



## รายงานการวิจัย

การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากโดยอาศัยทิศทางการมาถึงของสัญญาณ  
DOA-ASSISTED ORTHOGONAL BEAMFORMING

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากโดยอาศัยทิศทางการมาถึงของสัญญาณ  
DOA-ASSISTED ORTHOGONAL BEAMFORMING

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้



ผู้วิจัย

สิงหาคม 2561

## บทคัดย่อ

มาตรฐานของระบบการสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนาจากการสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดี่ยวไปสู่การสื่อสารแบบหลายผู้ใช้ เพื่อให้ผู้ใช้งานมีการส่งผ่านที่ดีขึ้น ลดการใช้พลังงานและครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างขึ้น การสื่อสารแบบหลายผู้ใช้เป็นการส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้งานหลายๆ ผู้ใช้งานพร้อมกัน อย่างเป็นอิสระต่อกันที่เวลาและความถี่เดียวกัน นอกจากนี้ยังนำเทคโนโลยีสายอากาศหลายต้นมาช่วยพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สาย แต่วิธีการส่วนใหญ่นั้นไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีโมเด็มและเทคนิคการควบคุมอัตรารวมต่อผู้ใช้งาน การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายหรือการก่อรูปลำคลื่นแบบรวมโอกาส ล้วนต้องมีการป้อนกลับของช่องสัญญาณหรือข้อมูลย้อนกลับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการประมวลผล ลื่นเปลืองพลังงานในการป้อนข้อมูลย้อนกลับ อีกทั้งถ้าช่องสัญญาณมีการลดทอนสูงอาจทำให้สัญญาณอ้างอิงนั้นผิดเพี้ยนไปได้ ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบบการสื่อสารหลายผู้ใช้และไม่มีการป้อนข้อมูลและช่องสัญญาณย้อนกลับ ซึ่งเรียกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก โดยการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากนั้นต้องสามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้งานได้พร้อมกัน โดยส่วนที่เป็นลำคลื่นข้างเคียงจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้งานคนอื่นๆ วิธีการนี้อาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณในแต่ละผู้ใช้งาน เพื่อช่วยทำให้การก่อรูปลำคลื่นมีลักษณะตั้งฉาก กล่าวคือลำคลื่นหลักจะหันไปยังทิศทางของผู้ใช้งานแต่ละคนโดยเฉพาะและจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้ในทิศทางอื่นๆ งานวิจัยฉบับนี้ยังได้นำเสนอการจำลองแบบและออกแบบสร้างระบบต้นแบบในสภาพแวดล้อมจริง ผลจากการจำลองแบบและผลการวัดชุดอุปกรณ์ต้นแบบพบว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ปริมาณงานมากกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม และให้ความคมชัดพลาดบิตต่ำกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม

## Abstract

So far, standards of wireless communication systems have been developed from single-user to multi-user communications so that users can gain higher data transmission speed, reduction of power consumption and wider coverage. For the multi-user transmission, a base station transmits data to a number of users employing the same frequency at the same time. Furthermore, a multiple antennas technology has been taken into account to upgrade the multi-user communication systems for example: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technology, Per-User Unitary Rate Control technique (PU2RC), Distributed beamforming and Opportunistic beamforming. These can be accomplished with the help of feedback information or channel in order to keep the accuracy of received data, hence the systems are relatively complicated. Therefore, the research proposes an alternative beamforming for multi-user communications, so called orthogonal beamforming. A number of beams are formed in pre-defined directions at the same where all beams employ the same frequency. Furthermore, to avoid interference from other users having the same frequency, all beams are orthogonal to each other. The orthogonal beamforming using an acknowledge of Direction Of Arrival (DOA) estimation. To validate the proposed concept, some simulations and experiments in various scenarios are performed. The obtained simulation results reveal that the orthogonal beamforming provides higher SINR over the conventional beamforming. Also, a constructed prototype is tested in real indoor environment, which reveals that the orthogonal beamforming provides higher received signal strength and throughput but low packet error rate compared with the conventional beamforming.

## สารบัญ

หน้า

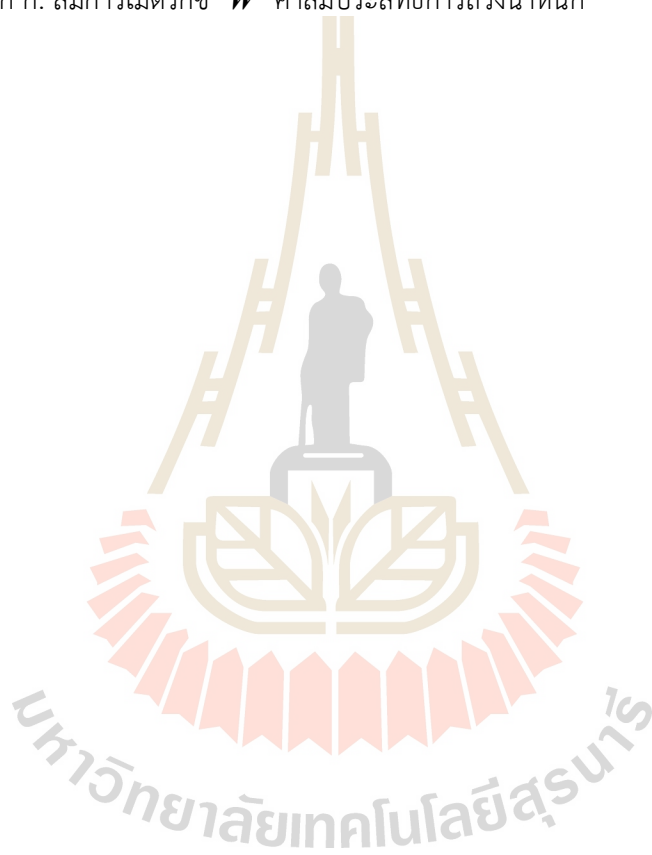
บทคัดย่อ .....	ก
คำนำ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	5
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	5
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน	5
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย	6
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย	6
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	6
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	6
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>7</b>
2.1 กล่าวนำ	7
2.2 ระบบการสื่อสารไร้สาย	8
2.2.1 ระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่	9
2.2.2 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	11
2.2.3 เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายไวแมกซ์	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 รูปแบบการสื่อสาร	14
2.3.1 การสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดียว	14
2.3.2 การสื่อสารแบบหลายผู้ใช้งาน	15
2.4 เทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น	16
2.4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น	17
2.4.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ	20
2.5 การก่อรูปลำคลื่น	22
2.6 การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ	27
2.6.1 วิธีห้วงเวลารวมกัน	27
2.6.2 วิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน	29
2.6.3 วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก	31
2.6.4 วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท	39
2.7 กล่าวสรุป	44
<b>3 กระบวนการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากโดยอาศัยทิศทางการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ</b>	<b>45</b>
3.1 กล่าวนำ	45
3.2 กระบวนการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก	45
3.2.1 แบบผู้ใช้งานเดียว	45
3.2.2 แบบหลายผู้ใช้งาน	48
3.4 กล่าวสรุป	54
<b>4 ผลการจำลองแบบการก่อรูปแบบตั้งฉากโดยอาศัยทิศทางการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ</b>	<b>55</b>
4.1 กล่าวนำ	55
4.2 การจำลองแบบการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากและแบบดั้งเดิม	55
4.3 สถานการณ์มุมต่างๆ ของผู้ใช้งานโดยอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ	67
4.4 กรณีศึกษา : การก่อรูปลำคลื่นบนมาตรฐานการสื่อสารไร้สาย IEEE802.11ac	71
4.5 กล่าวสรุป	77

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 แนวทางการวิจัยที่ต้องดำเนินการต่อ	78
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. สมการเมตริกซ์ $W$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก	85





## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดียว	14
2.2	การสื่อสารแบบหลายผู้ใช้งาน	15
2.3	ระบบที่มีการป้อนกลับข้อมูลและช่องสัญญาณ	16
2.4	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น	18
2.5	สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน $2 \times 2$	22
2.6	การก่อรูปลำคลื่น	23
2.7	ระบบการก่อรูปลำคลื่นเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ	24
2.8	การเปรียบเทียบสเปกตรัมเชิงตำแหน่งของวิธีห้วงเวลารวมกันและวิธีความแปรปรวน น้อยที่สุดของคาพอน เมื่อมีสองสัญญาณเข้ามาในทิศทาง 90 และ 100 องศา	31
2.9	การวิเคราะห์หาทิศทางมาถึงของสัญญาณแบบวิธีมิวสิก	37
2.10	การเปรียบเทียบการวิเคราะห์หาทิศทางมาถึงของสัญญาณระหว่างวิธีห้วงเวลา รวมกันวิธีคาพอน และวิธีมิวสิก (ก) เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 90 และ 100 องศา (ข) เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 90 และ 95 องศา	39
3.1	การก่อรูปลำคลื่นเพื่อใช้งานแบบ 1 ผู้ใช้งาน	46
3.2	การก่อรูปลำคลื่นเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการจาก $M$ ผู้ใช้งาน	49
4.1	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 30 60 90 และ 120 องศา	58
4.2	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 30 60 90 และ 120 องศา	58
4.3	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 50 100 และ 150 องศา	60
4.4	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 50 100 และ 150 องศา	60
4.5	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 7 50 90 และ 113 องศา	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 7 50 90 และ 113 องศา	63
4.7	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 16 44 และ 85 องศา	64
4.8	แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 16 44 และ 85 องศา	65
4.9	การประมาณทิศทางมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณ รบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB	68
4.10	การประมาณทิศทางมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณ รบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB	69
4.11	แบบจำลองเทคนิคไมโมในระบบหลายผู้ใช้งาน	72
4.12	แบบจำลองเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นในระบบหลายผู้ใช้งาน	72
4.13	อัตราการส่งข้อมูลเทียบกับระยะทางสำหรับเทคนิคไมโม เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น แบบตั้งเดิม (Non OBFM) และเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก (OBFM) ในระบบหลายผู้ใช้งาน เมื่อมีผู้ใช้งานพร้อมกัน 2 คน	75
4.14	ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะทาง 45 เมตร ของเทคนิค ไมโม การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิม (Non OBFM) และการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก (OBFM) ในระบบหลายผู้ใช้งาน	76
5.1	แผนภาพบล็อกชุดทดสอบเบื้องต้น	79

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมและแบบตั้งฉาก	56
4.2	อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางสำหรับกรณีที่ 1 แบบ ก.	59
4.3	อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางกรณีที่ 1 แบบ ข.	61
4.4	อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางกรณีที่ 2 แบบ ก.	63
4.5	อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางกรณีที่ 2 แบบ ข.	66
4.6	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ	67
4.7	การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพีริทเมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB	70
4.8	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ	73

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์ต้องการสื่อสารข้อมูลตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็น การโอนย้ายแฟ้มข้อมูล การสืบค้นข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต การพูดคุยและการส่งข้อความถึงกัน เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า ผู้ใช้บริการระบบสื่อสารไร้สายมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจากอดีตจนถึงปัจจุบันและยังจะเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่าตัวในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นระบบการสื่อสารไร้สายจึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ต้องการมากขึ้น เร็วขึ้น เรื่องของความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ พื้นที่การให้บริการที่ครอบคลุมกว้างขึ้นหรือจะเป็นเรื่องของคุณภาพความน่าเชื่อถือของระบบที่ต้องมีความถูกต้องและแม่นยำ ทั้งนี้ก็เพื่อรองรับกับความต้องการในการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียงและข้อมูลสื่อสารอื่นๆ ในอนาคต ความต้องการเหล่านี้จะต้องถูกพัฒนาบนความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดและต้องใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

การเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูลและการรองรับจำนวนผู้ใช้บริการยังคงเป็นหนึ่งในความสำคัญที่หลายๆ นักวิจัยให้ความสนใจ รวมไปถึงมาตรฐานของระบบการสื่อสารไร้สายที่พัฒนา ก็ยังคงให้ความสำคัญกับเรื่องนี้เป็นหลัก มาตรฐานของระบบการสื่อสารไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นมาตรฐานโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ที่มีการพัฒนามาตั้งแต่ยุคที่ 1 จนมาถึงยุคที่ 4 อีกทั้งกำลังจะพัฒนาไปยังยุคที่ 5 ในอนาคตอันใกล้ [1-2] ซึ่งเทคโนโลยีการรับส่งข้อมูลบนเครือข่ายได้พัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ยุคเริ่มต้นที่สื่อสารได้เพียงเสียงพูดเท่านั้น จากนั้นเริ่มมีการรองรับการรับส่งข้อมูลมัลติมีเดียที่มีความเร็วสูงขึ้นด้วยช่องทางที่มีความจุในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลและแอปพลิเคชันต่าง ๆ รวมทั้งบริการระบบเสียงดีขึ้น มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ตลอดเวลา ทำให้ชีวิตประจำวันสะดวกสบายคล่องตัวมากขึ้น เทคโนโลยีที่กำลังพัฒนาระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ในอนาคตคือ เทคโนโลยีแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) เป็นส่วนหนึ่งในมาตรฐานสากลจากกลุ่ม Third Generation Partner Ship Project (3GPP) เป็นระบบที่พัฒนาต่อจากระบบ 3G เป้าหมายหลักของเทคโนโลยีแอลทีอี คือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถลดค่าความหน่วงเวลาซึ่งทำให้ผู้ใช้บริการสามารถใช้บริการภาพเคลื่อนไหวที่สมจริง ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้ความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [3-4]

มาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) หรือ IEEE802.11 [5] เป็นมาตรฐานที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในสถานที่ต่างๆ โดยในยุคเริ่มแรกให้ประสิทธิภาพการทำงานค่อนข้างต่ำและไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการ ระบบจึงมีการพัฒนาตั้งแต่ IEEE802.11a ซึ่งมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็ว 54 Mbps แต่ยังมีรัศมีการใช้งานในระยะสั้น ถัดมามาตรฐาน IEEE802.11b และ IEEE802.11g ถูกพัฒนาให้สามารถใช้งานร่วมกันได้ พร้อมสนับสนุนการใช้งานบริเวณกว้างกว่าและความเร็วที่สูงขึ้นกว่ามาตรฐานเดิม มาตรฐานต่อมาคือ IEEE802.11n โดยให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 100 Mbps และในอนาคตกำลังพัฒนามายัง IEEE802.11ac และ IEEE802.11ad ซึ่งเป็นมาตรฐานใหม่ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งคลื่น ทำให้ได้ผลลัพธ์คือความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากเดิมมาก รวมไปถึงระยะที่ไกลขึ้นและสามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีขึ้น [6]

อีกหนึ่งมาตรฐานที่น่าสนใจ คือ มาตรฐานไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WIMAX) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงที่ถูกพัฒนาขึ้นมาบนมาตรฐาน IEEE 802.16 เป็นมาตรฐานที่ให้บริการการสื่อสารไร้สายความเร็วสูง ในระดับเมือง ชานเมืองและชนบท [7] ที่รองรับการทำงานได้ดีแม้มีสิ่งกีดขวาง ทำให้ไวแมกซ์ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถขยายเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้กว้างไกลและมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น

ทุกมาตรฐานของระบบการสื่อสารไร้สายที่กล่าวมานั้น กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เป้าหมายของระบบที่มีร่วมกันของเทคโนโลยีใหม่นั้นต่างมีความต้องการในการรองรับผู้ใช้บริการให้มากขึ้น รับและส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น ครอบคลุมพื้นที่การให้บริการได้ดีขึ้น ในช่วงแรกทุกมาตรฐานได้ถูกออกแบบให้มีการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุด (point-to-point) หรือการสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดียว (single-user communication) กล่าวคือสถานีฐานจะส่งข้อมูลในเวลาขณะหนึ่งไปยังผู้ใช้ได้เพียงหนึ่งผู้ใช้นั้น โดยมีทิศทางในการส่งสัญญาณเป็นแนวตรงและไม่มีสิ่งกีดขวาง จึงทำให้ส่งข้อมูลได้ระยะไกลและมีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูง แต่ยังคงทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณต่ำ และเป็นการใช้ความถี่ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยมาตรฐานในอนาคต IEEE802.11ac IEEE802.11ad IEEE802.16 และมาตรฐานโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ LTE-A release 12-15 ที่ล้วนแล้วแต่มีการพัฒนาจากการสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดียวไปสู่ระบบที่มีความสามารถในการส่งกระจายสัญญาณในลักษณะจากจุดเดียวไปยังหลายจุด (point-to-multipoint) ได้พร้อมๆ กัน หรือการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้ (multiuser communications) [8-9] เพื่อให้ผู้ใช้งานมีการส่งผ่านที่ดีขึ้น ลดการใช้พลังงานและครอบคลุมพื้นที่กว้างขึ้น เป็นการส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้งานหลายๆ ผู้ใช้งานพร้อมกัน อย่างเป็นอิสระต่อกันที่เวลาและความถี่เดียวกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณได้มากขึ้นกว่าการส่งข้อมูลแบบผู้ใช้งานเดียว นอกจากนี้ยังช่วยลดความต้องการการใช้สายอากาศหลายต้นที่ฝั่งภาครับ และลดผลกระทบของค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทางได้อีกด้วย จาก

การศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรม พบว่าในหลายๆงานวิจัยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบผู้ใช้งานเดี่ยวและหลายผู้ใช้งาน [10-12] โดยในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งานจะให้อัตราการส่งข้อมูลที่มากกว่าการส่งข้อมูลแบบผู้ใช้งานเดี่ยว แต่ในการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งานยังมีปัญหาเรื่องสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกัน จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า มีงานวิจัยมากมายที่คิดค้นพัฒนาปรับปรุงระบบการสื่อสารไร้สายเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น วิธีการหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและครอบคลุมพื้นที่ใช้งานมากขึ้น ดังที่แสดงในงานวิจัยที่ [13-14] วิธีการนี้คือเทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น (multiple-antenna technology) การเพิ่มจำนวนของสายอากาศจากเดิมเพียงแค่หนึ่งต้นได้ถูกพัฒนาขึ้นกลายเป็นใช้สายอากาศหลายต้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สาย นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการที่มีความซับซ้อนน้อย ต้นทุนต่ำ อีกทั้งสามารถลดสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานอื่นๆได้ ทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงขึ้น [15-17] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำเทคโนโลยีสายอากาศหลายต้นมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบหลายผู้ใช้ เช่น ช่วยลดสัญญาณรบกวน [18] เพิ่มความจุของระบบ [19-20] เป็นต้น

จากการศึกษาเราสามารถแยกการใช้เทคโนโลยีสายอากาศหลายต้นมาใช้ในระบบหลายผู้ใช้งานได้เป็น 2 แบบคือ 1. แบบที่มีการป้อนช่องสัญญาณย้อนกลับ เช่น เทคโนโลยีโมโม (MIMO technology) [21-22] และเทคนิคการควบคุมอัตรารวมต่อผู้ใช้งาน (Per-User Unitary Rate Control ; PU<sup>2</sup>RC) [23-24] เป็นต้น ซึ่งเทคนิคนี้จะต้องทราบช่องสัญญาณที่จะส่งข้อมูลแล้วมีการป้อนกลับมาเพื่อให้ระบบนั้นสมบูรณ์ 2. แบบที่มีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ ไม่ว่าจะเป็เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย [25-26] การก่อรูปลำคลื่นแบบฉวยโอกาส [27] การก่อรูปลำคลื่นในลักษณะนี้จะต้องใช้รูปการป้อนกลับ เพื่อนำเอาสัญญาณที่ต้องการมาสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อเข้าสู่กระบวนการป้อนกลับเพื่อใช้ในการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก โดยการป้อนช่องสัญญาณและข้อมูลย้อนกลับ คือการนำช่องสัญญาณหรือข้อมูลที่รับได้มาประมวลผลเพื่อให้ภาครับและภาคส่งได้ข้อมูลที่เหมือนกัน เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่ดีขึ้น จุดเด่นของการป้อนกลับทั้งสองแบบนี้คือทำให้การส่งข้อมูลมีความผิดพลาดน้อยและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลให้กับระบบ แต่ต้องยอมรับว่ามีขั้นตอนและกระบวนการที่ซับซ้อน ยุ่งยากในการประมวลผล สิ้นเปลืองพลังงานในการป้อนข้อมูลย้อนกลับ อีกทั้งถ้าช่องสัญญาณมีการลดทอนสูงอาจทำให้สัญญาณอ้างอิงนั้นผิดเพี้ยนไปได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวคิดในการใช้เทคโนโลยีสายอากาศหลายต้นในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้โดยปราศจากช่องสัญญาณและข้อมูลย้อนกลับ เพื่อลดกระบวนการที่ซับซ้อน เพิ่มความเร็วในการทำงานของระบบประมวลผล ประหยัดพลังงานในส่วนของการป้อนกลับ อีกทั้งยังลดความผิดพลาดของช่องสัญญาณที่ไม่แน่นอน หากเกิดการลดทอนหรือมีสัญญาณคลื่นหลายวิถี (multipath) หรือสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณสูง โดยวิธีการที่นำเสนอคือ เทคนิคการก่อรูปลำ

คลื่น ที่ไม่ต้องมีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ โดยอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึง (Direction-Of-Arrival : DOA) ของสัญญาณในแต่ละผู้ใช้ ซึ่งเป็นวิธีการประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบที่มีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยสามารถสร้างแบบรูปลำคลื่นที่มีพหุหลักหันไปยังทิศทางที่ต้องการและสามารถหันจุดศูนย์ (null) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ [28-29] การก่อรูปลำคลื่นสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สาย เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ดังนั้นจึงขยายพื้นที่ครอบคลุมให้กว้างขึ้นได้และทำให้ความเร็วในการส่งข้อมูลสูงขึ้น ช่วยลดการป้อนย้อนกลับได้ แต่เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบนี้ ถ้านำมาใช้ในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งานก็ยังคงมีข้อจำกัดคือ เมื่อมีผู้ใช้หลายคนพร้อมกัน ลำคลื่นของสถานีฐานจะส่งไปยังผู้ใช้งานในแต่ละคนพร้อมกันที่ความถี่เดียวกัน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ผู้ใช้แต่ละคนจะมีสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณแทรกสอดจากลำคลื่นของผู้ใช้ข้างเคียง ซึ่งเป็นสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานคนอื่นที่ความถี่เดียวกัน ส่งผลให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Interference Ratio : SIR) ต่ำ ส่งผลให้วิสัยสามารถ (throughput) ต่ำไปด้วย ซึ่งปัญหานี้ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่ปรับปรุงประสิทธิภาพการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบบหลายผู้ใช้และไม่มี การป้อนข้อมูลและช่องสัญญาณย้อนกลับ โดยการก่อรูปลำคลื่นที่ต้องการนั้นคือ ต้องสามารถก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้งานพร้อมกัน โดยส่วนที่เป็นลำคลื่นข้างเคียงจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้งานคนอื่น ๆ ซึ่งจะต้องอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณในแต่ละผู้ใช้งาน แล้วนำมาประมวลผลโดยตั้งเป็นสมการเมตริกซ์ จากนั้นจึงสังเคราะห์เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้นใหม่ เพื่อปรับแบบรูปลำคลื่นให้หันไปยังผู้ใช้งานที่ต้องการและลำคลื่นข้างเคียงต้องไม่รบกวนทิศทางหลักของผู้ใช้งานอื่น โดยเรียกความสัมพันธ์ที่จะนำเสนอนี้ว่า การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก คือลำคลื่นหลักจะหันไปยังทิศทางของผู้ใช้งานแต่ละคนโดยเฉพาะและจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้ในทิศทางอื่นๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้มีค่าอัตราส่วนต่อสัญญาณแทรกสอดสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลสูงและวิสัยสามารถสูงขึ้นตามไปด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 นำเสนอเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก ที่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานอื่นๆ ที่ความถี่เดียวกัน ในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งานและไม่มีข้อมูลย้อนกลับ

1.2.2 สร้างชุดทดสอบเบื้องต้น เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบตามที่ได้ออกแบบและผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก สามารถลดสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานอื่นๆ ที่ความถี่เดียวกัน ในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งาน โดยไม่มีข้อมูลย้อนกลับ

1.3.2 สามารถออกแบบชุดทดสอบเบื้องต้นของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก ที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในระบบส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งาน

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองแบบระบบที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก

1.4.2 ทดสอบวัดผลชุดทดสอบเบื้องต้น

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 จำลองแบบเพื่อดูประสิทธิภาพของระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5.2 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบเบื้องต้น

1.5.3 วัดประสิทธิภาพของระบบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายผู้ใช้งานและหลักการก่อรูปลำคลื่นแบบต่างๆ

3. ออกแบบและจำลองแบบการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4. ออกแบบและสร้างชุดทดสอบเบื้องต้น สำหรับการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ

5. วัดประสิทธิภาพของระบบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นและวิเคราะห์ผล

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1. การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกรณีที่ใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้ง



ฉากและการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม เมื่อใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

### 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

### 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. เครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย (network analyzer)
3. โปรแกรมแมทแลบ

### 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ
2. เก็บผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบเบื้องต้นที่ได้ออกแบบ

### 1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลที่ได้จากการทดสอบชุดทดสอบเบื้องต้นร่วมกับการจำลองผลในคอมพิวเตอร์นำไปวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยในรูปแบบของกราฟ แสดงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและค่าวิสัยสามารถ เพื่อแสดงประสิทธิภาพของระบบที่ได้ออกแบบ

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้แนวคิดสำหรับการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากโดยไม่มีข้อมูลย้อนกลับ เพื่อลดความซับซ้อน ประหยัดพลังงาน อีกทั้งลดความไม่แน่นอนของช่องสัญญาณที่อาจมีการลดทอนสูง

1.7.2 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก สามารถลดปัญหาสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานอื่นที่ความถี่เดียวกันและเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งาน

1.7.3 ชุดทดสอบเบื้องต้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งานได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมดเจ็ดส่วน ส่วนแรกคือการกล่าวนำเข้าสู่เนื้อหา ส่วนที่สองจะเป็นเรื่องของระบบการสื่อสารไร้สาย ที่มีการพัฒนามาเรื่อยๆ ไม่หยุดนิ่งและเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวัน เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย เครือข่ายไร้สายไวแมกซ์ เป็นต้น ส่วนที่สามจะกล่าวถึงระบบการสื่อสารที่พัฒนาระบบการส่งข้อมูลจากการส่งข้อมูลแบบผู้ใช้งานเดียวเป็นการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้ ต่อมาในส่วนที่สี่จะเป็นส่วนของเทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น ที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับเพื่อนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเชิงเส้นและแบบเชิงระนาบ ในส่วนที่ห้าจะกล่าวถึงระบบการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งเป็นวิธีการประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบที่มีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยสามารถสร้างแบบรูปลำคลื่นที่มีพหุหลักหันไปยังทิศทางที่ต้องการและสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ อีกทั้งไม่ต้องมีการบ่อนช่องสัญญาณหรือข้อมูลย้อนกลับ ในส่วนที่หกจะมีเนื้อหาต่อเนื่องกับการก่อรูปลำคลื่นที่ต้องใช้การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณมาใช้เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของสายอากาศและให้เกิดการก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการ และส่วนสุดท้ายในส่วนที่เจ็ดจะเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

