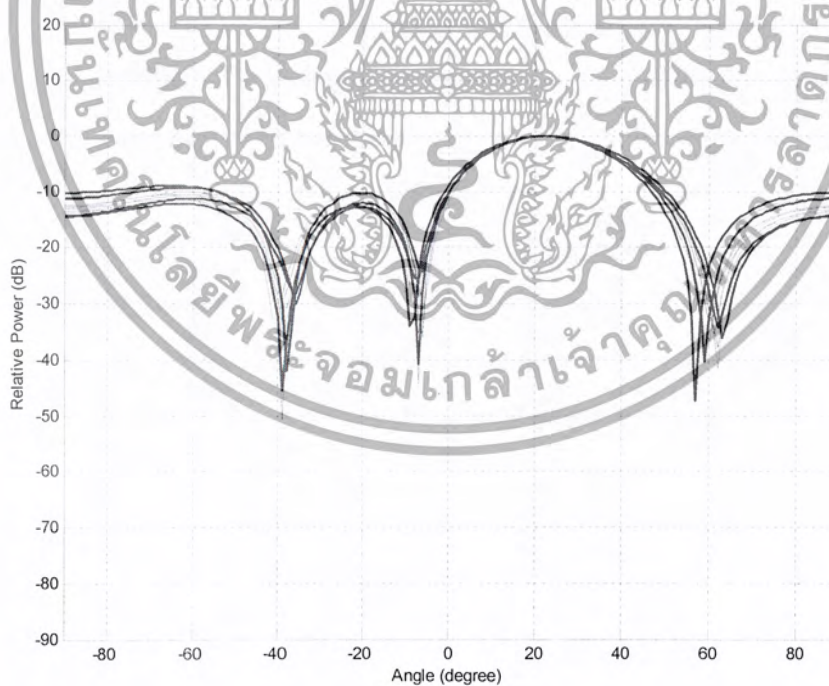
รูปที่ 4.31 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) โดยวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming)

