

การปรับปรุงวิสัยทัศน์และการจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายเฟมโตเซลล์โดยกลยุทธ์ราคา,
ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ



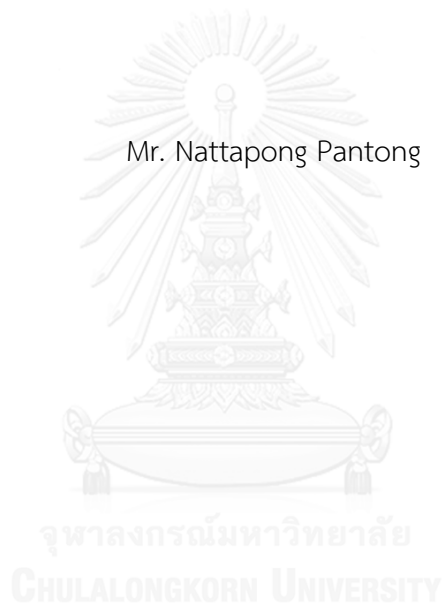
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THROUGHPUT IMPROVEMENT AND SPECTRUM ALLOCATION IN FEMTOCELL
NETWORKS BY PRICING STRATEGY, FAIRNESS AND QOS

Mr. Nattapong Pantong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงวิสัยความสามารถและการจัดสรรสเปกตรัมใน โครงข่ายเฟมโตเซลล์โดยกลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และ คุณภาพของบริการ
โดย	นายรัฐพงศ์ พานทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วาทีต เบญจพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสีหิทธิกุลกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทีต เบญจพลกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์นดิศ อัสวกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.บงการ หอมมาน)

นัฐพงศ์ พานทอง : การปรับปรุงวิสัยความสามารถและการจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายเฟมโตเซลล์ โดยกลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ (THROUGHPUT IMPROVEMENT AND SPECTRUM ALLOCATION IN FEMTOCELL NETWORKS BY PRICING STRATEGY, FAIRNESS AND QOS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วาทิต เบญจพลกุล, 65 หน้า.

ในปัจจุบันความต้องการปริมาณการใช้ข้อมูลในระบบโครงข่ายเซลล์ลู่ลาร์มีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีอุปกรณ์ที่สามารถรองรับการใช้งานพร้อมโปรแกรมประยุกต์ที่หลากหลาย จึงทำให้เกิดปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนมากที่สถานีฐานแมโครเซลล์ ส่งผลให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานลดลง ดังนั้นสถานีฐานเฟมโตเซลล์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหา ซึ่งสามารถลดปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนมากที่สถานีฐานแมโครเซลล์ รวมถึงสามารถเพิ่มความจุของสัญญาณและแก้ไขปัญหารัศมีการครอบคลุมของสัญญาณที่เข้าไม่ถึงสำหรับผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตามปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์และสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะเกิดขึ้นหากใช้ความถี่เดียวกัน ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งความถี่ระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ แต่ยังมีปัญหาในการคำนวณหาอัตราส่วนการจัดสรรสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐานแมโครเซลล์และสถานีฐานเฟมโตเซลล์ว่าควรเป็นจำนวนเท่าใด รวมถึงในการคำนวณหาจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้การจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ (FSA) ซึ่งกำหนดอัตราส่วนสำหรับการจัดสรรสเปกตรัม และจำนวนช่องสัญญาณย่อยแบบคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเฟมโตเซลล์ในโครงข่าย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์และแมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้นในโครงข่าย รวมทั้งหาจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ และปรับปรุงวิสัยความสามารถในโครงข่าย โดยใช้กลยุทธ์ด้านราคามาพิจารณา เพื่อให้ผู้ให้บริการได้รับรายได้สูงสุด พร้อมทั้งพิจารณาความยุติธรรมและคุณภาพของบริการสำหรับผู้ใช้งานด้วย ซึ่งพบว่าวิธีที่นำเสนอ นั้น ได้ค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดในโครงข่ายมากกว่าวิธี FSA ในช่วงแรกของจำนวนเฟมโตเซลล์ แต่หลังจากนั้นจะน้อยกว่าวิธี FSA และเมื่อพิจารณาทางด้านค่าบริการพบว่า วิธีที่เสนอมีค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ถูกกว่าแมโครเซลล์เสมอที่ทุกจำนวนเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะดึงดูดให้ผู้ให้บริการสนใจที่จะใช้บริการเฟมโตเซลล์มากขึ้น นอกจากนี้รายได้สูงสุดของผู้ให้บริการสำหรับวิธีที่เสนอนั้นมากกว่าวิธี FSA ทั้งหมดที่ทุกจำนวนเฟมโตเซลล์ และสุดท้าย เราได้จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้วางแผนในการจัดสรรสเปกตรัมอย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470242821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FEMTOCELL / FAIRNESS / PRICING / QOS / SPECTRUM ALLOCATION

NATTAPONG PANTONG: THROUGHPUT IMPROVEMENT AND SPECTRUM ALLOCATION IN FEMTOCELL NETWORKS BY PRICING STRATEGY, FAIRNESS AND QOS. ADVISOR: ASSOC. PROF. WATIT BENJAPOLAKUL, D.Eng., 65 pp.

At present, the demand for user capacity in the cellular network has been increasing due to having a smart device together with many application programs. The data stream will be transmitted considerably to the macrocell base station and this affects data speed of user. Thus, the femtocell base station becomes an alternative for the service provider to help to offload data from macrocell including to increase capacity and to solve coverage holes for user. However, the signal interference problem between macrocell and femtocell will occur when they use the same frequency. This problem can be solved by splitting spectrum between macrocell and femtocell. Nevertheless, it still faces problem to calculate the optimal spectrum ratios between macrocell and femtocell including the number of optimal sub-channels for femtocell. Previous works used fixed spectrum allocation (FSA), which specifies the fixed spectrum ratio and the fixed number of sub-channels that does not vary according to increased number of femtocells in the network.

In this thesis, we propose a method to find optimal spectrum ratio between macrocell and femtocell when the number of femtocells increases in the network including the number of optimal sub-channels for femtocell and throughput improvement in the network by pricing strategy for maximum revenue of service provider while considering fairness and QoS for user. The proposed method gets more total expected capacity in the network than FSA when the number of femtocells is small, after that the capacity is less than that of FSA. When considering price of service we found that the proposed method gives cheaper price of femtocell service than that of macrocell service for all number of femtocells. This is attractive for the service users to increase their usage. Moreover, the proposed method gives more revenue to service provider than FSA in all number of femtocells. Finally, we get optimal number of sub-channels to be applied effective spectrum allocation plan.

Department: Electrical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.วาทีต เบญจพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ที่มีประโยชน์กับงานวิจัย ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อิศวกุล และ รองศาสตราจารย์ ดร.บงการ หอม นาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ เพื่อน พี่ น้อง ในห้องวิจัยโทรคมนาคม และนอกห้องวิจัย สำหรับความมีน้ำใจ กำลังใจ ความช่วยเหลือ ตลอดจนผู้คนที่ผ่านเข้ามาในชีวิต ล้วนแต่เป็นแรงผลักดันในทางที่ดี ให้ข้าพเจ้าก้าวต่อไป

สุดท้าย สิ่งที่สำคัญที่สุดในชีวิตของข้าพเจ้านั้นคือ นายวิโรจน์ พานทอง และนางวรรณช พานทอง ผู้ให้กำเนิดข้าพเจ้า ผู้สนับสนุน ผู้ให้กำลังใจ และเป็นทุกๆอย่างในชีวิตอย่างหาที่สุดมิได้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างยิ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตและเป้าหมายของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความหมายของเฟมโตเซลล์	4
2.2 หลักการทำงานของเฟมโตเซลล์	4
2.3 กลยุทธ์ควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ (Access control strategy) ของเฟมโตเซลล์.....	6
2.4 การจัดสรรสเปกตรัมระหว่างแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์.....	7
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.5.1 การจัดสรรสเปกตรัมแบบใช้สเปกตรัมร่วมกันในโครงข่ายแมโครเซลล์กับเฟมโต เซลล์.....	7
2.5.1.1 แผนการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์.....	7
2.5.1.2 การวิเคราะห์การแทรกสอดของสัญญาณสำหรับการจัดการเฟมโตเซลล์ใน ระบบ OFDMA บนพื้นฐาน Fractional Frequency Reuse.....	9

2.5.1.3 การปรับปรุงวิสัยความสามารถสำหรับโครงข่ายเฟมโตเซลล์ OFDMA ผ่านการ จัดสรรสเปกตรัมและกลยุทธ์ควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ.....	10
2.5.2 การจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมในโครงข่ายแมโครเซลล์กับเฟมโตเซลล์	12
2.5.2.1 การจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์	12
2.5.2.2 ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการในการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่ง สเปกตรัมของโครงข่ายแมโครเซลล์-เฟมโตเซลล์.....	12
2.5.2.3 ราคาที่เหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมสำหรับผู้ให้บริการในการจัดการ เฟมโตเซลล์.....	13
2.5.2.4 วิสัยความสามารถที่เหมาะสมที่สุด, การจัดสรรสเปกตรัม และการควบคุมการ เข้าถึงช่องสัญญาณในโครงข่ายแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์.....	14
บทที่ 3 วิธีการที่นำเสนอ	15
3.1 วิธีการที่นำเสนอ	15
3.2 การหาอัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์และ ช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ในวิธีการที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์	18
3.2.1 กลยุทธ์ราคา.....	18
3.2.1.1 ฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของผู้ใช้บริการ (Utility function of user).....	18
3.2.1.2 รายได้สูงสุดของผู้ให้บริการ	19
3.2.2 ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการ	22
3.2.2.1 ความยุติธรรม.....	22
3.2.2.2 คุณภาพของบริการ	23
3.2.3 การจัดสรรสเปกตรัมและช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์	23
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	26
4.1 ผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์	26
4.1.1 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อจำนวนสเปกตรัม	27

4.1.2 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อความจุช่องสัญญาณ.....	32
4.1.3 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อรายได้ของผู้ให้บริการ	35
4.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรร สเปกตรัมแบบคงที่.....	36
4.1.4.1 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรร สเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$	37
4.1.4.2 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรร สเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$	41
4.1.4.3 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรร สเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$	45
4.2 แบบจำลองทำงาน	50
4.3 ผลการจำลองการทำงาน.....	53
4.3.1 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัม แบบคงที่ที่ $W_m = 0.3, 0.5, 0.7$	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
รายการอ้างอิง	61
ภาคผนวก.....	63
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	65

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์	26
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการทำงาน.....	51
ตารางที่ 5.1 จำนวนเฟมโตเซลล์ที่ Cap* ของวิธี OSA มากกว่าและน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ วิธี FSA ที่ W_m ต่างๆ จากการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์.....	58
ตารางที่ 5.2 จำนวนเฟมโตเซลล์ที่ Cap* ของวิธี OSA มากกว่าและน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ วิธี FSA ที่ W_m ต่างๆ จากการวิเคราะห์การจำลองการทำงาน.....	59



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 2.1 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์.....	4
รูปที่ 2.2 วงจรชีวิตการจัดระเบียบของเฟมโตเซลล์ด้วยตัวเอง.....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่.....	8
รูปที่ 2.4 การจัดสรร subband ในโครงข่ายเซลล์ลูลาร์โดยการใช้วิธี FFR.....	9
รูปที่ 2.5 การแบ่งพื้นที่แมโครเซลล์ออกเป็นสองส่วน.....	10
รูปที่ 2.6 การแบ่งสเปกตรัมความถี่ระหว่างเซลล์ด้านนอกและเซลล์ด้านใน.....	10
รูปที่ 2.7 การแบ่งสเปกตรัมความถี่ระหว่างแมโครเซลล์ 2 เซลล์.....	11
รูปที่ 2.8 การแบ่งสเปกตรัมในโครงข่ายแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์.....	13
รูปที่ 3.1 การจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์.....	16
รูปที่ 3.2 แบบจำลองการวางแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์.....	17
รูปที่ 3.3 แผนภาพวิธีที่นำเสนอ (1).....	17
รูปที่ 3.4 แผนภาพวิธีที่นำเสนอ (2).....	18
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในวิธีที่นำเสนอ.....	25
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ต่อจำนวน เฟมโตเซลล์ในแต่ละวิธี.....	27
รูปที่ 4.2 จำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) ที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ (1).....	29
รูปที่ 4.3 จำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) ที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ (2).....	30
รูปที่ 4.4 ผลต่างของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ระหว่างวิธี PFQ ₁ กับ วิธี P.....	31
รูปที่ 4.5 ผลต่างของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ระหว่างวิธี PFQ ₂ กับ วิธี PFQ ₁	31
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการแมโครเซลล์ และผู้ให้บริการ เฟมโตเซลล์ในแต่ละวิธี.....	32

รูปที่ 4.7 อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์เทียบกับ
 ผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ 32

รูปที่ 4.8 อัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ในวิธี PFQ₂
 เทียบกับวิธี PFQ₁ 33

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์
 และเฟมโตเซลล์ในแต่ละวิธี 33

รูปที่ 4.10 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อรายได้ของผู้ให้บริการในแต่ละวิธี..... 35

รูปที่ 4.11 อัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์ 36

รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
 จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ 37

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและ
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ 37

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้
 แมโครเซลล์สำหรับการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ 38

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ และ ผู้ใช้บริการ
 เฟมโตเซลล์ระหว่าง OSA กับ FSA ที่มี $W_m = 0.3$ 38

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ระหว่าง
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ 39

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์ระหว่างการ
 จัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ 39

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้ง
 แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
 จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ 40

รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
 จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ 41

รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและ
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ 41

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้
 แมโครเซลล์สำหรับการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ 42

รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ และผู้ให้บริการ
 เฟมโตเซลล์ระหว่าง OSA กับ FSA ที่มี $W_m = 0.5$ 42

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ระหว่าง
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ 43

รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์ระหว่าง
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ 44

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้ง
 แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
 จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ 44

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
 จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ 45

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและ
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ 46

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้
 แมโครเซลล์สำหรับการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ 46

รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ และผู้ให้บริการ
 เฟมโตเซลล์ระหว่าง OSA กับ FSA ที่มี $W_m = 0.7$ 47

รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ระหว่าง
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ 48

รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์ระหว่าง
 การจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ 48

รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้ง
 แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
 จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ 49

รูปที่ 4.33 ขั้นตอนของโปรแกรมที่ใช้จำลองการทำงานของวิธีที่เสนอ 52

- รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้ง
แม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ ในแต่ละ Random seed..... 53
- รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ ในแต่ละ Random seed..... 53
- รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้ง
แม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ ในแต่ละ Random seed..... 54
- รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ ในแต่ละ Random seed..... 54
- รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้ง
แม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ ในแต่ละ Random seed..... 55
- รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ
จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ ในแต่ละ Random seed..... 55
- รูปที่ 4.40 จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์จากผลการจำลองการทำงาน 56
- รูปที่ 5.1 วิธีที่เหมาะสมหากยึดหลักการให้ได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของ 59
- รูปที่ 5.2 วิธีที่เหมาะสมหากยึดหลักการให้ได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของ 59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการปริมาณการใช้ข้อมูลในระบบโครงข่ายเซลล์ลูลาร์มีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีอุปกรณ์ที่สามารถรองรับการใช้งานพร้อมโปรแกรมประยุกต์ที่หลากหลาย จึงทำให้เกิดปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนมากที่สถานีฐานแมโครเซลล์ ส่งผลให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานลดลง ดังนั้นสถานีฐานเฟมโตเซลล์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหา ซึ่งสามารถลดปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนมากที่สถานีฐานแมโครเซลล์ รวมถึงสามารถเพิ่มความจุของสัญญาณและแก้ไขปัญหาระยะการครอบคลุมของสัญญาณที่เข้าไม่ถึง (Coverage hole) สำหรับผู้ใช้งาน [1] อย่างไรก็ตามปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะเกิดขึ้นเมื่อสถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใช้ความถี่เดียวกัน ดังนั้นการจัดสรรสเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการแก้ปัญหา [2] ซึ่งการจัดสรรสเปกตรัมถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือการจัดสรรสเปกตรัมแบบใช้สเปกตรัมร่วมกันและการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัม ซึ่งการจัดสรรสเปกตรัมแบบใช้สเปกตรัมร่วมกันนั้นไม่สามารถแก้ไขปัญหาระยะการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ [3], [4], แต่การจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ [2]

ถึงแม้ว่าการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมสามารถแก้ปัญหาระยะการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ แต่ยังมีปัญหาในการจัดสรรสเปกตรัมให้สถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในอัตราส่วนเท่าใด รวมถึงหาจำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) สำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์เท่าใด จึงจะเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาจะกำหนดอัตราส่วนสำหรับการจัดสรรสเปกตรัมให้สถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ รวมถึงจำนวนช่องสัญญาณย่อยแบบคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนเฟมโตเซลล์ที่เพิ่มขึ้นในโครงข่าย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์และแมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ รวมถึงจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสม เมื่อจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้นในโครงข่าย พร้อมทั้งปรับปรุงวิธีสามารถในระบบโครงข่ายรวม (แมโครเซลล์-เฟมโตเซลล์) โดยใช้กลยุทธ์ด้านราคามาพิจารณา เพื่อให้ผู้ใช้บริการได้รับรายได้สูงสุดพร้อมคุณภาพของบริการและความยุติธรรมสำหรับผู้ใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อจัดสรรสเปกตรัมให้สามารถใช้สเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่ายเฟมโตเซลล์ โดยใช้กลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ
2. ศึกษาและวิเคราะห์หาจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์เพื่อปรับปรุงวิสัยความสามารถในโครงข่ายรวม

1.3 ขอบเขตและเป้าหมายของวิทยานิพนธ์

1. เสนอการจัดสรรสเปกตรัมให้สามารถใช้สเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่ายเฟมโตเซลล์ โดยใช้กลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ
2. เสนอสมการคณิตศาสตร์สำหรับกลยุทธ์ราคา เพื่อหาค่าอัตราส่วนของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ให้เหมาะสม
3. เสนอสมการคณิตศาสตร์สำหรับหาเกณฑ์ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการ เพื่อหาจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์
4. ศึกษาความยุติธรรมและคุณภาพของบริการที่ส่งผลกระทบต่อการจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายเฟมโตเซลล์
5. สร้างแบบจำลองการทำงานของ การจัดสรรสเปกตรัม เพื่อหาจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมในโครงข่ายเฟมโตเซลล์
6. นำผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของ การจัดสรรสเปกตรัมมาวิเคราะห์หาวิสัยสามารถสูงสุดในโครงข่ายรวม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงาน การจัดการ และเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับเฟมโตเซลล์
2. ศึกษาการจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายเซลล์ลูลาร์
3. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรสเปกตรัมระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์และสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เคยมีผู้นำเสนอ
4. พัฒนาและวิเคราะห์เปรียบเทียบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการจัดสรรสเปกตรัมให้สถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ รวมถึงหาจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่

เหมาะสมสำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยใช้กลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการผ่านทางสมการเชิงคณิตศาสตร์

5. จำลองการทำงานของการจัดสรรสเปกตรัม เพื่อหาจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์
6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของวิธีที่นำเสนอกับวิธีที่มีผู้นำเสนอไว้แล้ว
7. รวบรวมข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

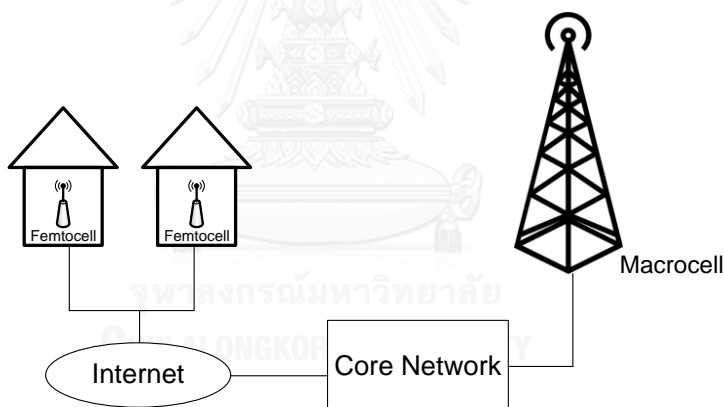
1. สามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการจัดสรรสเปกตรัมให้สถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ รวมถึงจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมได้ โดยผู้ให้บริการได้รับรายได้สูงสุด พร้อมทั้งมีคุณภาพของบริการและความยุติธรรมสำหรับผู้ใช้งาน
2. นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานกับผู้ให้บริการในโครงข่ายเฟมโตเซลล์ในเรื่องการวางแผนจัดสรรคลื่นความถี่
3. ได้เรียนรู้ถึงปัญหา การแก้ไขปัญหา และกระบวนการคิดในการทำงานวิจัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของเฟมโตเซลล์ [5-7]

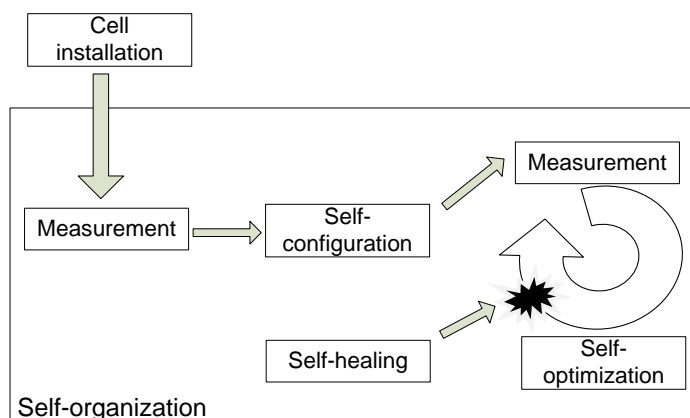
คำว่าเฟมโตมาจากขนาดรัศมีของการกระจายคลื่นวิทยุที่มีขนาดเล็กกว่าแมโครเซลล์, ไมโครเซลล์ และ พิกเซลล์ มีรัศมีของการกระจายคลื่นวิทยุน้อยกว่า 30 เมตร ความสามารถรองรับผู้ใช้งานแบ่งตามขนาดของพื้นที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชิปเซ็ต (Chipset) ที่ใช้งาน เช่น ในที่อยู่อาศัยรองรับประมาณ 3-5 คน, ในสำนักงานขนาดเล็กรองรับประมาณ 8 คน, ในสำนักงานขนาดใหญ่รองรับได้ประมาณ 16-32 คน เฟมโตเซลล์ถูกรู้จักในชื่อที่เรียกว่าสถานีฐานบ้าน (Home base station) ใช้ในระบบโครงข่ายเซลล์ลูลาร์ (Cellular network) เปรียบเสมือนจุดเข้าถึง (Access point) ซึ่งจะเชื่อมต่อจากอุปกรณ์เคลื่อนที่ไปยังผู้ให้บริการ โดยผ่านทางสายเช่าสัญญาณดิจิทัล (Digital Subscriber Line : DSL), ใยแก้วนำแสง, หรือ เทคโนโลยีไร้สายระยะไกล



รูปที่ 2.1 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์

2.2 หลักการทำงานของเฟมโตเซลล์ [5]

เฟมโตเซลล์มีพื้นฐานการทำงานที่แตกต่างจากเซลล์ขนาดเล็กแบบดั้งเดิม โดยเมื่อเฟมโตเซลล์เริ่มติดตั้ง เฟมโตเซลล์จะสามารถจัดระเบียบโครงข่ายได้ด้วยตัวเอง (Self-Organizing Networks) ตามความเหมาะสมของสถานการณ์ ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรชีวิตการจัดระเบียบของเฟมโตเซลล์ด้วยตัวเอง

รูปที่ 2.2 ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ การวัด (Measurement), การจัดรูปลักษณะด้วยตัวเอง (Self-configuration), การปรับค่าให้เหมาะสมที่สุดด้วยตัวเอง (Self-optimization) และการรักษาด้วยตัวเอง (Self-healing)

