



รายงานการวิจัย

การออกแบบการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่สำหรับการเชื่อมโยงลงใน
เครือข่ายเฮทเน็ต

Design of Fixed Coordinated Beamforming for Downlink HetNet

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การออกแบบการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่สำหรับการเชื่อมโยงลงใน
เครือข่ายเฮทเน็ต

Design of Fixed Coordinated Beamforming for Downlink HetNet

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

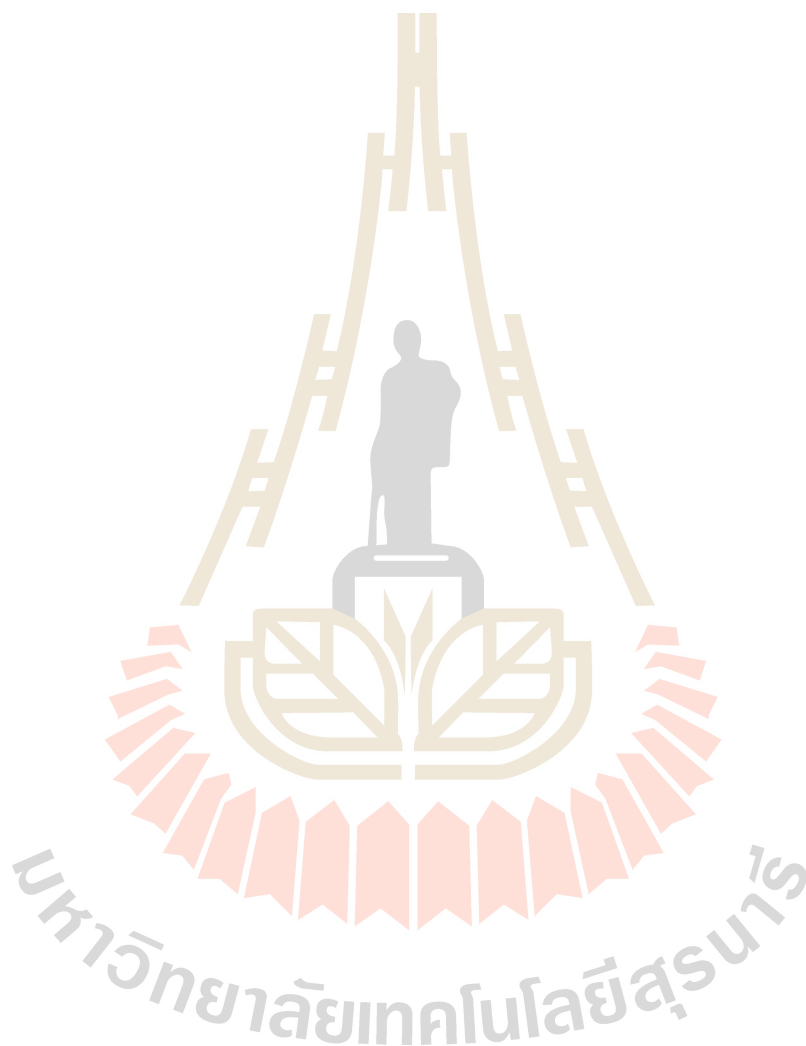
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้



ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

ในยุคปัจจุบันการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile station) มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการโทร การส่งข้อความ รวมทั้งการใช้งานแอปพลิเคชันเพื่อความบันเทิงต่างๆ เช่น เกมออนไลน์ ฟังเพลง วิดีโอสตรีมมิ่ง สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เซลล์ขนาดใหญ่ไม่สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้ได้อย่างเพียงพอ จึงได้มีการติดตั้งเซลล์ขนาดเล็กเพิ่มเข้ามาในพื้นที่ครอบคลุมของเซลล์ขนาดใหญ่ สำหรับในบางพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก รวมทั้งพื้นที่ที่เป็นจุดอับสัญญาณ เช่น บริเวณตัวเมืองที่มีผู้คนอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อเป็นการรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและรองรับพื้นที่บางจุดที่ได้รับสัญญาณต่ำ ซึ่งเราเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเจเนต (Heterogeneous Network : HetNet) นอกจากประโยชน์ของเครือข่ายเฮเทอเจเนตที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีผลกระทบกำลังส่งที่ไม่เท่ากันของสถานีฐาน เนื่องจากเครือข่ายเฮเทอเจเนตประกอบด้วยสถานีฐานหลายชนิดแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้แต่ละคนได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกัน

จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมพบว่าหลายงานวิจัยได้เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหา ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมคือ วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด (coordinated beamforming) ซึ่งเป็นวิธีการที่ต่อยอดมาจากวิธีการก่อรูปลำคลื่นโดยวิธีการนี้สถานีฐานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลของผู้ใช้ เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการจะมีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด ที่มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า วิธีการนี้ว่า การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่ (fixed-coordinated beamforming) เพื่อเป็นการปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค (pico base station) ให้ดีขึ้นนั้น โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร ให้เป็นเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก โดยสิ่งที่มุ่งหวังสำหรับงานวิจัยนี้คือสามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมซึ่งช่วยปรับปรุงค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้มีค่าเท่าเทียมกันได้

Abstract

Currently, mobile phones are increasingly used in daily lives. For example, it has been used 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) deploying some small cells into a large cell's coverage area are considered. This network can provide a higher data bandwidth in the city and some areas facing poor signal. The concept of HetNets is applying the different base stations for improving the performance of wireless network. In addition, HetNets are flexible and low of cost for installation because a number of small cells are installed in urban area instead of a large cell. However, an inequality occurs as a result of the different level of transmission power leading to a poor SINR of users in the small base stations.

From literatures, the one technique to solve the mentioned problem is a coordinated beamforming developed 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 users. Therefore, this research work employs the predefined weights method for coordinated beamforming so called fixed coordinated beamforming for selecting 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.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
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 ทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 เครือข่ายเฮทเน็ต.....	6
2.3 สายอากาศแถวลำดับ.....	7
2.3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น.....	8
2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	การก่อรูปลำคืบ.....	14
2.4.1	การก่อรูปลำคืบแบบสลับลำคืบ.....	18
2.4.2	การก่อรูปลำคืบแบบปรับตัว.....	19
2.4.3	การก่อรูปลำคืบเชิงพิกัด.....	21
2.5	แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีแอลทีอี.....	21
2.6	ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.7	สรุป.....	26
3	การออกแบบการก่อรูปลำคืบเพื่อทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและ 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	การออกแบบการก่อรูปลำคืบเพื่อทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณ รบกวนของผู้ใช้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น.....	41
3.5	สรุป.....	42
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	44
4.1	บทนำ.....	44
4.2	การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์.....	44
4.2.1	การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน.....	45
4.2.2	การกำหนดค่าจำนวนลำคืบที่เหมาะสม.....	48
4.3	สรุป.....	52
5	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1	สรุปเนื้อหางานวิจัย.....	53
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	54
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	54
	รายการอ้างอิง.....	55
	ภาคผนวก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	58



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เครือข่ายเฮทเน็ต..... 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	เครือข่ายเฮทเน็ตและการเกิดสัญญาณแทรกสอด..... 29
3.2	สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น..... 32
3.3	ขั้นตอนการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก..... 37
3.4	เส้นทางการมาถึงของสัญญาณ..... 38
3.5	ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน โดยวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่..... 40
3.6	แผนผังการทำงานของการทำงานการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณ 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



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	การแมปปีงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนกับการมอดูเลชัน.....49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile station) มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการโทร การส่งข้อความ รวมทั้งการใช้งานแอปพลิเคชันเพื่อความบันเทิงต่างๆ เช่น เกมออนไลน์ ฟังเพลง วิดีโอสตรีมมิ่ง สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เซลล์ขนาดใหญ่ไม่สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้ได้อย่างเพียงพอ จึงได้มีการติดตั้งเซลล์ขนาดเล็กเพิ่มเข้ามาในพื้นที่ครอบคลุมของเซลล์ขนาดใหญ่ สำหรับบางพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก รวมทั้งพื้นที่ที่เป็นจุดอับสัญญาณ เช่น บริเวณตัวเมืองที่มีผู้คนอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อเป็นการรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและรองรับพื้นที่บางจุดที่ได้รับสัญญาณต่ำ ซึ่งเราเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเนต (Heterogeneous Network : HetNet) นอกจากประโยชน์ของเครือข่ายเฮเทอเนตที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ผลกระทบที่ตามมา ก็คือการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ (Inter-Cell Interference: ICI) เนื่องมาจากการใช้งานที่ความถี่เดียวกันของสถานีฐานซึ่งส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise : SINR) ของผู้ใช้มีค่าต่ำ

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

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า หลายงานวิจัยได้เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความสนใจคือ วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด (coordinated beamforming) ซึ่งเป็นวิธีการที่ต่อยอดมาจากวิธีการก่อรูปลำคลื่น โดยวิธีการนี้สถานีฐานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลของผู้ใช้ ทำให้เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการจะมีความแม่นยำมากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด เช่น การนำวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดไปใช้แก้ปัญหาสัญญาณแทรกสอดในกลุ่มของเครือข่ายเฮเทอเนต

(HetNet clusters) โดยจำลองเครือข่ายเป็นสภาพแวดล้อม 2 แบบ คือ สนามกีฬา และบริเวณตัวเมือง

ที่หนาแน่น (Nagaraj *et al.*, 2014) ผลการทดลองที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพต่อสภาพแวดล้อมทั้ง 2 แบบ รวมทั้งในงานของ (Oguejiofor and Zhang, 2016) เป็นการนำเทคนิควิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคต์มาใช้เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์และเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัม (spectrum efficiency) ภายในเครือข่ายเฮทเน็ต โดยใช้ค่าเฉลี่ยอัตราขยายช่องสัญญาณ (average channel gain) ในการเลือกเซลล์ของผู้ใช้ ผลที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากกลุ่มเซลล์อื่น ซึ่งไม่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณซึ่งกันและกัน ผลที่ได้คือ เมื่อมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าไม่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูล (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) นำเสนอเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิคต์ในเครือข่ายเฮทเน็ตเพื่อลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-Channel Interference: CCI) ของระบบเชื่อมโยงขาลง (downlink) จากสถานีฐานมาโครไปยังผู้ใช้ของสถานีฐานพิโค โดยใช้วิธีการบังคับศูนย์ในการหาค่าถ่วงน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นโดยใช้วิธีการบังคับศูนย์ร่วมกับการใช้ขั้นตอนวิธี block diagonalization เพื่อใช้กำจัดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ เพื่อนำไปใช้ในการส่งแบบหลายจุดเชิงพิคต์ (Coordinated Multi-Point : CoMP transmission) ซึ่งช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น (Khan and Lee, 2012) แต่กลุ่มแรกมีข้อเสีย คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่คำนวณได้บางครั้งไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง เนื่องจากข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ (hardware) และสามารถเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากวิธีการบังคับศูนย์นั้นเหมาะสมสำหรับช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนซึ่งในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ยาก 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) ซึ่งวิธีที่มีการหาค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนนั้นมีข้อเสียคือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้อาจจะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่มีข้อดีคือ การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจะมีความซับซ้อนน้อย

เนื่องจากพลังงานที่แตกต่างกันของสถานีฐาน ทำให้ผู้ใช้ที่ได้รับบริการจากสถานีฐานขนาดเล็กได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ต่ำ จึงได้มีหลายงานวิจัยพยายามแก้ไขปัญหานี้เพื่อจะปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้เท่าเทียมกันมากขึ้น โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ได้มีการปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ให้ใกล้เคียงกันมีดังนี้ งานวิจัยของ (Park *et al.*, 2013) นำเสนออัลกอริทึมเพื่อแก้ไขปัญหการจัดดุลค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (SINR balancing) และปรับปรุงค่าอัตราข้อมูลที่ได้รับได้ (user-rate) ที่แย่ที่สุดให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำการจัดดุลค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมาใช้กับเครือข่ายเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (cognitive radio network) เพื่อปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รองให้มีค่าดียิ่งขึ้น และทำให้แน่ใจว่าจะไม่มีสัญญาณแทรกสอดไปยังผู้ใช้หลักสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Cumanan *et al.*, 2010) และตัวอย่างงานวิจัยสุดท้ายเป็นการนำเสนออัลกอริทึมที่มีความซับซ้อนต่ำ เพื่อหาการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่เท่าเทียมกันมากขึ้น 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) สำหรับเครือข่ายเฮทเน็ต

