การประเมินผลเฉลยต่าง ๆ ของเกมในการควบคุมกำลังสำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง

นายกตัญญู วัฒนวิบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 Graduate School.

Evaluation of Game Solutions in Power Control for Downlink Cognitive Radio Networks

Mr.Katan Vattanaviboon

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 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินผลเฉลยต่าง ๆ ของเกมในการควบคุมกำลังสำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง
โดย	นายกตัญญ์ วัฒนวิบูลย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัศวกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ภัทรชาติ โกมลกิติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัศวกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ภัทรชาติ โกมลกิติ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ)

กตัญญู์ วัฒนวิบูลย์ : การประเมินผลเฉลยต่าง ๆ ของเกมในการควบคุมกำลังสำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง. (Evaluation of Game Solutions in Power Control for Downlink Cognitive Radio Networks) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. เชาวน์ดิศ อัศวกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. ภัทรชาติ โกมลกิติ, 47 หน้า.

การส่งสัญญาณในโครงข่ายไร้สาย หากเครื่องส่งสัญญาณใช้กำลังต่ำ สัญญาณที่เครื่องรับสัญญาณรับได้อาจถูกลดทอนโดยสัญญาณรบกวน ส่งผลให้ได้รับความจุของแชนนอนที่มีค่าต่ำ แต่หากใช้กำลังสูง กำลังของสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับสัญญาณอื่น ๆ ได้รับอาจมีค่าสูง ส่งผลให้เครื่องรับสัญญาณเหล่านั้นได้รับความจุของแชนนอนที่มีค่าต่ำเช่นกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้จัดการปัญหาดังกล่าวโดยการนำทฤษฎีเกมมาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สาย และได้ศึกษาถึงผลลัพธ์ในแง่ของความจุของแชนนอนและความยุติธรรมในโครงข่าย จากการนิยามผลประโยชน์ของเกมในสามรูปแบบ โดยได้วิเคราะห์โครงข่ายไร้สายที่ประกอบไปด้วยเครื่องส่งสัญญาณสองเครื่องซึ่งแต่ละเครื่องส่งสัญญาณให้กับเครื่องรับสัญญาณสองเครื่อง และสร้างแบบจำลองเกมเป็นเกมที่มีผู้เล่นสองคน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ซึ่งเป็นโครงข่ายไร้สายที่มีการแบ่งผู้ใช้งานเป็นสองประเภท คือ ผู้ใช้ปฐมภูมิซึ่งจะต้องได้รับคุณภาพการให้บริการไม่ต่ำกว่าค่าที่ต้องการเสมอ และผู้ใช้ทุติยภูมิซึ่งเข้ามาใช้งานในโครงข่ายโดยไม่ได้รับการรับประกันใด ๆ โดยได้สร้างแบบจำลองเกมในสามรูปแบบ คือ เกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ เกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ และเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน

การทดลองในวิทยานิพนธ์ได้แสดงการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลงด้วยวิธีที่เสนอไว้ และได้วิเคราะห์ถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผู้ใช้ การเปลี่ยนจำนวนของผู้ใช้ และการใช้การแบ่งเวลาในเกมที่มีการร่วมมือกัน รวมถึงแสดงการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายที่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วยเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน ซึ่งพบว่าในทุกกรณีของการทดลองการควบคุมกำลังที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถให้คุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิที่มีค่าไม่ต่ำไปกว่าค่าที่ผู้ใช้ปฐมภูมินั้นต้องการ

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อนิสิต**	.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**	.....
ปีการศึกษา	2556	**ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**	.....

5570101021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: COGNITIVE RADIO NETWORKS/ POWER CONTROL/ GAME THEORY/ PRIMARY USER/ SECONDARY USER.

KATAN VATTANAVIBOON : EVALUATION OF GAME SOLUTIONS IN POWER CONTROL FOR DOWNLINK COGNITIVE RADIO NETWORK-S. ADVISOR: ASST. PROF. CHAODIT ASWAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: PATRACHART KOMOLKITI, Ph.D., 47 pp.

In wireless networks, transmission power has adverse effects. With low transmission power, the received signal may be eclipsed by the noise and interference from other transmitters, resulting in low Shannon's capacity. On the other hand, with high transmission power, the interference seen at other receivers could be too large, also resulting in low Shannon's capacity. This thesis aims to address this problem by using the game theory. Three utility functions of the game are investigated, and the trade-off between capacity and fairness is analyzed. Considering the scenario of wireless access network with two transmitters, each with two intended receivers, selection of transmission power of the two transmitters is modeled as the two-person game.

This thesis proposes methods to control the transmission power in cognitive radio network, which is a wireless network with two classes of users. The first one is the primary user who always has his quality of service guaranteed. The second one is the secondary user who utilizes the network without anything guaranteed. Using game theory to control the transmission power, three game models are proposed. Those are a cooperative game that players cooperate for utility summation, a cooperative game that players cooperate for utility product, and a non-cooperative game.

The numerical results show how the proposed methods control the transmission power in downlink cognitive radio network. The effects caused by adjusting user's location, changing amount of the users, and using time-sharing in the cooperative game are analyzed. Moreover, power control using the non-cooperative game for more complicated network is also demonstrated. From the numerical results, the proposed power control methods are able to guarantee the quality of service of all primary users.

Department : Electrical Engineering	**Student's Signature** .....
Field of Study : Electrical Engineering	**Advisor's Signature** .....
Academic Year : 2013	**Co-advisor's Signature** .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เชาวน์ดิศ อัศวกุล และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ภัทรชาติ โกมลกิติ ซึ่งได้ให้ความรู้และคำแนะนำอันมีค่ายิ่งต่อผู้วิจัย อีกทั้งตรวจทานงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยโครงข่าย (Network Research Group, NRG) ซึ่งดูแลโดย ผศ.ดร.เชาวน์ดิศ อัศวกุล และ ผศ.ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร ที่จัดกิจกรรมเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และการทำงานของผู้วิจัยให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสะดวกราบรื่น

ขอขอบคุณ โครงการศิษย์ก้นกุฏิ ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนค่าเล่าเรียนและค่าใช้จ่ายรายเดือนตลอดการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย ซึ่งได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย . . . . . ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ . . . . . จ
กิตติกรรมประกาศ . . . . . ฉ
สารบัญ . . . . . ช
สารบัญตาราง . . . . . ฌ
สารบัญรูป . . . . . ญ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์ 2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์ 2
2 หลักการและทฤษฎี 4
2.1 ทฤษฎีเกมเบื้องต้น 4
2.2 โครงข่ายไร้สาย 4
2.3 โครงข่ายวิทยุรับรู้ 6
2.4 บทความที่เกี่ยวข้อง 7
3 การควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สายโดยใช้ทฤษฎีเกม 10
3.1 โครงข่ายที่พิจารณา 10
3.2 กำหนดนิยามของตัวแปร 11
3.3 แบบจำลองเกม 11
3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองเกม 12
3.5 ผลลัพธ์เชิงตัวเลข 14
3.5.1 การทดลองที่ 1 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าสูง 14
3.5.2 การทดลองที่ 2 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ 19
3.6 สรุป 20
4 การควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้โดยใช้ทฤษฎีเกม 21
4.1 หลักการควบคุมกำลังส่ง 21
4.2 กำหนดนิยามของตัวแปร 22
4.3 แบบจำลองเกมที่มีการร่วมมือกัน 23
4.3.1 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ 24
4.3.2 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ 24
4.4 แบบจำลองเกมที่มีการร่วมมือกันโดยมีการแบ่งเวลา 25
4.4.1 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ 26
4.4.2 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ 26

