

การพัฒนาการก่อรูปล้าคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่สำหรับเครือข่ายเฮทเน็ต



นางสาวศิริดา สมอหมอบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**DEVELOPMENT OF FIXED COORDINATED
BEAMFORMING FOR HETNET**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การพัฒนาการก่อรูปล้าคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่สำหรับเครือข่ายเฮทเน็ต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ชาญไชย ไทยเจียม)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิรดา สมอหมอบ : การพัฒนาการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่สำหรับเครือข่ายเฮเทอเจนีด
(DEVELOPMENT OF FIXED COORDINATED BEAMFORMING FOR HETNET)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล, 72 หน้า.

ในยุคปัจจุบันการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile station) มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการโทร การส่งข้อความ รวมทั้งการใช้งานแอปพลิเคชันเพื่อความบันเทิงต่างๆ เช่น เกมออนไลน์ ฟังเพลง วิดีโอสตรีมมิ่ง สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เซลล์ขนาดใหญ่ไม่สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้ได้เพียงพอ จึงได้มีการติดตั้งเซลล์ขนาดเล็กเพิ่มเข้ามาในพื้นที่ครอบคลุมของเซลล์ขนาดใหญ่ สำหรับในบางพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก รวมทั้งพื้นที่ที่เป็นจุดอับสัญญาณ เช่น บริเวณตัวเมืองที่มีผู้คนอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อเป็นการรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและรองรับพื้นที่บางจุดที่ได้รับสัญญาณต่ำ ซึ่งเราเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเจนีด (Heterogeneous Network : HetNet) นอกจากประโยชน์ของเครือข่ายเฮเทอเจนีดที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีผลกระทบกำลังส่งที่ไม่เท่ากันของสถานีฐาน เนื่องจากเครือข่ายเฮเทอเจนีดประกอบด้วยสถานีฐานหลายชนิดแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้แต่ละคนได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกัน

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าหลายงานวิจัยได้เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหา ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมคือ วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด (coordinated beamforming) ซึ่งเป็นวิธีการที่ต่อยอดมาจากวิธีการก่อรูปลำคลื่น โดยวิธีการนี้สถานีฐานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลของผู้ใช้ เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการจะมีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด ที่มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าวิธีการนี้ว่า การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่ (fixed-coordinated beamforming) เพื่อเป็นการปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค (pico base station) ให้ดีขึ้นนั้น โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร ให้เป็นเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก โดยสิ่งที่มุ่งหวังสำหรับงานวิจัยนี้คือสามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมซึ่งช่วยปรับปรุงค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้มีค่าเท่าเทียมกันได้

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา ศิรดา สมอหมอบ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr.

SIRADA SAMOMOB : DEVELOPMENT OF FIXED COORDINATED
BEAMFORMING FOR HETNET. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
MONTHIPPA UTHANSAKUL, Ph.D., 72 PP.

COORDINATED BEAMFORMING/HETNETS/FAIENESS/SINR

Currently, mobile phones are increasingly used in daily lives. For example, it uses for a calling, sending message and entertainment such as online games, music streaming and video streaming. These applications require a huge data bandwidth. In some situations, a base station cannot support the sufficient bandwidth. According to the mentioned problem, the Heterogeneous Networks (HetNets) which deploy small cells into a large cell's coverage area are considered. This network can provide a higher data bandwidth in the city and poor signal area. The concept of HetNets is applying the different base stations for improving the performance of wireless network. In addition, HetNets are flexible and low cost for installation because small cells are installed in urban area in which there are many people and limited space so the large cell cannot be installed. As the benefit of HetNets is mentioned above, an inequality occurs as a result of the different level of transmission power leads to a poor SINR of users in the small base stations.

From literatures, there are lots of solving this problem. The one of these techniques is coordinated beamforming in which develop from a beamforming. In this method, a base station requires the knowledge of all user's location in the networks. Then, a base station provides the higher performance of beamforming since each base station selects a suitable weight for its user. Therefore, this paper uses the predefined weights method for coordinated beamforming and we call fixed coordinated

beamforming for selects the suitable weights for all users in HetNet. The predefined threshold of the SINR at macro-user is proposed in this research work to improve the SINR at pico-user. This is for the fairness of pico-user.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature ศศิธร อรรถนันทน

Advisor's Signature ดร. ...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิช อนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ และ อาจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูญาษา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องบัณฑิตศึกษาทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ และขอบคุณ คุณวีรินทร์ อาจหาญ เลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษาและจัดการด้านเอกสารตลอดระยะเวลาการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ศิรดา สมอหมอบ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย	4
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน	4
1.6.2 สถานที่ทำการวิจัย	5
1.6.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	5
1.6.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 ทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 เครื่องข่ายเสทเน็ต	6
2.3 สายอากาศแถวลำดับ	7
2.3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น	8
2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การก่อรูปลำดับชั้น.....	14
2.4.1 การก่อรูปลำดับชั้นแบบสลับลำดับชั้น.....	18
2.4.2 การก่อรูปลำดับชั้นแบบปรับตัว.....	19
2.4.3 การก่อรูปลำดับชั้นเชิงพิศม.....	21
2.5 แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีแอลทีอี.....	21
2.6 ปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.7 สรุป.....	26
3 การออกแบบการก่อรูปลำดับชั้นเพื่อให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและ	
สัญญาณรบกวนของผู้ใช้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น.....	27
3.1 บทนำ.....	27
3.2 ปัญหาและความเป็นมาของงานวิจัย.....	27
3.3 โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองแบบ.....	28
3.3.1 การจำลองสถานีฐานและค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและ	
สัญญาณรบกวน.....	28
3.3.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก.....	31
3.3.3 การมาถึงของสัญญาณบนแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถี	
ของแอลทีอี.....	37
3.4 การออกแบบการก่อรูปลำดับชั้นเพื่อให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด	
และสัญญาณ รบกวนของผู้ใช้ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น.....	41
3.5 สรุป.....	42
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	44
4.1 บทนำ.....	44
4.2 การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์.....	44
4.2.1 การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน.....	45
4.2.2 การกำหนดค่าจำนวนลำดับชั้นที่เหมาะสม.....	48
4.3 สรุป.....	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	53
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	54
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	54
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	72



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	พารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี.....	23
3.1	การมาถึงของสัญญาณของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี.....	39
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	44
4.2	ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน เมื่อไม่มีการกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน.....	46
4.3	ค่าวิสัยสามารถเมื่อไม่มีการกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน.....	48
4.4	การแมปปีงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนกับการมอดูเลชั่น.....	49

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เครื่องข่ายเฮทเน็ต.....	7
2.2	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น.....	9
2.3	สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน $M \times N$	12
2.4	การก่อรูปลำคลื่น.....	14
2.5	ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ.....	15
2.6	โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น.....	19
2.7	โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับตัว.....	20
2.8	การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด.....	22
3.1	เครื่องข่ายเฮทเน็ตและการเกิดสัญญาณแทรกสอด.....	29
3.2	สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น.....	32
3.3	ขั้นตอนการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก.....	37
3.4	เส้นทางการมาถึงของสัญญาณ.....	38
3.5	ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน โดยวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่.....	40
3.6	แผนผังการทำงานของกรเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่เท่าเทียมกันมากขึ้น.....	43
4.1	ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ ในสถานีสถานมาโคร.....	45
4.2	ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีสถานพิโค.....	46
4.3	ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีสถานมาโครและค่าวิสัยสามารถรวมของระบบ.....	47
4.4	ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีสถานพิโค.....	47
4.5	ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน.....	50
4.6	ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 4.3 dB.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 10.3 dB	51
4.8 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 22.7 dB	51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile station) มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการโทร การส่งข้อความ รวมทั้งการใช้งานแอปพลิเคชันเพื่อความบันเทิงต่างๆ เช่น เกมออนไลน์ ฟังเพลง วิดีโอสตรีมมิ่ง สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เซลล์ขนาดใหญ่ไม่สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้ได้เพียงพอ จึงได้มีการติดตั้งเซลล์ขนาดเล็กเพิ่มเข้ามาในพื้นที่ครอบคลุมของเซลล์ขนาดใหญ่ สำหรับบางพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก รวมทั้งพื้นที่ที่เป็นจุดสำคัญ เช่น บริเวณตัวเมืองที่มีผู้คนอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อเป็นการรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและรองรับพื้นที่บางจุดที่ได้รับสัญญาณต่ำ ซึ่งเราเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเจนีต (Heterogeneous Network : HetNet) นอกจากนี้ประโยชน์ของเครือข่ายเฮเทอเจนีตที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ผลกระทบที่ตามมาคือการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ (Inter-Cell Interference: ICI) เนื่องมาจากการใช้งานที่ความถี่เดียวกันของสถานีฐานซึ่งส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise : SINR) ของผู้ใช้นี้อาจต่ำ

การแก้ปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์นั้นมีการแก้ไขโดยใช้วิธีการที่หลากหลายรูปแบบ ดังเช่น การใช้วิธีการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ (fractional frequency reuse) เป็นเทคนิคหนึ่งในการบรรเทาปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ โดยการแบ่งทรัพยากรความถี่ออกเป็นหลายส่วนแล้วนำทรัพยากรความถี่เหล่านั้นมาใช้ซ้ำ เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกวิธีการหนึ่ง คือ วิธีการก่อรูปลำคลื่น (beamforming) โดยวิธีการนี้สายอากาศสามารถปรับเปลี่ยนการแผ่รังสีพลังงานโดยการปรับค่าถ่วงน้ำหนักทำให้สามารถแผ่รังสีพลังงานไปหาผู้ใช้ที่ต้องการได้โดยตรง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า หลายงานวิจัยได้เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความสนใจคือ วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด (coordinated beamforming) ซึ่งเป็นวิธีการที่ต่อยอดมาจากวิธีการก่อรูปลำคลื่น โดยวิธีการนี้สถานีฐานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลของผู้ใช้ ทำให้เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการจะมีความแม่นยำมากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด เช่น การนำวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดไปใช้แก้ปัญหาสัญญาณแทรกสอดในกลุ่มของเครือข่ายเฮเทอเจนีต (HetNet clusters) โดยจำลองเครือข่ายเป็นสภาพแวดล้อม 2 แบบ คือ สนามกีฬา และบริเวณตัวเมือง

ที่หนาแน่น (Nagaraj *et al.*, 2014) ผลการทดลองที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพต่อสภาพแวดล้อมทั้ง 2 แบบ รวมทั้งในงานของ (Ogejiofor and Zhang, 2016) เป็นการนำเทคนิควิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคัดมาใช้เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์และเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัม (spectrum efficiency) ภายในเครือข่ายเฮเทอเนต โดยใช้ค่าเฉลี่ยอัตราขยายช่องสัญญาณ (average channel gain) ในการเลือกเซลล์ของผู้ใช้ ผลที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากกลุ่มเซลล์อื่น ซึ่งไม่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณซึ่งกันและกัน ผลที่ได้คือ เมื่อมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันจะทำให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าไม่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูล (Belschner *et al.*, 2015)

วิธีการหาค่าถ่วงน้ำหนักสามารถแบ่งอย่างคร่าว ๆ ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่ไม่ได้มีการคิดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อน เช่น การหาค่าถ่วงน้ำหนักจากวิธีการบังคับศูนย์ (zero forcing) ดังงานวิจัยของ (Li *et al.*, 2010) ผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการบังคับศูนย์ ด้วยการจำกัดการป้อนกลับ เพื่อลดการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างสถานีฐาน ในงานวิจัยของ (Li *et al.*, 2013) นำเสนอเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคัดในเครือข่ายเฮเทอเนตเพื่อลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-Channel Interference: CCI) ของระบบเชื่อมโยงขาลง (downlink) จากสถานีฐานมาโครไปยังผู้ใช้ของสถานีฐานพิโค โดยใช้วิธีการบังคับศูนย์ในการหาค่าถ่วงน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นโดยใช้วิธีการบังคับศูนย์ร่วมกับการใช้ขั้นตอนวิธี block diagonalization เพื่อใช้กำจัดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ เพื่อนำไปใช้ในการส่งแบบหลายจุดเชิงพิคัด (Coordinated Multi-Point : CoMP transmission) ซึ่งช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น (Khan and Lee, 2012) แต่กลุ่มแรกมีข้อเสีย คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่คำนวณได้บางครั้งไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง เนื่องจากข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ (hardware) และสามารถเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากวิธีการบังคับศูนย์นั้นเหมาะสำหรับช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนซึ่งในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ยาก ส่วนกลุ่มที่ 2 คือกลุ่มที่มีการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแล้วจากนั้นจะมีการกำหนดเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่มีอยู่แล้ว ดังเช่น การประยุกต์ใช้การก่อรูปลำคลื่นเพื่อลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมจากการเชื่อมโยงลงจากสถานีฐานมาโคร (macro base station) ไปยังสถานีฐานเฟมโต (femto base station) โดยใช้สัญญาณอ้างอิงจากการเชื่อมโยงขาขึ้น (uplink sounding reference signal) เพื่อลดภาระในการป้อนกลับข้อมูลจากผู้ไปยังสถานีฐาน (Kim *et al.*, 2013) นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักโดยใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณที่รั่วไหลและสัญญาณรบกวน (Signal to Leakage and Noise Ratio : SLNR) และ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR) เพื่อหาเวกเตอร์ก่อรูปลำคลื่น (beamforming vector) ที่เหมาะสมที่สุดจาก codebook ในการก่อรูปลำคลื่นไปหาผู้ใช้ที่ต้องการ (Huang *et al.*, 2011) ซึ่งวิธีที่มีการ

กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนหน้านั้นมีข้อเสียคือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้อาจจะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่มีข้อดีคือ การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจะมีความซับซ้อนน้อย

เนื่องจากพลังงานที่แตกต่างกันของสถานีฐาน ทำให้ผู้ใช้ที่ได้รับบริการจากสถานีฐานขนาดเล็กได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ต่ำ จึงได้มีหลายงานวิจัยพยายามแก้ไขปัญหามาเพื่อจะปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้เท่าเทียมกันมากขึ้น โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ได้มีการปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ให้ใกล้เคียงกันมีดังนี้ งานวิจัยของ (Park *et al.*, 2013) นำเสนออัลกอริทึมเพื่อแก้ไขปัญหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (SINR balancing) และปรับปรุงค่าอัตราข้อมูลที่ได้รับได้ (user-rate) ที่แย่ที่สุดให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำการจัดคุลค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมาใช้กับเครือข่ายเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (cognitive radio network) เพื่อปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รองให้มีค่าดีขึ้น และทำให้แน่ใจว่าจะไม่มีสัญญาณแทรกสอดไปยังผู้ใช้หลักสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Cumanan *et al.*, 2010) และตัวอย่างงานวิจัยสุดท้ายเป็นการนำเสนออัลกอริทึมที่มีความซับซ้อนต่ำ เพื่อหาค่าการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่เท่าเทียมกันมากขึ้น โดยมีพื้นฐานจากการใช้วิธีการบังคับศูนย์ และการพิจารณาการรั่วไหล (leakage) ของสัญญาณ (Tang *et al.*, 2017)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด ที่มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อน โดยมีกำหนดเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกวิธีการนี้ว่า การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่ (fixed-coordinated beamforming) และเพื่อเป็นการปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค (pico base station) ให้ดียิ่งขึ้นนั้น จึงได้มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน สำหรับผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร ให้เป็นเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก นอกเหนือจากการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมากที่สุด โดยสิ่งที่มุ่งหวังสำหรับงานวิจัยนี้คือ สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมซึ่งช่วยปรับปรุงค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้มีค่าเท่าเทียมกันได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์หาค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่ (fixed coordinated beamforming) สำหรับเครือข่ายเสทเน็ต

1.2.2 เพื่อปรับปรุงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้เท่าเทียมกันมากขึ้น โดยการใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การหาค่าถ่วงน้ำหนักโดยวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่ สามารถนำไปใช้งานในเครือข่ายเสทเน็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.2 สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อปรับปรุงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้เท่าเทียมกันได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 เครือข่ายที่ทำการวิจัยเป็นเครือข่ายเสทเน็ต

1.4.2 สถานีฐานมาโครและสถานีฐานพิโคใช้งานที่ความถี่เดียวกัน

1.4.3 กำหนดให้ค่าวิสัยสามารถ (throughput) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบ

1.4.4 ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองแบบ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 เครือข่ายเสทเน็ตประกอบด้วยสถานีฐาน 2 ชนิด คือ สถานีฐานมาโครและสถานีฐานพิโค

1.5.2 ใช้แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี (LTE Multipath Channel Models)

1.5.3 จำลองแบบเพื่อดูประสิทธิภาพของวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่โดยวิเคราะห์ ค่าวิสัยสามารถ และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดและการหาค่าถ่วงน้ำหนัก
- 3) จำลองแบบเพื่อดูประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอซึ่งใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่โดยใช้โปรแกรม MATLAB
- 4) เปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการอื่นๆ

1.6.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการการสื่อสารเคลื่อนที่และการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 2) โปรแกรม MATLAB

1.6.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการจำลองแบบโดยนำผลที่ได้จากวิธีการที่งานวิจัยนี้ นำเสนอไปเปรียบเทียบกับวิธีการที่ไม่ได้คิดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อน และเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีการหาค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนจากงานวิจัยอื่นที่นำเสนอ โดยเปรียบเทียบผลในรูปแบบของกราฟข้อมูล

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถปรับปรุงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีการคิดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแต่ไม่มีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคัด

1.7.2 สามารถปรับปรุงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่แต่ละคนให้เท่าเทียมกันได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

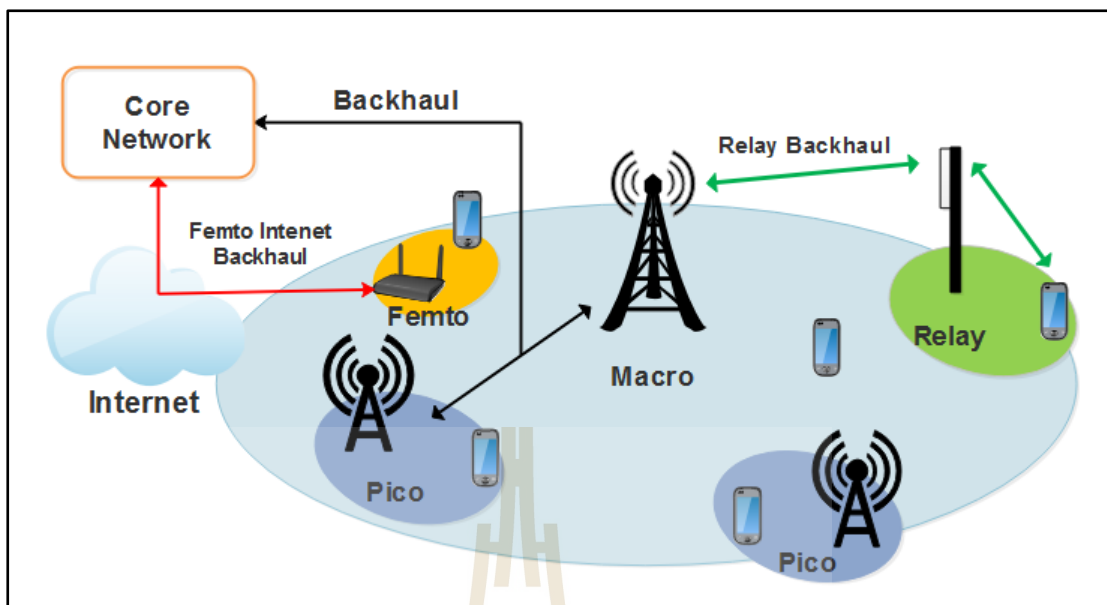
2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยแบ่งออกเป็นเจ็ดส่วน ส่วนแรกเป็นการกล่าวนำเข้าสู่เนื้อหา ส่วนที่สองเป็นการแนะนำเกี่ยวกับเครือข่ายเฮเทอเน็ต ประกอบด้วยความเป็นมาของเครือข่ายเฮเทอเน็ตรวมถึงประโยชน์ของเครือข่ายชนิดนี้ ต่อมาในส่วนที่สามกล่าวถึงสายอากาศแกลวลำดับโดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแกลวลำดับทั้งแบบเชิงเส้นและแบบเชิงระนาบ ในส่วนที่สี่จะกล่าวถึงการก่อรูปลำคลื่น การก่อรูปลำคลื่นเบื้องต้นประเภทของการก่อรูปลำคลื่น ในส่วนที่ห้าจะกล่าวถึงแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีแวลที่ไอในการนำมาอ้างอิงถึงรูปแบบการแพร่กระจายของสัญญาณในสภาวะแวลล้อมต่างๆ ในปัจจุบัน ในส่วนที่หกจะกล่าวถึงการสำรวจประสิทธิภาพที่เกี่ยวกับงานวิจัย และส่วนสุดท้ายในส่วนที่เจ็ดจะเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

2.2 เครือข่ายเฮเทอเน็ต

ในอดีต ระบบโทรศัพท์ไร้สายที่ถูกนำมาใช้งานโดยปกติทั่วไปคือ เครือข่ายเอกพันธ์ (homogeneous network) โดยจะมีสถานีฐานมาโคร (macro base station) ที่ให้พื้นที่ครอบคลุมในบริเวณกว้าง เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมต่อกับส่วนประมวลผล ซึ่งเครือข่ายแบบเอกพันธ์นั้น ทุกสถานีฐานจะมีกำลังส่ง รูปแบบสายอากาศ การเชื่อมต่อช่องสัญญาณที่เหมือนกัน นอกจากนี้ยังรองรับจำนวนผู้ใช้ได้จำนวนเท่าๆ กัน และให้คุณภาพของบริการ (Quality of Service: QoS) ที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ในส่วนของตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานมาโครนั้น ผู้ให้บริการจะเป็นผู้วางแผนในการติดตั้งเพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมมากที่สุด และควบคุมสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นระหว่างสถานีฐาน

เนื่องจากในปัจจุบันจำนวนผู้ใช้ ปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งสภาพแวลล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เครือข่ายเอกพันธ์ไม่สามารถรองรับปริมาณดังกล่าวที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้การติดตั้งสถานีฐานมาโครในพื้นที่เมืองนั้นเป็นเรื่องยาก เนื่องจากต้องใช้พื้นที่ และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้ให้บริการจึงได้หาวิธีการที่จะทำให้ปัญหานี้หมดไปด้วยการติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กที่อยู่ภายในบริเวณพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร ไม่ว่าจะ