กล่าวคือ เมื่อเฟมโตเซลล์ติดตั้งเสร็จแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการจัดระเบียบโครงข่ายได้ด้วยตัวเอง (Self-Organizing Networks) โดยเริ่มต้นที่ขั้นตอนการวัด ขั้นตอนการวัดจะเก็บข้อมูลเพื่อประเมินพฤติกรรมของโครงข่าย และทำการ Trigger โดยข้อมูลการวัดนี้ได้มาจากหลายๆแหล่ง เช่น ระบบย่อยสนับสนุนการปฏิบัติการ (Operation Support Subsystem), โหนดเพื่อนบ้าน (Neighbouring node) หรืออุปกรณ์ปลายทางผู้ใช้ (User terminal) โดยหาความสัมพันธ์ของข้อมูลเพื่อจัดรูปลักษณะและปรับค่าให้เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างข้อมูล เช่น แบบรูปทราฟฟิก (Traffic pattern), การเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน, เงื่อนไขการแทรกสอดของสัญญาณ และการจางหายของสัญญาณ (Fading) ในขั้นตอนการจัดรูปลักษณะด้วยตัวเอง (Self-configuration) พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น รายชื่อเพื่อนบ้าน (Neighbouring list), การจัดรูปลักษณะแฮนด์โอเวอร์ (Handover configuration), กำลังสัญญาณนำร่อง (Pilot power) จะถูกจัดรูปลักษณะ นอกจากนี้เฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งอยู่แล้วสามารถใช้ขั้นตอนการจัดรูปลักษณะด้วยตัวเองในการรับรู้เมื่อมีเฟมโตเซลล์ตัวใหม่ หรือลักษณะ (Feature) ใหม่ๆเกิดขึ้นในโครงข่าย เช่น ชนิดสายอากาศ, การให้บริการต่างๆ ในขั้นตอนการปรับค่าให้เหมาะสมที่สุดด้วยตัวเอง (Self-optimization) กระบวนการการวัดจะถูกวัดเป็นระยะๆ เพื่อปรับอัลกอริทึม และพารามิเตอร์ของเฟมโตเซลล์ โดยเป็นไปตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม การใช้ความรู้

ที่ได้จากสภาพแวดล้อม จะทำให้รัศมีการครอบคลุม และความจุของช่องสัญญาณสามารถปรับค่าให้เหมาะสมที่สุดได้ รวมถึงการเติมเต็มรัศมีการครอบคลุมที่เข้าไม่ถึง (Coverage hole) และจัดการปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณ ในกรณีที่การปรับค่าให้เหมาะสมที่สุดด้วยตัวเองไม่สามารถทำให้เราได้รับสมรรถนะตามที่ต้องการ เฟมโตเซลล์จะแจ้งเตือน (Trigger alarm) พร้อมทั้งให้ผู้ดูแลเข้าไปจัดการ เช่น การจัดการเฟมโตเซลล์ตัวใหม่ ส่วนขั้นตอนการรักษาด้วยตัวเอง (Self-healing) จะตัดสินใจเรื่องการสูญเสียรัศมีการครอบคลุม และความจุของช่องสัญญาณ เนื่องจากเกิดความล้มเหลวในโครงข่าย เช่น เฟมโตเซลล์เกิดการเสียหาย โดยจะปรับอัลกอริทึม และพารามิเตอร์ในเฟมโตเซลล์ข้างเคียงรอบๆ แต่เมื่อความล้มเหลวของโครงข่ายถูกแก้ไข พารามิเตอร์ทุกตัวจะถูกคืนค่าเป็นค่าดั้งเดิม

2.3 กลยุทธ์ควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ (Access control strategy) ของเฟมโตเซลล์ [2], [5]

กลยุทธ์ควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณของเฟมโตเซลล์แบ่งออกเป็น 3 วิธีได้แก่

1. กลยุทธ์การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบเปิด (Open access) คือ ผู้ใช้งานทุกคนสามารถเข้าถึงช่องสัญญาณของเฟมโตเซลล์ได้ วิธีนี้มีประโยชน์สำหรับผู้ที่ไม่ได้เป็นสมาชิกแต่สามารถเข้าถึงช่องสัญญาณของเฟมโตเซลล์ได้ เมื่อผู้ใช้อยู่ใกล้กับเฟมโตเซลล์นั้นๆ ซึ่งสามารถลดการใช้ทรัพยากรในระบบทั้งในด้านกำลังส่งและด้านความถี่
2. กลยุทธ์การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบปิด (Close access) คือ ผู้ใช้งานที่เป็นสมาชิกเท่านั้นที่สามารถเข้าถึงช่องสัญญาณของเฟมโตเซลล์ได้ วิธีนี้จะมีการแทรกสอดของสัญญาณเพิ่มขึ้นในกรณีที่ผู้ใช้แมโครเซลล์อยู่ใกล้เฟมโตเซลล์มากกว่าแมโครเซลล์ แมโครเซลล์จึงต้องเพิ่มกำลังในการส่ง ทำให้ผู้ใช้เฟมโตเซลล์ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มกำลังในการส่งของสถานีฐานแมโครเซลล์ จึงเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้เฟมโตเซลล์และสถานีฐานแมโครเซลล์
3. กลยุทธ์การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบไฮบริด (Hybrid access) คือ ผู้ใช้งานที่ไม่เป็นสมาชิกสามารถเข้าถึงช่องสัญญาณของเฟมโตเซลล์ได้ แต่ถูกจำกัดปริมาณช่องสัญญาณในการเข้าถึง

ข้อดีของเฟมโตเซลล์ ถูกแบ่งออกเป็นมุมมองในส่วนของผู้ใช้งาน กับมุมมองในส่วนของผู้ให้บริการ โดยมุมมองในส่วนของผู้ใช้งานคือ สามารถเพิ่มความจุของช่องสัญญาณในการใช้งาน, สามารถลดการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของผู้ใช้งาน เนื่องด้วยขนาดรัศมีการกระจายคลื่นวิทยุที่น้อย, สามารถติดตั้งด้วยตนเอง, สามารถนำมาใช้ในพื้นที่ที่อยู่นอกเหนือการครอบคลุมของรัศมีการสถานีฐานทั้งในพื้นที่ต่างจังหวัด และพื้นที่ในเขตเมืองใหญ่ ด้านมุมมองในส่วนของผู้ให้บริการคือ

สามารถลดภาระการทำงานของแม่โครเซลล์, ลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่างๆเนื่องมาจากการติดตั้งสถานีฐานเพิ่ม, เมื่อเปรียบเทียบกับพิกเซล และเทคโนโลยีที่ใช้ภายในที่อื่น ๆ เฟมโตเซลล์จะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าเมื่อต้องการเพิ่มรัศมีการครอบคลุมในที่ร่ม และด้านการปรับปรุงคุณภาพการให้บริการ

2.4 การจัดสรรสเปกตรัมระหว่างแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ [8]

การจัดสรรสเปกตรัมระหว่างแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือการจัดสรรแบบแบ่งสเปกตรัม และแบบใช้สเปกตรัมร่วมกัน การจัดสรรแบบแบ่งสเปกตรัมนั้น แม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์จะใช้แถบความถี่คนละแถบความถี่ จึงไม่เกิดการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ แต่ไม่สามารถใช้สเปกตรัมให้เกิดประสิทธิภาพได้ ส่วนการจัดสรรแบบใช้สเปกตรัมร่วมกันนั้น ทั้งแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์จะใช้แถบความถี่เดียวกันได้ โดยที่เฟมโตเซลล์จะใช้หลักการการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเกิดประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัม แต่จะเกิดปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแทรกสอดของสัญญาณระหว่างเฟมโตเซลล์เพื่อนบ้านยังคงเป็นปัญหา เนื่องจากเฟมโตเซลล์ สามารถติดตั้งโดยผู้ใช้งาน ตำแหน่งการติดตั้งของเฟมโตเซลล์จึงเกิดขึ้นแบบสุ่ม ซึ่งเป็นปัญหาของผู้ให้บริการที่ไม่อาจคาดการณ์ตำแหน่งการติดตั้งของเฟมโตเซลล์ได้ นำมาซึ่งปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างเฟมโตเซลล์กับแม่โครเซลล์

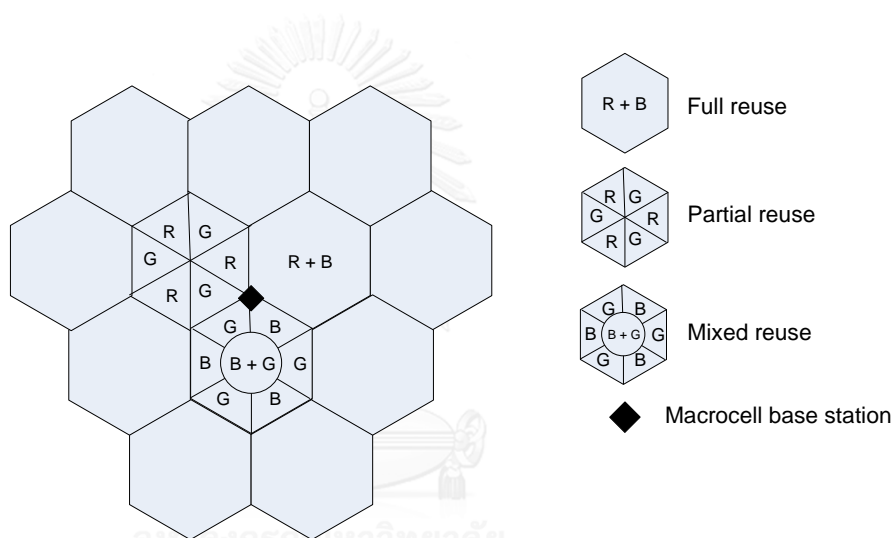
2.5.1 การจัดสรรสเปกตรัมแบบใช้สเปกตรัมร่วมกันในโครงข่ายแม่โครเซลล์กับเฟมโตเซลล์

2.5.1.1 แผนการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ [3]

งานวิจัยนี้เป็นการแก้ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณในโครงข่ายแม่โครเซลล์กับเฟมโตเซลล์บนพื้นฐานวิธี Fractional Frequency Reuse (FFR) โดยเสนอโครงสร้างแบบ Double frequency reuse ดังรูปที่ 2.3 กล่าวคือ แม่โครเซลล์แต่ละเซลล์ประกอบด้วย 3 เซกเตอร์ ซึ่งเฟมโตเซลล์ที่ติดตั้งใน 3 เซกเตอร์ของแม่โครเซลล์จะอนุญาตให้ใช้ความถี่ของ 2 เซกเตอร์ที่ติดกันในแม่โครเซลล์เดียวกัน แล้วต้องไม่ซ้ำกับความถี่ที่แม่โครเซลล์ใช้ ซึ่งเฟมโตเซลล์ สามารถใช้ความถี่ได้ 2 ใน 3 ของความถี่ที่มี

อยู่ โดยทั้ง 3 เซกเตอร์สามารถใช้เทคนิคการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ โดยแบ่งเทคนิคออกเป็น 3 แบบ คือ

1. Full reuse เป็นการนำความถี่ของ 2 เซกเตอร์ที่ติดกันในแมโครเซลล์เดียวกัน มาใช้ในพื้นที่เซกเตอร์นั้นได้ทั้งหมด
2. Partial reuse เป็นการนำความถี่ของ 2 เซกเตอร์ที่ติดกันในแมโครเซลล์เดียวกัน มาแบ่งเป็น 6 ส่วนเท่าๆกันในพื้นที่เซกเตอร์นั้น
3. Mixed reuse เป็นการนำความถี่ของ 2 เซกเตอร์ที่ติดกันในแมโครเซลล์เดียวกัน มาใช้เทคนิคแบบ Full reuse และ Partial reuse

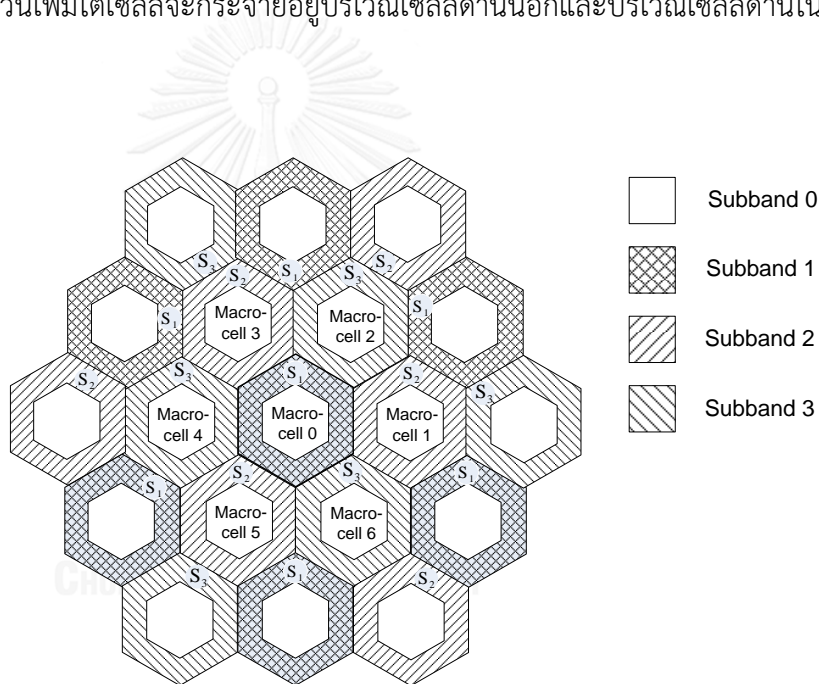


รูปที่ 2.3 โครงสร้างการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่

แต่วิธีนี้ที่ขอบเซลล์ยังคงมีปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณจากแมโครเซลล์ หากเพิ่มโตะเซลล์ ที่ขอบเซลล์เลือกความถี่ในเซกเตอร์ที่ติดกันเหมือนกับความถี่ที่ใช้กับแมโครเซลล์ ขณะที่ภายในเซลล์ ยังคงมีปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณหากเพิ่มโตะเซลล์มีความหนาแน่นมาก

2.5.1.2 การวิเคราะห์การแทรกสอดของสัญญาณสำหรับการจัดการเฟมโตเซลล์ในระบบ OFDMA บนพื้นฐาน Fractional Frequency Reuse [4]

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณในโครงข่ายแมโครเซลล์กับเฟมโตเซลล์บนพื้นฐานวิธี Fractional Frequency Reuse (FFR) ในเงื่อนไขการใช้ subband ที่ไม่ซ้ำกัน (Orthogonal subband) ระหว่างบริเวณเซลล์ด้านนอกกับบริเวณเซลล์ด้านในตามรูปที่ 2.4 เพื่อลดการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างบริเวณเซลล์ด้านนอกกับบริเวณเซลล์ด้านในภายในเซลล์เดียวกัน รวมถึงลดการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างเซลล์ โดยกำหนดให้ทุกแมโครเซลล์อยู่ตรงกลางเซลล์ในบริเวณเซลล์ด้านใน โดยใช้ subband ที่ 0 (S_0) และให้บริเวณเซลล์ด้านนอกทุกเซลล์ใช้ subband นอกเหนือจาก S_0 ส่วนเฟมโตเซลล์จะกระจายอยู่บริเวณเซลล์ด้านนอกและบริเวณเซลล์ด้านในของทุกเซลล์



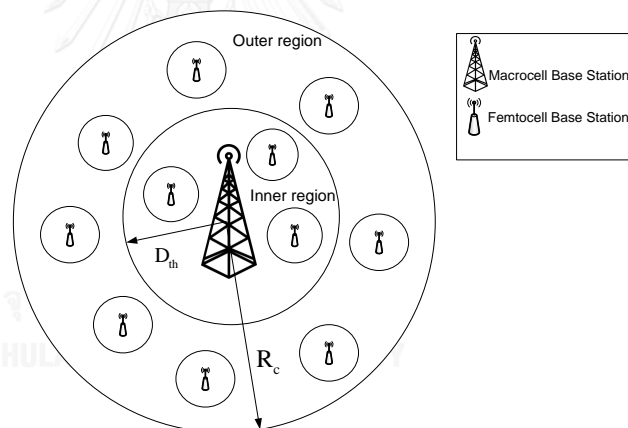
รูปที่ 2.4 การจัดสรร subband ในโครงข่ายเซลล์ลูลาร์โดยการใช้วิธี FFR

จากการวิเคราะห์ได้พบปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณภายในเซลล์ โดย S_0 , S_1 จะมี Spectral efficiency เพิ่มขึ้นตามระยะ r_f (ระยะห่างระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์ กับตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์) โดยที่ r_f ไกลๆ ยังคงมีปัญหาในเรื่อง Spectral efficiency อย่างไรก็ตามในบริเวณเซลล์ด้านนอกและบริเวณเซลล์ด้านในยังคงมีปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณภายในบริเวณเดียวกัน เนื่องจากบริเวณเซลล์ด้านนอกใช้ subband เหมือนกัน และบริเวณเซลล์ด้านในใช้ subband เหมือนกัน ดังนั้นเฟมโตเซลล์ควรใช้ subband ที่ต่างกันเมื่ออยู่ใกล้กับสถานีฐานแมโคร

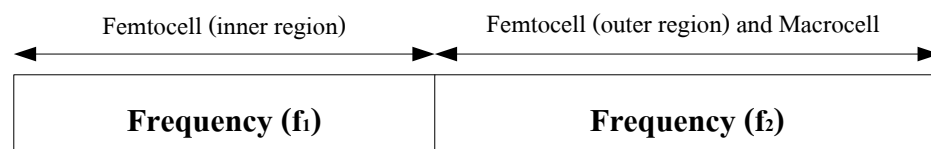
เซลล์ รวมถึงผู้ใช้แมโครเซลล์ควรใช้ subband ที่ต่างกันเมื่ออยู่ใกล้กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ เพื่อลดการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างกัน

2.5.1.3 การปรับปรุงวิสัยความสามารถสำหรับโครงข่ายเฟมโตเซลล์ OFDMA ผ่านการจัดสรรสเปกตรัมและกลยุทธ์ควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ [9]

งานวิจัยนี้เป็นการแก้ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณในโครงข่ายแมโครเซลล์กับเฟมโตเซลล์เพื่อปรับปรุงวิสัยความสามารถสำหรับโครงข่ายเฟมโตเซลล์ โดยการจัดสรรสเปกตรัม ซึ่งมีเงื่อนไขว่าเฟมโตเซลล์ตัวใดๆ ไม่สามารถใช้ช่องสัญญาณเดียวกันได้ หากเฟมโตเซลล์ตัวใดๆ นั้นมีรัศมีทับซ้อนกันเพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างกัน ผู้เสนอได้แบ่งพื้นที่แมโครเซลล์ออกเป็นสองส่วนตามรูปที่ 2.5 โดย D_{th} คือรัศมีในบริเวณเซลล์ด้านใน, R_c คือรัศมีของแมโครเซลล์ กำหนดให้เฟมโตเซลล์ในบริเวณเซลล์ด้านในใช้สเปกตรัมเดียวกับแมโครเซลล์ในเซลล์อื่นๆ และบริเวณเฟมโตเซลล์ในเซลล์ด้านนอกใช้สเปกตรัมเดียวกับแมโครเซลล์ในเซลล์เดียวกันดังรูปที่ 2.6, 2.7



รูปที่ 2.5 การแบ่งพื้นที่แมโครเซลล์ออกเป็นสองส่วน



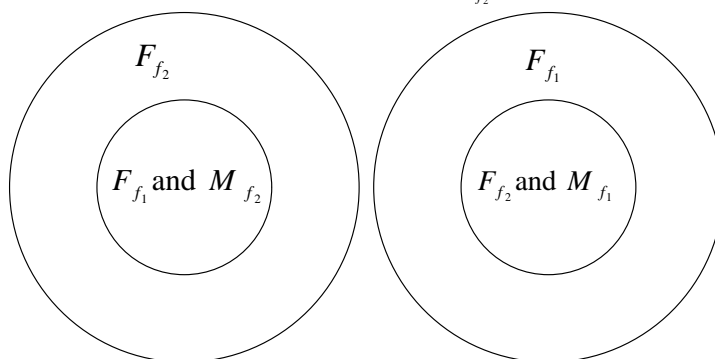
รูปที่ 2.6 การแบ่งสเปกตรัมความถี่ระหว่างเซลล์ด้านนอกและเซลล์ด้านใน

M_{f_1} = Macrocell use frequency 1 (f_1)

M_{f_2} = Macrocell use frequency 2 (f_2)

F_{f_1} = Femtocell use frequency 1 (f_1)

F_{f_2} = Femtocell use frequency 2 (f_2)



รูปที่ 2.7 การแบ่งสเปกตรัมความถี่ระหว่างแมโครเซลล์ 2 เซลล์

สำหรับบริเวณเซลล์ด้านใน ระยะทางระหว่างเฟมโตเซลล์บริเวณเซลล์ด้านในกับแมโครเซลล์ในเซลล์อื่น ๆ มีระยะที่ไกล และกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ต่ำ ดังนั้นจึงไม่เกิดปัญหาการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเฟมโตเซลล์บริเวณเซลล์ด้านในกับแมโครเซลล์ในเซลล์อื่นๆ ฉะนั้นการแบ่งพื้นที่แมโครเซลล์ออกเป็นสองส่วนนี้จะเกิดปัญหาเฉพาะในกรณีที่เฟมโตเซลล์ในบริเวณเซลล์ด้านนอกหรือเซลล์ด้านใน เกิดการแทรกสอดสัญญาณระหว่างกัน และกรณีที่แมโครเซลล์ในบริเวณเซลล์ด้านนอกเกิดสัญญาณแทรกสอดกับเฟมโตเซลล์ด้านนอก

สำหรับปัญหาในกรณีที่แมโครเซลล์ในบริเวณเซลล์ด้านนอกเกิดสัญญาณแทรกสอดกับเฟมโตเซลล์ด้านนอก ผู้เสนอได้แก้ปัญหานี้โดยใช้กลยุทธ์ควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ (Access control strategy) ซึ่งได้วิสัยสามารถดีกว่ากลยุทธ์การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบเปิด (Open access) และแบบปิด (Close access) แบบดั้งเดิม

สำหรับปัญหาในกรณีที่เฟมโตเซลล์ในบริเวณเซลล์ด้านนอกหรือเซลล์ด้านในเกิดการแทรกสอดสัญญาณระหว่างกัน ผู้เสนอได้นำเสนอวิธีการจัดสรรสเปกตรัม เพื่อปรับปรุงวิสัยสามารถ โดยมีเงื่อนไขว่า เฟมโตเซลล์ตัวใด ๆ ไม่สามารถใช้ช่องสัญญาณเดียวกันได้ หากเฟมโตเซลล์ตัวใด ๆ นั้น มีรัศมีทับซ้อนกัน พบว่าเมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์น้อยจะได้วิสัยสามารถน้อยกว่าวิธี Universal frequency reuse (เฟมโตเซลล์ทุกตัวสามารถใช้สเปกตรัมบางส่วนหรือทั้งหมดของแมโครเซลล์ในเซลล์เดียวกัน และวิธี Improved universal frequency reuse (เฟมโตเซลล์บริเวณเซลล์ด้านในใช้สเปกตรัมของแมโครเซลล์ในเซลล์อื่น, เฟมโตเซลล์บริเวณเซลล์ด้านนอกใช้สเปกตรัมในแมโครเซลล์เดียวกัน และแต่

ละเฟมโตะเซลล์สามารถใช้สเปกตรัมทั้งหมดของแม่โครเซลล์ในเซลล์เดียวกัน) แต่วิสัยสามารถจะมากกว่าวิธี Universal frequency reuse และวิธี Improved universal frequency reuse เมื่อจำนวนเฟมโตะเซลล์มากขึ้น

อย่างไรก็ตามวิธีการจัดสรรสเปกตรัมเพื่อปรับปรุงวิสัยสามารถนี้ยังคงมีปัญหาเมื่อจำนวนเฟมโตะเซลล์น้อย เนื่องจากผู้เสนอได้กำหนดค่าขอบเขตสูงสุดของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่ให้กับเฟมโตะเซลล์เป็นค่าคงที่ A_m โดย m คือเฟมโตะเซลล์ตัวที่ m ซึ่งถ้า A_m มีปริมาณมากจะเกิดความไม่ยุติธรรมในการจัดสรรสเปกตรัมระหว่างเฟมโตะเซลล์ และถ้า A_m มีปริมาณน้อย จำนวนสเปกตรัมในการจัดสรรจะลดลง ซึ่งปริมาณ A_m จะสัมพันธ์กับจำนวนเฟมโตะเซลล์

2.5.2 การจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมในโครงข่ายแม่โครเซลล์กับเฟมโตะเซลล์

2.5.2.1 การจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายแม่โครเซลล์และเฟมโตะเซลล์ [10]