บทที่ หน้า

4.5 แบบจำลองเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน 26
4.6 สรุป 28
5 ผลลัพธ์เชิงตัวเลข 29
5.1 การทดลองที่ 1 ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของผู้ใช้ 29
5.2 การทดลองที่ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้ 34
5.2.1 โครงข่ายที่มีผู้ใช้ 2 คน 34
5.2.2 โครงข่ายที่มีผู้ใช้ 3 คน 36
5.3 การทดลองที่ 3 ผลของการแบ่งเวลาในเกมที่มีการร่วมมือกัน 38
5.4 การทดลองที่ 4 โครงข่ายที่มีความซับซ้อนมากขึ้น 41
5.5 สรุป 42
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 43
6.1 บทสรุป 43
6.2 ข้อเสนอแนะ 44
รายการอ้างอิง 45
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 47

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการทดลองที่ 1 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าสูง . . . 15
ตารางที่ 3.2 ดัชนีความยุติธรรมและความจุรวมของโครงข่ายของการทดลองที่ 1 18
ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการทดลองที่ 2 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ . . . 19
ตารางที่ 5.1 ผลของการแบ่งเวลา ในกรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ . . . 39
ตารางที่ 5.2 ผลของการแบ่งเวลา ในกรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ . . . 39
ตารางที่ 5.3 กำลังส่งที่เหมาะสมและความจุของแชนนอนที่ได้รับ ในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 6 คน . . 41

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างเขตผลประโยชน์และขอบพาเรโตในเกมที่มีผู้เล่นสองคน 5
รูปที่ 2.2 โครงข่ายไร้สายที่ประกอบด้วยเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ 3 คู่ 6
รูปที่ 3.1 โครงข่ายที่มีเครื่องส่ง 2 เครื่องโดยแต่ละเครื่องส่งสัญญาณให้กับเครื่องรับ 2 เครื่อง . 10
รูปที่ 3.2 กลไลการแบ่งเวลา 13
รูปที่ 3.3 โครงข่ายไร้สายสำหรับการทดลอง 15
รูปที่ 3.4 เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเลขคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง . 16
รูปที่ 3.5 เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง 16
รูปที่ 3.6 เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าต่ำสุด โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง 16
รูปที่ 3.7 เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเลขคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง . . 17
รูปที่ 3.8 เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง . . 17
รูปที่ 3.9 เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าต่ำสุด โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง 17
รูปที่ 3.10 เกมที่มีไม่การร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนต่ำ 19
รูปที่ 3.11 เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนต่ำ . . 20
รูปที่ 4.1 โครงข่ายวิทยุรับรู้ที่มีคู่ส่งรับสัญญาณปฐมภูมิ 1 คู่ และคู่ส่งรับสัญญาณทุติยภูมิ 2 คู่ 22
รูปที่ 4.2 กลไกการแบ่งเวลา 25
รูปที่ 5.1 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 1 ซึ่งมีการเปลี่ยนตำแหน่งของผู้ใช้ทั้งสอง 29
รูปที่ 5.2 กำลังส่งที่เหมาะสมในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ 30
รูปที่ 5.3 ความจุของแชนนอนในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ 31
รูปที่ 5.4 กำลังส่งที่เหมาะสมในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ 32
รูปที่ 5.5 ความจุของแชนนอนในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ 32
รูปที่ 5.6 กำลังส่งที่เหมาะสมในเกมที่ผู้เล่นไม่มีการร่วมมือกัน 33
รูปที่ 5.7 ความจุของแชนนอนในเกมที่ผู้เล่นไม่มีการร่วมมือกัน 33
รูปที่ 5.8 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 2 ซึ่งมีผู้ใช้ 2 คน 34
รูปที่ 5.9 กำลังส่งที่เหมาะสมในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 2 คน 35
รูปที่ 5.10 ความจุของแชนนอนที่ได้รับในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 2 คน 35
รูปที่ 5.11 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 2 ซึ่งมีผู้ใช้ 3 คน 36
รูปที่ 5.12 กำลังส่งที่เหมาะสมในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 3 คน 37
รูปที่ 5.13 ความจุของแชนนอนที่ได้รับในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 3 คน 37
รูปที่ 5.14 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 3 ซึ่งมีผู้ใช้ทุติยภูมิ 2 คน 38
รูปที่ 5.15 เขตผลประโยชน์และจุดเหมาะสมทั้งสองของการทดลองที่ 3 ที่ไม่มีการแบ่งเวลา . . . 40
รูปที่ 5.16 เขตผลประโยชน์และจุดเหมาะสมทั้งสองของการทดลองที่ 3 ที่มีการแบ่งเวลา 40
รูปที่ 5.17 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 4 ซึ่งมีผู้ใช้ปฐมภูมิ 2 คนและผู้ใช้ทุติยภูมิ 4 คน 41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สมรรถนะของโครงข่ายไร้สายถูกจำกัดโดยความจุของช่องสัญญาณ จากสมการความจุของแชนนอน เราเห็นได้ว่าตัวแปรที่ทำให้เกิดข้อจำกัดดังกล่าวคือ แบนด์วิดท์หรือสเปกตรัม และกำลัง แบนด์วิดท์ถูกจำกัดโดยช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบสื่อสารซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกำกัด หากเป็นช่วงความถี่ที่ขึ้นทะเบียน (registered) อาจมีราคาแพงมาก หรือถ้าเป็นช่วงความถี่ที่ไม่มีการขึ้นทะเบียน (unregistered) อาจมีผู้ใช้งานหนาแน่น ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และส่งผลให้ความจุที่ผู้ใช้งานได้รับมีค่าต่ำ ส่วนกำลังหมายถึงกำลังที่เครื่องส่งสัญญาณในโครงข่ายใช้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งถูกจำกัดโดยกฎหมายข้อบังคับและแหล่งพลังงาน ทั้งนี้กำลังส่งจำเป็นต้องมากพอที่จะฝ่าสัญญาณรบกวนต่าง ๆ จนไปถึงเครื่องรับสัญญาณ และให้ความจุที่เพียงพอ แต่ค่ากำลังส่งที่เหมาะสมอาจไม่ใช่ค่ากำลังส่งสูงสุดที่เครื่องส่งสัญญาณสามารถส่งได้ เนื่องจากกำลังส่งที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่มีกำลังสูงกับเครื่องรับสัญญาณเครื่องอื่น ๆ ข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้ทฤษฎีเกมเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา เนื่องจากทฤษฎีเกมเป็นทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่มีความสามารถในการจัดการกับฟังก์ชันข้อจำกัดหลาย ๆ ฟังก์ชันให้เกิดความเหมาะสม