1.2.2 เพื่อปรับปรุงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้เท่าเทียมกันมากขึ้นโดยการใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดแบบคงที่

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การหาค่าถ่วงน้ำหนักโดยวิธีก่อรูปลำดับชั้นเชิงพิกัดแบบคงที่ สามารถนำไปใช้งานในเครือข่ายเฮทเน็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.2 สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อปรับปรุงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้แต่ละคนให้เท่าเทียมกันได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 เครือข่ายที่ทำการวิจัยเป็นเครือข่ายเฮทเน็ต

1.4.2 สถานีฐานมาโครและสถานีฐานพีโคใช้งานที่ความถี่เดียวกัน

1.4.3 กำหนดให้ค่าวิสัยสมารถ (throughput) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบ

1.4.4 ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองแบบ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 เครือข่ายเฮทเน็ตประกอบด้วยสถานีฐาน 2 ชนิด คือ สถานีฐานมาโครและสถานีฐานพีโค

1.5.2 ใช้แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี (LTE Multipath Channel Models)

1.5.3 จำลองแบบเพื่อดูประสิทธิภาพของวิธีการก่อรูปลำดับชั้นเชิงพิกัดแบบคงที่โดยการวิเคราะห์ ค่าวิสัยสมารถ และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการก่อรูปลำดับชั้นเชิงพิกัดและการหาค่าถ่วงน้ำหนัก

3) จำลองแบบเพื่อดูประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอซึ่งใช้วิธีการก่อรูปลำดับชั้นเชิงพิกัดแบบคงที่โดยใช้โปรแกรม 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 และเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีการ
หาค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนจากงานวิจัยอื่นที่นำเสนอ โดยเปรียบเทียบผลในรูปแบบของกราฟข้อมูล

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถปรับปรุงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณ
รบกวนเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีการคิดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแต่ไม่มีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด

1.7.2 สามารถปรับปรุงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณ
รบกวนของผู้ใช้ที่แต่ละคนให้เท่าเทียมกันได้



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

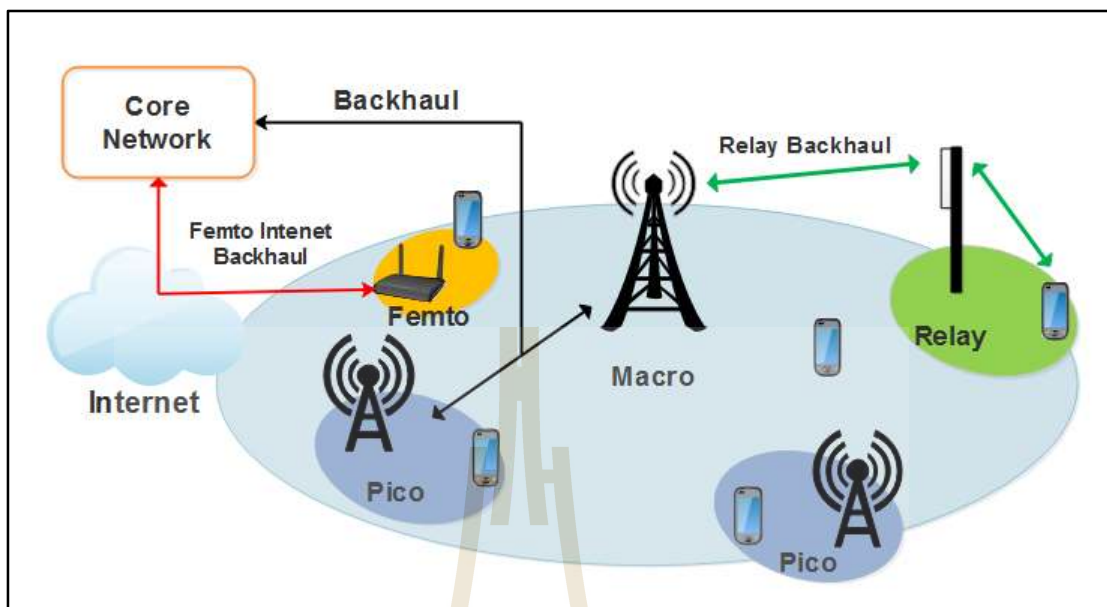
2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้โดยแบ่งออกเป็นเจ็ดส่วน ส่วนแรกเป็นการกล่าวนำเข้าสู่เนื้อหา ส่วนที่สองเป็นการแนะนำเกี่ยวกับเครือข่ายเฮเทอเน็ต ประกอบด้วยความเป็นมาของเครือข่ายเฮเทอเน็ตรวมถึงประโยชน์ของเครือข่ายชนิดนี้ ต่อมาในส่วนที่สามกล่าวถึงสายอากาศแถวลำดับโดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเชิงเส้นและแบบเชิงระนาบ ในส่วนที่สี่จะกล่าวถึงการก่อรูปลำคลื่น การก่อรูปลำคลื่นเบื้องต้น ประเภทของการก่อรูปลำคลื่น ในส่วนที่ห้าจะกล่าวถึงแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีแวลที่ใช้ในการนำมาอ้างอิงถึงรูปแบบการแพร่กระจายของสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ในปัจจุบัน ในส่วนที่หกจะกล่าวถึงการสำรวจประสิทธิภาพของระบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และส่วนสุดท้ายในส่วนที่เจ็ดจะเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

2.2 เครือข่ายเฮเทอเน็ต

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

เนื่องจากในปัจจุบันจำนวนผู้ใช้ ปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เครือข่ายเอกพันธ์ไม่สามารถรองรับปริมาณดังกล่าวที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้การติดตั้งสถานีฐานมาโครในพื้นที่เมืองนั้นเป็นเรื่องยาก เนื่องจากต้องใช้พื้นที่ และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้ให้บริการจึงได้หาวิธีการที่จะทำให้ปัญหานี้หมดไป ด้วยการติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กอยู่ภายในบริเวณพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร ไม่ว่าจะเป็น



รูปที่ 2.1 เครือข่ายเฮเทอเน็ต

[Khandekar *et al.*, 2010]

เป็นพื้นที่ภายใน หรือภายนอกอาคาร เพื่อช่วยรองรับจำนวนผู้ใช้และปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังใช้งบประมาณในการติดตั้งน้อยเมื่อเทียบกับการติดตั้งสถานีฐานมาโคร ซึ่งเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเน็ต (heterogeneous network)

จากรูปที่ 2.1 แสดงรูปของเครือข่ายเฮเทอเน็ต 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) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น เรียกว่า องค์ประกอบ (element) การนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลาย ๆ

องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่เป็นมากต่อระบบสายอากาศแก่ที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่นรอง (side lobes) หรือจุดศูนย์ (nulls) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น สายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น และสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังต่อไปนี้

2.3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

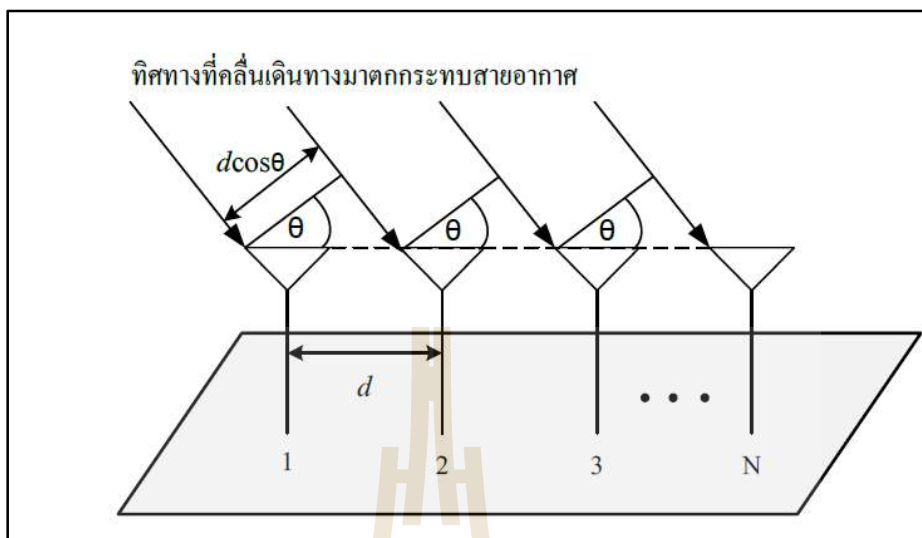
สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear antenna array) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่พื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นวางตัวเรียงกันเป็นเส้นตรงซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.2 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้น หรือ $N \times 1$ ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น 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

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

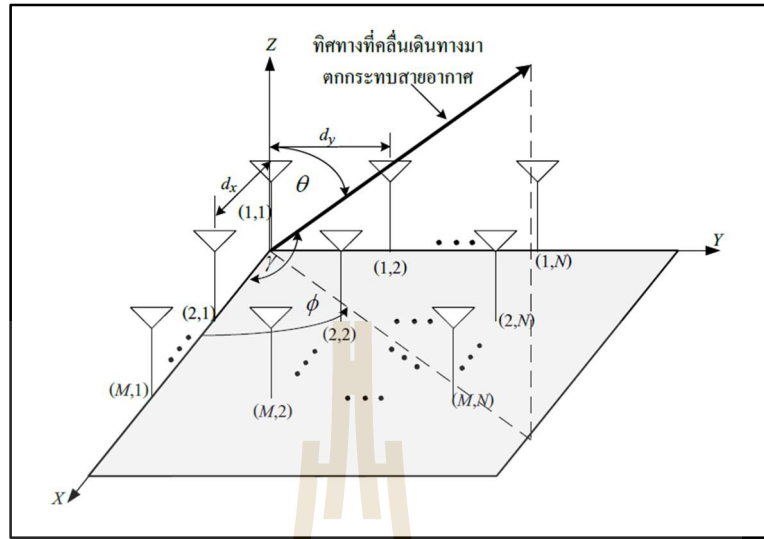
หรือถ้าหากค่าของ ψ น้อยมาก ๆ จะสามารถประมาณค่าสมการได้ดังนี้

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

2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ (planar antenna array) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจากรูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3.1 โดยสายอากาศแต่ละตัวจะถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยม หรือที่เรียกว่าสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเชิงเส้น คือสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้หลากหลาย ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจึงมีความเอนกประสงค์มากกว่า และสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบสามารถหันพูลักในมุมเงย และทุก ๆ ทิศรอบตัว 360 องศา ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาร์ การชี้ทิศทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สาย และรวมถึงระบบสายอากาศเก่งที่มีการก่อรูปลำคลื่นอีกด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ (Allen and Ghavami, 2005)

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



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจำนวน $M \times N$
[มนตรีพิทยา 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} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y และ β_y คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y รวมกันหรือที่เรียกว่าแบบเชิงระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน 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

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

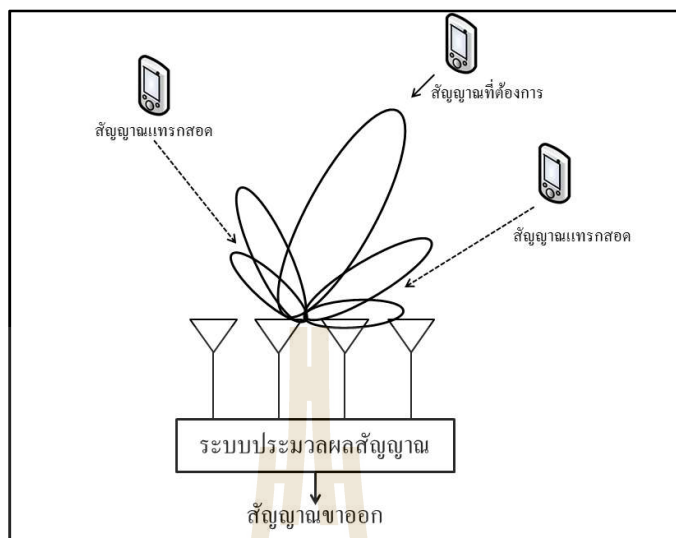
เช่นเดียวกันกับสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น เราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ (2.11) และ (2.12) ซึ่งจะได้เท่ากับ