รูปที่ 2.1 เครือข่ายเฮเทอเจเนต

[Khandekar *et al.*, 2010]

เป็นพื้นที่ภายใน หรือภายนอกอาคาร เพื่อช่วยรองรับจำนวนผู้ใช้และปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังใช้งบประมาณในการติดตั้งน้อยเมื่อเทียบกับการติดตั้งสถานีฐานมาโคร ซึ่งเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเจเนต (heterogeneous network)

จากรูปที่ 2.1 แสดงรูปของเครือข่ายเฮเทอเจเนต ประกอบไปด้วยสถานีฐานมาโครโดยปกติมีกำลังส่งสูง ประมาณ 5 ถึง 40 วัตต์ ภายในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร จะมีสถานีฐานพิโค สถานีฐานเฟมโต และสถานีฐานรีเลย์ ติดตั้งอยู่ ซึ่งสถานีฐานเหล่านี้จะมีกำลังส่งต่ำ ประมาณ 100 มิลลิวัตต์ ถึง 2 วัตต์ (Khandekar *et al.*, 2010) โดยสถานีฐานขนาดเล็กนั้นสามารถนำมาใช้งานในการติดตั้งภายในพื้นที่ที่เป็นจุดอับสัญญาณที่สถานีฐานมาโครไม่สามารถให้บริการได้ เพิ่มความจุช่องสัญญาณในพื้นที่ที่มีคนใช้งานเยอะ หรือสามารถนำไปติดตั้งเพื่อเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมภายในอาคารได้ เนื่องจากสถานีฐานเหล่านี้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับสถานีฐานมาโคร

2.3 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น เรียกว่า องค์ประกอบ (element) การนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลาย ๆ

องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งจะทำได้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญมากต่อระบบสายอากาศเก่งที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่นรอง (side lobes) หรือจุดศูนย์ (nulls) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น สายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น และสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังต่อไปนี้

2.3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

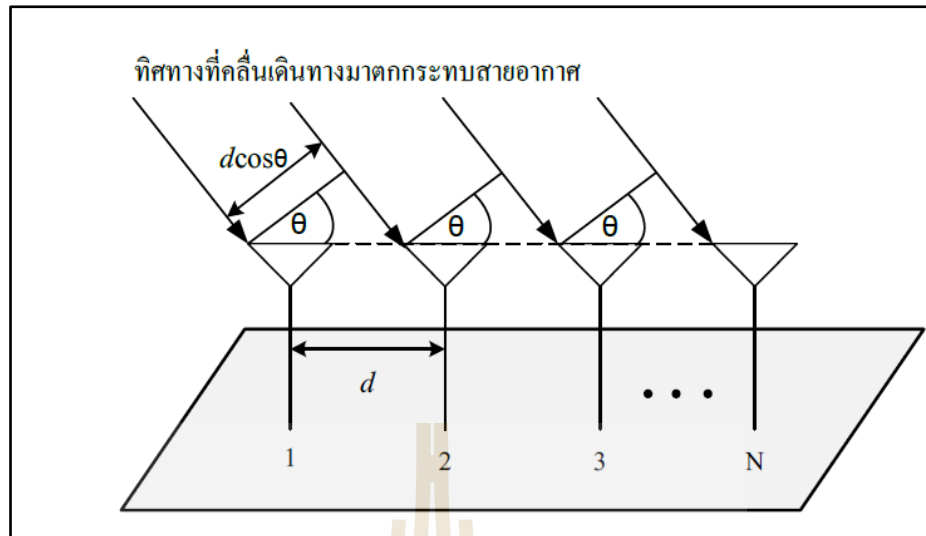
สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear antenna array) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่พื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นวางตัวเรียงกันเป็นเส้นตรงซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.2 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้น หรือ $N \times 1$ ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้น และแต่ละต้นมีแอมพลิจูดเท่ากัน ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน มีการป้อนกระแสให้กับทุก ๆ องค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่า ๆ กัน เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิง หรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor : AF) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

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



รูปที่ 2.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

[มนตรีทิพย์ภา อุฑารสกุล, 2556]

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

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

เมื่อ $\psi = kd \cos\theta + \beta$ k คือหมายเลขคลื่น (wave number) $= 2\pi/\lambda$ d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น และ β คือความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น จากสมการ (2.4) เราสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

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

จะได้ดังสมการที่ (2.6)

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

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

$$AF = \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] \quad (2.7)$$

จัดรูปโดยการคูณด้วย $\frac{e^{-j(N/2)\psi}}{e^{-j(N/2)\psi}}$ จะได้

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

จัดรูปโดยการคูณด้วย $\frac{e^{j[(N-1)/2]\psi}}{e^{j[(N-1)/2]\psi}}$ จะได้

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

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

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นค่าของระยะห่างของสายอากาศ $d=0$ และ $\beta=0$ ดังนั้น $\psi = kd \cos\theta + \beta = 0$ ดังนั้นสมการ (2.8) จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.9)$$

ค่าของ ψ จะถือว่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

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

ค่าสูงสุดของสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะมีค่าเท่ากับ N เพื่อที่จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเป็นค่ามาตรฐานที่สามารถเปรียบเทียบกันได้ จึงต้องมีการกำหนดให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization) โดยเป็นการทำให้ค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นสมการมาตรฐานของตัวประกอบแถวลำดับคือ

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.11)$$

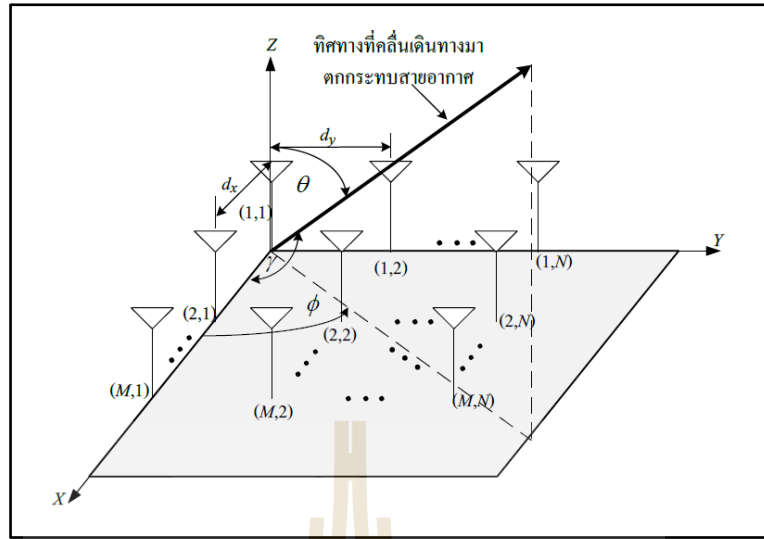
หรือถ้าหากค่าของ ψ น้อยมาก ๆ จะสามารถประมาณค่าสมการได้ดังนี้

$$(AF)_n \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.12)$$

2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ (planar antenna array) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจากรูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3.1 โดยสายอากาศแต่ละตัวจะถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยม หรือที่เรียกว่าสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเชิงเส้น คือสามารถควบคุม และเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้หลากหลาย ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจึงมีความเอนกประสงค์มากกว่า และสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบสามารถหันพู่หลักในมุมเฉย และทุก ๆ ทิศรอบตัว 360 องศา ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาร์ การชี้ทิศทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สาย และรวมถึงระบบสายอากาศแก่งที่มีการก่อรูปลำคลื่นอีกด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ (Allen and Ghavami, 2005)

เราสามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบโดยใช้สมการที่ (2.12) ได้ เช่นเดียวกับสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแถวลำดับแตกต่างกันซึ่งสามารถหาได้ โดยพิจารณามุม γ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 จะได้



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจำนวน $M \times N$
[มนตรีพิชญา อุฑารสกุล, 2556]

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

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 คือ ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ β_x คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน y เช่นเดียวกันกับที่พิจารณาแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

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

เมื่อ I_{1n} คือค่าสัมประสิทธิ์ที่กระแสดำระดับของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y และ β_y คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแอมพลิจูดของทั้งแกน x และ y รวมกันหรือที่เรียกว่าแบบเชิงระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแอมพลิจูดของทั้งแกน x และ y เข้าด้วยกันจะได้

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

ถ้าสมมติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากันจะได้

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

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

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

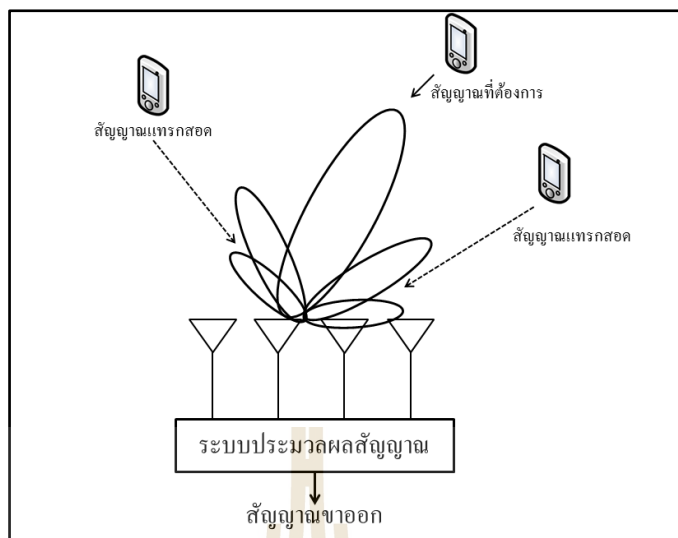
เช่นเดียวกันกับสายอากาศแอมพลิจูดแบบเชิงเส้น เราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ (2.11) และ (2.12) ซึ่งจะได้เท่ากับ

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

เมื่อ

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

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



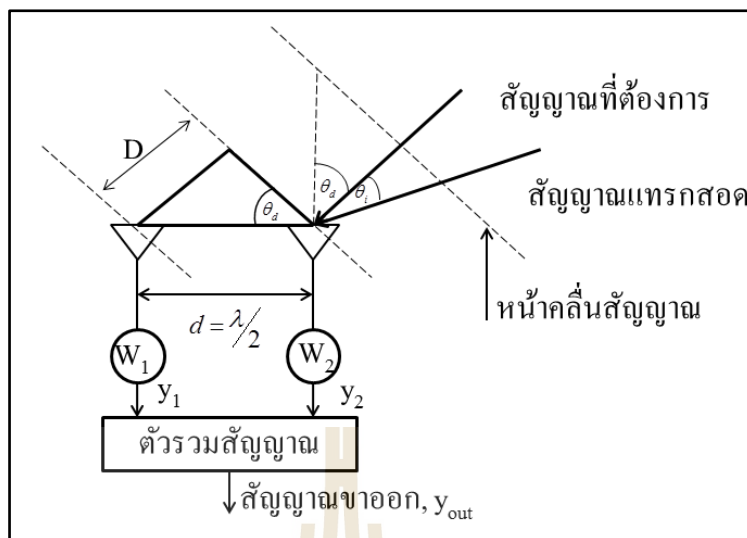
รูปที่ 2.4 การก่อรูปลำคลื่น
[มนตรีพิทยา อุทาร์สกุล, 2556]

2.4 การก่อรูปลำคลื่น

การก่อรูปลำคลื่น เป็นวิธีการประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบที่มีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยสามารถสร้างแบบรูปลำคลื่นที่มีพหุคลื่นหลักหันไปยังทิศทางที่ต้องการ และสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ การก่อรูปลำคลื่นสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สายได้ ดังนี้

- 1) เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงขยายพื้นที่ครอบคลุมให้กว้างขึ้น และทำให้ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น
- 2) ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น
- 3) เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งจะหันพหุหลักไปเฉพาะในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น จึงไม่สูญเสียพลังงานไปในทิศทางอื่น ทำให้ประหยัดพลังงาน และยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
- 4) ลดสัญญาณแทรกสอด

ด้วยข้อดีดังกล่าวการก่อรูปลำคลื่นจึงได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ งานในระบบการสื่อสารไร้สาย จากรูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเก่ง ซึ่งระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ สายอากาศแฉกและระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) ซึ่งในระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival : DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ (Liberti and Rappaport, 1999) ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการก่อรูปลำคลื่น



รูปที่ 2.5 ระบบสายอากาศแก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ
[มนตรีทิพย์ภา อูทวารสกุล, 2556]

ของพหุหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ ในขณะที่หักจุดศูนย์หรือพุ่งไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด โดยหลักการเบื้องต้นในการที่จะหาค่าคลื่นสามารถอธิบายได้โดยใช้ระบบสายอากาศแก่งลำดับแบบเชิงเส้น จำนวน 2 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากรูป D คือความต่างเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ W คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ θ_d และ θ_r คือมุมที่มาตกกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับจากรูปสัญญาณขาออกคือ

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

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

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

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

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

เมื่อ y_{1d} , y_{1i} , y_{2d} และ y_{2i} คือสัญญาณที่ต้องการที่มอดกกระทบสายอากาศชั้นที่ 1 สัญญาณแทรกสอดที่มอดกกระทบสายอากาศชั้นที่ 1 สัญญาณที่ต้องการที่มอดกกระทบสายอากาศชั้นที่ 2 และสัญญาณแทรกสอดที่มอดกกระทบสายอากาศชั้นที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสัญญาณขาออกของสายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักแล้ว ดังนี้

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

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

แทนสมการ (2.27) และ (2.28) ลงในสมการ (2.22) จะได้

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

เราต้องการทำให้พจน์ของ A_i มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้หมดไปและต้องการพจน์ของ A_d เท่ากับ A_d เพื่อให้สัญญาณที่ต้องการมีค่าดั้งเดิมเอาไว้ ดังนั้นจะได้

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

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

เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) จะได้

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

แทนสมการที่ (2.32) ในสมการ (2.31) จะได้

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

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

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศชั้นที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ

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

เช่นเดียวกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศชั้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.31) เราจะได้

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

แทนสมการ (2.36) ลงใน (2.31) จะได้

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

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

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

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศชั้นที่ 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) สุดท้ายจะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

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

จากสมการ (2.40) แสดงให้เห็นว่าการก่อรูปลำคลื่นสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้ และยังสามารถรับสัญญาณในทิศทางที่ต้องการได้ โดยการนำสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละ ต้นมาประมวลผลสัญญาณนั่นเอง ซึ่งการก่อรูปลำคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น (switched beam systems) และการก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัว (adaptive antenna systems)

2.4.1 การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น

การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น ประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) ซึ่งสามารถสร้างลำคลื่นได้ M ลำคลื่นในเวลา เดียวกัน และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วง น้ำหนัก (weight, T) สำหรับสัญญาณขาออกที่มีลำคลื่นชี้ไปยังทิศทางที่ m^{th} สามารถแสดงใน สมการ (2.41) ได้ดังนี้

$$\mathbf{T}_m = [w_{0,m} \quad w_{1,m} \quad \cdots \quad w_{N-1,m}] \quad (2.42)$$

เมื่อ $w_{n,m}$ คือค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ n^{th} สำหรับการก่อรูปลำคลื่นในทิศทางที่ m^{th} ซึ่ง สัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้

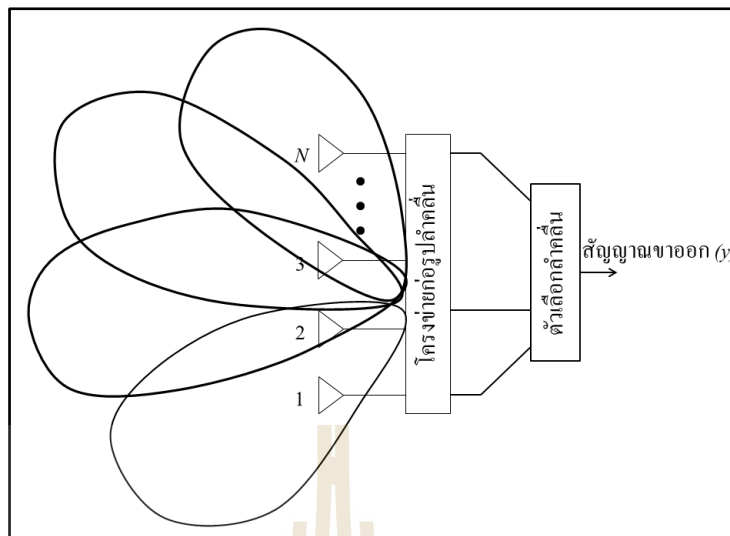
$$\mathbf{y} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{x} \quad (2.43)$$

เมื่อ \mathbf{x} คือสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์

โดยขั้นตอนการทำงานของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

- 1) ตรวจสอบทิศทางความแรงของสัญญาณ
- 2) เลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นที่ถูกเลือกไว้อย่างเหมาะสม
- 3) ใช้ลำคลื่นในทิศทางที่เลือกเมื่อผู้ใช้ไม่มีการเคลื่อนที่
- 4) สลับเปลี่ยนลำคลื่นเดิม ไปยังลำคลื่นใหม่เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น

นอกจากนี้การรวมสัญญาณขาออกของสายอากาศหลาย ๆ ตัวทำให้สายอากาศแบบปรับ เลือกลำคลื่นสามารถสร้างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งทำให้ระบบมี ทางเลือกของรูปแบบการแพร่กระจายแบบรูปการแผ่พลังงานที่มากกว่าการใช้สายอากาศต้นเดียว จึงทำให้เราสามารถสรุปข้อดี และข้อเสียของระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น ได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น
[มนตรีพิทยา อุทราสกุล, 2556]

ข้อดี

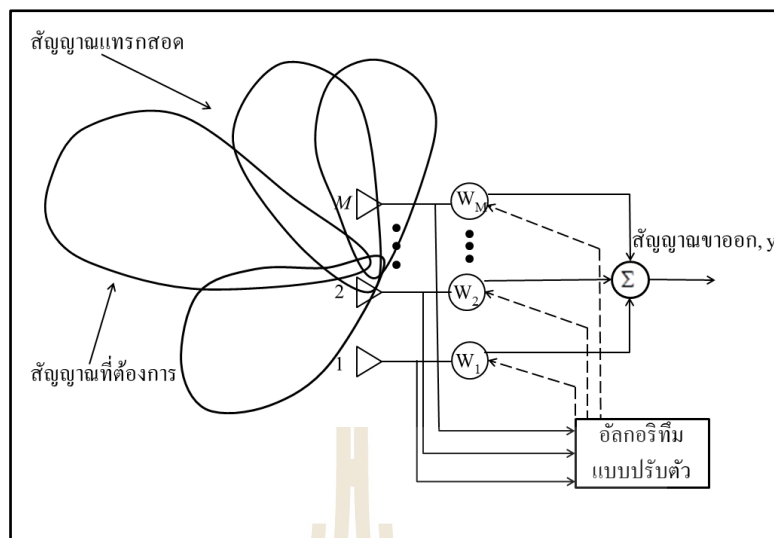
- 1) มีความซับซ้อนน้อย
- 2) สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการเปลี่ยนแปลงลำคลื่น
- 3) ในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ประสิทธิภาพของสายอากาศแบบสลับลำคลื่นจะใกล้เคียงกับสายอากาศแบบปรับลำคลื่น

ข้อเสีย

- 1) ในกรณีที่สัญญาณไม่ชัดเจน มีการบดบัง มีการแทรกสอดของสัญญาณหรือมีสัญญาณมาถึงในมุมกว้างหลาย ๆ มุม อาจมีความผิดพลาดในการเลือกสัญญาณได้
- 2) อัตราการขยายสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น
- 3) การลดจำนวนสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด

2.4.2 การก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัว

การก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัว เป็นการปรับรูปลำคลื่นที่สามารถปรับเปลี่ยนลำคลื่นให้ชี้ไปในทิศทางใด ๆ ได้โดยอิสระ โดยจะมีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับลำคลื่น และมีส่วนที่เรียกว่า อัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive algorithm) เป็นตัวคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ โดยหลักการทำงานของระบบคือ เมื่อสัญญาณตกกระทบบสายอากาศแต่ละต้น สัญญาณจะถูกส่งมาที่ส่วนอัลกอริทึมแบบปรับตัวเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับตัว

[มนตรีพิทยา อุทาร์สกุล, 2556]

แล้วส่งค่ากลับไปตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ ดังนั้นจึงได้สัญญาณขาออกดังสมการที่ (2.44)

$$y = \mathbf{W}\mathbf{x}$$

(2.44)

เมื่อ \mathbf{x} คือสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น

ระบบจะทำงานเป็นรูปแบบวงจรปิดแบบนี้ไปเรื่อย ๆ วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีหลายวิธีขึ้นกับอัลกอริทึมที่เลือกใช้ จากกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลให้ระบบสามารถหันพู่หลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันพู่รองหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดตามที่แสดงในรูปที่ 2.7

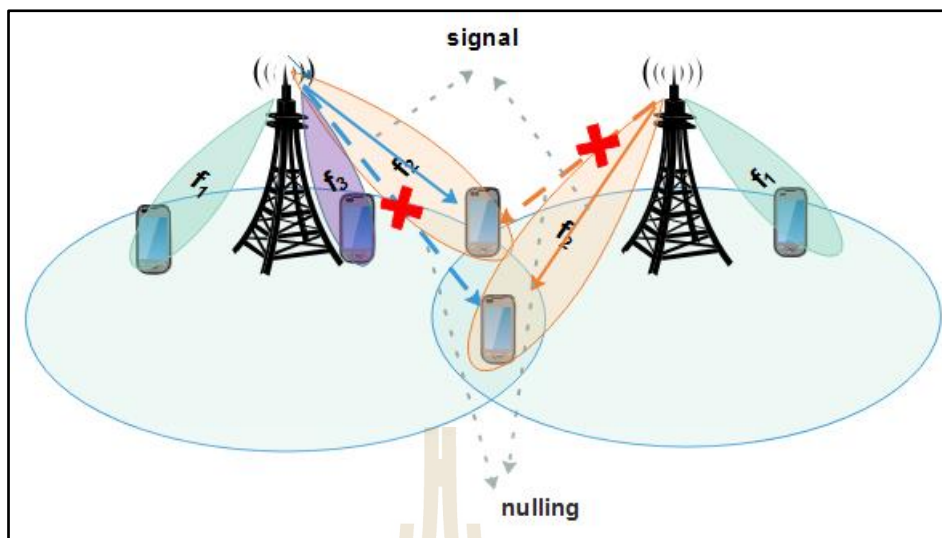
เราสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัวได้ดังนี้