ด้วยความสามารถดังกล่าวของทฤษฎีเกม นักวิจัยหลายท่านจึงนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เช่น ใน [1] มีการวิเคราะห์ช่องสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนแบบจางสม่ำเสมอทุกความถี่ (flat-fading Gaussian interference channel) ด้วยเกมที่มีผู้เล่นสองคน ใน [2] ได้นำทฤษฎีเกมมาประยุกต์ใช้กับโครงข่ายโครงข่าย CDMA ฝั่งขาขึ้นเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองเกมที่ไม่มีการร่วมมือกันโดยมีผู้เล่นจำนวน N คน ใน [3] ทฤษฎีเกมถูกนำมาประยุกต์เพื่อหากำลังส่งที่เหมาะสมซึ่งทำให้อัตราส่วนระหว่างอัตราบิตต่อกำลังที่ใช้มีค่าสูงสุด การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมกับการเข้าถึงสื่อกลางร่วม (multiple access) ของโครงข่ายไร้สายถูกสรุปไว้ใน [4]

สำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ (cognitive radio network) มีความแตกต่างจากโครงข่ายไร้สายทั่วไป เนื่องจากมีการแบ่งผู้ใช้ (user) เป็นสองประเภทคือผู้ใช้ปฐมภูมิ (primary user) และผู้ใช้ทุติยภูมิ (secondary user) โดยผู้ใช้ปฐมภูมิเป็นผู้ใช้ที่ได้รับใบอนุญาตให้ใช้ช่องสัญญาณ และมีสิทธิ์ได้รับการรับประกันคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำ ส่วนผู้ใช้ทุติยภูมิคือผู้ใช้ที่มิได้มีใบอนุญาตสำหรับช่องสัญญาณ แต่โครงข่ายวิทยุรับรู้จะยอมให้ผู้ใช้ดังกล่าวเข้ามาใช้งานในช่องสัญญาณได้ หากการใช้งานของผู้ใช้ทุติยภูมิไม่กระทบต่อคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำของผู้ใช้ปฐมภูมิ จากการยอมให้ผู้ใช้ทุติยภูมิเข้ามาใช้งานในช่องสัญญาณของโครงข่ายวิทยุรับรู้ ทำให้โครงข่ายชนิดนี้สามารถใช้ประโยชน์จากช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อเปิดโอกาสให้ผู้ใช้ทุติยภูมิเข้ามาใช้งานได้ แต่มิให้ผู้ใช้ทุติยภูมิสร้างสัญญาณรบกวนในโครงข่ายมากจนทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับคุณภาพการให้บริการต่ำกว่าคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำ กำลังส่งของเครื่องส่งสัญญาณของผู้ใช้ต่าง ๆ ในโครงข่ายจะต้องถูกควบคุมอย่างเหมาะสม

เราสามารถวิเคราะห์ปัญหาข้อจำกัดต่าง ๆ ข้างต้น แล้วเปลี่ยนปัญหาเหล่านั้น ให้มาอยู่ในรูปของเกม เพื่อที่จะวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเกมและหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

เพื่อใช้ทฤษฎีเกมควบคุมกำลังส่งของเครื่องส่งสัญญาณในโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง โดยสามารถรับรองค่าความจุของแชนนอนขั้นต่ำให้แก่ผู้ใช้ปฐมภูมิ และให้ผู้ใช้ทุติยภูมิสามารถใช้ประโยชน์จากโครงข่ายเพื่อให้ความจุรวมของโครงข่ายมีค่าสูง

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาโครงข่ายที่เครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ ส่งและรับสัญญาณกันเป็นคู่ ๆ (transmission pair)
2. การส่งสัญญาณในโครงข่ายเป็นการรับส่งแบบช่องทางเดียว (SISO)
3. พิจารณาเฉพาะฝั่งขาลง จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับสัญญาณ
4. การส่งสัญญาณในโครงข่าย จะส่งผ่านช่องสัญญาณเกาส์เซียน
5. การส่งสัญญาณในโครงข่าย จะใช้ช่องสัญญาณเดียวร่วมกันทั้งโครงข่าย
6. คุณภาพการให้บริการขึ้นอยู่กับความจุของแชนนอน และค่า SINR
7. ไม่มีการเคลื่อนที่ภายในโครงข่าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถควบคุมกำลังส่งของเครื่องส่งสัญญาณในโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง โดยมีการรับรองค่าความจุของแชนนอนขั้นต่ำให้แก่ผู้ใช้ปฐมภูมิ และให้ผู้ใช้ทุติยภูมิสามารถใช้ประโยชน์จากโครงข่ายเพื่อให้ความจุรวมของโครงข่ายมีค่าสูง

1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึง ความสำคัญของการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สาย ความสอดคล้องกับทฤษฎีเกม และลักษณะของโครงข่ายวิทยุรับรู้

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี: กล่าวถึง ทฤษฎีเกมเบื้องต้น การส่งสัญญาณและการรบกวนในโครงข่ายไร้สาย หลักการควบคุมกำลังส่งสำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ และวิธีการควบคุมกำลังส่งสำหรับโครงข่ายไร้สายและโครงข่ายวิทยุรับรู้ของงานวิจัยในอดีต

บทที่ 3 การควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สายโดยใช้ทฤษฎีเกม: กล่าวถึง วิธีการนำทฤษฎีเกมมาประยุกต์ใช้ควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สาย และวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น รวมถึงวิเคราะห์ถึงผลเกี่ยวกับค่าความจุของโครงข่ายและความยุติธรรมต่อผู้ใช้ในโครงข่าย ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเกมเป็นแบบต่าง ๆ ด้วย

บทที่ 4 การควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้โดยใช้ทฤษฎีเกม: กล่าวถึง วิธีการนำทฤษฎีเกมมาประยุกต์ใช้ควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ ทั้งกรณีที่ใช้เกมที่มีการร่วมมือกันและกรณีที่ใช้เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน

บทที่ 5 ผลลัพธ์เชิงตัวเลข: แสดงผลการทดสอบการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ด้วยทฤษฎีเกม

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: สรุปงานวิจัยทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกมเบื้องต้น

เกม ตามทฤษฎีเกม สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\boldsymbol{G} = (\{1, \ldots, N\}, \mathcal{S}, \{u_1, \ldots, u_N\}) \tag{2.1}$$

โดยมีองค์ประกอบอยู่ 3 ประการคือ [1]

1. ผู้เล่น (player) คือผู้ตัดสินใจในเกมโดย $\{1, \ldots, N\}$ แทนเซตของผู้เล่นที่ 1 ถึงผู้เล่นที่ N