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

เมื่อ

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

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



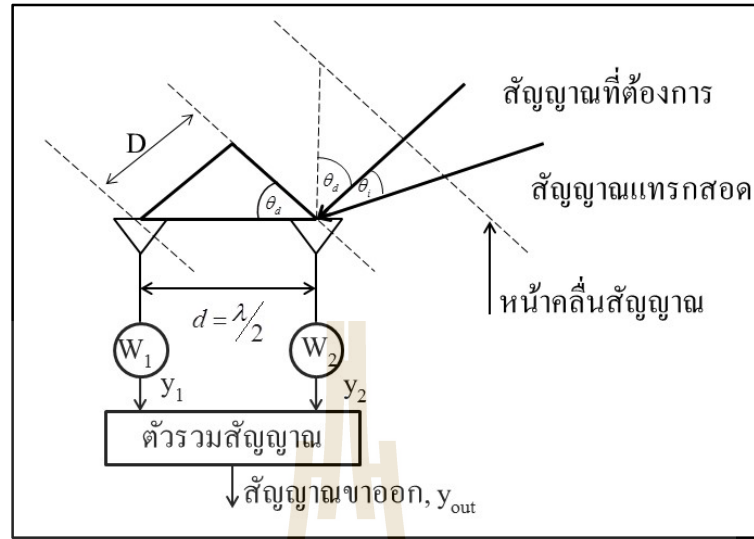
รูปที่ 2.4 การก่อรูปลำคลื่น
[มนตรีพิทยา อุฑารสกุล, 2556]

2.4 การก่อรูปลำคลื่น

การก่อรูปลำคลื่น เป็นวิธีการประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบที่มีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยสามารถสร้างแบบรูปลำคลื่นที่มีพหุคลื่นหลักหันไปยังทิศทางที่ต้องการ และสามารถหักเหจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ 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 สายอากาศแถวลำดับ และระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) ซึ่งในระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival : DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ (Liberti and Rappaport, 1999) ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการก่อรูปลำคลื่น



รูปที่ 2.5 ระบบสายอากาศแก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ
[มนตรีพิทยา อุฑารสกุล, 2556]

ของพหุคูณกำลังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ ในขณะที่หันทจุดศูนย์หรือพหุคูณกำลังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด โดยหลักการเบื้องต้นในการที่จะหันทลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น จำนวน 2 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากรูป D คือความต่างเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ W คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ θ_d และ θ_i คือมุมที่มากกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับจากรูปสัญญาณขาออกคือ

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

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

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

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

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

เมื่อ y_{1d} y_{1i} y_{2d} และ y_{2i} คือสัญญาณที่ต้องการที่มาจากกระโทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณแทรกสอดที่มาจากกระโทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณที่ต้องการที่มาจากกระโทบสายอากาศต้นที่ 2 และสัญญาณแทรกสอดที่มาจากกระโทบสายอากาศต้นที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสัญญาณขาออกของสายอากาศต้นที่ 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 เพื่อให้สัญญาณที่ต้องการมีค่าดังเดิมเอาไว้ 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) ของสายอากาศต้นที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ

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

เช่นเดียวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.31) เราจะได้

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

แทนสมการ (2.36) ลงใน (2.31) จะได้

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

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

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

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 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 โดยการนำสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละต้นมาประมวลผลสัญญาณนั่นเอง ซึ่งการก่อรูปลำคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น (switched beam systems) และการก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัว (adaptive antenna systems)

2.4.1 การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น

การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น ประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) ซึ่งสามารถสร้างลำคลื่นได้ M ลำคลื่นในเวลาเดียวกัน และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weight, T) สำหรับสัญญาณขาออกที่มีลำคลื่นชี้ไปยังทิศทางที่ m^{th} สามารถแสดงในสมการ (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} ซึ่งสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้

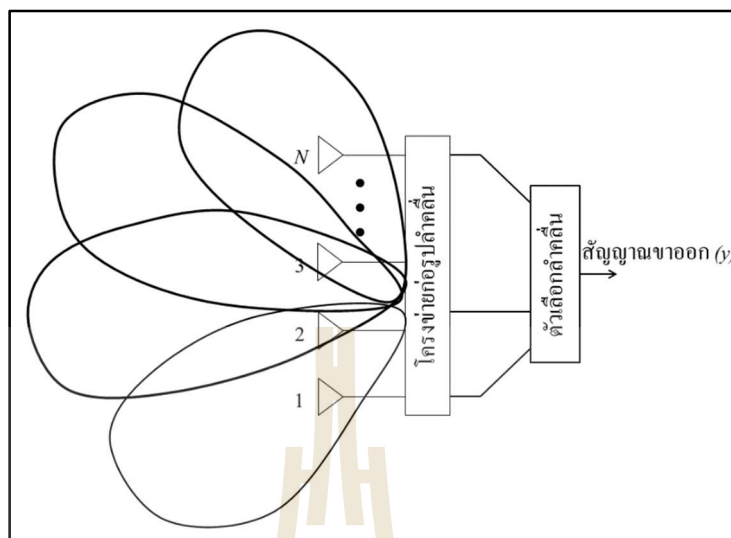
$$\mathbf{y} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{x} \quad (2.43)$$

เมื่อ $\mathbf{x}$ คือสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์

โดยขั้นตอนการทำงานของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

- 1) ตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ
- 2) เลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นที่ถูกเลือกไว้อย่างเหมาะสม
- 3) ใช้ลำคลื่นในทิศทางที่เลือกเมื่อผู้ใช้ไม่มีการเคลื่อนที่
- 4) สับเปลี่ยนลำคลื่นเดิมไปยังลำคลื่นใหม่เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น

นอกจากนี้การรวมสัญญาณขาออกของสายอากาศหลาย ๆ ตัวทำให้สายอากาศแบบปรับตัวเลือกลำคลื่นสามารถสร้างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งทำให้ระบบมีทางเลือกของรูปแบบการแพร่กระจายแบบรูปการแผ่พลังงานที่มากกว่าการใช้สายอากาศต้นเดียว จึงทำให้เราสามารถสรุปข้อดี และข้อเสียของระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น
[มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล, 2556]

ข้อดี

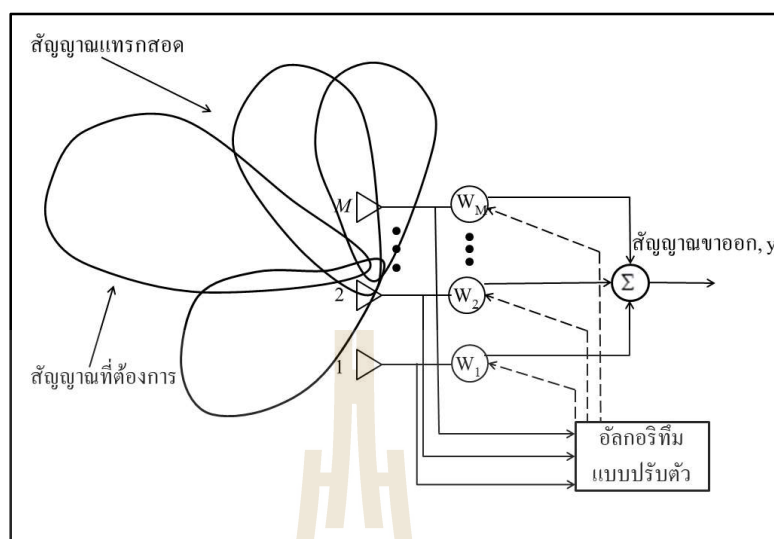
- 1) มีความซับซ้อนน้อย
- 2) สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการเปลี่ยนแปลงลำคลื่น
- 3) ในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ประสิทธิภาพของสายอากาศแ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจะใกล้เคียงกับสายอากาศแ่งแบบปรับลำคลื่น

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 เมื่อสัญญาณตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น สัญญาณจะถูกส่งไปที่ส่วนอัลกอริทึมแบบปรับตัวเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับตัว

[มนต์ทิพย์ภา อูซารสกุล, 2556]

แล้วส่งค่ากลับไปให้ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ ดังนั้นจึงได้สัญญาณขาออกดังสมการที่ (2.44)

$$y = \mathbf{W}\mathbf{x} \quad (2.44)$$

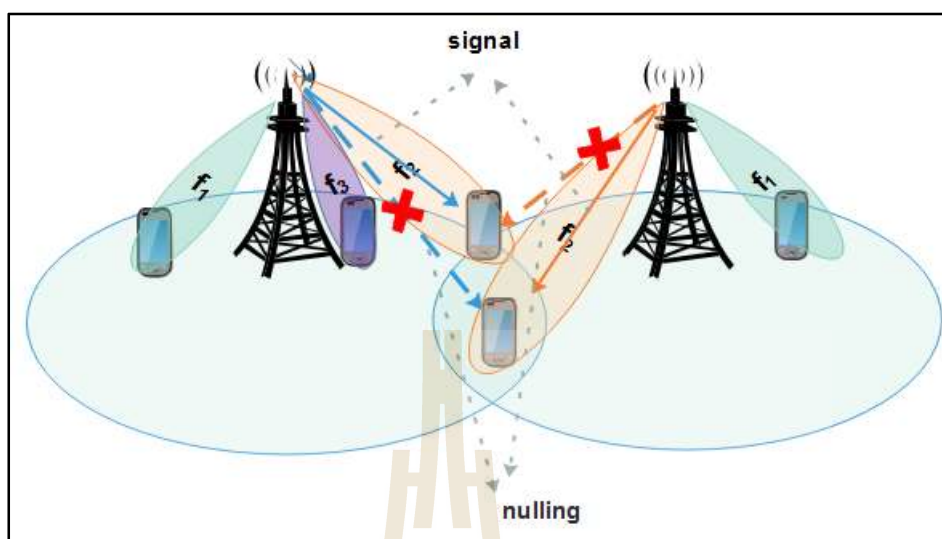
เมื่อ $\mathbf{x}$ คือสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น

ระบบจะทำงานเป็นรูปแบบวงจรปิดแบบนี้ไปเรื่อย ๆ วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีหลายวิธีขึ้นกับอัลกอริทึมที่เลือกใช้ จากกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลให้ระบบสามารถหันทุพอหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันพารอนหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดตามที่แสดงในรูปที่ 2.7

เราสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของระบบสายอากาศแ่งแบบปรับตัวได้ดังนี้

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

- ข้อเสีย
 - 1) มีความซับซ้อนสูงมากกว่าสายอากาศแ่งแบบสวิตช์ลาค์ลีน



รูปที่ 2.8 การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด

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

- 2) ต้องการสัญญาณอ้างอิงที่ดีเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
- 3) ต้องการหน่วยประมวลผลความเร็วสูง

2.4.3 การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด

การก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากการก่อรูปลำคลื่นแบบธรรมดา โดยมีหลักการพื้นฐานคือ สถานีฐานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณซึ่งกันและกันโดยเป็นตำแหน่งของผู้ใช้ ทั้งผู้ใช้ที่ต้องการติดต่อสื่อสารด้วย และผู้ใช้อื่น ๆ ที่อยู่ในเซลล์เดียวกัน หรือ เซลล์ข้างเคียง เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการ จึงทำให้ก่อรูปลำคลื่นไปหาผู้ใช้ที่ต้องการได้แม่นยำมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่สถานีฐาน 1 และ 2 มีการทำงานร่วมกัน เมื่อก่อรูปลำคลื่นทำให้สถานีฐาน 1 และ 2 ก่อรูปลำคลื่นไปหาผู้ใช้ที่ต้องการได้โดยตรง ในขณะเดียวกันก็มีการหักจุดศูนย์ไปยังผู้ใช้อื่นที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอดไปยังผู้ใช้ข้างเคียงน้อยที่สุด

2.5 แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีแอลทีอี

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

เคลื่อนที่ยุคที่สาม โดยแต่ละแท็ปจะสอดคล้องกับสัญญาณที่มาถึงสายอากาศจำนวนหลาย
เส้นทาง โดยยึดผลตอบแทนของช่องสัญญาณอิมพัลส์เป็นหลัก

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

เมื่อ k คือหมายเลขแท็ป τ_k คือ ความล่าช้าของแท็ป เมื่อเทียบกับแท็ปแรก และ a_k คือ
การกระจายค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเชิงซ้อน ที่เป็นไปตามธรรมชาติของดอปเพลอร์สเปกตรัม
 $S(f)$