ข้อดี

- 1) มีค่าอัตราส่วนสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวนสูง
- 2) ไม่ต้องมีการปรับเทียบสายอากาศ (calibration)
- 3) มีประสิทธิภาพดีแม้ในกรณีที่จำนวนสัญญาณรบกวนมากกว่าจำนวนสายอากาศ

ข้อเสีย

- 1) มีความซับซ้อนสูงมากกว่าสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ค่าคลื่น



รูปที่ 2.8 การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด

[<https://www.netmanias.com>]

- 2) ต้องการสัญญาณอ้างอิงที่ดีเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
- 3) ต้องการหน่วยประมวลผลความเร็วสูง

2.4.3 การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด

การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากการก่อรูปลำคลื่นแบบธรรมดา โดยมีหลักการพื้นฐานคือ สถานีฐานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณซึ่งกันและกัน โดยเป็นตำแหน่งของผู้ใช้ ทั้งผู้ใช้ที่ต้องการติดต่อสื่อสารด้วย และผู้ใช้อื่น ๆ ที่อยู่ในเซลล์เดียวกัน หรือ เซลล์ข้างเคียง เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการ จึงทำให้การก่อรูปลำคลื่นไปหาผู้ใช้ที่ต้องการได้แม่นยำมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่สถานีฐาน 1 และ 2 มีการทำงานร่วมกัน เมื่อการก่อรูปลำคลื่นทำให้สถานีฐาน 1 และ 2 ก่อรูปลำคลื่นไปหาผู้ใช้ที่ต้องการได้โดยตรง ในขณะที่เดียวกันก็มีการหันจุดศูนย์ไปยังผู้ใช้อื่นที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอดไปยังผู้ใช้ข้างเคียงน้อยที่สุด

2.5 แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีแอสทีอี

แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอสทีอี (LTE multipath channel models) เป็นแบบจำลองมาตรฐานของแอสทีอี ที่ถูกกำหนดโดย ITU-R M.1225 และ 3GPP เป็นข้อมูลทางเทคนิคสำหรับระบบ GSM ที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในยุคโทรศัพท์

เคลื่อนที่ยุคที่สาม โดยแต่ละแท็ปจะสอดคล้องกับสัญญาณที่มาถึงสายอากาศจำนวนหลายเส้นทาง โดยยึดผลตอบสนองช่องสัญญาณอิมพัลส์เป็นหลัก

$$h(\tau; t) = \sum_{k=1}^K a_k \delta(\tau - \tau_k) \quad (2.45)$$

เมื่อ k คือหมายเลขแท็ป τ_k คือ ความล่าช้าของแท็ป เมื่อเทียบกับแท็ปแรก และ a_k คือ การกระจายค่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณเชิงซ้อน ที่เป็นไปตามธรรมชาติของคอปเพลอร์สเปกตรัม $S(f)$

$$S(f) \propto \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_d}\right)^2}}, \quad f \in [-f_d, f_d] \quad (2.46)$$

เมื่อ f_d คือการเคลื่อนที่ความถี่แบบคอปเพลอร์สูงสุด

โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในกลุ่มความร่วมมือของ 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) ซึ่งเป็นกลุ่มความร่วมมือระหว่างหน่วยงานมาตรฐานการสื่อสารโทรคมนาคม เพื่อกำหนดมาตรฐานกลางในการผลิต และพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายในยุคสามจี และ ITU (International Telecommunication Union) หรือ สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ช่วยส่งเสริมความร่วมมือระหว่างประเทศในด้านการติดต่อสื่อสารโทรคมนาคม ให้ความช่วยเหลือทางวิชาการแก่ประเทศกำลังพัฒนาในด้านโทรคมนาคม และสนับสนุนการพัฒนาทางด้านโทรคมนาคม เห็นด้วยกับการกำหนดการใช้งานช่องสัญญาณ Pedestrian A (PA) และ Vehicular A (VA) จากงานวิจัยของ (Sørensen *et al.*, 2005) และ Typical Urban (TU) จาก (3GPP, 2006) เพื่อจำลองสภาพแวดล้อม 3 แบบ ที่มีพื้นฐานที่โดดเด่นตามความล่าช้าในการแพร่กระจายต่ำปานกลาง และสูง ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานแอลทีอีก็ได้นำแบบจำลองที่กำหนดโดย ITU และ 3GPP มาใช้เช่นกัน ซึ่งพารามิเตอร์หลักของแบบจำลองเหล่านี้แสดงไว้ใน TS 36.101 และ TS 36.104 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งจากตาราง ค่า τ คือเวลาที่สัญญาณในแต่ละเส้นทางมาถึงสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเส้นทางแรกที่มาถึง และ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อแมส (Signal to Mask Ratio : SMR) เป็นความแรงของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศ เมื่อเทียบกับสัญญาณที่แรงที่สุด นอกจากนี้แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรูปแบบของสายอากาศหลายต้น โดยการพัฒนาของเมทริกซ์สหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ โดยสามารถหาข้อมูลได้จาก 3GPP TS 36.101

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี

Tap no	EPA Channel		EVA Channel		ETU Channel	
	τ (ns)	SMR (dB)	τ (ns)	SMR (dB)	τ (ns)	SMR (dB)
1	0	0.0	0	0.0	0	-1.0
2	30	-1.0	30	-1.5	20	-1.0
3	70	-2.0	150	-1.4	150	-1.0
4	90	-3.0	310	-3.6	200	0.0
5	110	-8.0	370	-0.6	230	0.0
6	190	-17.2	710	-9.1	500	0.0
7	410	-20.8	1090	-7.0	1600	-3.0
8			1730	-12.0	2300	-5.0
9			2510	-16.9	5000	-7.0

2.6 ปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากทฤษฎีที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดมากขึ้น และสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ จึงได้มีการศึกษาปรัชญาวิศวกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยทำการสำรวจปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้พอสังเขปได้ดังนี้

งานวิจัยของ (Nagaraj *et al.*, 2014) นำเสนอการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดเพื่อนำไปใช้แก้ไข ปัญหาสัญญาณแทรกสอดในกลุ่มของเครือข่ายเฮเทอเนตโดยจำลองเครือข่ายเป็นสภาพแวดล้อม 2 แบบ คือ สนามกีฬา และบริเวณตัวเมืองที่หนาแน่น โดยในการจำลองแบบได้เลือกวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด 3 แบบ คือ การก่อรูปลำคลื่นแบบเจาะจง (Eigen-beamforming) ซึ่งเป็นการก่อรูปไปหาผู้ใช้ที่ต้องการแต่ไม่สนใจว่าจะมีสัญญาณแทรกสอดไปที่ผู้ใช้อื่นหรือไม่ อีกวิธีหนึ่งคือ การทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณที่รบกวนและสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุด (max-SLNR) โดยเป็นการคำนึงถึงการทำให้มีสัญญาณแทรกสอดไปที่ผู้ใช้อื่นน้อยที่สุด และวิธีสุดท้ายคือ วิธีการ Joint Enhanced Transmit-Receive Optimization : JETRO โดยเป็นวิธีการที่หาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนที่มากที่สุดร่วมกับการใช้ Interference-Rejection Combining: IRC เพื่อช่วยลดความแรงของสัญญาณแทรกสอด ผลการจำลองแบบที่ได้คือ ในพื้นที่ตัวเมืองที่หนาแน่นการก่อรูปลำคลื่นแบบ JETRO ให้ค่าวิสัยสามารถ (throughput) ของผู้ใช้ที่บริเวณกลางเซลล์ และขอบเซลล์มากกว่าวิธีอื่น ๆ

งานวิจัยของ (Oguejiofor and Zhang, 2016) เป็นการนำเทคนิควิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดมาใช้เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์และเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัม (spectrum

efficiency) ภายในเครือข่ายเฮเทอเนต โดยใช้ค่าเฉลี่ยอัตราขยายช่องสัญญาณ (average channel gain) ในการเลือกเซลล์ของผู้ใช้แทนการใช้กำลังสัญญาณอ้างอิงที่ได้รับ (Reference Signal Received Power: RSRP) หรือคุณภาพสัญญาณอ้างอิงที่ได้รับ (Reference Signal Received Quality: RSRQ) ซึ่งช่วยปรับปรุงการกระจายโหลดในเครือข่ายเฮเทอเนต และช่วยป้องกันสัญญาณแทรกสอดที่จะเกิดขึ้น และวิธีการก่อรูปลำคลื่นที่นำมาใช้คือการทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณที่รบกวนและสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุด เนื่องมาจากในเครือข่ายเฮเทอเนต สถานิฐานแต่ละชนิดจะมีกำลังส่งไม่เท่ากัน ผลที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น

งานวิจัยของ (Belschner *et al.*, 2015) ผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากกลุ่มเซลล์อื่น โดยเปรียบเทียบระหว่างมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณ และไม่มีแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณซึ่งกันและกัน ผลคือเมื่อมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันจะทำให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าไม่มีแลกเปลี่ยนข้อมูล

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคัดสามารถนำไปแก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ หรือสัญญาณแทรกสอดที่มาจากกลุ่มเซลล์อื่นได้นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคัดยังสามารถทำได้หลายวิธีการ ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการเลือกวิธีการต่อไปได้

งานวิจัยของ (Li *et al.*, 2013) ได้นำเสนอเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคัดในเครือข่ายเฮเทอเนตเพื่อลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-Channel Interference : CCI) ของระบบเชื่อมโยงขาลง (downlink) จากสถานีฐานมาโครไปยังผู้ใช้ของสถานีฐานพิโค โดยใช้วิธีการบังคับศูนย์ในการหาค่าถ่วงน้ำหนัก โดยคำนึงถึงสัญญาณแทรกสอดที่จะส่งผลไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในเซลล์อื่นด้วย ผลที่ได้คือค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มีการใช้การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคัด

งานวิจัยของ (Khan and Lee, 2012) นำเสนอการใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นโดยใช้วิธีการบังคับศูนย์ร่วมกับการใช้ block diagonalization ซึ่งจะช่วยกำจัดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น เพื่อนำไปใช้ในการส่งแบบหลายจุดเชิงพิคัด (Coordinated Multi-Point : CoMP transmission) ซึ่งช่วยปรับปรุงซึ่งช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการบังคับศูนย์เพียงอย่างเดียว

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นนี้เป็นตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัวได้ในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งจากทฤษฎีข้อดีของการก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัวจะหาค่าถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดเสมอทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสูง แต่มีข้อเสียคือระบบมีความซับซ้อน และต้องใช้เวลาประมวลผลที่รวดเร็ว

งานวิจัยของ (Kim *et al.*, 2013) เป็นการประยุกต์ใช้การก่อรูปลำคลื่นเพื่อลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมจากการเชื่อมโยงขาลงจากสถานีฐานมาโคร (macro base station) ไปยังสถานีฐาน

เฟมโต (femto base station) โดยใช้สัญญาณอ้างอิงจากการเชื่อมโยงขาขึ้น (uplink sounding reference signal) แทนการใช้สัญญาณอ้างอิงจากการเชื่อมโยงขาลง (downlink reference signal) เพื่อลดภาระในการป้อนกลับข้อมูลจากผู้ใช้ไปยังสถานีฐาน ในส่วนของการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักนั้น จะเลือกจากค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดมาก

มากที่สุด งานวิจัยของ (Huang *et al.*, 2011) นำเสนอการใช้วิธีการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักโดยใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณที่รั่วไหลและสัญญาณรบกวน (Signal to Leakage and Noise Ratio : SLNR) และ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR) เพื่อหาเวกเตอร์ก่อรูปลำคลื่น (beamforming vector) ที่เหมาะสมที่สุดจาก codebook ในการก่อรูปลำคลื่นไปหาผู้ใช้ที่ต้องการ ซึ่งสถานีฐานจะแบ่งปัน codebook และข้อมูลช่องสัญญาณซึ่งกันและกัน ซึ่งให้ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณที่รั่วไหลและสัญญาณรบกวนเพียงอย่างเดียว

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นนี้เป็นตัวอย่างของงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น โดยมีเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับก่อรูปลำคลื่นแตกต่างกันออกไป เช่น การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจากเงื่อนไขที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรก-สอด และสัญญาณรบกวนมากที่สุด หรือ การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจากเงื่อนไขที่มีสัญญาณแทรกสอดไปรบกวนผู้อื่นน้อยที่สุด ซึ่งจากทฤษฎีการก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่นนั้น มีข้อดีคือ มีความซับซ้อนน้อย แต่ข้อเสียคือ การลดสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัดเนื่องจากจำนวนของค่าถ่วงน้ำหนักที่มีอยู่อาจมีไม่ครอบคลุม

งานวิจัยของ (Park *et al.*, 2013) พัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมการจัดคู่ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (SINR balancing) บนพื้นฐานของ symmetric complex เปรียบเทียบกับ asymmetric complex โดยนำมาใช้ในการหาขอบเขตอัตราที่สามารถได้มา (achievable rate region) เพื่อปรับปรุงค่า user-rate ที่แย่ที่สุดในการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดให้ดียิ่งขึ้น โดยพบว่าวิธีการ asymmetric complex ให้ผลที่ดีกว่าเมื่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ (Cumanan *et al.*, 2010) เป็นการนำการจัดคู่ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรก-สอดและสัญญาณรบกวนมาใช้กับเครือข่ายเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (cognitive radio network) โดยการใช้การก่อรูปลำคลื่นและการจัดสรรกำลัง (power allocation) เพื่อปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รองให้มีค่าดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันต้องทำให้แน่ใจว่าจะไม่มีสัญญาณแทรกสอดไปที่ผู้ใช้หลักสูงกว่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ที่กำหนดไว้

งานวิจัยของ (Tang *et al.*, 2017) เป็นการนำเสนออัลกอริทึมที่มีความซับซ้อนต่ำ เพื่อหาการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่เท่า

เทียบกันมากขึ้น โดยมีพื้นฐานจากการใช้วิธีการบังคับศูนย์ และการพิจารณาการรั่วไหล (leakage) ของสัญญาณ ผลที่ได้คืออัลกอริทึมที่มีพื้นฐานจากการรั่วไหลของสัญญาณให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า จากงานวิจัยข้างต้นนั้นเป็นการแก้ไขปัญหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกันของผู้ใช้เนื่องมาจากกำลังส่งที่ไม่เท่ากันของสถานีฐานแต่ละชนิดที่อยู่ในเครือข่ายเฮเทอเน็ต ซึ่งมีหลายวิธีการที่สามารถนำมาแก้ไขปัญหานี้ โดยการก่อรูปลำคลื่นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าสามารถทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ให้เท่าเทียมกันได้

2.7 สรุป

ตามเนื้อหาข้างต้นที่กล่าวมาในบทนี้จะเห็นว่า การสื่อสารไร้สายมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทำให้ระบบแบบเดิมไม่สามารถรองรับผู้ใช้และปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพอ จึงได้มีเครือข่ายเฮเทอเน็ตที่ช่วยรองรับผู้ใช้และข้อมูลที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการใช้งานที่ความถี่เดียวกันของสถานีฐานและความแตกต่างของกำลังส่ง ทำให้มีการพัฒนาวิธีการก่อรูปลำคลื่นเพื่อมาแก้ปัญหาค่าสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ ซึ่งการก่อรูปลำคลื่นนั้นก็มีหลายรูปแบบ ซึ่งต่างก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ในส่วนของความแตกต่างระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกัน ได้มีหลายงานวิจัยเสนอการแก้ไข ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น ซึ่งเป็นวิธีการที่มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแล้ว เนื่องจากสามารถนำไปปรับใช้กับฮาร์ดแวร์ที่มีอยู่ได้ และมีความซับซ้อนต่ำ โดยได้มีการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ได้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่เท่าเทียมกันมากขึ้น

บทที่ 3

การออกแบบการก่อรูปล้าคืบเพื่อให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอเกี่ยวกับการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์และการออกแบบการทำงานของระบบที่นำเสนอ โดยในส่วนแรกจะเป็นการกล่าวนำหัวข้อของบทนี้ ส่วนที่สองจะเป็นการกล่าวถึงปัญหาและความเป็นมาของงานวิจัยในการสร้างแบบจำลอง ในส่วนที่สามจะกล่าวถึงข้อมูลที่ใช้สำหรับการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ เช่น การกำหนดตำแหน่งสถานีฐาน และผู้ใช้ การหาค่าถ่วงน้ำหนัก การกำหนดเมตริกซ์ช่องสัญญาณ ส่วนที่สี่จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการสรุปท้ายบท

3.2 ปัญหาและความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันที่การใช้งาน โทรศัพท์มือถือมีความสำคัญในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การรองรับผู้ใช้งาน และปริมาณข้อมูลที่มาจากผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น โดยสถานีฐานมาโครเพียงอย่างเดียวนั้นเป็นเรื่องยาก ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์มือถือจึงได้มีการคิดหาวิธีการที่ช่วยแก้ไขปัญหานี้ โดยการติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กภายในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโครเพื่อรองรับปริมาณข้อมูลภายในพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก และภายในอาคารที่เป็นจุดอับสัญญาณ เช่น บริเวณเขตเมืองที่มีคนอาศัยอยู่เยอะ โดยเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮทเน็ต ปัญหาที่ตามมาคือ การเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ รวมทั้งปัญหาที่ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกัน เนื่องมาจากกำลังส่งของสถานีฐานที่แตกต่างกัน โดยหนึ่งในวิธีการแก้ไข คือการนำวิธีการก่อรูปล้าคืบเชิงพิคคมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาล่าคืบ โดยวิธีการก่อรูปล้าคืบเชิงพิคคนั้นเป็นวิธีการที่มีพื้นฐานมาจากการก่อรูปล้าคืบ ซึ่งเป็นการปรับล้าคืบหลักไปยังผู้ใช้ที่เราต้องการ และปรับจุดศูนย์กลางไปยังผู้ใช้ที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อเป็นการลดสัญญาณแทรกสอดที่จะเกิดขึ้น ซึ่งประเภทของการก่อรูปล้าคืบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การก่อรูปล้าคืบแบบสลับล้าคืบ โดยวิธีการคือ จะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแล้วจากนั้นจะมีเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดี คือมีความซับซ้อนน้อย แต่มีข้อเสียคือ การลดสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด อาจเนื่องมาจากจำนวนล้าคืบที่มีจำกัด ส่วนอีกประเภทคือ การก่อ

รูปลาคลิ้นแบบปรับตัว โดยวิธีการนี้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักตามสัญญาณที่รับเข้ามา ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้ แม่นยำว่าการก่อรูปลาคลิ้นแบบสลับลาคลิ้น แต่มีข้อเสียคือ ระบบมีความซับซ้อนและต้องการระบบที่ประมวลผลได้รวดเร็ว นอกจากการนำการก่อรูปลาคลิ้นไปแก้ไขปัญหาเรื่องการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์แล้วนั้น ยังมีหลายงานวิจัยที่นำวิธีการก่อรูปลาคลิ้นเชิงพิคัดมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลกันของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน เนื่องมาจากกำลังส่งที่ต่างชนิดกันของสถานีฐานแต่ละชนิด ทำให้ผู้ใช้ที่ได้รับสถานีฐานขนาดเล็กได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ต่ำ

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่สามารถช่วยทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในเครือข่ายเฮเทอเน็ต มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยทำการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร เพื่อเป็นการเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานขนาดเล็ก

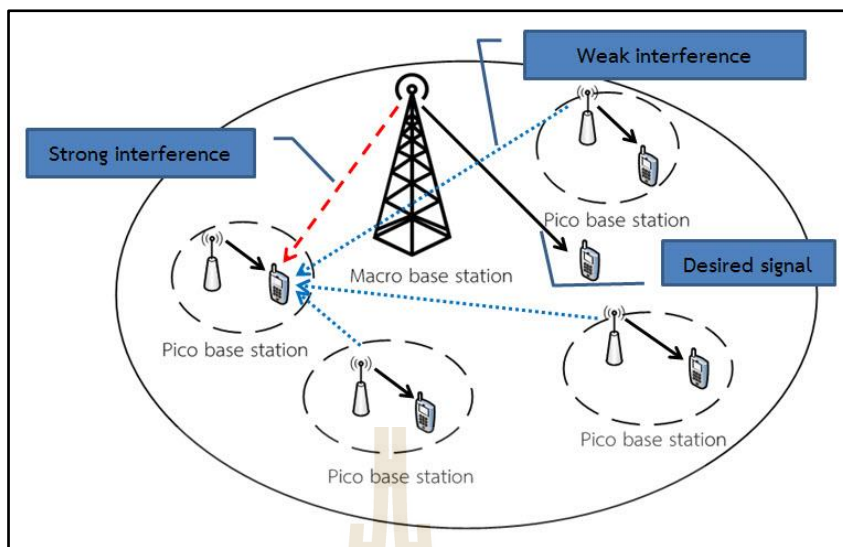
3.3 โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองแบบ

ในส่วนนี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดต่าง ๆ สำหรับการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยการกำหนดสถานีฐาน การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก เงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก และการหาค่ามุมของสัญญาณที่มาถึง ซึ่งเป็นส่วนของการกำหนดเมทริกซ์ช่องสัญญาณ

3.3.1 การจำลองสถานีฐานและค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของเครือข่ายเฮเทอเน็ตที่ใช้ในการจำลองแบบ ประกอบไปด้วยสถานีฐานมาโครจำนวน 1 สถานี และสถานีฐานพิโคจำนวน 4 สถานี โดยสถานีฐานพิโคจะวางอยู่ภายในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร และแต่ละสถานีฐานให้บริการผู้ใช้สถานีฐานละ 1 คน ซึ่งตำแหน่งของสถานีฐานพิโค และตำแหน่งของผู้ใช้จะถูกสุ่มขึ้นใหม่ทุกครั้ง แต่ละสถานีฐานให้บริการในความถี่เดียวกัน และแต่ละสถานีฐานสร้างสัญญาณแทรกสอดซึ่งกันและกัน โดยลูกศรสีดำ คือ สัญญาณที่ต้องการ ลูกศรสีแดง คือ สัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานมาโคร และลูกศรสีน้ำเงิน คือ สัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานพิโค ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาในการเชื่อมโยงขาลง ซึ่งสัญญาณที่ผู้ใช้ในสถานีฐานมาโครรับได้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$y_{U_M} = \sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_M}^M \mathbf{W}_{U_M} x_{U_M} + \sum \sqrt{P_P} \mathbf{H}_{U_M}^P \mathbf{W}_{U_P} x_{U_P} + n_{U_M} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 เครือข่ายเฮเทอเนตและการเกิดสัญญาณแทรกสอด