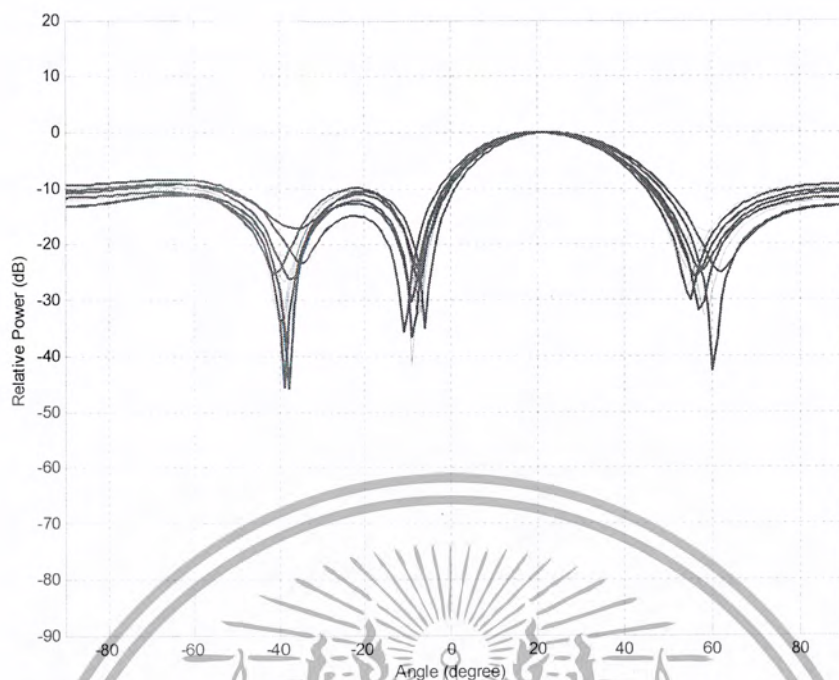


รูปที่ 4.32 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์

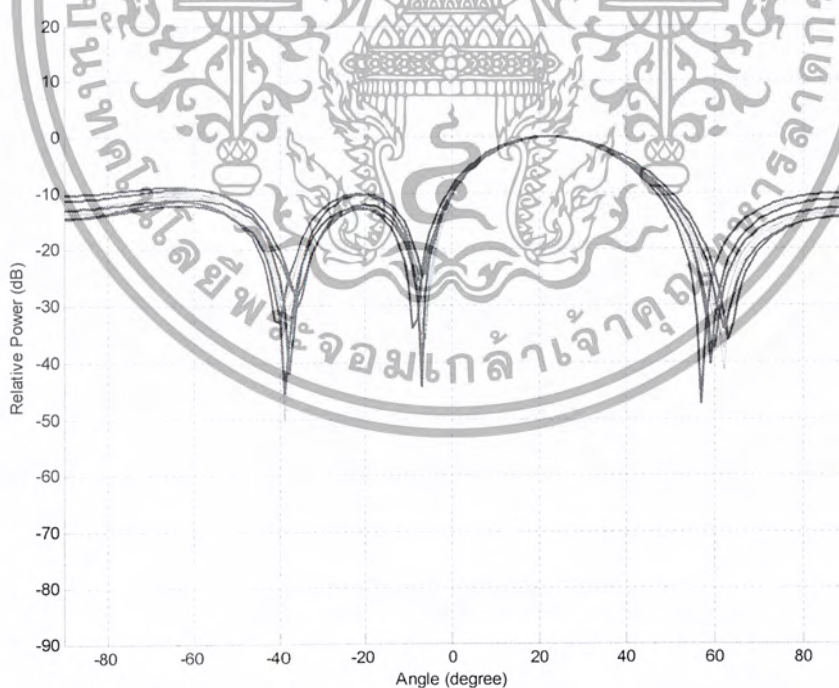


รูปที่ 4.33 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธีแวลวลำดับแอปเปิลปอม เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.35 การจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยวิธี LCMV เมื่อสัญญาณอินพุตจำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) พบว่าทั้ง 3 วิธีคือ วิธี Conventional, MUSIC และ Spatial Smoothing MUSIC สามารถทำนายทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้ แต่ทั้ง 3 วิธีจะมีความแตกต่างกันคือ วิธี Conventional จะให้ผลตอบสนองในรูปของค่ากำลังที่แท้จริงและสามารถนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักได้โดยตรง ส่วนวิธี MUSIC และวิธี Spatial Smoothing MUSIC ผลตอบสนองจะอยู่ในรูปของค่ากำลังทางสเปกตรัมซึ่งไม่ใช่ค่ากำลังที่แท้จริง แต่วิธี Spatial Smoothing MUSIC สามารถใช้แก้ไขปัญหของสัญญาณแบบสหสัมพันธ์ (multipath signal)

ส่วนผลการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) พบว่าทั้งวิธีแวลวลำดับแอปเปิลบอม และวิธี LCMV สามารถให้ผลตอบสนองในการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง แต่ทั้ง 2 วิธีจำเป็นต้องรู้ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) ก่อนโดยจะสามารถคำนวณได้จากวิธี Conventional



บทที่ 5

สรุป และ วิเคราะห์

จากการศึกษาถึงหลักการต่างๆ ของทฤษฎีทั้งหมด และวัตถุประสงค์ในการทำโครงงานนี้ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 โดยจะอธิบายถึงทฤษฎีต่างๆ ของสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว (adaptive array antenna) ในบทที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยการทำงาน และกลไกต่างๆ ของสายอากาศแบบแถวลำดับปรับตัว รูปแบบของสัญญาณต่างๆ รูปแบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว ค่าแอมพลิจูดเฟสต่างๆ ในสายอากาศแถวลำดับ และหลักการของระดับขั้นเสริม โดยมีทฤษฎีการจัดรูปแบบลำคลื่นของสัญญาณ (beamforming) ที่เข้ามาซึ่งประกอบไปด้วยวิธีของ LCMV และวิธีแถวลำดับแอปเปิลบอม (applebaum array) ทฤษฎีการหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา (DOA) ซึ่งจะประกอบไปด้วยวิธี Conventional, MUSIC และ Spatial smoothing โดยการหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามามีความจำเป็น เนื่องจากการจัดรูปแบบลำคลื่นจำเป็นต้องรู้ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา และอธิบายถึงการปรับค่าเมทริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) เพื่อประโยชน์ในการจัดรูปแบบลำคลื่น ในบทที่ 3 จะอธิบายถึงการคำนวณค่าต่างๆ ของสัญญาณที่รับเข้ามาซึ่งประกอบไปด้วยการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา การหาค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) เพื่อใช้ในการจัดรูปแบบลำคลื่น และการปรับค่าของเมทริกซ์โคเวเรียนซ์ (covariance matrix) เพื่อเป็นประโยชน์ในการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังอธิบายถึงการสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว โดยการใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผล ซึ่งมีการเขียนโปรแกรมให้อยู่ในรูปของ S-Function เพื่อสร้างเป็น toolbox ต่างๆ เพื่อที่จะประมวลผลเมื่อมีการรับสัญญาณจากสายอากาศ ในบทที่ 4 จะอธิบายถึงการทดลองและผลการทดลองซึ่งประกอบด้วย ผลการทดลองในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (DOA) และการจัดรูปแบบลำคลื่น (beamforming) โดยทำการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตที่มาจากชุดวงจรกำเนิดสัญญาณ 400 เฮิรตซ์กับสัญญาณอินพุตที่จำลองขึ้นมาจากโปรแกรม simulink ใน MATLAB พบว่าผลที่ได้จากการทดลองสามารถหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาและ ทำการจัดรูปแบบลำคลื่นให้ตอบสนองในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้ถูกต้อง โครงงานนี้ได้ระทำการนำค่าอัลกอริทึม (Algorithm) ของวิธีการคำนวณการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัว (Adaptive Array Antenna) ซึ่งเป็นงานวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาปริญญาโท [3] มาเขียนโปรแกรมใหม่ให้อยู่ในรูปของ S-Function โดยนำมาสร้างเป็น toolbox ต่างๆเพื่อที่จะนำไปประมวลผลสัญญาณให้เข้าสู่ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวเพื่อมีการตอบสนองได้ดีในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ

สรุป การสร้างระบบการจัดรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ มีข้อจำกัดที่ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ คือ

1. สัญญาณอินพุตที่ได้จากสายอากาศรับมีความถี่ที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของการ์ด A/D ในโปรแกรม MATLAB
2. สัญญาณอินพุตที่ได้จากสายอากาศรับที่มีความถี่ต่ำนั้นความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตมีน้อยมากจึงไม่สามารถนำสัญญาณไปทำการประมวลผลตามค่าอัลกอริทึมที่ใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อจำกัดดังกล่าวซึ่งทำให้การประมวลผลของสัญญาณมีความผิดพลาด ในโครงการนี้จึงได้นำวงจรกำเนิดสัญญาณชายนี้นี้ ความถี่ 400 เฮิร์ตซ์ 4 ช่องสัญญาณที่ต่างเฟสกันมาใช้ในการ interface กับการ์ด A/D เพื่อทำการทดสอบกับระบบแทนสัญญาณที่ได้จากสายอากาศรับ เนื่องจากวงจรกำเนิดสัญญาณชายนี้นี้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ และมีความต่างเฟสกันในแต่ละช่องสัญญาณ จึงเป็นการนำสัญญาณที่เป็นไปตามข้อจำกัดดังกล่าวมาใช้ในการประมวลผล ซึ่งจะทำให้การประมวลผลของสัญญาณนั้นมีความถูกต้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมประมวลผลสัญญาณ โดยใช้ MATLAB ในรูปของ s-function

```
function [sys,x0,str,ts] = signal2(t,x,u,flag,sim)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[b,w]=size(sim);
A=b;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

switch flag,

    case 0                                % Initialization
        [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,w,sim) ;

    case 3                                % Outputs
        sys = mdlOutputs (t,x,u,A,w,sim);

    case { 1, 2, 4, 9}
        sys = [];

    otherwise                              % Error handling
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);

end

%=====
%=====
% mdlInitializeSizes
%=====
%=====
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,w,sim)

sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = A*8;
sizes.NumInputs = 0;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);
str = [];
x0 = [];
ts = [1 0];

%=====
%=====
% mdlOutputs
%=====
%=====
function sys = mdlOutputs(t,x,u,A,w,sim)

Y=sim';
M=4;
N=length(Y);
NN=N+1000;
t=0:N-1;
tt=[0:NN-1];
fc=400/1600;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

ff=fc;
T=0:1/1600:(N-1)/1600;
AA=exp(-j*2*pi*fc*t);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Complex number
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for k=1:M
    c=hilbert(Y(k,:));%.*exp(-j*2*pi*fc*T);
    B(k,:)=c(:,.);
end

BN=B/(max(max(B)));
for n=1:4
    figure(8)
    subplot(4,1,n);
    plot(t,BN(n,:), 'r');
end

R=zeros(1,N*8);

R(1,1:N)=real(B(1,:));
R(1,(N+1):2*N)=imag(B(1,:));
R(1,(2*N+1):3*N)=real(B(2,:));
R(1,(3*N+1):4*N)=imag(B(2,:));
R(1,(4*N+1):5*N)=real(B(3,:));
R(1,(5*N+1):6*N)=imag(B(3,:));
R(1,(6*N+1):7*N)=real(B(4,:));
R(1,(7*N+1):8*N)=imag(B(4,:));

sys=R;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function [sys,x0,str,ts] = DW2(t,x,u,flag,sim)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[b,w]=size(sim);
A=b;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

switch flag,

    case 0                                % Initialization
        [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,w,sim) ;

    case 3                                % Outputs
        sys = mdlOutputs (t,x,u,A,w,sim);

    case { 1, 2, 4, 9}
        sys = [];

    otherwise                             % Error handling
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);

end