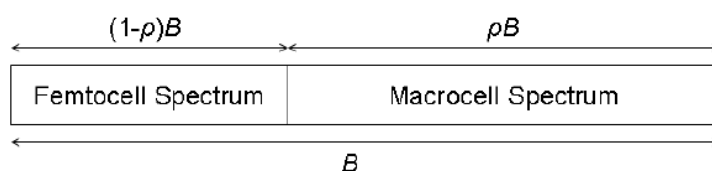
งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมโดยใช้วิธีการเข้าใช้สเปกตรัมแบบ Frequency ALOHA (F-ALOHA) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเข้าใช้สเปกตรัมของแต่ละเฟมโตะเซลล์ โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการเข้าใช้สเปกตรัมต่อพื้นที่ (Area spectral efficiency) ในหน่วย bits/s/Hz/m^2 ซึ่งพบว่าคุณภาพของบริการ (QoS) ความหนาแน่นของเฟมโตะเซลล์ และสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานแม่โครเซลล์กับสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานเฟมโตะเซลล์รอบๆ มีผลกับการจัดสรรอัตราส่วนสเปกตรัมสำหรับการเข้าใช้สเปกตรัมของแต่ละเฟมโตะเซลล์

2.5.2.2 ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการในการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมของโครงข่ายแม่โครเซลล์-เฟมโตะเซลล์ [11]

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอเทคนิคการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัม (Spectrum splitting) ออกเป็น 2 ช่วงสำหรับแม่โครเซลล์และเฟมโตะเซลล์ดังรูปที่ 2.8 โดย B คือสเปกตรัมทั้งหมด, ρ คืออัตราส่วนของสเปกตรัมที่แม่โครเซลล์สามารถนำไปใช้ได้ โดยให้แม่โครเซลล์อยู่ในระดับชั้น (Tier) ที่ 1 และเฟมโตะเซลล์อยู่ในระดับชั้นที่ 2 ซึ่งผู้เสนอได้หาค่า ρ ที่เหมาะสมเพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดโดยมีเงื่อนไขความยุติธรรม (Fairness) ในการจัดสรรสเปกตรัมให้ผู้ใช้แต่ละคนและคุณภาพของบริการ (QoS) พบว่าหากอยู่ในเงื่อนไขที่ปราศจากความยุติธรรมกล่าวคือผู้ใช้แต่ละคนได้สเปกตรัมไม่เท่ากัน จะมีค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดมากกว่าเงื่อนไขความยุติธรรมในการ

จัดสรรสเปกตรัม เนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์จากสเปกตรัมทั้งหมดให้กับเฟมโตเซลล์ได้มากกว่ากรณีที่มีความยุติธรรมในการจัดสรรสเปกตรัม แต่นำมาซึ่งความไม่ยุติธรรมในการจัดสรรสเปกตรัมให้กับผู้ใช้แต่ละคนในระดับชั้นที่ต่างกัน

เมื่ออยู่ในเงื่อนไขของความยุติธรรมในการจัดสรรสเปกตรัม และคุณภาพของบริการ พบว่ามีความสมดุลในการจัดสรรสเปกตรัม แต่จะไม่ได้ค่าความจุของสัญญาณสูงสุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่ปราศจากความยุติธรรม โดยความยุติธรรมในการจัดสรรสเปกตรัมจะใช้ดัชนีของ Jain (Jain's fairness index) สำหรับหาเกณฑ์ความยุติธรรม และคุณภาพการให้บริการคืออัตราส่วนความสัมพันธ์ในการจัดสรรสเปกตรัมระหว่างระดับชั้นแมโครเซลล์กับเฟมโตเซลล์



รูปที่ 2.8 การแบ่งสเปกตรัมในโครงข่ายแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์

2.5.2.3 ราคาที่เหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมสำหรับผู้ให้บริการในการจัดการเฟมโตเซลล์ [12]

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอในกรอบความคิดทางเศรษฐศาสตร์ โดยที่ผู้ใช้บริการเลือกใช้บริการเฟมโตเซลล์หรือแมโครเซลล์ให้ได้ประโยชน์สูงสุดกับตัวผู้ใช้บริการ และผู้ให้บริการไร้สาย (Wireless service provider) สามารถได้รับรายรับสูงสุด โดยการตัดสินใจในเรื่องราคา และการจัดสรรสเปกตรัม ซึ่งการตอบสนองของผู้ใช้บริการกับราคาถูกนำไปพิจารณาด้วย

ผู้เสนอได้ใช้การจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมดังรูปที่ 2.8 โดยหาค่า p ที่เหมาะสมเทียบกับจำนวนเฟมโตเซลล์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีเงื่อนไขเพื่อให้ได้รับรายรับสูงสุด พบว่าค่า p มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนเฟมโตเซลล์ที่เพิ่มขึ้น นั่นคือมีสเปกตรัมน้อยที่ถูกจัดสรรให้เฟมโตเซลล์ เพราะเฟมโตเซลล์สามารถนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสเปกตรัมส่วนใหญ่ที่ถูกสำรองให้เฟมโตเซลล์ถูกนำไปใช้กับแมโครเซลล์ แมโครเซลล์จึงมีความจุของช่องสัญญาณมากขึ้นและทำให้มีรายรับที่มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการใช้กลยุทธ์ในเรื่องราคาและการจัดสรรสเปกตรัมแบบสเปกตรัมไม่คงที่กับวิธีการใช้กลยุทธ์ในเรื่องราคาและการจัดสรรสเปกตรัมแบบสเปกตรัมคงที่ พบว่าวิธีการใช้กลยุทธ์ในเรื่องราคากับการจัดสรรสเปกตรัมแบบสเปกตรัมไม่คงที่ สามารถทำให้ผู้ให้บริการไร้สายได้รับ

รายรับสูงสุดมากกว่าวิธีการจัดสรรสเปกตรัมแบบสเปกตรัมคงที่ นั่นหมายถึงสามารถใช้สเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้

2.5.2.4 วิสัยความสามารถที่เหมาะสมที่สุด, การจัดสรรสเปกตรัม และการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณในโครงข่ายแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ [13]

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการจัดสรรสเปกตรัมที่เหมาะสมทั้งแบบแบ่งสเปกตรัมและแบบใช้สเปกตรัมร่วมกัน ซึ่งพิจารณาในกรณีการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณทั้งแบบปิดและแบบเปิด รวมถึงหาค่าวิสัยความสามารถที่เหมาะสมระหว่างโครงข่ายแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ในการเชื่อมต่อขา ลง (Downlink) โดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นที่สำเร็จ (Success probability) ของระดับค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณแทรกสอด (Signal-to-Interference Ratio : SIR)

ซึ่งกรณีใช้การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบปิดจะได้ค่าวิสัยความสามารถสูงสุดเมื่อใช้สเปกตรัมร่วมกันที่ความหนาแน่นของเฟมโตเซลล์น้อย และได้ค่าวิสัยความสามารถสูงสุดเมื่อใช้สเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมที่ความหนาแน่นของเฟมโตเซลล์มาก ในส่วนของกรณีที่ใช้การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบเปิดจะได้ค่าวิสัยความสามารถสูงสุดที่เป็นไปได้เมื่อใช้สเปกตรัมร่วมกันในทุกความหนาแน่นของเฟมโตเซลล์

บทที่ 3

วิธีการที่นำเสนอ

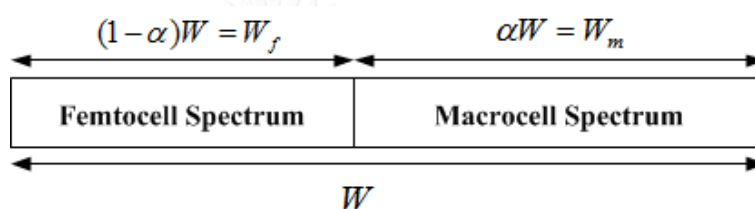
เมื่อได้เรียนรู้หลักการทำงานของเฟมโตเซลล์รวมถึงแนวทางการจัดสรรสเปกตรัมแบบทั้งใช้สเปกตรัมร่วมกันและแบบแบ่งสเปกตรัมที่ได้มีผู้เสนอไว้แล้วดังที่กล่าวในบทก่อนหน้า ในบทนี้เป็น การนำเสนอการจัดสรรสเปกตรัมให้สามารถใช้สเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่ายแมโคร เซลล์และเฟมโตเซลล์ โดยใช้กลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ

3.1 วิธีการที่นำเสนอ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการแก้ไขปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณในโครงข่ายแมโครเซลล์ กับเฟมโตเซลล์ ซึ่งใช้เทคนิค Fractional Frequency Reuse เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ สเปกตรัมให้เกิดประโยชน์สูงสุด และหลีกเลี่ยงการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานบนพื้นฐาน การใช้วิธีการจัดสรรสเปกตรัมทั้งแบบแบ่งสเปกตรัม และแบบใช้สเปกตรัมร่วมกัน ซึ่งในกรณีการใช้ สเปกตรัมร่วมกันจะเกิดปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างระดับชั้นแมโครเซลล์กับเฟมโต เซลล์อย่างมาก ดังนั้นในวิธีที่จะนำเสนอจะใช้นั้นจะใช้การจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมซึ่งจะไม่เกิด ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างระดับชั้นแมโครเซลล์กับเฟมโตเซลล์ แต่ยังมีปัญหาในการ จัดสรรสเปกตรัมให้สถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในอัตราส่วนเท่าใด รวมถึงหา จำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) สำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์เท่าใด จึงจะเหมาะสม ซึ่งใน งานวิจัยที่ผ่านมาจะกำหนดอัตราส่วนสำหรับการจัดสรรสเปกตรัมให้สถานีฐานแมโครเซลล์กับสถานี ฐานเฟมโตเซลล์ รวมถึงจำนวนช่องสัญญาณย่อยแบบคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนเฟมโต เซลล์ที่เพิ่มขึ้นในโครงข่าย [9] ซึ่งผู้ให้บริการไม่สามารถใช้สเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์ สูงสุดได้ เนื่องจากไม่สามารถหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์ และแมโครเซลล์ สามารถนำไปใช้งาน จึงแก้ปัญหาโดยใช้กลยุทธ์ในการจัดสรรสเปกตรัมและราคา [12] เพื่อหาค่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์และแมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งจะทำได้ เกิดประโยชน์สูงสุดในแง่ของรายได้ของผู้ให้บริการโครงข่าย พร้อมทั้งความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ รวมถึงการใช้สเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดให้คุ้มค่า แต่เนื่องจากใน [12] พิจารณาในกรอบความคิดทาง เศรษฐศาสตร์ โดยไม่ได้คำนึงถึงการจัดสรรจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ ในงานวิจัยนี้จึงเพิ่มส่วนของการจัดสรรจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมซึ่งเปลี่ยนแปลงตาม

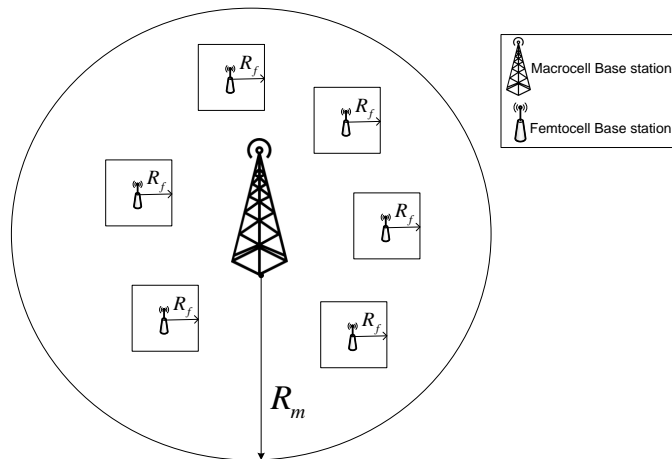
จำนวนเฟมโตเซลล์ที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับปรุงวิสัยทัศน์ในโครงข่ายรวม (แมโครเซลล์-เฟมโตเซลล์) โดยคำนึงถึงความยุติธรรมและคุณภาพของบริการสำหรับผู้ใช้งานร่วมด้วย และเปรียบเทียบกับการใช้จำนวนช่องสัญญาณย่อยแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้นในโครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4

ในแนวทางที่เสนอกำหนดให้ระดับชั้นแมโครเซลล์ และเฟมโตเซลล์ใช้การจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งสเปกตรัมดังรูปที่ 3.1 โดย W คือสเปกตรัมทั้งหมด, W_m คือสเปกตรัมสำหรับแมโครเซลล์, W_f คือสเปกตรัมสำหรับเฟมโตเซลล์, $0 \leq \alpha \leq 1$ คืออัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งาน และ $1 - \alpha$ คืออัตราส่วนของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์สามารถนำไปใช้งาน

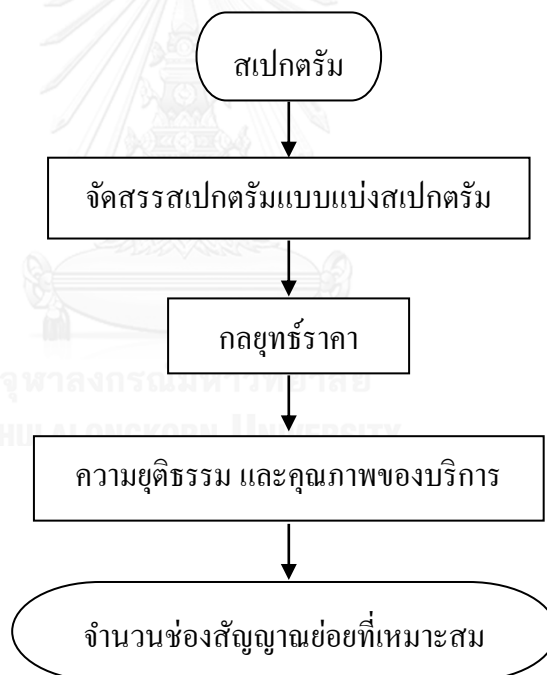


รูปที่ 3.1 การจัดสรรสเปกตรัมในโครงข่ายแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์

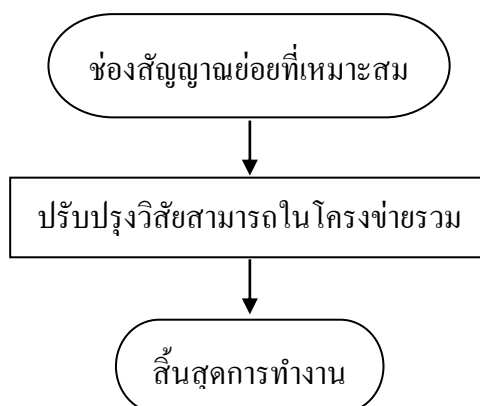
โดยวิเคราะห์ในกรณีข่ายเชื่อมโยงขาลง และกำหนดให้แบบจำลองมีสถานีฐานแมโครเซลล์อยู่ตรงกลางเซลล์จำนวน 1 สถานี ซึ่งภายในพื้นที่รัศมีของสถานีฐานแมโครเซลล์ประกอบไปด้วยสถานีฐานเฟมโตเซลล์ดังรูปที่ 3.2 โดย R_m คือรัศมีของสถานีฐานแมโครเซลล์ และ R_f คือรัศมีของสถานีฐานเฟมโตเซลล์



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการวางแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์



รูปที่ 3.3 แผนภาพวิธีที่นำเสนอ (1)



รูปที่ 3.4 แผนภาพวิธีที่นำเสนอ (2)

3.2 การหาอัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์และช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ในวิธีการที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์

3.2.1 กลยุทธ์ราคา

ในงานวิจัยที่เสนอได้มีการพิจารณากลยุทธ์ในเรื่องราคาในการจัดสรรสเปกตรัม เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในแง่ของรายได้ของผู้ให้บริการโครงข่าย พร้อมทั้งความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ รวมถึงการใช้สเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดให้คุ้มค่า

3.2.1.1 ฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของผู้ใช้บริการ (Utility function of user)

ผู้ใช้บริการสามารถเลือกใช้บริการแมโครเซลล์หรือเฟมโตเซลล์ได้ หากผู้ใช้บริการเกิดความพึงพอใจ โดยผู้ใช้บริการจะเปรียบเทียบความจุช่องสัญญาณที่ได้รับและค่าบริการที่ต้องจ่ายไป กล่าวคือผู้ใช้บริการจะเลือกใช้แมโครเซลล์ หากฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของแมโครเซลล์มากกว่าเฟมโตเซลล์ หรือผู้ใช้บริการจะเลือกใช้เฟมโตเซลล์ หากฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของเฟมโตเซลล์มากกว่าแมโครเซลล์ ซึ่งเราจะได้ฟังก์ชันอรรถประโยชน์ [12] ตามสมการที่ 3.1

$$U_i = \gamma c_i - p_i \quad ; \quad U_i > 0 \quad (3.1)$$

โดย $i = m, f$ ซึ่ง m คือ แมโครเซลล์, f คือ เฟมโตเซลล์

γ คือ ค่าความพึงพอใจของผู้ใช้บริการสำหรับความจุช่องสัญญาณที่ได้รับ

c_m คือ ความจุช่องสัญญาณของแต่ละผู้ใช้งานที่ได้รับจากแมโครเซลล์

c_f คือ ความจุช่องสัญญาณของแต่ละผู้ใช้งานที่ได้รับจากเฟมโตเซลล์

p_m คือ ค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์

p_f คือ ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์

และผู้ใช้บริการจะเปลี่ยนไปใช้แมโครเซลล์หรือเฟมโตเซลล์ภายในเงื่อนไขอย่างน้อยที่สุดเมื่อ

$U_i > 0$ นั่นคือผู้ให้บริการจะรู้สึกว่าได้ประโยชน์จากความจุช่องสัญญาณที่ได้รับกับราคาที่ต้องจ่ายไป

3.2.1.2 รายได้สูงสุดของผู้ให้บริการ

รายได้ของผู้ให้บริการจากการให้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ [12] คือ

$$M = p_m E(C_m) + p_f E(C_f) \quad (3.2)$$

โดย M คือ รายได้ของผู้ให้บริการจากการให้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์

p_m คือ ค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์

p_f คือ ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์

$E(C_m)$ คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์

$E(C_f)$ คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์

กำหนดให้ $E(c_m), E(c_f)$ คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์

และเฟมโตเซลล์ โดย c_m, c_f คือความจุช่องสัญญาณของแต่ละผู้ใช้งานซึ่งเป็นอิสระจากกัน มีการแจก

แจงแบบเลขชี้กำลังด้วยพารามิเตอร์ λ_m และ λ_f มี probability density function (pdf) คือ

$$g(c_i; \lambda_i) = \begin{cases} \lambda_i e^{-\lambda_i c_i} & c_i \geq 0 \\ 0 & c_i < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

เมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น สถานที่ของผู้ใช้บริการ, การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) และกำลังส่งของสถานีฐาน ซึ่งมีผลกระทบต่อความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้งาน โดยจะมีค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ เมื่อระบบมีจำนวนเฟมโตเซลล์ n ตัว [12] คือ

$$E(c_m) = \frac{1}{\lambda_m} = \frac{\beta_m \alpha W}{\rho} \quad (3.4)$$

$$E(c_f) = \frac{1}{\lambda_f} = \frac{\beta_f n (1 - \alpha) W}{r \rho} \quad (3.5)$$

โดย β_m คือ ประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมของผู้ให้บริการแมโครเซลล์ (bits/s/Hz)

β_f คือ ประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมของผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์ (bits/s/Hz)

α คือ อัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์

W คือ สเปกตรัมทั้งหมด (Hz)

ρ คือ ความหนาแน่นของผู้ใช้งาน

r คือ ค่าเพกเตอร์การนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของเฟมโตเซลล์

n คือ จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์

จากสมการที่ 3.1 เราจะได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์ และเฟมโตเซลล์โดยอ้างอิงจากสมการที่ 8 ในงานวิจัย [12] แต่ในสมการที่อ้างอิงนั้นไม่ถูกต้องทั้งหมด ผู้วิจัยจึงได้ปรับแก้ไขให้ถูกต้อง ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ดังสมการที่ 3.6 และ 3.7

$$E(C_m) = \int_{U_f > 0}^{+\infty} g(c_f; \lambda_f) \left[\int_{U_m > U_f}^{+\infty} c_m g(c_m; \lambda_m) dc_m \right] dc_f \quad (3.6)$$

$$E(C_f) = \int_{U_m > 0}^{+\infty} g(c_m; \lambda_m) \left[\int_{U_f > U_m}^{+\infty} c_f g(c_f; \lambda_f) dc_f \right] dc_m \quad (3.7)$$

โดยผู้ให้บริการจะเลือกใช้แมโครเซลล์เมื่อ $U_m > U_f$ ภายใต้เงื่อนไขที่ $U_f > 0$ และผู้ให้บริการจะเลือกใช้เฟมโตเซลล์เมื่อ $U_f > U_m$ ภายใต้เงื่อนไขที่ $U_m > 0$

เมื่อแทนค่า U_i ที่ได้จากสมการที่ 3.1 และค่า $g(c_i; \lambda_i)$ ที่ได้จากสมการที่ 3.3 ลงในสมการที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับจะได้

$$E(C_m) = \int_{P_f/\gamma}^{+\infty} \lambda_f e^{-\lambda_f c_f} \left[\int_{c_f + (P_m - P_f)/\gamma}^{+\infty} c_m \lambda_m e^{-\lambda_m c_m} dc_m \right] dc_f \quad (3.8)$$

$$E(C_f) = \int_{P_m/\gamma}^{+\infty} \lambda_m e^{-\lambda_m c_m} \left[\int_{c_m + (P_f - P_m)/\gamma}^{+\infty} c_f \lambda_f e^{-\lambda_f c_f} dc_f \right] dc_m \quad (3.9)$$

จากนั้นเราหาปริพันธ์ (Integrate) จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 เพื่อหาค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ จะได้

$$E(C_m) = \lambda_f e^{\frac{-(\lambda_f P_f + \lambda_m P_m)}{\gamma}} \left[\frac{P_m}{(\lambda_f + \lambda_m)\gamma} + \frac{2\lambda_m + \lambda_f}{\lambda_m(\lambda_f + \lambda_m)^2} \right] \quad (3.10)$$

$$E(C_f) = \lambda_m e^{\frac{-(\lambda_f p_f + \lambda_m p_m)}{\gamma}} \left[\frac{p_f}{(\lambda_f + \lambda_m)\gamma} + \frac{2\lambda_f + \lambda_m}{\lambda_f(\lambda_f + \lambda_m)^2} \right] \quad (3.11)$$

เมื่อได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์แล้ว ต่อมาเราจะทำการหาราคาที่เหมาะสมเพื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.2 โดยมีจุดประสงค์เพื่อหารายได้สูงสุดของผู้ให้บริการ โดยเราแทนสมการที่ 3.10 และ 3.11 ลงในสมการที่ 3.2 แล้วหาอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่ง (First order partial derivative) ของ M เทียบกับ p_m และเทียบกับ p_f แล้วกำหนดค่าเป็นศูนย์ เพื่อหาค่า p_m และ p_f ที่ทำให้ M มีค่าสูงสุดซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$\frac{\partial M}{\partial p_m} = \frac{e^{\frac{-(\lambda_f p_f + \lambda_m p_m)}{\gamma}}}{\lambda_f + \lambda_m} \left[-\frac{\lambda_m \lambda_f p_m^2}{\gamma^2} + \frac{\lambda_f^2 p_m}{\gamma(\lambda_f + \lambda_m)} - \frac{\lambda_m^2 p_f^2}{\gamma^2} - \frac{(2\lambda_f + \lambda_m)\lambda_m^2 p_f}{\gamma(\lambda_f + \lambda_m)\lambda_f} + \frac{(2\lambda_m + \lambda_f)\lambda_f}{(\lambda_f + \lambda_m)\lambda_m} \right] = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial M}{\partial p_f} = \frac{e^{\frac{-(\lambda_f p_f + \lambda_m p_m)}{\gamma}}}{\lambda_f + \lambda_m} \left[-\frac{\lambda_m \lambda_f p_f^2}{\gamma^2} + \frac{\lambda_m^2 p_f}{\gamma(\lambda_f + \lambda_m)} - \frac{\lambda_f^2 p_m^2}{\gamma^2} - \frac{(2\lambda_m + \lambda_f)\lambda_f^2 p_m}{\gamma(\lambda_f + \lambda_m)\lambda_m} + \frac{(2\lambda_f + \lambda_m)\lambda_m}{(\lambda_f + \lambda_m)\lambda_f} \right] = 0 \quad (3.13)$$

จากนั้นเราแก้สมการโดยการแยกตัวประกอบพหุนามกำลังสองจะได้ค่าราคาที่เหมาะสมที่ทำให้ผู้ให้บริการได้รายได้สูงสุด คือ

$$p_m = p_m^* = \frac{-B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1} \quad (3.14)$$

$$p_f = p_f^* = \frac{-B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2}}{2A_2}$$