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

เมื่อ f_d คือการเคลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์สูงสุด

โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในกลุ่มความร่วมมือของ 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) ซึ่งเป็นกลุ่มความร่วมมือระหว่างหน่วยงานมาตรฐานการสื่อสารโทรคมนาคม เพื่อกำหนด
มาตรฐานกลางในการผลิต และพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายในยุคสามจี และ ITU
(International Telecommunication Union) หรือ สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ ซึ่งเป็น
หน่วยงานที่ช่วยส่งเสริมความร่วมมือระหว่างประเทศในด้านการติดต่อสื่อสารโทรคมนาคม ให้ความ
ช่วยเหลือทางวิชาการแก่ประเทศกำลังพัฒนาในด้านโทรคมนาคม และสนับสนุนการพัฒนาทางด้าน
โทรคมนาคม เห็นด้วยกับการกำหนดการใช้งานช่องสัญญาณ Pedestrian A (PA) และ Vehicular A
(VA) จากงานวิจัยของ (Sørensen *et al.*, 2005) และ Typical Urban (TU) จาก (3GPP, 2006)
เพื่อจำลองสภาพแวดล้อม 3 แบบ ที่มีพื้นฐานที่โดดเด่นตามความล่าช้าในการแพร่กระจายต่ำ ปาน
กลาง และสูง ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานแอลทีอีก็ได้้นำแบบจำลองที่กำหนดโดย ITU และ 3GPP มาใช้
เช่นกัน ซึ่งพารามิเตอร์หลักของแบบจำลองเหล่านี้แสดงไว้ใน TS 36.101 และ TS 36.104 ดังแสดง
ในตารางที่ 2.1 ซึ่งจากตาราง ค่า τ คือเวลาที่สัญญาณในแต่ละเส้นทางมาถึงสายอากาศ เมื่อ
เปรียบเทียบกับสัญญาณเส้นทางแรกที่มาถึง และ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อแมส (Signal to Mask
Ratio : SMR) เป็นความแรงของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศ เมื่อเทียบกับสัญญาณที่แรงที่สุด
นอกจากนี้แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีของแอลทีอี สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรูปแบบของ

สายอากาศหลายต้น โดยการพัฒนาของเมทริกซ์สหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ โดยสามารถหาข้อมูลได้จาก 3GPP TS 36.101

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิธีของแอลทีอี

Tap no	EPA Channel		EVA Channel		ETU Channel	
	τ (ns)	SMR (dB)	τ (ns) (dB)	SMR (dB)	τ (ns) (dB)	SMR
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 ปรัชญาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากทฤษฎีที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดมากขึ้น และสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ จึงได้มีการศึกษาปรัชญาวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยทำการสำรวจปรัชญาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้พอสังเขปได้ดังนี้

งานวิจัยของ (Nagaraj *et al.*, 2014) นำเสนอการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดเพื่อนำไปใช้แก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกสอดในกลุ่มของเครือข่ายเฮเทอเน็ตโดยจำลองเครือข่ายเป็นสภาพแวดล้อม 2 แบบ คือ สนามกีฬา และบริเวณตัวเมืองที่หนาแน่น โดยในการจำลองแบบได้เลือกวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัด 3 แบบ คือ การก่อรูปลำคลื่นแบบเจาะจง (Eigen-beamforming) ซึ่งเป็นการก่อรูปไปหาผู้ใช้ที่ต้องการแต่ไม่สนใจว่าจะมีสัญญาณแทรกสอดไปที่ผู้ใช้อื่นหรือไม่ อีกวิธีหนึ่งคือ การทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณที่รั่วไหลและสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุด (max-SLNR) โดยเป็นการคำนึงถึงการทำให้มีสัญญาณแทรกสอดไปที่ผู้ใช้อื่นน้อยที่สุด และวิธีสุดท้ายคือ วิธีการ Joint Enhanced Transmit-Receive Optimization : JETRO โดยเป็นวิธีการที่หาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่มากที่สุดรวมกับการใช้ Interference-Rejection Combining: IRC เพื่อช่วยลดความแรงของสัญญาณแทรกสอด ผลการจำลองแบบที่ได้คือ ในพื้นที่ตัวเมืองที่หนาแน่นการก่อรูป

ลำดับแบบ JETRO ให้ค่าวิสัยสามารถ (throughput) ของผู้ใช้ที่บริเวณกลางเซลล์ และขอบเซลล์ มากกว่าวิธีอื่น ๆ

งานวิจัยของ (Oguejiofor and Zhang, 2016) เป็นการนำเทคนิควิธีการก่อรูปลำดับเชิงพิกัดมาใช้เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์และเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัม (spectrum efficiency) ภายในเครือข่ายเฮเทอเน็ต โดยใช้ค่าเฉลี่ยอัตราขยายช่องสัญญาณ (average channel gain) ในการเลือกเซลล์ของผู้ใช้แทนการใช้กำลังสัญญาณอ้างอิงที่ได้รับ (Reference Signal Received Power: RSRP) หรือคุณภาพสัญญาณอ้างอิงที่ได้รับ (Reference Signal Received Quality: RSRQ)

ซึ่งช่วยปรับปรุงการกระจายโหลดในเครือข่ายเฮเทอเน็ต และช่วยป้องกันสัญญาณแทรกสอดที่จะเกิดขึ้น และวิธีการก่อรูปลำดับที่นำมาใช้คือการทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณที่รบกวนและสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุด เนื่องมาจากในเครือข่ายเฮเทอเน็ต สถานีฐานแต่ละชนิดจะมีกำลังส่งไม่เท่ากัน ผลที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น

งานวิจัยของ (Belschner *et al.*, 2015) ผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากกลุ่มเซลล์อื่น โดยเปรียบเทียบระหว่างมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณ และไม่มี การแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณซึ่งกันและกัน ผลคือเมื่อมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันจะให้ ประสิทธิภาพที่ดีกว่าไม่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูล

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า วิธีการก่อรูปลำดับเชิงพิกัดสามารถนำไปแก้ไข ปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ หรือสัญญาณแทรกสอดที่มาจากกลุ่มเซลล์อื่นได้ นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการก่อรูปลำดับเชิงพิกัดยังสามารถทำได้หลาย วิธีการ ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการเลือกวิธีการต่อไปได้

งานวิจัยของ (Li *et al.*, 2013) ได้นำเสนอเทคนิคการก่อรูปลำดับเชิงพิกัดในเครือข่ายเฮเทอเน็ตเพื่อลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-Channel Interference : CCI) ของระบบเชื่อมโยง ขาลง (downlink) จากสถานีสถานีมาโครไปยังผู้ใช้ของสถานีสถานีพิโค โดยใช้วิธีการบังคับศูนย์ในการ หาค่าถ่วงน้ำหนัก โดยคำนึงถึงสัญญาณแทรกสอดที่จะส่งผลไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในเซลล์อื่นด้วย ผลที่ได้คือ ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มีการใช้การก่อรูปลำดับเชิงพิกัด

งานวิจัยของ (Khan and Lee, 2012) นำเสนอการใช้วิธีการก่อรูปลำดับโดยใช้วิธีการ บังคับศูนย์ร่วมกับการใช้ block diagonalization ซึ่งจะช่วยกำจัดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น เพื่อนำไปใช้ในการส่งแบบหลายจุดเชิงพิกัด (Coordinated Multi-Point : CoMP transmission) ซึ่งช่วยปรับปรุงซึ่งช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ บังคับศูนย์เพียงอย่างเดียว

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นนี้เป็นตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัวได้ในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งจากทฤษฎีข้อดีของการก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัวจะให้ค่าถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดเสมอทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสูง แต่มีข้อเสียคือระบบมีความซับซ้อน และต้องใช้เวลาประมวลผลที่รวดเร็ว

งานวิจัยของ (Kim *et al.*, 2013) เป็นการประยุกต์ใช้การก่อรูปลำคลื่นเพื่อลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมจากการเชื่อมโยงขาจากสถานีฐานมาโคร (macro base station) ไปยังสถานีฐานเฟมโต (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 การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจากเงื่อนไขที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมากที่สุด หรือ การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจากเงื่อนไขให้มีสัญญาณแทรกสอดไปรบกวนผู้อื่นน้อยที่สุด ซึ่งจากทฤษฎีการก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่นนั้น มีข้อดีคือ มีความซับซ้อนน้อย แต่ข้อเสียคือ การลดสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัดเนื่องจากจำนวนของค่าถ่วงน้ำหนักที่มีอยู่อาจมีไม่ครอบคลุม

งานวิจัยของ (Park *et al.*, 2013) พัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมการจัดดุลค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (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) เป็นการนำการจัดสรรค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมาใช้กับเครือข่ายเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (cognitive radio network) โดยการใช้การก่อรูปลำคลื่นและการจัดสรรกำลัง (power allocation) เพื่อปรับปรุงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รองให้มีค่าดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันต้องทำให้แน่ใจว่าจะไม่มีสัญญาณแทรกสอดไปที่ผู้ใช้หลักสูงกว่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ที่กำหนดไว้

งานวิจัยของ (Tang *et al.*, 2017) เป็นการนำเสนออัลกอริทึมที่มีความซับซ้อนต่ำ เพื่อหาการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่เท่าเทียมกันมากขึ้น โดยมีพื้นฐานจากการใช้วิธีการบังคับศูนย์ และการพิจารณาการรั่วไหล (leakage) ของสัญญาณ ผลที่ได้คืออัลกอริทึมที่มีพื้นฐานจากการรั่วไหลของสัญญาณให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า

จากงานวิจัยข้างต้นนั้นเป็นการแก้ไขปัญหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกันของผู้ใช้เนื่องมาจากกำลังส่งที่ไม่เท่ากันของสถานีฐานแต่ละชนิดที่อยู่ในเครือข่ายเฮเทอเน็ต ซึ่งมีหลายวิธีการที่สามารถนำมาแก้ไขปัญหาได้โดยการก่อรูปลำคลื่นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าสามารถทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ให้เท่าเทียมกันได้

2.7 สรุป

ตามเนื้อหาข้างต้นที่กล่าวมาในบทนี้จะเห็นว่า การสื่อสารไร้สายมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทำให้ระบบแบบเดิมไม่สามารถรองรับผู้ใช้และปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพอ จึงได้มีการนำเครือข่ายเฮเทอเน็ตที่ช่วยรองรับผู้ใช้และข้อมูลที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการใช้งานที่ความถี่เดียวกันของสถานีฐานและความแตกต่างของกำลังส่ง ทำให้มีการพัฒนาวิธีการก่อรูปลำคลื่นเพื่อมาแก้ปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ ซึ่งการก่อรูปลำคลื่นนั้นก็มีหลายรูปแบบ ซึ่งต่างก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ในส่วนของความแตกต่างระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกัน ได้มีหลายงานวิจัยเสนอการแก้ไข ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น ซึ่งเป็นวิธีการที่มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแล้ว เนื่องจากสามารถนำไปปรับใช้กับฮาร์ดแวร์ที่มีอยู่ได้ และมีความซับซ้อนต่ำ โดยได้มีการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ได้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่เท่าเทียมกันมากขึ้น

บทที่ 3

การออกแบบการก่อรูปลำคลื่นเพื่อให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอเกี่ยวกับการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์และการออกแบบการทำงานของระบบที่นำเสนอ โดยในส่วนแรกจะเป็นการกล่าวนำหัวข้อของบทนี้ ส่วนที่สองจะเป็นการกล่าวถึงปัญหาและความเป็นมาของงานวิจัยในการสร้างแบบจำลอง ในส่วนที่สามจะกล่าวถึงข้อมูลที่ใช้สำหรับการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ เช่น การกำหนดตำแหน่งสถานีฐาน และผู้ใช้ การหาค่าถ่วงน้ำหนัก การกำหนดเมทริกซ์ช่องสัญญาณ ส่วนที่สี่จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของกระบวนการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการสรุปท้ายบท

3.2 ปัญหาและความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันที่การใช้งานโทรศัพท์มือถือมีความสำคัญในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การรองรับผู้ใช้งาน และปริมาณข้อมูลที่มาจากผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นโดยสถานีฐานมาโครเพียงอย่างเดียว นั้นเป็นเรื่องยาก ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์มือถือจึงได้มีการคิดหาวิธีการที่ช่วยแก้ไขปัญหานี้ โดยการติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กภายในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโครเพื่อรองรับปริมาณข้อมูลภายในพื้นที่ที่มีผู้ใช้จำนวนมาก และภายในอาคารที่เป็นจุดอับสัญญาณ เช่น บริเวณเขตเมืองที่มีคนอาศัยอยู่เยอะ โดยเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเนต ปัญหาที่ตามมาคือ การเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ รวมทั้งปัญหาที่ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่าเทียมกัน เนื่องมาจากกำลังส่งของสถานีฐานที่แตกต่างกัน โดยหนึ่งในวิธีการแก้ไขคือการนำวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดนั้นเป็นวิธีการที่มีพื้นฐานมาจากการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งเป็นการปรับลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้ที่เราต้องการ และปรับจุดศูนย์ไปยังผู้ใช้ที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อเป็นการลดสัญญาณแทรกสอดที่จะเกิดขึ้น ซึ่งประเภทของการก่อรูปลำคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น โดยวิธีการคือ จะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อนแล้วจากนั้นจะมีเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดี คือมีความซับซ้อนน้อย แต่มีข้อเสียคือ การลด

สัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด อาจเนื่องมาจากจำนวนลำคลื่นที่มีจำกัด ส่วนอีกประเภทคือ การก่อ

รูปลำดับแบบปรับตัว โดยวิธีการนี้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักตามสัญญาณที่รับเข้ามา ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้แม่นยำกว่า การก่อรูปลำดับแบบสลับลำดับ แต่มีข้อเสียคือ ระบบมีความซับซ้อนและต้องการระบบที่ประมวลผลได้รวดเร็ว นอกจากการนำการก่อรูปลำดับไปแก้ไขปัญหาเรื่องการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์แล้วนั้น ยังมีหลายงานวิจัยที่นำวิธีการก่อรูปลำดับเชิงพิกัดมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไข ปัญหาความไม่สมดุลกันของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน เนื่องมาจากกำลังส่งที่ต่างชนิดกันของสถานีฐานแต่ละชนิด ทำให้ผู้ใช้ที่รับสถานีฐานขนาดเล็กได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ต่ำ

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่สามารถช่วยทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในเครือข่ายเฮเทอเน็ต มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยทำการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร เพื่อเป็นการเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานขนาดเล็ก

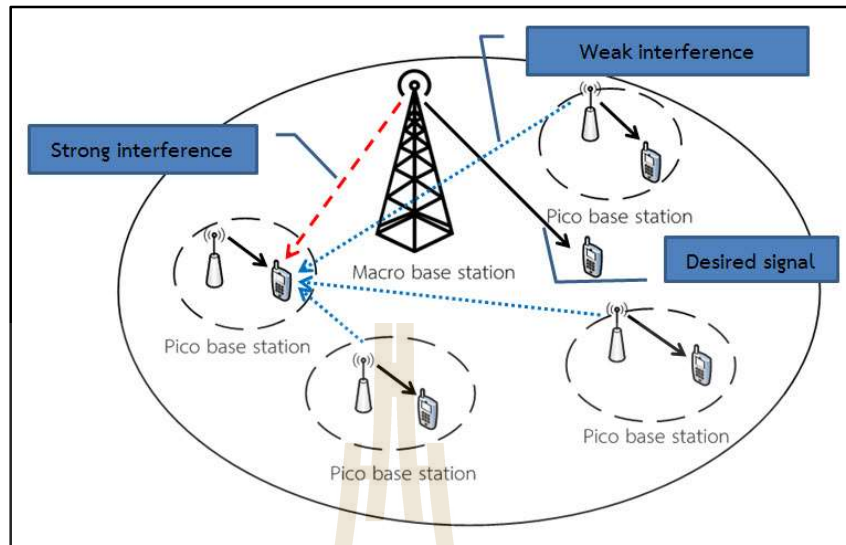
3.3 โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองแบบ

ในส่วนนี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดต่าง ๆ สำหรับการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วยการกำหนดสถานีฐาน การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก เงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก และการหาค่ามุมของสัญญาณที่มาถึง ซึ่งเป็นส่วนของการกำหนดเมทริกซ์ช่องสัญญาณ

3.3.1 การจำลองสถานีฐานและค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของเครือข่ายเฮเทอเน็ตที่ใช้ในการจำลองแบบ ประกอบไปด้วยสถานีฐานมาโครจำนวน 1 สถานี และสถานีฐานพิโคจำนวน 4 สถานี โดยสถานีฐานพิโคจะวางอยู่ในพื้นที่ที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร และแต่ละสถานีฐานให้บริการผู้ใช้สถานีฐานละ 1 คน ซึ่งตำแหน่งของสถานีฐานพิโค และตำแหน่งของผู้ใช้จะถูกสุ่มขึ้นใหม่ทุกครั้ง แต่ละสถานีฐานให้บริการในความเร็วเดียวกัน และแต่ละสถานีฐานสร้างสัญญาณแทรกสอดซึ่งกันและกัน โดยลูกศรสีดำ คือ สัญญาณที่ต้องการ ลูกศรสีแดง คือ สัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานมาโคร และลูกศรสีน้ำเงิน คือ สัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานพิโค ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาในการเชื่อมโยงขาลง 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 เมทริกซ์ช่องสัญญาณจากสถานีฐานพีโคไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร

$\mathbf{H}_{U_p}^{p'}$ คือ เมทริกซ์ช่องสัญญาณจากสถานีฐานพีโคที่อื่นไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพีโค

$\mathbf{W}$ 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 ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพีโคสามารถคำนวณได้จากสมการ (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 $\sigma_{U_p}^2$ คือพลังงานของ

สัญญาณรบกวน (noise power) $|x_{U_M}|^2$ และ $|x_{U_p}|^2$ คือพลังงานของสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 1

ซึ่งในการจำลองแบบเมื่อทราบค่าของ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนจะสามารถนำมาหาค่าวิสัยสมการของผู้ใช้ได้ดังสมการที่ (3.5)

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

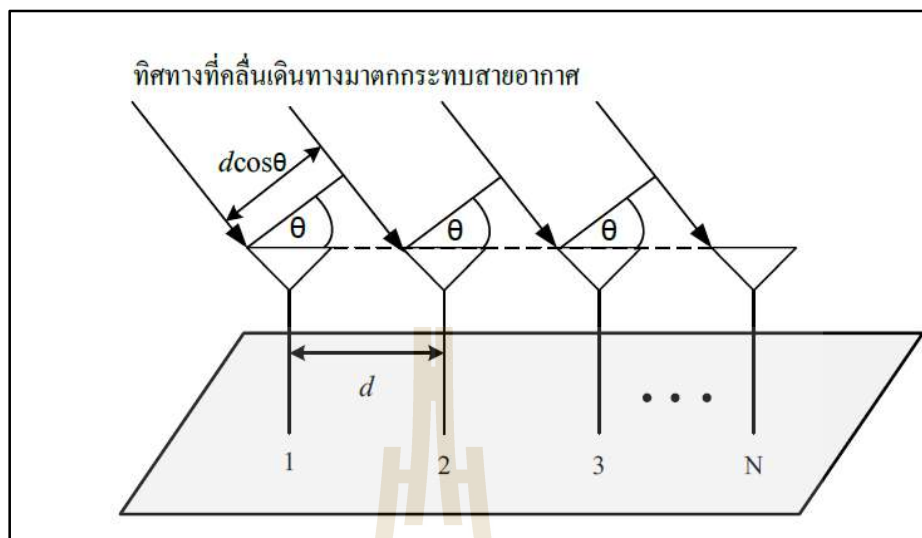
โดย C คือ ความจุช่องสัญญาณ (capacity) และ B คือ แบนด์วิดท์ (bandwidth)

3.3.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก

จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) $\mathbf{W}$ คือค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งใช้ถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการ 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 จะนิยมใช้สายอากาศไอโซทรอปิก (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 คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศ และ θ คือมุมตกกระทบบนของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศแต่ละต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2

งานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ $\lambda/2$ โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของสายอากาศ เนื่องจากความถี่ในส่วนของสายอากาศและความถี่ของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศมีค่าเท่ากัน ดังนั้นความยาวคลื่นของสายอากาศและความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศจะมีค่าเท่ากันด้วย 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 สำหรับจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นก็ไม่ควรมากเกินไปเช่นกัน เนื่องจากระบบจะมีการเปรียบเทียบอัตราขยายสัญญาณ และปรับเปลี่ยนแบบรูปการแผ่พลังงานอยู่ตลอดเวลา หากมีจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานมากเกินไปอาจทำให้ระบบทำงานช้าลงได้ โดยรหัสในการก่อรูปลำคลื่นอย่างง่ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถหาได้จากสมการ (3.9)

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

จากสมการ (3.9) เราสามารถคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในเมทริกซ์ของรหัสในการก่อรูปลำ คลื่น โดยกำหนดมุม $0 - 180$ องศา เพิ่มขึ้นครั้งละ 30 องศา และใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 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°

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

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

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

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

จ) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 120°

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

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

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

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

ฉ) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 150°

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

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

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

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

ข) ค่าถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดมุมเท่ากับ 180°

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

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

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

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

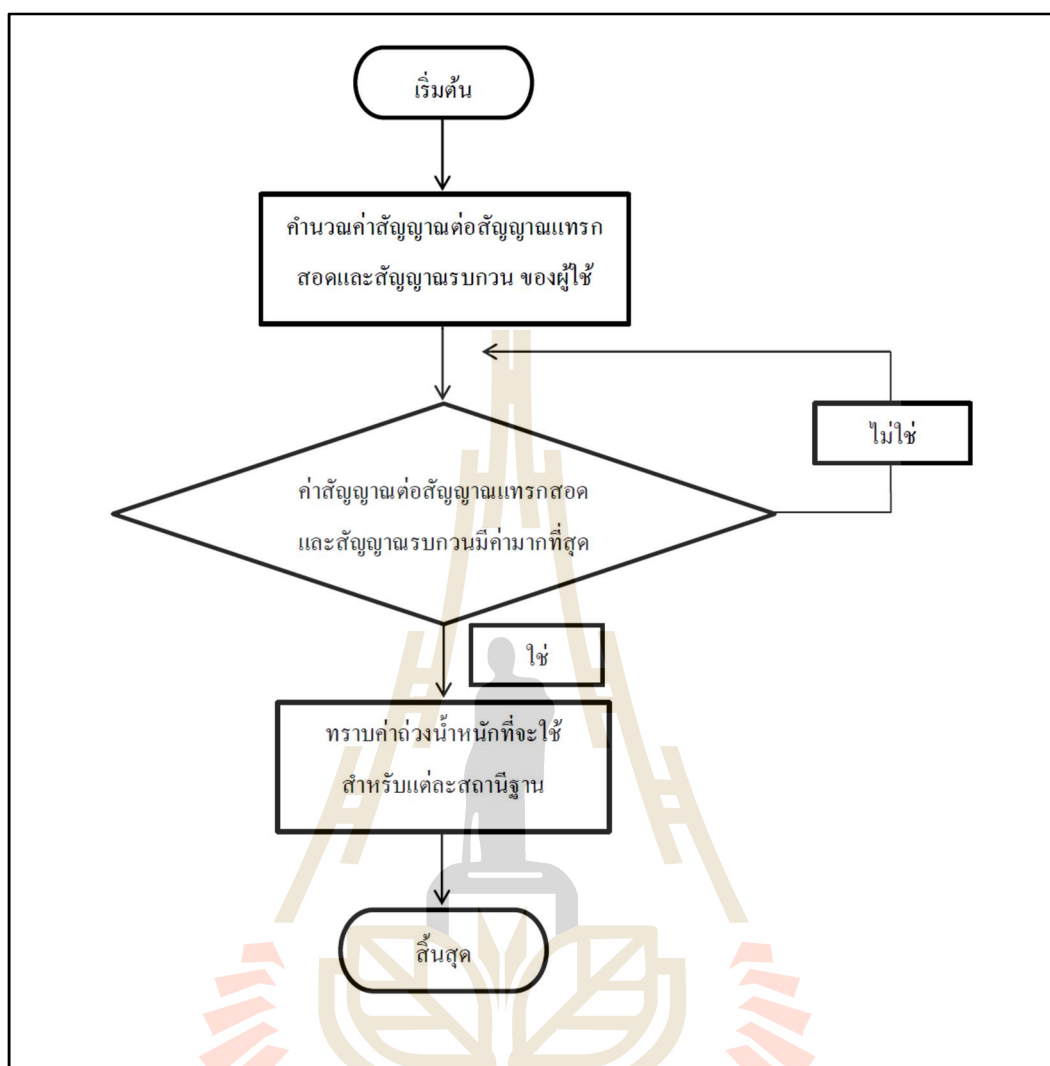
เราสามารถนำค่าถ่วงน้ำหนักในสมการ (3.10) จนถึงสมการ (3.37) เขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ ได้ดังสมการ (3.38)