2. กลยุทธ์ (strategy) คือกลยุทธ์หรือวิธีการที่ผู้เล่นสามารถเลือกใช้ได้ โดย $\mathcal{S}$ แทนปริภูมิกลยุทธ์ (strategy space) หรือเซตของกลยุทธ์ของผู้เล่นทั้งหมด มีค่าเป็น $S_1 \times S_2 \times \cdots \times S_N \in \mathrm{R}^N$ เมื่อ S_i โดย $i \in \{1, \ldots, N\}$ เป็นเซตของกลยุทธ์ที่ผู้เล่น i สามารถเลือกใช้ได้

3. ผลประโยชน์ (utility) หรือผลตอบแทน (payoff) คือผลที่ผู้เล่นได้รับ ซึ่งผู้เล่นจะพยายามเลือกกลยุทธ์ที่ทำให้ค่าดังกล่าวมีค่าสูงที่สุด โดย $\{u_1, \ldots, u_N\}$ แทนเซตของผลประโยชน์สำหรับผู้เล่นที่ 1 ถึงผู้เล่นที่ N

โดยทฤษฎีเกมมีคำศัพท์สำคัญดังนี้

เขตผลประโยชน์ (utility region) คือบริเวณที่เกิดจากเซตของผลประโยชน์ทั้งหมดที่เป็นไปได้จากการเลือกกลยุทธ์ใด ๆ ของผู้เล่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

จุดเหมาะสมแบบพาเรโต (Pareto optimum) คือ จุดทำงานที่เป็นไปได้บนขอบของเขตผลประโยชน์ที่มีสมบัติว่า หากต้องการเพิ่มผลประโยชน์ของผู้เล่นคนใดคนหนึ่ง จะทำให้มีผู้เล่นอื่นต้องเสียผลประโยชน์ไป โดยขอบของเขตผลประโยชน์ที่มีสมบัติเป็นจุดเหมาะสมแบบพาเรโตเรียกว่าขอบพาเรโต (Pareto boundary) ดังแสดงไว้เป็นเส้นหนาในรูปที่ 2.1

จุดสมดุลของแนช (Nash equilibrium) คือ จุดทำงานที่เป็นไปได้ซึ่งอยู่ในเขตผลประโยชน์ที่มีสมบัติว่า ไม่มีผู้เล่นใดสามารถเพิ่มผลประโยชน์ให้แก่ตนเอง จากการเปลี่ยนกลยุทธ์ของตนเพียงผู้เดียว โดยผู้เล่นอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์

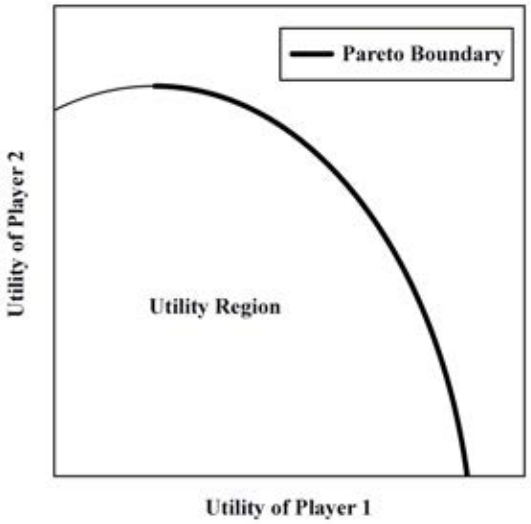
เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน (non-cooperative game) คือเกมที่ผู้เล่นแต่ละคนพยายามเลือกกลยุทธ์เพื่อเพิ่มผลประโยชน์ของตนเอง โดยไม่สนใจผลประโยชน์ของผู้เล่นอื่น

เกมที่มีการร่วมมือกัน (cooperative game) คือเกมที่ผู้เล่นแต่ละคนตกลงเลือกกลยุทธ์ร่วมกันเพื่อให้ค่าผลประโยชน์โดยรวมของเกมสูงที่สุด

ทฤษฎีการต่อรองของแนช (Nash bargaining theory) เป็นทฤษฎีเพื่อหาผลการต่อรอง (bargaining solution) ระหว่างผู้เล่นในเกมที่มีการร่วมมือกัน

2.2 โครงข่ายไร้สาย

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในโครงข่ายไร้สาย หากเครื่องส่งสัญญาณส่งสัญญาณด้วยกำลังที่ต่ำเกินไปจะส่งผลให้คุณภาพการให้บริการที่เครื่องรับได้รับจะมีค่าต่ำ แต่หากเครื่องส่งส่งด้วยกำลังสูงเกินไป จะทำให้เครื่องรับอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการรับสัญญาณนั้นถูกรบกวน และส่งผลให้เครื่องรับสัญญาณเหล่านั้น



รูปที่ 2.1: ตัวอย่างเขตผลประโยชน์และขอบพาเรโตในเกมที่มีผู้เล่นสองคน

ได้รับคุณภาพการให้บริการที่ต่ำลง สำหรับโครงข่ายไร้สาย ตัวแปรหลักที่ใช้วัดคุณภาพการให้บริการก็คือค่าความจุของแชนนอนที่มีค่าเป็น $\log_2(1 + \mathrm{SINR})$ เมื่อ SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณข้อมูลที่ได้รับต่อกำลังของสัญญาณรบกวนรวมที่ได้รับ ซึ่งเห็นได้ว่าคุณภาพการให้บริการจะแปรเป็นสัดส่วนไปทางเดียวกับค่า SINR

พิจารณาโครงข่ายที่ประกอบไปด้วยเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ 3 คู่ ที่ส่งและรับสัญญาณในช่องสัญญาณเกาส์เซียนดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีเส้นทึบแสดงช่องสัญญาณข้อมูลและเส้นประแสดงช่องสัญญาณรบกวนพบว่า สัญญาณที่เครื่องรับสัญญาณแต่ละเครื่องได้รับเป็นไปตามสมการ [1]

$$\begin{aligned} y_1[k] &= h_{11}x_1[k] + h_{21}x_2[k] + h_{31}x_3[k] + e_1[k] \\ y_2[k] &= h_{12}x_1[k] + h_{22}x_2[k] + h_{32}x_3[k] + e_2[k] \\ y_3[k] &= h_{13}x_1[k] + h_{23}x_2[k] + h_{33}x_3[k] + e_3[k] \end{aligned} \tag{2.2}$$