โดย

$$A_1 = \left\{ \begin{aligned} & \left[2(\lambda_f^2 \lambda_m + \lambda_f \lambda_m^2)(\lambda_f^2 \lambda_m^4 + \lambda_f^3 \lambda_m^3)(2\lambda_f \lambda_m^4 + 2\lambda_f^2 \lambda_m^3)^2 \right] \\ & + \left[2\gamma^2(\lambda_f + \lambda_m)\lambda_m^2(\lambda_f^2 \lambda_m^4 + \lambda_f^3 \lambda_m^3)(2\lambda_f^4 \lambda_m + 2\lambda_f^3 \lambda_m^2)^2 \right] \end{aligned} \right\}$$

$$B_1 = \left\{ \begin{aligned} & - \left[2\gamma(\lambda_f^4 \lambda_m^4 + \lambda_f^5 \lambda_m^3)(2\lambda_f \lambda_m^4 + 2\lambda_f^2 \lambda_m^3)^2 \right] + \\ & \left[8\gamma^3(\lambda_f + \lambda_m)(\lambda_f^2 \lambda_m^4 + \lambda_f^3 \lambda_m^3)(\lambda_f^4 \lambda_m^3 + \lambda_f^3 \lambda_m^4)(2\lambda_f^3 \lambda_m - 2\lambda_f \lambda_m^3 + \lambda_f^4 - \lambda_m^4) \right] \\ & + \left[2\gamma(2\lambda_f \lambda_m^2 + \lambda_m^3)(\lambda_f^4 \lambda_m + \lambda_f^3 \lambda_m^2)(2\lambda_f \lambda_m^4 + 2\lambda_f^2 \lambda_m^3)^2 \right] \end{aligned} \right\}$$

$$C_1 = \left\{ \begin{aligned} & - \left[2\gamma^2(2\lambda_f \lambda_m + \lambda_f^2)(\lambda_f^2 \lambda_m^3 + \lambda_f^3 \lambda_m^2)(2\lambda_f \lambda_m^4 + 2\lambda_f^2 \lambda_m^3)^2 \right] \\ & + \left[2\gamma^4(\lambda_f + \lambda_m)(\lambda_f^2 \lambda_m^4 + \lambda_f^3 \lambda_m^3)(2\lambda_f^3 \lambda_m^3 - 2\lambda_f \lambda_m^5 + \lambda_f^4 \lambda_m^2 - \lambda_m^6)^2 \right] \\ & + \left[\gamma^2(2\lambda_f \lambda_m^2 + \lambda_m^3)(2\lambda_f^3 \lambda_m - 2\lambda_f \lambda_m^3 + \lambda_f^4 - \lambda_m^4)(2\lambda_f \lambda_m^4 + 2\lambda_f^2 \lambda_m^3)^2 \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
A_2 &= \left\{ \begin{aligned} & \left[2(\lambda_m^2 \lambda_f + \lambda_m \lambda_f^2)(\lambda_m^2 \lambda_f^4 + \lambda_m^3 \lambda_f^3)(2\lambda_m \lambda_f^4 + 2\lambda_m^2 \lambda_f^3)^2 \right] \\ & + \left[2\gamma^2 (\lambda_f + \lambda_m) \lambda_f^2 (\lambda_m^2 \lambda_f^4 + \lambda_m^3 \lambda_f^3)(2\lambda_m^4 \lambda_f + 2\lambda_m^3 \lambda_f^2)^2 \right] \end{aligned} \right\} \\
B_2 &= \left\{ \begin{aligned} & - \left[2\gamma (\lambda_m^4 \lambda_f^4 + \lambda_m^5 \lambda_f^3)(2\lambda_m \lambda_f^4 + 2\lambda_m^2 \lambda_f^3)^2 \right] + \\ & \left[8\gamma^3 (\lambda_f + \lambda_m)(\lambda_m^2 \lambda_f^4 + \lambda_m^3 \lambda_f^3)(\lambda_m^4 \lambda_f^3 + \lambda_m^3 \lambda_f^4)(2\lambda_m^3 \lambda_f - 2\lambda_m \lambda_f^3 + \lambda_m^4 - \lambda_f^4) \right] \\ & + \left[2\gamma (2\lambda_m \lambda_f^2 + \lambda_f^3)(\lambda_m^4 \lambda_f + \lambda_m^3 \lambda_f^2)(2\lambda_m \lambda_f^4 + 2\lambda_m^2 \lambda_f^3)^2 \right] \end{aligned} \right\} \\
C_2 &= \left\{ \begin{aligned} & - \left[2\gamma^2 (2\lambda_m \lambda_f + \lambda_m^2)(\lambda_m^2 \lambda_f^3 + \lambda_m^3 \lambda_f^2)(2\lambda_m \lambda_f^4 + 2\lambda_m^2 \lambda_f^3)^2 \right] \\ & + \left[2\gamma^4 (\lambda_f + \lambda_m)(\lambda_m^2 \lambda_f^4 + \lambda_m^3 \lambda_f^3)(2\lambda_m^3 \lambda_f^3 - 2\lambda_m \lambda_f^5 + \lambda_m^4 \lambda_f^2 - \lambda_f^6)^2 \right] \\ & + \left[\gamma^2 (2\lambda_m \lambda_f^2 + \lambda_f^3)(2\lambda_m^3 \lambda_f - 2\lambda_m \lambda_f^3 + \lambda_m^4 - \lambda_f^4)(2\lambda_m \lambda_f^4 + 2\lambda_m^2 \lambda_f^3)^2 \right] \end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

3.2.2 ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการ

เมื่อจัดสรรสเปกตรัมโดยใช้กลยุทธ์ราคาแล้ว จึงเสนอการจัดสรรให้เกิดความยุติธรรมพร้อมทั้งคุณภาพของบริการ เพื่อหาอัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์ที่เหมาะสม (α^*) และจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสม (Sub_{CH}^*) สำหรับเฟมโตเซลล์ในโครงข่ายเฟมโตเซลล์ซึ่งยังมีปัญหาใน [9]

3.2.2.1 ความยุติธรรม

เพื่อรักษามาตรฐานการให้บริการของผู้ให้บริการ แม้จะมีเฟมโตเซลล์ในระบบเพิ่มมากขึ้น เราจึงคำนึงถึงความยุติธรรมของความจุช่องสัญญาณที่ผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ได้รับ โดยความยุติธรรมจะใช้ดัชนีของ Jain (Jain's fairness index) สำหรับหาเกณฑ์ความยุติธรรม [14] คือ

$$J(x) = \frac{\left(\sum_{j=1}^N x_j \right)^2}{N \sum_{j=1}^N x_j^2} \quad (3.15)$$

โดย N คือ จำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมด

x_j คือ ค่าความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการลำดับที่ j

ซึ่ง $J(x) \in [1/N, 1]$, $\forall x$ นั้นหมายถึง $J(x)$ จะมีค่าต่ำสุดที่ $1/N$ และสูงสุดที่ 1

ให้ค่า $J(x)$ เท่ากับ 0.8 เป็นค่าเกณฑ์ความยุติธรรมที่ยอมรับได้ [11]

เมื่อเราประยุกต์สมการดัชนีความยุติธรรมของ Jain จาก [14] จะได้

$$J_n = \frac{([E(c_m)_n + E(c_f)_n])^2}{2[E(c_m)_n^2 + E(c_f)_n^2]} \quad (3.16)$$

โดย J_n คือ เกณฑ์ความยุติธรรมเมื่อโครงข่ายมีจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ n สถานี

$E(c_m)_n$ คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์เมื่อระบบมีเฟมโตเซลล์ n สถานี

$E(c_f)_n$ คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์เมื่อระบบมีเฟมโตเซลล์ n สถานี

3.2.2.2 คุณภาพของบริการ

ในงานวิจัยนี้เรากำหนดให้คุณภาพของบริการ (QoS) คือค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณที่ผู้ให้บริการได้รับจากการใช้บริการแมโครเซลล์ ($E(c_m)$) และเฟมโตเซลล์ ($E(c_f)$) โดยกำหนดให้ผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์ต้องได้รับค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าผู้ให้บริการแมโครเซลล์ เนื่องจากผู้ใช้งานที่เลือกใช้บริการเฟมโตเซลล์มีความคาดหวังว่าจะสามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณมากกว่าที่ได้รับจากการใช้บริการแมโครเซลล์ [1] และเพื่อเป็นการชักจูงให้ผู้ให้บริการเลือกใช้บริการเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้การใช้งานในโครงข่ายเซลล์ลูลาร์มีประสิทธิภาพมากขึ้นดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.2.3 การจัดสรรสเปกตรัมและช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์

ในงานวิจัยนี้เราจัดสรรสเปกตรัมเพื่อหาช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์จากอัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์ที่เหมาะสม (α^*) โดยเราแทนสมการที่ 3.10, 3.11, 3.14 ใน 3.2 โดยกำหนดให้ $\gamma = 1$ ซึ่งเราจะได้สมการรายได้ของผู้ให้บริการจากการให้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ในเทอมของ λ_m, λ_f ดังนี้

$$M(\lambda_m, \lambda_f) = \left(p_m(\lambda_m, \lambda_f) E_m(\lambda_m, \lambda_f) \right) + \left(p_f(\lambda_m, \lambda_f) E_f(\lambda_m, \lambda_f) \right) \quad (3.17)$$

โดย E_m คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์

E_f คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์

จากนั้นเราจะหา λ_m, λ_f จากสมการที่ 3.4, 3.5 โดยกำหนดค่า α เป็น 0.01 ถึง 0.99 โดยให้เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 เพื่อหา λ_m, λ_f และ α^* ที่ทำให้เกิดรายได้สูงสุดสำหรับผู้ให้บริการ พร้อมทั้งมีความยุติธรรม และคุณภาพของบริการร่วมด้วย โดยเราจะได้สมการช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์จากกลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ ดังนี้

$$Sub_{CH}^* = \frac{(1 - \alpha^*)S}{S_f} \quad (3.18)$$

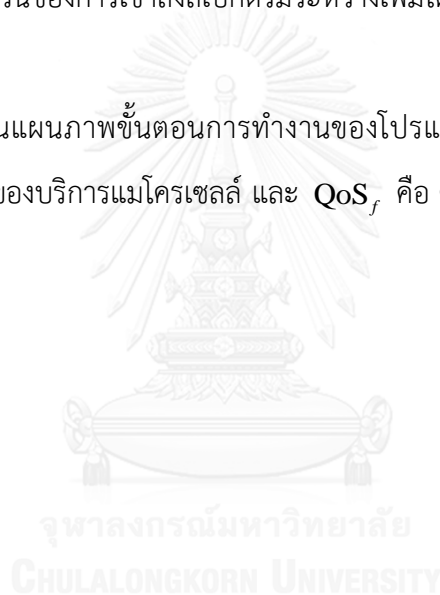
โดย S คือ จำนวนของสเปกตรัมทั้งหมดในระบบ (Hz)

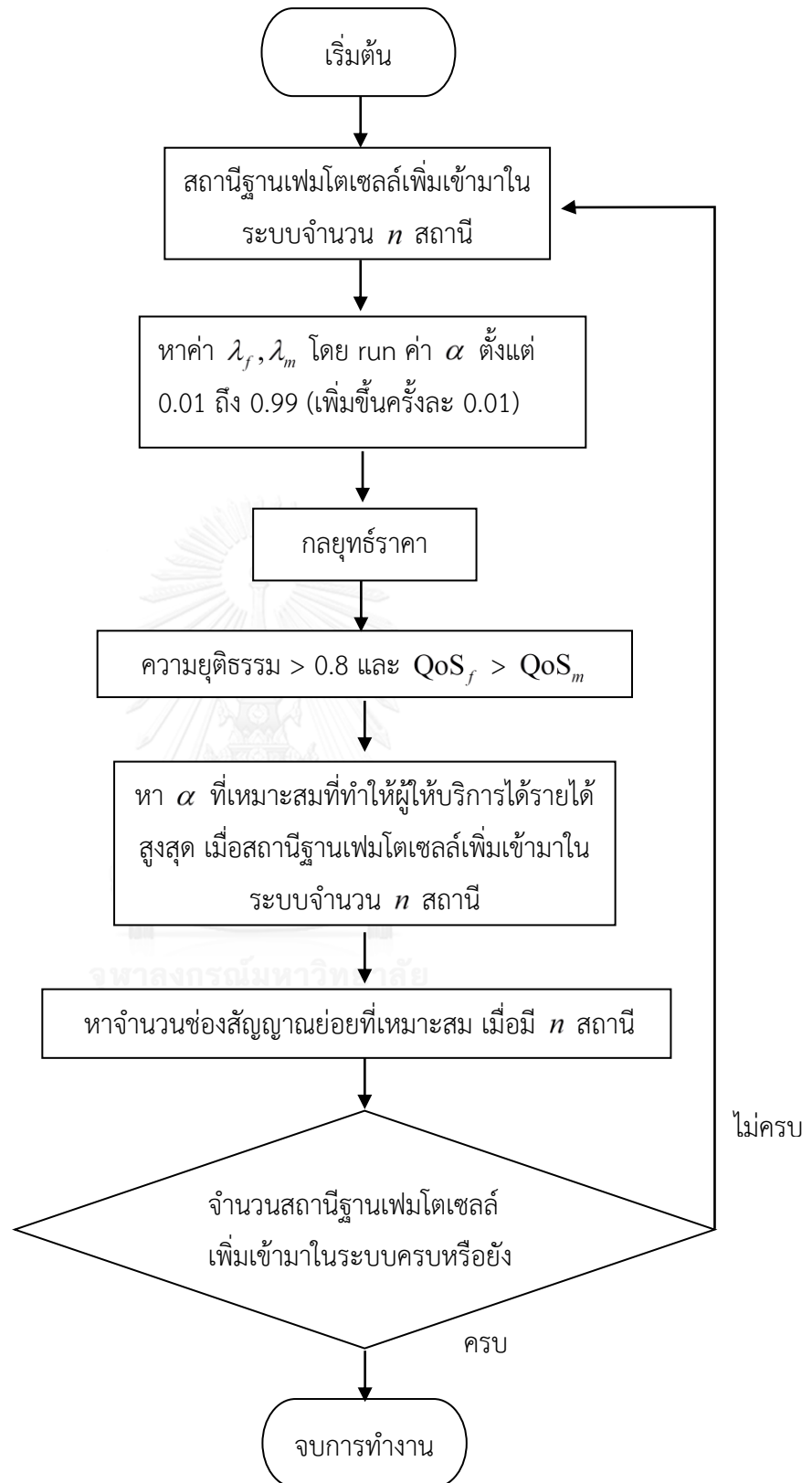
S_f คือ จำนวนของสเปกตรัมสำหรับช่องสัญญาณย่อยแต่ละผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ (Hz)

α^* คือ อัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์ที่เหมาะสม

เราสามารถเขียนแผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในวิธีที่นำเสนอได้ดังรูปที่ 3.5

โดย QoS_m คือ คุณภาพของบริการแมโครเซลล์ และ QoS_f คือ คุณภาพของบริการเฟมโตเซลล์





รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในวิธีที่นำเสนอ

บทที่ 4 ผลการวิจัย

เพื่อหาอัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์และช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ รวมทั้งปรับปรุงวิสัยสมรรถนะในโครงข่ายรวม โดยใช้กลยุทธ์ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ บทนี้จึงแสดงถึงผลการวิจัยที่ได้จากผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์ และผลการวิจัยที่ได้จากผลการวิเคราะห์โดยใช้การสร้างแบบจำลองในการทำงาน

4.1 ผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์

เราจะใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1 เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนของการเข้าถึงสเปกตรัมระหว่างเฟมโตเซลล์กับแมโครเซลล์และช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ รวมถึงปรับปรุงวิสัยสมรรถนะในโครงข่ายรวม

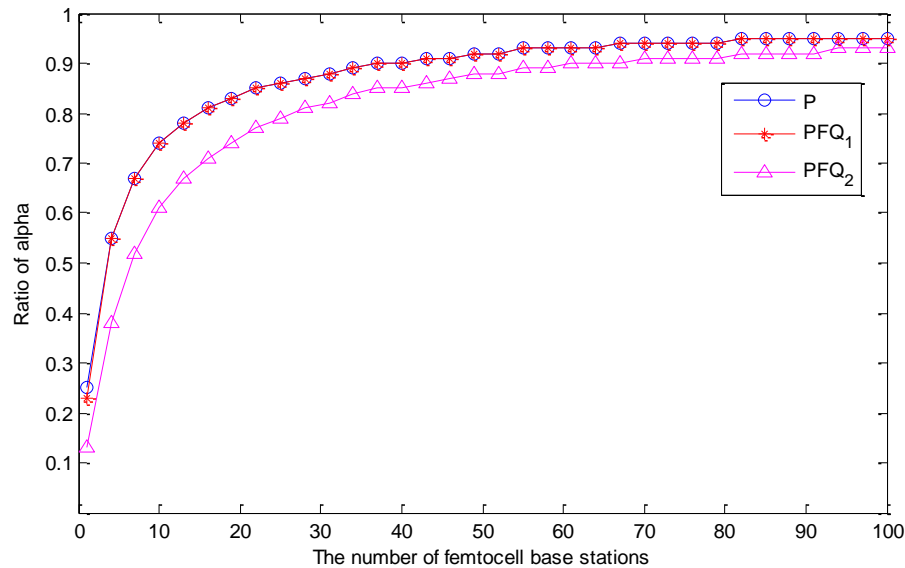
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์

γ	1
β_m	1
β_f	1
W	1
ρ	1
r	3
S	20 MHz
S_f	200 kHz

โดย S คือ จำนวนของสเปกตรัมทั้งหมดในระบบ (Hz)

S_f คือ จำนวนสเปกตรัมของช่องสัญญาณย่อยสำหรับแต่ละผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ (Hz)

4.1.1 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อจำนวนสเปกตรัม



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ต่อจำนวนเฟมโตเซลล์ในแต่ละวิธี

รูปที่ 4.1 แสดงถึงผลกระทบของอัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ต่อจำนวนเฟมโตเซลล์ ซึ่งเปรียบเทียบกัน 3 วิธี ได้แก่

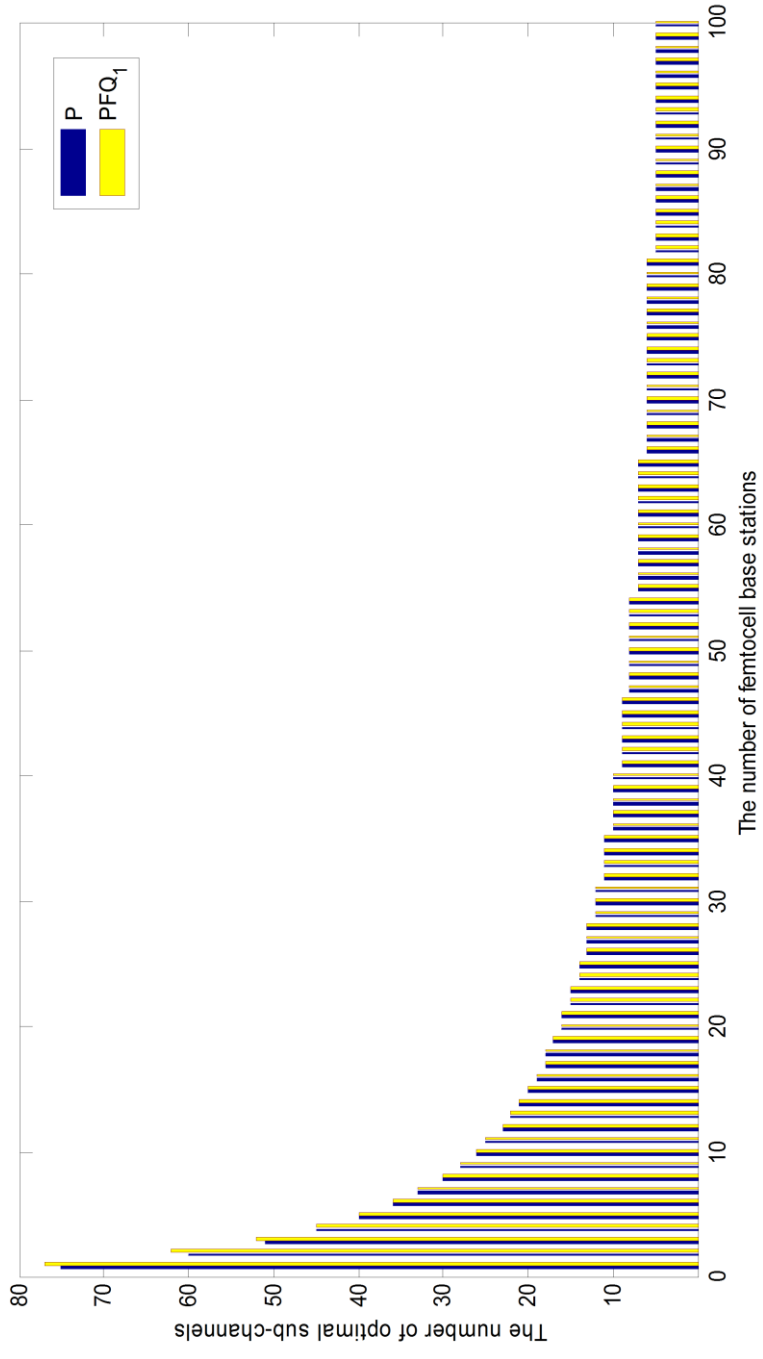
1. P (Price) หมายถึง ใช้ราคาในการพิจารณาอย่างเดียว
2. PFQ₁ (Price, Fairness and QoS₁) หมายถึง ใช้ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการในการพิจารณา โดยคุณภาพของบริการคือค่าความจุช่องสัญญาณที่ผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ได้รับมากกว่าผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ ($QoS_f > QoS_m$) ซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอ
3. PFQ₂ (Price, Fairness and QoS₂) หมายถึง ใช้ราคา, ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการในการพิจารณา โดยคุณภาพของบริการคือค่าความจุช่องสัญญาณที่ผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ได้รับมากกว่า 2 เท่าตัวของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ ($QoS_f > 2QoS_m$)

จากรูปจะพบว่าวิธี PFQ₁ มีอัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ใกล้เคียงกับวิธี P แม้ว่าจะพิจารณาความยุติธรรม และคุณภาพของบริการร่วมด้วย ซึ่งเมื่อเฟมโตเซลล์เพิ่มจำนวนมากขึ้น อัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้มีค่าเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้าม อัตราส่วนของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์สามารถนำไปใช้นั้นมีค่าลดลง เนื่องจากเฟมโตเซลล์มีการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นข้อดีที่ไม่ต้องการ

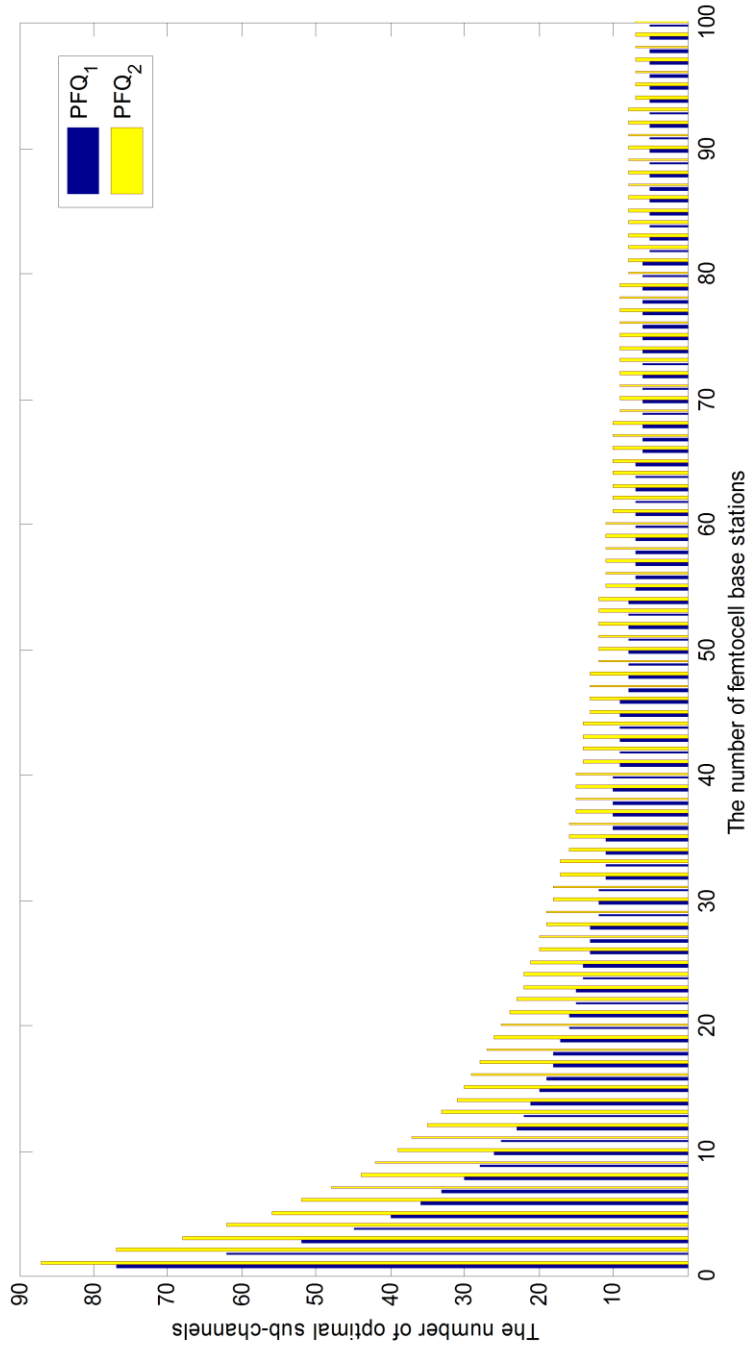
สเปกตรัมที่มากถึงแม้จะมีจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลดีกับแมโครเซลล์ที่สามารถมีสเปกตรัมให้ผู้ใช้งานแมโครเซลล์ได้มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบ PFQ_1 กับ PFQ_2 พบว่า PFQ_2 มีอัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้น้อยกว่า PFQ_1 และในทางตรงกันข้าม อัตราส่วนที่เฟมโตเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้นั้นมากกว่า PFQ_1 เนื่องจาก PFQ_2 เฟมโตเซลล์จะต้องใช้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่า PFQ_1 อย่างมาก จึงทำให้เฟมโตเซลล์ใช้สเปกตรัมที่มากกว่า ซึ่งส่งผลให้มีสเปกตรัมให้ผู้ใช้งานแมโครเซลล์น้อยลง