จากสมการที่ (3.1) พจน์แรก คือ สัญญาณที่มาจากสถานีฐานมาโคร หรือ สัญญาณที่ต้องการ พจน์ที่สอง คือ สัญญาณที่มาจากสถานีฐานพิโคทั้ง 4 สถานี หรือ สัญญาณแทรกสอด พจน์สุดท้ายคือ สัญญาณรบกวน และสัญญาณที่ผู้ใช้ในสถานีฐานพิโครับได้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$y_{U_p} = \sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p} x_{U_p} + \sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_p}^M \mathbf{W}_{U_M} x_{U_M} + \sum_{p \neq p} \sqrt{P_p} \mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p} x_{U_p} + n_{U_p} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.2) พจน์แรก คือ สัญญาณที่มาจากสถานีฐานพิโคที่ติดต่อด้วย หรือ สัญญาณที่ต้องการ พจน์ที่สอง คือ สัญญาณที่มาจากสถานีฐานมาโคร พจน์ที่สามคือ สัญญาณที่มาจากสถานีฐานพิโคอื่น ๆ หรือ สัญญาณแทรกสอด และพจน์สุดท้ายคือสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถอธิบายสัญลักษณ์ได้ดังนี้

โดย M คือ ตัวย่อของสถานีฐานมาโคร

P คือ ตัวย่อของสถานีฐานพิโค

U_M คือ ผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร

U_p คือ ผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโค

$\mathbf{H}_{U_M}^M$ คือ เมทริกซ์ช่องสัญญาณจากสถานีฐานมาโครไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร

$\mathbf{H}_{U_p}^M$ คือ เมทริกซ์ช่องสัญญาณจากสถานีฐานมาโครไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโค

$\mathbf{H}_{U_p}^p$ คือ เมทริกซ์ช่องสัญญาณจากสถานีฐานพิโคไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโค

- $\mathbf{H}_{U_M}^p$ คือ เมทริกซ์ช่องสัญญาณจากสถานีฐานพิโคไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร
 $\mathbf{H}_{U_p}^p$ คือ เมทริกซ์ช่องสัญญาณจากสถานีฐานพิโคที่อื่นไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโค
 \mathbf{W} คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก
 P คือ พลังงานของสถานีฐาน
 n คือ สัญญาณรบกวนไวต์เกาส์เซียนแบบบวก (additive white Gaussian noise)

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) สามารถนำมาเขียนสมการหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ได้ โดยค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3)

$$\begin{aligned}
 SINR_{U_M} &= \frac{|\sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_M}^M \mathbf{W}_{U_M} x_{U_M}|^2}{\sum |\sqrt{P_p} \mathbf{H}_{U_M}^p \mathbf{W}_{U_p} x_{U_p}|^2 + |n_{U_M}|^2} \\
 &= \frac{P_M |\mathbf{H}_{U_M}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2}{\sum P_p |\mathbf{H}_{U_M}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2 + \sigma_{U_M}^2} \\
 &= \frac{\frac{P_M}{\sigma_{U_M}^2} |\mathbf{H}_{U_M}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2}{\sum \frac{P_p}{\sigma_{U_M}^2} |\mathbf{H}_{U_M}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2 + \frac{\sigma_{U_M}^2}{\sigma_{U_M}^2}} \\
 &= \frac{\rho_M |\mathbf{H}_{U_M}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2}{\sum \rho_p |\mathbf{H}_{U_M}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2 + 1}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวน ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.4)

$$\begin{aligned}
 SINR_{U_p} &= \frac{|\sqrt{P_p} \mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p} x_{U_p}|^2}{|\sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_p}^M \mathbf{W}_{U_M} x_{U_M}|^2 + \sum_{p' \neq p} |\sqrt{P_{p'}} \mathbf{H}_{U_p}^{p'} \mathbf{W}_{U_{p'}} x_{U_{p'}}|^2 + |n_{U_p}|^2} \\
 &= \frac{P_p |\mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2}{P_M |\mathbf{H}_{U_p}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2 + \sum_{p' \neq p} P_{p'} |\mathbf{H}_{U_p}^{p'} \mathbf{W}_{U_{p'}}|^2 + \sigma_{U_p}^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SINR_{U_p} &= \frac{\frac{P_p}{\sigma_{U_p}^2} |\mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2}{\frac{P_M}{\sigma_{U_p}^2} |\mathbf{H}_{U_p}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2 + \sum_{p' \neq p} \frac{P_{p'}}{\sigma_{U_p}^2} |\mathbf{H}_{U_p}^{p'} \mathbf{W}_{U_{p'}}|^2 + \frac{\sigma_{U_p}^2}{\sigma_{U_p}^2}} \\
&= \frac{\rho_p |\mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2}{\rho_M |\mathbf{H}_{U_p}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2 + \sum_{p' \neq p} \rho_{p'} |\mathbf{H}_{U_p}^{p'} \mathbf{W}_{U_{p'}}|^2 + 1}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

โดย $\frac{P_M}{\sigma_{U_M}^2}$ และ $\frac{P_p}{\sigma_{U_p}^2}$ คือ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน $\sigma_{U_M}^2$ และ $\sigma_{U_p}^2$ คือพลังงานของสัญญาณรบกวน (noise power) $|x_{U_M}|^2$ และ $|x_{U_p}|^2$ คือพลังงานของสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งในการจำลองแบบเมื่อทราบค่าของ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนจะสามารถนำมาหาค่าวิสัยสมการของผู้ใช้ได้ดังสมการที่ (3.5)

$$throughput = \frac{C}{B} = \log_2(1 + SINR) \tag{3.5}$$

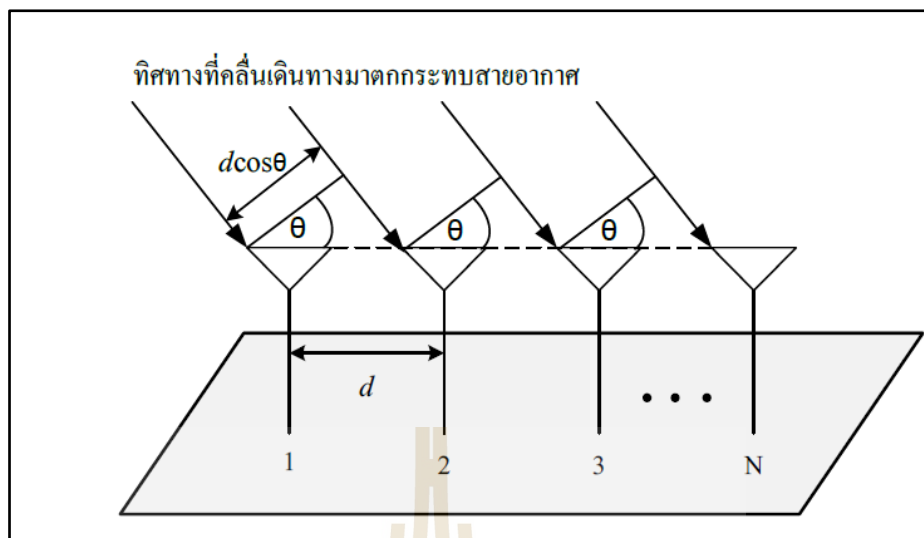
โดย C คือ ความจุช่องสัญญาณ (capacity) และ B คือ แบนด์วิดท์ (bandwidth)

3.3.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก

จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) \mathbf{W} คือค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งใช้ถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการก่อรูปลำคลื่น ไปยังผู้ใช้ที่ต้องการ โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด ขนาด $N \times K$ ดังแสดงในสมการ (3.6) เราเรียกเมทริกซ์นี้ว่า รหัสในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่ง N คือจำนวนสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น ส่วน K คือจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานหรือจำนวนลำคลื่นที่เราต้องการ เราสามารถหารหัสในการก่อรูปลำคลื่นได้เพียงกำหนดจำนวนสายอากาศที่ใช้และจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w(1,1) & \dots & \dots & w(1,K) \\ w(2,1) & \dots & \dots & w(2,K) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w(N,1) & \dots & \dots & w(N,K) \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

หลังจากที่ได้รหัสในการก่อรูปลำคลื่นแล้ว เราสามารถหาแบบรูปการแผ่พลังงาน ได้โดยใช้สมการ



รูปที่ 3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

ตัวประกอบแถวลำดับ โดยทั่วไปแล้วในตำราต่างๆ จะนิยามใช้สายอากาศไอโซทรอปิก (isotropic antenna) ที่มีคุณสมบัติแผ่พลังงานในทุกทิศทางรอบตัวเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับจึงมีค่าเท่ากับตัวประกอบแถวลำดับนั่นเอง ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นสามารถหาได้จากสมการ (3.7)

$$AF = \sum_{n=1}^N w(n, k) e^{j2\pi(n-1)(d/\lambda)\cos\theta} \quad (3.7)$$

โดยที่ $w(n, k)$ คือรหัสในการก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศต้นที่ n และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบที่ k ส่วน N คือจำนวนสายอากาศที่วางตัวเรียงกันเป็นแนวตรงหรือวางตัวแบบ $N \times 1$ ต้น ส่วน d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศ และ θ คือมุมตกกระทบของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ $\lambda/2$ โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของสายอากาศ เนื่องจากความถี่ในส่วนของสายอากาศและความถี่ของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศมีค่าเท่ากัน ดังนั้นความยาวคลื่นของสายอากาศและความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศจะมีค่าเท่ากันด้วย สมการ (3.7) จึงสามารถลดรูปได้ดังสมการ (3.8)

$$\begin{aligned}
 AF &= \sum_{n=1}^N w(n,k) e^{j2\pi(n-1)(1/2)\cos\theta} \\
 &= \sum_{n=1}^N w(n,k) e^{j\pi(n-1)\cos\theta}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานได้หลากหลายไม่ว่าจะใช้สายอากาศกี่ต้น และต้องการแบบรูปการแผ่พลังงานกี่แบบ ซึ่งจำนวนสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นไม่ควรมากเกินไป เนื่องจากจะทำให้อุปกรณ์ส่งสัญญาณหรืออุปกรณ์รับสัญญาณมีขนาดใหญ่เกินไป สำหรับจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นก็ควรมากเกินไปเช่นกัน เนื่องจากระบบจะมีการเปรียบเทียบอัตราขยายสัญญาณ และปรับเปลี่ยนแบบรูปการแผ่พลังงานอยู่ตลอดเวลา หากมีจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานมากเกินไปอาจทำให้ระบบทำงานช้าลงได้ โดยรหัสในการก่อรูปลำคลื่นอย่างง่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถหาได้จากสมการ (3.9)

$$w(n, \theta) = \sum_{n=1}^N e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \tag{3.9}$$

จากสมการ (3.9) เราสามารถคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในเมทริกซ์ของรหัสในการก่อรูปลำคลื่น โดยกำหนดมุม $0 - 180$ องศาเพิ่มขึ้นครั้งละ 30 องศา และใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น จำนวน 4 ต้น ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

ก) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 0°

$$\begin{aligned}
 w_1(1,0^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos 0} = e^{j\pi(0)\cos 0} \\
 &= e^{j0} = e^0 = 1
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
 w_1(2,0^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos 0} = e^{j\pi(2-1)\cos 0} = e^{j\pi \cos 0} \\
 &= \cos(\pi \cos 0) + j \sin(\pi \cos 0) = -1
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 w_1(3,0^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos 0} = e^{j\pi(3-1)\cos 0} = e^{j2\pi \cos 0} \\
 &= \cos(2\pi \cos 0) + j \sin(2\pi \cos 0) = 1
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
 w_1(4,0^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos 0} = e^{j\pi(4-1)\cos 0} = e^{j3\pi \cos 0} \\
 &= \cos(3\pi \cos 0) + j \sin(3\pi \cos 0) = -1
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

ข) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 30°

$$\begin{aligned} w_1(1,30^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(1-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(0)\cos(\pi/6)} \\ &= e^{j0} = e^0 = 1 \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} w_1(2,30^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(2-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(1)\cos(\pi/6)} \\ &= \cos(\pi \cos(\pi/6)) + j \sin(\pi \cos(\pi/6)) = -0.91 + j0.41 \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} w_1(3,30^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(3-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(2)\cos(\pi/6)} \\ &= \cos(2\pi \cos(\pi/6)) + j \sin(2\pi \cos(\pi/6)) = 0.67 - j0.75 \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} w_1(4,30^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(4-1)\cos(\pi/6)} = e^{j\pi(3)\cos(\pi/6)} \\ &= \cos(3\pi \cos(\pi/6)) + j \sin(3\pi \cos(\pi/6)) = -0.303 + j0.95 \end{aligned} \quad (3.17)$$

ค) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 60°

$$\begin{aligned} w_1(1,60^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(1-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(0)\cos(\pi/3)} \\ &= e^{j0} = e^0 = 1 \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} w_1(2,60^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(2-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(1)\cos(\pi/3)} \\ &= \cos(\pi \cos(\pi/3)) + j \sin(\pi \cos(\pi/3)) = j \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} w_1(3,60^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(3-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(2)\cos(\pi/3)} \\ &= \cos(2\pi \cos(\pi/3)) + j \sin(2\pi \cos(\pi/3)) = -1 \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} w_1(4,60^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(4-1)\cos(\pi/3)} = e^{j\pi(3)\cos(\pi/3)} \\ &= \cos(3\pi \cos(\pi/3)) + j \sin(3\pi \cos(\pi/3)) = -j \end{aligned} \quad (3.21)$$

ง) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 90°

$$\begin{aligned} w_1(1,90^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(1-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(0)\cos(\pi/2)} \\ &= e^{j0} = e^0 = 1 \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} w_1(2, 90^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(2-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(1)\cos(\pi/2)} \\ &= \cos(\pi \cos(\pi/2)) + j \sin(\pi \cos(\pi/2)) = 1 \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} w_1(3, 90^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(3-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(2)\cos(\pi/2)} \\ &= \cos(2\pi \cos(\pi/2)) + j \sin(2\pi \cos(\pi/2)) = 1 \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} w_1(4, 90^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(4-1)\cos(\pi/2)} = e^{j\pi(3)\cos(\pi/2)} \\ &= \cos(3\pi \cos(\pi/2)) + j \sin(3\pi \cos(\pi/2)) = 1 \end{aligned} \quad (3.25)$$

จ) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 120°

$$\begin{aligned} w_1(1, 120^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(1-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(0)\cos(2\pi/3)} \\ &= e^{j0} = e^0 = 1 \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} w_1(2, 120^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(2-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(1)\cos(2\pi/3)} \\ &= \cos(\pi \cos(2\pi/3)) + j \sin(\pi \cos(2\pi/3)) = -j \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} w_1(3, 120^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(3-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(2)\cos(2\pi/3)} \\ &= \cos(2\pi \cos(2\pi/3)) + j \sin(2\pi \cos(2\pi/3)) = -1 \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} w_1(4, 120^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(4-1)\cos(2\pi/3)} = e^{j\pi(3)\cos(2\pi/3)} \\ &= \cos(3\pi \cos(2\pi/3)) + j \sin(3\pi \cos(2\pi/3)) = j \end{aligned} \quad (3.29)$$

ฉ) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 150°

$$\begin{aligned} w_1(1, 150^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(1-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(0)\cos(5\pi/6)} \\ &= e^{j0} = e^0 = 1 \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} w_1(2, 150^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(2-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(1)\cos(5\pi/6)} \\ &= \cos(\pi \cos(5\pi/6)) + j \sin(\pi \cos(5\pi/6)) = -0.91 - j0.41 \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} w_1(3, 150^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(3-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(2)\cos(5\pi/6)} \\ &= \cos(2\pi \cos(5\pi/6)) + j \sin(2\pi \cos(5\pi/6)) = 0.67 + j0.75 \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned}
 w_1(4,150^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(4-1)\cos(5\pi/6)} = e^{j\pi(3)\cos(5\pi/6)} \\
 &= \cos(3\pi \cos(5\pi/6)) + j \sin(3\pi \cos(5\pi/6)) = -0.303 - j0.95
 \end{aligned} \quad (3.33)$$

ข) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 180°

$$\begin{aligned}
 w_1(1,180^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(1-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(0)\cos(\pi)} \\
 &= e^{j0} = e^0 = 1
 \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned}
 w_1(2,180^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(2-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(1)\cos(\pi)} \\
 &= \cos(\pi \cos(\pi)) + j \sin(\pi \cos(\pi)) = -1
 \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned}
 w_1(3,180^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(3-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(2)\cos(\pi)} \\
 &= \cos(2\pi \cos(\pi)) + j \sin(2\pi \cos(\pi)) = 1
 \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned}
 w_1(4,180^\circ) &= e^{j\pi(n-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(4-1)\cos(\pi)} = e^{j\pi(3)\cos(\pi)} \\
 &= \cos(3\pi \cos(\pi)) + j \sin(3\pi \cos(\pi)) = -1
 \end{aligned} \quad (3.37)$$

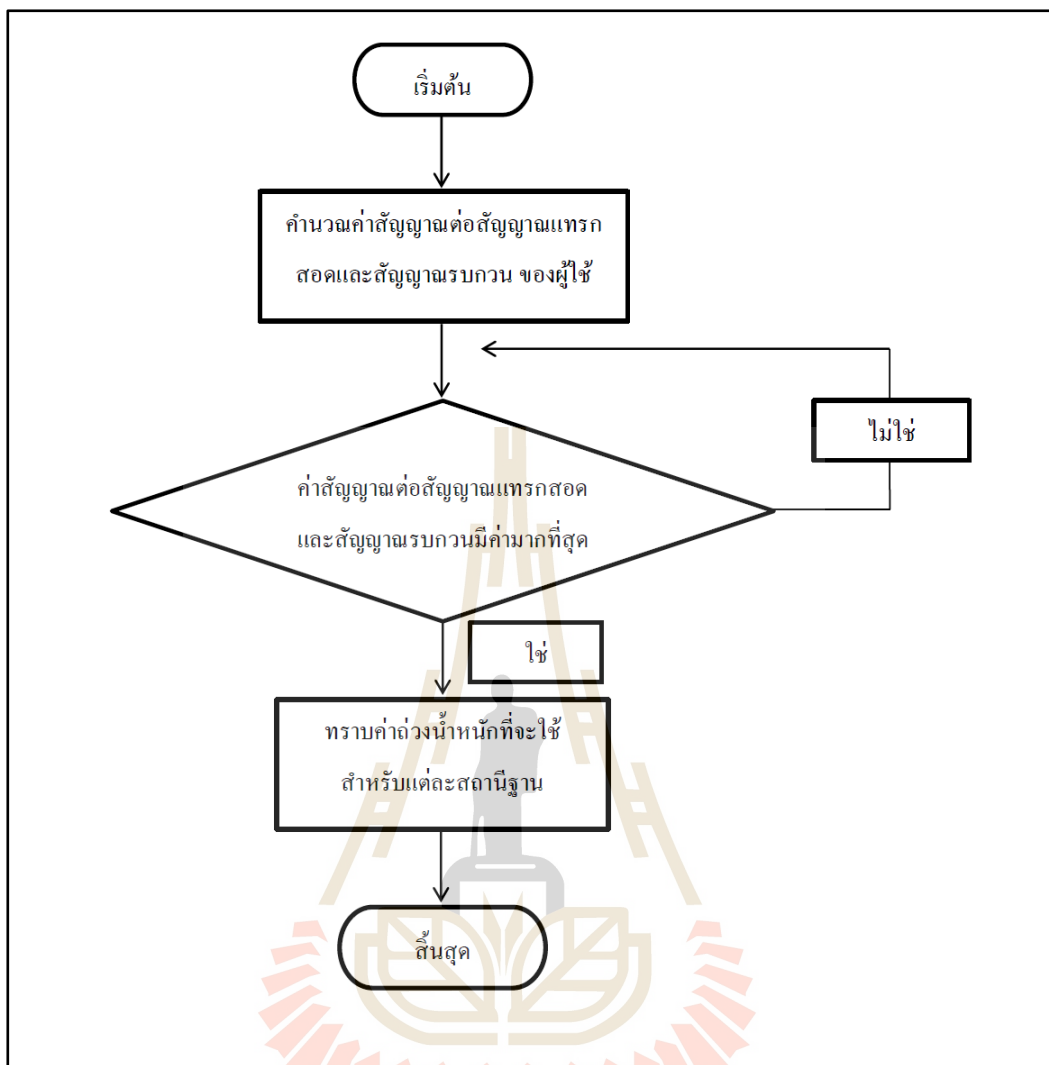
เราสามารถนำค่าถ่วงน้ำหนักในสมการ (3.10) จนถึงสมการ (3.37) เขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ ได้ดังสมการ (3.38)

$$\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -0.91 + j0.41 & j & 1 & -j & -0.91 - j0.41 & -1 \\ 1 & 0.67 - j0.75 & -1 & 1 & -1 & 0.67 + j0.75 & 1 \\ -1 & -0.30 + j0.95 & -j & 1 & j & -0.30 - j0.95 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

จากสมการ (3.38) จะเห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้นั้นมีหลายชุด จึงได้มีการใช้เงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก ดังสมการ (3.39)

$$\mathbf{W} = \arg \max |SINR|^2 \quad (3.39)$$

ซึ่งเป็นการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมากที่สุด ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังรูป 3.3 โดยขั้นแรกค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกกำหนดไว้