```

```

=====
%=====
% mdlInitializeSizes
%=====
=====
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,w,sim)

sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 1;
sizes.NumInputs = -1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);
str = [];
x0 = [];
ts = [1 0];

%=====
=====
% mdlOutputs
%=====
=====
function sys = mdlOutputs(t,x,u,A,w,sim)

```

```

R=u;
Y=zeros(4,A);
y1=u((length(u)-(8*A-1)):(length(u)-(7*A)));
y2=u((length(u)-(7*A-1)):(length(u)-(6*A)));
y3=u((length(u)-(6*A-1)):(length(u)-(5*A)));
y4=u((length(u)-(5*A-1)):(length(u)-(4*A)));
y5=u((length(u)-(4*A-1)):(length(u)-(3*A)));
y6=u((length(u)-(3*A-1)):(length(u)-(2*A)));
y7=u((length(u)-(2*A-1)):(length(u)-A));
y8=u((length(u)-(A-1)):(length(u)));
Y1=y1+i*y2;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Weight computation

Convention Technique

```
nth=1;
C=Am(:,nth);
w app=5*Rinv*C;
```

```
save w data2 w app w lcmv v1 v2;
```

sys=v1;



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```
function [sys,x0,str,ts] = Beam2(t,x,u,flag,sim)
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[b,w]=size(sim)
```

```
A=b;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
switch flag,
```

```
    case 0 % Initialization
```

```
        [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,w,sim) ;
```

```
    case 3 % Outputs
```

```
        sys = mdlOutputs (t,x,u,A,w,sim);
```

```
    case { 1, 2, 4, 9}
```

```
        sys = [];
```

```
    otherwise % Error handling
```

```
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
```

```
end
```

```
%=====
```

```
=====
```

```
% mdlInitializeSizes
```

```
%=====
```

```
=====
```

```
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,w,sim)
```

```
sizes = simsizes;
```

```
sizes.NumContStates = 0;
```

```
sizes.NumDiscStates = 0;
```

```
sizes.NumOutputs = -1;
```

```
sizes.NumInputs = -1;
```

```
sizes.DirFeedthrough = 1;
```

```
sizes.NumSampleTimes = 1;
```

```
sys = simsizes(sizes);
```

```
str = [];
```

```
x0 = [];
```

```
ts = [1 0];
```

```
%=====
```

```
=====
```

```
% mdlOutputs
```

```
%=====
```

```
=====
```

```
function sys = mdlOutputs(t,x,u,A,w,sim)
```

```
F=400;
```

```
c=3e8;
```

```
wavelen=c/F;
```

```
M=4;
```

```
deg2rad=pi/180;
```

```
d=wavelen/2;
```

```
%d=0.5;
```

```
j=sqrt(-1);
```

```
th=[-90:1:90]';
```

```
theta=-180:10:180;
```

```
AA=exp(-j*2*pi*([0:M-1]'*sin(th'*deg2rad))*d/wavelen)/sqrt(M);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยดูแล ให้คำแนะนำและ
เสนอแนะแนวทางในการทำโครงงานที่ดีตลอดมา และขอขอบคุณบุคคลต่างๆ ที่คอยให้คำแนะนำที่ดีๆ
ตลอดการทำโครงงานนี้มีดังนี้

นาย ควงอาทิตย์ ศรีมูล

นาย ไพศาล งามจรรยาภรณ์

นาย อาณัติ เหมือนชู

นางสาว ปานิสรา แก้วสวัสดิ์

นาย สุวรรณ จันทร์อิน

นาย เอกรัฐ บุญงา

และพี่ๆ Wireless Communication Lab. ทุกคน สำหรับมิตรภาพดีๆ ที่หยิบยื่นให้

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] Compton R.T., Jr. **Adaptive Antenna Concepts and Performance**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.1988.
- [2] Liberti J.C., Jr. and Rappaport T.S. **Smart Antennas for Wireless Communication: IS-95 and Third Generation CDMA Application**. New Jersey: Prentice Hall, Inc.1999.
- [3] ธนากร สุคนธพงค์, "Covariance Matrix Adjustment Technique for Beamforming Improvement of Adaptive Array Antenna," วิทยานิพนธ์ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2546
- [4] Hayes M.H. **Statistical Digital and Signal Processing and Modeling**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1996.