เมื่อ k คือดัชนีแสดงเวลา

$y_i[k]$ โดย $i \in \{1,2,3\}$ คือสัญญาณที่เครื่องรับ i ได้รับ ณ ดัชนีเวลา k

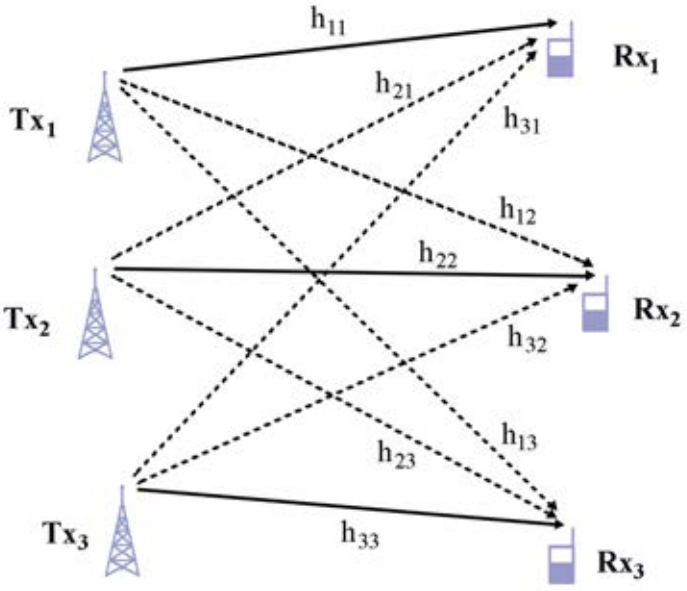
$x_i[k]$ คือสัญญาณที่ถูกส่งออกจากเครื่องส่ง i ณ ดัชนีเวลา k

h_{ji} โดย $i,j \in \{1,2,3\}$ คือสถานะช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่ง j และเครื่องรับ i

$e_i[k]$ คือค่าสุ่มจากสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนเป็น σ^2 ณ ดัชนีเวลา k

จากสัญญาณที่เครื่องรับต่าง ๆ ได้รับในสมการ (2.2) สามารถนำมาเขียนเป็นค่า SINR ที่เครื่องรับแต่ละเครื่องได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{p_1 g_{11}}{p_2 g_{21} + p_3 g_{31} + \sigma^2} \\ \gamma_2 &= \frac{p_2 g_{22}}{p_1 g_{12} + p_3 g_{32} + \sigma^2} \\ \gamma_3 &= \frac{p_3 g_{33}}{p_1 g_{13} + p_2 g_{23} + \sigma^2} \end{aligned} \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.2: โครงข่ายไร้สายที่ประกอบด้วยเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ 3 คู่

เมื่อ γ_i คือค่า SINR ที่เครื่องรับ i

p_i โดย $0 \leq p_i \leq p_i^{\max}$ คือค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง i เมื่อ $p_i^{\max}$ เป็นค่ากำลังส่งสูงสุดของเครื่องส่ง i

g_{ji} คือค่าการลดทอนของช่องสัญญาณ (channel attenuation) หรืออัตราขยาย (gain) ของช่องสัญญาณจากเครื่องส่ง j ไปยังเครื่องรับ i มีค่าเป็น $g_{ji} = |h_{ji}|^2$

σ^2 คือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียน

ดังนั้นความจุของแชนนอนของเครื่องรับ i ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพการให้บริการที่เครื่องรับ i ได้รับจึงมีค่าเป็น

$$c_i = \log_2(1 + \gamma_i) \tag{2.4}$$

จากสมการ (2.3) และ (2.4) จะเห็นได้ว่าหากเครื่องส่งอื่น ๆ ที่ไม่ได้เป็นคู่รับส่งกับเครื่องรับ ส่งสัญญาณมาด้วยกำลังสูง จะทำให้สัญญาณที่ส่งมา เป็นสัญญาณรบกวนและส่งผลให้ SINR ที่เครื่องรับดังกล่าวมีค่าต่ำลงและทำให้คุณภาพการให้บริการที่ได้รับต่ำลงด้วย

2.3 โครงข่ายวิทยุรับรู้

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โครงข่ายวิทยุรับรู้มีการแบ่งผู้ใช้เป็นสองประเภทคือผู้ใช้ปฐมภูมิ (primary user) และผู้ใช้ทุติยภูมิ (secondary user) โดยผู้ใช้ปฐมภูมิเป็นผู้ใช้ที่ได้รับใบอนุญาตให้ใช้ช่องสัญญาณ และมีสิทธิ์ได้รับการรับประกันคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำ ส่วนผู้ใช้ทุติยภูมิคือผู้ใช้ที่มิได้มีใบอนุญาตสำหรับช่องสัญญาณ แต่โครงข่ายวิทยุรับรู้จะยอมให้ผู้ใช้ดังกล่าวเข้ามาใช้งานในช่องสัญญาณได้ แต่ต้องไม่กระทบต่อคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำของผู้ใช้ปฐมภูมิ

งานวิจัย [5] ได้นำเสนอหลักการในการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ที่น่าสนใจ นั่นคือหลักการ DPCPC (Duo Priority Class Power Control) ซึ่งหลักการดังกล่าวประกอบด้วยสัจพจน์ 3 ข้อ คือ

1. กำลังส่งในสถานะอยู่ตัวเป็นไปตามอสมการ

$$\begin{aligned} \partial p_i/\partial I_{-i} > 0 : i \in \mathrm{P} \\ \partial p_i/\partial I_{-i} < 0 : i \in \mathrm{S} \end{aligned} \tag{2.5}$$

2. คุณภาพการให้บริการเป้าหมายของผู้ใช้เป็นไปตามอสมการ

$$\begin{aligned} \partial \gamma_i^{\mathrm{tar}}/\partial I_{-i} < 0 : i \in \mathrm{S} \\ \partial \gamma_i^{\mathrm{tar}}/\partial I_{-i} = 0 : i \in \mathrm{P} \end{aligned} \tag{2.6}$$

3. การเข้ามาของผู้ใช้ทุติยภูมิจะต้องไม่ทำให้เกิด

$$\gamma_i < \gamma_i^{\mathrm{tar}} : i \in \mathrm{P} \tag{2.7}$$

เมื่อ p_i คือกำลังส่งของเครื่องส่งของผู้ใช้ i
I_{-i} คือกำลังของสัญญาณรบกวนรวมที่เครื่องรับของผู้ใช้ i ได้รับ
γ_i^{tar} คือค่า SINR เป้าหมายของผู้ใช้ i
γ_i คือค่า SINR ของผู้ใช้ i
P คือเซตของผู้ใช้ปฐมภูมิ
S คือเซตของผู้ใช้ทุติยภูมิ