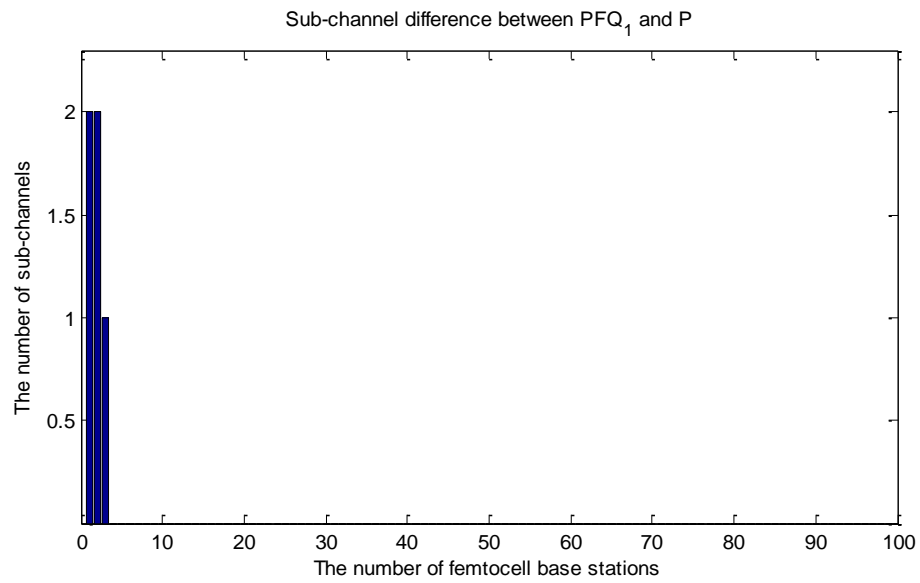
รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 แสดงจำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) ที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ ซึ่งสัมพันธ์กับรูปที่ 4.1 นั่นคือ จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์จะค่อยๆ ลดลงเมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์ในระบบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเฟมโตเซลล์มีระบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ที่ดี โดยรูปที่ 4.4 แสดงถึงผลต่างของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ระหว่าง PFQ_1 กับ P ซึ่ง PFQ_1 ใช้ช่องสัญญาณย่อยมากกว่า P ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์น้อยมาก เนื่องจากที่จำนวนเฟมโตเซลล์น้อยนั้นจะมีความจุช่องสัญญาณที่น้อย ซึ่งไม่เพียงพอกับเกณฑ์ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการที่กำหนดในวิธี PFQ_1 ดังนั้นวิธี PFQ_1 จึงต้องเพิ่มช่องสัญญาณย่อยที่มากกว่าวิธี P เพื่อให้เพียงพอกับเกณฑ์ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการที่กำหนด จากนั้นในรูปที่ 4.5 แสดงถึงผลต่างของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ระหว่าง PFQ_2 กับ PFQ_1 พบว่าวิธี PFQ_2 ใช้ช่องสัญญาณย่อยมากกว่าวิธี PFQ_1 เนื่องจาก PFQ_2 จะใช้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่า จากการกำหนดเกณฑ์ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการโดยแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ และผู้ใช้บริการแมโครเซลล์



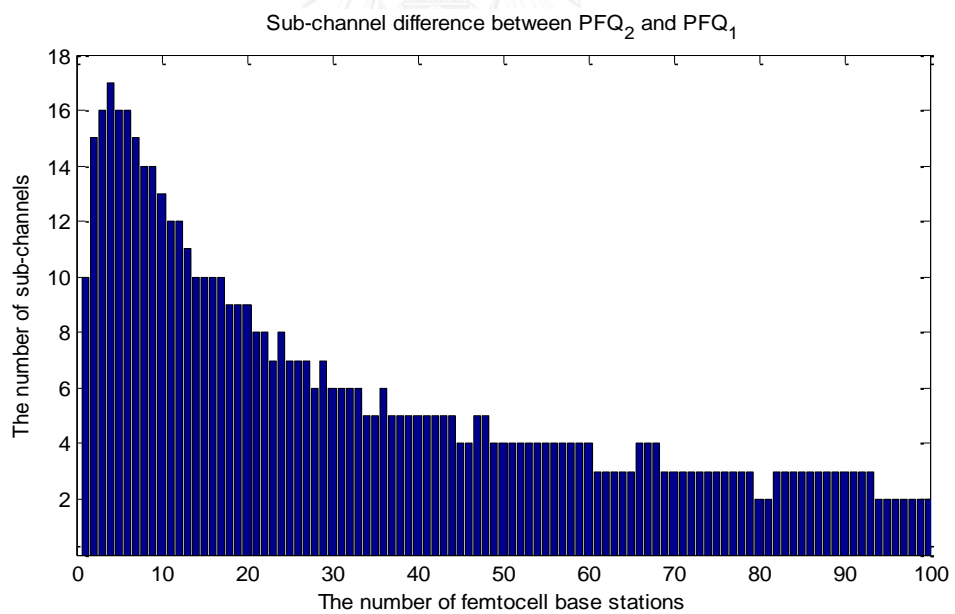
รูปที่ 4.2 จำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) ที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตนีเซลล์ (1)



รูปที่ 4.3 จำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) ที่เหมาะสมสำหรับเฟมโโตเซลล์ (2)

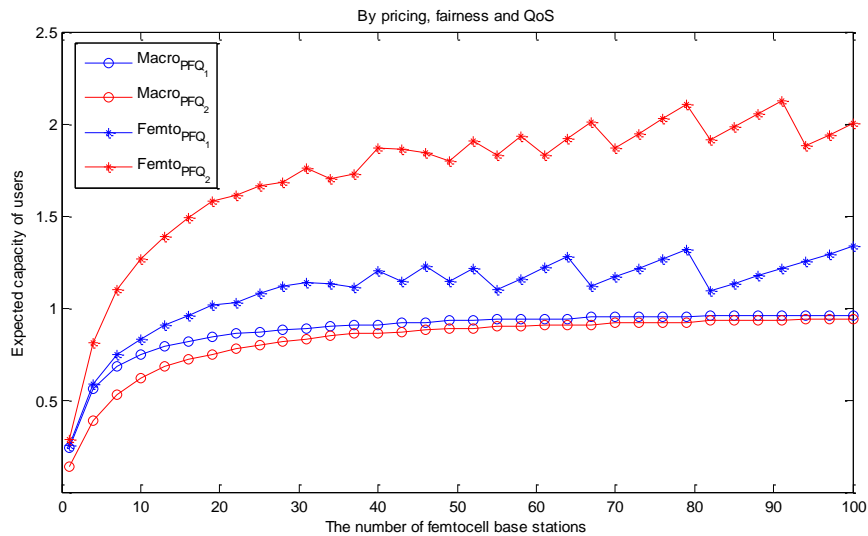


รูปที่ 4.4 ผลต่างของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ระหว่างวิธี PFQ_1 กับ วิธี P



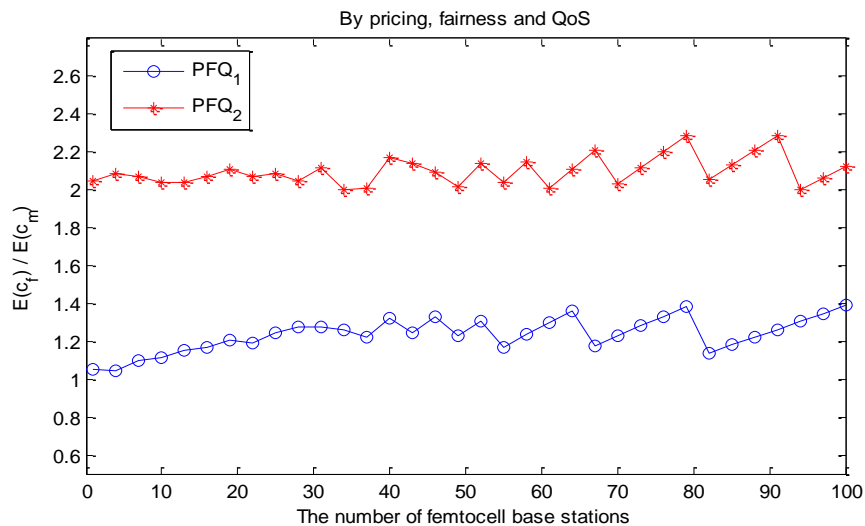
รูปที่ 4.5 ผลต่างของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์ระหว่างวิธี PFQ_2 กับ วิธี PFQ_1

4.1.2 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อความจุช่องสัญญาณ



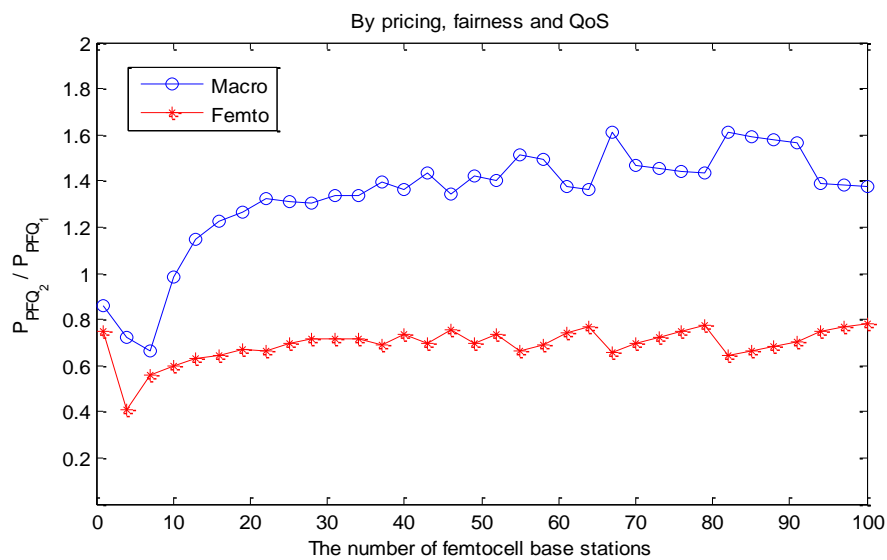
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ และ ผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ในแต่ละวิธี

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ และ ผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ พบว่าค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ในวิธี PFO_2 มากกว่าวิธี PFO_1 และ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ในวิธี PFO_2 น้อยกว่าวิธี PFO_1 โดยเกิดจากการกำหนดค่าความยุติธรรมและคุณภาพของบริการซึ่งสัมพันธ์กับอัตราส่วนของสเปกตรัมที่แมโครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ต่อจำนวนเฟมโตเซลล์ดังรูปที่ 4.1

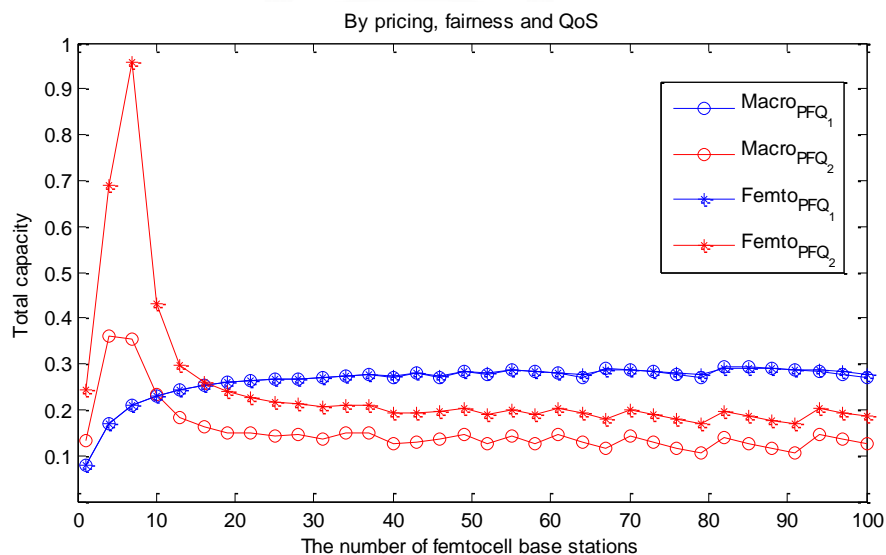


รูปที่ 4.7 อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณระหว่างผู้บริการเฟมโตเซลล์เทียบกับ ผู้บริการแมโครเซลล์

รูปที่ 4.7 พบว่าที่ PFQ_1 จะได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์มากกว่าผู้ให้บริการแมโครเซลล์อยู่ในช่วง 1-1.5 เท่า และที่ PFQ_2 จะได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์มากกว่าผู้ให้บริการแมโครเซลล์อยู่ในช่วง 2-2.5 เท่า ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดในคุณภาพของบริการ โดยจะให้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์มากกว่าผู้ให้บริการแมโครเซลล์เสมอ โดยมีความยุติธรรมคอยควบคุมเพื่อไม่ให้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์มากกว่าผู้ให้บริการแมโครเซลล์มากเกินไป



รูปที่ 4.8 อัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ในวิธี PFQ_2 เทียบกับวิธี PFQ_1

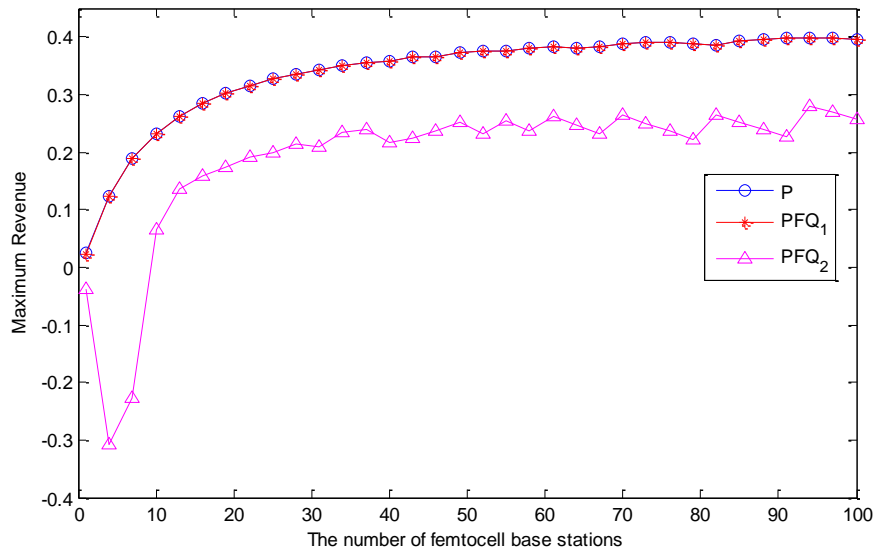


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ในแต่ละวิธี

จากรูปที่ 4.8 – 4.9 พบว่าในรูปที่ 4.9 ที่วิธี PFQ_1 นั้น ค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกัน แม้จะมีอัตราส่วนสเปกตรัมให้เฟมโตเซลล์ใช้น้อยดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ถูกกว่าแม่โครเซลล์ และมีค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์มากกว่าแม่โครเซลล์ โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.6 และ 4.11 จึงทำให้ค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น และค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแม่โครเซลล์เพิ่มขึ้น แม้ค่าบริการเมื่อใช้แม่โครเซลล์แพงกว่าเฟมโตเซลล์ เนื่องจากเมื่อโครงข่ายมีจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้น แม่โครเซลล์จะมีสเปกตรัมให้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 จึงทำให้ค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกัน

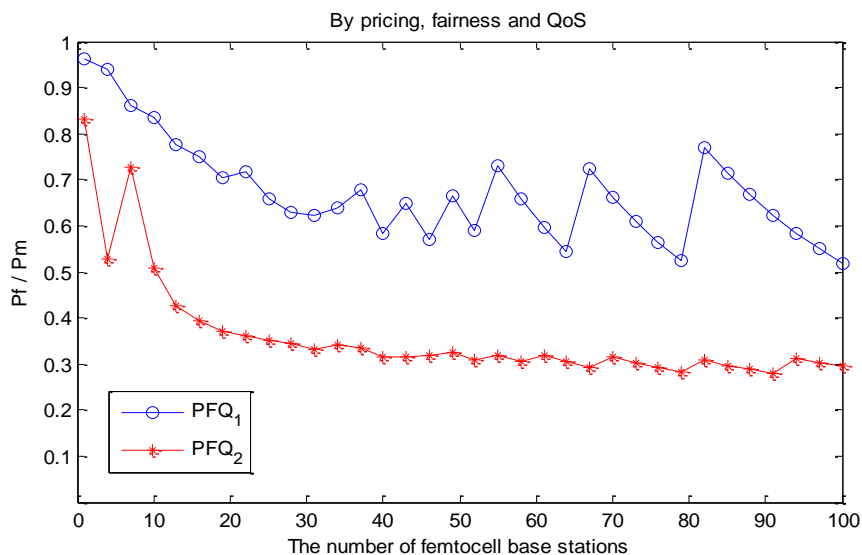
เมื่อเปรียบเทียบวิธี PFQ_1 กับวิธี PFQ_2 จะพบว่าวิธี PFQ_2 จะมีค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์สูงกว่าวิธี PFQ_1 มากในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์น้อย เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี PFQ_2 ถูกกว่าวิธี PFQ_1 มาก โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงอัตราส่วนค่าบริการเมื่อใช้แม่โครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี PFQ_2 เทียบกับวิธี PFQ_1 แต่เมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแม่โครเซลล์ของวิธี PFQ_2 จะต่ำกว่าวิธี PFQ_1 เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แม่โครเซลล์ของวิธี PFQ_2 แพงกว่าวิธี PFQ_1 และในส่วนของเฟมโตเซลล์ ค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ของวิธี PFQ_2 จะต่ำกว่าวิธี PFQ_1 แม้ว่าค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์จะถูกกว่าวิธี PFQ_1 ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากเมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้น แม้ว่าค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์จะเพิ่มสูงขึ้นตาม แต่ความจุของสัญญาณที่ผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์ได้รับอย่างน้อยต้องมากกว่า 2 เท่าตัวของผู้ให้บริการแม่โครเซลล์ ซึ่งเป็นคุณภาพของบริการที่กำหนดไว้ จึงทำให้ผู้ให้บริการต้องรักษาเงื่อนไขรายได้สูงสุดของผู้ให้บริการไว้ด้วย เพื่อให้เกิดความสมดุลกันทั้งคุณภาพของบริการ และรายได้ของผู้ให้บริการ ทำให้ที่จำนวนเฟมโตเซลล์มาก วิธี PFQ_2 จึงมีค่าเฉลี่ยความจุของสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ต่ำกว่าวิธี PFQ_1

4.1.3 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อรายได้ของผู้ให้บริการ



รูปที่ 4.10 ผลกระทบของจำนวนเฟมโตเซลล์ต่อรายได้ของผู้ให้บริการในแต่ละวิธี

รูปที่ 4.10 พบว่า PFQ_1 ซึ่งเป็นวิธีที่น่าเสนอ จะทำให้ผู้ให้บริการมีรายได้ที่ใกล้เคียงกับวิธี P แม้ว่าจะต้องพิจารณาความยุติธรรมและคุณภาพของบริการร่วมด้วย เพื่อให้ผู้ใช้บริการไม่ว่าจะเป็นแมโครเซลล์หรือเฟมโตเซลล์เกิดความพึงพอใจ และเมื่อเปรียบเทียบ PFQ_1 กับ PFQ_2 จะเห็นได้ว่ารายได้ของผู้ให้บริการลดลงอย่างมากที่จำนวนเฟมโตเซลล์น้อย และเพิ่มขึ้นเมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์มากขึ้น เนื่องจากช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์น้อย ค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี PFQ_2 ถูกกว่า PFQ_1 มาก ดังรูปที่ 4.8 จึงทำให้รายได้ของผู้ให้บริการในช่วงนี้ลดลงอย่างมาก แต่เมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น แม้ว่าค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์ของวิธี PFQ_2 จะแพงกว่า PFQ_1 แต่ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ของวิธี PFQ_2 ก็ถูกกว่า PFQ_1 ซึ่งมีผลกับรายได้ของผู้ให้บริการมากกว่า เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์มากกว่าแมโครเซลล์ดังรูปที่ 4.9 จึงส่งผลให้รายได้ของผู้ให้บริการเพิ่มสูงขึ้น แต่ก็ยังไม่สูงกว่าวิธี PFQ_1



รูปที่ 4.11 อัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์

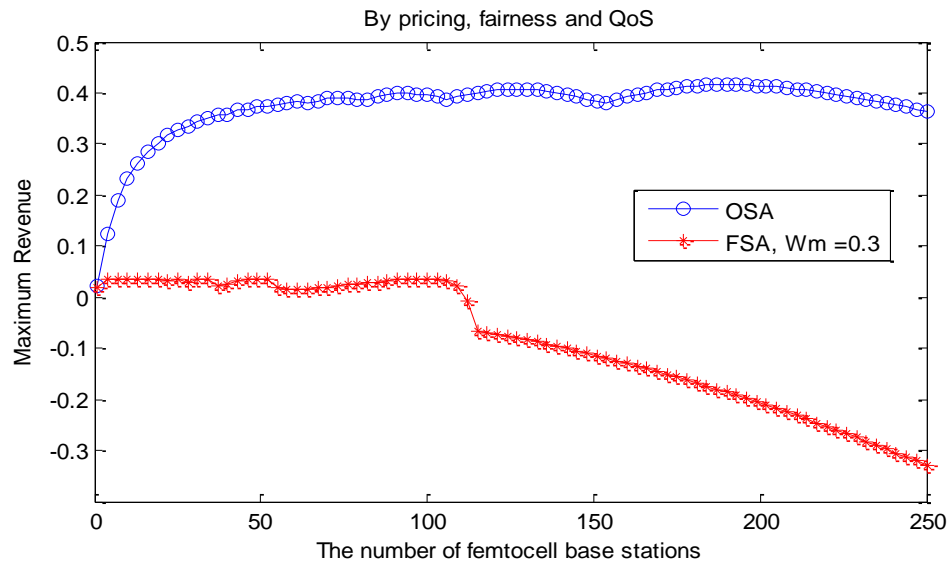
รูปที่ 4.11 พบว่าค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์จะถูกกว่าแมโครเซลล์เสมอทั้งวิธี PFQ₁ และวิธี PFQ₂ เนื่องจากเมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย แม้ว่าจะมีสเปกตรัมให้ใช้น้อยลง แต่เฟมโตเซลล์มีการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์จะถูกกว่าแมโครเซลล์ ซึ่งเป็นผลดีกับผู้ให้บริการ ส่งผลให้การให้บริการเฟมโตเซลล์เป็นไปอย่างแพร่หลายในอนาคต