#### 2.2 ระบบการสื่อสารไร้สาย

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าระบบการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์ต้องการสื่อสารข้อมูลตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็น การโอนย้ายแฟ้มข้อมูล การสืบค้นข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต หรือการพูดคุยและส่งข้อความถึงกัน เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าผู้ใช้บริการระบบสื่อสารไร้สายมีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นจากอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังคงเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่าตัวในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นระบบการสื่อสารไร้สายจึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่ต้องมากขึ้น เร็วขึ้น ความจุของช่องสัญญาณที่จะต้องรองรับการเข้าใช้บริการที่พร้อมกัน ความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ต้องมีความถูกต้องและแม่นยำ ความต้องการเหล่านี้จะต้องถูกพัฒนาบนความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดและต้องใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ระบบการสื่อสารไร้สาย ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน ได้แก่

### 2.2.1 ระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่

ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆได้มากมาย ตั้งแต่ระบบที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงซับซ้อนมาก หรือตั้งแต่การใช้บริการแค่เสียงพูดไปจนถึงส่งเพลง ภาพนิ่ง หรือภาพเคลื่อนไหวได้ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ เป็นระบบที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยถือว่าเป็นตัวแทนของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่เนื่องจากเป็นระบบที่มีอิทธิพลกับชีวิตประจำวันมากที่สุดในปัจจุบันถึงขนาดที่มีการจัดให้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นปัจจัยที่ห้าสำหรับชีวิตมนุษย์เพราะความสะดวกที่ใช้งานได้ทุกที่และมีประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารทำให้ระบบนี้ได้รับความนิยมมาก ในปี ค.ศ.1979 ได้มีการพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นแบบเซลลูลาร์หรือที่เรียกว่าโทรศัพท์มือถือ มีการนำไปใช้งานครั้งแรกพร้อมกันที่โตเกียว ประเทศญี่ปุ่นและชิคาโก ประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้นต่อมาโทรศัพท์มือถือก็แพร่หลายอย่างรวดเร็ว แพร่กระจายเข้าสู่ทุกประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทย มีจำนวนผู้ใช้งานที่ขยายตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา สำหรับวิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ มีดังนี้

#### ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่หนึ่ง (First Generation : 1G)

เป็นยุคแรกของการพัฒนาเครือข่ายระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ การรับส่งสัญญาณนั้นใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณอนาล็อกเข้าช่องสื่อสารโดยวิธีนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่จำนวนสัญญาณ เพราะว่ามีจำนวนช่องสัญญาณที่น้อย ทำให้ติดขัดในเรื่องของการขยายจำนวนหมายเลขได้ในอนาคต ดังนั้นต่อมาจึงได้มีการพัฒนาระบบดิจิทัลขึ้นโดยมีการเข้าช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลาเพื่อแก้ไขปัญหาการมีช่องสัญญาณที่จำกัด

#### ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สอง (Second Generation : 2G)

เป็นยุคที่มีการพัฒนาต่อมาจากยุคแรกด้วยการเข้ารหัสสัญญาณเสียงและบีบอัดสัญญาณเสียงในรูปแบบดิจิทัลให้มีขนาดข้อมูลที่น้อยลงเหลือเพียง 9 กิโลบิตต่อวินาทีต่อช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นเหตุผลที่คุณภาพของสัญญาณเสียงในระบบโทรศัพท์มือถือด้อยลง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้เพราะสัญญาณรับส่งเป็นแบบดิจิทัลจึงมีความเที่ยงหรือสัญญาณแทรกสอดต่ำ ในยุคที่สอง เน้นการพัฒนาในระบบในเรื่องการแบ่งเวลาในช่องสัญญาณโดยใช้เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA) และเทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบเข้ารหัส (Code Division Multiple Access : CDMA) มากกว่าการใช้งานโดยใช้เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA)

เมื่อระบบโทรศัพท์มือถือในยุค 2G ใช้รหัสดิจิทัล การกำหนดเส้นทางและการหาเส้นทางเชื่อมกับสถานีฐานจึงทำได้ดี ระบบการโรมมิ่ง (roaming) คือการนำเอาโทรศัพท์มือถือไปใช้ในเครือข่ายอื่น เช่นในต่างประเทศจึงทำได้และก่อให้เกิดระบบโทรศัพท์มือถือแบบจีเอสเอ็ม (Global System for Mobilization : GSM) ต่อมาได้มีการพัฒนาจากระบบโทรศัพท์ยุคที่สองโดยเพิ่มเติม

เทคนิคบางอย่างเท่านั้น เป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สองครึ่ง (Second and Half Generation : 2.5G) เป็นยุคที่ไม่เป็นที่ยอมรับอย่างเป็นทางการ ระบบในสถานีฐานส่วนใหญ่ยังคงสามารถใช้งานได้เหมือนเดิม 2.5G เป็นยุคที่มีการเน้นเรื่องของการรับส่งข้อมูลผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องจากว่าระบบในยุค 2G นั้นไม่สามารถให้บริการในเรื่องการรับ-ส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะว่าระบบไม่ได้ถูกออกแบบมาให้สนับสนุนในเรื่องดังกล่าวโดยเฉพาะ ดังนั้นเครือข่ายในยุค 2.5G จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับส่งข้อมูลของลูกค้า โดยมีการอัพเกรด (Upgrade) จากเครือข่ายยุค 2G เดิม ซึ่งเครือข่ายในยุค 2.5G นี้คือ เครือข่าย ซีดีเอ็มเอ 2000 1X , เครือข่ายจีพีอาร์เอส (General Packet Radio Service : GPRS) ได้อัพเกรดเพิ่มเติมกลายเป็นเครือข่ายเอดจ์ (Enhanced Data rate for GSM Evolution : EDGE) ซึ่งเครือข่ายในยุคนี้จะใช้การรับส่งข้อมูลเป็นแพ็คเกจ (packet)

### ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สาม (Third Generation : 3G)

เครือข่ายในยุค 3G นี้จะเป็นเครือข่ายที่พัฒนามาจากเครือข่ายในยุค 2.5G ซึ่งเป็นเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น ถึงแม้ว่าเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุค 2.5G จะสามารถให้บริการในเรื่องของการรับส่งข้อมูลแล้วนั้น แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูล ดังนั้นระบบ 3G จึงได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าในเรื่องการรับส่งข้อมูลที่หลากหลายขึ้นและรวดเร็วขึ้น ระบบ 3G ที่ได้พัฒนาขึ้นครั้งนี้เป็นแบบดิจิทัลแพ็คเกจ โดยเน้นการรองรับระบบมัลติมีเดียที่ทุกคนเข้าถึงข้อมูลข่าวสารได้ทุกที่ ทุกเวลา เป้าหมายของความเร็วการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ 3G อยู่ที่ 2 เมกะบิตต่อวินาที ในอาคารหรือในบ้าน และหากอยู่ในรถยนต์ที่เคลื่อนที่ อัตราการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 144 กิโลบิตต่อวินาที การรับส่งข้อมูลของโทรศัพท์มือถือจะรองรับการประยุกต์ใช้งานทุกรูปแบบ ตั้งแต่การโทรศัพท์แบบวิดีโอคอนเฟอเรนซ์ (video conference) การส่งโทรสารแบบ G4 (ส่งภาพสีแบบความละเอียดสูง) การเชื่อมต่อระบบเว็บ (Wireless Application Protocol : WAP)

ยูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunications System : UMTS) เป็นเครือข่ายในยุค 3G ที่มีการพัฒนารวมจากเครือข่ายจีเอสเอ็ม จีพีอาร์เอสและเอดจ์ ซึ่งหลายๆครั้งอาจเรียกได้ว่าเป็นเครือข่าย W-CDMA โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานด้านการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น เครือข่ายยูเอ็มทีเอสนั้นจะมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงถึง 22 เมกะบิตต่อวินาที ซึ่งมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่มากกว่าเครือข่ายเอดจ์ที่ใช้บริการในปัจจุบัน

### ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สี่ (Fourth Generation : 4G)

ระบบโทรศัพท์ยุคนี้น่าจะรองรับการตอบสนองของภาพเคลื่อนไหวความจริงเสมือนแบบ 3 มิติหรือระบบวิดีโอที่สามารถโต้ตอบได้ทันที รวมถึงความสามารถของเครื่องโทรศัพท์ที่ฉลาดขึ้นและสามารถใช้จ่ายผ่านโทรศัพท์ได้ ซึ่งก็ต้องมีประเด็นเรื่องความปลอดภัยเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างมาก ใน

ยุคนี้ได้มีการวางกรอบแนวทางการพัฒนาไว้โดยใช้เทคโนโลยีเรื่องโมโม่และโอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) สำหรับตัวเครื่องโทรศัพท์จะต้องมีการพัฒนาความฉลาดให้เหมือนมีเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก โดยต้องระบบปฏิบัติการในโทรศัพท์ด้วย เทคโนโลยีแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) เป็นส่วนหนึ่งในมาตรฐานสากล จากกลุ่ม Third Generation Partner Ship Project (3GPP) เป็นระบบที่พัฒนาต่อจากระบบ 3G เป้าหมายหลักของแอลทีอี คือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถค่าความหน่วงเวลาซึ่งทำให้ผู้ใช้บริการสามารถใช้บริการภาพเคลื่อนไหวที่สมจริง ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้ความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทั้งยังสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในยุคก่อนหน้านี้

### 2.2.2 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

มาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2540 ซึ่งอุปกรณ์ตามมาตรฐานดังกล่าวจะมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 และ 2 เมกะบิตต่อวินาที ด้วยสื่ออินฟราเรด (Infarred) หรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกเริ่มมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับคุณภาพการบริการ (Quality of Service : QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงาน (task group) ขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยคณะทำงานกลุ่มที่มีผลงานที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันดีได้แก่ IEEE 802.11a IEEE 802.11b IEEE 802.11g IEEE 802.11n

**IEEE 802.11b** คณะทำงานชุด IEEE 802.11b ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันดีและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 เมกะบิตต่อวินาที ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

**IEEE 802.11a** คณะทำงานชุด IEEE 802.11a ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า โอเอฟดีเอ็ม เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 เมกะบิตต่อวินาที แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างสาธารณะ

**IEEE 802.11g** คณะทำงานชุด IEEE 802.11g ได้ใช้เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มมาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 เมกะบิตต่อวินาที ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 กิกะ

เฮิร์ตซ์ เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g สามารถทำงานร่วมกับ อุปกรณ์ IEEE 802.11b ได้ (backward-compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

**IEEE 802.11n** มาตรฐาน IEEE 802.11n จะเป็นการพัฒนาแบบก้าวกระโดดด้วยการใช้ เทคโนโลยีมากมายเข้ามาช่วยเพื่อเพิ่มความเร็วในการรับ - ส่งข้อมูลให้สูงขึ้น โดยจะมีความเร็วอยู่ที่ 300 เมกะบิตต่อวินาทีหรือเร็วกว่าแลนแบบมีสายที่มาตรฐาน 100 BASE-TX นอกจากนี้ยังมีระยะ พื้นที่ให้บริการกว้างขึ้น โดยเทคโนโลยีที่ 802.11n นำมาใช้ก็คือเทคโนโลยีโมโม ซึ่งเป็นการรับส่ง ข้อมูลจากเสาสัญญาณหลายๆ ต้น พร้อมๆ กัน ทำให้ได้ความเร็วสูงขึ้นและยังใช้คลื่นความถี่แบบ ความถี่คู่ (dual band) คือทั้ง 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ว่าออกแบบมาให้ ทำงานกับคลื่นใดหรือทำงานกับทั้งสองคลื่นพร้อมๆ กันได้ ซึ่งทำให้บางประเทศที่ยังไม่ได้อนุมัติให้ใช้ เครือข่ายไร้สายมาตรฐาน 802.11a อาจจะมีปัญหากับการใช้งานเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน 802.11n

**IEEE 802.11ac** เป็นมาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายใหม่ ที่ตั้งเป้าว่าจะมาแทน มาตรฐาน IEEE 802.11n ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยมีหัวหอกเป็นผู้ผลิตชิปเซ็ตอย่าง Broadcom และเหล่า ผู้ผลิตอุปกรณ์เครือข่ายชั้นนำที่เข้ามาเป็นพันธมิตรร่วมผลักดันมาตรฐานตัวนี้ให้เข้าไปอยู่ในมาตรฐาน Wi-Fi Alliance ให้ได้ มาตรฐาน IEEE 802.11ac นั้น ได้มีการปรับปรุงเรื่องของการเข้ารหัสใหม่ และมีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาใช้แล้ว ทำให้สามารถทำความเร็วต่ำสุดตามทฤษฎีต่อ 1 เสาได้ถึง 433 เมกะบิตต่อวินาที ซึ่งมีความเร็วใกล้เคียงกันกับ มาตรฐาน IEEE 802.11n ที่เป็นแบบ 3 เสา ซึ่ง มีความเร็วอยู่ที่ 450 เมกะบิตต่อวินาที การที่ IEEE 802.11ac นั้นออกแบบมาโดยคำนึงถึงอุปกรณ์ พกพาต่าง ๆ เช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ตหรือโน้ตบุ๊กที่มีความบางมาก ๆ เป็นสำคัญด้วยเพราะว่าการ ใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้ในปัจจุบันนั้นเน้นการเชื่อมต่อแบบไร้สายกันมากขึ้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ พวกนี้มักจะไม่ค่อยมีพื้นที่ในการใส่เสารับส่งสัญญาณจำนวนมากและถึงสามารถใส่ได้ ก็มีผลต่อการใช้ พลังงานอีก ทำให้ความเร็วการเชื่อมต่อผ่านระบบไร้สายนั้นโดนจำกัดไว้ แต่ด้วยความเร็วขั้นต่ำที่ มาตรฐาน IEEE 802.11ac ทำได้ จะช่วยให้การโอนถ่ายข้อมูลนั้นมีความเร็วมากขึ้น โดยไม่ต้องใช้เสา รับส่งสัญญาณจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานอีกด้วย

### 2.2.3 เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายไวแมกซ์

เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายไวแมกซ์ มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า IEEE 802.16 ได้รับการ อนุมัติโดย IEEE เมื่อเดือนมกราคม พ.ศ.2547 มาตรฐานไวแมกซ์จัดอยู่ในกลุ่มให้บริการการสื่อสารไร้ สายความเร็วสูง ในระดับเมือง ชานเมืองและชนบท ซึ่งความเร็วการสื่อสารข้อมูลขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น วิธีการมอดูเลต (modulation) ความกว้างของช่องสัญญาณ (channel bandwidth) ระดับ ความแรงของสัญญาณและระดับของสัญญาณรบกวน เป็นต้น มาตรฐาน IEEE802.16a มี

ความสามารถรองรับการทำงานในลักษณะเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Non Line of Sight : NLoS) คือสามารถทำงานได้ดีแม้มีสิ่งกีดขวาง ทำให้ไวแมกซ์ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถขยายเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้กว้างไกล โดยมีรัศมีทำการถึง 48 กิโลเมตร ซึ่งให้บริการได้ไกลกว่าเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมาก นอกจากนี้ไวแมกซ์ยังมีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที สำหรับมาตรฐานของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี IEEE 802.16 นี้ จะมีองค์กรซึ่งทำหน้าที่ดูแลและรับผิดชอบอยู่ ได้แก่ WiMAX Forum ซึ่งได้จัดขึ้นโดยกลุ่มบริษัทชั้นนำทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสารในปี พ.ศ. 2544 องค์กร WiMAX Forum นี้ทำหน้าที่ปรับปรุงพัฒนาและกำหนดมาตรฐานของ IEEE 802.16 รวมทั้งทำหน้าที่ตรวจสอบและออกใบรับรองให้แก่อุปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน โดยมีการพัฒนามาตรฐาน ดังนี้

IEEE 802.16 เป็นมาตรฐานที่มีรัศมีการทำงาน 1.6-4.8 กิโลเมตร และเป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุนเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight : LoS) โดยมีการใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงมาก คือ 10-66 กิกะเฮิรตซ์

IEEE 802.16a เป็นมาตรฐานที่แก้ไขปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิม โดยใช้งานที่ความถี่ 2-11 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งคุณสมบัติเด่น คือคุณสมบัติการรองรับการทำงานแบบมีสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้ก็ยังช่วยให้สามารถขยายระบบเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงได้ด้วยรัศมีทำการที่ไกล 48 กิโลเมตร และมีอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 75 เมกะบิตต่อวินาที ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อการใช้งานระบบเครือข่ายของบริษัทที่ใช้สายประเภท T1 และการเชื่อมต่อแบบ DSL ตามบ้านเรือนที่พักอาศัยได้พร้อมกันโดยไม่เกิดปัญหาในการใช้งาน

IEEE 802.16e เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์พีดีเอ คอมพิวเตอร์พกพา เป็นต้น โดยให้รัศมีทำงานที่ 1.6-4.8 กิโลเมตร และมีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพในการใช้งานขณะที่มีการเคลื่อนที่อยู่

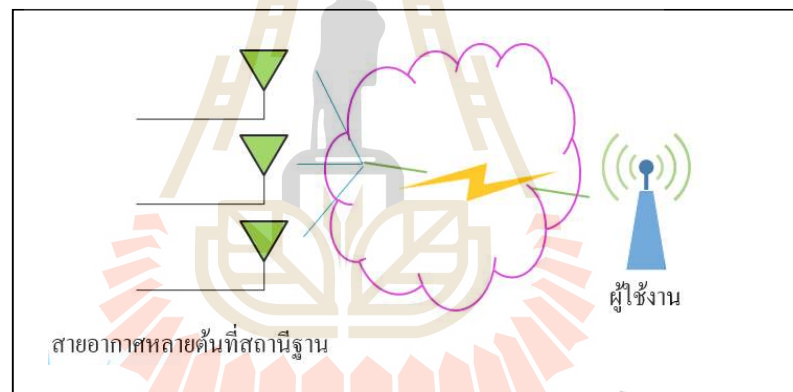
### 2.3 รูปแบบการสื่อสาร

ทุกมาตรฐานของระบบการสื่อสารไร้สายที่กล่าวมานั้น กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เป้าหมายของระบบที่มีร่วมกันของเทคโนโลยีใหม่นั้นต่างมีความต้องการในการรองรับผู้ใช้บริการให้มากขึ้น รับและส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น ครอบคลุมพื้นที่การให้บริการ ในช่วงแรกทุกมาตรฐานได้ออกแบบให้มีการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดหรือการสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดียว คือ สถานีฐานจะส่งข้อมูลในเวลาขณะหนึ่งไปยังผู้ใช้ได้เพียงหนึ่งผู้ใช้นั้น โดยมีทิศทางในการส่งสัญญาณเป็นแนวตรงและไม่มีสิ่งกีดขวาง จึงทำให้ส่งข้อมูลได้ระยะไกลและมีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูง แต่ยังคงทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณต่ำและเป็นการใช้ความถี่ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยมาตรฐานในอนาคต ไม่ว่าจะ เป็น IEEE802.11ac IEEE802.11ad IEEE802.16e และมาตรฐานโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ LTE-A

release 12-15 ล้วนแล้วแต่มีการพัฒนาจากการสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดี่ยวไปสู่ระบบที่มีความสามารถในการส่งกระจายสัญญาณในลักษณะจากจุดเดียวไปยังหลายจุดได้พร้อมๆ กันหรือการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้ เพื่อให้ผู้ใช้งานมีการส่งผ่านที่ดีขึ้น ลดการใช้พลังงานและครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ เป็นการส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้งานหลายๆ คนพร้อมกันอย่างเป็นอิสระต่อกันที่เวลาและความถี่เดียวกัน

### 2.3.1 การสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดี่ยว

การสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดี่ยว เป็นการสื่อสารแบบจุดต่อจุด คือสถานีฐานจะส่งข้อมูลในเวลาขณะหนึ่งไปยังผู้ใช้งานได้เพียงหนึ่งผู้ใช้งานเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หากมีหลายผู้ใช้งานต้องการส่งข้อมูลจะต้องส่งคนละเวลาหรือคนละความถี่กัน จึงทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณต่ำและเป็นการใช้ความถี่ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่ข้อดีของการส่งข้อมูลแบบนี้คือไม่มีสัญญาณแทรกสอดกันที่ความถี่และเวลาเดียวกัน ทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงมาก แต่ให้ค่าวิสัยสามารถ (throughput) ของผู้ใช้งานต่ำ

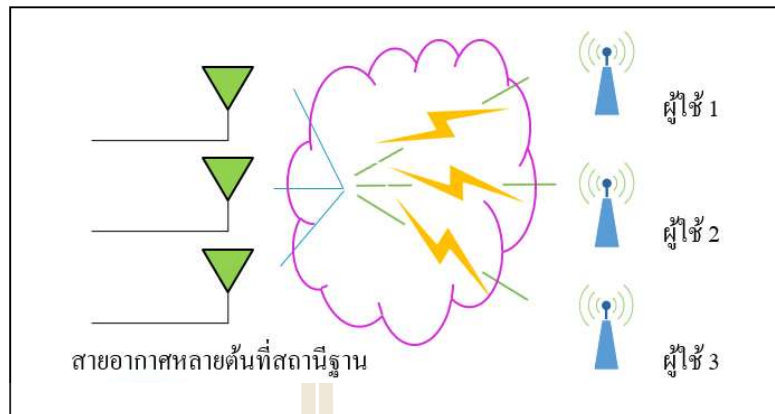


รูปที่ 2.1 การสื่อสารแบบผู้ใช้งานเดี่ยว

### 2.3.2 การสื่อสารแบบหลายผู้ใช้งาน

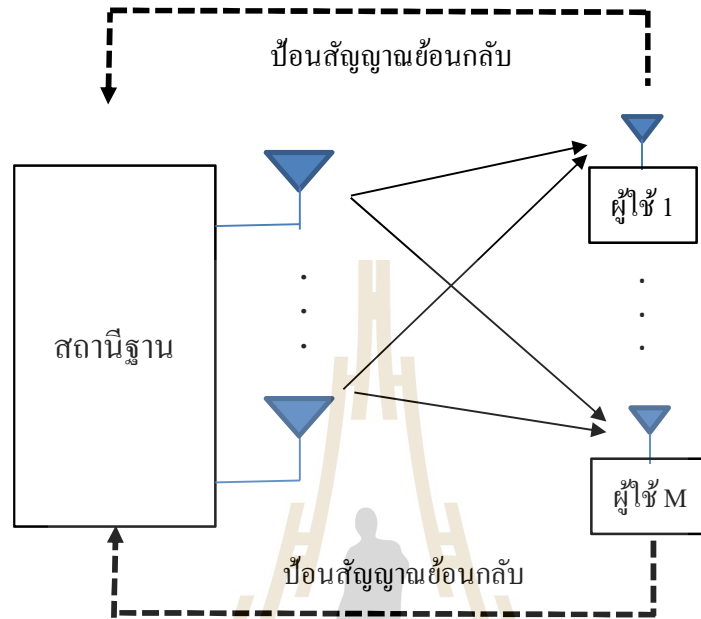
การสื่อสารแบบหลายผู้ใช้งาน เป็นการส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้งานหลายๆ คนพร้อมกันอย่างเป็นอิสระต่อกันที่เวลาและความถี่เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณมากขึ้นกว่าการส่งข้อมูลแบบผู้ใช้งานเดี่ยว นอกจากนี้ยังลดความต้องการการใช้สายอากาศหลายต้นที่ฝั่งภาครับ และลดผลกระทบของค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทาง โดยการสื่อสารแบบหลายผู้ใช้งานถูกนำมาใช้กับมาตรฐานการสื่อสารไร้สายมากมาย เช่น ระบบการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ 4G/IMT-Advance LTE-Advance 802.16m/WiMAX 802.11ac และ 802.11ad [30] แต่ปัญหาที่สำคัญของระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งานคือเกิดสัญญาณแทรกสอดที่ความถี่เดียวกันของแต่ละผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงถูกนำไปวิจัยพัฒนาปรับปรุงให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น





รูปที่ 2.2 การสื่อสารแบบหลายผู้ใช้งาน

มีงานวิจัยมากมายที่พัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งาน ด้วยเทคโนโลยีสายอากาศหลายคัน มีวิธีการต่างๆ มากมาย แต่วิธีการส่วนใหญ่นั้นไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยี MIMO และเทคนิคการควบคุมอัตรารวมต่อผู้ใช้งาน การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายหรือการก่อรูปลำคลื่นแบบควายโอกาส ล้วนต้องมีการป้อนกลับของช่องสัญญาณหรือข้อมูลย้อนกลับ ดังรูปที่ 2.3 โดยการป้อนช่องสัญญาณและข้อมูลย้อนกลับ คือการนำช่องสัญญาณหรือข้อมูลที่รับได้มาประมวลผลเพื่อให้ภาครับและภาคส่งได้ข้อมูลที่เหมือนกัน เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและข้อมูลที่ส่งนั้นถูกต้องไปยังผู้ใช้งาน จุดเด่นของการป้อนกลับทั้งสองนี้คือทำให้การส่งข้อมูลมีความผิดพลาดน้อยและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลให้กับระบบ แต่ก็ต้องด้วยกระบวนการที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการประมวลผล สิ้นเปลืองพลังงานในการป้อนข้อมูลย้อนกลับ อีกทั้งถ้าช่องสัญญาณมีการลดทอนสูงอาจทำให้สัญญาณอ้างอิงนั้นผิดเพี้ยนไปได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการวิธีการที่ไม่ต้องมีการป้อนช่องสัญญาณและข้อมูลย้อนกลับ ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้คือ การก่อรูปลำคลื่น โดยการก่อรูปลำคลื่นเป็นเทคนิคหนึ่งในเทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายคัน ที่นำมาใช้ร่วมกับส่วนประมวลผลที่จะหันทิศทางไปยังผู้ใช้ที่ต้องการได้ ซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป



รูปที่ 2.3 ระบบที่มีการป้อนกลับข้อมูลและช่องสัญญาณ

## 2.4 เทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น

การใช้งานโดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวนั้นมักจะมีปัญหาอยู่เสมอ เช่น มีลำคลื่นค่อนข้างกว้างทำให้มีสภาพเงาเงจทิศทางและอัตราขยายค่อนข้างต่ำ ซึ่งการนำสายอากาศไปใช้กับการสื่อสารระยะไกลนั้นจำเป็นต้องใช้สายอากาศที่มีสภาพเงาเงจทิศทางที่สูงมาก วิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้มากมายในปัจจุบัน คือการนำสายอากาศหลายๆต้นมาประกอบวางเรียงให้มีรูปร่างเชิงเรขาคณิต จะเรียกว่า สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) การนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลายๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดียว ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเงาเงจทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น การใช้สายอากาศหลายต้น จึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อระบบการก่อรูปลำคลื่น ที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่นรอง (side lobes) หรือจุดศูนย์ ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น สายอากาศแถวลำดับ

ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังต่อไปนี้

#### 2.4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น [31] (linear array antennas) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่พื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นวางตัวเรียงกันเป็นเส้นตรงซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.4 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน  $N$  ต้นหรือ  $N \times 1$  ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะห่าง ( $d$ ) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น

ในรูปที่ 2.4 แสดงถึงสายอากาศแบบเชิงเส้น  $N \times 1$  ต้นโดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้นและมีแอมพลิจูดเท่ากัน ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่าแถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน มีการป้อนกระแสให้กับทุกๆองค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่าๆกัน เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor : AF) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

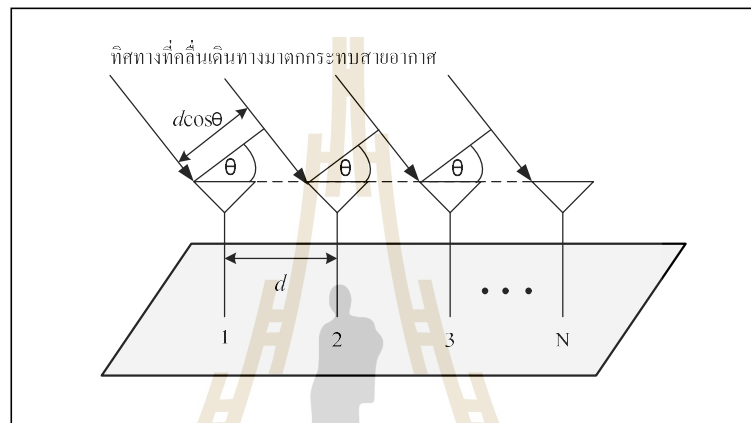
$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.2)$$

$$AF = \sum_{n=1}^n e^{j(n-1)kd(\cos \theta + \beta)} \quad (2.3)$$

$$AF = \sum_{n=1}^n e^{j(n-1)\Psi} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\psi = kd \cos \theta + \beta$   $k$  คือ เลขคลื่น (wave number)  $= 2\pi/\lambda$   $d$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นและ  $\beta$  คือ ความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น จากสมการ (2.4) เราสามารถลดรูปของสมการได้ดังนี้

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j\psi(N-1)} + e^{jN\psi} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.4 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน  $N \times 1$  ต้น

แทนสมการ (2.4) ลงใน (2.5) จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

$$(AF)(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (2.6)$$

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

$$AF = \left[ \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right]$$

$$= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[ \frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right]$$

$$= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.7)$$

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นค่าของระยะห่างของสายอากาศ  $d = 0$  และ  $\beta = 0$  ดังนั้น  $\psi = kd \cos \theta + \beta = 0$  ดังนั้นสมการที่ (2.7) จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$AF = \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.8)$$

ค่าของ  $\psi$  จะถือว่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

$$AF \cong \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{\psi}{2}} \right] \quad (2.9)$$

ค่าสูงสุดของสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะมีค่าเท่ากับ  $N$  เพื่อที่จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเป็นมาตรฐานเราจึงต้องกำหนดให้ค่าสูงสุดของแต่ละสมการเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นสมการมาตรฐานของตัวประกอบแถวลำดับคือ

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.10)$$

$$(AF)_n \cong \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.11)$$

### 2.4.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ [32] (planar array antennas) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจากรูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายใน 2.4.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่าสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเชิงเส้น คือสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้ ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบสามารถที่จะหันพู่หลักในมุมเงยและทุก ๆ ทิศรอบตัว 360 องศา ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาร์ การชี้ทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สายและรวมถึงระบบสายอากาศแก่งด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ B.Allen, M. Ghavami (2005) เราสามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแถวลำดับระนาบโดยใช้สมการที่ (2.12) ได้เช่นเดียวกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแถวลำดับแตกต่างกันซึ่งสามารถหาได้ โดยเริ่มจากพิจารณามุม  $\gamma$  ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 จะได้

$$\cos \gamma = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot \hat{\mathbf{a}}_r = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot (\hat{\mathbf{a}}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{\mathbf{a}}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{\mathbf{a}}_z \cos \theta) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\hat{\mathbf{a}}_x$ ,  $\hat{\mathbf{a}}_y$ ,  $\hat{\mathbf{a}}_z$  และ  $\hat{\mathbf{a}}_r$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน  $x$ ,  $y$ ,  $z$  และ  $r$  ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน  $x$  เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

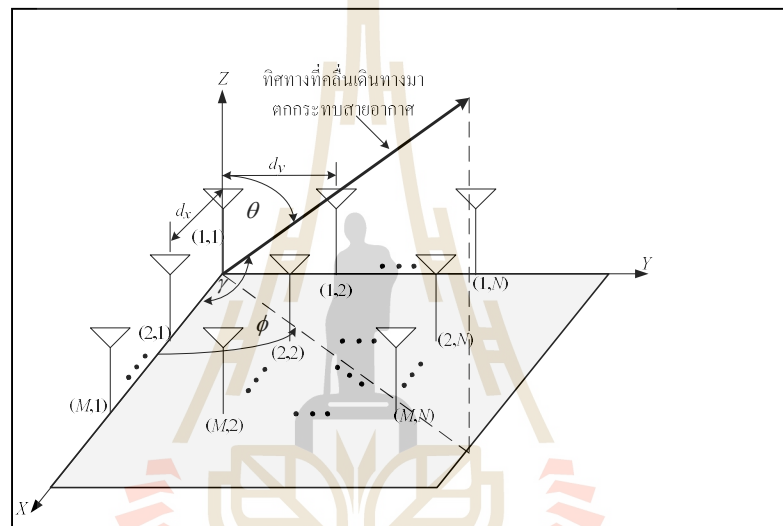
$$\begin{aligned} AF_x &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \cos \gamma + \beta_x)} \\ &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $I_{m1}$  คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น  $d_x$  คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน  $x$  และ  $\beta_x$  คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน  $x$  เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน  $y$  เช่นเดียวกันกับที่พิจารณาแกน  $x$  เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

$$AF_y = \sum_{n=1}^N I_{1n} e^{j(m-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $I_{1n}$  คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น  $d_y$  คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน  $y$  และ  $\beta_y$  คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน  $y$  ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน  $x$  และ  $y$  รวมกันหรือที่เรียกว่าแบบระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน  $x$  และ  $y$  เข้าด้วยกันจะได้

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[ \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.5 สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน  $2 \times 2$

ถ้าสมมติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน  $x$  และ  $y$  มีค่าเท่ากันจะได้

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \quad (2.17)$$

และกำหนดให้แอมพลิจูดมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยจะได้  $I_{mn} = I_0$  ดังนั้นเราสามารถลดรูปสมการ (2.16) ลงเหลือเท่ากับ

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.18)$$

เช่นเดียวกันกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นเราสามารถทำการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x \quad (2.20)$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y \quad (2.21)$$

## 2.5 การก่อรูปลำคลื่น

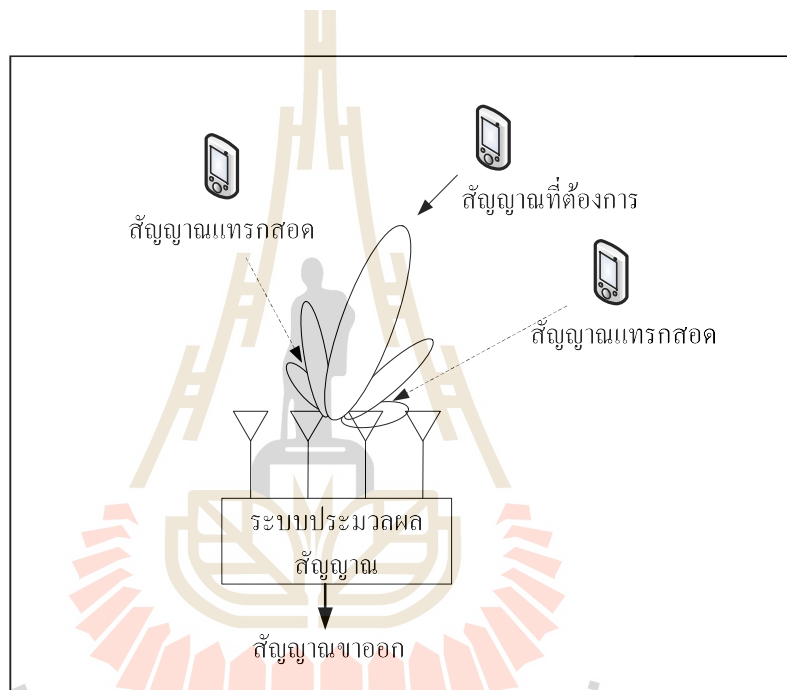
การก่อรูปลำคลื่น [33-34] เป็นวิธีการประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบที่มีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยสามารถสร้างแบบรูปลำคลื่นที่มีพหุหลักหันไปยังทิศทางที่ต้องการและสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ การก่อรูปลำคลื่นสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สายได้ ดังนี้

1. เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงขยายพื้นที่ครอบคลุมให้กว้างขึ้นและทำให้ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น
2. ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น
3. เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งจะหันพหุหลักไปเฉพาะในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น จึงไม่สูญเสียพลังงานไปในทิศทางอื่น ทำให้ประหยัดพลังงานและยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
4. ลดสัญญาณแทรกสอด

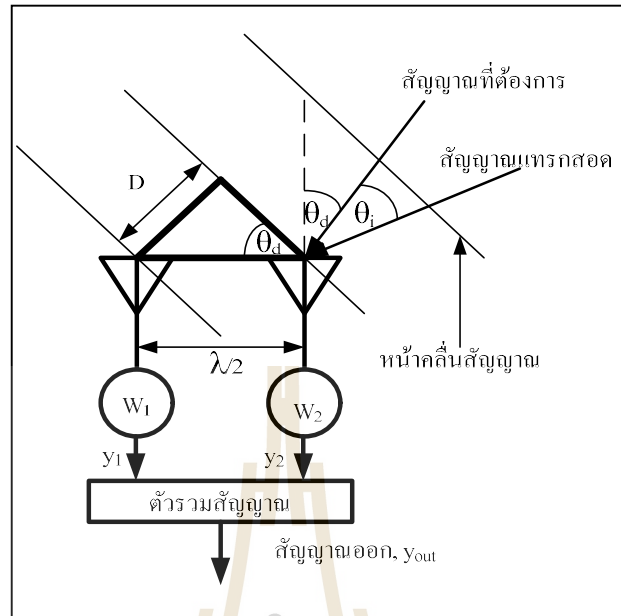
ด้วยข้อดีดังกล่าวการก่อรูปลำคลื่นจึงได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ งานในระบบการสื่อสารไร้สาย [35-36] รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของการก่อรูปลำคลื่นซึ่งระบบการก่อรูปลำคลื่นประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับและระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) ซึ่งในระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival : DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ Liberti, J.J.C., and Rappaport, T.S. (1999) ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการก่อรูปลำคลื่นของพหุหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการในขณะที่หันจุดศูนย์หรือพหุรองไปยังทิศทาง



ของสัญญาณแทรกสอด โดยหลักการเบื้องต้นในการที่จะหาลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.7 จากรูป  $D$  คือความต่างเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น  $d$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ  $W$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ  $\theta_0$  และ  $\theta_1$  คือมุมที่มาตกกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับจากรูปสัญญาณขาออกคือ



รูปที่ 2.6 การก่อรูปลำคลื่น



รูปที่ 2.7 ระบบการก่อรูปลำคลื่นเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.22)$$

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นจะได้

$$y_{2d} = A \quad (2.23)$$

$$y_{2i} = A_i \quad (2.24)$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.25)$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $y_{1d}$   $y_{1i}$   $y_{2d}$  และ  $y_{2i}$  คือ สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 และสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้น

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2 (A_d + A_i) \quad (2.27)$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1 (A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \quad (2.28)$$

แทนค่าสมการที่ (2.27) และ (2.28) ลงในสมการที่ (2.22) จะได้

$$y_{out} = A_i (w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) + A_d (w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) \quad (2.29)$$

เราต้องการพจน์ของ  $A_i$  เท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้หมดไปและต้องการพจน์ของ  $A_d$  เท่ากับ  $A_d$  เพื่อยังคงรักษาสัญญาณที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นต้องทำให้

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \quad (2.30)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.31)$$

เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) เราจะได้

$$w_2 = -w_1 e^{j\theta_i} \quad (2.32)$$

แทนสมการที่ (2.32) ลงใน (2.31) จะได้

$$-w_1 e^{j\theta_i} + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.33)$$

$$w_1 (e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}) = 1 \quad (2.34)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศต้นที่ 1 เท่ากับ

$$w_1 = \frac{1}{(e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i})} \quad (2.35)$$

เช่นเดียวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) เราจะได้

$$w_1 = \frac{-w_2}{e^{j\theta_i}} \quad (2.36)$$

แทนสมการที่ (2.35) ลงใน (2.31) จะได้

$$w_2 - \frac{w_2 e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} = 1 \quad (2.37)$$

$$w_2 \left( 1 - \frac{e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \quad (2.38)$$

$$w_2 \left( \frac{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \quad (2.39)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2 เท่ากับ

$$w_2 = \left( \frac{e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}} \right) \quad (2.40)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.35) และ (2.40) เข้าไปในสมการที่ (2.29) สุดท้ายเราจะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \quad (2.41)$$

## 2.6 การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ

การประมาณทิศทางการมาถึง (Direction-Of-Arrival : DOA) ของสัญญาณ คือรูปแบบหนึ่งของการประมวลผลสัญญาณสายอากาศแถวลำดับที่มุ่งเน้นไปที่การหาทิศทางของสัญญาณที่มาจากกระทบกับสายอากาศแถวลำดับเป็นหลัก โดยวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณมีด้วยกันมากมายหลายแบบ ซึ่งได้ถูกนำไปอ้างอิงและนำไปใช้งานในการหาตำแหน่งของผู้ใช้งานอยู่บ่อยครั้ง การใช้สายอากาศหลายต้นมาเรียงลำดับเพื่อหาตำแหน่งหรือทิศทางที่อุปกรณ์สื่อสารไร้สายส่งสัญญาณมานั้นถือว่ามีประสิทธิภาพมากและมีงานวิจัยมากมายที่พัฒนาวิธีการต่างๆ เพื่อให้การกำหนดตำแหน่งหรือทิศทางมีความแม่นยำมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จำเป็นที่จะต้องทราบทิศทางการมาถึงของสัญญาณเพื่อที่จะนำทิศทางของสัญญาณนี้ไปใช้ในการปรับตัวถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแถวลำดับ ให้ก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้แต่ละคน โดยวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณที่เป็นที่รู้จักและนำไปใช้งานจริงได้แก่ วิธีห้วงเวลารวมกัน (delay-and-sum method) วิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน (Capon's minimum variance method) วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก (subspace method with MUSIC algorithm) วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท (subspace method with ESPRIT algorithm) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยคิดค้นการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณอีกมากมาย [37-38]

### 2.6.1 วิธีห้วงเวลารวมกัน

วิธีห้วงเวลารวมกัน ( delay-and-sum method ) เป็นการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณที่ง่ายที่สุด และเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาวิธีการหาทิศทางในแบบอื่นๆ วิธีการนี้จะไม่ใช่ประโยชน์คุณลักษณะของสัญญาณที่มาจากกระทบ หรือสัญญาณรบกวนในระบบแต่อย่างใด (ถ้าเป็นวิธีแบบปริภูมิย่อยจะใช้ประโยชน์จากสัญญาณที่รับได้นำมาแยกแยะลักษณะก่อนหาทิศทาง) ซึ่งจะใช้เพียงแต่คุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับนั้น โดยทำการก่อรูปลำคลื่นแล้วหมุนหรือหันทิศทางไปเรื่อยๆ ทุกทิศทางจากนั้นหาทิศทางที่ให้กำลังรวมสูงที่สุด [39]

เมื่อพิจารณาสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักแล้วจะได้ว่าสัญญาณขาออกจากการรวมกันของสัญญาณที่ได้จากสายอากาศแต่ละต้นที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักแล้วสามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$y(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{u}(k) \quad (2.42)$$

ซึ่งกำลังของสัญญาณรวมที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักนี้คือ

$$P_{cbf} = E[|y(k)|^2] = E[|\mathbf{w}^H \mathbf{u}(k)|^2] = \mathbf{w}^H E[\mathbf{u}(k) \mathbf{u}^H(k)] \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{uu} \mathbf{w} \quad (2.43)$$

เมื่อ  $\mathbf{R}_{uu}$  คือเมตริกซ์สหสัมพันธ์ตัวเอง ( autocorrelation matrix ) ของสัญญาณที่มาจาก กระทบสายอากาศแถวลำดับ

จากสมการที่ (2.43) พบว่า ค่ากำลังของสัญญาณรวมแสดงถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณที่เข้ามาโดยตรง ซึ่งถ้าปรับให้ค่าการถ่วงน้ำหนักตรงให้กับมุมที่ตกกระทบ ก็จะทำให้ได้กำลังที่สูงที่สุด จึงทำให้รูปแบบการหาทิศทางในวิธีต่างๆ ใช้กำลังรวมของสัญญาณนี้เพื่อนำไปพิจารณาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้

เมตริกซ์สหสัมพันธ์ตัวเอง  $\mathbf{R}_{uu}$  นี้มีข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการหาทิศทางเพราะมี ข้อมูลทั้งทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และทิศทางของสัญญาณแทรกสอดผสมอยู่ด้วยจึงทำให้ วิธีการหาทิศทางต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นที่จะวิเคราะห์เมตริกซ์สหสัมพันธ์ตัวเอง  $\mathbf{R}_{uu}$  นี้เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามสำหรับวิธีการห้วงเวลารวมกันนั้นยังไม่ใช่ประโยชน์ของเมตริกซ์นี้ แต่อาศัยการปรับค่า ถ่วงน้ำหนักเพื่อหมุนพู่คลื่นหลักไปที่ทิศทางต่างๆ โดยรอบแล้วพิจารณากำลังรวมที่สูงที่สุดเท่านั้น

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่ต้องการหาทิศทาง  $s(k)$  ที่มาตกกระทบกับสายอากาศแถวลำดับ ด้วยมุม  $\phi_0$  จะได้ว่าค่ากำลังของสัญญาณรวมตามสมการที่ (2.43) จะขึ้นกับมุม  $\phi_0$  ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{cbf}(\phi_0) &= E[|\mathbf{w}^H \mathbf{u}(k)|^2] = E[|\mathbf{w}^H (\mathbf{a}(\phi_0) s(k) + \mathbf{n}(k))|^2] \\ &= (|\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\phi_0)|^2 (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)) \end{aligned} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $\mathbf{a}(\phi_0)$  คือเวกเตอร์การหันลำคลื่น ( steering vector ) ในทิศทางที่สัญญาณมาถึง  $\phi_0$  และ  $\mathbf{n}(k)$  คือเวกเตอร์สัญญาณรบกวนในสายอากาศแถวลำดับ กำหนดให้  $\sigma_s = E[s(k)^2]$  และ  $\sigma_n = E[\mathbf{n}(k)^2]$  เป็นกำลังของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณรบกวนตามลำดับ

จากสมการที่ (2.44) เห็นได้ชัดว่าผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ  $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\phi_0)$  เพราะเมื่อแทน ค่านีลงไปในสมการจะทำให้ได้กำลังสูงที่สุด ซึ่งเป็นค่าการถ่วงน้ำหนักที่มุมของสัญญาณที่ต้องการหา ทิศทางพอดี ดังนั้นในระบบก่อรูปลำคลื่นแบบปกติจึงสามารถนำมาใช้หาทิศทางได้ โดยกำหนดให้ สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักมีค่าเท่ากับเวกเตอร์ชี้ทิศของมุมต่าง ๆ โดยเปลี่ยนมุมไปเรื่อย ๆ แล้ว

สังเกตว่าถ้าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าสูงที่สุดที่มุมใด ก็แสดงว่าสัญญาณมาจากทิศทางนั้น ซึ่งในกรณีนี้สามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า กำลังของสัญญาณที่รับได้จะขึ้นกับมุมที่หมุนไปดังนี้

$$P_{\text{cbf}}(\phi) = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{\text{uu}} \mathbf{w} = \mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{R}_{\text{uu}} \mathbf{a}(\phi) \quad (2.45)$$

ค่ากำลังของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนมุมของตัวถ่วงน้ำหนักไปเรื่อยๆ นี้ในบางตำราจะเรียกว่า สเปกตรัมเชิงตำแหน่ง (spatial spectrum) ซึ่งหมายความว่า ทิศทางในตำแหน่งที่ทำให้สเปกตรัมนี้สูงที่สุดคือทิศทางที่สัญญาณนั้นมาถึงนั่นเอง

วิธีประมาณทิศทางแบบห้วงเวลารวมกันนี้ มีข้อเสียหลายอย่างกล่าวคือ ความกว้างของลำคลื่นและความสูงของพูข้างเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของการหาทิศทาง โดยเฉพาะเมื่อมีสัญญาณหลายๆทิศทางเข้ามาถึงสายอากาศพร้อมๆกัน ทั้งนี้เป็นเพราะสัญญาณเหล่านั้นส่งผลต่อเวกเตอร์การหันลำคลื่นที่ทำให้ได้ค่าสูงที่สุดไม่เหมือนกัน ซึ่งขึ้นกับมุมที่ต่างกันในขณะที่ตกกระทบสายอากาศ ดังนั้นผลลัพธ์ของกำลังสัญญาณในสมการที่ (2.45) จึงเป็นการเฉลี่ยรวมของทุกสัญญาณในทุกทิศทางที่เกี่ยวข้อง ทำให้ไม่สามารถชี้ไปยังทิศทางที่สัญญาณแต่ละทิศทางเข้ามาจริงๆได้ จึงสรุปได้ว่าวิธีการนี้ใช้ได้ดีเฉพาะเมื่อมีสัญญาณเข้ามาเพียงทิศทางเดียว และให้ความละเอียดที่ต่ำมาก ซึ่งถ้าต้องการความละเอียดในการชี้ทิศที่ขึ้นก็ต้องใช้จำนวนสายอากาศที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดความสั่นเปลือยของระบบ

### 2.6.2 วิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน

วิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน (Capon's minimum variance method) เป็นการพัฒนามาจากวิธีห้วงเวลารวมกัน โดยที่วิธีห้วงเวลารวมกันนั้นจะหาทิศทางได้ดีจากสัญญาณที่มีความแรงมากที่สุดเป็นหลักเพียงทิศทางเดียวเท่านั้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่าไม่สามารถหาทิศทางของสัญญาณที่มากกว่าหนึ่งทิศทางที่เข้ามาถึงสายอากาศแล้วลำดับ แต่สำหรับวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอนนี้จะก่อรูปลำคลื่นบางส่วนไปยังทิศทางที่ต้องการควบคุมไปกับการหันจุดศูนย์ไปทิศทางที่มีสัญญาณอื่นๆ วิธีนี้จึงลดผลกระทบของสัญญาณในทิศทางต่างๆได้ โดยพิจารณาให้เป็นสัญญาณแทรกสอดให้หมดในขณะที่พิจารณาทิศทางของสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งจากนั้นจึงสลับกันไปเรื่อยๆจนครบทุกทิศทาง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\min_{\mathbf{w}} E[|y(k)|^2] = \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{\text{uu}} \mathbf{w} \text{ subject to } \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\phi_0) = 1 \quad (2.46)$$

ค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่ได้จากสมการที่ (2.46) จะถูกเรียกว่าเป็นสัมประสิทธิ์การก่อรูปลำคลื่นแบบเอ็มวีดีอาร์ (Minimum Variance Distortionless: MVDR) ทั้งนี้เป็นเพราะค่าถ่วงน้ำหนักนี้

ทำให้กำลังเฉลี่ย หรือความแปรปรวนของสัญญาณมีค่าน้อยที่สุดขณะที่ยังคงรักษาระดับของสัญญาณในทิศทางที่ต้องการ  $\phi_0$  ให้เหมือนเดิม ในสมการที่ (2.46) เป็นเงื่อนไขของการหาเวกเตอร์ที่เหมาะสมที่สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยวิธีตัวคูณลากรอง (Lagrange multiplier) [40] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$w = \frac{\mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{a}(\phi)}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{a}(\phi)} \quad (2.47)$$

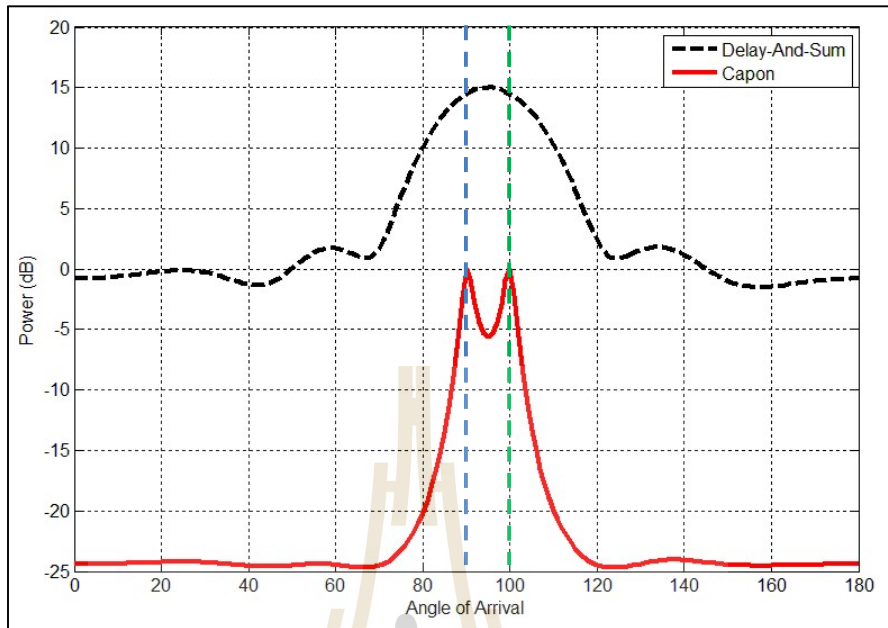
จากสมการนี้จะทำให้กำลังรวมของสัญญาณที่ได้จากสายอากาศแถวลำดับเป็นฟังก์ชันของมุมในทิศทางต่างๆตามวิธีของคาพอน ซึ่งทำให้สามารถเขียนสเปกตรัมเชิงตำแหน่งของคาพอนได้ดังนี้

$$P_{\text{capon}}(\phi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{a}(\phi)} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.48) สามารถหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้โดยพิจารณาทิศทางในตำแหน่งที่ทำให้สเปกตรัมเชิงตำแหน่งของคาพอนเป็นยอดสูง ในบางครั้งวิธีของคาพอนนี้ถูกพิจารณาว่าเป็นการประมาณทิศทางแบบค่าควรจะเป็นมากที่สุด (Maximum Likelihood: ML) เพราะในการหาลำดับรวมของแต่ละมุม ค่าสเปกตรัมเชิงตำแหน่งจะเป็นค่าประมาณที่ควรจะเป็นมากที่สุดของสัญญาณที่มาจากกระทบในมุนั้นๆ