สัจพจน์ข้อแรกมีความหมายว่า กำลังส่งของผู้ใช้ปฐมภูมิจะแปรไปทางเดียวกับกำลังของสัญญาณรบกวนที่ผู้ใช้นั้นได้รับ หากได้รับสัญญาณรบกวนที่มีกำลังสูง ผู้ใช้ปฐมภูมิจะส่งสัญญาณด้วยกำลังที่สูงขึ้น และกำลังสัญญาณรบกวนที่ได้รับมีค่าต่ำลง ก็จะลดค่ากำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ในขณะที่กำลังส่งของผู้ใช้ทุติยภูมิจะแปรในทางกลับกันกับกำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้รับ นั่นคือ หากผู้ใช้ทุติยภูมิได้รับสัญญาณรบกวนมาก ผู้ใช้ทุติยภูมิจะลดค่ากำลังส่งลง แต่ได้รับสัญญาณรบกวนน้อย ผู้ใช้ทุติยภูมิจะใช้ค่ากำลังที่สูงขึ้น สัจพจน์ข้อสองมีส่วนสำคัญในการควบคุมกำลังส่งของโครงข่ายวิทยุรับรู้ โดยมีใจความว่า SINR เป้าหมายของผู้ใช้ปฐมภูมิจะไม่ขึ้นกับกำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้รับ นั่นคือไม่ว่าสัญญาณรบกวนในโครงข่ายจะมากน้อยเพียงใด ผู้ใช้ปฐมภูมิก็ควรได้รับ SINR ที่ต้องการ ซึ่งเป็นการรับรองคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำสำหรับผู้ใช้ปฐมภูมินั่นเอง ในขณะที่ SINR เป้าหมายของผู้ใช้ทุติยภูมิ แปรในทางกลับกันกับกำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้รับซึ่งสอดคล้องกับสัจพจน์ข้อแรก ส่วนสัจพจน์ข้อสามเป็นการป้องกันไม่ให้การเข้ามาของผู้ใช้ทุติยภูมิส่งผลให้ผู้ใช้ปฐมภูมิไม่ได้รับคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำ

จากปัญหาข้อจำกัดต่าง ๆ ข้างต้น เราสามารถวิเคราะห์แล้วเปลี่ยนปัญหาเหล่านั้น ให้มาอยู่ในรูปของเกม โดยการกำหนดผู้เล่น กลยุทธ์ และผลประโยชน์ เพื่อที่จะวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเกมและหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมต่อไปได้

2.4 บทความที่เกี่ยวข้อง

ใน [5] ได้มีการนำเสนอหลักการ DPCPC (Duo Priority Class Power Control) เพื่อควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ ให้ผู้ใช้แต่ละคนได้รับ SINR ที่ต้องการ โดยความต้องการ SINR ของผู้ใช้ปฐมภูมิมีค่าคงที่ ในขณะที่ความต้องการ SINR ของผู้ใช้ทุติยภูมิจะแปรในทางกลับกันกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวนรวมที่ผู้ใช้นั้นได้รับ

บทความที่ใช้ทฤษฎีเกมในการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สาย ที่มีเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณจับกันเป็นคู่ ๆ (transmission pairs) เช่น [6]-[9] จะกำหนดให้ผู้ใช้ (user) หรือคู่ (pair) ส่งรับสัญญาณ เป็นผู้เล่นในเกม โดย [6] ใช้เกมการตั้งราคา (pricing game) ในการควบคุมกำลังส่งของโครงข่ายแอดฮอกไร้สาย (wireless ad hoc network) เพื่อให้คุณภาพการให้บริการรวมของโครงข่ายสูงสุด โดยมีขั้นตอนวิธีคือ ให้ผู้ใช้ประกาศราคาซึ่งสอดคล้องกับระดับสัญญาณรบกวนที่ผู้ใช้นั้น ๆ ได้รับ แล้วจึงปรับกำลังส่งเพื่อให้ได้ค่าผลประโยชน์มากที่สุด โดยพบว่าในบางกรณี ขั้นตอนวิธีดังกล่าวสามารถทำให้เกมลู่เข้าสู่สมดุล และได้ผลลัพธ์เป็นการแบ่งกำลังที่เหมาะสม ส่วน [7] อาศัยทฤษฎีการต่อรองของแนชในการควบคุมกำลังส่ง เพื่อให้เครื่องส่งส่งสัญญาณด้วยกำลังค่าต่ำสุดที่ยังคงให้ SINR ที่ต้องการ ในเกมที่มีการร่วมมือกัน ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิ โดยพบว่าเขตกำลัง (power region) หรือเซตของกำลังส่งที่สามารถให้ค่า SINR ที่ไม่ต่ำกว่าค่า SINR ขั้นต่ำสำหรับผู้ใช้แต่ละคน มีสมบัติเป็นคอนเวกซ์และมีจุดที่ผู้ใช้แต่ละคนใช้กำลังส่งต่ำที่สุด ซึ่งหาได้จากผลการต่อรองของแนช (Nash bargaining solution) ใน [8] ได้เสนอวิธีควบคุมกำลังส่งของผู้ใช้ทุติยภูมิในโครงข่ายวิทยุรับรู้แบบกระจายด้วยเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน โดยการกำหนดให้ฟังก์ชันผลประโยชน์เป็นค่าลบของผลรวมของสัญญาณรบกวนร่วมช่องสัญญาณ เพื่อลดสัญญาณรบกวนในโครงข่าย และได้พิสูจน์ว่าเกมมีจุดสมดุลของแนชที่มีสมบัติเป็นจุดที่มีผลประโยชน์รวมสูงสุดด้วยเกมศักย์ (potential game) ซึ่งเกมสามารถลู่เข้าสู่จุดสมดุลของแนชได้จากการที่ผู้เล่นแต่ละคนเลือกกลยุทธ์ด้วยการตอบสนองที่ดีที่สุด (best response) หรือการตอบสนองที่ดีกว่า (better response) ส่วน [9] ใช้เกมแบบเบย์ (Bayesian game) สำหรับการควบคุมกำลังส่งของผู้ใช้ทุติยภูมิในโครงข่ายวิทยุรับรู้แบบกระจาย เพื่อประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในโครงข่ายแบบกระจาย และให้ผลลัพท์เป็นจุดสมดุลแบบเบย์ (Bayesian equilibrium) ที่ให้คุณภาพการให้บริการกับผู้ใช้ทุติยภูมิไม่ต่ำไปจากโครงข่ายแบบรวมศูนย์มากนัก