4.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่

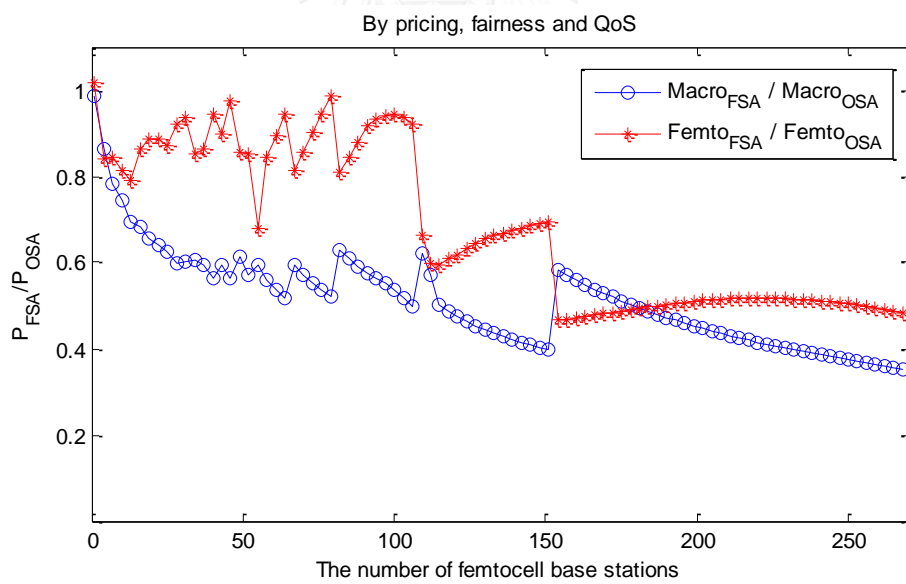
ในหัวข้อนี้ เราจะเปรียบเทียบการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสม (Optimal Spectrum Allocation, OSA) และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ (Fixed Spectrum Allocation, FSA) โดยการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมนั้น เราจะเลือกใช้วิธี PFQ₁ ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้ผู้ให้บริการมีรายได้สูงสุด รวมทั้งมีความจุช่องสัญญาณทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นแมโครเซลล์หรือเฟมโตเซลล์มากกว่าวิธี PFQ₂ และสำหรับวิธีการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่นั้น เพื่อความยุติธรรมในการเปรียบเทียบ เราจะใช้เกณฑ์แบบเดียวกันกับวิธี PFQ₁ แต่จะกำหนดให้ใช้สเปกตรัมแบบคงที่ไม่ว่าจะมีจำนวนเฟมโตเซลล์เท่าใดในระบบ โดยจะแบ่งอัตราส่วนสเปกตรัมสำหรับแมโครเซลล์ (W_m) ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0.3, 0.5 และ 0.7

4.1.4.1 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่

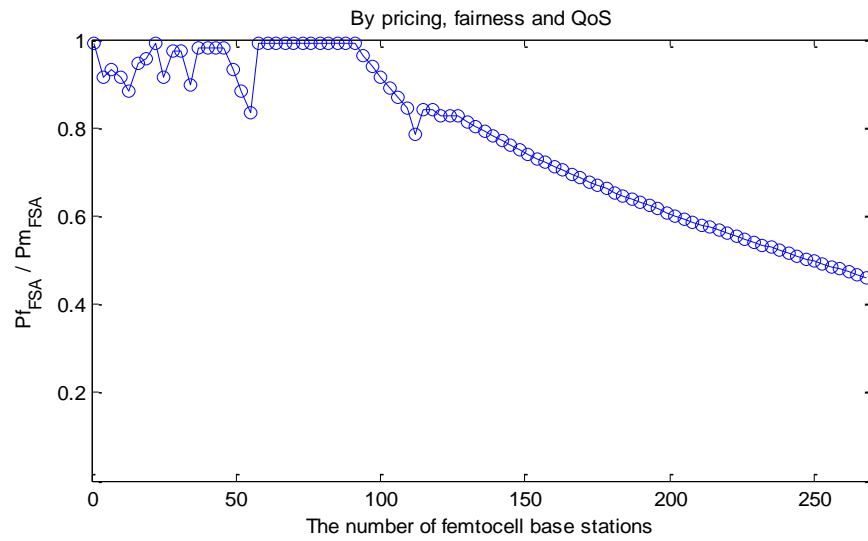
$$W_m = 0.3$$



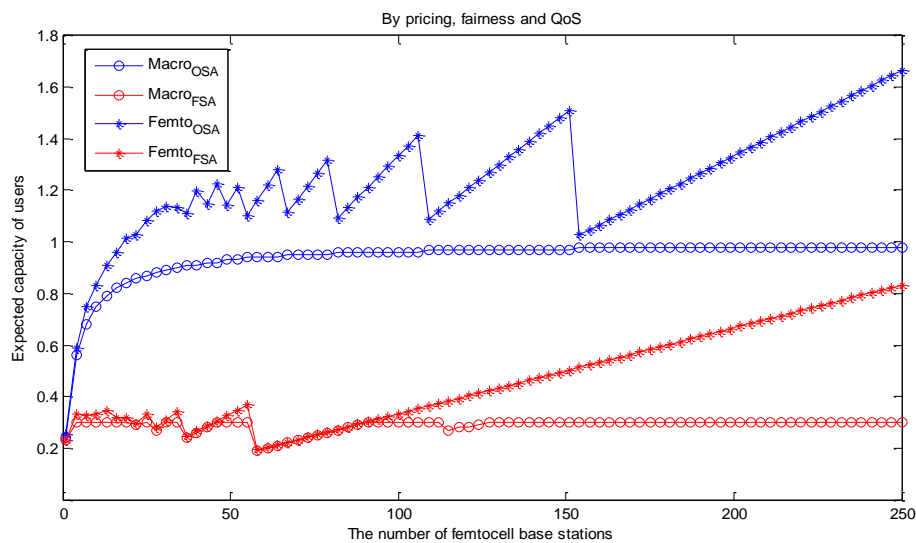
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสม และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสม และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$



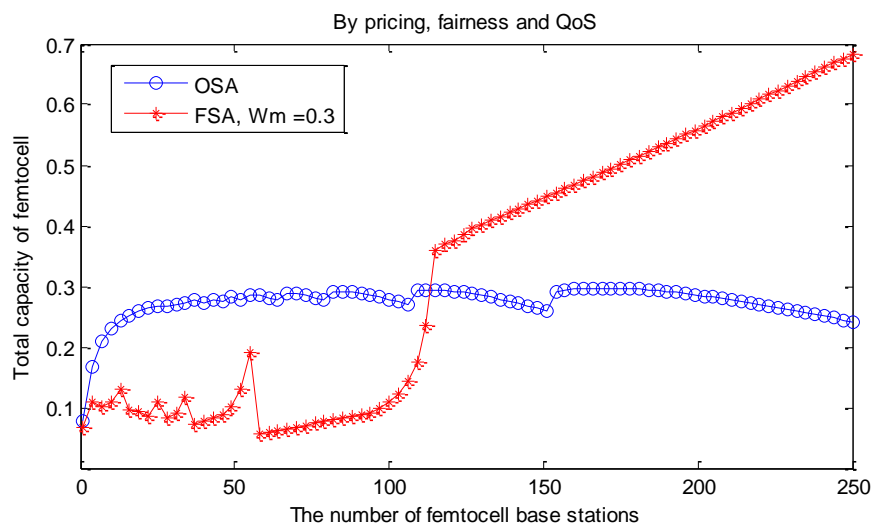
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์สำหรับการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$



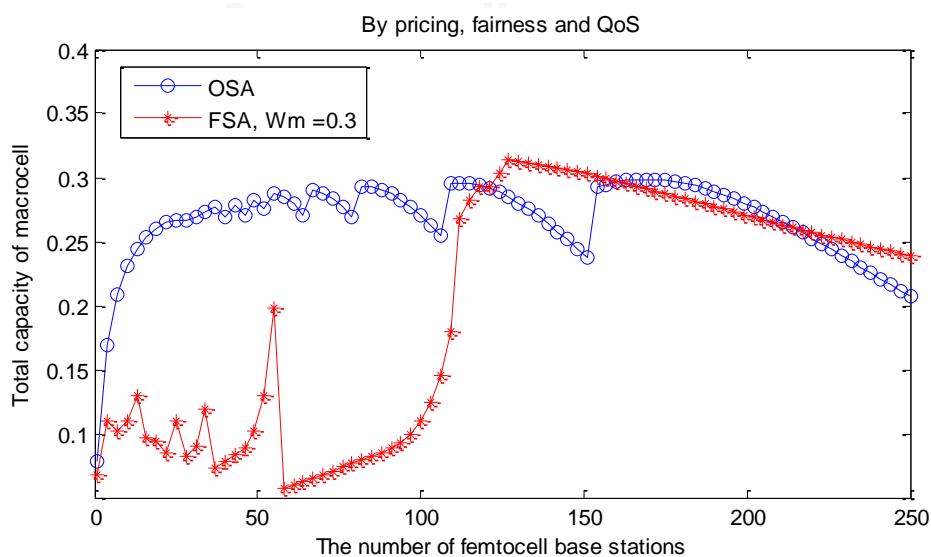
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ และผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์ระหว่าง OSA กับ FSA ที่มี $W_m = 0.3$

จากรูปที่ 4.12 - 4.15 พบว่าในรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างวิธี OSA และวิธี FSA ที่ $W_m = 0.3$ จะเห็นว่าวิธี FSA มีรายได้สูงสุดให้กับผู้ให้บริการน้อยกว่าวิธี OSA และจะยิ่งลดลงมากขึ้นเมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่า OSA เมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้นโดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.13 ซึ่งค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์ และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA จะถูกกว่า OSA เป็นส่วนใหญ่

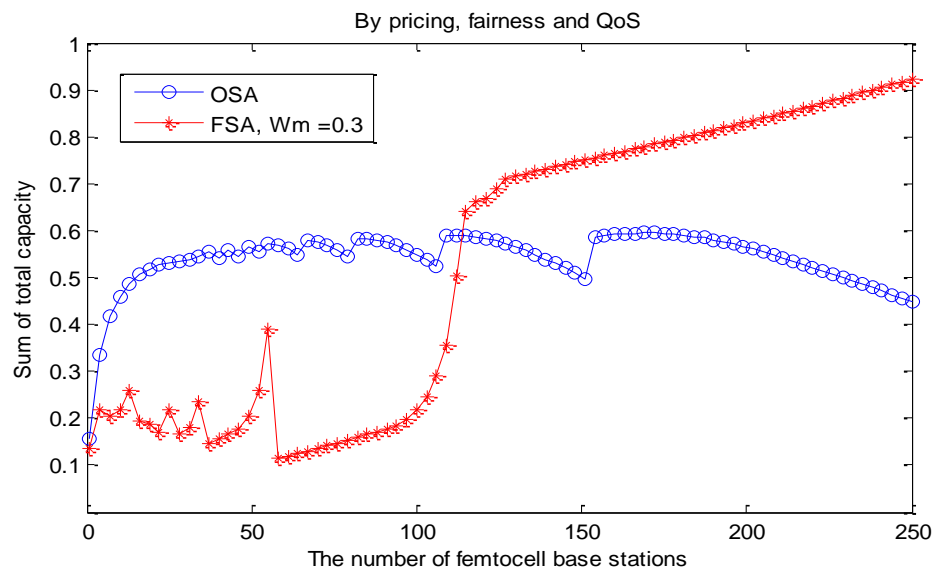
และจากรูปที่ 4.14 จะพบว่าในวิธี FSA นั้น ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์จะถูกกว่าไม่มากและใกล้เคียงกับแมโครเซลล์ในช่วงแรก และจะถูกกว่ามากในช่วงที่มีเฟมโตเซลล์มาก เนื่องจากในช่วงแรก ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของ FSA มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ที่ FSA มี $W_m = 0.3$ และในขณะที่จำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ถูกกว่าแมโครเซลล์มาก



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$

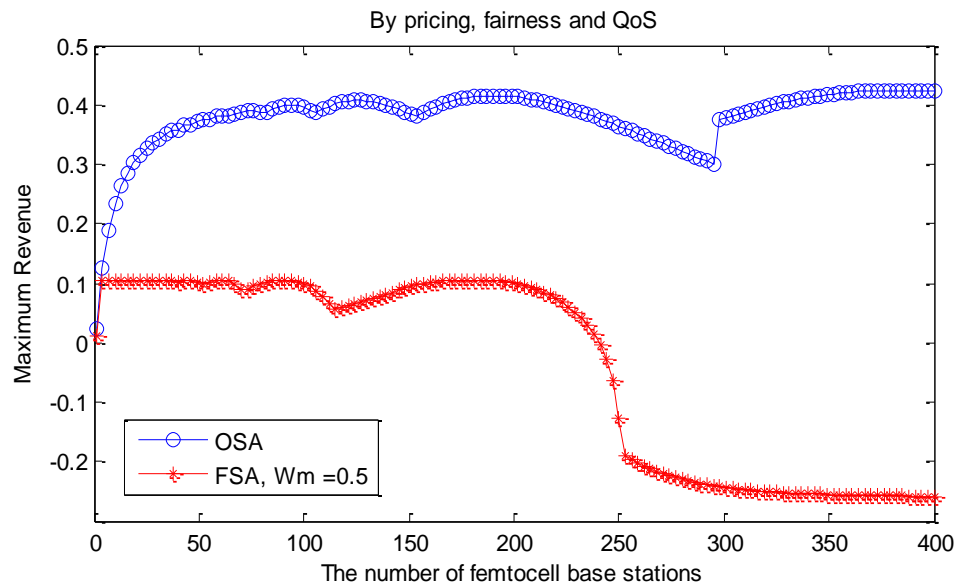


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$

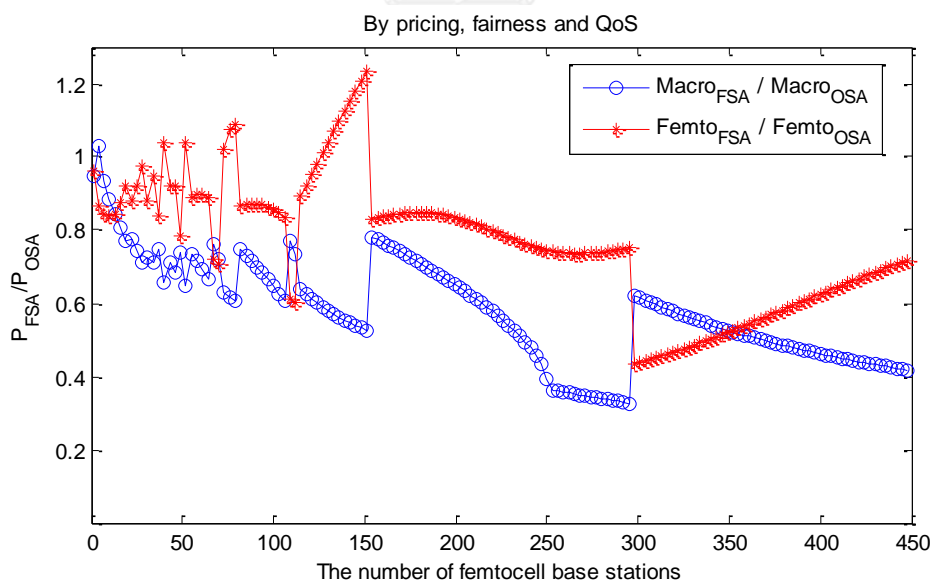
จากรูปที่ 4.16 - 4.18 พบว่าในรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างวิธี OSA และวิธี FSA ที่ $W_m = 0.3$ จะได้ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA มากกว่าวิธี FSA ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ไม่เกิน 113 ตัว แต่หลังจากนั้นวิธี OSA จะน้อยกว่าวิธี FSA เนื่องจากในช่วงแรกนั้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA น้อยกว่าวิธี OSA มากดังรูปที่ 4.15 เนื่องจากค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ของวิธี FSA ถูกจำกัดที่ $W_m = 0.3$ แม้ว่าเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA จะมีอัตราส่วนสเปกตรัมให้ใช้งานได้มาก ($W_f = 0.7$) แต่ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ก็ไม่มากกว่าแมโครเซลล์มาก เนื่องจากถูกควบคุมด้วยเงื่อนไขของราคา ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการ รวมทั้งค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่าวิธี OSA ไม่มาก โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.13 จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ในช่วงไม่เกิน 113 ตัวนั้น น้อยกว่าวิธี OSA ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 แต่เมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์เกิน 113 ตัว ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA จะน้อยกว่าวิธี FSA เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่าวิธี OSA มาก และค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA เพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA น้อยกว่าวิธี FSA

4.1.4.2 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่

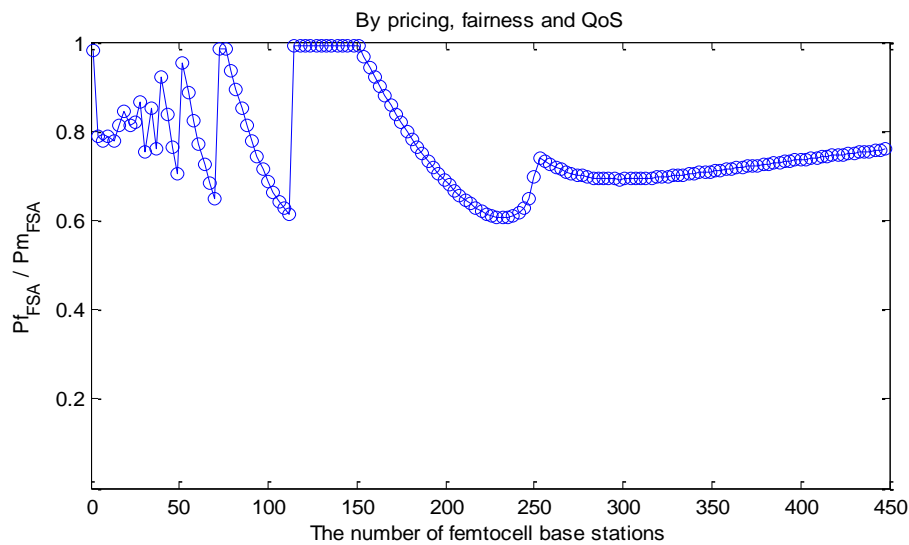
$$W_m = 0.5$$



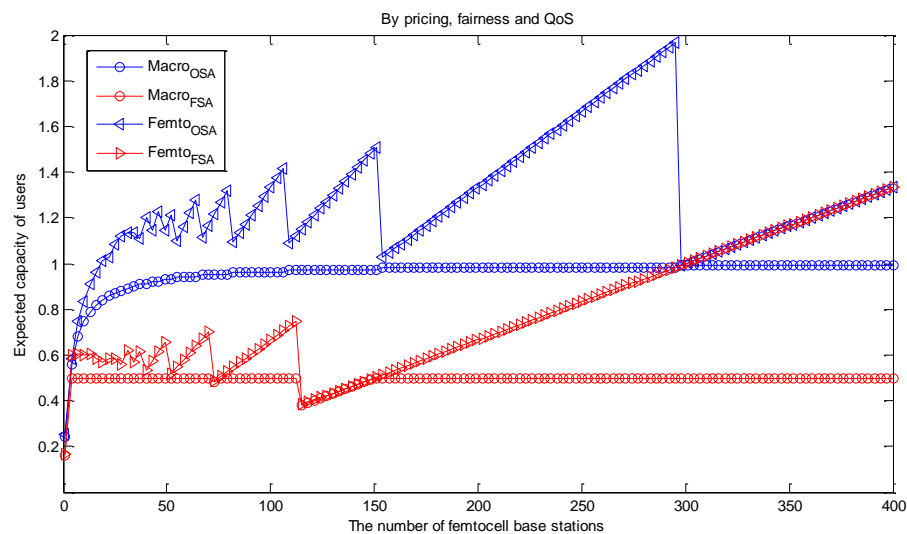
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสม และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสม และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$



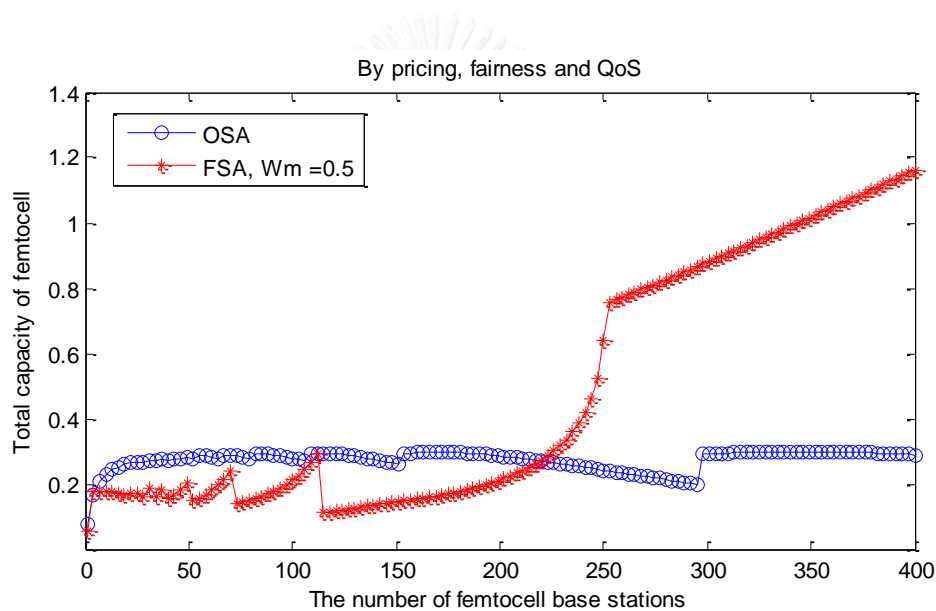
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้
แมโครเซลล์สำหรับการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$



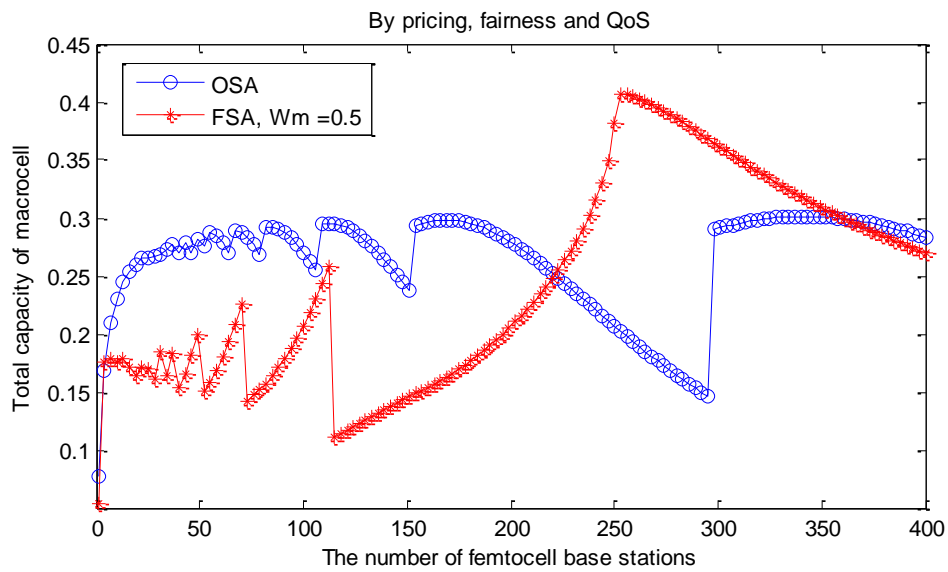
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ และ
ผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์ระหว่าง OSA กับ FSA ที่มี $W_m = 0.5$

จากรูปที่ 4.19 - 4.22 พบว่าในรูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างวิธี OSA และวิธี FSA ที่ $W_m = 0.5$ จะเห็นว่าวิธี FSA มีรายได้สูงสุดให้กับผู้ให้บริการน้อยกว่าวิธี OSA และจะยิ่งลดลงมากขึ้นเมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่า OSA เมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้นโดยอ้างอิงจากรูป