รูปที่ 2.8 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นจากวิธีหน่วงเวลารวมกันเมื่อใช้วิธีของคาพอน โดยเป็นการจำลองผลของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น 6 ต้น แต่ละต้นห่างกันครึ่งความยาวคลื่น เมื่อมีสองสัญญาณเข้ามาในทิศทาง 90 และ 100 องศา และสองสัญญาณนี้มีกำลังงานเท่ากันที่ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 20 dB จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่า วิธีของคาพอนสามารถแยกทิศทางของสัญญาณทั้งสองได้ดี ในขณะที่วิธีหน่วงเวลารวมกันไม่สามารถทำได้





รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบสเปกตรัมเชิงตำแหน่งของวิธีห้วงเวลารวมกันและวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน เมื่อมีสองสัญญาณเข้ามาในทิศทาง 90 และ 100 องศา

ถึงแม้ว่าจะได้ความสามารถในการแยกมุมที่ดีขึ้นกว่าวิธีห้วงเวลารวมกัน แต่วิธีของคาพอนมีข้อเสียหลายอย่าง เช่น วิธีของคาพอนไม่สามารถใช้ได้กับหลายๆสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กัน เพราะว่าความสัมพันธ์นี้จะไปลดกำลังของสัญญาณที่ขาออก หรือกล่าวไว้ว่าองค์ประกอบในสหสัมพันธ์ของสัญญาณนี้จะไปทำลายโครงสร้างของการกำหนดให้กำลังของสัญญาณในทิศทางต่างๆ น้อยที่สุด นอกจากนี้ข้อเสียหนึ่งของวิธีการของคาพอนคือ ความต้องการพื้นที่สำหรับการประมวลผลของเมตริกซ์ผกผันที่มีขนาดใหญ่ตามขนาดของสายอากาศแล้วลำดับ

### 2.6.3 วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก

แม้ว่าวิธีการของคาพอนจะพัฒนาความสามารถในการหาทิศทางได้มากกว่าวิธีห้วงเวลารวมกัน ซึ่งกลายเป็นที่รู้จักและถูกนำไปใช้งานบ่อยครั้งก็ตาม แต่วิธีคาพอนก็มีขีดจำกัดในการจำแนกทิศทางของสองสัญญาณที่มีทิศทางการมาถึงที่สายอากาศใกล้กัน ทั้งนี้เป็นขีดจำกัดเนื่องจากข้อมูลที่เข้ามาในวิธีการของคาพอนเองซึ่งเป็นลักษณะธรรมชาติของสัญญาณอยู่แล้ว ดังนั้นจึงได้มีผู้วิจัยและพัฒนาวิธีการปรับปรุงลักษณะของข้อมูลขาเข้า หรือเมตริกซ์สหสัมพันธ์ตัวเองเพื่อให้สามารถแยกทิศทางของสัญญาณได้ดีขึ้น วิธีการเหล่านี้จะใช้คณิตศาสตร์เรื่องปริภูมิย่อยเพื่อแยกแยะลักษณะปริภูมิที่มีทิศทางของสัญญาณที่ต้องการออกมาได้ วิธีการปริภูมิย่อยที่เป็นที่นิยม ได้แก่ วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก (subspace method with MUSIC algorithm) และวิธีปริภูมิย่อย

ด้วยอัลกอริทึมเอสพริท (subspace method with ESPRIT algorithm) ซึ่งต่อมาทั้งสองอัลกอริทึมนี้ได้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาวิธีต่างๆ ตามมาอีกมากมาย

สำหรับอัลกอริทึมมิวสิก (Multiple Signal Classification: MUSIC) ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Schmidt ในปี 1979 [41] เพื่อแก้ปัญหาเทคนิคพื้นฐานในการแบ่งประเภทของหลายๆ สัญญาณ ด้วยรูปแบบของเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) ทำให้สามารถแยกแยะข้อมูลของสัญญาณที่เข้ามาถึงสายอากาศแล้วลำดับได้หลายสัญญาณพร้อมๆ กัน ในขณะที่ข้อดีของวิธีมิวสิกนี้คือ มีความละเอียดในการหาทิศทางสูง แต่ก็ต้องการการปรับเทียบระหว่างสายอากาศที่แม่นยำ

การพัฒนาอัลกอริทึมมิวสิกนั้นอาศัยแนวคิดทางเรขาคณิตของสัญญาณที่มาตกกระทบกับสายอากาศ ถ้ามีสัญญาณจำนวน  $D$  สัญญาณมาตกกระทบกับสายอากาศแล้วลำดับ สัญญาณขาออกที่รับได้จากสายอากาศจำนวน  $M$  ต้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{l=0}^{D-1} \mathbf{a}(\phi_l) s_l(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2.49)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}(\phi_0) & \mathbf{a}(\phi_1) & \dots & \mathbf{a}(\phi_{D-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(t) \\ \vdots \\ s_{D-1}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{n}(t) \quad (2.50)$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2.51)$$

เมื่อ  $\mathbf{s}^T(t) = [s_0(t) \ s_1(t) \ \dots \ s_{D-1}(t)]$  คือเวกเตอร์ของสัญญาณที่ตกกระทบกับสายอากาศแล้วลำดับ  $\mathbf{n}^T(t) = [n_0(t) \ n_1(t) \ \dots \ n_{D-1}(t)]$  คือเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวน  $\mathbf{a}(\phi_j)$  คือเวกเตอร์การหันลำคลื่นในทิศทางที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศของสัญญาณที่  $j$

เพื่อความง่ายในการพิจารณา ในสมการต่อไปจากนี้จะตัดเทอมที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (t) ออกไปโดยให้ผู้อ่านเข้าใจว่าตัวแปรต่างๆ ทั้ง  $\mathbf{u}$   $\mathbf{s}$  และ  $\mathbf{n}$  นั้นเปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากลักษณะของเมตริกซ์ในสมการที่ (2.51) แสดงว่ามีปริภูมิของสัญญาณขนาด  $M$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสัญญาณย่อยๆ จำนวน  $D$  บวกเข้าด้วยกัน ซึ่งนั่นหมายความว่า มีเวกเตอร์ฐานหลัก (basis vector) จำนวน  $D$  ที่ตอบสนองต่อสัญญาณที่เข้ามา  $D$  ทิศทางซ่อนอยู่ภายในเมตริกซ์สหสัมพันธ์  $\mathbf{R}_{uu}$  ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{R}_{uu} = E[\mathbf{u}\mathbf{u}^H] = \mathbf{A}E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H]\mathbf{A}^H + E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] \quad (2.52)$$

$$\mathbf{R}_{uu} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (2.53)$$

เมื่อ  $\mathbf{R}_{ss} = E[\mathbf{ss}^H]$  คือเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาตกกระทบกับสายอากาศ  
 ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) ของเมตริกซ์สหสัมพันธ์  $\mathbf{R}_{uu}$  ว่ามีค่า  
 เป็น  $\lambda_0, \dots, \lambda_{M-1}$  จะได้ว่า

$$[\mathbf{R}_{uu} - \lambda_i\mathbf{I}] = 0 \quad (2.54)$$

ซึ่งทำให้สามารถเขียนสมการที่ (2.53) ใหม่ได้ดังนี้

$$|\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} - \lambda_i\mathbf{I}| = |\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H - (\lambda_i - \sigma_n^2)\mathbf{I}| = 0 \quad (2.55)$$

ดังนั้นค่าลักษณะเฉพาะของ  $\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H$  คือ

$$V_i = \lambda_i - \sigma_n^2 \quad (2.56)$$

ค่าของเมตริกซ์  $\mathbf{R}_{ss}$  ไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐานตรงเท่าที่สัญญาณที่มาตกกระทบกับ  
 สายอากาศไม่มีความสัมพันธ์กันมาก ทำให้สามารถหาค่าตอบได้เสมอในเงื่อนไขที่  $D$  ต้องน้อยกว่า  
 จำนวนสายอากาศแถวลำดับ  $M$

จากทฤษฎีของพีชคณิตเชิงเส้น ทำให้ทำนายได้ว่ามีค่าลักษณะเฉพาะของ  $\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H$  จำนวน  
 $M - D$  ค่าที่เป็นศูนย์ และจากสมการที่ (2.56) จะได้ว่ามีค่าลักษณะเฉพาะของเมตริกซ์สหสัมพันธ์  
 $\mathbf{R}_{uu}$  จำนวน  $M - D$  ค่าที่เป็นค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน  $\sigma_n^2$  ดังนั้นจึงสามารถเรียงค่า  
 ลักษณะเฉพาะของเมตริกซ์สหสัมพันธ์  $\mathbf{R}_{uu}$  จากมากไปหาน้อยได้ดังนี้

$$\lambda_D, \dots, \lambda_{M-1} = \sigma_n^2 \quad (2.57)$$

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่า เมตริกซ์สหสัมพันธ์  $\mathbf{R}_{uu}$  ที่ถูกคำนวณมาจากจำนวนข้อมูล  
 ที่จำกัดค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละค่าของลักษณะเฉพาะใน  
 สมการที่ (2.57) ถ้ากำหนดให้  $K$  คือจำนวนของค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด การประมาณจำนวน  
 ของสัญญาณที่เข้ามาจะเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{D} = M - K \quad (2.58)$$

กำหนดให้  $\mathbf{q}_i$  คือเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะที่คู่กับค่าลักษณะเฉพาะ  $\lambda_i$  ซึ่งจะได้ว่า

$$(\mathbf{R}_{uu} - \lambda_i \mathbf{I}) \mathbf{q}_i = 0 \quad (2.59)$$

และถ้าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะเป็นของค่าลักษณะเฉพาะที่มีค่าน้อยที่สุดจะได้ว่า

$$(\mathbf{R}_{uu} - \sigma_n^2 \mathbf{I}) \mathbf{q}_i = \mathbf{A} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}^H \mathbf{q}_i + \sigma_n^2 \mathbf{I} - \sigma_n^2 \mathbf{I} = 0 \quad (2.60)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}^H \mathbf{q}_i = 0 \quad (2.61)$$

เพราะว่า  $\mathbf{R}_{ss}$  ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐานทำให้เข้าใจได้ว่า

$$\mathbf{A}^H \mathbf{q}_i = 0 \quad (2.62)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}^H(\phi_0) \mathbf{q}_i \\ \mathbf{a}^H(\phi_1) \mathbf{q}_i \\ \vdots \\ \mathbf{a}^H(\phi_{D-1}) \mathbf{q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

ซึ่งหมายความว่าค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะชุดนี้จะสัมพันธ์กับค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดจำนวน  $M-D$  ในลักษณะที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ชี้ทิศของสัญญาณที่เข้ามาทั้งหมด  $D$  เส้นทาง ดังแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\{\mathbf{a}(\phi_0), \dots, \mathbf{a}(\phi_{D-1})\} \perp \{\mathbf{q}_D, \dots, \mathbf{q}_{M-1}\} \quad (2.64)$$

นี่คือพื้นฐานหลักการของอัลกอริทึมมิวสิกที่สามารถประมาณทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยสมการที่ (2.64) แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของ  $\mathbf{R}_{uu}$  ประกอบไปด้วยสองปริภูมีย่อย คือปริภูมีย่อยของสัญญาณ  $\{a(\phi_0), \dots, a(\phi_{D-1})\}$  และปริภูมีย่อยของสัญญาณรบกวน  $\{q_D, \dots, q_{M-1}\}$  ดังนั้นการหาทิศทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปริภูมีย่อยของสัญญาณสามารถหาได้จากปริภูมีย่อยของสัญญาณรบกวนดังแสดงในสมการที่ (2.65)

$$\mathbf{V}_n = [\mathbf{q}_D \quad \mathbf{q}_{D+1} \quad \dots \quad \mathbf{q}_{M-1}] \quad (2.65)$$

เพราะเวกเตอร์ชี้ทิศนี้ตั้งฉากกับเวกเตอร์ชี้ทิศในทิศทางที่สัญญาณเข้ามาถึง ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาตำแหน่งของสัญญาณที่เข้ามาถึงได้จากสเปกตรัมเชิงตำแหน่งของมิวสิก ดังนี้

$$P_{\text{MUSIC}}(\phi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\phi)} \quad (2.66)$$

หรือ

$$P_{\text{MUSIC}}(\phi) = \frac{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{a}(\phi)}{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\phi)} \quad (2.67)$$

การตั้งฉากของ  $\{a(\phi_0), \dots, a(\phi_{D-1})\}$  และ  $\mathbf{V}_n$  จะทำให้เมื่อคูณกันมีผลลัพธ์เป็นศูนย์ซึ่งพบว่าส่วนกลับของสมการที่ (2.66) และ (2.67) จะเป็นจุดสูงสุดที่สุดนั่นเอง และเมื่อหาทิศทางทั้งหมดเจอจะสามารถคำนวณเมตริกซ์สหสัมพันธ์  $\mathbf{R}_{ss}$  ได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_{ss} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H (\mathbf{R}_{uu} - \lambda_{\min} \mathbf{I}) \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \quad (2.68)$$

โดยสรุปแล้ววิธีมิวสิกนั้นเป็นขั้นตอนของการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสัญญาณ เช่น จำนวนของสัญญาณที่เกิดขึ้น ทิศทางการมาถึงของแต่ละสัญญาณ ความแรงของสัญญาณ และความสัมพันธ์กันระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้น รวมไปถึงความแรงของสัญญาณรบกวนอีกด้วย ซึ่งวิธีมิวสิกนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำที่สูงมาก โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์การมาถึงของสัญญาณสรุปดังนี้

1. รวมสัญญาณอินพุต  $u_k$  โดยที่  $k = 0, \dots, K-1$  และวิเคราะห์หาค่าเมตริกซ์สหสัมพันธ์เข้าได้ดังนี้

$$\hat{R}_{uu} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} u_k u_k^H \quad (2.69)$$

2. หาค่าลักษณะเฉพาะของค่า  $\hat{R}_{uu}$  ดังนี้

$$\hat{R}_{uu} V = V \Lambda \quad (2.70)$$

ซึ่ง  $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{M-1}\}, \lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{M-1}$  คือค่าลักษณะเฉพาะ และ  $V = [q_0 q_1 \dots q_{M-1}]$  คือค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะที่สัมพันธ์กันของ  $\hat{R}_{uu}$

3. วิเคราะห์หาจำนวนของสัญญาณ ( $\hat{D}$ ) จากค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด ( $\lambda_{min}$ )

$$\hat{D} = M - K \quad (2.71)$$

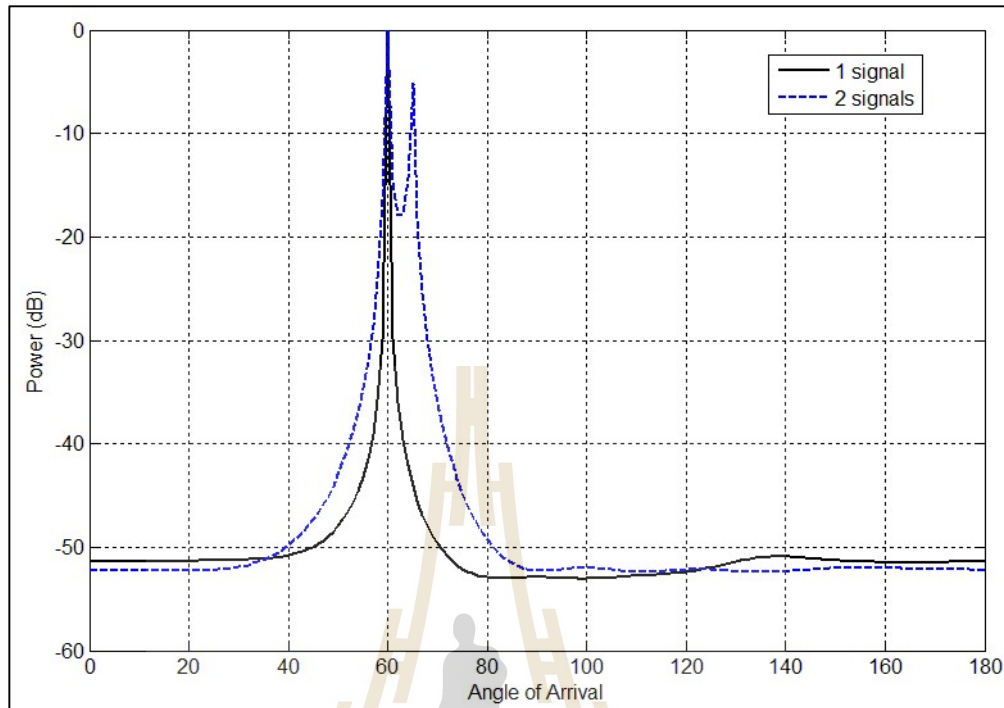
4. คำนวณหาสเปกตรัมแบบวิธีมิวสิกดังนี้

$$\hat{P}_{MUSIC}(\phi) = \frac{1}{a^H(\phi) V_n V_n^H a(\phi)} \quad (2.72)$$

ซึ่ง  $V_n = [q_D q_{D+1} \dots q_{M-1}]$

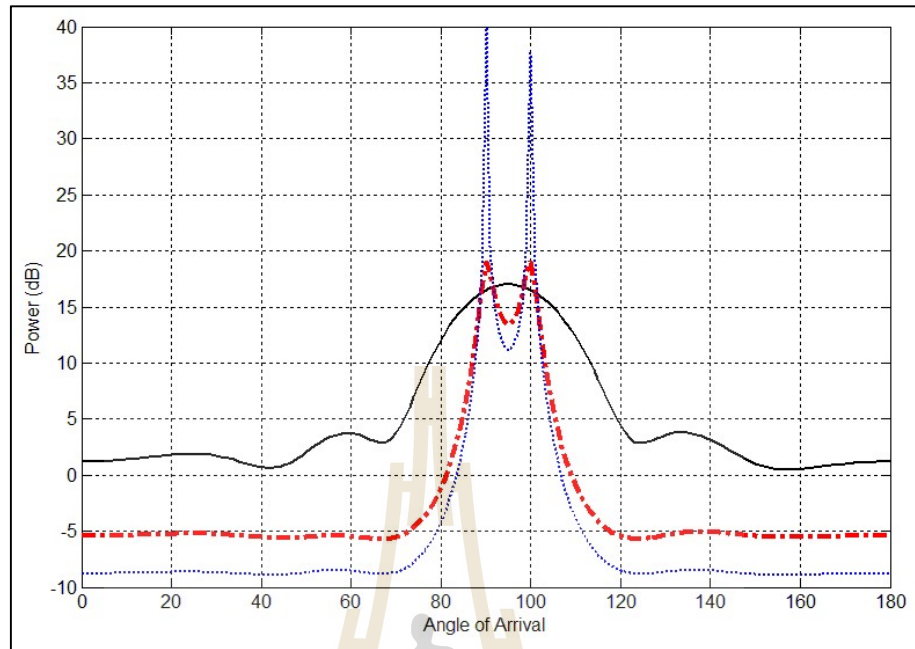
5. หาจำนวนของสัญญาณที่มีค่าสเปกตรัมสูงสุดของ  $\hat{P}_{MUSIC}(\phi)$  ที่ได้รับมาจากการวิเคราะห์หาทิศทางมาถึงของสัญญาณ ซึ่งจะแสดงการหาทิศทางได้ดังรูป 2.9

รูปที่ 2.9 แสดงการวิเคราะห์หาทิศทางมาถึงของสัญญาณแบบวิธีมิวสิก เมื่อกำหนดให้ระบบใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 6 ต้น และมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 20 dB โดยกราฟเส้นสีดำแสดงการหาทิศทางเมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 60 องศา ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 60 และ 65 องศา จะแสดงการหาทิศทางด้วยกราฟเส้นสีน้ำเงิน

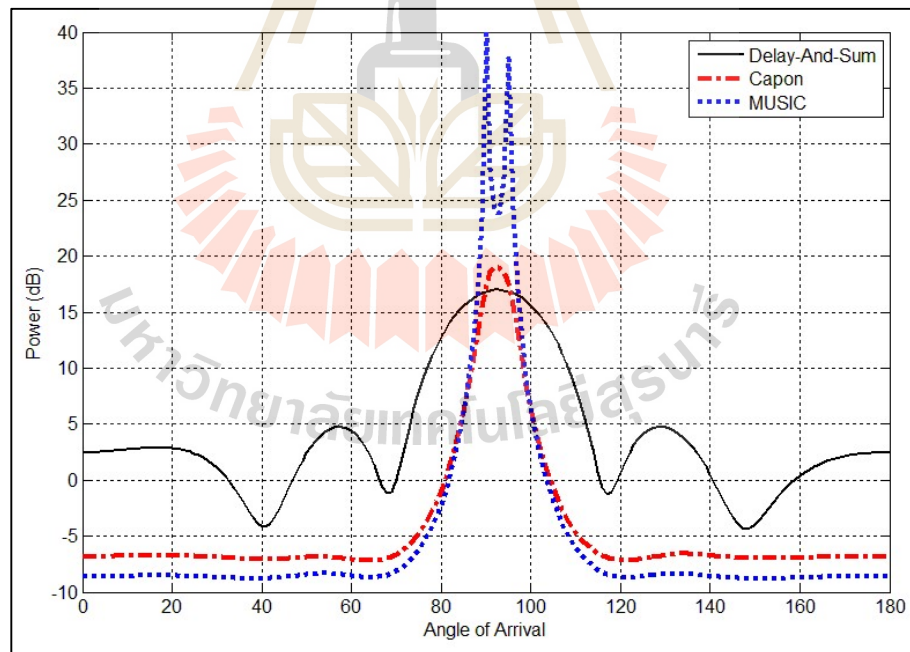


รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์หาทิศทางการมาถึงของสัญญาณแบบวิธีมิวสิก

รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์หาทิศทางการมาถึงของสัญญาณแบบวิธีหน้าต่างเวลารวมกัน วิธีคาพอน และวิธีมิวสิก ซึ่งแสดงแทนด้วยกราฟเส้นสีดำ สีแดงและสีน้ำเงิน ตามลำดับ โดยกำหนดให้ระบบใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 6 ต้น และมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 20 dB จากรูปที่ 2.10 (ก) เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 90 และ 100 องศา จะเห็นได้ว่าวิธีหน้าต่างเวลารวมกันไม่สามารถหาทิศทางได้เมื่อมีสัญญาณเข้ามา มากกว่าหนึ่งสัญญาณ ในขณะที่วิธีคาพอน และวิธีมิวสิกนั้นสามารถที่จะหาทิศทางได้อย่างถูกต้อง และจากรูปที่ 2.10 (ข) เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 90 และ 95 องศา จะเห็นได้ว่าวิธีหน้าต่างเวลารวมกัน และวิธีคาพอนไม่สามารถที่จะหาทิศทางได้เนื่องจากวิธีคาพอนนั้นจะไม่สามารถหาทิศทางได้เมื่อมีสัญญาณที่เข้ามา มีทิศทางที่ใกล้กันมากเกินไป ส่วนวิธีมิวสิกนั้นยังคงหาทิศทางได้อย่างถูกต้อง สรุปได้ว่าวิธีมิวสิกนั้นสามารถที่จะวิเคราะห์หาทิศทางได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ไม่ว่าจะในสถานการณ์ที่มีสัญญาณเข้ามา มากกว่าหนึ่งสัญญาณหรือสัญญาณที่เข้ามานั้นมีทิศทางที่ใกล้กันมาก



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ทิศทาง การมาถึงของสัญญาณระหว่างวิธีหน้าต่างเวลา  
รวมกัน วิธีคาพอน และวิธีมิวสิก (ก) เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 90 และ 100 องศา (ข) เมื่อมีสัญญาณ  
เข้ามาที่ 90 และ 95 องศา



### 2.6.4 วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท

วิธีการหาทิศทางด้วยอัลกอริทึมเอสพริท (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques: ESPRIT) คือวิธีการหาทิศทางของสัญญาณโดยอาศัยหลักการของปริภูมิย่อยที่เป็นที่นิยมอีกวิธีหนึ่ง ข้อดีของอัลกอริทึมเอสพริทคือ สามารถลดความซับซ้อนในการประมวลผลเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมมิวสิก และไม่ต้องการใช้เวกเตอร์การหันลำคลื่นเพื่อหมุมหาทิศทางที่ทำให้สเปกตรัมเชิงตำแหน่งมีค่าเป็นจุดยอด นอกจากนี้วิธีเอสพริทยังไม่ต้องการข้อมูลการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับ ซึ่งการปรับเทียบระหว่างสายอากาศจึงไม่จำเป็นในกรณีนี้

อัลกอริทึมเอสพริทนั้นมีข้อได้เปรียบกว่าอัลกอริทึมมิวสิก เพราะใช้วิธีการแยกสัญญาณออกเป็นสองชุดเท่าๆกัน เสมือนมีสายอากาศแถวลำดับย่อยสองชุดที่มีค่าระยะทางการเคลื่อนที่คงที่ นั่นคือจะได้ชุดสายอากาศสองชุดที่ความห่างเท่ากันทางตำแหน่ง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นมีหลายวิธีที่รองรับแนวคิดนี้เช่น สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นเอกรูป

สมมติให้พิจารณาโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับระนาบที่มีการวางตัวอิสระที่ประกอบด้วยจำนวน  $m = M / 2$  คู่ของสายอากาศที่อยู่ติดกัน และมีระยะห่างระหว่างกัน  $\Delta x$  เท่าๆกันในแต่ละคู่ จะได้สัญญาณที่รับได้ที่คู่อันดับที่  $i$  ดังนี้

$$u_{0,i}(t) = \sum_{k=0}^{D-1} s_k(t) a_i(\phi_k) + n_{0,i}(t) \quad (2.73)$$

$$u_{1,i}(t) = \sum_{k=0}^{D-1} s_k(t) \exp[-j\beta\Delta x \cos(\phi_k)] a_i(\phi_k) + n_{1,i}(t) \quad (2.74)$$

เมื่อ  $\phi_k$  คือทิศทางของสัญญาณที่  $k$  เข้ามาตกกระทบสายอากาศ เมื่อนำสมการสัญญาณที่รับได้ไปเขียนใหม่ในรูปแบบของเมตริกซ์จะได้ว่า

$$\mathbf{u}_0(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_0(t) \quad (2.75)$$

$$\mathbf{u}_1(t) = \mathbf{A}\Phi\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_1(t) \quad (2.76)$$