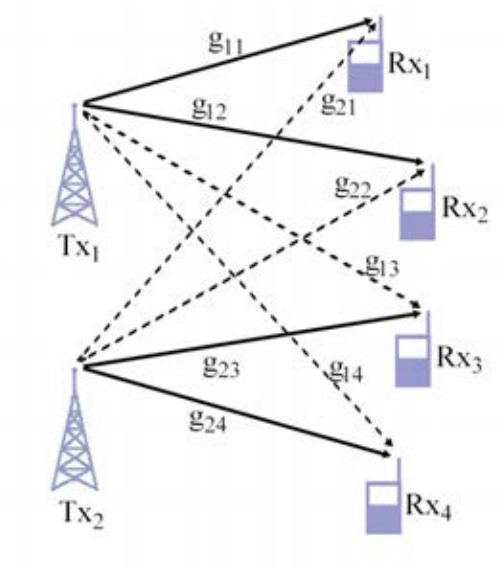
สำหรับโครงข่ายไร้สายแบบเซลล์ (cellular wireless network) ที่มีการแบ่งพื้นที่เป็นเซลล์ โดยแต่ละเซลล์จะมีเครื่องส่งหนึ่งเครื่องที่เรียกว่าสถานีฐาน (base station) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้กับเครื่องรับหลาย ๆ เครื่องภายในเซลล์ การใช้ทฤษฎีเกมในการควบคุมกำลังส่งจะกำหนดให้สถานีฐานหรือเซลล์เป็นผู้เล่น ดังใน [10]-[12] โดย [10] พิจารณาการส่งสัญญาณของสถานีฐานซึ่งส่งสัญญาณให้กับทั้งผู้ใช้ปฐมภูมิและผู้ใช้ทุติยภูมิภายในเซลล์ และได้เสนอวิธีการควบคุมกำลังที่ส่งให้กับผู้ใช้ทุติยภูมิ ด้วยการใช้เกมการตั้งราคาร่วมกับเกมสแตกเกลเบิร์ก (Stackelberg game) โดยกำหนดให้มีผู้เล่นสองประเภทภายในเกม คือ สถานีฐานและผู้ใช้ทุติยภูมิ ซึ่งมีฟังก์ชันผลประโยชน์ที่แตกต่างกัน โดยสถานีฐานมีค่าผลประโยชน์เป็นผลรวมของผลคูณระหว่างราคาหน่วย (unit-price) และ SINR ของผู้ใช้แต่ละคนที่ใช้งานสถานีฐานนั้น ๆ ลบด้วยผลรวมของกำลังส่งที่สถานีฐานแบ่งให้แก่ผู้ใช้ภายในเซลล์ ส่วนผลประโยชน์ของผู้ใช้มีค่าเป็นอัตราข้อมูลที่ผู้ใช้นั้น ๆ ได้รับ ลบด้วยผลคูณระหว่างราคาหน่วยและ SINR ของผู้ใช้นั้น ๆ สำหรับขั้นตอนวิธีในการหาผลลัพธ์ของเกม สามารถทำได้โดยการแบ่งเกมเป็นสองระยะ (two stages) ระยะแรกสถานีฐานจะกำหนดราคาต่อหน่วยสำหรับค่า SINR ให้กับผู้ใช้ทุติยภูมิแต่ละคนภายในเซลล์ และระยะที่สองผู้ใช้ทุติยภูมิจะเลือกค่า SINR ที่ต้องการโดยทราบราคาต่อหน่วยที่สถานีฐานกำหนดไว้ เกมจะลู่เข้าสู่สมดุลของแนช ทั้งนี้เงื่อนไขหลักในการแบ่งกำลังของสถานีฐานคือ กำลังของสัญญาณรบกวนที่ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับจะต้องมีค่าไม่เกินค่าขีดแบ่ง (threshold) ค่าหนึ่ง ใน [11] ได้นำเสนอการควบคุมกำลังในโครงข่าย OFDMA แบบเซลล์ด้วยเกมศักย์โดยกำหนดให้ฟังก์ชันผลประโยชน์ เป็นค่าลบของผลรวมของสัญญาณรบกวนร่วมช่องสัญญาณคล้ายกับ [8] และเกมสามารถลู่เข้าสมดุลของแนชด้วยด้วยการตอบสนองที่ดีที่สุดหรือด้วยการตอบสนองที่ดีกว่าของผู้เล่น ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ของการควบคุมกำลังด้วยวิธีนี้สามารถให้ความ

ยุติธรรมในหมู่ผู้ใช้ โดยเฉพาะในขณะที่ระบบถูกใช้งานหนัก นอกจากนั้น แม้การควบคุมกำลังด้วยวิธีดังกล่าวไม่ได้มีปริมาณงาน (throughput) เป็นเป้าหมายหลัก แต่ยังคงให้ปริมาณงานที่น่าพอใจ ส่วน [12] แบ่งสถานีฐานออกเป็นเครื่องส่งย่อยตามช่องสัญญาณ และกำหนดฟังก์ชันผลประโยชน์คล้ายกับใน [11] สำหรับผู้ใช้ทุติยภูมิในโครงข่ายวิทยุรับรู้ แต่ได้เพิ่มพจน์ของกำลังสัญญาณข้อมูลที่รับได้และพจน์ที่ป้องกันมิให้กำลังสัญญาณรบกวนรวมที่ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับ มีค่ามากเกินข้าขีดแบ่งค่าหนึ่ง และในทำนองเดียวกัน ได้ใช้เกมศักย์ (potential game) เพื่อยืนยันถึงการมีอยู่ของจุดสมดุลของแนช อีกทั้งยืนยันได้ว่าจุดสมดุลของแนชให้ผลประโยชน์รวมสูงสุด และเกมสามารถไปถึงจุดดังกล่าวได้ด้วยการตอบสนองที่ดีที่สุดหรือด้วยการตอบสนองที่ดีกว่าของผู้เล่น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการควบคุมกำลังด้วยวิธีนี้ ประหยัดพลังงานกว่าและสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้ทุติยภูมิได้มากกว่าการควบคุมกำลังแบบรวมศูนย์ ใน [13] ได้มีการพิจารณาโครงข่ายลักษณะเดียวกับใน [12] และได้นำเสนอแผนการ DIGA (dynamic interference graph allocation) ซึ่งใช้ทฤษฎีกราฟเพื่อควบคุมกำลังส่ง โดยมีเป้าหมายให้โครงข่ายรองรับผู้ใช้ทุติยภูมิได้มากที่สุด นั่นคือได้รับ SINR ไม่ต่ำกว่า SINR ขั้นต่ำ โดยที่กำลังของสัญญาณรบกวนรวม ณ ผู้ใช้ปฐมภูมิใด ๆ ในแต่ละช่องสัญญาณมีค่าไม่เกินค่าขีดแบ่ง ส่วน [14] นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังในเซลล์เซลล์หนึ่งของโครงข่ายวิทยุรับรู้ โดยมีการจัดสรรเวลาให้กับผู้ใช้ทุติยภูมิ เพื่อให้ได้ปริมาณงานรวมสูงสุด บนเงื่อนที่ว่าค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณรบกวนรวมที่ผู้ใช้ปฐมภูมิตลอดทุกช่องสัญญาณต้องไม่เกินค่าแบ่งขีด

บทที่ 3

การควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สายโดยใช้ทฤษฎีเกม

3.1 โครงข่ายที่พิจารณา



รูปที่ 3.1: โครงข่ายที่มีเครื่องส่ง 2 เครื่องโดยแต่ละเครื่องส่งสัญญาณให้กับเครื่องรับ 2 เครื่อง