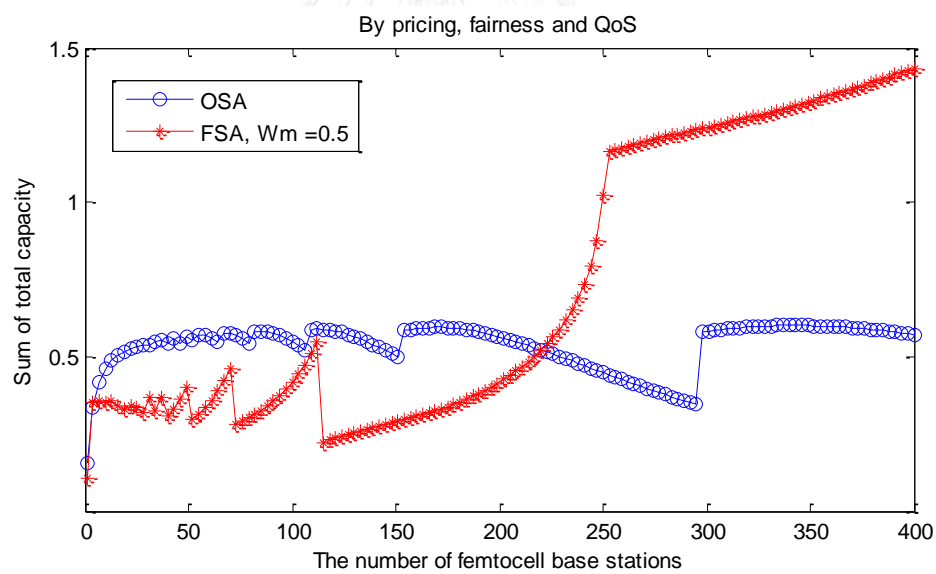
ที่ 4.20 ซึ่งค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์ และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA จะถูกกว่า OSA เป็นส่วนใหญ่ และจากรูปที่ 4.21 จะพบว่าในวิธี FSA นั้น ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์จะถูกกว่าไม่มากและใกล้เคียงกับแมโครเซลล์ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ประมาณ 120 - 160 ตัว และจะถูกกว่ามากในช่วงที่มีเฟมโตเซลล์มาก เนื่องจากในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ประมาณ 120 - 160 ตัวนั้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของ FSA มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.22 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ที่ FSA มี $W_m = 0.5$ และในขณะที่จำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ถูกกว่าแมโครเซลล์มาก



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์ ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$

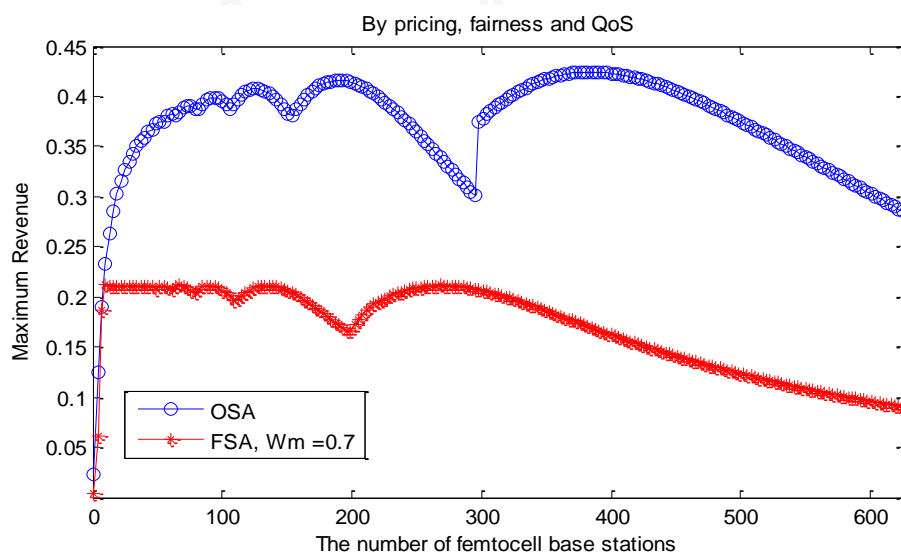


รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้ง แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการ จัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$

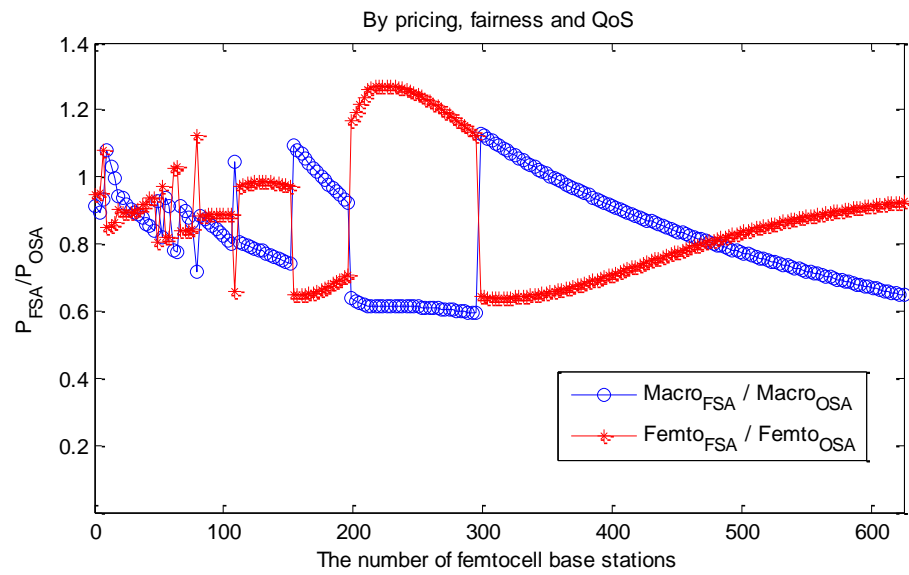
จากรูปที่ 4.23 – 4.25 พบว่าในรูปที่ 4.25 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการให้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างวิธี OSA และวิธี FSA ที่ $W_m = 0.5$ จะได้ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA มากกว่าวิธี FSA ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ไม่เกิน 220 ตัว แต่หลังจากนั้นวิธี OSA จะน้อยกว่าวิธี FSA เนื่องจากในช่วงแรกนั้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA น้อยกว่าวิธี OSA มาก ดังรูปที่ 4.22 เนื่องจากค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการแมโครเซลล์ของวิธี FSA ถูกจำกัดที่ $W_m = 0.5$ ซึ่งแม้ว่าเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA จะมีอัตราส่วนสเปกตรัมให้ใช้งานได้เท่ากัน ($W_f = 0.5$) แต่ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์ก็ไม่เท่ากัน ซึ่งจะมากกว่าแมโครเซลล์เล็กน้อย เนื่องจากถูกควบคุมด้วยเงื่อนไขของราคา ความยุติธรรม และคุณภาพของบริการ รวมทั้งค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่าวิธี OSA ไม่มาก โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.20 จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการให้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ในช่วงไม่เกิน 220 ตัวนั้น น้อยกว่าวิธี OSA ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 แต่เมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์เกิน 220 ตัว ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA จะน้อยกว่าวิธี FSA เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่าวิธี OSA มาก และค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ให้บริการเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA เพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA จะน้อยกว่าวิธี FSA

4.1.4.3 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่

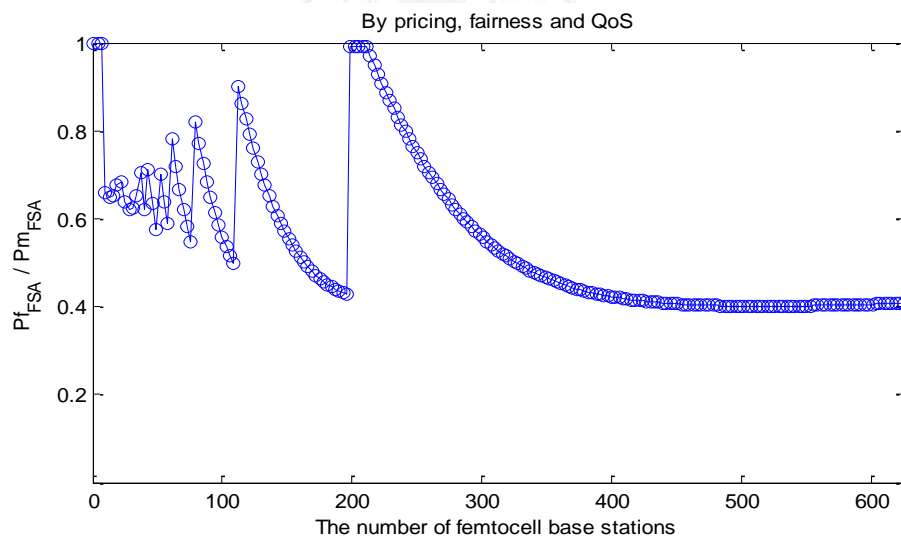
$$W_m = 0.7$$



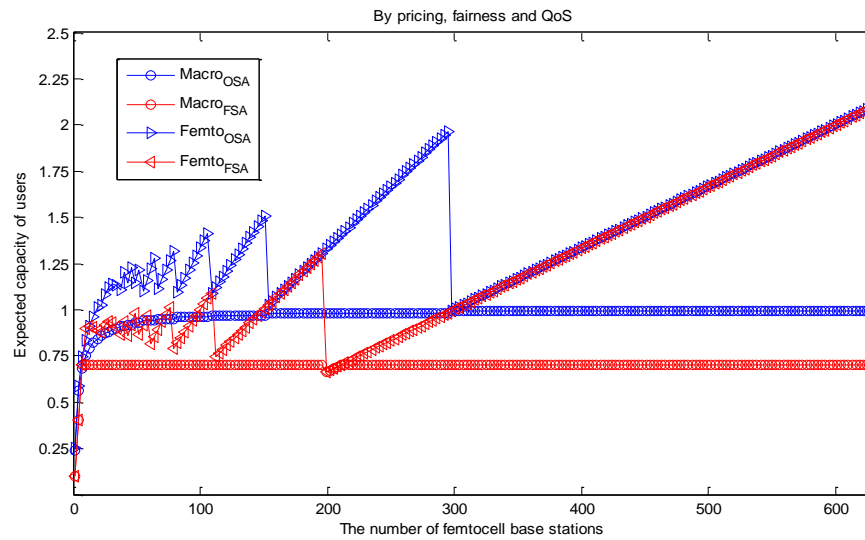
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสม และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสม และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$

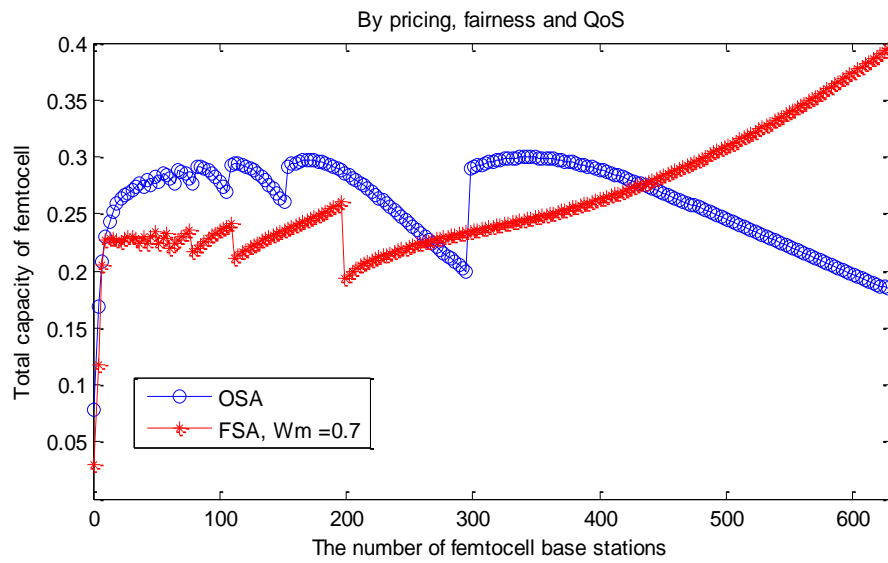


รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์เทียบกับค่าบริการเมื่อใช้ แมโครเซลล์สำหรับการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$

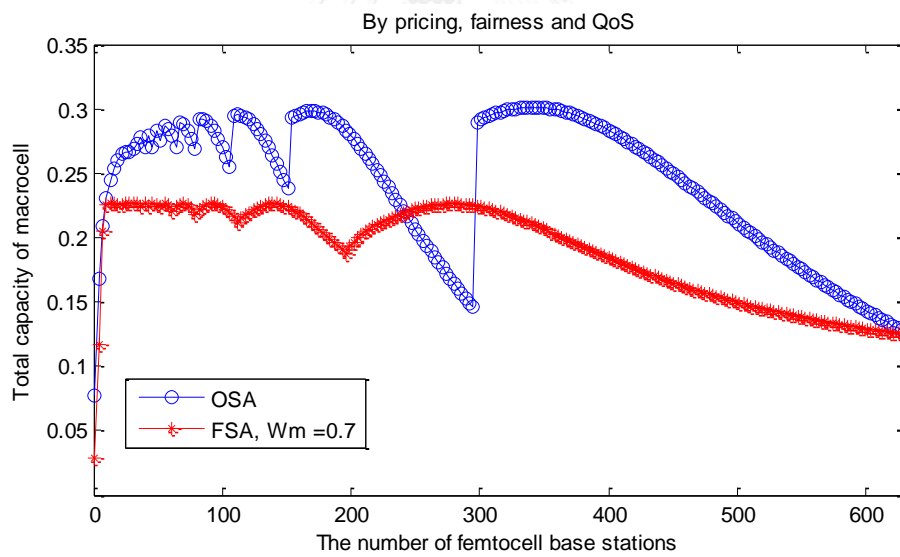


รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์ และ ผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ระหว่าง OSA กับ FSA ที่มี $W_m = 0.7$

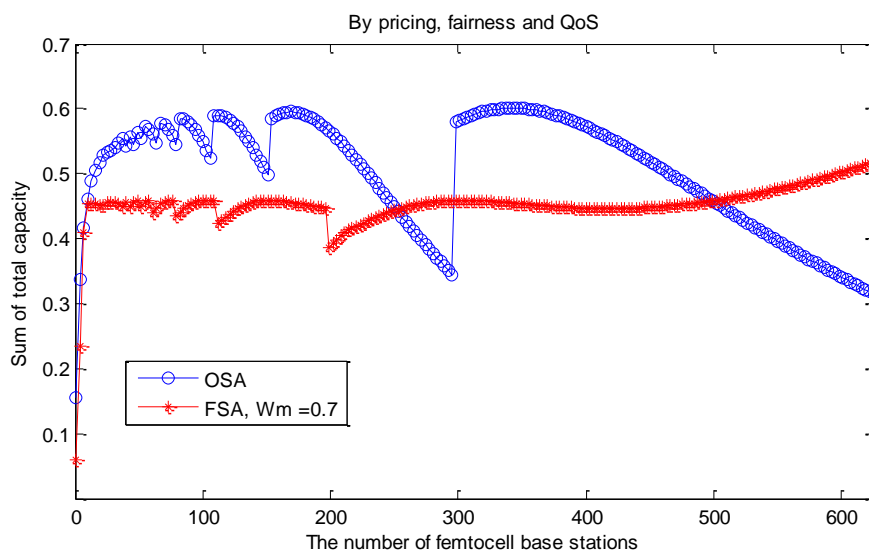
จากรูปที่ 4.26 – 4.29 พบว่าในรูปที่ 4.27 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการ ระหว่างวิธี OSA และวิธี FSA ที่ $W_m = 0.7$ จะเห็นว่าวิธี FSA มีรายได้สูงสุดให้กับผู้ให้บริการน้อยกว่าวิธี OSA และจะยิ่งลดลงมากขึ้นเมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่า OSA เมื่อจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้นโดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.27 ซึ่งค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์ และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA จะถูกกว่า OSA เป็นส่วนใหญ่ และจากรูปที่ 4.28 จะพบว่าในวิธี FSA นั้น ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์จะเท่ากันหรือใกล้เคียงกับแมโครเซลล์ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์น้อยมากกับช่วงที่มีประมาณ 200 – 220 ตัว และจะถูกกว่ามากในช่วงที่มีเฟมโตเซลล์มาก เนื่องจากในช่วงนั้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของ FSA มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ที่ FSA มี $W_m = 0.7$ และในขณะที่จำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ถูกกว่าแมโครเซลล์มาก



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการเฟมโตเซลล์ ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการแมโครเซลล์ ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$

จากรูปที่ 4.30 – 4.32 พบว่าในรูปที่ 4.32 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างวิธี OSA และวิธี FSA ที่ $W_m = 0.7$ จะได้ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA น้อยกว่าวิธี FSA ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ประมาณ 200 - 300 ตัว เนื่องจากในช่วงนั้น ค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่าวิธี OSA มาก โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.27 แม้ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ของวิธี FSA จะแพงกว่าวิธี OSA มาก แต่ด้วยเงื่อนไขของราคา ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการ จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี OSA ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ประมาณ 200 - 300 ตัวนั้น น้อยกว่าวิธี FSA ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 และในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ประมาณ 300 - 500 ตัวนั้น ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA กลับมามากกว่าวิธี FSA เนื่องจากค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์ของวิธี FSA แพงกว่าวิธี OSA มาก แม้ค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ของวิธี FSA จะถูกกว่าวิธี OSA มาก แต่ด้วยเงื่อนไขของราคา ความยุติธรรมและคุณภาพของบริการ จึงส่งผลให้ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA ในช่วงที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ประมาณ 300 - 500 ตัวนั้น มากกว่าวิธี FSA และเมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์มากกว่า 500 ตัวโดยประมาณ ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA กลับมาน้อยกว่าวิธี FSA เนื่องจากค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA เท่ากับวิธี OSA แต่ค่าบริการเมื่อใช้แมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ของวิธี FSA ถูกกว่าวิธี OSA จึงทำให้ผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุ

ช่องสัญญาณทั้งหมดในระบบของวิธี OSA น้อยกว่าวิธี FSA เมื่อมีจำนวนเฟมโตเซลล์มากกว่า 500 ตัว โดยประมาณ

4.2 แบบจำลองทำงาน

ในการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์นั้น เราให้ค่า β_m และ β_f ในสมการที่ 3.4 และ 3.5 เท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่า ผู้ใช้งานจะได้รับความจุช่องสัญญาณได้เต็มประสิทธิภาพ แต่ในแบบจำลองการทำงานนั้น เรายังให้ค่า β_m สำหรับผู้ใช้แมโครเซลล์ในสมการที่ 3.4 เท่ากับ 1 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเฟมโตเซลล์ที่เข้ามาในระบบ โดยที่แมโครเซลล์ได้รับความจุช่องสัญญาณได้เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งเรากำหนดให้ค่า β_m เท่ากับ 1 ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานแมโครเซลล์กับผู้ใช้แมโครเซลล์เท่ากับ 20 เมตร แต่ในส่วนของผู้ใช้เฟมโตเซลล์นั้น เราจะหาค่า β_f ในสมการที่ 3.5 โดยการกำหนดให้ตำแหน่งของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) ภายในพื้นที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยจะสุ่มตำแหน่งของผู้ใช้บริการเฟมโตเซลล์ในทุกๆ ครั้งที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้นและสุ่มด้วยจำนวน 100 ครั้ง เพื่อหาค่า β_f ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\beta_f = \frac{\beta_{f_d}}{\beta_{f_{ref}}} \quad (4.1)$$

โดย

$$\beta_{f_d} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{t_f} d_f^{-pl}}{\sigma^2} \right), \quad \text{bits/s/Hz} \quad (4.2)$$

$$\beta_{f_{ref}} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{t_f} d_{f_{ref}}^{-pl}}{\sigma^2} \right), \quad \text{bits/s/Hz} \quad (4.3)$$

โดย

β_f คือ ประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมของผู้ใช้เฟมโตเซลล์ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize)

β_{f_d} คือ ประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมของผู้ใช้เฟมโตเซลล์ที่ระยะทาง d_f

$\beta_{f_{ref}}$ คือ ประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมของผู้ใช้เฟมโตเซลล์ที่ระยะทาง d_{ref}

P_{t_f} คือ กำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์

d_f คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์กับผู้ใช้เฟมโตเซลล์

d_{ref} คือ ระยะห่างอ้างอิงระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์กับผู้ใช้เฟมโตเซลล์

pl คือ เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง (Path loss exponent)

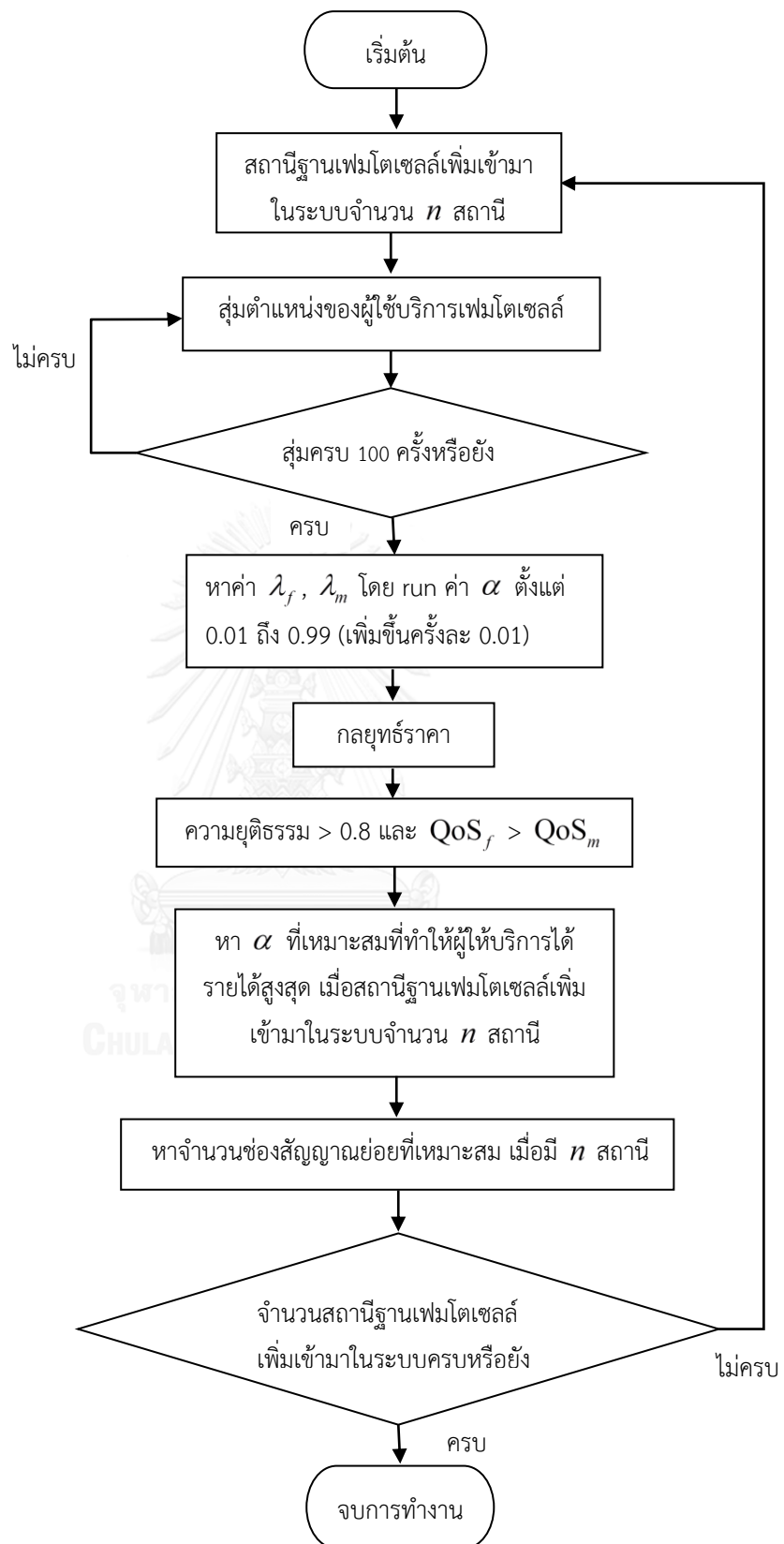
σ^2 กำลังของสัญญาณรบกวน (Noise power)

โดยขั้นตอนของโปรแกรมที่ใช้จำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.33 และกำหนดค่าที่ใช้ในการจำลองการทำงาน [9] ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการทำงาน

	Macrocell	Femtocell
R	500 m	30 m
P_t	43 dBm	20 dBm
σ^2	-105 dBm	-105 dBm
pl	3.5	3.5
d_{ref}	20 m	15 m





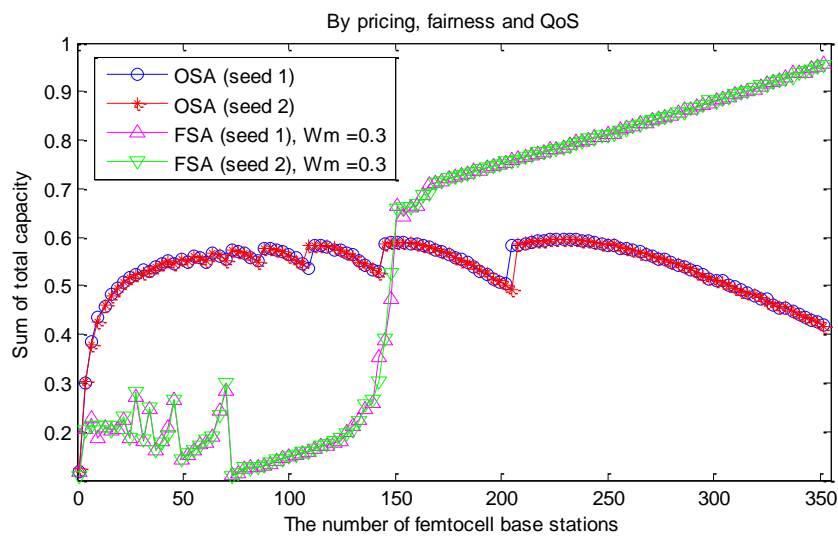
รูปที่ 4.33 ขั้นตอนของโปรแกรมที่ใช้จำลองการทำงานของวิธีที่เสนอ