เมื่อ  $\Phi$  คือเมตริกซ์ทแยงมุมซึ่งมีสมาชิกแต่ละตัวแสดงถึงกำลังของเฟสที่เลื่อนไปของสัญญาณแต่ละตัว และเมตริกซ์นี้มีความสัมพันธ์กับการวัดสัญญาณเปรียบเทียบกับชุด  $\mathbf{u}_0$  และ  $\mathbf{u}_1$  ในแต่ละคู่ ซึ่งกำหนดได้ดังนี้

$$\Phi = \text{diag} \{ \exp(j\gamma_0), \exp(j\gamma_1), \dots, \exp(j\gamma_{D-1}) \} \quad (2.77)$$

เมื่อ  $\gamma_k = -\beta\Delta x \cos(\phi_k)$

แม้ว่า  $\Phi$  จะเป็นค่าเชิงซ้อนแต่สามารถพิจารณาเป็นการดำเนินการของค่าจริงสองค่าบนสองมิติได้ ซึ่งสัญญาณที่รับได้รวมทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0(t) \\ \mathbf{u}_1(t) \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2.78)$$

เมื่อ

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}\Phi \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_0(t) \\ \mathbf{n}_1(t) \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

แนวคิดพื้นฐานเบื้องหลังอัลกอริทึมเอสพริท คือ การใช้ประโยชน์ของความคงตัวของสัญญาณในปริภูมิย่อยที่จัดวางเป็นคู่ๆ ซึ่งแต่ละชุดจะมีเวกเตอร์ฐานหลักที่เหมือนกัน เมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณ  $R_{uu} = \overline{\mathbf{A}R_{ss}\mathbf{A}^H} + \sigma_n^2 I$  สามารถนำไปใช้หาเวกเตอร์ฐานหลักได้ และถ้า  $D \geq M$  จะทำให้มีค่าลักษณะเฉพาะจำนวน  $M - D$  ที่น้อยที่สุดของ  $R_{uu}$  ซึ่งเท่ากับ  $\sigma_n^2$  และมีเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ  $\mathbf{V}_s$  จำนวน  $D$  ตามค่าลักษณะเฉพาะที่มากที่สุดโดยที่

$$\text{Range}\{\mathbf{V}_s\} = \text{Range}\{\overline{\mathbf{A}}\} \quad (2.80)$$

เนื่องจาก  $\text{Range}\{\mathbf{V}_s\} = \text{Range}\{\overline{\mathbf{A}}\}$  ดังนั้นจึงต้องมีค่าเมตริกซ์  $\mathbf{T}$  ที่ไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน ซึ่งทำให้  $\mathbf{V}_s = \overline{\mathbf{A}}\mathbf{T}$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการแยกสัญญาณของ  $\mathbf{V}_s$  ใน  $\mathbf{V}_0 \in \mathbb{C}^{M \times D}$  และ  $\mathbf{V}_1 \in \mathbb{C}^{M \times D}$  ทำให้  $\mathbf{V}_0 = \mathbf{A}\mathbf{T}$  และ  $\mathbf{V}_1 = \mathbf{A}\Phi\mathbf{T}$  ซึ่งหมายความว่า

$$\text{Range}\{\mathbf{V}_0\} = \text{Range}\{\mathbf{V}_1\} = \text{Range}\{\mathbf{A}\} \quad (2.81)$$

เพราะ  $\mathbf{V}_0$  และ  $\mathbf{V}_1$  มีปริภูมิหลักร่วมกันทำให้ลำดับของ  $\mathbf{V}_0 = [\mathbf{V}_0 | \mathbf{V}_1]$  คือ  $D$  ซึ่งบอกเป็นนัยว่าจะมีเมตริกซ์  $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{2D \times D}$  ดังนี้

$$\mathbf{0} = [\mathbf{V}_0 | \mathbf{V}_1] \mathbf{F} = \mathbf{V}_0 \mathbf{F}_0 + \mathbf{V}_1 \mathbf{F}_1 = \mathbf{A} \mathbf{T} \mathbf{F}_0 + \mathbf{A} \Phi \mathbf{T} \mathbf{F}_1 \quad (2.82)$$

เมตริกซ์  $F$  span ปริภูมิจุดศูนย์ของ  $V_{01}$  โดยกำหนดให้  $\Psi = -F_0 F_1^{-1}$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.82) ใหม่ได้ดังนี้

$$AT\Psi = A\Phi T \quad (2.83)$$

ซึ่งบอกเป็นนัยว่า

$$AT\Psi T^{-1} = A\Phi \quad (2.84)$$

สมมติให้เมตริกซ์  $A$  เป็นแบบลำดับเต็มซึ่งเป็นจริงตรงเท่าที่มีมุมของสัญญาณที่เข้ามาจากสัญญาณในแต่ละทิศทางแตกต่างกันอย่างชัดเจน จะได้ว่า

$$T\Psi = \Phi T \quad (2.85)$$

จากสมการที่ (2.85) ค่าลักษณะเฉพาะของ  $\Psi$  จะต้องเท่ากับสมาชิกในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์  $\Phi$  และหลักของเมตริกซ์  $T$  เป็นเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของ  $\Psi$  สิ่งนี้เป็นความสัมพันธ์ที่เป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาอัลกอริทึมเอสพริท

แต่ในทางปฏิบัติ นั้น จะมีสัญญาณรบกวนปะปนมากับสัญญาณที่รับได้เสมอทำให้สมการที่ (2.80) และ (2.81) ไม่สามารถเป็นจริงได้ ดังนั้นการหา  $\Psi$  เพื่อให้  $\hat{V}_0 \Psi = \hat{V}_1$  จะเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ผลเฉลยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังสมการต่อไปนี้

$$\Psi = (\hat{V}_0^H \hat{V}_0)^{-1} \hat{V}_0^H \hat{V}_1 \quad (2.86)$$

เมื่อได้เมตริกซ์  $\Psi$  แล้ว การหาค่าเมตริกซ์  $\Phi$  สามารถทำได้เพราะสมาชิกในแนวทแยงมุมเป็นค่าลักษณะเฉพาะของ  $\Psi$  ซึ่งสัมพันธ์กับทิศทางมาถึงของสัญญาณ

เนื่องจากทั้ง  $\hat{V}_0$  และ  $\hat{V}_1$  ถูกรบกวนเท่าๆกัน ทำให้ปัญหาถูกแก้ไขด้วยการใช้เงื่อนไขกำลังสองน้อยที่สุดทั้งหมด (Total Least Squares: TLS) ซึ่งสามารถแทนที่เมตริกซ์ศูนย์ในสมการที่ (2.82) ด้วยเมตริกซ์ของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด สำหรับอัลกอริทึมเอสพริทที่ใช้เงื่อนไขกำลังสองน้อยที่สุดทั้งหมดถูกสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาค่า  $\hat{R}_{uu}$  ของ  $R_{uu}$  จากการวัดสัญญาณที่รับได้

2. หาค่าลักษณะเฉพาะและเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของ  $\hat{\mathbf{R}}_{uu}$  ดังนี้

$$\hat{\mathbf{R}}_{uu} = \mathbf{V}\Lambda\mathbf{V}^H \quad (2.87)$$

เมื่อ  $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_0, \dots, \lambda_{M-1}\}$  และ  $\mathbf{V} = \{\mathbf{q}_0, \dots, \mathbf{q}_{M-1}\}$  เป็นค่าลักษณะเฉพาะและเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะตามลำดับ

3. ประมาณจำนวนทิศทางที่เข้ามาของสัญญาณ  $\hat{D} = M - K$

4. ประมาณปริภูมิสัญญาณ  $\hat{V}_s = [\hat{V}_0, \dots, \hat{V}_{D-1}]$  และแยกเป็นเมตริกซ์ย่อย 2 ชุด

$$\hat{V}_s = \begin{bmatrix} \hat{V}_0 \\ \hat{V}_1 \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

5. คำนวณหาค่าลักษณะเฉพาะ ( $\lambda_1 > \dots > \lambda_{2D}$ )

$$\mathbf{V}_{01}^H \hat{V}_{01} = \begin{bmatrix} \hat{V}_0^H \\ \hat{V}_1^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_0 \\ \hat{V}_1 \end{bmatrix} = \mathbf{V}\Lambda\mathbf{V}^H \quad (2.89)$$

และจัดเมตริกซ์  $\mathbf{V}$  ในรูปแบบเมตริกซ์ย่อย  $\hat{D} \times \hat{D}$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{11} & \mathbf{V}_{12} \\ \mathbf{V}_{21} & \mathbf{V}_{22} \end{bmatrix} \quad (2.90)$$

6. คำนวณค่าลักษณะเฉพาะของ  $\Psi = -\mathbf{V}_{12}\mathbf{V}_{22}^{-1}$

$\hat{\Phi}_k =$  ค่าลักษณะเฉพาะของ  $(-\mathbf{V}_{12}\mathbf{V}_{22}^{-1}) \quad \forall k = 0, \dots, D - 1$

7. ประมาณทิศทางดังนี้

$$\phi_k = \cos^{-1} \left[ -\frac{(\text{angle}(\hat{\Phi}_k))}{\beta \Delta x} \right] \quad (2.91)$$

จากขั้นตอนที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า สามารถประมาณทิศทางได้จากสมการโดยตรงซึ่งไม่ต้องอาศัยการพิจารณาจากสเปกตรัมเชิงตำแหน่งเหมือนวิธีอื่นๆ

## 2.7 สรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้จะเห็นว่า ระบบการสื่อสารไร้สายที่รองรับการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งาน ถูกนำมาพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีโมเด็มและเทคนิคการควบคุมอัตรารวมต่อผู้ใช้งาน ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ต้องทราบช่องสัญญาณที่จะส่งข้อมูลแล้วมีการป้อนกลับมาเพื่อให้ระบบนั้นสมบูรณ์ หรือจะเป็นเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย การก่อรูปลำคลื่นแบบฉวยโอกาส การก่อรูปลำคลื่นในลักษณะนี้จะต้องใช้รูปการป้อนกลับ เพื่อนำเอาข้อมูลหรือสัญญาณที่ต้องการมาสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อเข้าสู่กระบวนการป้อนกลับเพื่อใช้ในการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก แต่เราสามารถทำให้ระบบปราศจากการป้อนกลับได้ โดยวิธีที่น่าสนใจคือเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยการป้อนช่องสัญญาณและข้อมูลย้อนกลับ โดยอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ แต่ด้วยข้อจำกัดของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมที่ถูกนำมาใช้ ยังคงมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดต่ำซึ่งจะแสดงให้เห็นในบทถัดไป

ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่ปรับปรุงประสิทธิภาพการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบบหลายผู้ใช้และไม่มีการป้อนข้อมูลและช่องสัญญาณย้อนกลับ โดยการก่อรูปลำคลื่นที่ต้องการนั้นคือ ต้องสามารถก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้งานพร้อมกัน โดยส่วนที่เป็นลำคลื่นข้างเคียงจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้งานคนอื่นๆ ซึ่งจะต้องอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณในแต่ละผู้ใช้งานแล้วนำมาประมวลผลโดยตั้งเป็นสมการเมตริกซ์ จากนั้นจึงสังเคราะห์เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้นใหม่ เพื่อปรับแบบรูปลำคลื่นให้หันไปยังผู้ใช้งานที่ต้องการและลำคลื่นข้างเคียงต้องไม่รบกวนทิศทางหลักของผู้ใช้งานอื่น

## บทที่ 3

# กระบวนการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากโดยอาศัยทิศทางการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ

### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากโดยอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ โดยแสดงถึงกระบวนการและหลักการที่ใช้ในการออกแบบด้วยสมการที่เป็นการส่งแบบผู้ใช้งานเดี่ยวและการส่งแบบหลายผู้ใช้งาน โดยจะต้องอาศัยส่วนสำคัญที่เรียกว่าส่วนประมวลผลสัญญาณที่สำคัญของการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่มาจากกระบอกสายอากาศแต่ละต้น เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักให้กับสายอากาศในแต่ละต้นนั้นเราจะออกแบบให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในระบบการส่งแบบหลายผู้ใช้งาน เพื่อให้ลำคลื่นหลักหันไปยังผู้ใช้งานที่ต้องการและลดสัญญาณแทรกสอดในทิศทางของผู้ใช้งานคนอื่นๆ โดยเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้นออกมา จากนั้นจะนำถ่วงน้ำหนักของสายอากาศไปจำลองแบบในบรอดไปเพื่อศึกษาคุณสมบัติของระบบ โดยจะเปรียบเทียบในระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิมและแบบตั้งฉาก โดยดูจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละผู้ใช้งานที่เวลาและความถี่เดียวกัน

### 3.2 กระบวนการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก

#### 3.2.1 แบบผู้ใช้งานเดี่ยว

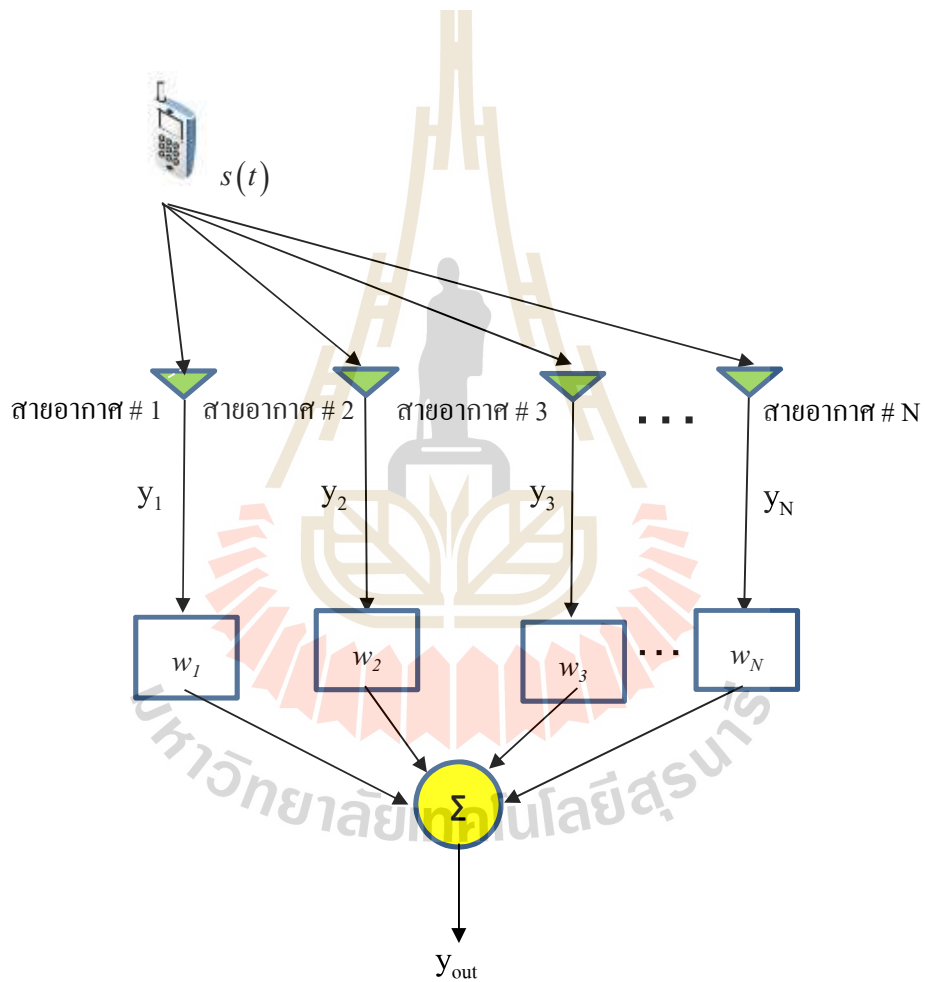
การก่อรูปลำคลื่นแบบผู้ใช้งานเดี่ยว จะเหมือนกับการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิม โดยหลักการในการที่จะหันลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบเชิงเส้นจำนวน  $N$  ต้น ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 จากรูปสัญญาณขาออกคือ

$$y_{out} = \sum_{i=1}^N w_i y_i \quad (3.1)$$

เมื่อ  $y_{out}$  คือสัญญาณขาออก  $w_i$  คือค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น (weighting coefficients)  $y_i$  คือสัญญาณที่มาจากกระบอกสายอากาศแต่ละต้น และ  $N$  คือจำนวนสายอากาศ กำหนดสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น  $y_i$  เป็นดังนี้

$$y_i(t) = e^{-j(kd \cos\theta)(i-1)} s(t) + n_i(t) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $s(t)$  คือข้อมูลของผู้ใช้  $\theta$  คือทิศทางของผู้ใช้ในแนวระนาบ  $n_i(t)$  คือสัญญาณรบกวนที่มาตกระทบที่สายอากาศ (noise)  $k$  คือหมายเลขคลื่น (wave number)  $= 2\pi/\lambda$  และ  $d$  คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น



รูปที่ 3.1 การก่อรูปลำคลื่นเพื่อใช้งานแบบ 1 ผู้ใช้งาน

แทนค่าในรูปสมการเมตริกซ์

$$y_{out} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad \dots \quad w_N] \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

แทนค่าสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.1) จะได้

$$y_{out} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad \dots \quad w_N] \times \begin{bmatrix} e^{-j(kd \cos \theta)(1-1)} s(t) + n_1(t) \\ e^{-j(kd \cos \theta)(2-1)} s(t) + n_2(t) \\ e^{-j(kd \cos \theta)(3-1)} s(t) + n_3(t) \\ \vdots \\ e^{-j(kd \cos \theta)(N-1)} s(t) + n_N(t) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\hat{y}_{out} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad \dots \quad w_N] \times \begin{bmatrix} s(t) \\ e^{-jkd \cos \theta} s(t) \\ e^{-j2kd \cos \theta} s(t) \\ \vdots \\ e^{-jNkd \cos \theta} s(t) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\hat{y}_{out} = s(t) (w_1 + w_2 e^{-jkd \cos \theta} + w_2 e^{-j2kd \cos \theta} + w_3 e^{-j3kd \cos \theta} + \dots + w_N e^{-jNkd \cos \theta}) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $w_i$  คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น จากสมการที่ 3.6 เราต้องการให้สัญญาณขาออกเท่ากับข้อมูลของผู้ใช้งานที่รับมา ดังนั้นตัวคูณของสมการที่ติดกับสัญญาณ  $s(t)$  จะต้องมีค่าเท่ากับ 1 เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ ดังนี้

$$w_1 + w_2 e^{-jkd \cos \theta} + w_2 e^{-j2kd \cos \theta} + w_3 e^{-j3kd \cos \theta} + \dots + w_N e^{-jNkd \cos \theta} = 1 \quad (3.7)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ



$$w_1 = 1 - w_2 e^{-jkd \cos \theta} - w_2 e^{-j2kd \cos \theta} - w_3 e^{-j3kd \cos \theta} - \dots - w_N e^{-jNkd \cos \theta} \quad (3.8)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ

$$w_2 = \frac{1 - w_1 - w_3 e^{-j3kd \cos \theta} - \dots - w_N e^{-jNkd \cos \theta}}{e^{-j2kd \cos \theta}} \quad (3.9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 3 มีค่าเท่ากับ

$$w_3 = \frac{1 - w_1 - w_2 e^{-j2kd \cos \theta} - \dots - w_N e^{-jNkd \cos \theta}}{e^{-j3kd \cos \theta}} \quad (3.10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่  $N$  มีค่าเท่ากับ

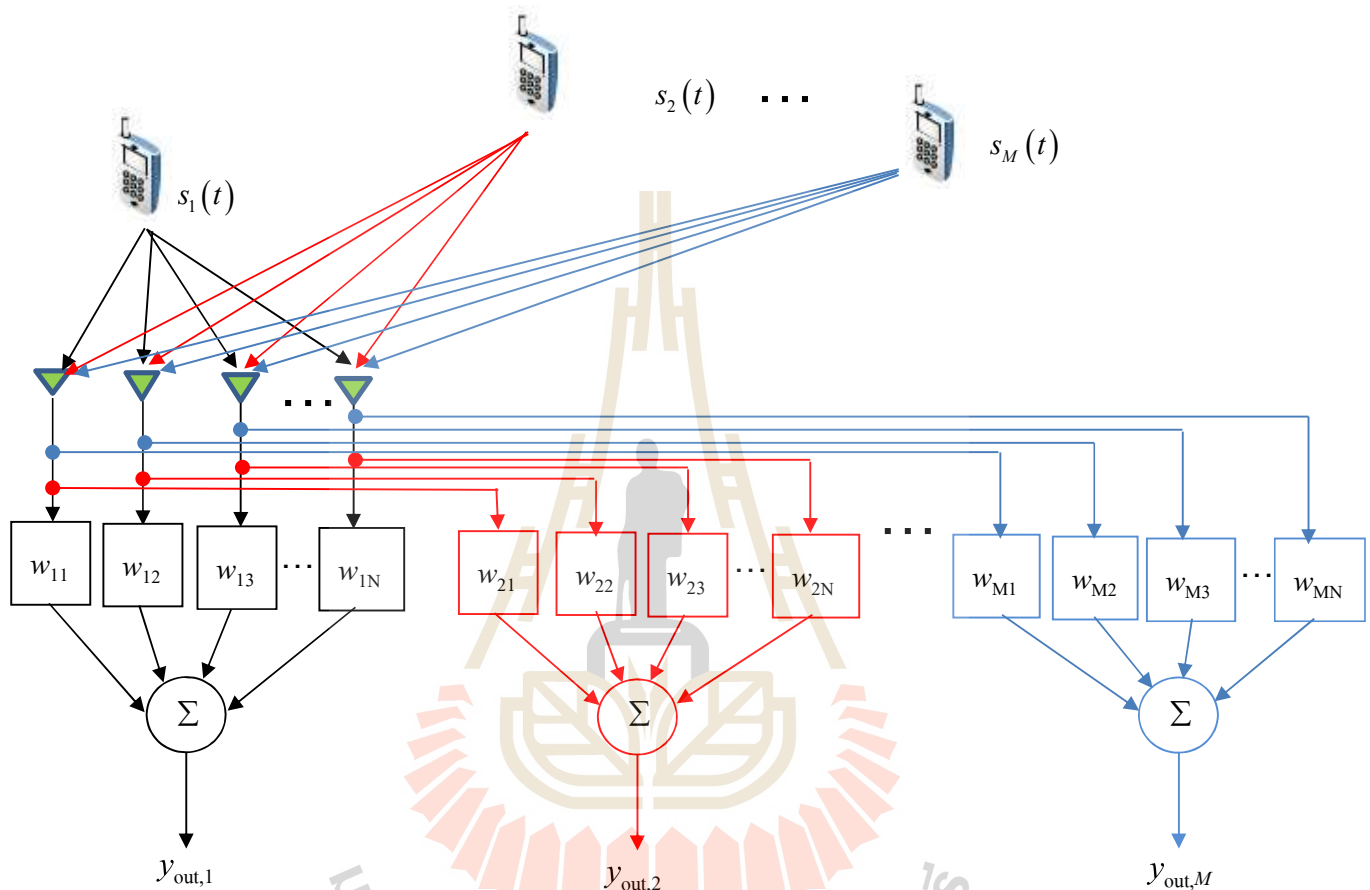
$$w_N = \frac{1 - w_1 - w_2 e^{-j2kd \cos \theta} - w_3 e^{-j3kd \cos \theta} - \dots - w_{N-1} e^{-j(N-1)kd \cos \theta}}{e^{-jNkd \cos \theta}} \quad (3.11)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศในแต่ละต้นที่ได้มานั้น จะนำไปแทนในสมการ (3.1) เพื่อให้ได้สัญญาณขาออกตามทิศทางของผู้ใช้งานนั้น เราก็จะสามารถก่อรูปลำคลื่นที่ลำคลื่นหลักหันไปยังผู้ใช้งานที่ต้องการได้ ในส่วนนี้เป็นส่วนของทิศทางของผู้ใช้งานเพียง 1 คนเท่านั้น ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงหลักการและกระบวนการก่อรูปลำคลื่นไปยัง  $M$  ผู้ใช้งาน

### 3.2.2 แบบหลายผู้ใช้งาน

เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม ถ้านำมาใช้ในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งานมีข้อจำกัดคือ เมื่อมีผู้ใช้หลายคนพร้อมกัน ลำคลื่นของสถานีฐานจะส่งไปยังผู้ใช้งานในแต่ละคนพร้อมกันที่ความถี่เดียวกัน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ผู้ใช้แต่ละคนจะมีสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณแทรกสอดจากลำคลื่นของผู้ใช้ข้างเคียง ซึ่งเป็นสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานคนอื่นที่ความถี่เดียวกัน ส่งผลให้ได้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดต่ำ ส่งผลให้วิสัยสามารถต่ำไปด้วย ซึ่งปัญหานี้ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นเราจึงได้เสนอการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก คือลำคลื่นหลักจะหันไปยังทิศทางของผู้ใช้งานแต่ละคนโดยเฉพาะและจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้ในทิศทางอื่นๆ ซึ่ง

เป็นวิธีการที่ทำให้มีค่าอัตราส่วนต่อสัญญาณแทรกสอดสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลสูงและค่า  
 วิสัยสามารถสูงขึ้นตามไปด้วย โดยกระบวนการเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 การก่อรูปลำคลื่นเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการจาก  $M$  ผู้ใช้งาน

จากรูปที่ 3.2 แสดงการก่อรูปลำคลื่นเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการจาก  $M$  ผู้ใช้งาน ซึ่งจะแตกต่าง  
 จากระบบแบบ 1 ผู้ใช้งาน เพราะจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น ตาม  
 จำนวนของผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ระบบจึงต้องก่อรูปลำคลื่นไป  $M$  ทิศทาง ตามที่ผู้ใช้งานอยู่ และยังคงใช้  
 สายอากาศ  $N$  ต้น จะได้สัญญาณขาออกของ  $M$  ผู้ใช้งาน คือ

$$y_{out,m} = \sum_{i=1}^N (w_{mi} y_i) \quad (3.12)$$

เมื่อ  $y_{out,m}$  คือ สัญญาณขาออกของแต่ละผู้ใช้งาน  $w_{mi}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนักของผู้ใช้คนที่  $m$  ของสายอากาศต้นที่  $i$  และ  $y_i$  คือสัญญาณที่มาจากกระบอกที่สายอากาศแต่ละต้น

ตามทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับในบทที่ 2 จะได้ว่าสัญญาณที่มาจากกระบอกที่สายอากาศแต่ละต้น เป็นดังนี้

$$y_i(t) = \sum_{m=1}^M e^{-j(kd \cos \theta_m)(i-1)} s_m(t) + n_i(t) \quad (3.13)$$

เมื่อ  $M$  คือ จำนวนของผู้ใช้งานในระบบ  $s_m(t)$  คือข้อมูลของผู้ใช้งาน  $\theta_m$  คือทิศทางของผู้ใช้งานในแนวระนาบของแต่ละผู้ใช้งาน และ  $n_i(t)$  คือสัญญาณรบกวนที่มาจากกระบอกที่สายอากาศแต่ละต้น