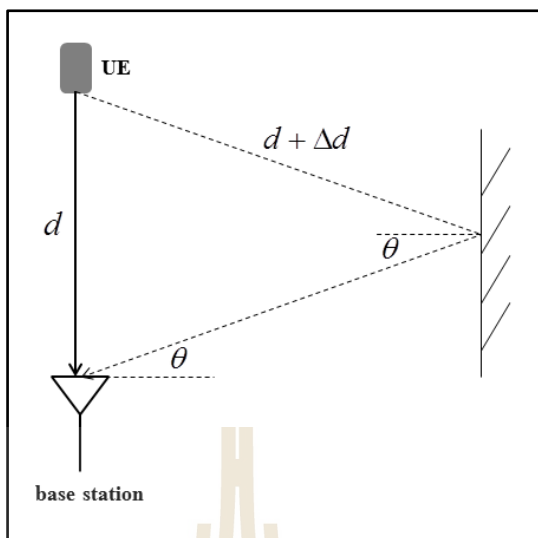


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก

จากนั้นที่สถานีฐานจะคำนวณค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน ของผู้ใช้แต่ละคน จากนั้นเปรียบเทียบค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ได้ ถ้าไม่ใช่ค่าที่มากที่สุดก็จะกลับไปคำนวณใหม่อีกรอบ โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักค่าอื่น ถ้าเป็นค่าที่มากที่สุด ค่าถ่วงน้ำหนักชุดนั้นจะถูกนำมาใช้ในการก่อรูปลำคลื่น ไปหาผู้ใช้ของแต่ละสถานีฐาน

3.3.3 การมาถึงของสัญญาณบนแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี

แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี (LTE multipath channel models) เป็นแบบจำลองมาตรฐานของ LTE ที่ถูกกำหนดโดย ITU และ 3GPP ซึ่งเป็นข้อมูลทางเทคนิคที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในยุคโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สามและสี่ โดยแบบจำลองนี้แสดงให้เห็นถึง



รูปที่ 3.4 เส้นทางมาถึงของสัญญาณ

การแพร่กระจายของสัญญาณบนสามสภาพแวดล้อมพื้นฐานที่โดดเด่น ซึ่งพารามิเตอร์หลักของแบบจำลองเหล่านี้มีดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ประกอบไปด้วยค่าความล่าช้าของสัญญาณ และค่ากำลังงานของสัญญาณ ซึ่งงานวิจัยนี้จำเป็นต้องรู้ทิศทางการเข้ามาของสัญญาณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ข้อมูลจากความล่าช้าของสัญญาณจากแบบจำลองมาใช้ในการคำนวณหาทิศทางของสัญญาณของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีได้ดังนี้

จากรูปที่ 3.4 สามารถเขียนสมการการหาทิศทางของสัญญาณที่มาถึงได้ดังนี้

$$\theta = \sin^{-1} \frac{d}{d + \Delta d} \quad (3.40)$$

เมื่อ θ คือ ทิศทางของสัญญาณ d คือ ระยะทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวางระหว่างผู้ใช้งานและสถานีฐาน

พิจารณาค่าความล่าช้าของสัญญาณ (τ) เพื่อหาระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป Δd ดังสมการ

$$\tau = \frac{d + \Delta d - d}{c} \quad (3.41)$$

เมื่อ c คือความเร็วของคลื่นในอากาศว่างจะได้ว่า

ตารางที่ 3.1 การมาถึงของสัญญาณของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี

Tap no	EPA Channel		EVA Channel		ETU Channel	
	τ (ns)	SMR (dB)	τ (ns)	SMR (dB)	τ (ns)	SMR (dB)
1	0	0.0	0	0.0	0	-1.0
2	30	-1.0	30	-1.5	20	-1.0
3	70	-2.0	150	-1.4	150	-1.0
4	90	-3.0	310	-3.6	200	0.0
5	110	-8.0	370	-0.6	230	0.0
6	190	-17.2	710	-9.1	500	0.0
7	410	-20.8	1090	-7.0	1600	-3.0
8			1730	-12.0	2300	-5.0
9			2510	-16.9	5000	-7.0

$$\Delta d = \tau \quad (3.42)$$

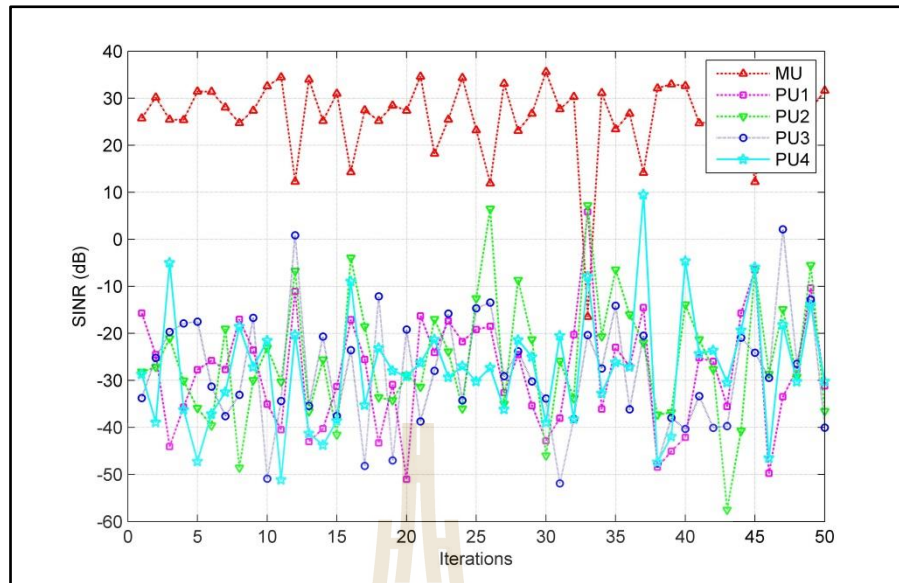
แทนสมการ (3.42) ใน (3.40) จะได้ทิศทางของสัญญาณที่มาถึงดังสมการ

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{d}{d + \tau}\right) \quad (3.43)$$

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าแบบจำลองช่องสัญญาณ EPA มีทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาทั้งหมด 7 เส้นทาง แบบจำลองช่องสัญญาณ EVA มีทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาทั้งหมด 9 เส้นทางและแบบจำลองช่องสัญญาณ ETU มีเส้นทางของสัญญาณเข้ามาทั้งหมด 9 เส้นทาง ซึ่งเป็นสัญญาณที่มาจากผู้ใช้เดียวกัน เมื่อทราบทิศทางของแต่ละแบบจำลองแล้วจากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ และนำไปเขียนเป็นเมทริกซ์ช่องสัญญาณ ซึ่งในวิทยานิพนธ์เลือกใช้แบบจำลองช่องสัญญาณ ETU ซึ่งเหมาะสำหรับพื้นที่ในเมือง ดังนั้นจะได้สัญญาณที่มาถึงสายอากาศจำนวน 9 เส้นทาง โดยจะเขียนสัญญาณที่มาถึงสายอากาศได้ดังนี้

$$h_1 = A_1 e^{j\pi(1-1)\cos\theta_1} + A_2 e^{j\pi(1-1)\cos\theta_2} + \dots + A_9 e^{j\pi(1-1)\cos\theta_9} \quad (3.44)$$

$$h_2 = A_1 e^{j\pi(2-1)\cos\theta_1} + A_2 e^{j\pi(2-1)\cos\theta_2} + \dots + A_9 e^{j\pi(2-1)\cos\theta_9} \quad (3.45)$$



รูปที่ 3.5 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน โดยวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่

$$h_3 = A_1 e^{j\pi(3-1)\cos\theta_1} + A_2 e^{j\pi(3-1)\cos\theta_2} + \dots + A_9 e^{j\pi(3-1)\cos\theta_9} \quad (3.46)$$

$$h_4 = A_1 e^{j\pi(4-1)\cos\theta_1} + A_2 e^{j\pi(4-1)\cos\theta_2} + \dots + A_9 e^{j\pi(4-1)\cos\theta_9} \quad (3.47)$$

- โดย h_1 คือ สัญญาณที่มาถึงสายอากาศต้นที่ 1
 h_2 คือ สัญญาณที่มาถึงสายอากาศต้นที่ 2
 h_3 คือ สัญญาณที่มาถึงสายอากาศต้นที่ 3
 h_4 คือ สัญญาณที่มาถึงสายอากาศต้นที่ 4
 A คือ กำลังงานของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศ โดยสามารถดูค่าได้จากตารางที่ 3.1
 θ คือ มุมของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศ คำนวณได้จากสมการ (3.43)

และในท้ายที่สุดจะสามารถเขียนเมทริกซ์ช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = [h_1 \quad h_2 \quad h_3 \quad h_4] \quad (3.48)$$

เมื่อได้เมทริกซ์ที่ต้องการแล้ว จึงได้มีการจำลองแบบเบื้องต้น ผลที่ได้คือ ค่าสัญญาต่อสัญญา แทรกสอดและสัญญาครบถ้วน ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานพิโคทั้ง 4 สถานีสถาน มีค่าต่ำกว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานมาโครเป็นอย่างมาก แต่ในขณะที่เดียวกัน เมื่อค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอด และสัญญาครบถ้วนของผู้ใช้ในสถานีสถานมาโครมีค่าต่ำลง ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนของผู้ใช้ในสถานีสถานพิโคจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5 ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานมาโคร เพื่อให้ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนของผู้ใช้ในสถานีสถานพิโคมีค่าเพิ่มมากขึ้น

3.4 การออกแบบการก่อรูปลำคลื่นเพื่อให้ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนของผู้ใช้ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

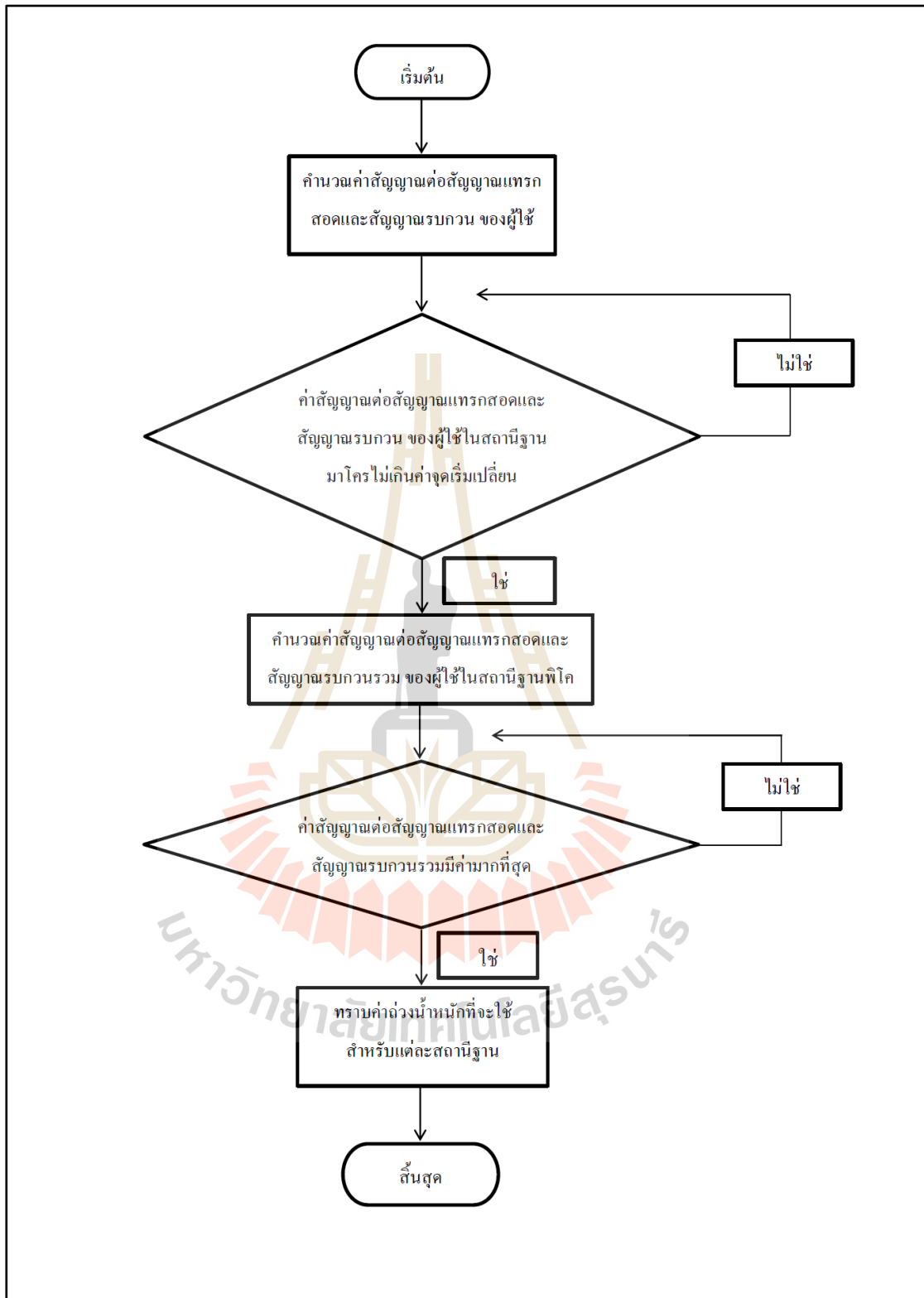
จากปัญหาข้างต้นที่ผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานพิโคได้รับค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนน้อยกว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานมาโคร เนื่องจากกำลังส่งที่แตกต่างกันของสถานีสถานแต่ละชนิด ทำให้เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นอาจมีบางส่วนของลำคลื่น ไปรบกวนผู้ใช้ที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนสำหรับผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานมาโคร โดยมีความคาดหวังว่าเมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน จะส่งผลให้ผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานพิโคได้รับค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน จากรูป 3.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบที่นำเสนอ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในแต่ละสถานีสถานจะมีค่าถ่วงน้ำหนักที่เตรียมไว้แล้ว และแต่ละสถานีสถานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่มุม 0 – 180 องศา โดยห่างกันครั้งละ 30 องศา ในแต่ละสถานีสถานจะมีการคำนวณค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนเพื่อเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม ซึ่งเป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนไม่เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ เพื่อไม่ให้เกิดสัญญาแทรกสอดไปยังผู้ใช้อื่น และในขั้นตอนมาบางครั้งจะมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าถ่วงน้ำหนักหลายค่าที่ทำให้ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอด และสัญญาครบถ้วนไม่เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มเงื่อนไขขึ้นมาอีกหนึ่งเงื่อนไข คือการหาค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีสถานพิโคมารวมกัน แล้วจากนั้นจึงเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนของผู้ใช้ในสถานีสถานพิโครวมมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะได้ค่าถ่วงน้ำหนักที่จะถูกนำไปใช้ในการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการ ดังนั้นเงื่อนไขที่ใช้เลือกค่าถ่วงน้ำหนักจะมีสองเงื่อนไขคือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญา

รบกวนน้อยกว่าจุดเริ่มเปลี่ยน และ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนรวมมากที่สุด

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ การกำหนดค่าและตำแหน่งของสถานีฐาน ประเภทของสถานีฐาน การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก และผลการจำลองแบบเบื้องต้นที่แสดงให้เห็นว่า ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิกะมีค่าน้อยกว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครอย่างมาก จึงได้มีการคิดวิธีการเพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้กับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าสถานีฐานมาโครนั้นมีกำลังส่งที่แรงกว่าสถานีฐานพิกะ เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นอาจจะมีส่วนของลำคลื่นเกิดการแทรกสอดต่อผู้ใช้ใกล้เคียงได้





รูปที่ 3.6 แผนผังการทำงานของการทำงานของการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญารบกวนที่เท่าเทียมกันมากขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

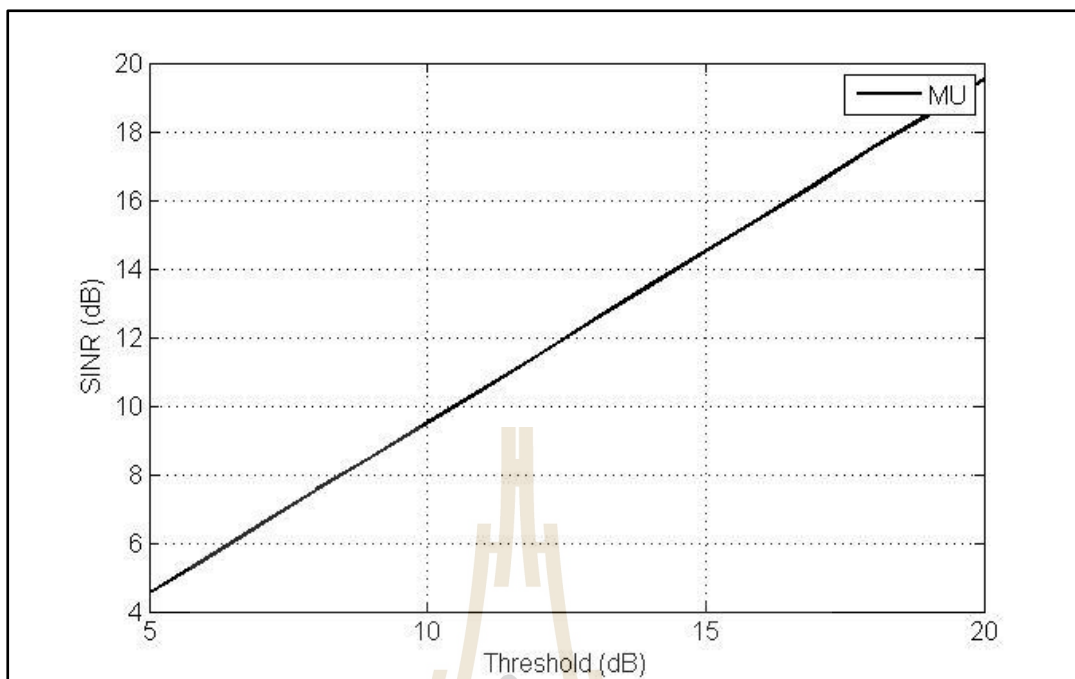
เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ในส่วนของ การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ ในสถานีฐานมาโคร เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีพิโค นอกจากนี้ยังได้มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนลำคลื่นว่าจะ ส่งผลต่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนอย่างไร

4.2 การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงประสิทธิภาพ ของการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ ในสถานีฐานมาโคร โดยเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เพื่อที่ว่าค่าสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโคมีค่าเพิ่มขึ้นมากเพียงใด ซึ่ง พารามิเตอร์เบื้องต้นที่กำหนดในการจำลองแบบเป็นดังตาราง 4.1 โดยกำลังส่งของสถานีฐานมาโคร และสถานีฐานพิโคอ้างอิงจากงานวิจัยของ (Khandekar *et al*, 2010) ตำแหน่งของสถานีฐาน มาโครจะถูกกำหนดไว้คงที่ แต่ตำแหน่งของสถานีฐานพิโค และผู้ใช้ทั้งหมด จะถูกสุ่มขึ้นใหม่ทุกครั้ง โดยจำนวนครั้งที่สุ่มคือ 200 ครั้ง เพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างที่หลากหลาย จากนั้นจะนำค่าสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

กำลังส่งของสถานีฐานมาโคร	13 dB
กำลังส่งของสถานีฐานพิโค	-7 dB
ตำแหน่งของสถานีฐานมาโคร	จุด (0,0)
ตำแหน่งของสถานีฐานพิโค	ตำแหน่งถูกสุ่มขึ้นใหม่ทุกครั้ง
ตำแหน่งของผู้ใช้	ตำแหน่งถูกสุ่มขึ้นใหม่ทุกครั้ง
จำนวนครั้งที่สุ่ม	200 ครั้ง เพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างที่หลากหลาย

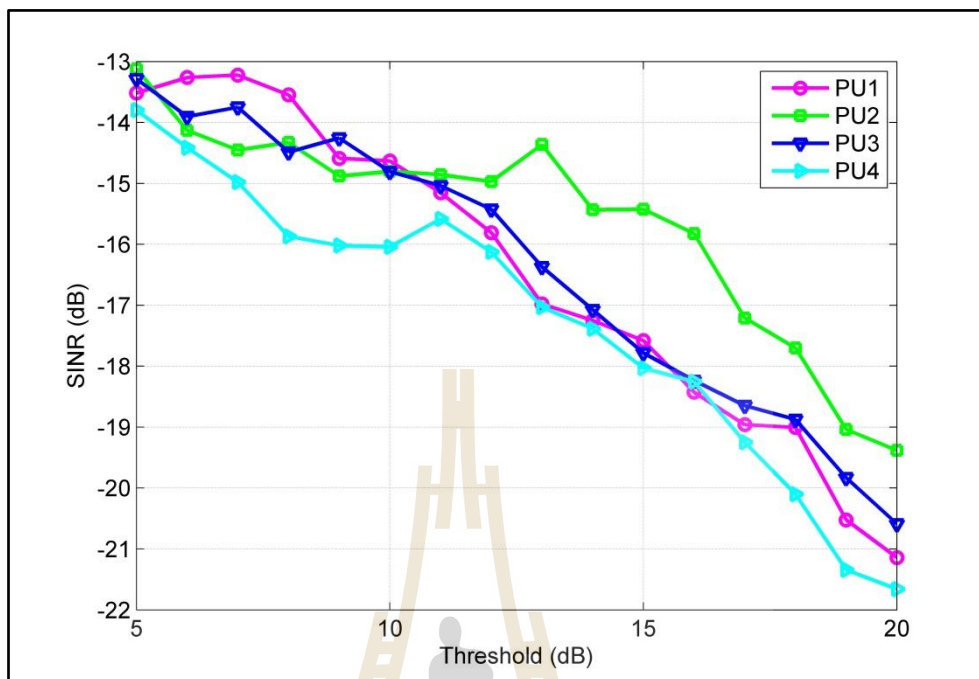


รูปที่ 4.1 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร

4.2.1 การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

ในส่วนนี้เป็นการสังเกตการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนจะส่งผลอย่างไรต่อผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโค โดยมีการเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนด้วย โดยค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการสุ่มตำแหน่งของสถานีฐานพิโค และตำแหน่งของผู้ใช้จำนวน 200 ครั้ง และกำหนดค่ากำลังส่งของสถานีฐานดังตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครเมื่อมีการเปลี่ยนค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจาก 5 – 20 dB พบว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครจะได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนตามค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด และในรูปที่ 4.2 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคทั้ง 4 สถานี พบว่าเมื่อค่าจุดเริ่มเปลี่ยนมีค่าลดลง ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน พบว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครจะลดลง และค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนนั้นมีค่าดีขึ้น