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -0.91 + j0.41 & j & 1 & -j & -0.91 - j0.41 & -1 \\ 1 & 0.67 - j0.75 & -1 & 1 & -1 & 0.67 + j0.75 & 1 \\ -1 & -0.30 + j0.95 & -j & 1 & j & -0.30 - j0.95 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

จากสมการ (3.38) จะเห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้นั้นมีหลายชุด จึงได้มีการใช้เงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก ดังสมการ (3.39)

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

ซึ่งเป็นการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมากที่สุด ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังรูป 3.3 โดยขั้นแรกค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกกำหนดไว้

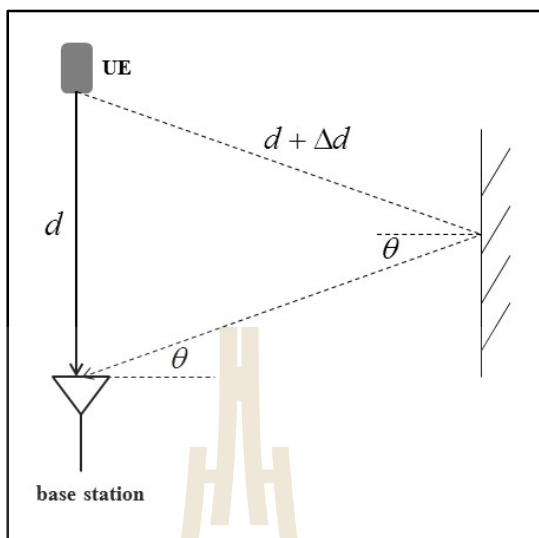


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก

จากนั้นที่สถานีฐานจะคำนวณค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน ของผู้ใช้แต่ละคน จากนั้นเปรียบเทียบค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ได้ ถ้าไม่ใช่ค่าที่มากที่สุดก็จะกลับไปคำนวณใหม่อีกรอบ โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักค่าอื่น ถ้าเป็นค่าที่มากที่สุด ค่าถ่วงน้ำหนักชุดนั้นจะถูกนำมาใช้ในการก่อรูปลำคลื่นไปหาผู้ใช้ของแต่ละสถานีฐาน

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 ซึ่งงานวิจัยนี้จำเป็นต้องรู้ทิศทางของการเข้ามาของสัญญาณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ข้อมูลจากความล่าช้าของสัญญาณจากแบบจำลองมาใช้ในการคำนวณหาทิศทางของสัญญาณของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิธีได้ดังนี้

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

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

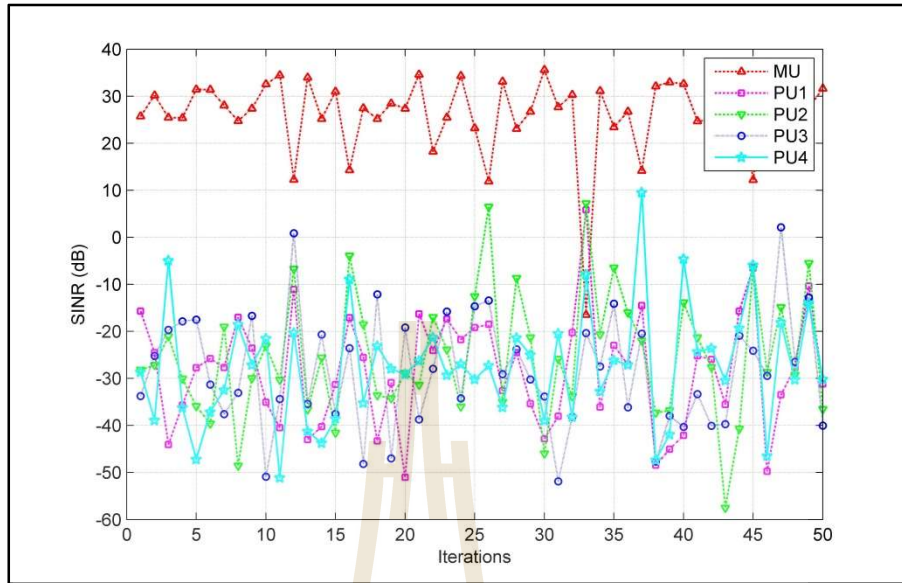
แทนสมการ (3.42) ใน (3.40) จะได้ทิศทางของสัญญาณที่มาถึงดังสมการ

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

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าแบบจำลองช่องสัญญาณ EPA มีทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาทั้งหมด 7 เส้นทาง แบบจำลองช่องสัญญาณ EVA มีทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาทั้งหมด 9 เส้นทาง และแบบจำลองช่องสัญญาณ ETU มีเส้นทางของสัญญาณเข้ามาทั้งหมด 9 เส้นทาง ซึ่งเป็นสัญญาณที่มาจากผู้ใช้เดียวกัน เมื่อทราบทิศทางของแต่ละแบบจำลองแล้วจากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ และนำไปเขียนเป็นเมทริกซ์ช่องสัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้แบบจำลองช่องสัญญาณ ETU ซึ่งเหมาะสมสำหรับพื้นที่ในเมือง 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 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคทั้ง 4 สถานีฐาน มีค่าต่ำกว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครเป็นอย่างมาก แต่ในขณะเดียวกัน เมื่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโครมีค่าต่ำลง ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโคจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร เพื่อให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโคมีค่าเพิ่มมากขึ้น

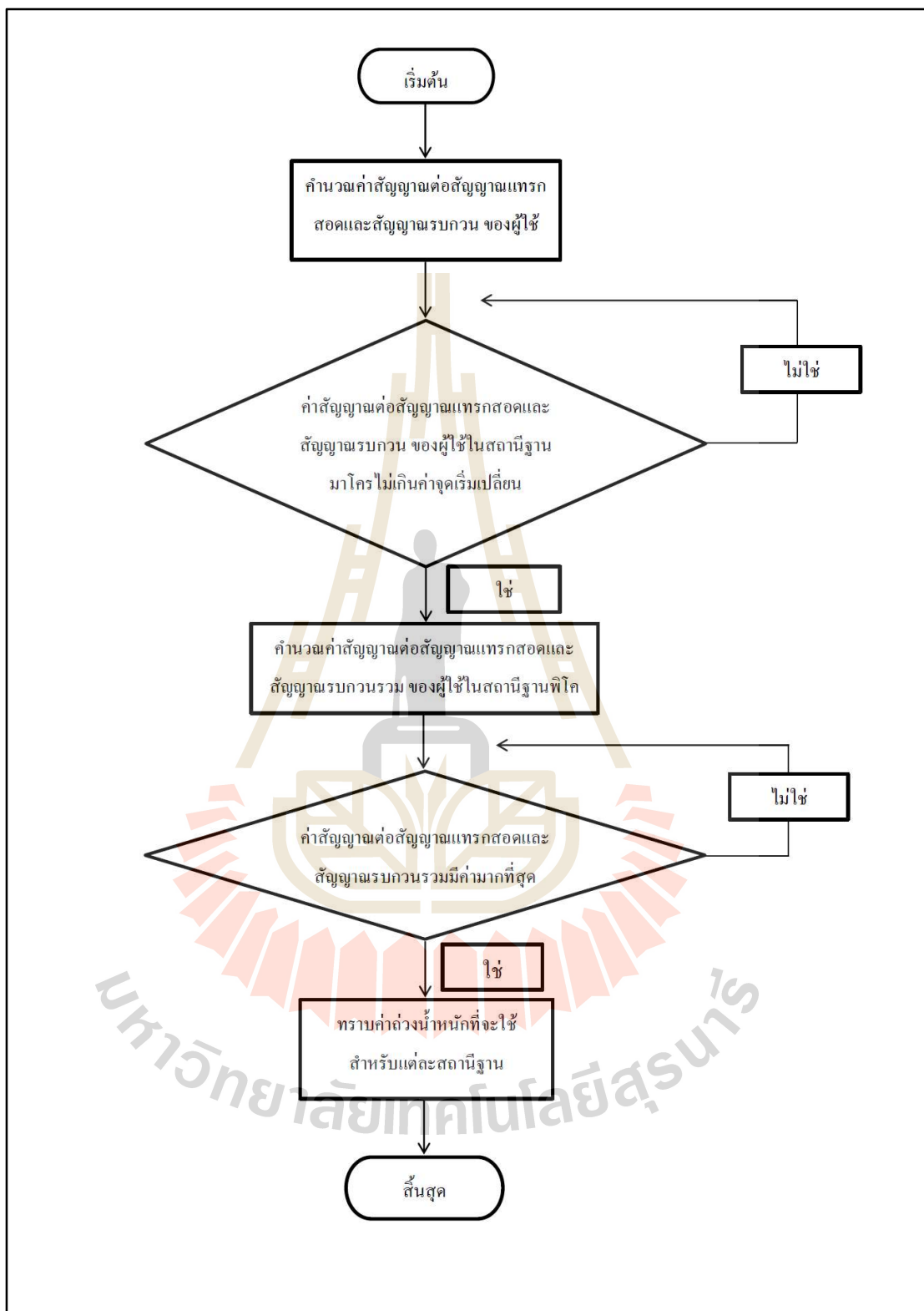
3.4 การออกแบบการก่อรูปลำคลื่นเพื่อให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

จากปัญหาข้างต้นที่ผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนน้อยกว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร เนื่องมาจากกำลังส่งที่แตกต่างกันของสถานีฐานแต่ละชนิด ทำให้เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นอาจมีบางส่วนของลำคลื่นไปรบกวนผู้ใช้ที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร โดยมีความคาดหวังว่าเมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจะส่งผลให้ผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน จากรูป 3.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบที่นำเสนอ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในแต่ละสถานีฐานจะมีค่าถ่วงน้ำหนักที่เตรียมไว้แล้ว และแต่ละสถานีฐานจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่มุม 0 – 180 องศา โดยห่างกันครั้งละ 30 องศา ในแต่ละสถานีฐานจะมีการคำนวณค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนเพื่อเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม ซึ่งเป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนไม่เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ เพื่อไม่ให้เกิดสัญญาณแทรกสอดไปยังผู้อื่น และในขั้นตอนมาบางครั้งจะมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าถ่วงน้ำหนักหลายค่าที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนไม่เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มเงื่อนไขขึ้นอีกหนึ่งเงื่อนไข คือการหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคมารวมกัน แล้วจากนั้นจึงเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโครวมมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะได้ค่าถ่วงน้ำหนักที่จะถูกนำไปใช้ในการก่อรูปลำคลื่นไปยังผู้ใช้ที่ต้องการ ดังนั้นเงื่อนไขที่ใช้เลือกค่าถ่วงน้ำหนักจะมีสองเงื่อนไขคือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนน้อยกว่าจุดเริ่มเปลี่ยน และ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนรวมมากที่สุด

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ การกำหนดค่าและตำแหน่งของสถานีฐาน ประเภทของสถานีฐาน การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก และผลการจำลองแบบเบื้องต้นที่แสดงให้เห็นว่า ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน ของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพีโคมีค่าน้อยกว่าผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครอย่างมาก จึงได้มีการคิดวิธีการเพื่อแก้ไขปัญหานี้โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้กับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าสถานีฐานมาโครนั้นมิกำลังส่งที่แรงกว่าสถานีฐานพีโค เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นอาจจะมีผลให้บางส่วนของลำคลื่นเกิดการแทรกสอดต่อผู้ใช้ใกล้เคียงได้





รูปที่ 3.6 แผนผังการทำงานของการทำงานการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ผู้ใช้ได้รับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่เท่าเทียมกันมากขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