ตัวอย่าง สัญญาณขาออกของผู้ใช้คนที่ 1 คือ

$$y_{out,1}(t) = w_{11}y_1 + w_{12}y_2 + w_{13}y_3 + \dots + w_{1N}y_N \quad (3.14)$$

ตั้งให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$y_{out,1}(t) = [w_{11} \ w_{12} \ w_{13} \ \dots \ w_{1N}] \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ดังนั้นสัญญาณขาออกของ  $M$  ผู้ใช้งาน ได้แก่

$$\begin{bmatrix} y_{out,1} \\ y_{out,2} \\ y_{out,3} \\ \vdots \\ y_{out,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \dots & w_{2N} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & \dots & w_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & w_{M2} & w_{M3} & \dots & w_{MN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

จากสมการ (3.13) กำหนดให้สัญญาณที่มาตกกระทบกับสายอากาศในแต่ละต้น อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j(kd \cos \theta_1)(1-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(1-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(1-1)} \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(2-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(2-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(1-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(N-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(N-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

ดังนั้น เราสามารถจัดรูปของสมการใหม่ให้ดูง่ายขึ้นในรูปของตัวแปร ดังนี้

$$\mathbf{Y} = \mathbf{WAS} + \mathbf{n} \quad (3.18)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{out,1} \\ y_{out,2} \\ y_{out,3} \\ \vdots \\ y_{out,M} \end{bmatrix}$$

คือเมตริกซ์ของสัญญาณขาออกทั้งหมด  $M$  ผู้ใช้งาน

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \dots & w_{2N} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & \dots & w_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & w_{M2} & w_{M3} & \dots & w_{MN} \end{bmatrix}$$

คือเมตริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศในแต่ละต้นและแต่ละผู้ใช้งาน

$$A = \begin{bmatrix} e^{-j(kd \cos \theta_1)(1-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(1-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(1-1)} \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(2-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(2-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(1-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(N-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(N-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(N-1)} \end{bmatrix}$$

คือเมตริกซ์บังคับทิศทาง (steering vector) โดย  $\theta_M$  เป็นทิศทางของผู้ใช้งานในแนวระนาบของผู้ใช้แต่ละคน

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix}$$

คือเมตริกซ์ของสัญญาณรบกวนมาตกกระทบกับสายอากาศ  $N$  ต้น

จากสมการ (3.18) ย้ายข้างเมตริกซ์สัญญาณรบกวน ดังนี้

$$\mathbf{Y} - \mathbf{n} = \mathbf{W}\mathbf{S} \quad (3.19)$$

เปลี่ยนตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{W}\mathbf{S} \quad (3.20)$$

เมื่อ  $\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \mathbf{n}$

เราต้องการให้ผู้รับได้รับสัญญาณที่ต้องการเท่านั้น กล่าวคือ

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{S} \quad (3.21)$$

ดังนั้นเมตริกซ์  $\mathbf{W}$  คูณกับเมตริกซ์  $\mathbf{A}$  จะต้องมีค่าเท่ากับ 1 เพื่อนำไปคูณกับเมตริกซ์  $\mathbf{S}$  ก็จะได้สัญญาณ  $\mathbf{S}$  ออกมาเท่านั้น การที่เมตริกซ์จะสามารถคูณกันแล้วได้เท่ากับ 1 นั้นจะต้องมีความสัมพันธ์ที่เป็นเมตริกซ์ผกผันของกันและกัน แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศในแต่ละต้นและแต่ละผู้ใช้งานจะเป็นเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์บังคับทิศทาง ดังนี้

$$W = A^{-1} \quad (3.22)$$

ดังนั้นสัญญาณที่จะส่งออกไปยังผู้ใช้งาน กล่าวคือ

$$\hat{Y} = AA^{-1}S \quad (3.23)$$

เมื่อ เวกเตอร์  $A$  คูณกับเมตริกซ์ผกผันของ  $A$  จะทำให้ เมตริกซ์เอกลักษณ์  $I$  ดังนี้

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_M \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

โดยความสัมพันธ์ในลักษณะนี้ ในเชิงพีชคณิตนั้นการที่เมตริกซ์  $A$  เป็นเมตริกซ์ที่สามารถหาเมตริกซ์ผกผันได้ หรือเรียกชื่อว่า เมตริกซ์ที่ไม่ใช่เมตริกซ์เอกฐาน (non-singular matrix) แล้วเรียก  $A$  ว่าเป็นเมตริกซ์เชิงตั้งฉาก (orthogonal matrix) ก็ต่อเมื่อ  $A$  คูณกับเมตริกซ์ผกผันของ  $A$  จะทำให้เมตริกซ์เอกลักษณ์  $I$  ดังนั้นเราสามารถเรียกกระบวนการก่อรูปลำคลื่นที่ได้นำเสนอนี้ว่า การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก

ดังนั้น จากสมการ (3.24) สัญญาณสุดท้ายที่ได้คือ

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_M \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ดังนั้น เราจึงต้องสังเคราะห์  $W$  เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศในแต่ละต้นและแต่ละผู้ใช้งาน เพื่อให้การก่อรูปลำคลื่นหันไปยังผู้ใช้งานโดยตรงและให้ทิศทางอื่นนั้นมีการรบกวนที่ต่ำลง โดยจะต้องเป็นเมตริกซ์ผกผันของ  $A$  โดย  $A$  เป็นเวกเตอร์บังคับทิศทางซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันของมุมต่างๆ ที่ทราบจากทิศทางของผู้ใช้งาน

$$A = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M, N) \quad (3.26)$$

การที่เราจะรู้เมตริกซ์  $A$  จะต้องใช้การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ เพื่อให้ทราบทิศทางของผู้ใช้งานแต่ละคน เมื่อทราบทิศทางของผู้ใช้งานแต่ละคนแล้วนั้น ก็นำทิศทางที่ได้จากการประมาณทิศทางการมาถึงมาใส่ในสมการของเมตริกซ์  $A$  ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} e^{-j(kd \cos \theta_1)(1-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(1-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(1-1)} \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(2-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(2-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(2-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(N-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(N-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

เมื่อทราบเมตริกซ์  $A$  แล้วจากนั้นทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อหาเมตริกซ์  $W$  ซึ่งก็คือเมตริกซ์ผกผันของ  $A$  หรือ  $A^{-1}$  ออกมาแล้วนำเมตริกซ์  $W$  โดยเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศในแต่ละต้นและแต่ละผู้ใช้งาน นำไปแทนในสมการ (3.18) ที่เป็นสมการของสัญญาณขาออก ระบบการก่อรูปลำคลื่นก็จะได้ระบบการประมวลผลในการหันลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้งานและหันลำคลื่นทิศทางอื่นไปยังผู้ใช้งานคนอื่นๆน้อยลง เมื่อได้ความสัมพันธ์ของกระบวนการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากแล้ว ในบทที่ 4 เราจะนำสมการที่เรานำเสนอนี้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ เพื่อดูว่าระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก สามารถช่วยลดสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานคนอื่นที่เวลาและความถี่เดียวกันได้



รูปที่ 3.3 ภาพการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบตัวต้นแบบ

ในการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ ผู้วิจัยใช้สายอากาศชนิดโมโนโพลจำนวน 4 ต้นวางแบบแถว ลำดับเชิงเส้นที่มีระยะห่างเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น และใช้คอมพิวเตอร์แบบพกพาจำนวน 2 ตัวเพื่อนำมาเป็นตัวส่งสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอด การทดสอบกระทำในห้องปฏิบัติการปิดที่มีผนังครบทั้งสี่ด้าน และมีสิ่งกีดขวางเช่น โต้ะ และฉากกัน เพื่อให้เกิดสภาวะการแทรกสอดอย่างรุนแรง ที่จะทำให้เห็นประสิทธิภาพของตัวต้นแบบอย่างแท้จริง

### 3.3 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้แสดงแนวคิดและกระบวนการการออกแบบเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก โดยอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ เราออกแบบเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวถ่วงน้ำหนักที่ปรับให้เหมาะกับการนำไปใช้ในระบบแบบหลายผู้ใช้งาน โดยเราจะทราบแอมพลิจูดของสัญญาณที่ทิศทางจากการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ แล้วนำมาหาเมตริกซ์ผกผันที่ทำให้สมการมีความสัมพันธ์แบบตั้งฉาก เพื่อต้องการให้ทิศทางของลำคลื่นหลักหันไปยังทิศทางของผู้ใช้งานแต่ละคนและลำคลื่นข้างเคียงจะต้องแทรกสอดทิศทางของผู้ใช้งานคนอื่นต่ำลง สำหรับข้อดีอีกหนึ่งอย่างที่สำคัญคือปราศจากการป้อนข้อมูลและช่องสัญญาณย้อนกลับ เมื่อได้สมการที่เป็นความสัมพันธ์นี้แล้ว เราจะนำไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นที่ได้ ออกแบบ โดยจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป



## บทที่ 4

# ผลการจำลองแบบการก่อรูปแบบตั้งฉากโดยอาศัยทิศทางการมาถึงของ สัญญาณ ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ

### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้แสดงผลการจำลองแบบที่ได้จำลองการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งการจำลองแบบเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนที่หนึ่งนำการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากมาเปรียบเทียบกับการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เพื่อดูประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งาน โดยดูจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดของผู้ใช้งานแต่ละคนที่เวลาและความถี่เดียวกัน พร้อมทั้งดูลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นที่หันไปยังผู้ใช้งานในแต่ละคน ในส่วนที่สองจำลองสถานการณ์การประมาณทิศทางการมาถึงที่ผู้ใช้งานอยู่ โดยเปรียบเทียบวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงแบบต่างๆ ที่กล่าวไปในบทที่ 2 เพื่อดูวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงที่เหมาะสมกับการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก และในส่วนที่สามเป็นกรณีศึกษาที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบบนมาตรฐานการสื่อสารไร้สาย IEEE802.11ac เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนามาเป็นระบบการสื่อสารแบบหลายผู้ใช้งานและได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากและเทคนิคโมโม โดยดูจากอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่ระยะทางต่างๆ และค่าวิสัยสมารถที่แต่ละระยะทางมาเปรียบเทียบกัน

### 4.2 การจำลองแบบการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากและแบบดั้งเดิม

ในบทที่ 3 เราได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากนั้นอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ เพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนักของสายอากาศในแต่ละต้น โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองในส่วนนี้แสดงในตารางที่ 4.1 จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์ลงไปเมตริกซ์  $A$  แล้วหาเมตริกซ์ผกผันของ  $A$  เพื่อให้ได้สมการเมตริกซ์ของค่าสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนักของสายอากาศ จากนั้นจะสมมติว่าทราบทิศทางการมาถึงของสัญญาณจากผู้ใช้ในแต่ละคนแล้ว กล่าวคือแทนค่าทิศทางของผู้ใช้งานในแนวระนาบ  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  ลงไปในสมการ (4.4)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมและแบบตั้งฉาก

จำนวนสายอากาศที่สถานีฐาน	4
จำนวนสายอากาศที่ผู้ใช้	1
จำนวนผู้ใช้งาน	4
ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น	$\lambda / 2$
ความถี่ที่ใช้งาน	2.4 GHz
เลขคลื่น	$2\pi / \lambda$

จากบทที่ 3 สัญญาณขาออก คือ

$$Y = WAS + n \quad (4.1)$$

จากเมตริกซ์  $A$  ในบทที่ 3 คือ

$$A = \begin{bmatrix} e^{-j(kd \cos \theta_1)(1-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(1-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(1-1)} \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(2-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(2-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(2-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(kd \cos \theta_1)(N-1)} & e^{-j(kd \cos \theta_2)(N-1)} & \dots & e^{-j(kd \cos \theta_M)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

แทนค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.1 ในสมการ (4.2) จะได้ว่า

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_1} & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_2} & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_3} & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_4} \\ e^{-j2\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_1} & e^{-j2\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_2} & e^{-j2\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_3} & e^{-j2\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_4} \\ e^{-j3\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_1} & e^{-j3\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_2} & e^{-j3\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_3} & e^{-j3\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \cos \theta_4} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ e^{-j\pi \cos \theta_1} & e^{-j\pi \cos \theta_2} & e^{-j\pi \cos \theta_3} & e^{-j\pi \cos \theta_4} \\ e^{-j2\pi \cos \theta_1} & e^{-j2\pi \cos \theta_2} & e^{-j2\pi \cos \theta_3} & e^{-j2\pi \cos \theta_4} \\ e^{-j3\pi \cos \theta_1} & e^{-j3\pi \cos \theta_2} & e^{-j3\pi \cos \theta_3} & e^{-j3\pi \cos \theta_4} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

และสามารถหาเมตริกซ์  $W$  จาก

$$W = A^{-1} \quad (4.5)$$

จากนั้นใช้โปรแกรมแมทแลบช่วยในการหาสมการเมตริกซ์ผกผัน เมตริกซ์  $W$  จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันตัวแปร  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  โดยเมตริกซ์ผกผันที่ได้แสดงในภาคผนวก ก จากนั้นนำไปแทนในสมการ (4.1) เพื่อให้ได้ค่าสัญญาณขาออกที่จะนำไปใช้ในการก่อรูปลำคลื่น จะได้ว่า

$$Y = A^{-1}AS + n \quad (4.6)$$

เมื่อเวกเตอร์  $A$  คูณกับเมตริกซ์ผกผันของ  $A$  จะได้

$$Y = S + n \quad (4.7)$$

การจำลองแบบในส่วนนี้ แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

**กรณีที่ 1.** ผู้ใช้งานแต่ละคนอยู่ห่างกันเป็นมุมระยะห่างเท่าๆ กัน

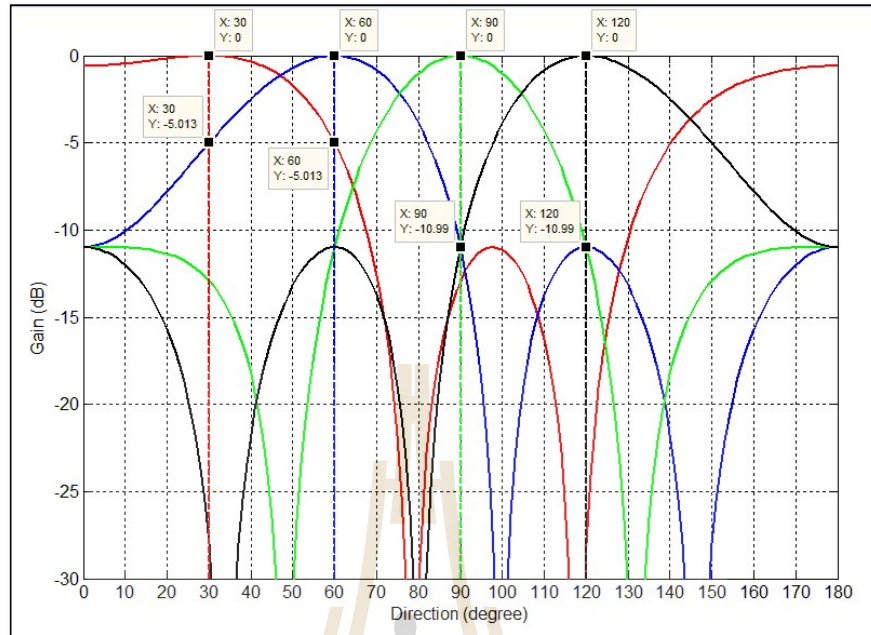
ในการจำลองแบบทำการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน โดยกำหนดให้ระยะทางที่สุ่มมานั้นมีระยะห่างของแต่ละคนห่างเท่าๆ กัน ในการดูประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นนี้จะดูจากค่าพารามิเตอร์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (SIR) ในแต่ละทิศทาง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$SIR (dB) = \text{สัญญาณที่ผู้ใช้ต้องการ (dB)} - \text{สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานอื่น (dB)} \quad (4.8)$$

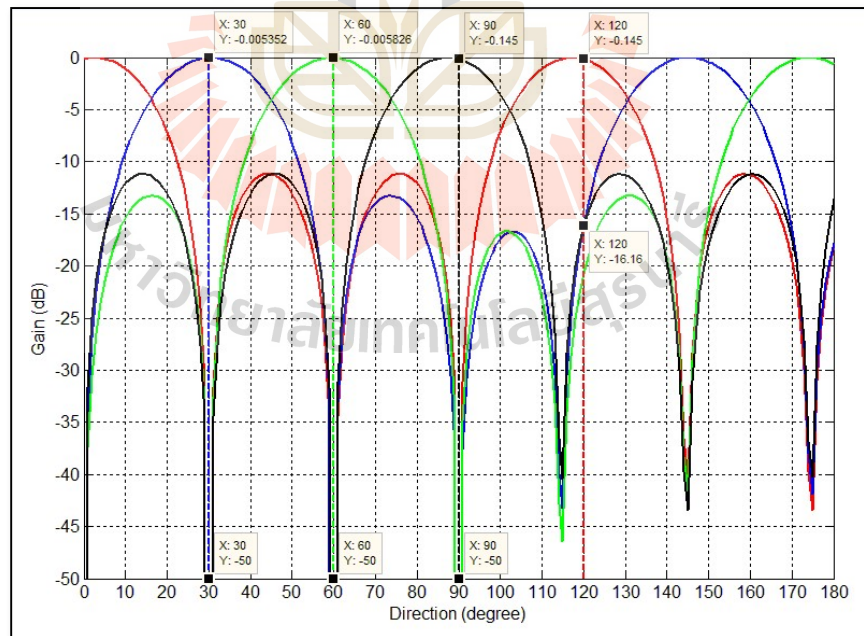
**ผลการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ มีดังต่อไปนี้**

โดยการจำลองแบบจะสุ่มมาสองครั้ง ที่ระยะห่างของมุมที่ต่างกัน เพื่อให้มั่นใจว่าใช้ได้ในทุกๆกรณี จากการสุ่มได้ทิศทางดังนี้

**แบบ ก.** ทิศทาง 30 60 90 และ 120 องศา โดยกรณีนี้ผู้ใช้แต่ละคนอยู่ห่างเท่าๆกัน เป็นระยะ 30 องศา



รูปที่ 4.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 30 60 90 และ 120 องศา



รูปที่ 4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 30 60 90 และ 120 องศา

เมื่อได้แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นทั้ง 2 แบบแล้ว จากนั้นนำมาแทนค่าหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในสมการ (4.8) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดแสดงในตารางที่ 4.2 ยกตัวอย่างการคำนวณที่ทิศทางผู้ใช้งานอยู่ที่ 60 องศา จะสังเกตว่ารูปที่ 4.1 การก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมทิศทาง 60 องศาสูงสุดจะอยู่ที่ 0 dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นยังคงมีลำคลื่นสีแดงมาแทรกสอดที่ทิศทางเดียวกันมีค่ากำลังงาน  $-5.013$  dB ดังนั้น

$$SIR = 0 \text{ dB} - (-5.013 \text{ dB}) = 5.013 \text{ dB}$$

รูปที่ 4.2 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากทิศทาง 60 องศาสูงสุดจะอยู่ที่  $-0.005826$  dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นที่ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าระบบสามารถลดสัญญาณแทรกสอดลงมีค่ากำลังงาน  $-50$  dB จะได้

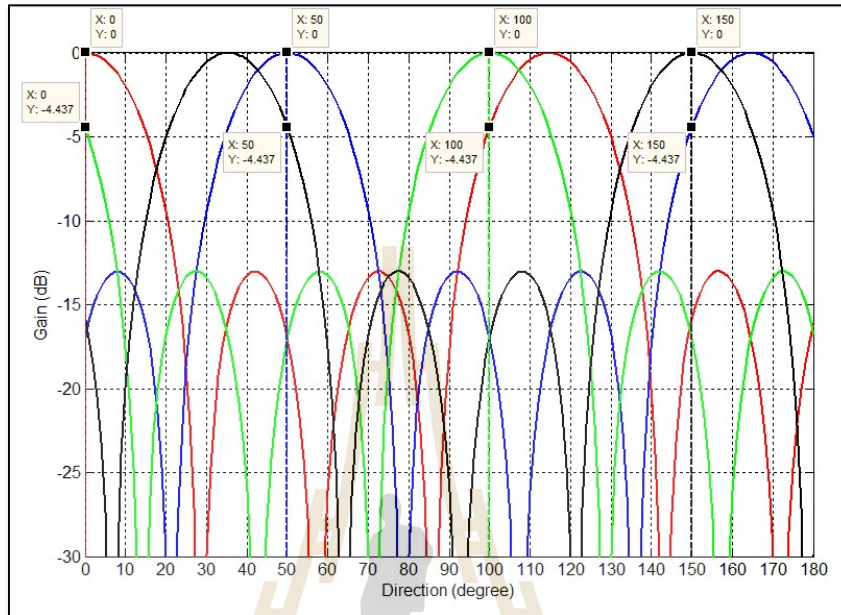
$$SIR = -0.005826 \text{ dB} - (-50 \text{ dB}) = 49.9942 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางสำหรับกรณีที่ 1 แบบ ก.

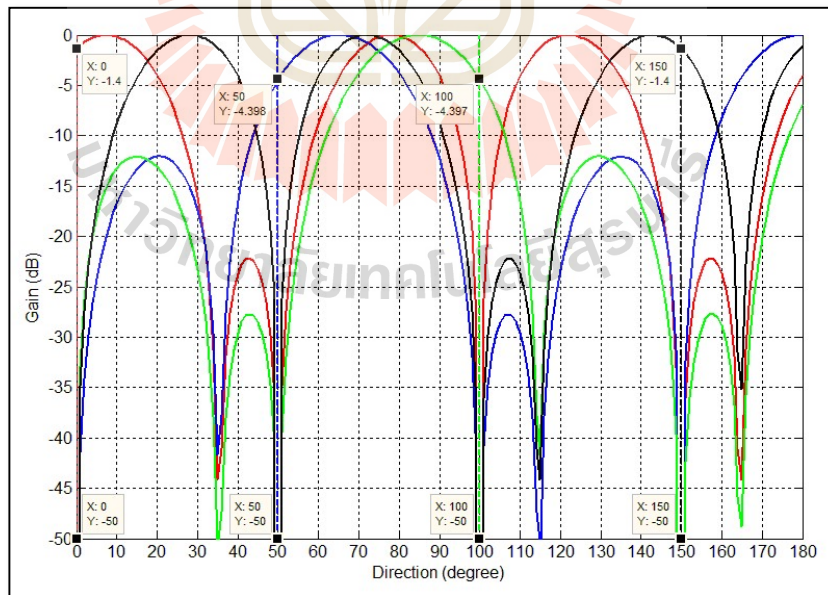
ทิศทางผู้ใช้งาน (องศา)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบดั้งเดิม (dB)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบตั้งฉาก (dB)
30	5.013	49.9945
60	5.013	49.9942
90	10.99	49.855
120	10.99	16.035

จากผลการจำลองในส่วนนี้ พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากในทิศทางผู้ใช้งานอื่นจะพบว่า ระบบจะก่อรูปลำคลื่นให้มีค่ากำลังงานต่ำสุดเพื่อไม่ให้รบกวนผู้ใช้งานอื่นๆ ในขณะเดียวกันการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมจะก่อรูปลำคลื่นโดยเน้นที่ผู้ใช้งานหลักมีกำลังงานสูงที่สุด แต่ไม่ได้ลดสัญญาณรบกวนข้างเคียง จึงส่งผลให้การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม

แบบ ข. ทิศทาง 0 50 100 และ 150 องศา โดยกรณีนี้ผู้ใช้แต่ละคนอยู่ห่างเท่าๆกัน เป็นระยะ 50 องศา



รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 50 100 และ 150 องศา



รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 50 100 และ 150 องศา

เมื่อได้แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นทั้ง 2 แบบแล้ว จากนั้นนำมาหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ในสมการ (4.8) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดแสดงในตารางที่ 4.3 ยกตัวอย่างการคำนวณที่ทิศทางผู้ใช้งานอยู่ที่ 150 องศา สังเกตว่ารูปที่ 4.3 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากทิศทาง 150 องศาสูงสุดจะอยู่ที่ 0 dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นยังคงมีลำคลื่นสีน้ำเงินมาแทรกสอดที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่ากำลังงาน -4.437 จะได้

$$SIR = 0 \text{ dB} - (-4.437 \text{ dB}) = 4.437 \text{ dB}$$

รูปที่ 4.4 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากทิศทาง 150 องศาสูงสุดจะอยู่ที่ -1.4 dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นที่ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าระบบสามารถลดสัญญาณแทรกสอดลงมีค่ากำลังงาน -50 dB จะได้

$$SIR = -1.4 \text{ dB} - (-50 \text{ dB}) = 48.6 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางกรณี 1 แบบ ข.

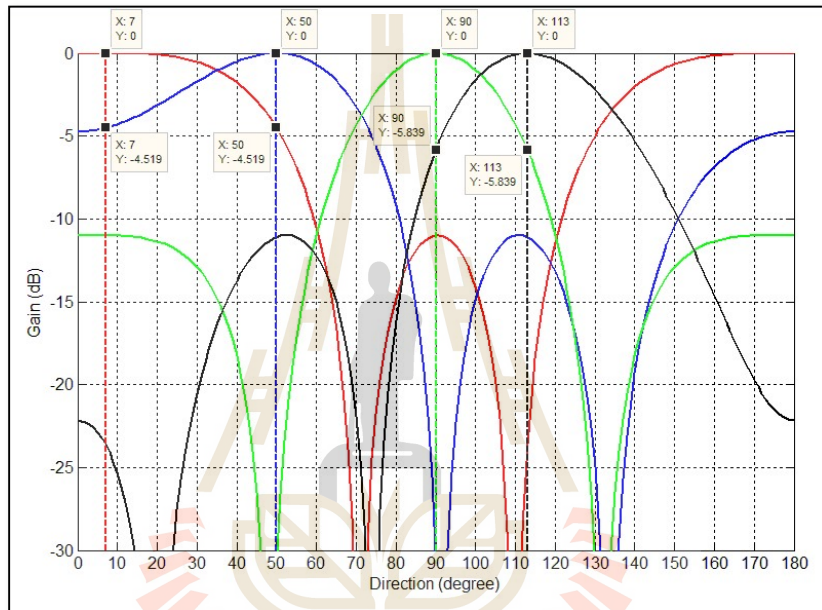
ทิศทางผู้ใช้งาน (องศา)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบตั้งฉาก (dB)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบตั้งฉาก (dB)
0	4.437	48.6
50	4.437	45.602
100	4.437	45.603
150	4.437	48.6

จากผลการจำลองในส่วนนี้ สุ่มที่ระยะห่างของมุมมากขึ้น ยังคงพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากให้ผลที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากเช่นเดียวกันกับกรณี 1 แบบ ก.