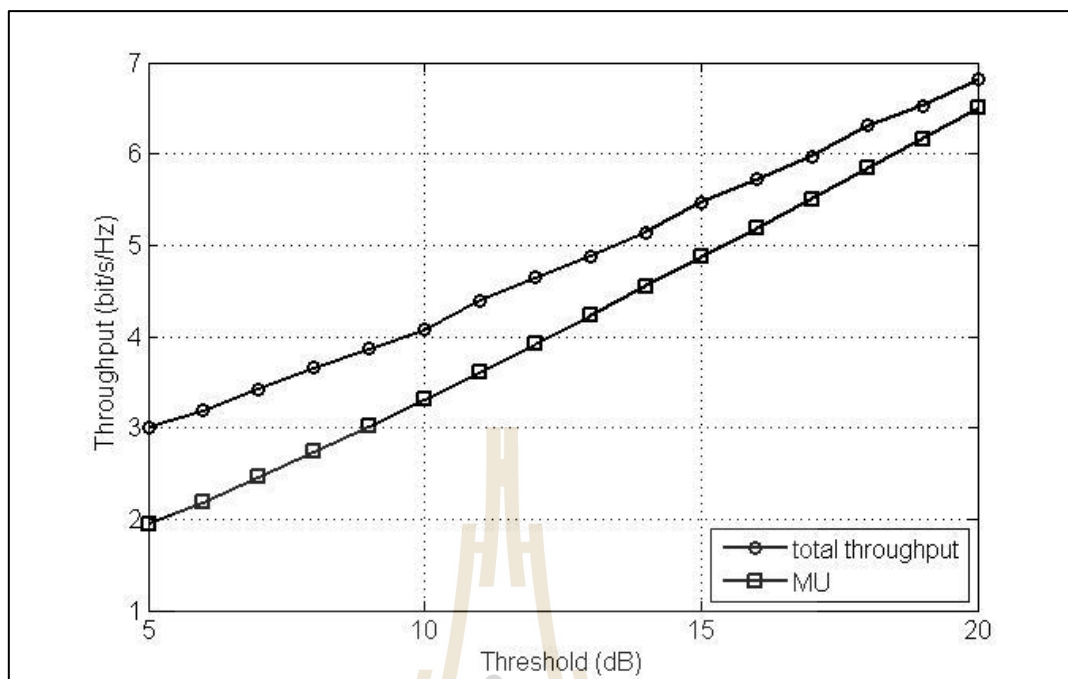


รูปที่ 4.2 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโค

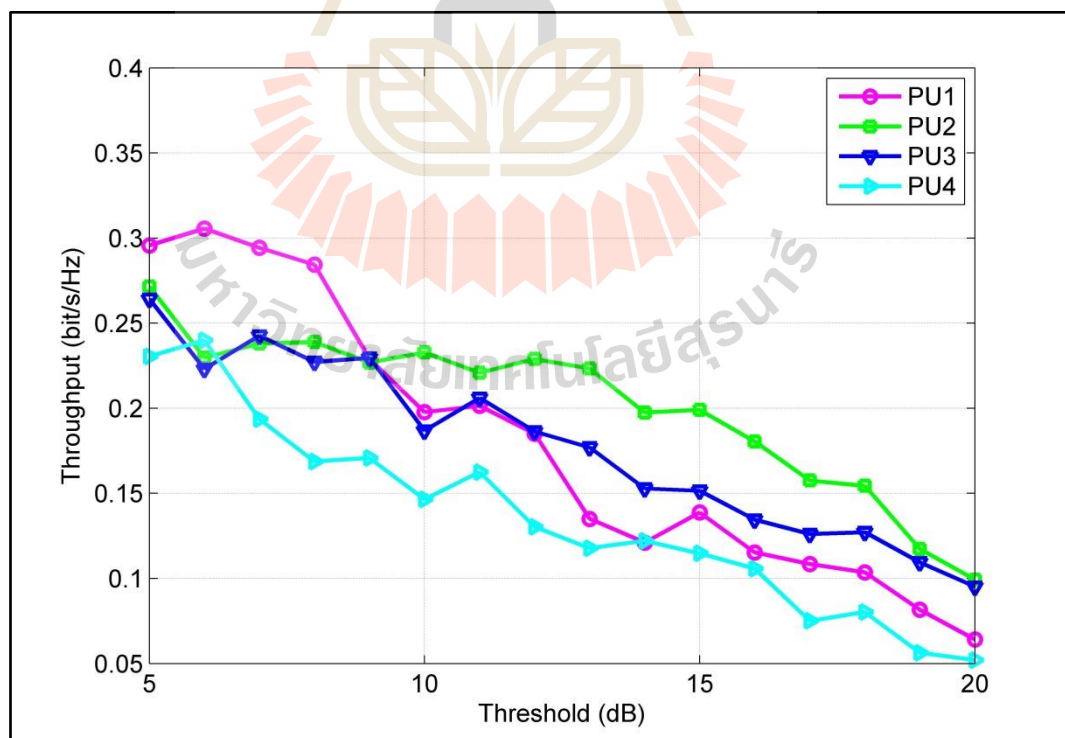
ตาราง 4.2 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนเมื่อไม่มีการกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน

MU	PU1	PU2	PU3	PU4
25.93227 dB	-28.3914 dB	-25.6038 dB	-26.9825 dB	-27.6114 dB

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครและค่าวิสัยสามารถรวมของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจาก 5 – 20 dB พบว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครจะได้รับค่าวิสัยสามารถซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปตามกราฟของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน หรือตามค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด และในรูปที่ 4.4 แสดงค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพีโคทั้ง 4 สถานี พบว่าเมื่อค่าจุดเริ่มเปลี่ยนมีค่าน้อย ค่าวิสัยสามารถจะมีค่ามาก เมื่อค่าจุดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าวิสัยสามารถมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับกราฟแสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่มีค่าลดลงเมื่อค่าจุดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน พบว่าค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครจะลดลง และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโคทั้ง 4 สถานี จะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่ทำให้ค่าวิสัยสามารถนั้นมีค่าดียิ่งขึ้น



รูปที่ 4.3 ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร และค่าวิสัยสามารถรวมของระบบ



รูปที่ 4.4 ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค

ตาราง 4.3 ค่าวิสัยสามารถเมื่อไม่การกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน

MU	PU1	PU2	PU3	PU4	Total
8.721 bps/Hz	0.081 bps/Hz	0.092 bps/Hz	0.077 bps/Hz	0.058 bps/Hz	9.028 bps/Hz

จากสมการ (3.3) และ (3.4) ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกนำมาคำนวณในสมการสำหรับการหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนด้วย ซึ่งค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสามารถหาได้จากสัญญาณที่ต้องการหารด้วยสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน ดังนั้นเมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร เป็นเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก เมื่อพิจารณาที่สมการที่ (3.4) ซึ่งใช้หาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค เมื่อเรากำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งในสมการนี้จะเปรียบเสมือนเป็นส่วนของสัญญาณแทรกสอด ทำให้ส่วนของสัญญาณแทรกสอดมีค่าน้อยลง ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่า เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่น จะมีการเลือกลำคลื่นที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคน้อยที่สุด ทำให้ผู้ใช้ในสถานีฐานพิโคได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโครก็ต้องมีความแรงเพียงพอเพื่อให้ผู้ใช้ยังสามารถติดต่อสื่อสารได้ และเมื่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้เพิ่มขึ้นด้วย

4.2.2 การกำหนดค่าจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสม

ในส่วนนี้เป็นการจำลองแบบเพื่อดูว่าเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนลำคลื่นจะมีผลต่อการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนหรือไม่ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือถ้ามีจำนวนลำคลื่นที่มากขึ้นจะมีประโยชน์ต่อการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนหรือไม่

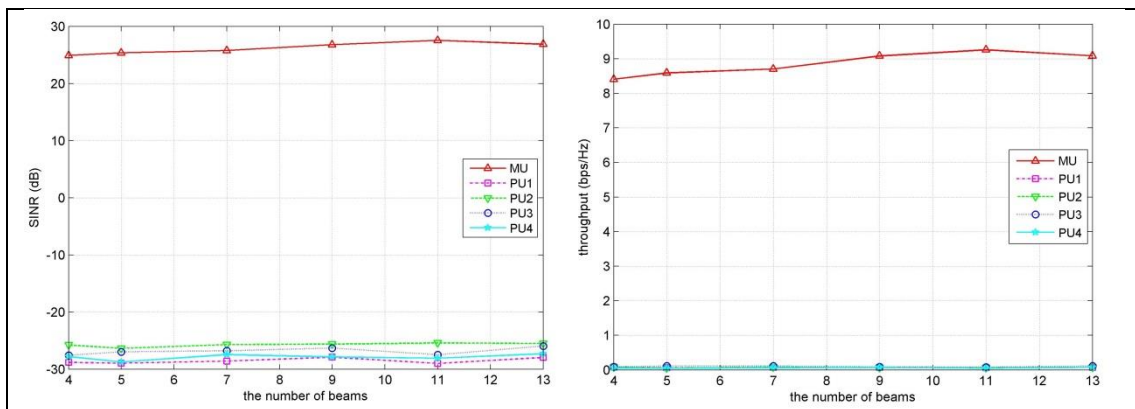
จากรูปที่ 4.5 – 4.8 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร และสถานีฐานพิโค เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนลำคลื่นจาก 4 – 13 ลำคลื่น โดยมีทั้งกรณีที่ไม่มีการกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน และมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ได้แก่ 4.3 dB 10.3 dB และ 22.7 dB ตามลำดับ โดยค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดนั้น ได้เลือกมาจากตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงการแมปบิงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนกับประเภทของการมอดูเลชันที่ต้องใช้ เช่น เมื่อได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน เท่ากับ 11.7 dB ข้อมูลจะถูกมอดูเลตแบบ 16QAM ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกมา 3 ค่า โดยเป็นตัวแทนของระดับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่จะใช้ในการมอดูเลชันแต่ละแบบ คือ QPSK 16QAM และ 64QAM

ตารางที่ 4.4 การแมปปี้งค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน กับการมอดูเลชัน

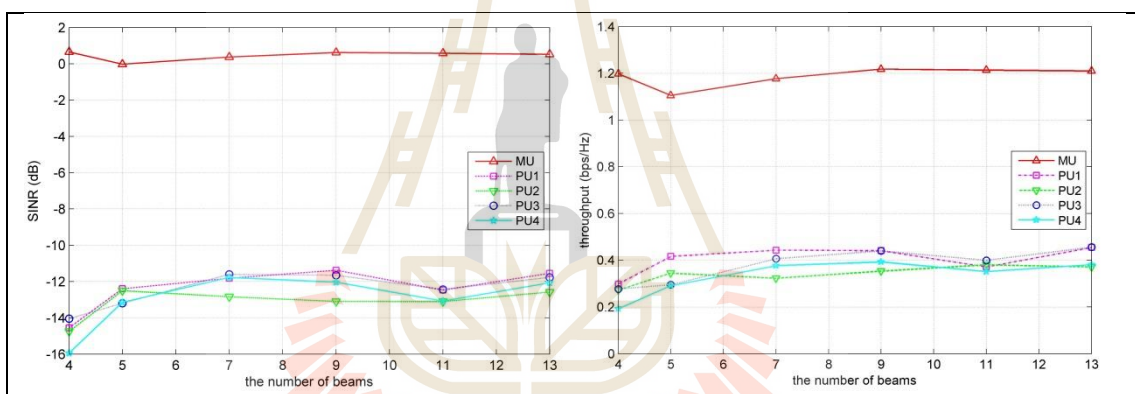
CQI Index	modulation	coding rate	spectrum efficiency (bps/Hz)	SINR estimate (dB)
1	QPSK	0.0762	0.1523	-6.7
2	QPSK	0.1172	0.2344	-4.7
3	QPSK	0.1885	0.3770	-2.3
4	QPSK	0.3008	0.6016	0.2
5	QPSK	0.4385	0.8770	2.4
6	QPSK	0.5879	0.1758	4.3
7	16QAM	0.3691	1.4766	5.9
8	16QAM	0.4785	1.9141	8.1
9	16QAM	0.6016	2.4063	10.3
10	64QAM	0.4551	2.7305	11.7
11	64QAM	0.5537	3.3223	14.1
12	64QAM	0.6504	3.9023	16.3
13	64QAM	0.7539	4.5234	18.7
14	64QAM	0.8525	5.1152	21.0
15	64QAM	0.9258	5.5547	22.7

จากผลการจำลองแบบจะเห็นว่าในรูปที่ 4.5 ที่ไม่มีการกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโคมีค่าต่ำมาก ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มจำนวนลำคลื่นก็ตาม เช่นเดียวกับค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพีโคก็มีค่าต่ำ ถึงแม้จะมีการเพิ่มจำนวนลำคลื่น จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เท่ากับ 4.3 dB พบว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโคมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เมื่อสังเกตที่จำนวนลำคลื่นพบว่า ที่ 4 ลำคลื่นค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโคจะมีค่าต่ำที่สุดในขณะที่จำนวนลำคลื่น ที่ 7 ลำคลื่น ให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสูงสุด เมื่อพิจารณาค่าวิสัยสามารถ จำนวนลำคลื่นที่ให้ค่าวิสัยสามารถสูงสุด คือที่ 7 – 9 ลำคลื่น

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เท่ากับ 10.3 dB พบว่าจำนวนลำคลื่นส่งผลเพียงเล็กน้อย โดยค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีค่าประมาณ -10 ถึง -16 dB โดยช่วงที่



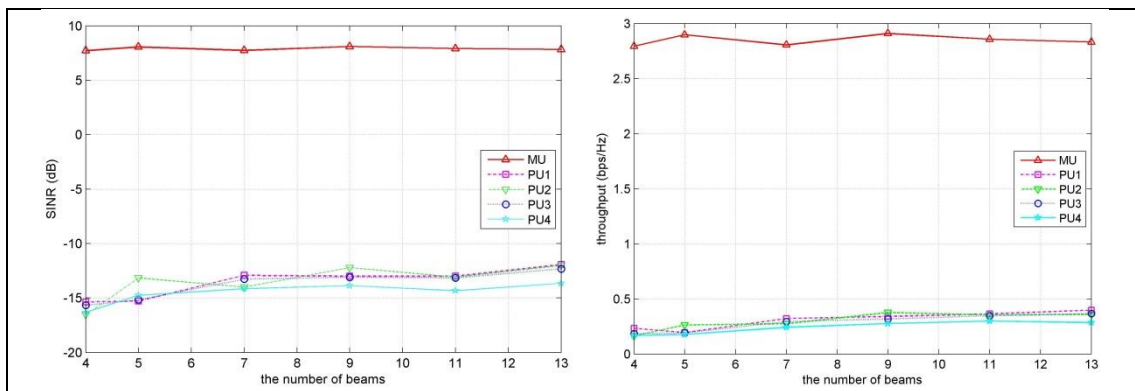
รูปที่ 4.5 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน



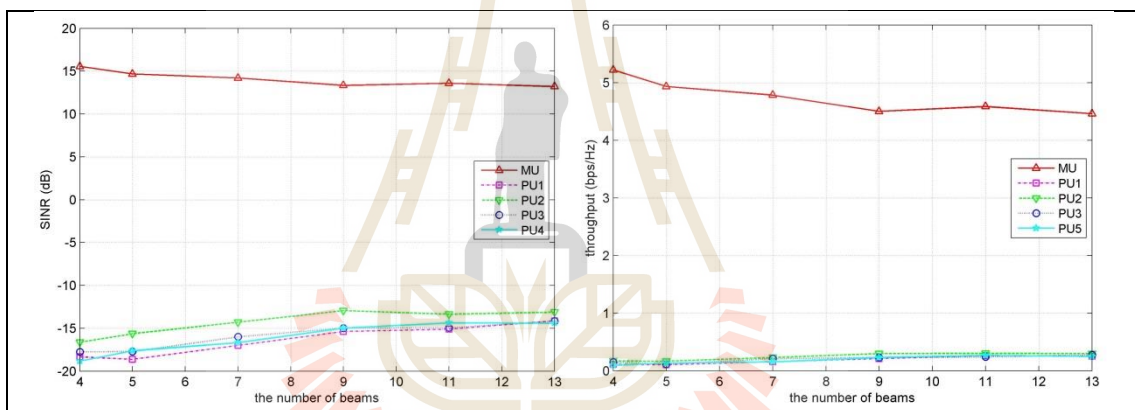
รูปที่ 4.6 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 4.3 dB

ทำให้มีค่าสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน มีค่ามากที่สุดคือที่ 7 – 9 ลำคลื่น เมื่อสังเกตที่ค่าวิสัยสามารถพบว่า ค่าวิสัยสามารถมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนลำคลื่นเพิ่มขึ้น และเริ่มลดลงเมื่อจำนวนลำคลื่นเท่ากับ 11 ลำคลื่น โดยจำนวนลำคลื่นที่ให้ค่าวิสัยสามารถสูงสุด คือที่จำนวนลำคลื่นเท่ากับ 9 ลำคลื่น

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เท่ากับ 22.7 dB พบว่า เมื่อจำนวนลำคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อจำนวนลำคลื่นเท่ากับ 11 ลำคลื่น ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโคจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อสังเกตที่ค่าวิสัยสามารถพบว่า



รูปที่ 4.7 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 10.3 dB



รูปที่ 4.8 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 22.7 dB

ค่าวิสัยสามารถมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนลำคลื่นเพิ่มขึ้น และค่าวิสัยสามารถจะเริ่มลดลงเมื่อจำนวนลำคลื่นเท่ากับ 11 ลำคลื่น โดยจำนวนลำคลื่นที่ทำให้ค่าวิสัยสามารถสูงสุดคือที่จำนวนลำคลื่นเท่ากับ 9 ลำคลื่น

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ ของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งจากการสอบถามผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์มือถือพบว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่สามารถใช้งานได้ จะอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 dB นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงจำนวนลำคลื่น ส่งผลต่อค่าวิสัยสามารถ และค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ ซึ่งจำนวนลำคลื่นที่ทำให้ได้รับค่าวิสัยสามารถ

และ ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนมีค่ามากที่สุดที่จำนวนลำคลื่นเท่ากับ 7 ถึง 9 ลำคลื่น ส่วนสาเหตุที่เมื่อจำนวนลำคลื่นเท่ากับ 11 ลำคลื่น ค่าวิสัยสามารถ และ ค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนลำคลื่นก็เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดสัญญาแทรกสอดให้เพิ่มขึ้นด้วย

4.3 สรุป

จากผลการจำลองแบบ พบว่าการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนสำหรับผู้ใช้ในสถานีฐานมาโครนั้นส่งผลอย่างมากต่อค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วน และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโค โดยค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้มีค่าน้อย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาว่าจำนวนลำคลื่นว่าจะส่งผลอย่างไรบ้าง ถ้ามีการเพิ่มจำนวนลำคลื่น และมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนด้วย ผลที่ได้คือจำนวนลำคลื่นนั้นส่งผลต่อการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน และการเพิ่มจำนวนลำคลื่นนั้นไม่ได้ส่งผลดีต่อค่าสัญญาต่อสัญญาแทรกสอดและสัญญาครบถ้วนเสมอไป



บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันที่การสื่อสารมีความสำคัญในชีวิตประจำวันมากขึ้น ส่งผลให้การรองรับผู้ใช้และปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นโดยสถานีฐานมาโครเพียงอย่างเดียวนั้นเป็นเรื่องยาก ผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือจึงได้มีการคิดหาวิธีการที่ช่วยแก้ไขปัญหานี้ ซึ่งวิธีนั้นคือการติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร โดยเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮทเน็ต ปัญหาที่ตามมา คือการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างสถานีฐาน ซึ่งวิธีแก้ไขคือการนำวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคคมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยประเภทของการก่อรูปลำคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น โดยวิธีการคือ จะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแล้วจากนั้นจะมีเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดี คือมีความซับซ้อนน้อย แต่มีข้อเสียคือ การลดสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด ส่วนอีกประเภทคือ การก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัว โดยวิธีการนี้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักตามสัญญาณที่รับเข้ามา ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้แม่นยำกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น แต่มีข้อเสียคือ ระบบมีความซับซ้อนและต้องการระบบที่ประมวลผลได้รวดเร็ว นอกจากการนำการก่อรูปลำคลื่นไปแก้ปัญหาระบบการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์แล้วนั้น ยังมีงานวิจัยที่นำวิธีการก่อรูปลำคลื่นมาแก้ไขปัญหาค่าความไม่สมดุลกันของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน เนื่องมาจากกำลังส่งที่ต่างชนิดกันในสถานีฐานแต่ละชนิด วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในเครือข่ายเฮทเน็ตมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร เมื่อมีการจำลองแบบ ผลที่ได้พบว่า การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ในสถานีฐานมาโครนั้นส่งผลอย่างมากต่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค โดยค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้มีค่าน้อย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับจำนวนลำคลื่นว่าจะส่งผลอย่างไรถ้ามีการเพิ่มจำนวนลำคลื่น เมื่อไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน และมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนด้วย ผลที่ได้คือจำนวนลำคลื่นนั้นส่งผล และการเพิ่มจำนวนลำคลื่นนั้น ไม่ได้ส่งผลดีต่อค่า

สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนเสมอไป

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการจำลองแบบนั้น เนื่องจากมีจำนวนสถานีฐานหลายสถานีฐานและแต่ละสถานีฐานมีจำนวนค่าถ่วงน้ำหนักหลายค่า ทำให้เมื่อต้องหาค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ต้องใช้เวลานานในการรวบรวมข้อมูล

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ ได้นำเสนอการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ภายในเครือข่ายเสทเน็ตเท่าเทียมกันมากขึ้น โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งในงานนี้ยังไม่ได้ข้อสรุปที่แน่ชัดว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนควรมีค่าเป็นเท่าใดถึงจะยุติธรรมต่อทั้งผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร และผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโค เช่น มีการเปรียบเทียบค่า โดยสมมติมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 5 และ 10 dB จะเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคก็เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ถ้าหากค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีการเพิ่มขึ้นไม่ต่างกันมาก ก็ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้ต่ำถึง 5 dB นอกจากนี้การปรับรูปลำคลื่นเพียงอย่างเดียวนั้นอาจจะยังไม่เพียงพอ ถ้าหากมีการพัฒนาโดยร่วมกับการใช้วิธีการจัดสรรกำลัง (power allocation) อาจจะทำให้วิธีการนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้นไปอีก