4.3 ผลการจำลองการทำงาน

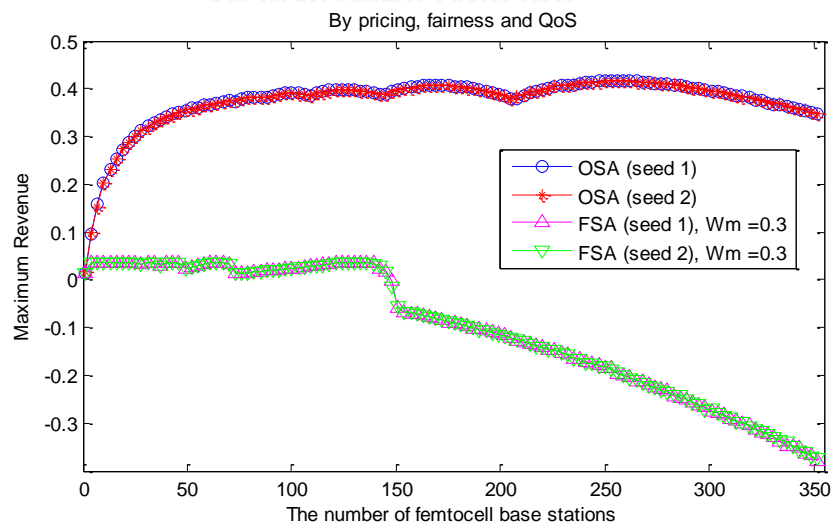
เราจะเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอ และการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ โดยจะใช้ค่าเริ่มต้นในการสุ่ม (Random seed) 2 ชุดในแต่ละวิธี เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง

4.3.1 เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่

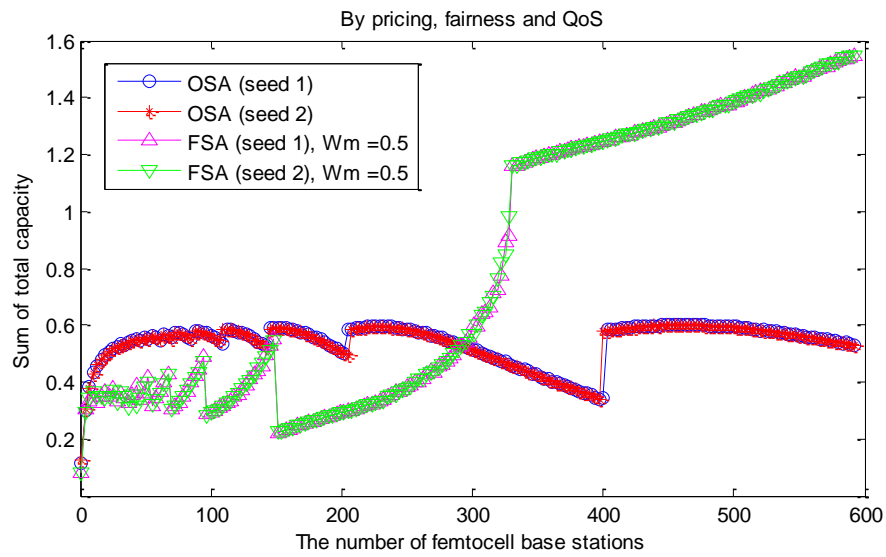
$$W_m = 0.3, 0.5, 0.7$$



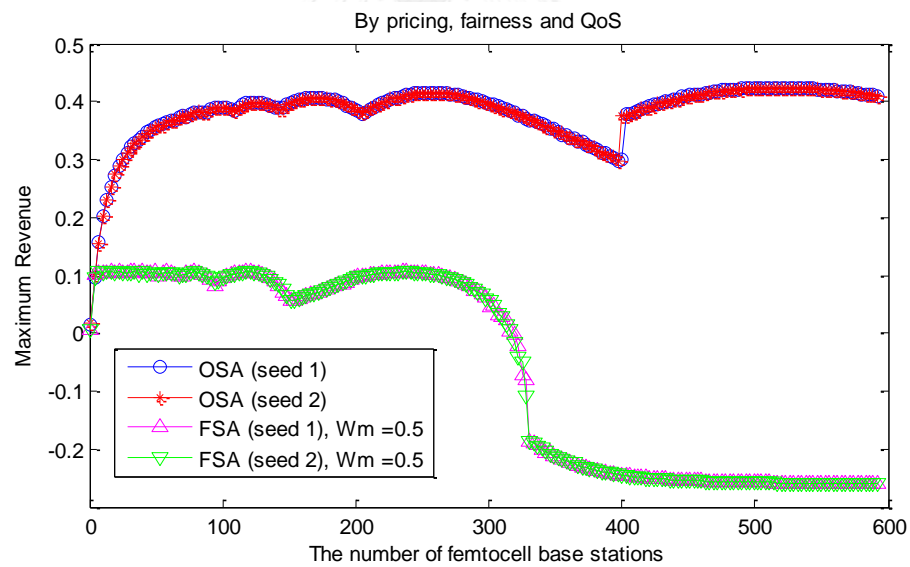
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ ในแต่ละ Random seed



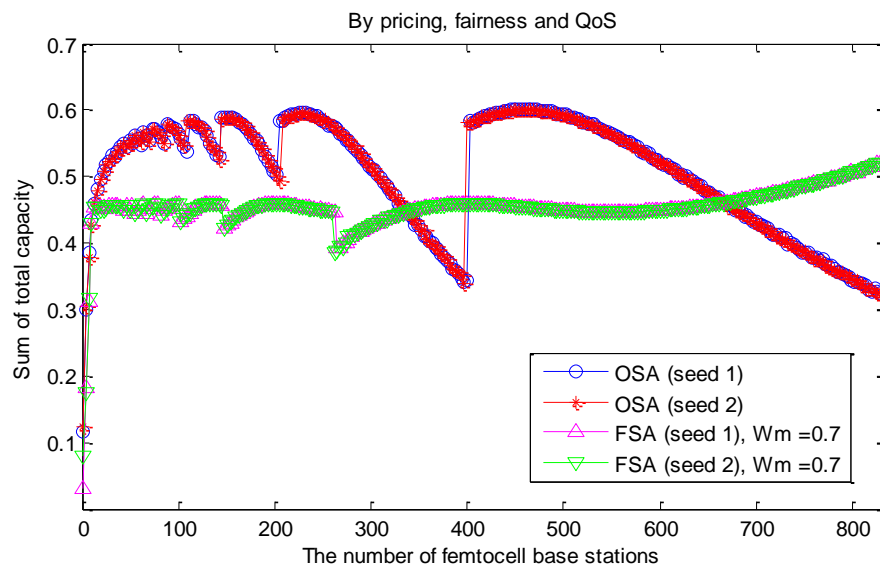
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.3$ ในแต่ละ Random seed



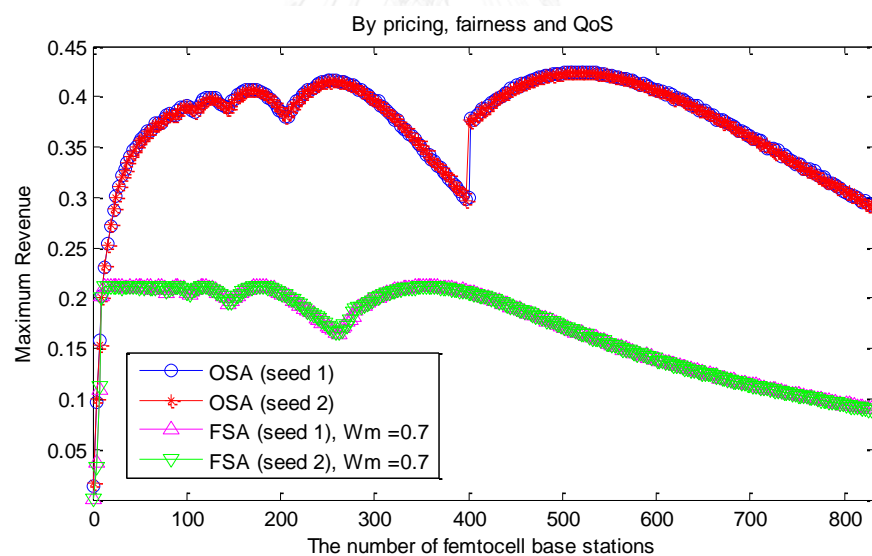
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมิโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ ในแต่ละ Random seed



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.5$ ในแต่ละ Random seed



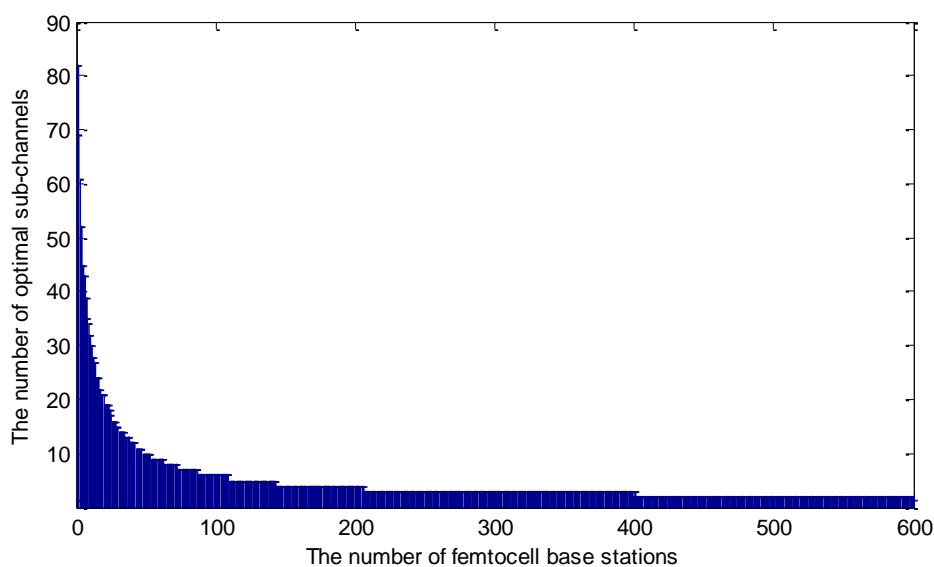
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ ในแต่ละ Random seed



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ $W_m = 0.7$ ในแต่ละ Random seed

รูปที่ 4.34 – 4.39 แสดงการเปรียบเทียบผลรวมของค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของการใช้บริการทั้งแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ W_m ต่างๆ และการเปรียบเทียบรายได้ของผู้ให้บริการระหว่างการจัดสรรสเปกตรัมแบบเหมาะสมและการจัดสรรสเปกตรัมแบบคงที่ที่ W_m ต่างๆ จะพบว่าค่าที่ได้มี

แนวโน้มที่เหมือนกับผลจากการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์ และจะแตกต่างกันที่จำนวนเฟมโตเซลล์ที่สามารถรองรับการใช้งานได้ในระบบ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองการทำงานจะสามารถมีจำนวนเฟมโตเซลล์ที่รองรับการใช้งานได้มากกว่าผลจากการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์ เนื่องจากค่า β_f ที่ได้จากการจำลองการทำงานมีค่าอยู่ระหว่าง 0.90 - 0.92 นั้นหมายถึงประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัมของผู้ใช้เฟมโตเซลล์สามารถใช้ได้ประมาณ 90% ซึ่งไม่เต็มประสิทธิภาพเหมือนกับผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์ที่ให้ $\beta_f = 1$ จึงทำให้ยังมีสเปกตรัมเพื่อรองรับการใช้งานให้กับเฟมโตเซลล์ได้เพิ่มขึ้น และมีจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.40 โดยเราจะสรุปจำนวนเฟมโตเซลล์ในระบบ ที่มีได้จำกัดของแต่ละวิธี และการเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมซึ่งจะสัมพันธ์กับจำนวนเฟมโตเซลล์ในบทที่ 5 ต่อไป



รูปที่ 4.40 จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์จากผลการจำลองการทำงาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

เนื่องด้วยปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างสถานีฐานแม่โครเซลล์และสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะเกิดขึ้นเมื่อสถานีฐานแม่โครเซลล์และสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใช้ความถี่เดียวกัน ดังนั้นการจัดสรรสเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการแก้ปัญหา ซึ่งการจัดสรรสเปกตรัมแบบแบ่งความถี่สามารถแก้ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างสถานีฐานแม่โครเซลล์กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ แต่ยังมีปัญหาในการแบ่งสเปกตรัมให้สถานีฐานแม่โครเซลล์และสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใช้ในอัตราส่วนเท่าใด รวมถึงหาจำนวนช่องสัญญาณย่อย (Sub-channel) สำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์เท่าใด จึงจะเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาจะกำหนดอัตราส่วนสำหรับการจัดสรรสเปกตรัมให้สถานีฐานแม่โครเซลล์และสถานีฐานเฟมโตเซลล์ รวมถึงจำนวนช่องสัญญาณย่อยแบบคงที่ โดยไม่ขึ้นกับความเป็นจริง เนื่องจากอัตราส่วนสำหรับการจัดสรรสเปกตรัมไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนเฟมโตเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสเปกตรัมที่เฟมโตเซลล์และแม่โครเซลล์สามารถนำไปใช้งานได้ รวมถึงจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมสำหรับเฟมโตเซลล์เมื่อจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์เพิ่มขึ้นในโครงข่าย รวมทั้งปรับปรุงวิธีสามารถในระบบโครงข่ายรวม โดยใช้กลยุทธ์ด้านราคามาพิจารณา เพื่อให้ผู้ใช้บริการได้รับรายได้สูงสุด พร้อมทั้งพิจารณาคุณภาพของบริการและความยุติธรรมสำหรับผู้ใช้งานด้วย

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์พบว่าวิธี OSA ซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอจะได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่ายรวม (แม่โครเซลล์-เฟมโตเซลล์) มากกว่าวิธี FSA ในช่วงแรกช่วงหนึ่ง แต่หลังจากนั้นจะน้อยกว่าวิธี FSA ซึ่งสรุปได้ดังนี้ วิธี OSA จะมีค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่ายรวมมากกว่าวิธี FSA ที่ $W_m = 0.3$ ในช่วงที่มีเฟมโตเซลล์ไม่เกิน 113 ตัว, ที่ $W_m = 0.5$ ในช่วงที่มีเฟมโตเซลล์ไม่เกิน 220 ตัว และที่ $W_m = 0.7$ ในช่วงที่มีเฟมโตเซลล์ไม่เกิน 251 ตัว และช่วง 297 - 498 ตัว นอกเหนือจากนั้นแล้ว พบว่าวิธี OSA จะได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่ายรวมน้อยกว่าวิธี FSA ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 5.1 และเมื่อพิจารณาทางด้านค่าบริการจะพบว่าวิธี OSA มีค่าบริการเมื่อใช้เฟมโตเซลล์ถูกกว่าค่าบริการเมื่อใช้แม่โครเซลล์เสมอที่ทุกจำนวนเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะดึงดูดให้ผู้ใช้บริการสนใจที่จะใช้บริการมากขึ้น เพื่อลดปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนมากที่สถานีฐานแม่โครเซลล์ เหมาะสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารในยุคหน้า ที่เน้นปริมาณในการรับส่งข้อมูลที่สูง นอกจากนี้รายได้สูงสุดของผู้ให้บริการของวิธี OSA นั้นมากกว่าวิธี

FSA ทั้งหมดที่ทุกจำนวนเพมโตเซลล์ และหากเปรียบเทียบในเฉพาะวิธี FSA พบว่าวิธี FSA ที่ $W_m = 0.7$ จะมีรายได้สูงสุดของผู้ให้บริการมากที่สุด รองลงมาคือ ที่ $W_m = 0.5$ และ $W_m = 0.3$ ตามลำดับ และสุดท้ายจะได้จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้วางแผนในการจัดสรรสเปกตรัมอย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์การจำลองการทำงานพบว่าค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่ายรวม และรายได้สูงสุดของผู้ให้บริการ จะมีแนวโน้มที่เหมือนกันกับผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์ ต่างกันตรงที่มีจำนวนเพมโตเซลล์ที่สามารถรองรับการใช้งานได้เพิ่มมากขึ้น โดยสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการจัดสรรสเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดให้คุ้มค่าระหว่างแมโครเซลล์และเพมโตเซลล์สำหรับผู้ให้บริการ โดยรักษาความยุติธรรม และคุณภาพของบริการร่วมด้วย ทั้งนี้ผู้วิจัยได้จัดทำรูปภาพ เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานหากต้องการยึดหลักการให้ได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของโครงข่ายรวมสูงสุดในแต่ละช่วงของจำนวนเพมโตเซลล์ ซึ่งสามารถใช้วิธีต่างๆที่เหมาะสมดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 แต่หากยึดหลักการให้ได้รายได้สูงสุดนั้น วิธี OSA จะดีกว่าวิธี FSA ในทุกช่วงของจำนวนเพมโตเซลล์

ตารางที่ 5.1 จำนวนเพมโตเซลล์ที่ Cap^* ของวิธี OSA มากกว่าและน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี FSA ที่ W_m ต่างๆ จากการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์

วิธี	จำนวนเพมโตเซลล์ที่ Cap^* ของ OSA มากกว่า	จำนวนเพมโตเซลล์ที่ Cap^* ของ OSA น้อยกว่า	จำนวนเพมโตเซลล์ที่มีได้ในระบบ
FSA, $W_m = 0.3$	1 - 113	114 - 270	270
FSA, $W_m = 0.5$	1 - 220	221 - 449	449
FSA, $W_m = 0.7$	1 - 251, 297 - 498	252 - 296, 499 - 629	629

หมายเหตุ

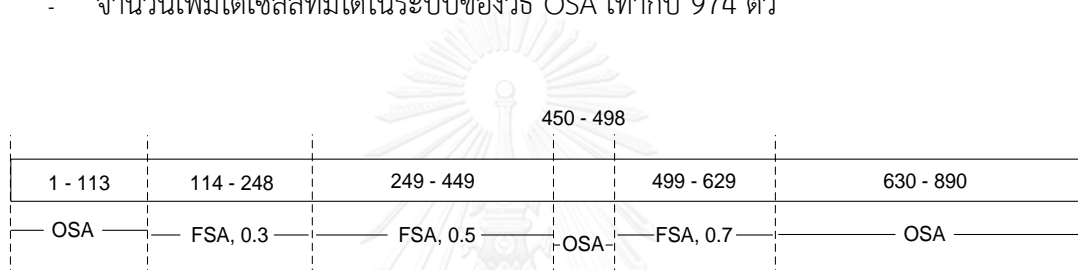
- Cap^* คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่ายรวม
- จำนวนเพมโตเซลล์ที่มีได้ในระบบของวิธี OSA เท่ากับ 890 ตัว

ตารางที่ 5.2 จำนวนเฟรมโตะเซลล์ที่ Cap* ของวิธี OSA มากกว่าและน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี FSA ที่ W_m ต่างๆ จากการวิเคราะห์การจำลองการทำงาน

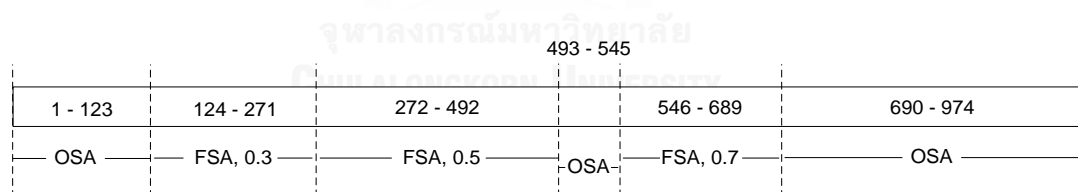
วิธี	จำนวนเฟรมโตะเซลล์ที่ Cap* ของ OSA มากกว่า	จำนวนเฟรมโตะเซลล์ที่ Cap* ของ OSA น้อยกว่า	จำนวนเฟรมโตะเซลล์ที่มีได้ในระบบ
FSA, $W_m = 0.3$	1 - 123	124 - 295	295
FSA, $W_m = 0.5$	1 - 241	242 - 492	492
FSA, $W_m = 0.7$	1 - 275, 326 - 545	276-325, 546-689	689

หมายเหตุ

- *Cap คือ ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่ายรวม
- จำนวนเฟรมโตะเซลล์ที่มีได้ในระบบของวิธี OSA เท่ากับ 974 ตัว



รูปที่ 5.1 วิธีที่เหมาะสมหากยึดหลักการให้ได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของโครงข่ายรวมสูงสุดในแต่ละช่วงของจำนวนเฟรมโตะเซลล์จากการวิเคราะห์ที่นำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์



รูปที่ 5.2 วิธีที่เหมาะสมหากยึดหลักการให้ได้ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณทั้งหมดของโครงข่ายรวมสูงสุดในแต่ละช่วงของจำนวนเฟรมโตะเซลล์จากการวิเคราะห์การจำลองการทำงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อานำทฤษฎีเกมมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนสเปกตรัมที่เหมาะสมระหว่างแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์
2. อาจเพิ่มการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของจำนวนผู้ใช้งานในระบบที่ส่งผลถึงการจัดสรรสเปกตรัมระหว่างแมโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการนำไปใช้งาน



รายการอ้างอิง

1. Calin, D., H. Claussen, and H. Uzunalioglu, *On femto deployment architectures and macrocell offloading benefits in joint macro-femto deployments*. Communications Magazine, IEEE, 2010. 48(1): p. 26-32.
2. Lopez-Perez, D., et al., *OFDMA Femtocells: A Roadmap on Interference Avoidance*. Ieee Communications Magazine, 2009. 47(9): p. 41-48.
3. Haddad, Y. and D. Porrat. *A two-tier frequency reuse scheme*. in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on*. 2010.
4. Ju Yong, L., et al., *Interference Analysis for Femtocell Deployment in OFDMA Systems Based on Fractional Frequency Reuse*. Communications Letters, IEEE, 2011. 15(4): p. 425-427.
5. J. Zhang and G.d.l. Roche, *Femtocells: Technologies and Deployment*. 2010: John Wiley & Sons
6. Qualcomm. *Femtocells – How to get the most out of your network*. in *4GWorld*. 2011. Chicago.
7. *Femtocell*. [cited 2015 23/05]; Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell>.
8. Suzan Bayhan, G.G.a.F.A., *Cognitive Capabilities for Femtocell Networks: Cognitive Femtocells*, in *Cognitive Radio and its Application for Next Generation Cellular and Wireless Networks*, G.-M.M. Hrishikesh Venkataraman, Editor. 2012, Springer: Springer. p. 331 - 355.
9. Mingjie, F., et al. *Throughput improvement for OFDMA femtocell networks through spectrum allocation and access control strategy*. in *Computing, Communications and Applications Conference (ComComAp)*, 2012. 2012.
10. Chandrasekhar, V. and J.G. Andrews. *Spectrum allocation in two-tier networks*. in *Signals, Systems and Computers, 2008 42nd Asilomar Conference on*. 2008.

11. Erturk, M.C., et al. *Fair and QoS-Oriented Spectrum Splitting in Macrocell-Femtocell Networks*. in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 2010 IEEE. 2010.
12. Yanjiao, C., et al. *Optimal Pricing and Spectrum Allocation for Wireless Service Provider on Femtocell Deployment*. in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*. 2011.
13. Wang Chi, C., T.Q.S. Quek, and M. Kountouris, *Throughput Optimization, Spectrum Allocation, and Access Control in Two-Tier Femtocell Networks*. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2012. 30(3): p. 561-574.
14. R. Jain, D.C., and W. Hawe. *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. in *Digital Equipment Corporation*. 1984. Maynard, Massachusetts, USA.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่แล้ว

บทความทางวิชาการจากการประชุมวิชาการ The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 14 -17 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ที่ จังหวัด นครราชสีมา ประเทศไทย

- [1] Pantong, N. and W. Benjapolakul (2014). Throughput improvement and spectrum allocation in femtocell networks by pricing strategy. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference on.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัฐพงศ์ พานทอง เกิดเมื่อวันที่ 4 กันยายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเซนต์หลุยส์ ฉะเชิงเทรา และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2552 ต่อมาได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกรโทรคมนาคม ที่บริษัท MYCOM INTERNATIONAL THAILAND จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