## กรณีที่ 2. ผู้ใช้งานแต่ละคนอยู่ห่างกันเป็นมุมระยะห่างไม่เท่ากัน

เนื่องจากในการใช้งานจริง จะไม่สามารถระบุให้ผู้ใช้งานนั้นอยู่ในระยะที่ห่างเท่าๆกันได้ ดังนั้นจึงสุ่มระยะทางของผู้ใช้งานให้ห่างเป็นระยะที่มุมต่างๆ กัน เพื่อดูประสิทธิภาพของการก่อรูปคลื่นในกรณีที่มีมุมแตกต่างกัน โดยการจำลองแบบจะสุ่มมาสองครั้ง ที่ระยะห่างของมุมที่ต่างกัน เพื่อให้มั่นใจว่าใช้ได้ในทุกๆกรณี จากการสุ่มได้ทิศทางดังนี้

**แบบ ก.** ทิศทาง 7 50 90 และ 113 องศา

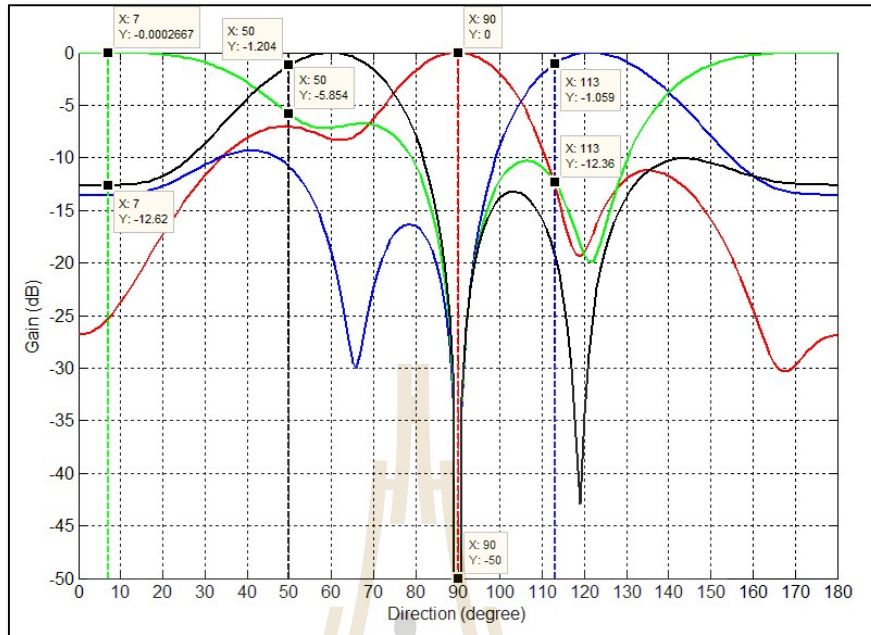


รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 7 50 90 และ 113 องศา

เมื่อได้แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นทั้ง 2 แบบแล้ว จากนั้นนำมาหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ในสมการ (4.8) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดแสดงในตารางที่ 4.4 ยกตัวอย่างการคำนวณที่ทิศทางผู้ใช้งานอยู่ที่ 7 องศา สังเกตว่ารูปที่ 4.5 การก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมทิศทาง 7 องศาสูงสุดจะอยู่ที่ 0 dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นยังคงมีลำคลื่นสีน้ำเงินมาแทรกสอดที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่ากำลังงาน -4.519 dB จะได้

$$SIR = 0 \text{ dB} - (-4.519 \text{ dB}) = 4.519 \text{ dB}$$





รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 7 50 90 และ 113 องศา

รูปที่ 4.6 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากทิศทาง 7 องศาสูงสุดจะอยู่ที่  $-0.0002667$  dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นที่ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าระบบสามารถลดสัญญาณแทรกสอดลงมีค่ากำลังงาน  $-12.62$  dB จะได้

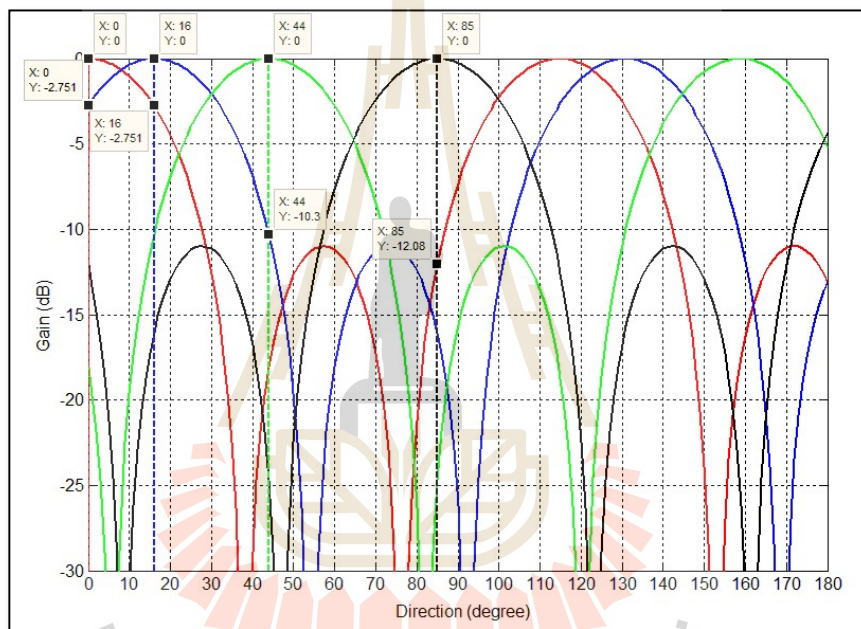
$$SIR = -0.0002667 \text{ dB} - (-12.62 \text{ dB}) = 12.6197 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางกรณีนี้ 2 แบบ ก.

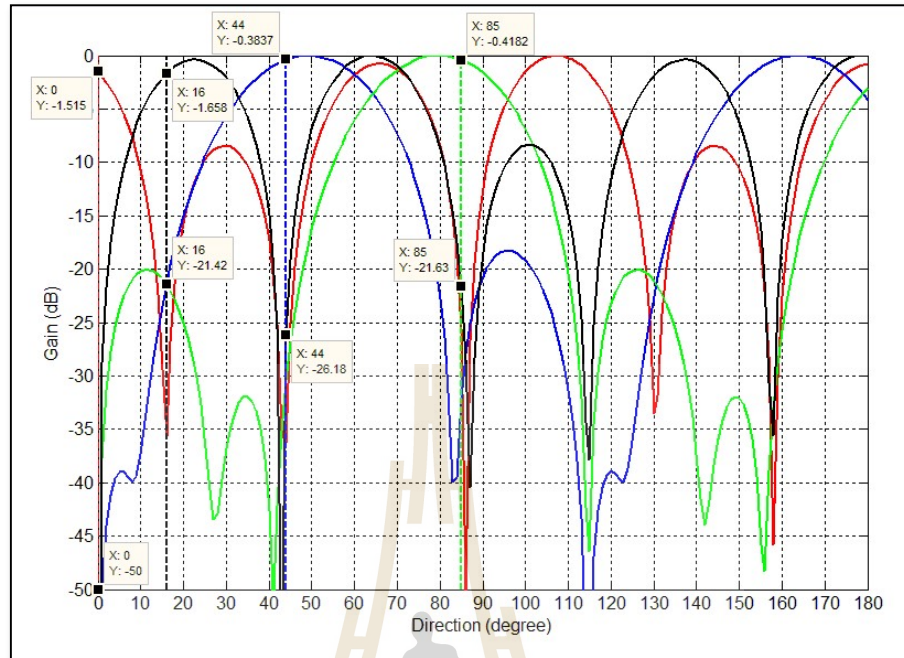
ทิศทางผู้ใช้งาน (องศา)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบตั้งเดิม (dB)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบตั้งฉาก (dB)
7	4.519	12.6197
50	4.519	4.85
90	5.839	50
113	5.839	11.301

จากผลการจำลองในส่วนนี้ พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากในทิศทางผู้ใช้งานอื่นจะพบว่าระบบจะก่อรูปลำคลื่นนี้จะลดสัญญาณแทรกสอดในทิศทางต่างๆ ที่ไม่ใช่ทิศทางหลักให้มีค่าน้อยเพื่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอดน้อย ในขณะที่เดียวกันการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิมจะก่อรูปลำคลื่นโดยเน้นที่ผู้ใช้งานหลักมีกำลังงานสูงที่สุด แต่ไม่ได้ลดสัญญาณรบกวนข้างเคียง จึงส่งผลให้การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดยังคงมีค่าสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิม

แบบ ข. ทิศทาง 0 16 44 และ 85 องศา



รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิม เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 16 44 และ 85 องศา



รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก เมื่อทิศทางของผู้ใช้ 0 16 44 และ 85 องศา

เมื่อได้แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นทั้ง 2 แบบแล้ว จากนั้นนำมาหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ในสมการ (4.8) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดแสดงในตารางที่ 4.5 ยกตัวอย่างการคำนวณที่ทิศทางผู้ใช้งานอยู่ที่ 16 องศา สังเกตว่ารูปที่ 4.7 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิมทิศทาง 16 องศาสูงสุดจะอยู่ที่ 0 dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นยังคงมีลำคลื่นสีแดงมาแทรกสอดที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่ากำลังงาน  $-2.751$  dB จะได้

$$SIR = 0 \text{ dB} - (-2.751 \text{ dB}) = 2.751 \text{ dB}$$

รูปที่ 4.8 การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากทิศทาง 16 องศาสูงสุดจะอยู่ที่  $-1.658$  dB แต่ในทิศทางเดียวกันนั้นที่ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าระบบสามารถลดสัญญาณแทรกสอดลงมีค่ากำลังงาน  $-21.42$  dB จะได้

$$SIR = -1.658 \text{ dB} - (-21.42 \text{ dB}) = 19.762 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางกรณีที่ 2 แบบ ข.

ทิศทางผู้ใช้งาน (องศา)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบดั้งเดิม (dB)	SIR : การก่อรูปลำ คลื่นแบบตั้งฉาก (dB)
0	2.751	48.485
16	2.751	19.762
44	10.3	25.7963
85	12.08	21.2118

จากผลการจำลองในส่วนนี้ ยังคงพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากให้ผลที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม เช่นเดียวกันกับกรณีที่ 2 แบบ ก.

ดังนั้น จากผลการจำลองแบบที่แสดงในรูปที่ 4.1-4.8 และตารางที่ 4.2-4.5 ที่ได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากที่นำเสนอโดยมุมทิศทางของผู้ใช้แบบต่างๆ ที่มีมุมห่างเท่าๆกัน และมุมแตกต่างกันออกไป ผลการจำลองแบบพบว่า การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิมนั้นจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่หันลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้ในทิศทางนั้นๆ โดยสังเกตได้จากค่ากำลังงานสูงสุดในแต่ละผู้ใช้งานจะมีค่าเท่ากับ 0 dB ซึ่งเป็นค่าสูงสุด แต่การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งเดิมนั้นจะไม่สามารถควบคุมลำคลื่นข้างเคียงที่จะมาแทรกสอดได้ จะเห็นว่าลำคลื่นข้างเคียงนั้นมีสัญญาณค่อนข้างสูงแล้วไปแทรกสอดในทิศทางหลักของผู้ใช้งานคนอื่นๆ ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในแต่ละทิศทางมีค่าต่ำ สำหรับการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากนั้นจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่พยายามหันลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้งานพร้อมทั้งปรับลำคลื่นด้านข้างที่จะไปแทรกสอดทิศทางที่ผู้ใช้คนอื่นๆ อยู่ สังเกตได้ว่ากราฟรูปที่ 4.2 4.4 4.6 และ 4.8 นั้นทิศทางแต่ละทิศของผู้ใช้งานแต่ละคน สัญญาณคนอื่นๆ จะพยายามก่อรูปลำคลื่นให้ต่ำที่สุดเพื่อลดปัญหาสัญญาณแทรกสอดที่เวลาและเวลาที่เหมือนกันในขณะใช้งาน โดยเป็นหลักการที่เราให้ทิศทางแต่ละทิศทางพยายามตั้งฉากกันให้สัญญาณแทรกสอดเกิดขึ้นน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด พบว่าให้ค่าที่สูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมมาก เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดมีค่าสูงย่อมส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสามารถรับส่งข้อมูลได้รวดเร็วและยังส่งผลให้ค่าวิสัยสามารถสูงขึ้นอีกด้วย

### 4.3 สถานการณ์มุมต่างๆ ของผู้ใช้งาน โดยอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ

ตามที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 เรื่องการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ กระบวนการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากที่นำเสนอ นั้นจะสามารถก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้งานได้ จะต้องทราบทิศทางของผู้ใช้งานก่อน ซึ่งต้องอาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณที่มีวิธีการต่างๆ มากมาย โดยในตอนนี้จะแบ่งการจำลองแบบเป็น 3 กรณีคือ

1. การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน
2. การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก
3. การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท

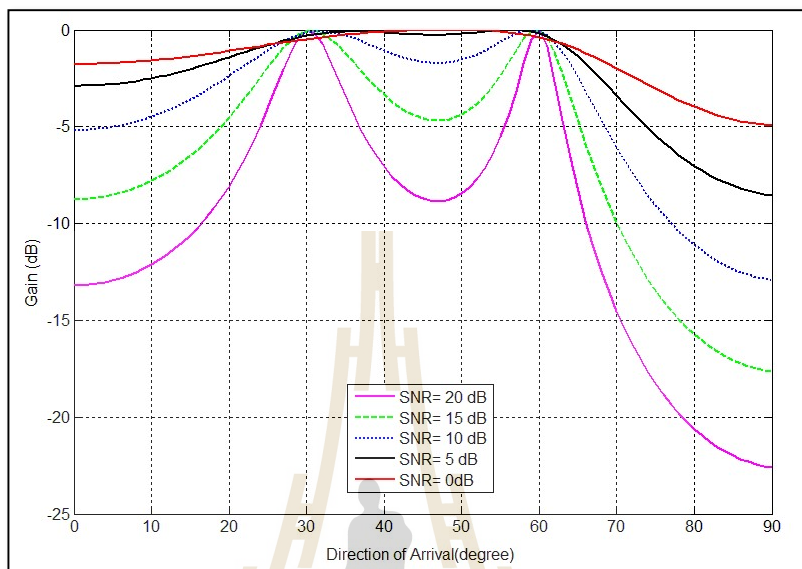
โดยในการจำลองแต่ละกรณีนั้น จะสมมติว่ามีผู้ใช้เข้ามาพร้อมกันใน 2 ทิศทาง แล้วจำลองถึงหากสายอากาศถูกสัญญาณมารบกวนเพิ่มมากขึ้น คืออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยลง เนื่องจากในสภาพแวดล้อมจริงจะไม่สามารถรู้ได้ว่าในระบบนั้นจะเกิดสัญญาณรบกวนมากน้อยเพียงใด จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่เราจะต้องหาวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณที่สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ ดังนั้นจึงพิจารณาว่าวิธีการในกรณีใดของการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณยังสามารถวิเคราะห์และแยกทิศทางของผู้ใช้งานที่ต้องการได้ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

จำนวนสายอากาศ	4
จำนวนผู้ใช้งาน	2
ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น	$\lambda / 2$
ความถี่ที่ใช้งาน	2.4 GHz
เลขคลื่น	$2\pi / \lambda$

**กรณีที่ 1.** การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน จากสมการ (2.48) ในบทที่ 2 สามารถหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้โดยพิจารณาทิศทางในตำแหน่งที่ทำให้สเปกตรัมเชิงตำแหน่งของคาพอนเป็นยอดสูง จากนั้นกำหนดทิศทางของ

สัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.9

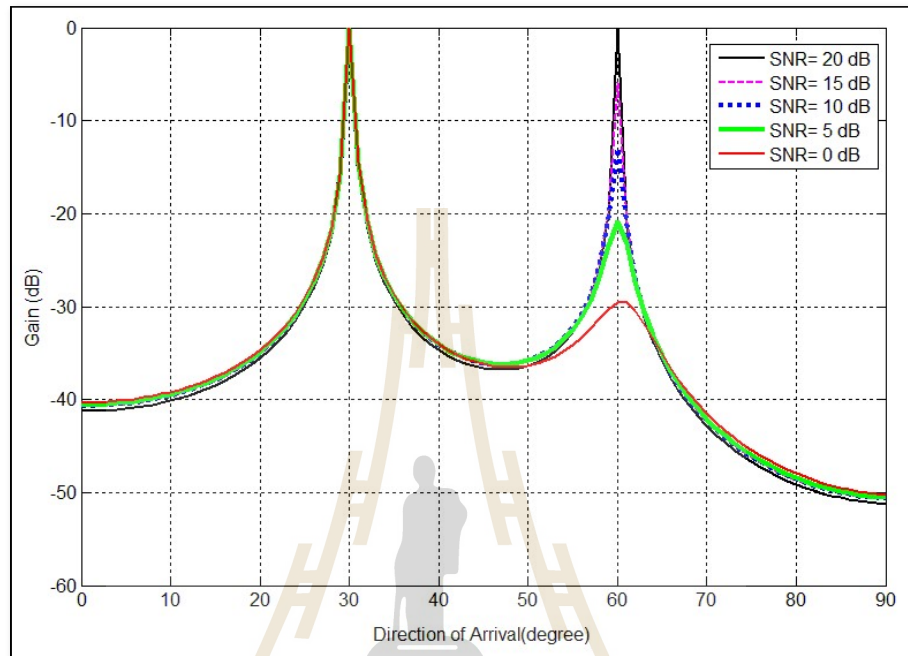


รูปที่ 4.9 การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอน เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB

ผลการจำลองแบบการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดของคาพอนในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อระบบมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยลงส่งผลให้การหาทิศทางของสัญญาณนั้นมีคุณภาพต่ำลงไปด้วย สังเกตเส้นสีดำที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 5 dB การหาทิศทางนั้นเกือบใช้ไม่ได้เลยเนื่องจากไม่สามารถระบุทิศทางที่ผู้ใช้งานอยู่ได้ชัดเจน เช่นจากเดิมผู้ใช้อู่ที่ 30 และ 60 องศา แต่จากกราฟเส้นสีดำระบบอาจจะดูผู้ใช้อู่อยู่ที่ 40 และ 50 องศาได้เนื่องจากระดับของสัญญาณมีค่าสูงเท่ากัน ทำให้แยกทิศทางได้ยาก และโดยเฉพาะเส้นสีแดง กรณีที่สัญญาณรบกวนมีค่ามากเท่ากับสัญญาณที่ส่ง ทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเท่า 0 dB แทบจะระบุค่าสูงสุดไม่ได้เลย เนื่องจากมีค่าสูงสุดหลายจุด ดังนั้นหากนำไปใช้ระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากก็จะผิดพลาดและให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำ

**กรณีที่ 2.** การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก ในการจำลองกรณีนี้สามารถพิจารณาตำแหน่งของสัญญาณที่เข้ามาถึงได้จากสเปกตรัมเชิงตำแหน่งของมิวสิก ตามขั้นตอนในสมการ (2.69) - (2.72) จากนั้นกำหนดทิศทางของสัญญาณเข้า

มาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การประมาณทิศทาง การมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB

วิธีการปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมมิวสิก รูปที่ 4.10 พบว่าที่ทิศทาง 60 องศา นั้น ระบบมีความสามารถในการชี้ทิศทางที่น้อยลงเรื่อยๆ เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยลงและหากน้อยลงจนกระทั่งสัญญาณรบกวนมีขนาดเท่ากับสัญญาณส่งนั้นจะระบุทิศทางของสัญญาณผิดพลาดมากขึ้น

**กรณีที่ 3.** การประมาณทิศทาง การมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท ซึ่งวิธีการหาทิศทางของสัญญาณโดยอาศัยหลักการของปริภูมิย่อยที่เป็นที่นิยมอีกวิธีหนึ่ง ข้อดีของอัลกอริทึมเอสพริท กล่าวคือสามารถลดความซับซ้อนในการประมวลผลเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมมิวสิกและไม่ต้องการใช้เวกเตอร์การหันลำคลื่นเพื่อหมุนหาทิศทางที่ทำให้สเปกตรัมเชิงตำแหน่งมีค่าเป็นจุดยอด ในการจำลองกรณีนี้สามารถพิจารณาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาถึงได้ ตามขั้นตอนในสมการ (2.87) - (2.91) จากนั้นกำหนดทิศทางของสัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่า

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงออกมาเป็นค่าของทิศทางที่ประมาณมาได้ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่ 30 และ 60 องศาและปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 20 15 10 5 และ 0 dB

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (dB)	ทิศทางของผู้ใช้งานที่กำหนด (องศา)	ทิศทางที่ได้ : วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท (องศา)	ทิศทางของผู้ใช้งานที่กำหนด (องศา)	ทิศทางที่ได้ : วิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท (องศา)
20	30	29.9530	60	60.0288
15	30	29.9188	60	60.0528
10	30	29.8625	60	60.0995
5	30	29.7761	60	60.1968
0	30	29.6545	60	60.4277

ตารางที่ 4.7 เป็นผลจำลองจากโปรแกรมแมทแลบที่ใช้วิธีการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริท ซึ่งเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยลง ทิศทางของผู้ใช้งานมีการคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังสามารถระบุทิศทางของผู้ใช้งานได้ถึงแม้ว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะมีค่าเท่า 0 dB ก็ยังสามารถแยกแยะสัญญาณของผู้ใช้งานได้ ซึ่งมีความผิดพลาดมากที่สุดเพียง 0.4277 องศาเท่านั้น

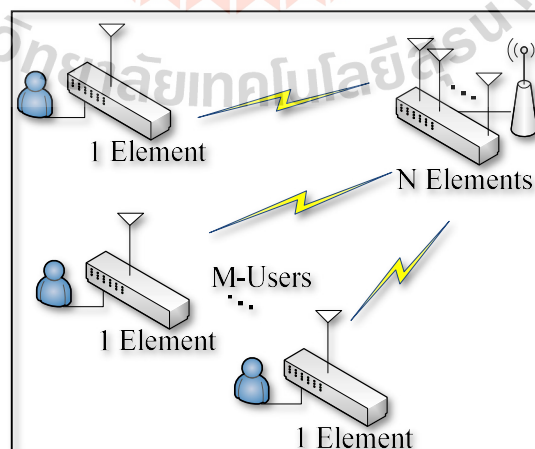
ดังนั้นวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณที่เหมาะสมจะนำมาใช้กับระบบที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำนั้นควรเลือกรูปวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริทที่ให้ค่าความผิดพลาดของทิศทางน้อยที่สุด คือแม่นยำกว่าวิธีการอื่นๆ จากขั้นตอนของวิธีปริภูมิย่อยด้วยอัลกอริทึมเอสพริทที่กล่าวมาในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าสามารถประมาณทิศทางได้จากสมการโดยตรงซึ่งไม่ต้องอาศัยการพิจารณาจากสเปกตรัมเชิงตำแหน่งเหมือนวิธีอื่นๆ ทำให้สามารถลดความซับซ้อนในการประมวลผลเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมมิวสิกและไม่ต้องการใช้เวกเตอร์การหันลำคลื่นเพื่อหมุนหาทิศทางที่ทำให้สเปกตรัมเชิงตำแหน่งมีค่าเป็นจุดยอด นอกจากนี้วิธีเอสพริทยังไม่ต้องการข้อมูลการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับ ซึ่งการปรับเทียบระหว่างสายอากาศจึงไม่จำเป็นในกรณีนี้



#### 4.4 กรณีศึกษา : การก่อรูปลำคลื่นบนมาตรฐานการสื่อสารไร้สาย IEEE802.11ac

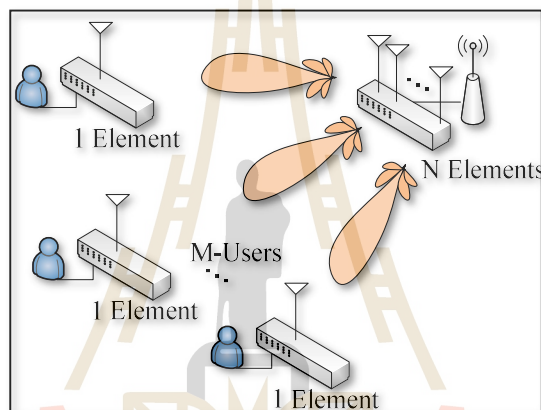
ปัจจุบันมาตรฐานการสื่อสารไร้สาย IEEE 802.11 ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากไม่แพ้ระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ ระบบจึงถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว อนาคตอันใกล้ที่กำลังพัฒนาระบบมาตรฐาน IEEE 802.11ac ที่มีการปรับปรุงเรื่องของการเข้ารหัสใหม่และมีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาใส่ไว้ โดยเฉพาะการรับและการส่งข้อมูลแบบหลายผู้ใช้งาน โดยใช้เทคนิคโมโม จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรม พบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบจากผู้ใช้งานเดียวเป็นระบบหลายผู้ใช้งานบนมาตรฐาน IEEE 802.11n โดยใช้เทคนิคโมโม [42] ดังนั้นเราจึงสนใจที่จะนำเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากที่เราแนะนำเสนอมาใช้ในระบบการสื่อสารของ IEEE 802.11ac เพื่อศึกษาดูประสิทธิภาพของระบบเทียบกับเทคนิคโมโม โดยดูจากค่าอัตราการส่งข้อมูลที่ระยะทางต่างๆและดูค่าวิสัยสมารถที่ระยะทางนั้นๆ โดยในการจำลองแบบนั้น มีแบบจำลองแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งแบ่งเป็นเทคนิคโมโมและเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นตามลำดับ

รูปที่ 4.11 แบบจำลองเทคนิคโมโมในระบบหลายผู้ใช้งาน โดยจะพิจารณากรณีที่ใช้ผู้ใช้งานใช้สายอากาศเพียง 1 ต้น และให้จำนวนผู้ใช้งานรวมในระบบคือ  $M$  ผู้ใช้งาน สำหรับที่สถานีฐานมีจำนวนสายอากาศ  $N$  ต้น วางตัวเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น โดยเทคนิคการส่งข้อมูลแบบโมโม คือการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปมีจำนวนมากกว่าหนึ่งต้นและสร้างกระบวนการให้สายอากาศที่เพิ่มเข้าไปนั้นช่วยกันส่งสัญญาณ โดยสัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศแต่ละต้นฝั่งภาคส่งนั้นจะแยกกันส่งข้อมูล คือข้อมูลที่ส่งไปในสายอากาศแต่ละต้นจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกันเพื่อให้ส่งข้อมูลได้เร็วขึ้นและฝั่งภาครับนั้นจะทำการรวมสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศในแต่ละต้น ในการจำลองนี้กำหนดให้จำนวนของผู้ใช้งานในระบบเท่ากับจำนวนของสายอากาศที่สถานีฐาน ( $M = N$ )