รายการอ้างอิง

- มนต์ทิพย์ภา อูฑารสกุล. 2556. การประมวลผลสัญญาณสายอากาศแวลลำดับ. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Khandekar, A., Bhushan, N., Tingfang, J., and Vanghi, V. (2010). **LTE-advanced:Heterogeneous networks**. European Wireless Conference (EW); 12-15 April, 2010; Lucca, Italy, p. 978-982.
- Hamza, A.S., Khalifa, S.S., Hamza, H.S., and Elsayed, K. (2013). **A survey on inter-cell interference coordination techniques in OFDMA-based cellular networks**. IEEE Commu. Surveys Tutorials, 15(4), 1642-1670.
- Nagaraj, S., Hsieh, F., Pengoria, D., Raghavendra, M.R., Schamberger, M., and Honig, M. (2014). **Coordinated beamforming in clustered HetNets: System design and performance evaluation**. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW); 6-9 April, 2014; Istanbul, Turkey, p. 70-75.
- Oguejiofor, O., and Zhang, L. (2016). **Heuristic Coordinated Beamforming for Heterogeneous Cellular Network**. Proceedings of the IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring); 15-18 May, 2016; Nanjing, China, p. 1-5.
- Belschner, J., Rakocevic, V., and Habermann, J. (2015). **The effect of out of cluster interference on coordinated beamforming in LTE-A HetNets**. Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW); 8-12 June, 2015; London, UK, p. 203-209.
- Li, Q., Yang, Y., and Fang, S. (2010). **Zero-forcing beamforming with limited feedback in coordinated multi-point transmission**. Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM); 23-25 September, 2010; Chengdu, China, p. 1-4.
- Li, Y., Li, J., Zhang, L., and Peng, M. (2013). **Adaptive heterogeneous coordinated beamforming algorithm in LTE-advanced systems**. Proceedings of the IEEE Wireless

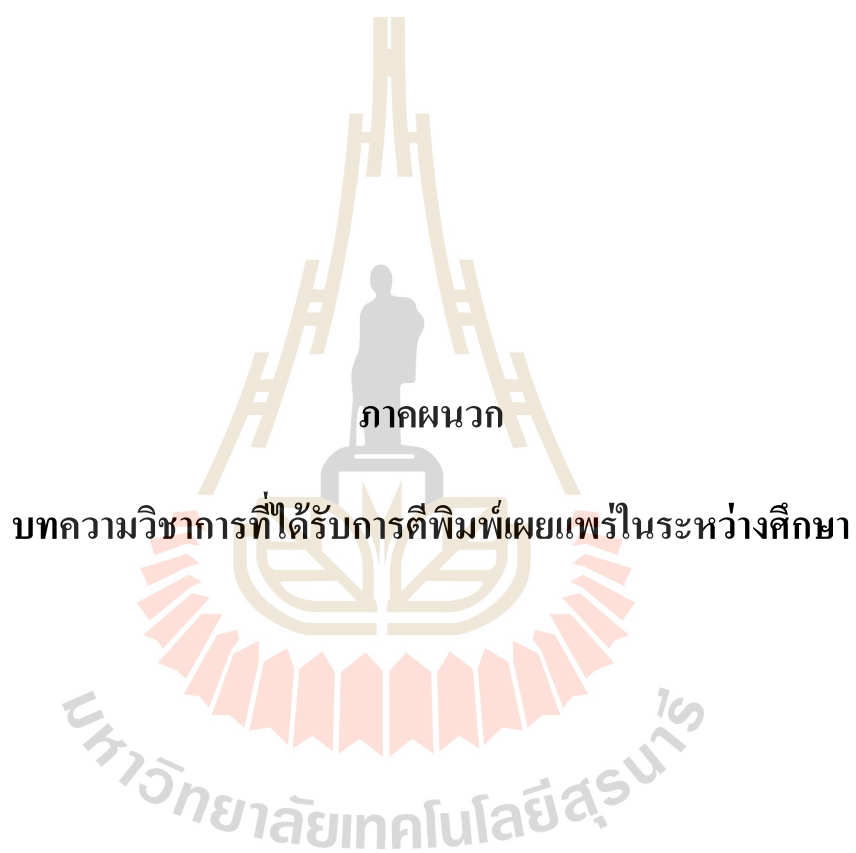
- Communications and Networking Conference (WCNC); 7-10 April, 2013; Shanghai, China, p. 1893-1897.
- Khan, M.H.A. and Lee, M.H. (2012). **Zero-forcing beamforming with block diagonalization scheme for Coordinated Multi-Point transmission.** P
- Kim, J., Han, Y., and Lee, S. H. (2013). **An Efficient Downlink** roceedings of the 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC); 15-17 October, 2012; Jeju Island, South Korea, p. 152-156. **Coordinated Beamforming for Heterogeneous Networks.** Proceedings of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall); 2-5 September, 2013; Las Vegas, NV, USA, p. 1-5.
- Huang, Z., Li, B., and Liu, M. (2011). **Coordinated Beamforming of CoMP with limited feedback.** International Conference on Network Computing and Information Security (NCIS); 14-15 May, 2011; Guilin, China, p. 138-141.
- Baracca, P., Boccardi, F., Braun, V., and Tulino, A. (2012). **Base station selection and per-cell codebook optimization for CoMP with joint processing.** Proceedings of the IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC); 9-12 September, 2012; Sydney, NSW, Australia, p. 2329-2334.
- Park, H., Park, S.H., Kim, J.S., and Lee, I. (2013). **SINR balancing techniques in coordinated multi-cell downlink systems.** IEEE Transactions on Wireless Communications, 12(2):626-635.
- Cumanan, K., Musavian, L., Lambotharan, S., and Gershman, A. B. (2010). **SINR balancing technique for downlink beamforming in cognitive radio networks.** IEEE Signal Processing Letters, 17(2):133-136.
- Tang, Y., Hu, Y., Zhang, X., Li, O., and Yu, H. (2017). **Low-Complexity Beamforming Schemes of SINR Balancing for the Gaussian MISO Multi-Receiver Wiretap Channel.** Proceedings of the IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring); 4-7 June 2017; Sydney, NSW, Australia
- ITU-R M.1225 International Telecommunication Union. **Guidelines forevaluation of radio transmission technologies for IMT-2000.** 1997.
- Sorensen T., Mogensen P., and Frederiksen F. (2005). **Extension of The ITU channel models**

for wideband (OFDM) systems. in Proc.IEEE VTC '05, vol. 1, Sept. 2005, pp. 392–396.

R4-070572, **Proposal for LTE channel models.** 3GPP, Ericsson, Nokia, Motorola, Rohde & Schwarz, RAN4-43, May 2007.

R4-060334, **LTE Channel Models and simulations.** 3GPP, Ericsson, Elektrobit, Nokia, Motorola, Siemens, RAN4-38, Feb.2006





รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Sirada Samomob, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul and Thossaporn Chanpuek.

“Fairness Improvement for Fixed Coordinated Beamforming Scheme in HetNets.”

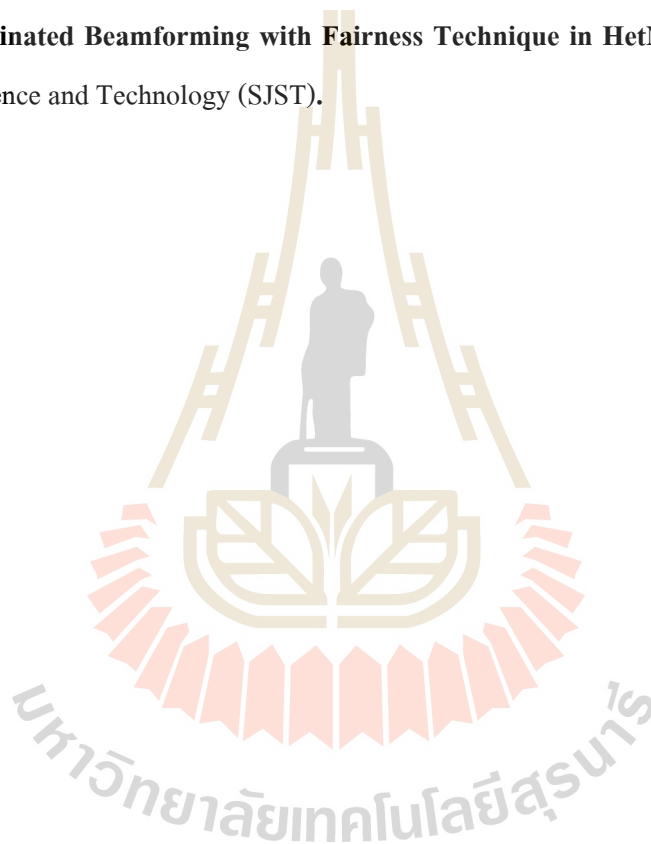
International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Nagoya,

Japan, 21-23 April 2017.

Sirada Samomob, Monthippa Uthansakul, Thossaporn Chanpuek and Pongnarin Sriploy. **“ Fixed**

Coordinated Beamforming with Fairness Technique in HetNets.” Suranaree Journal

of Science and Technology (SJST).



Fairness Improvement for Fixed Coordinated Beamforming Scheme in HetNets

Sirada Samomob¹, Peerapong Uthansakul¹, Monthippa Uthansakul¹⁺ and Thossaporn Chanpuek²

¹ School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand 30000

² Faculty of Industrial Technology, Nakhonratchasima Rajabhat University, Nakhonratchasima, Thailand, 30000

Abstract. Coordinated beamforming has been considered as one famous method to tackle the problem of inter-cell interference for NetNets. So far, users occupying macrocell have higher signal-to-interference plus noise ratio comparing to the picocell users. This paper proposes a weighting scheme for coordinated beamforming in HetNets to give a fairness to both macrocell and picocell users.

Keywords: coordinated beamforming, HetNets, fairness.

1. Introduction

So far, the number of users for mobile communications has exponentially grown as the demand for real-time chatting, viewing multimedia and transferring big data has increased year by year. As a result, a large cell in cellular systems cannot provide a best satisfaction to all users. Then, there have been the installation of small cells inside a large cell for some areas having problem of weak signal or user congestion. The networks having both large and small cells inside are called Hetero-geneous Networks (HetNets). However, these networks are facing the problem of Inter-Cell Interference (ICI) as macrocell base station employs the same frequency as picocell base station does. According to this problem, users are experiencing a low Signal-to-Interference plus Noise (SINR).

Coordinated beamforming technology employing an antenna array cooperating with signal processing units has been considered to be a solution to tackle the problem of ICI. The macro base station needs to know the position of users within its own cell as well as the position of users in picocell. This is because the macro base station can perform beamforming avoiding ICI from picocell, vice versa for the picocell.

From literatures, many researchers have paid attention to the problem of ICI [1-3]. The authors of [1] have investigated into coordinated beamforming which is capable of solving the problem of ICI for cluster HetNets. They have also utilized sounding reference signal to deal with the channel estimation. In addition, the works presented in [2] have proposed a technique for coordinated beamforming when dealing the ICI problem. In that work, the proper base station for individual users can be chosen according to average channel gain. The concept of coordinated beamforming has been also studied in [3] in order to tackle the ICI problem. In that work, the cooperation between base stations have been introduced to reduce the ICI problem. The key success for coordinated beamforming is weighting coefficients.

There are 2 groups of weighting schemes. For the first one [4-6], weighting coefficients can be real-time calculated using some efficient algorithms such as zero forcing. The authors of [4] have introduced zero forcing to coordinated beamforming. For that work, users constantly need to feedback their information to

⁺ Corresponding author. Tel.: +66848355589; fax: +6644224603.
E-mail address: mtp@sut.ac.th

base station. Also, we can the help of zero forcing for coordinated beamforming in HetNets to reduce downlink co-channel interference in [5]. In addition, the authors of [6] have introduced the cooperation between zero forcing and block diagonalization for Coordinated MultiPoint (CoMP) transmission to give rise in users' sum rate. However, the drawback of this first group is that it hardware realization is limited as the weighting coefficients have be constantly updated. Also, zero forcing works well only when the communication is ideally noise free. For the second group, the weighting coefficients are predefined [7-9]. The authors of [7] have proposed the method to reduce the effect of downlink co-channel interference between macrocell and femtocell using uplink sounding reference signal to create the predefined weighting coefficients. Also in [8], (Signal to Leakage and Noise Ratio (SLNR) and Signal to Noise Ratio (SNR) have been utilized to find the best beamforming vector for the users. Moreover, [9] has presented how to calculate the predefined weighting coefficients at base station which can be applied to Coordinated Multi-Point Joint Processing (CoMP-JP). The advantage of this group is that the calculated weighting coefficients are practical. However, from literatures, users from other base station have not been taken into account for this type of calculation.

From the motivation mentioned earlier, this paper adopts the HetNet system when weighting coefficients are predefined. Also, the position of users in other cell coverage has to be taken into account when performing ICI cancellation. In addition, the fairness of users' SINR for both macrocell and picocell has to be considered.

2. System Model

From Fig.1, HetNets consist of 1 macrocell having 4 picocells staying inside its coverage area. Please note that all cells employ the same frequency and all the assumed scenarios are downlink. The received signal at the users of macrocell can be express as

$$y_{U_M} = \sqrt{P_M} H_{U_M}^M W_{U_M} x_{U_M} + \sum \sqrt{P_p} H_{U_M}^p W_{U_p} x_{U_p} + n_{U_M} \quad (1)$$

when M and p stand for macro and pico symbol, respectively. Also, U_M and U_p represent macrocell and picocell users, respectively.

Also, the received signal at the users of picocell can be express as

$$y_{U_p} = \sqrt{P_M} H_{U_p}^M W_{U_M} x_{U_M} + \sqrt{P_p} H_{U_p}^p W_{U_p} x_{U_p} + \sum_{p \neq p} \sqrt{P_p} H_{U_p}^p W_{U_p} x_{U_p} + n_{U_p} \quad (2)$$

When $H_{U_M}^M$ and $H_{U_p}^M$ are downlink channel matrix from base station to its own users and to picocell. Also, $H_{U_M}^p$, $H_{U_M}^p$ and $H_{U_p}^p$ are downlink channel matrix from picocell base station to its own users, to macrocell's users and to other picocell's users. The weighting coefficients W is a predefined beamforming vector and n stands for additive white Gaussian noise. The SNR for macrocell and picocell users can be express as: $\rho_M = P_M / \sigma_n^2$, $\rho_p = P_p / \sigma_n^2$ where σ_n^2 is noise power.

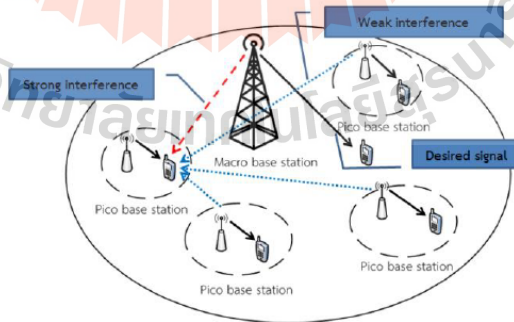


Fig. 1: HetNet model.

3. Proposed Scheme on Coordinated Beamforming

The beamforming scheme proposed in this paper is a selection of weighting coefficients which give the maximum SINR to users as follows.

$$W = \arg \max |SINR|^2 \quad (3)$$

The SINR for users staying in macrocell can be expressed as

$$SINR_{U_M} = \frac{\rho_M |H_{U_M}^M W_{U_M}|^2}{\sum \rho_p |H_{U_M}^p W_{U_p}|^2 + 1} \quad (4)$$

The SINR for users staying in picocell can be expressed as

$$SINR_{U_p} = \frac{\rho_p |H_{U_p}^p W_{U_p}|^2}{\rho_M |H_{U_p}^M W_{U_M}|^2 + \sum_{p \neq p} \rho_p |H_{U_p}^p W_{U_p}|^2 + 1} \quad (5)$$

The above expressions can provide the maximum to users for both macrocell and picocell users. However, users staying in macrocell always get higher SINR comparing with the users in picocell. This is not fair for users in picocell. Furthermore, this paper proposes a threshold to adjust the SINR for users in macrocell so we can have more degree of freedom to give rise in SINR value for picocell users. The following thresholds can give a fairness to users for both coverage areas.

$$SINR_{U_M} < 16dB, 10dB \text{ or } 5dB \quad (6)$$

Please note that those values can be referred to [10]. According to those thresholds, we can choose a proper weighting coefficient which give rise to SINR value at picocell users. However, those thresholds can be changed up to the satisfaction of network providers. The simulation results with and without setting the mentioned threshold will be discussed in next section.

4. Simulation Results and Discussions

This section shows some computer simulation of SINR for users at macrocell and picocell with and without giving the proposed thresholds as mentioned in last section. In the simulation, 1 macrocell and 4 picocells are assumed. Fig. 2 shows SINR for users staying in macrocell (MUE) and picocells (PUE1, PUE2, PUE3 and PUE4). As expected, macrocell user gets a higher SINR. Furthermore, picocell users get very low SINR in some points. This can cause a user dropped-call.

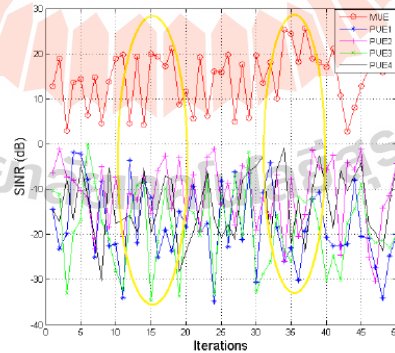


Fig. 2: SINR for users in macrocell and picocell without setting threshold.

Figs. 3 a) b) and c) show SINR values at users in macrocell and picocell when giving thresholds as the maximum SINR at macrocell user is 16 dB, 10 dB and 5 dB, respectively, as mentioned in last section. As we can see, overall SINR values at picocell users increase. This can decrease a dropped-call rate to picocell users. The reason behind this success is that we can choose some appropriate weighting coefficients which limit the SINR at macrocell users while allowing higher SINR at picocell users. However, level of SINR at macrocell users drops comparing the ones without giving threshold. As we can see, the lower threshold we set, the higher SINR at picocell users we can get. However, the final SINR may not be the best value for macrocell users but it can give fairness to picocell users. This is a tradeoff that network providers have to concern.

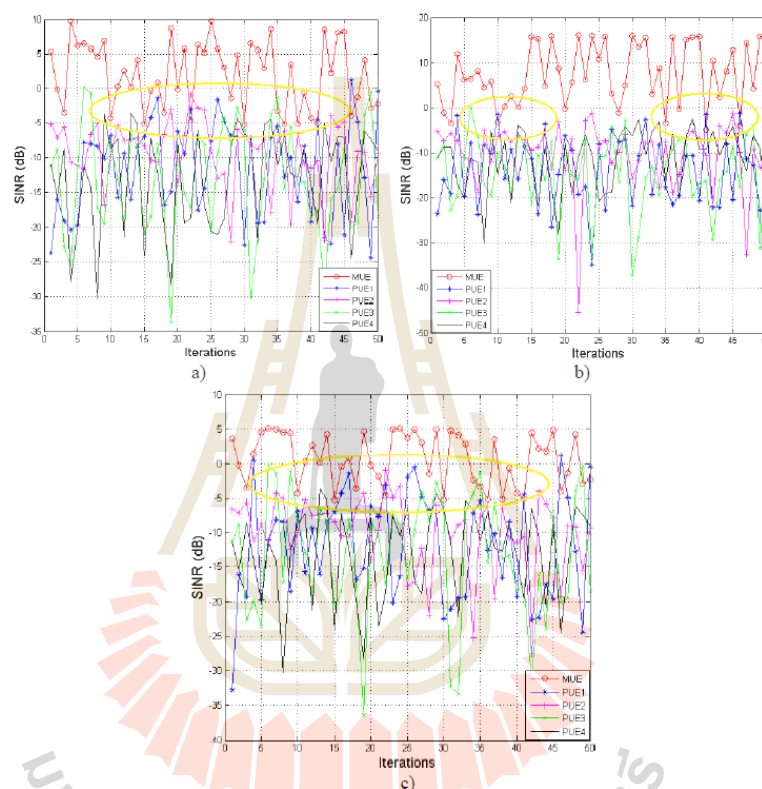


Fig.3: SINR for users in macrocell and picocell when setting threshold as SINR of macrocell users a) < 16 dB b) < 10 dB and c) < 5 dB.

5. Conclusion

This paper has investigated into the ICI problem in HetNets consisting of macrocell and picocell users, which can be solved using coordinated beamforming. So far, macrocell users always get higher SINR. So, a threshold has been introduced to give fairness to picocell users. This threshold allows us to choose some proper weighting coefficients which give rise to SINR at picocell users.

6. References

FIXED COORDINATED BEAMFORMING WITH FAIRNESS TECHNIQUE IN HETNETS

Sirada Samomob^{1*}, Monthippa Uthansakul¹, Thossaporn Chanpuek², and Pongnarin Sriploy²

Received: March 19, 2018; Revised: May 23, 2018; Accepted: May 23, 2018

Abstract

Heterogeneous networks consist of different base stations and levels of transmission power. Thus, beamforming interference is caused to the users in other base stations. Currently, a base station considers the weights by evaluating the maximum value of SINR at each user. However, the pico users still receive a weak signal. Therefore, we propose a technique to select the weighting which introduces a similar SINR between the user in a pico base station and the user in the macro base station. The SINR threshold of the macro user is defined as a condition to select the optimum weights. Moreover, we compare the proposed method with normal fixed coordinated beamforming. The simulation results show that the pico users receive the higher SINR and throughput.

Keywords: Coordinated beamforming, HetNets, fairness, SINR

Introduction

Currently, mobile phones are increasingly used in daily lives. For example, they are used for calling, sending messages, and entertainment such as online games, music streaming, and video streaming. These applications require a huge data bandwidth. In some situations, a base station cannot support a sufficient bandwidth. To solve the

problem, heterogeneous networks (HetNets) which deploy small cells into a large cell's coverage area are considered. These networks can provide higher data bandwidths in the city and in poor signal areas.

The concept of HetNets consists of applying different base stations to improve the performance of a wireless network (Khandekar

¹ School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. E-mail: M5840731@g.sut.ac.th; mtp@sut.ac.th

² Program in Industrial Education, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. E-mail: thossaporn.c@nrru.ac.th; pongnarin.s@nrru.ac.th

* Corresponding author

et al., 2010). In addition, HetNets are flexible and have low installation costs because small cells are installed in urban areas in which there are many people but the limited space means that a large cell cannot be installed. As to the benefit of HetNets, inter-cell interference occurs as a result of the same frequency being utilized in the large base station and a small base station. This problem affects users in terms of low received signal-to-interference-plus-noise (SINR).

Recently, many solutions for the inter-cell interference problem have been proposed. One of these techniques is the fractional frequency reuse technique which mitigates the inter-cell interference by dividing and reusing the frequency resources. Another popular technique is adaptive beamforming which adapts the radiation pattern by depending on the interference levels (Hamza *et al.*, 2013). The concept of adaptive beamforming is to form a main beam to the desired direction and form a null to the interference direction. However, when using adaptive beamforming in HetNets, a base station requires knowledge of all the users' locations in the network. Then, a base station provides a higher performance of beamforming since each base station selects a suitable weight for its users. Moreover, a base station reduces the inter-cell interference by pointing its null to users in other base stations.