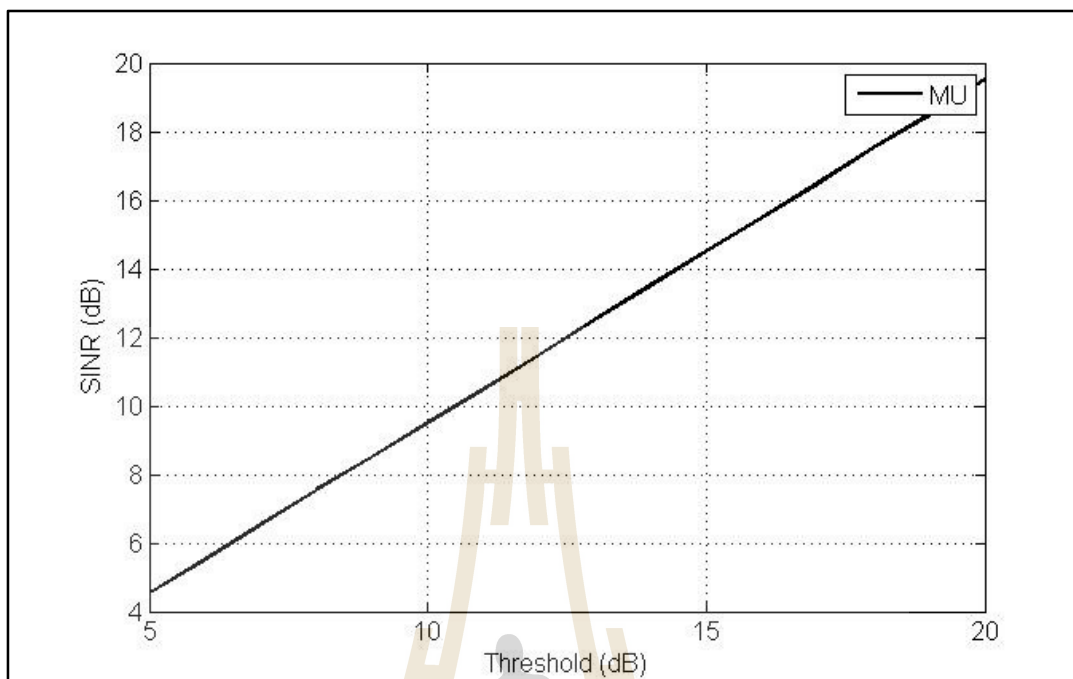
เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ในส่วนของการนำการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีพิโค นอกจากนี้ยังได้มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนลำคลื่น ที่จะส่งผลต่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนอย่างไร

4.2 การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร โดยเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เพื่อดูว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโคมีค่าเพิ่มขึ้นมากเพียงใด ซึ่งพารามิเตอร์เบื้องต้นที่กำหนดในการจำลองแบบเป็นดังตาราง 4.1 โดยกำลังส่งของสถานีฐานมาโครและสถานีฐานพิโคอ้างอิงจากงานวิจัยของ (Khandekar *et al*, 2010) ตำแหน่งของสถานีฐานมาโครจะถูกกำหนดให้คงที่ แต่ตำแหน่งของสถานีฐานพิโค และผู้ใช้ทั้งหมด จะถูกสุ่มขึ้นใหม่ทุกครั้ง โดยจำนวนครั้งที่สุ่มคือ 200 ครั้ง เพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างที่หลากหลาย จากนั้นจะนำค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

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

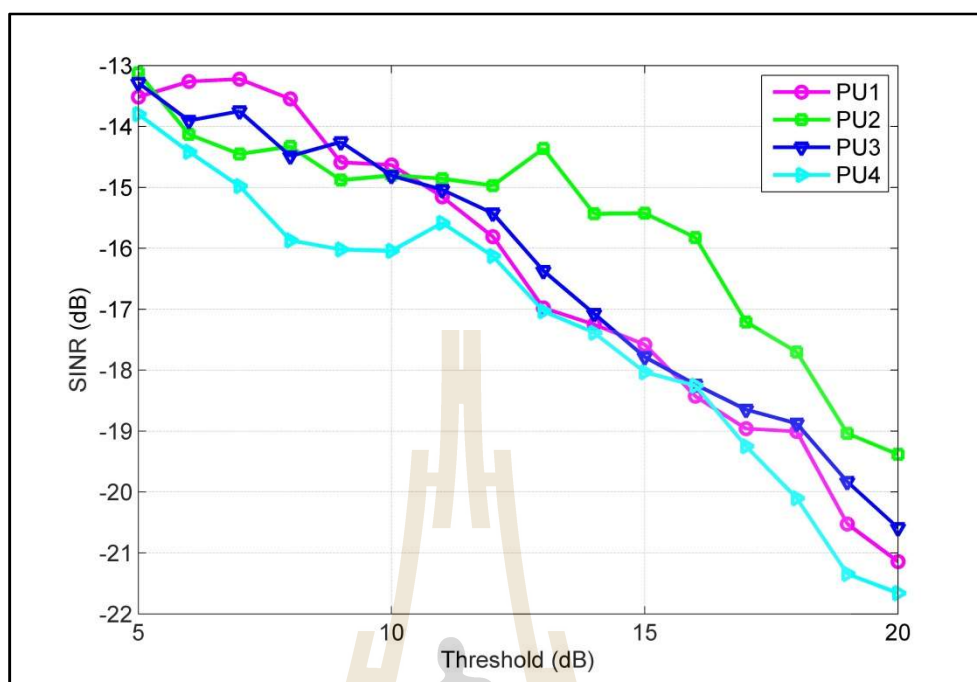


รูปที่ 4.1 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร

4.2.1 การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

ในส่วนนี้เป็นการสังเกตการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนจะส่งผลอย่างไรต่อผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคโดยมีการเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนด้วย โดยค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการสุ่มตำแหน่งของสถานีฐานพิโค และตำแหน่งของผู้ใช้จำนวน 200 ครั้ง และกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานดังตารางที่ 4.1

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

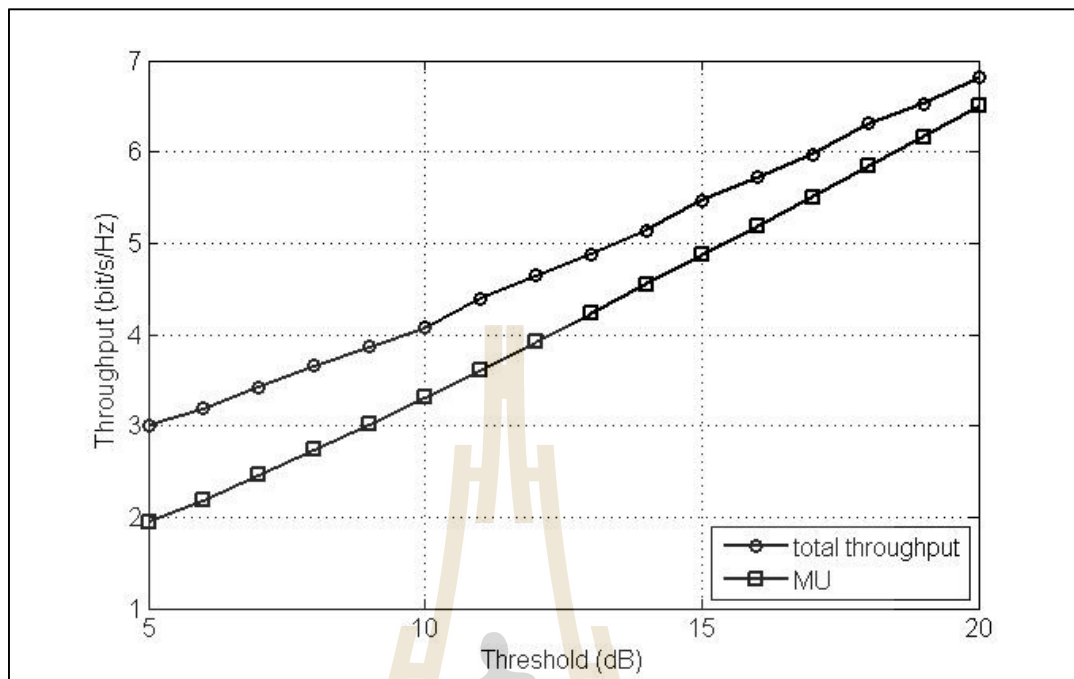


รูปที่ 4.2 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโค

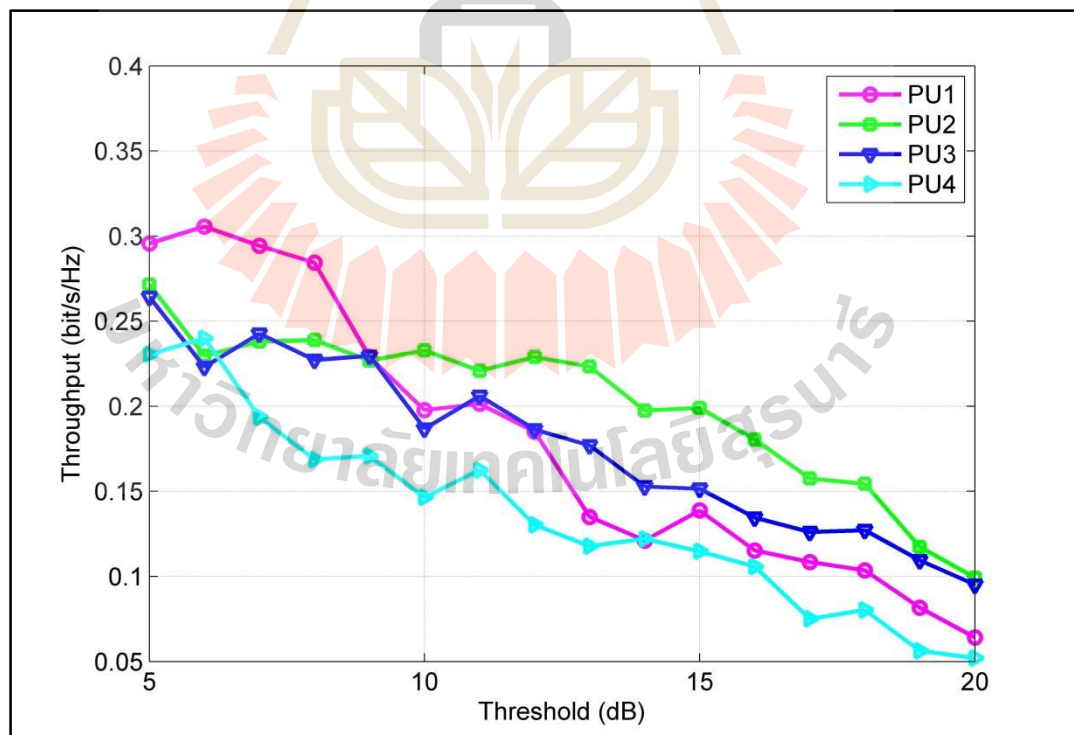
ตาราง 4.2 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนเมื่อไม่การกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน

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 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน พบว่าค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโครจะลดลง และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพีโคทั้ง 4 สถานี จะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่ทำให้ค่าวิสัยสามารถนั้นมีค่าดีขึ้น



รูปที่ 4.3 ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานมาโคร และค่าวิสัยสามารถรวมของระบบ



รูปที่ 4.4 ค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโค

ตาราง 4.3 ค่าวิสัยสามารถเมื่อไม่การกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน

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

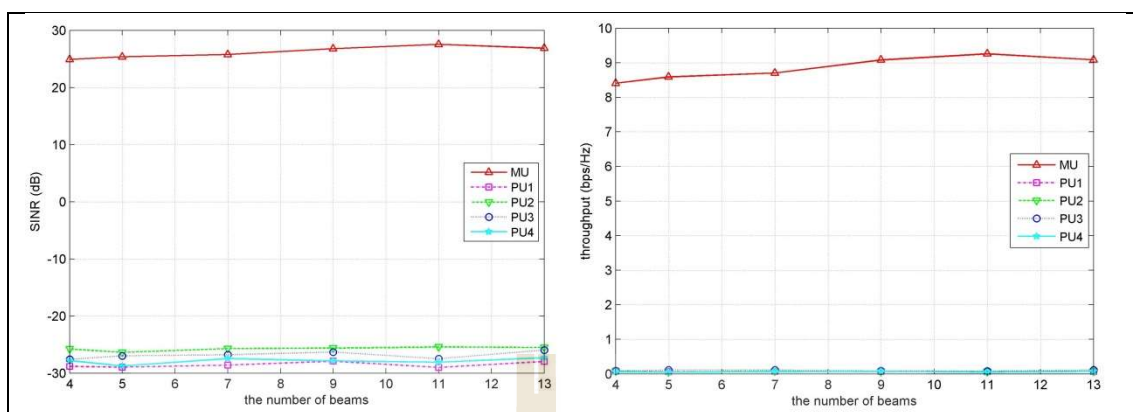
จากรูปที่ 4.5 – 4.8 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร และสถานีฐานพิโค เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนลำคลื่นจาก 4 – 13 ลำคลื่น โดยมีทั้งกรณีที่ไม่มีการกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยน และมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ได้แก่ 4.3 dB 10.3 dB และ 22.7 dB ตามลำดับ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