รูปที่ 4.11 แบบจำลองเทคนิคโมโมในระบบหลายผู้ใช้งาน

รูปที่ 4.12 แบบจำลองเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นในระบบหลายผู้ใช้งาน โดยจะพิจารณากรณีที่ผู้ใช้งานใช้สายอากาศเพียง 1 ต้นและให้จำนวนผู้ใช้งานรวมในระบบคือ  $M$  ผู้ใช้งาน สำหรับที่สถานีฐานมีจำนวนสายอากาศ  $N$  ต้น วางตัวเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับเทคนิคโมโม แต่เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นนี้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่สถานีฐานจะช่วยกันก่อรูปลำคลื่นเพื่อส่งข้อมูลออกไปยังผู้ใช้งานแต่ละผู้ใช้งานโดยตรง ซึ่งเป็นข้อมูลชุดเดียวที่ต้องการส่งไม่ได้มีการแยกส่งเหมือนกับเทคนิคโมโม โดยจำนวนการก่อรูปลำคลื่นก็ตามจำนวนของผู้ใช้งานในระบบ ในการจำลองนี้กำหนดให้จำนวนของผู้ใช้งานในระบบเท่ากับจำนวนของสายอากาศที่สถานีฐาน ( $M = N$ )



รูปที่ 4.12 แบบจำลองเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นในระบบหลายผู้ใช้งาน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบแสดงในตารางที่ 4.8 ดังนี้

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

จำนวนสายอากาศที่สถานีฐาน	2
จำนวนสายอากาศที่ผู้ใช้งาน	1
จำนวนผู้ใช้งาน	2
ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น	$\lambda / 2$
ความถี่ที่ใช้งาน	2.4 GHz
เลขคลื่น	$2\pi / \lambda$
การสูญเสียเชิงวิถี(path loss) ที่ 1 เมตร [42]	44.2 dB
เลขชี้กำลังการสูญเสียเชิงวิถี(path loss exponent) [42]	4
กำลังส่งของผู้ใช้งาน [42]	200 mW
สัญญาณรบกวน [42]	-199 dBW/Hz

แบนด์วิธ [42]	20 MHz
payload size [42]	1000 byte

ในการจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากและเทคนิคโมโม โดยมีตารางการมอดูเลชันและรูปแบบการเข้ารหัสของมาตรฐาน IEEE 802.11ac แสดงในตารางงานวิจัย [42] โดยคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของแต่ละผู้ใช้งานเทียบกับระยะทางที่ห่างจากสถานีฐาน ดังนี้

$$SNR = SNR_0 - 44.2 - (10 \times PLe) \log d \quad (4.9)$$

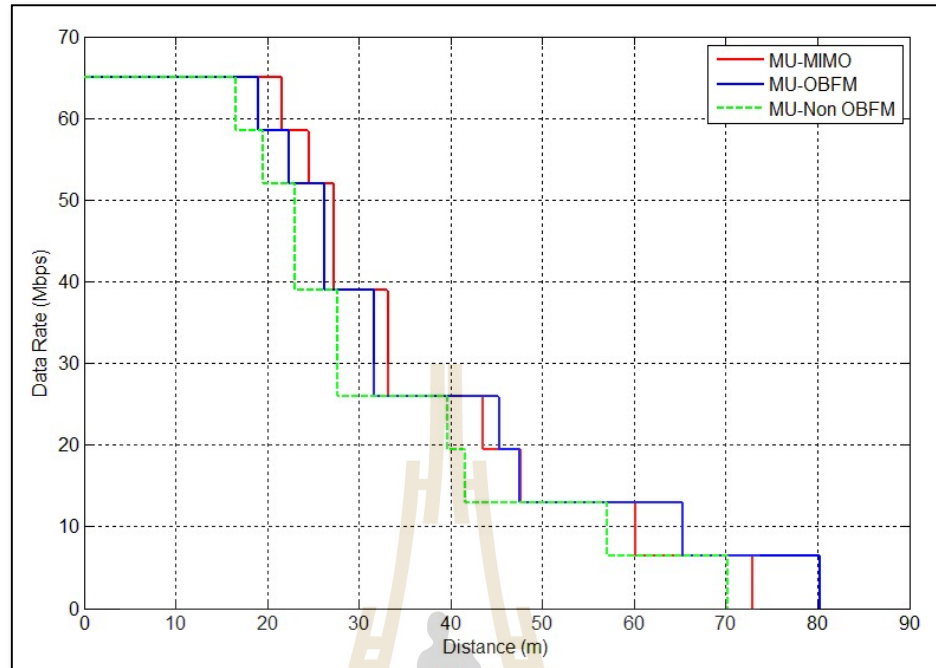
เมื่อ  $PLe$  คือ เลขชี้กำลังการสูญเสียเชิงวิถี (path loss exponent)  $d$  คือระยะห่างระหว่างผู้ใช้งานและสถานีฐาน สมการที่เราใช้ในการจำลองค่าวิสัยสามารถคือ

$$Throughput = \frac{\sum_{m=1}^{user} m \cdot P_r^m \cdot [payload\ size]}{(1 - P_{tr}^{sys}) SlotTime + \sum_{m=1}^{user} P_{tr}^m T_{tr}^m + \sum_{m=2}^N P_{tr}^m T_c^m} \quad (4.10)$$

เมื่อ  $m$  คือจำนวนผู้ใช้งานที่ใช้พร้อมกัน  $payload\ size$  คือขนาดของข้อมูลที่ต้องการส่ง  $P_r^m$  คือความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลพร้อมกันของ  $m$  ผู้ใช้งาน  $P_{tr}^{sys}$  คือความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลของระบบทั้งหมดที่สำเร็จ  $T_{tr}^m$  คือเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของ  $m$  ผู้ใช้งาน  $T_c^m$  คือเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของ  $m$  ผู้ใช้งานที่เกิดการชนกันของข้อมูล  $SlotTime$  คือช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล โดยค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดตามในงานวิจัย [42]

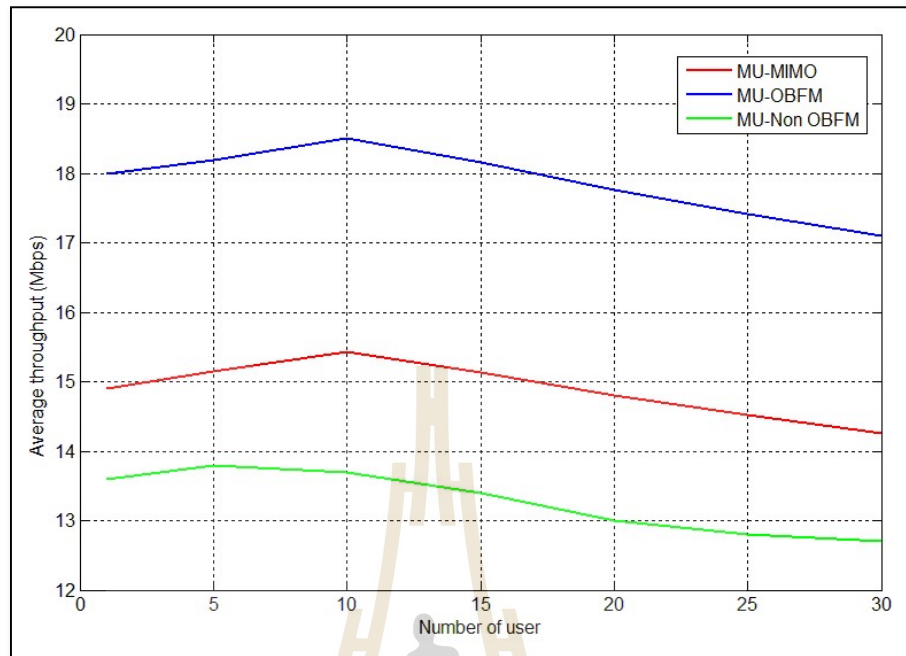
รูปที่ 4.13 แสดงการจำลองแบบโดยดูอัตราการส่งข้อมูลเทียบกับระยะทางสำหรับเทคนิคโมโม เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมและเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากในระบบหลายผู้ใช้งาน เมื่อกำหนดให้มีผู้ใช้งานพร้อมกัน 2 คน จากรูปเส้นสีเขียวคือเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม พบว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมมีระยะทางการใช้งาน ที่ครอบคลุมน้อย และอัตราการส่งข้อมูลก็ต่ำอีกด้วย เมื่อเทียบกับระยะทางเดียวกันกับเทคนิคอื่นๆ เนื่องจากว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมนี้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดต่ำ จึงส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลก็ต่ำและระยะทางที่ครอบคลุมก็น้อยลงไปด้วยเมื่อเทียบกับอีกสองวิธี สำหรับเส้นสีแดงเป็นเทคนิคโมโม โดยพบว่าเทคนิคโมโมในช่วงระยะทาง 0-44 เมตรจะให้อัตราการส่งข้อมูลที่มีค่าสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่น

แบบตั้งฉากที่เป็นเส้นสีน้ำเงิน แต่เมื่อระยะทางไกลขึ้นมากกว่า 44 เมตร การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าและสามารถส่งสัญญาณครอบคลุมได้ไกลกว่าเทคนิคโมโม เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากนั้นมีการวางตัวของสายอากาศแบบแถวลำดับเชิงเส้น ซึ่งสายอากาศแต่ละต้นจะช่วยกันก่อรูปลำคลื่นที่ได้คำนวณตามทิศทางนั้น การช่วยกันก่อรูปลำคลื่นนี้ส่งผลให้ระบบมีอัตราขยายของสายอากาศที่สูงขึ้น เมื่ออัตราขยายสูงขึ้นการส่งข้อมูลจึงได้ระยะทางที่ไกลขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากสามารถครอบคลุมพื้นที่การใช้งานได้ไกลขึ้นถึง 80 เมตร และมีระยะทางที่มากกว่าโมโม พร้อมทั้งมีอัตราการส่งข้อมูลในระยะไกลมากกว่าเทคนิคโมโมอีกด้วย เนื่องจากการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากที่ได้ออกแบบยังคงสัญญาณแทรกสอดจากทิศทางของผู้ใช้คนอื่นๆด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (4.9) เพื่อดูระยะทาง ก็พบว่าระยะทางที่ได้ก็ไกลกว่าการส่งข้อมูลแบบเทคนิคโมโม แต่ถึงอย่างไรก็ตามที่ระยะทางไกลๆ เทคนิคโมโมนั้นมีอัตราการส่งข้อมูลที่มากกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากเนื่องจากว่า ในระยะทางที่ไกลๆ ช่องสัญญาณยังไม่มีผลลดทอนหรือมีสัญญาณที่มารบกวนข้อมูลในการส่งไม่มากนัก อีกทั้งโมโมเป็นการส่งข้อมูลโดยการแยกสัญญาณที่จะส่ง ออกเป็นชุดเท่ากับจำนวนของสายอากาศ เพื่อส่งผ่านสายอากาศในแต่ละต้น เรียกว่าต่างคนต่างส่งนั่นเอง โดยส่งที่ความถี่เดียวกัน ช่วงเวลาเดียวกัน ในที่นี้ใช้สายอากาศจำนวน 2 ต้น ดังนั้นก็จะช่วยเพิ่มความเร็วในการรับส่งได้ประมาณ 2 เท่า เพราะเสมือนกับการส่งสัญญาณผ่านสาย หากมี 2 สาย ความเร็วที่ได้ก็จะเพิ่มเป็น 2 เท่านั่นเอง ดังนั้นเทคนิคโมโมในช่วงระยะทางไกลๆ จึงให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก แต่เมื่อระยะทางไกลขึ้นไปนั้นการลดทอนที่ช่องสัญญาณมีมากขึ้นรวมกับสัญญาณรบกวน ส่งผลให้พลังงานในการส่งข้อมูลของโมโมนั้นต่ำและส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลต่ำที่ระยะทางที่ไกล



รูปที่ 4.13 อัตราการส่งข้อมูลเทียบกับระยะทางสำหรับเทคนิคโมโม เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม (Non OBFM) และเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก (OBFM) ในระบบหลายผู้ใช้งาน เมื่อมีผู้ใช้งานพร้อมกัน 2 คน

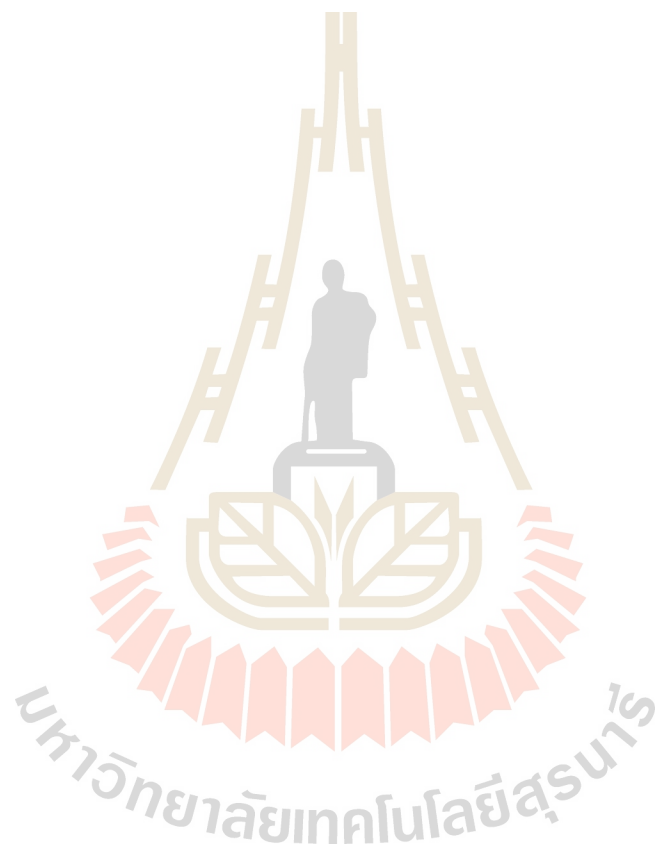
รูปที่ 4.14 แสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะทาง 45 เมตรของเทคนิคโมโม การก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก จากกราฟผลการจำลองแบบ รูปที่ 4.13 ได้ตัดที่ตำแหน่ง 45 เมตร นำอัตราการส่งข้อมูลของแต่ละแบบมาใส่ในการคำนวณเพื่อหาค่าวิสัยสามารถ ในสมการ (4.10) พบว่าที่ระยะทาง 45 เมตรค่าวิสัยสามารถของการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากนั้นมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าแบบโมโมและการก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อกำหนดให้มีจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราการส่งข้อมูลที่นำมาจากระยะทาง 45 เมตร เมื่อจำนวนผู้ใช้งานพร้อมกันเพิ่มขึ้น ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยก็มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจำนวนผู้ใช้งาน 10 ผู้ใช้งาน เป็นช่วงที่ระบบมีค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยสูงสุด จากนั้นเมื่อมีผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยมีค่าลดลง เนื่องจากว่าถ้ามีจำนวนผู้ใช้งานในระบบเกินจะส่งผลให้เวลาในการส่งข้อมูลล่าช้าและมีการชนกันของข้อมูลมากขึ้น ทำให้ค่าวิสัยสามารถที่คำนวณจาก (4.10) นั้นก็มีค่าเฉลี่ยลดลงด้วย



รูปที่ 4.14 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะทาง 45 เมตร ของเทคนิค ไมโม การก่อรูปลำคลื่นแบบดั้งเดิม (Non OBFM) และการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉาก (OBFM) ในระบบหลายผู้ใช้งาน

#### 4.4 กล่าวสรุป

ในบทนี้แสดงผลการจำลองแบบที่ได้จำลองการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากที่ได้นำเสนอไว้ แสดงให้เห็นว่า การก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากเมื่อเปรียบเทียบกับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงขึ้น นอกจากนี้ยังจำลองผลดูวิธีการประมาณทิศทางการมาถึงที่เหมาะสมกับการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากที่ทราบว่าวิธีการของเอสพริทนั้นให้ค่าแม่นยำเมื่อระบบมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำได้ดีกว่าวิธีการอื่นๆ จากนั้นเมื่อนำมาจำลองผลในมาตรฐาน IEEE 802.11ac ยังพบว่าเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากมีพื้นที่ครอบคลุมได้ไกลกว่า มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าที่ระยะทางไกลๆ กว่าเทคนิคไมโม ประเด็นที่สำคัญคือการก่อรูปลำคลื่นแบบตั้งฉากไม่ต้องการป้อนช่องสัญญาณย้อนกลับเหมือนกับเทคนิคไมโม



## บทที่ 5

### บทสรุป

ผู้วิจัยได้ศึกษาการก่อรูปลาคลิ้นแบบตั้งฉากโดยอาศัยทิศทางการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งปราศจากข้อมูลย้อนกลับ ตามที่ได้อธิบายกระบวนการออกแบบไปแล้วในบทที่ 3 และจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบในบทที่ 4 พบว่าสุดท้ายได้แนวคิดที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการก่อรูปลาคลิ้นที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบบการสื่อสารหลายผู้ใช้และไม่มีการป้อนข้อมูลและช่องสัญญาณย้อนกลับ ซึ่งเรียกว่าการก่อรูปลาคลิ้นแบบตั้งฉาก โดยการก่อรูปลาคลิ้นแบบตั้งฉากนั้นต้องสามารถก่อรูปลาคลิ้นหลักไปยังผู้ใช้งานได้พร้อมกันที่ความถี่และที่เวลาเดียวกัน โดยส่วนที่เป็นลาคลิ้นข้างเคียงจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้งานคนอื่น ๆ วิธีการนี้อาศัยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณในแต่ละผู้ใช้งาน เพื่อช่วยทำให้การก่อรูปลาคลิ้นมีลักษณะตั้งฉาก กล่าวคือลาคลิ้นหลักจะหันไปยังทิศทางของผู้ใช้งานแต่ละคนโดยเฉพาะและจะต้องไม่รบกวนผู้ใช้งานในทิศทางอื่นๆ





ภาคผนวก ก

สมการเมตริกซ์  $W$  ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สมการเมตริกซ์  $W$  ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก

$$W = \begin{bmatrix} \frac{-e^{j\pi\theta_2} e^{j\pi\theta_3} e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{e^{j\pi\theta_2} e^{j\pi\theta_3} + e^{j\pi\theta_2} e^{j\pi\theta_4} + e^{j\pi\theta_3} e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{-e^{j\pi\theta_2} + e^{j\pi\theta_3} + e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{1}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})} \\ \frac{e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_3} e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{-e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_3} + e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_4} + e^{j\pi\theta_3} e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{e^{j\pi\theta_1} + e^{j\pi\theta_3} + e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{-1}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_2})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})} \\ \frac{-e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_2} e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_2} + e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_4} + e^{j\pi\theta_2} e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{-e^{j\pi\theta_1} + e^{j\pi\theta_2} + e^{j\pi\theta_4}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{1}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_3})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} \\ \frac{e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_2} e^{j\pi\theta_3}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{-e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_2} + e^{j\pi\theta_1} e^{j\pi\theta_3} + e^{j\pi\theta_2} e^{j\pi\theta_3}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{e^{j\pi\theta_1} + e^{j\pi\theta_2} + e^{j\pi\theta_3}}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} & \frac{-1}{(e^{j\pi\theta_1} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_2} - e^{j\pi\theta_4})(e^{j\pi\theta_3} - e^{j\pi\theta_4})} \end{bmatrix}$$

## รายการอ้างอิง

- [1] Afif Osseiran et al., **“Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project,”** IEEE Communications Magazine, May 2014.
- [2] Shanzhi Chen and Jian Zhao., **“The Requirements, Challenges, and Technologies for 5G of Terrestrial Mobile Telecommunication,”** IEEE Communications Magazine, May 2014.
- [3] Amitava Ghosh et al., **“LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology,”** IEEE Wireless Communications, June 2010.
- [4] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold., **“4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband,”** Academic Press, 2011.
- [5] IEEE., **“IEEE Standard 802.11 Part 1, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S],”** 1997.
- [6] R. Nee, Qualcomm Inc., **“Breaking the Gigabit-per-second barrier with 802.11AC,”** IEEE Wireless Communications, Vol. 18, Issue 2, pp. 4, 2011.
- [7] Daan Pareit et al., **“The History of WiMAX: A Complete Survey of the Evolution in Certification and Standardization for IEEE 802.16 and WiMAX,”** IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14, No. 4.
- [8] Buon Kiong Lau et al., **“Single and Multi-User Cooperative MIMO in a Measured Urban Macrocellular Environment,”** Actions on antennas and propagation, Vol. 60, NO. 2, February 2012.
- [9] Lingjia Liu et al., **“Downlink MIMO in LTE-Advanced: “SU-MIMO vs. MU-MIMO,”** IEEE Communications Magazine, February 2012.
- [10] Hieu Duy Nguyen., **“Multi-Cell Random Beamforming: Achievable Rate and Degrees of Freedom Region,”** IEEE Trans. Signal Processing, July 2013.
- [11] Liangbin Li., **“Maximum-Rate Transmission With Improved Diversity Gain for Interference Networks,”** IEEE Trans. Information Theory, 2013.
- [12] Pei Xiao and Mathini Sellathurai., **“Improved Linear Transmit Processing for Single-User and Multi-User MIMO Communications Systems,”** IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 58, No. 3, March 2010.

- [13] Emil Björnson., **“Receive Combining vs. Multi-Stream Multiplexing in Downlink Systems With Multi-Antenna Users,”** IEEE Trans. Signal Processing, July 2013.
- [14] Nikhil Gupta and Aditya K. Jagannatham., **“Multiuser Successive Maximum Ratio Transmission (MS-MRT) for Video Quality Maximization in Unicast and Broadcast MIMO OFDMA based 4G Wireless Networks,”** IEEE Trans. Vehicular, 2014.
- [15] Peter J. Smith., **“On the Number of Independent Channels in Multi-Antenna Systems,”** IEEE Trans. Wireless Comm, January 2014.
- [16] Rafik Addaci., **“Dual-Band WLAN Multiantenna System and Diversity/MIMO Performance Evaluation,”** IEEE Trans. Antennas, March 2014.
- [17] Mohammad Hassan Shariat., **“Signal-to-noise-ratio maximisation for linear multi-antenna relay communications,”** IET Communications , September 2013.
- [18] Siyoung Choi., **“Optimal Beamforming and Power Allocation for Sensing-Based Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks,”** IEEE Trans. Vehicular, January 2014.
- [19] Janne Ilvonen., **“Design Strategy for 4G Handset Antennas and a Multiband Hybrid Antenna,”** IEEE Trans. Antennas, 2013.
- [20] Redha M. Radaydeh, and Mohamed-Slim Alouini., **“Comparisons of Receive Array Interference Reduction Techniques Under Erroneous Generalized Transmit Beamforming,”** IEEE Trans. On Comm, Vol. 62, No. 2, February 2014.
- [21] B. N. Bharath and Chandra R. Murthy., **“Channel Training Signal Design for Reciprocal Multiple Antenna Systems With Beamforming,”** IEEE Trans. Vehicular, Vol. 62, No. 1, January 2013.
- [22] Vincent K. N. Lau et al., **“Low Complexity Delay-Constrained Beamforming for Multi-User MIMO Systems With Imperfect CSIT,”** IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 61, No. 16, August 15, 2013.
- [23] Sayed Ata Sattarzadeh, Ali Olfat., **“Performance improvement of the PU2RC transmission Schemes,”** IET Commun., 2014, Vol. 8, Iss. 5, pp. 658–670.

- [24] Sayed Ata Sattarzadeh and Ali Olfat., **“Bounds on the Throughput Performance of PU2RC and Its Application in Mode Switching,”** IEEE Trans. Vehicular, Vol. 61, No. 2, February 2012.
- [25] Eunsung Park, Heejin Kim, Haewook Park, and Inkyu Lee., **“Feedback Bit Allocation Schemes for Multi-User Distributed Antenna Systems,”** IEEE Comm Letter, Vol.17, No. 1, January 2013.
- [26] Robert Heath, Steven Peters, Yi Wang and Jiayin Zhang., **“A Current Perspective on Distributed Antenna Systems for the Downlink of Cellular Systems,”** IEEE Communications Magazine, April 2013.
- [27] Ozgur Ozdemir and Murat Torlak., **“Optimum Feedback Quantization in an Opportunistic Beamforming Scheme,”** IEEE Trans. on Wireless Comm, Vol. 9, No. 5, May 2010.
- [28] Hussain, M.A., Suresh Varma, P., Satya Rajesh, K., Pathan, H.B., Sarraju, L.M., **“Use of smart antennas in AD HOC networks.”** Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol., 2010, 2, (6), pp. 48–54.
- [29] Mallaparapu, U., Nalini, K., Ganesh, P., et al.: **“Non-blind adaptive beam forming algorithms for smart antennas,”** IJRRAS, 2011,6, (4), pp. 491–496.
- [30] Sung-Woo Choi, Il-Gyu Kim and Jae-Min Ahn., **“Architecture of Baseband Modem Board for IEEE802.11ad Technology,”** ICTC 2013
- [31] C.A. Balanis (1997)., **“Antenna Theory: Analysis and Design 2nd edition,”** John Wiley & Sons, Inc.
- [32] B.Allen, M. **“Adaptive Array System: Fundamentals and Applications,”** John Wiley & Sons, 2005.
- [33] M. Rivas, **“A Review of Adaptive Beamforming Techniques for Wideband Smart Antennas,”** IEEE WiCOM 2010, pp. 1-5, 23-25 Sept. 2010.
- [34] E. Klumperink., **“Beamforming techniques and RF transceiver design,”** IEEE ISSCC 2012, pp. 198-199, 19-23 Feb, 2012.
- [35] T.W. Nuteson., **“Smart antenna systems for wireless applications,”** IEEE con. Ant and Prop. Society International Symposium, pp.2804-2807, 20-25 June 2004.

- [36] T. Mack, “**A digital mm-wave smart antenna receiver based on six-port technology for near range radar applications,**” Microwave Conference, 2004. 34<sup>th</sup> European, pp. 1481-1484, 14 Oct. 2004.
- [37] Piya Pal and P. P. Vaidyanathan., “**A Grid-Less Approach to Underdetermined Direction of Arrival Estimation Via Low Rank Matrix Denoising,**” IEEE Signal Processing Letters, Vol. 21, No. 6, June 2014.
- [38] Fabiola Colone et al., “**Direction of arrival estimation performance comparison of dual cancelled channels space–time adaptive processing techniques,**” IET Radar Sonar Navig., 2014, Vol. 8, Iss. 1, pp. 17–26.
- [39] Harry L. Van Trees., “**Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory,**” Wiley, New York, 2002.
- [40] S. Haykin., “**Adaptive Filter Theory,**” Prentice Hall, NJ, 1991.
- [41] R.O. Schmidt., “**Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation,**” Proc. Of RADC Spectrum Estimation,” Workshop, Griffiss AFB, NY, pp.243-258 , 1979.
- [42] H. Jin, B. C. Jung, H. Y. Hwang, and D. K. Sung, “**A Tradeoff Between Single-User and Multi-User,**” IEEE Trans, Wireless Communications, vol. 10 no. 10, October 2011.