From the literature, there are many ways for solving inter-cell interference by using coordinated beamforming. Coordinated beamforming solves inter-cell interference in cluster HetNets which are considered for different environments such as a stadium or an urban area. Besides, a bottleneck problem of coordinated beamforming is improved by utilizing a reference signal (Nagaraj *et al.*, 2014).

Coordinated beamforming solves inter-cell interference by adopting the average channel gain in order to consider a suitable base station for each user (Oguejiofor and Zhang, 2016). This paper studies an effect of inter-cell interference from other clusters which cannot exchange the channel information. The results show that coordination leads to higher effectiveness than no coordination (Belschner *et al.*, 2015).

Coordinated beamforming can point a main beam to the desired user and point nulls to the interference signal by adjusting the weighting coefficients at an individual antenna. Weight selection can be divided into 2 groups. The first group is a method to select the weights without predefining the weight coefficients. For instance, the authors have improved the zero-forcing method by limited feedback for decreasing information exchange between base stations, as presented in Li *et al.* (2010). Coordinated beamforming reduces downlink co-channel interference from a macro base station to a pico user using zero-forcing in order to define the weight coefficients (Li *et al.*, 2013). The authors have presented beamforming using the zero-forcing method and block diagonalization for coordinated multi-point (CoMP) transmission which can improve the sum rate of the users (Khan and Lee, 2012). However, this method does not work in some situations due to the limitations of the existing hardware. The zero-forcing method is suitable for a perfect channel, but it is not practical.

The second group is the method to select the weights from predefined weighting coefficients using a suitable algorithm. For instance, coordinated beamforming has been presented to mitigate the downlink co-channel interference from a macro base station to a femto user (Kim *et al.*, 2013). From that work, the uplink sounding reference signal is used to decrease the feedback signal from the base station. The weighting coefficients are selected by estimation of a signal to leakage and noise ratio (SLNR) and signal to noise ratio (SNR) in order to find the optimum beamforming vector from the codebook (Huang *et al.*, 2011). In this paper, the weighting coefficients are selected from the codebook at the base station (Baracca *et al.*, 2012). Thus, the base station can select the optimum weights which provide the best transmitted data. Moreover, this can be applied to coordinated multi-point joint processing (CoMP-JP). Sometimes, the weighting coefficients obtained from this method are not the optimum weights. Nonetheless, the advantage of this method is that the weighting coefficients are practical. Therefore, this paper uses the predefined weights method and then

selects the suitable weights for all users in the HetNet.

As the different levels of transmission power lead to a poor SINR for users in the small base stations, there has been much research attempting to solve the unfair SINR for each user. For example, the authors have presented an algorithm to solve the SINR by balancing and improving the worst user-rate for the coordinated multi-cell system as proposed by Park *et al.* (2013). The SINR balancing can be adapted to be used in cognitive radio networks for improving the SINR of the secondary user and ensures the interference leakage to the primary user is less than the required criteria (Cumanan *et al.*, 2010). The authors have proposed a low complicated algorithm for finding the optimal beamforming in which the users obtain a balanced SINR. This algorithm is based on zero-forcing and leakage (Tang *et al.*, 2017). Therefore, the predefined threshold of the SINR at the macro user is proposed in this research work to improve the SINR at the pico user. This is for fairness for the pico user.

The System Model

Figure 1 illustrates the model of the HetNets and consists of 1 macro base station and 4 pico base stations in the coverage area of the macro base station. We assume that each base station

has 1 user and all base stations use the same frequency considered in the case of the downlink. Note that herein the symbol M is the short term for the macro base station and the symbol p is the short term for the pico base stations. In addition, the symbols U_M and U_p are the macro user and the pico user, respectively. The received signal of the macro user can be expressed as follows:

$$y_{U_M} = \sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_M}^M \mathbf{W}_{U_M} x_{U_M} + \sum \sqrt{P_p} \mathbf{H}_{U_M}^p \mathbf{W}_{U_p} x_{U_p} + n_{U_M} \quad (1)$$

Likewise, the received signal of the pico user is obtained:

$$y_{U_p} = \sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p} x_{U_p} + \sqrt{P_M} \mathbf{H}_{U_p}^M \mathbf{W}_{U_M} x_{U_M} + \sum_{p \neq p'} \sqrt{P_p} \mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p} x_{U_p} + n_{U_p} \quad (2)$$

where $\mathbf{H}_{U_M}^M$ and $\mathbf{H}_{U_p}^M$ are the downlink channel matrices from the macro base station to their own user and the pico user, respectively; $\mathbf{H}_{U_M}^p$, $\mathbf{H}_{U_M}^{p'}$, and $\mathbf{H}_{U_p}^{p'}$ are the downlink channel matrices from the pico base station to their own user, the macro user, and from the other pico base stations, respectively; \mathbf{W} is the beamforming vector which is the weight that has been defined; and n is the additive white Gaussian noise. The signal to noise

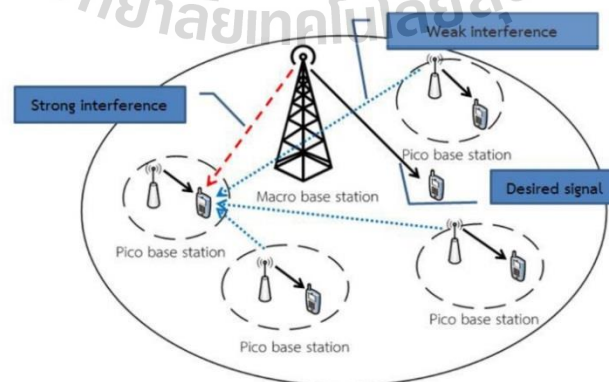


Figure 1. Macro base station and pico base stations for downlink transmission of HetNets

ratio can be expressed as follows $\rho_M = P_M / \sigma_n^2$, $\rho_p = P_p / \sigma_n^2$ where σ_n^2 is the noise power.

The equation used for selecting the weighting coefficients can be expressed as follows:

$$\mathbf{W} = \arg \max |\text{SINR}|^2 \quad (3)$$

The SINR of the macro user can be calculated from

$$\text{SINR}_{U_M} = \frac{\rho_M |\mathbf{H}_{U_M}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2}{\sum \rho_p |\mathbf{H}_{U_M}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2 + 1} \quad (4)$$

Likewise, the SINR of the pico user can be calculated from

$$\text{SINR}_{U_p} = \frac{\rho_p |\mathbf{H}_{U_p}^p \mathbf{W}_{U_p}|^2}{\rho_M |\mathbf{H}_{U_p}^M \mathbf{W}_{U_M}|^2 + \sum_{p' \neq p} \rho_{p'} |\mathbf{H}_{U_p}^{p'} \mathbf{W}_{U_{p'}}|^2 + 1} \quad (5)$$

From Equation (3), the users receive the maximum SINR, but the SINR of the macro user is higher than that of the pico users. This is not fair for the pico users who receive a poor SINR. Therefore, the threshold is defined to constrain the SINR of the macro user which is higher than that of the pico users.

The Proposed System

As mentioned above, the SINR of the macro user is higher than the SINR of the pico users. Since the macro base station has transmission power higher than the pico base stations, it is possible that nearby users receive an interference signal when the beams are formed to the desired users. Therefore, this paper proposes the defined threshold of the SINR of the macro user. The expectation is an increase of the SINR of the pico users when compared to a case in which the threshold is not defined.

Figure 2 illustrates the operating system that can be described as follows. The weighting coefficients of each base station are defined and the information is exchanged. In this paper, the weighting coefficients are defined as the angle spread from 0 to 180 degrees by increments of 30 degrees. Then, the base stations calculate the expected SINR using the different weights. The base station will check the weights which can make the SINR of the macro user less than the defined threshold. As there are a lot of weights which can make the SINR of macro user less than the threshold, the SINR of the pico users in the 4 pico base stations will be combined. Therefore, the weights are selected from 2 conditions. First, the SINR of the macro user is not higher than the threshold. Second, the total SINR of all the pico users is the maximum value.

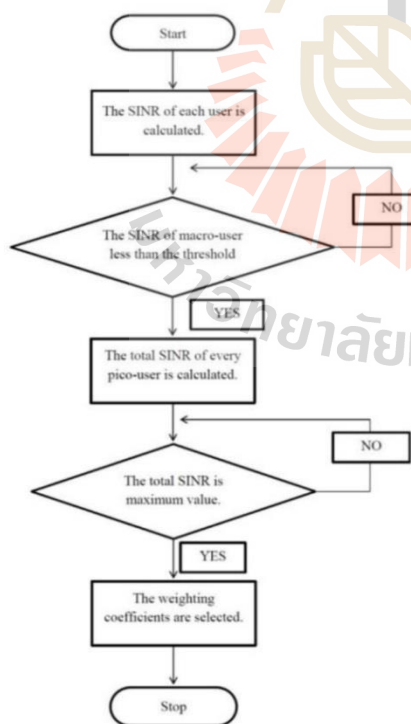


Figure 2. Flowchart of the system's operation

Simulation Result

This section illustrates and compares the results between the cases of a defined threshold and

an undefined threshold. The SINR and throughput of the system are considered.

Figure 3 shows the SINR of the macro user when varying the threshold from 5 to 20 dB. The SINR of the macro user is consistent with the defined threshold. Figure 4 shows the results when varying the threshold from 5 to 20 dB and focuses on the SINR of the pico users. The results show that the SINR of the pico users increases when the threshold decreases. Additionally, the SINR of the pico users is higher than in the case of the undefined threshold. From the results, it can be seen that the threshold affects the SINR of the pico users.

Figure 5 shows the results when varying the threshold from 5 to 20 dB to focus on the throughput of the macro user and the total throughput. Figure 6 shows the results when varying the threshold from 5 to 20 dB to focus on the throughput of the pico users. The results

show that the throughput of the macro user and the total throughput are consistent with the defined threshold, whereas the throughput of the pico users increases when the defined threshold decreases. From the results, it can be seen that the threshold affects the throughput of the pico users because the SINR value is calculated from the desired signal divided by the interference from other base stations and the noise. From Equations (4) and (5), the weights are taken into account for the desired signal and the interference signal. Therefore, the defined threshold becomes the condition for selecting the weights. The SINR of the macro user from this method may not be the best signal, but it can provide a communication. In the case of the SINR of the macro user being higher than that of the pico users, this possibly occurs when the pico users directly receive the interference from the macro base station. However, these conditions can make the

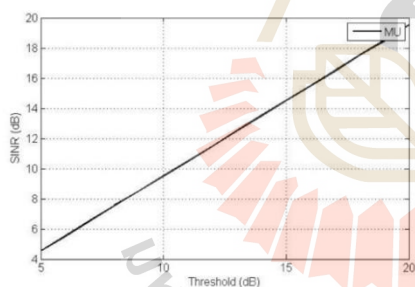


Figure 3. SINR of the macro user when varying the defined threshold

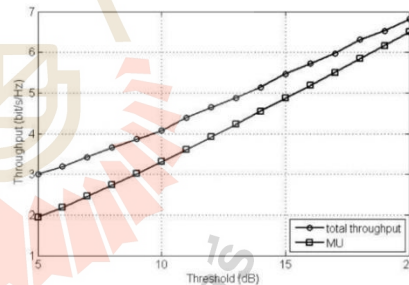


Figure 5. Throughput of the macro user when varying the defined threshold

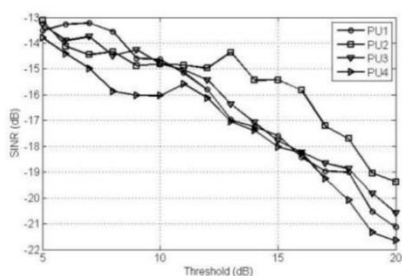


Figure 4. SINR of the pico users when varying the defined threshold

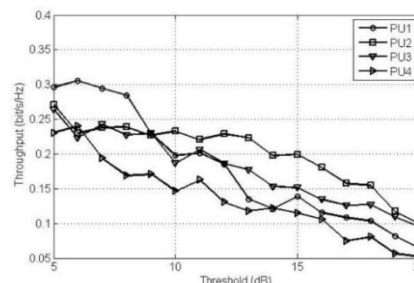


Figure 6. Throughput of the pico users when varying the defined threshold

interference from the macro base station decrease. As a result, the SINR and throughput of the pico users are higher than in the case of the undefined threshold.

We also studied the SINR and throughput of users at the macro and pico base stations when varying the number of beams. The number of beams varies from 4 to 13 beams. Figures 7 and 8 show the SINR and the throughput of users, respectively, when the threshold is not defined. The SINR and throughput of the pico users are lower than those of the macro user, even if the number of beams increases. However, the increasing number of beams slightly affects the SINR and throughput of the pico users.

Likewise, Figures 9-14 show the SINR and throughput of users when the threshold is

defined as 4.3, 10.3, and 22.7 dB. From the results, the SINR and throughput are slightly increased when the number of beams increases, since increasing the number of beams can increase the probability of the interference signal. It can be seen that the number of beams is 7 and 13 in which the SINR and throughput are similar.

The proposed technique can improve the SINR and throughput of the pico users. It means that the defined threshold of the macro user affects the SINR and throughput of the pico users but the increasing number of beams slightly affects the SINR and throughput of the pico users.

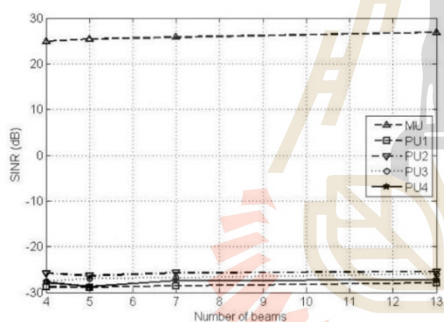


Figure 7. SINR of users when varying the number of beams. No defined threshold

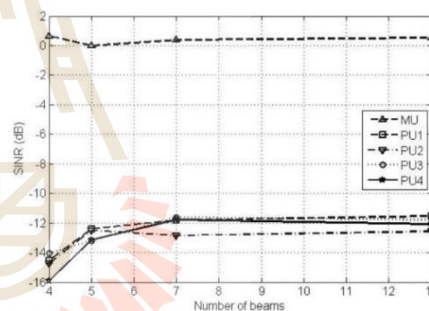


Figure 9. SINR of users when varying the number of beams. Threshold = 4.3 dB

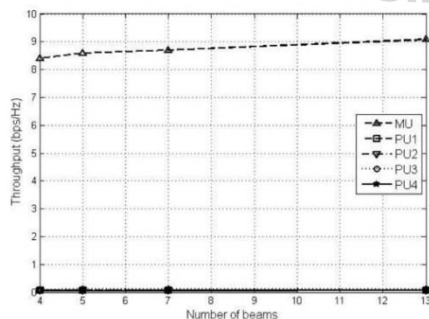


Figure 8. Throughput of users when varying the number of beams. No defined threshold

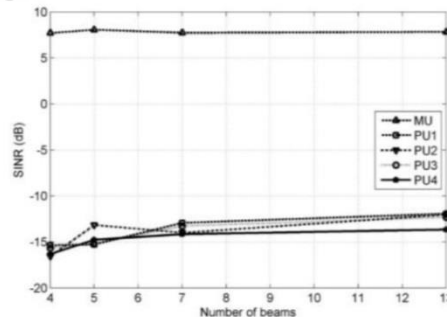


Figure 10. SINR of users when varying the number of beams. Threshold = 10.3 dB

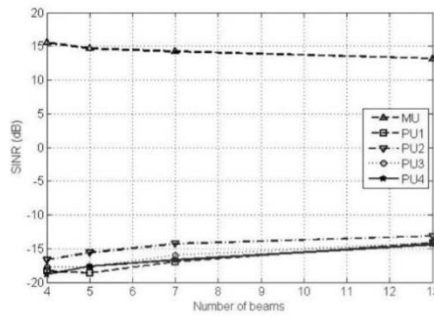


Figure 11. SINR of users when varying the number of beams. Threshold = 22.7 dB

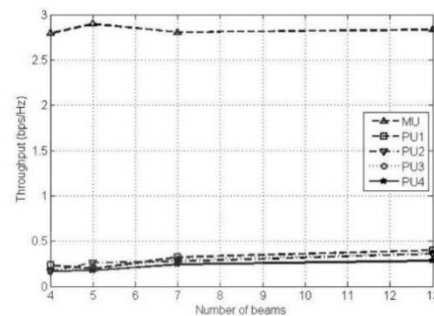


Figure 13. Throughput of users when varying the number of beams. Threshold = 10.3 dB

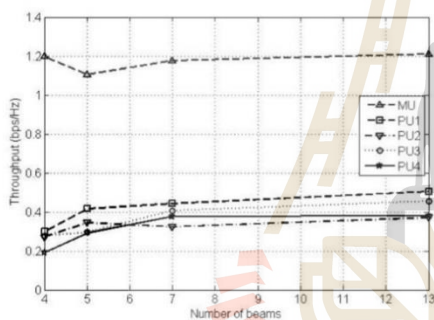


Figure 12. Throughput of users when varying the number of beams. Threshold = 4.3 dB

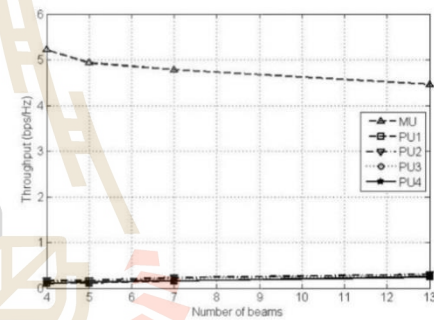


Figure 14. Throughput of users when varying the number of beams. Threshold = 22.7 dB

Conclusions

HetNets consist of different transmitting powers of base stations. That introduces an unfairness to pico users. This paper presents the weight selection which provides a fairness for the pico users. The fixed coordinated beamforming and the defined threshold are adapted to this paper. As a result, the pico users achieve the SINR and throughput higher than in the case of the undefined threshold.

Acknowledgements

This work was supported by Suranaree University Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

References

- Baracca, P., Boccardi, F., Braun, V., and Tulino, A. (2012). Base station selection and per-cell codebook optimization for CoMP with joint processing. Proceedings of the IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC); Sep 9-12, 2012; Sydney, NSW, Australia, p. 2329-2334.
- Belschner, J., Rakocevic, V., and Habermann, J. (2015). The effect of out of cluster interference on coordinated beamforming in LTE-A HetNets. Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW); June 8-12, 2015; London, UK, p. 203-209.
- Cumanan, K., Musavian, L., Lambotharan, S., and Gershman, A.B. (2010). SINR balancing technique for downlink beamforming in cognitive radio networks. IEEE Signal Proc. Let., 17(2):133-136.
- Hamza, A.S., Khalifa, S.S., Hamza, H.S., and Elsayed, K. (2013). A survey on inter-cell interference

- coordination techniques in OFDMA-based cellular networks. *IEEE Commun. Surv. Tut.*, 15(4):1642-1670.
- Huang, Z., Li, B., and Liu, M. (2011). Coordinated beamforming of CoMP with limited feedback. *International Conference on Network Computing and Information Security (NCIS)*; May 14-15, 2011; Guilin, China, p. 138-141.
- Khan, M.H.A. and Lee, M.H. (2012). Zero-forcing beamforming with block diagonalization scheme for coordinated multi-point transmission. *Proceedings of the 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*; Oct 15-17, 2012; Jeju Island, South Korea, p. 152-156.
- Khandekar, A., Bhushan, N., Tingfang, J., and Vanghi, V. (2010). LTE-advanced: Heterogeneous networks. *European Wireless Conference (EW)*; April 12-15, 2010; Lucca, Italy, p. 978-982.
- Kim, J., Han, Y., and Lee, S.H. (2013). An efficient downlink coordinated beamforming for heterogeneous networks. *Proceedings of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*; Sep 2-5, 2013; Las Vegas, NV, USA, p. 1-5.
- Li, Q., Yang, Y., and Fang, S. (2010). Zero-forcing beamforming with limited feedback in coordinated multi-point transmission. *Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*; Sep 23-25, 2010; Chengdu, China, p. 1-4.
- Li, Y., Li, J., Zhang, L., and Peng, M. (2013). Adaptive heterogeneous coordinated beamforming algorithm in LTE-advanced systems. *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*; April 7-10, 2013; Shanghai, China, p. 1893-1897.
- Nagaraj, S., Hsieh, F., Pengoria, D., Raghavendra, M.R., Schamberger, M., and Honig, M. (2014). Coordinated beamforming in clustered HetNets: System design and performance evaluation. *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*; April 6-9, 2014; Istanbul, Turkey, p. 70-75.
- Oguejiofor, O. and Zhang, L. (2016). Heuristic coordinated beamforming for heterogeneous cellular network. *Proceedings of the IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*; May 15-18, 2016; Nanjing, China, p. 1-5.
- Park, H., Park, S.H., Kim, J.S., and Lee, I. (2013). SINR balancing techniques in coordinated multi-cell downlink systems. *IEEE T. Wirel. Commun.*, 12(2): 626-635.
- Tang, Y., Hu, Y., Zhang, X., Li, O., and Yu, H. (2017). Low-complexity beamforming schemes of SINR balancing for the Gaussian MISO multi-receiver wiretap channel. *Proceedings of the IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*; June 4-7, 2017; Sydney, NSW, Australia, p. 2174-2178.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริดา สมอหมอบ เกิดเมื่อวันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2536 ที่กรุงเทพมหานคร เริ่มศึกษาชั้นประถมปีที่ 1- 6 โรงเรียนตาดเนินราษฎร์วิทยาคาร ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 3 โรงเรียนเนินสง่า จังหวัดชัยภูมิ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 - 6 โรงเรียนบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558

ปี พ.ศ. 2558 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนสนับสนุนจากทุนกิตติบัณฑิต ระหว่างศึกษาได้มีโอกาสนำเสนอบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 ฉบับ และตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 ฉบับ ดังนี้

1) 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) ในหัวข้อเรื่อง. **“Fairness Improvement for Fixed Coordinated Beamforming Scheme in HetNets.”** Nagoya, Japan, 21-23 April 2017.

2) Suranaree Journal of Science and Technology (SJST) ในหัวข้อเรื่อง. **“Fixed Coordinated Beamforming with Fairness Technique in HetNets.”** Suranaree University of Technology, Thailand