ตารางที่ 4.4 การแมปปี้งค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน กับการมอดูเลชัน

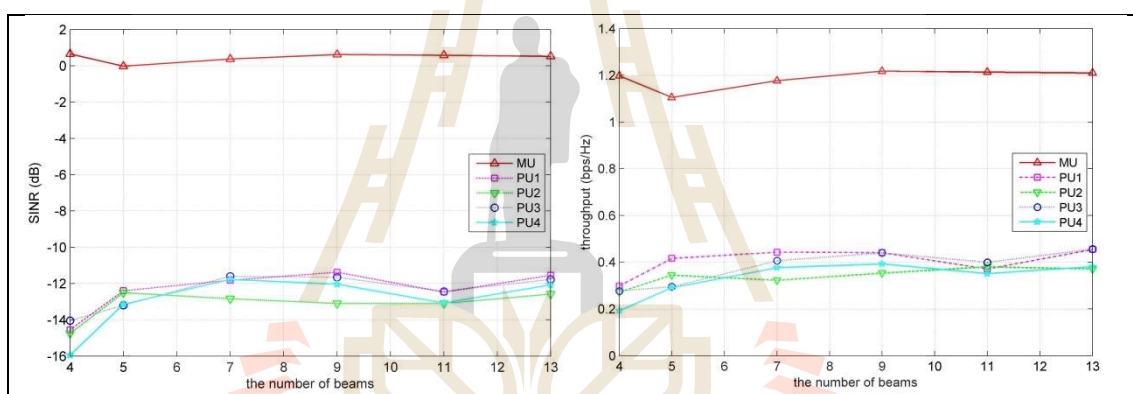
CQI Index	modulation	coding rate	spectrum efficiency (bps/Hz)	SINR estimate (dB)
1	QPSK	0.0762	0.1523	-6.7
2	QPSK	0.1172	0.2344	-4.7
3	QPSK	0.1885	0.3770	-2.3
4	QPSK	0.3008	0.6016	0.2
5	QPSK	0.4385	0.8770	2.4
6	QPSK	0.5879	0.1758	4.3
7	16QAM	0.3691	1.4766	5.9
8	16QAM	0.4785	1.9141	8.1
9	16QAM	0.6016	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 ลำคลื่นค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพีโคจะมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่จำนวนลำคลื่น ที่ 7 ลำคลื่น ให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสูงสุด เมื่อพิจารณาค่าวิสัยสามารถ จำนวนลำคลื่นที่ให้ค่าวิสัยสามารถสูงที่สุด คือที่ 7 – 9 ลำคลื่น

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



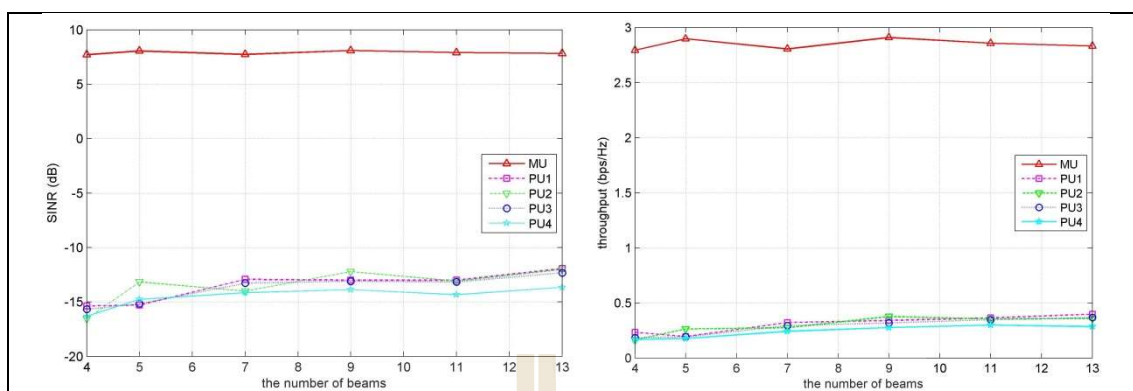
รูปที่ 4.5 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน



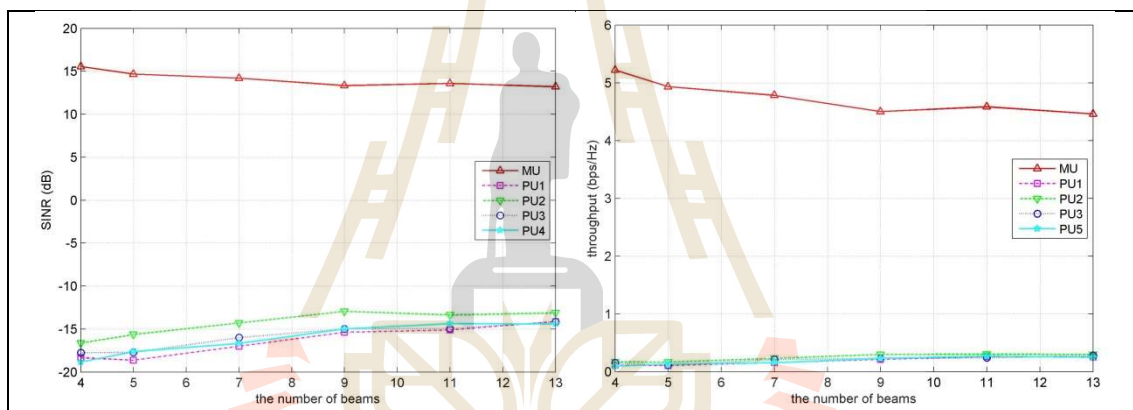
รูปที่ 4.6 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 4.3 dB

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 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิกโค ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อจำนวนลำคลื่นเท่ากับ 11 ลำคลื่น ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในสถานีฐานพิกโคจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อสังเกตที่ค่าวิสัยสามารถพบว่า



รูปที่ 4.7 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 10.3 dB



รูปที่ 4.8 ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ เมื่อกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 22.7 dB

ค่าวิสัยสามารถมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนลำคลื่นเพิ่มขึ้น และค่าวิสัยสามารถจะเริ่มลดลงเมื่อจำนวนลำคลื่นเท่ากับ 11 ลำคลื่น โดยจำนวนลำคลื่นที่ให้ค่าวิสัยสามารถสูงสุดคือที่จำนวนลำคลื่นเท่ากับ 9 ลำคลื่น

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถ ของผู้ใช้ในสถานียานพาหนะ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งจากการสอบถามผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์มือถือพบว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนที่สามารถใช้งานได้ จะอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 dB นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงจำนวนลำคลื่น ส่งผลต่อค่าวิสัยสามารถ และค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ ซึ่งจำนวนลำคลื่นที่ทำให้ได้รับค่าวิสัยสามารถ และ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุดที่จำนวนลำคลื่นเท่ากับ 7 ถึง 9 ลำคลื่น ส่วนสาเหตุที่เมื่อ

จำนวนลำคี่เส้นเท่ากับ 11 ลำคี่เส้น ค่าวิสัยสามารถ และ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนลำคี่เส้นก็เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดสัญญาณแทรกสอดให้เพิ่มขึ้นด้วย

4.3 สรุป

จากผลการจำลองแบบ พบว่าการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ที่สถานีฐานมาโครนั้นส่งผลอย่างมากต่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานีฐานพิโค โดยค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้มีค่าน้อย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาว่าจำนวนลำคี่เส้นว่าจะส่งผลอย่างไรบ้าง ถ้ามีการเพิ่มจำนวนลำคี่เส้น และมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนด้วย ผลที่ได้คือจำนวนลำคี่เส้นนั้นส่งผลต่อการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน และการเพิ่มจำนวนลำคี่เส้นนั้นไม่ได้ส่งผลดีต่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนเสมอไป



บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย

ในปัจจุบันที่การสื่อสารมีความสำคัญในชีวิตประจำวันมากขึ้น ส่งผลให้การรองรับผู้ใช้และปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นโดยสถานียานมาโครเพียงอย่างเดียวนั้นเป็นเรื่องยาก ผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือจึงได้มีการคิดหาวิธีการที่ช่วยแก้ไขปัญหานี้ ซึ่งวิธีนั้นคือการติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กไปในพื้นที่ครอบคลุมของสถานียานมาโคร โดยเรียกเครือข่ายแบบนี้ว่า เครือข่ายเฮเทอเน็ต ปัญหาที่ตามมา คือการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างสถานีฐาน ซึ่งวิธีแก้ไขคือการนำวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงพิกัดมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยประเภทของการก่อรูปลำคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น โดยวิธีการคือ จะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ก่อน แล้วจากนั้นจะมีเงื่อนไขในการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดี คือมีความซับซ้อนน้อย แต่มีข้อเสียคือ การลดสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด ส่วนอีกประเภทคือ การก่อรูปลำคลื่นแบบปรับตัว โดยวิธีการนี้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักตามสัญญาณที่รับเข้ามา ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้แม่นยำกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบสลับลำคลื่น แต่มีข้อเสียคือ ระบบมีความซับซ้อนและต้องการระบบที่ประมวลผลได้รวดเร็ว นอกจากการนำการก่อรูปลำคลื่นไปแก้ไขปัญหारेื่องการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์แล้วนั้น ยังมีงานวิจัยที่นำวิธีการก่อรูปลำคลื่นมาแก้ไขปัญหาค่าความไม่สมดุลกันของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน เนื่องมาจากกำลังส่งที่ต่างชนิดกันในสถานีฐานแต่ละชนิด งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ในเครือข่ายเฮเทอเน็ตมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นโดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานียานมาโคร เมื่อมีการจำลองแบบ ผลที่ได้พบว่าการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้ที่สถานียานมาโครนั้นส่งผลอย่างมากต่อค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน และค่าวิสัยสามารถของผู้ใช้ในสถานียานพิโค โดยค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้มีค่าน้อย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับจำนวนลำคลื่นว่าจะส่งผลอย่างไรถ้ามีการเพิ่มจำนวนลำคลื่น เมื่อไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน และมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนด้วย ผลที่ได้คือจำนวนลำคลื่นนั้นส่งผล และการเพิ่มจำนวนลำคลื่นนั้นไม่ได้ส่งผลดีต่อค่า

สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนเสมอไป

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการจำลองแบบนั้น เนื่องจากมีจำนวนสถานีฐานหลายสถานีฐานและแต่ละสถานีฐานมีจำนวนค่าถ่วงน้ำหนักหลายค่า ทำให้เมื่อต้องหาค่าถ่วงน้ำหนักที่ให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวนที่ไม่เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ต้องใช้เวลานานในการรวบรวมข้อมูล

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ ได้นำเสนอการออกแบบการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ภายในเครือข่ายเฮเทอเนตเท่าเทียมกันมากขึ้น โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งในงานนี้ยังไม่ได้ข้อสรุปที่แน่ชัดว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนควรมีค่าเป็นเท่าใด ถึงจะยุติธรรมต่อทั้งผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานมาโคร และผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโค เช่น มีการเปรียบเทียบค่า โดยสมมติมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 5 และ 10 dB จะเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่อยู่ในสถานีฐานพิโคก็เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ถ้าหากค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนมีการเพิ่มขึ้นไม่ต่างกันมาก ก็ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้ต่ำถึง 5 dB นอกจากนี้ การปรับรูปลำคลื่นเพียงอย่างเดียวนั้นอาจจะยังไม่เพียงพอ ถ้าหากมีการพัฒนาโดยร่วมกับการใช้วิธีการจัดสรรกำลัง (power allocation) อาจจะทำให้วิธีการนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้นไปอีก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

- มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล. 2556. **การประมวลผลสัญญาณสายอากาศแถวลำดับ**. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- ITU-R M.1225 International Telecommunication Union. **Guidelines forevaluation of radio transmission technologies for IMT-2000**. 1997.
- Khan, M.H.A. and Lee, M.H. (2012). **Zero-forcing beamforming with block diagonalization scheme for Coordinated Multi-Point transmission**. P
- 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.
- 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.

- 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.
- Motorola, Siemens, RAN4-38, Feb.2006
- 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.
- 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.
- R4-060334, **LTE Channel Models and simulations**. 3GPP, Ericsson, Elektrobit, Nokia,
- R4-070572, **Proposal for LTE channel models**. 3GPP, Ericsson, Nokia, Motorola, Rohde & Schwarz, RAN4-43, May 2007.
- 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.
- 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



ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

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).