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำทฤษฎีเกมมาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สาย เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้รูปแบบของเกมส์ที่แตกต่างกัน โดยได้พิจารณาโครงข่ายซึ่งมีเครื่องส่งสัญญาณจำนวนสองเครื่อง โดยแต่ละเครื่องกระจายสัญญาณให้แก่เครื่องรับสัญญาณจำนวนสองเครื่อง ผ่านช่องสัญญาณเกาส์เซียน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่มีเครื่องส่งสัญญาณที่หนึ่ง (Tx_1) กระจายสัญญาณให้กับเครื่องรับสัญญาณที่หนึ่งและสอง (Rx_1 และ Rx_2) ซึ่งสัญญาณที่ส่งออกไปจะไปเป็นสัญญาณรบกวน ณ เครื่องรับสัญญาณที่สามและสี่ (Rx_3 และ Rx_4) ในขณะเดียวกันเครื่องส่งสัญญาณที่สอง (Tx_2) ที่กระจายสัญญาณให้กับเครื่องรับที่สามและสี่ ก็จะสร้างสัญญาณรบกวนแก่เครื่องรับสัญญาณที่หนึ่งและสองด้วย ซึ่งจะได้ว่าค่า SINR สำหรับเครื่องรับสัญญาณต่าง ๆ ในโครงข่ายมีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
\gamma_1 &= \frac{p_1 g_{11}}{p_2 g_{21} + \sigma^2} \\
\gamma_2 &= \frac{p_1 g_{12}}{p_2 g_{22} + \sigma^2} \\
\gamma_3 &= \frac{p_2 g_{23}}{p_1 g_{13} + \sigma^2} \\
\gamma_4 &= \frac{p_2 g_{24}}{p_1 g_{14} + \sigma^2}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

เมื่อ γ_i คือค่า SINR ที่เครื่องรับ i

p_j โดย $0 \leq p_j \leq p_j^{\max}$ คือค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง i เมื่อ $p_j^{\max}$ เป็นค่ากำลังส่งสูงสุดของเครื่องส่ง j

g_{ji} คือค่าการลดทอนของช่องสัญญาณ (channel attenuation) หรืออัตราขยาย (gain) ของช่องสัญญาณจากเครื่องส่งสัญญาณ j ไปยังเครื่องรับสัญญาณ i

σ^2 คือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียน

และมีความจุของแชนนอนเป็น $c_i = \log_2(1 + \gamma_i)$ เช่นเดียวกับสมการ (2.4)

3.2 กำหนดนิยามของตัวแปร

i	ดัชนีของเครื่องรับสัญญาณ โดย $i \in \{1, 2, 3, 4\}$
j	ดัชนีของเครื่องส่งสัญญาณ โดย $i \in \{1, 2\}$
p_j	กำลังส่งของเครื่องส่งสัญญาณ j
$p_j^{\max}$	กำลังส่งสูงสุดที่เครื่องส่งสัญญาณ j สามารถใช้ได้
γ_i	ค่า SINR ที่เครื่องรับสัญญาณ i ได้รับ
c_i	ค่าความจุของแชนนอนของเครื่องรับสัญญาณ i
u_j	ค่าผลประโยชน์ของเครื่องส่งสัญญาณ j
$\mathcal{U}$	เซตผลประโยชน์ของเกม
g_{ji}	อัตราขยายจากเครื่องส่งสัญญาณ j ไปยังเครื่องรับสัญญาณ i
σ^2	ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียน หรือกำลังของสัญญาณรบกวน (noise power) ในช่องสัญญาณ

3.3 แบบจำลองเกม

วิทยานิพนธ์นี้ได้ควบคุมกำลังส่งของโครงข่ายในรูปที่ 3.1 ด้วยทฤษฎีเกม โดยการสร้างแบบจำลองเกมจากโครงข่ายเป็นเกมที่มีผู้เล่นสองคน (two-person game) โดยกำหนดให้กลุ่มของเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณซึ่งส่งและรับสัญญาณเดียวกันเป็นผู้เล่นคนหนึ่ง กล่าวคือ กลุ่มของเครื่องส่งสัญญาณที่หนึ่ง (Tx_1) เครื่องรับสัญญาณที่หนึ่งและสอง (Rx_1 และ Rx_2) เป็นผู้เล่นที่หนึ่ง ส่วนกลุ่มของเครื่องส่งสัญญาณที่สอง (Tx_2) เครื่องรับสัญญาณที่สามและสี่ (Rx_3 และ Rx_4) เป็นผู้เล่นที่สอง สำหรับกลยุทธ์ถูกกำหนดให้เป็นค่ากำลังส่ง p_j ที่เครื่องส่งสัญญาณของผู้เล่นนั้น ๆ ใช้ในการส่งสัญญาณ โดยมีค่าไม่ต่ำกว่าศูนย์วัตต์และไม่เกินค่ากำลังส่งสูงสุด $p_j^{\max}$ ที่เครื่องส่งสัญญาณ j สามารถส่งได้ ทั้งนี้เพื่อความเรียบง่าย จึงถือให้เครื่องส่งสัญญาณทั้งสองมีความสามารถเท่ากัน คือสามารถส่งสัญญาณได้ด้วยกำลังสูงสุดเป็น $p_1^{\max} = p_2^{\max} = p^{\max}$ ดังนั้นจึงได้ว่า $[0, p^{\max}]^2$ เป็นปริภูมิกลยุทธ์ของเกม ส่วนค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นแต่ละคนจะถูกกำหนดโดยค่า

ความจุของแชนนอนของเครื่องรับสัญญาณของผู้เล่นนั้น ๆ ซึ่งมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} c_1 &= \log_2(1+\gamma_1) = \log_2(1+\frac{p_1 g_{11}}{p_2 g_{21}+\sigma^2}) \\ c_2 &= \log_2(1+\gamma_2) = \log_2(1+\frac{p_1 g_{12}}{p_2 g_{22}+\sigma^2}) \\ c_3 &= \log_2(1+\gamma_3) = \log_2(1+\frac{p_2 g_{23}}{p_1 g_{13}+\sigma^2}) \\ c_4 &= \log_2(1+\gamma_4) = \log_2(1+\frac{p_2 g_{24}}{p_1 g_{14}+\sigma^2}) \end{aligned} \tag{3.2}$$

ดังนั้นค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นที่หนึ่งและสองจึงอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $u_1(c_1,c_2)$ และ $u_2(c_3,c_4)$ ตามลำดับ ซึ่งทำให้แบบจำลองเกมนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเกมในลักษณะของสมการ (2.1) ได้เป็น

$$\boldsymbol{G} = (\{1,2\}, [0,p^{\max}]^2, \{u_1,u_2\}) \tag{3.3}$$

และได้ว่าแบบจำลองเกมนี้มีเขตผลประโยชน์เป็น

$$\mathcal{U} = \bigcup_{0\le p_1\le p^{\max}, 0\le p_2\le p^{\max}} \{(u_1,u_2)\} \tag{3.4}$$

เพื่อวิเคราะห์ฟังก์ชันผลประโยชน์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณได้รับ ในบทนี้ฟังก์ชัน $u_1(c_1,c_2)$ และ $u_2(c_3,c_4)$ จะถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ

ก. ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณได้รับ

$$\begin{aligned} u_1(c_1,c_2) &= \frac{c_1+c_2}{2} \\ u_2(c_3,c_4) &= \frac{c_3+c_4}{2} \end{aligned} \tag{3.5}$$

ข. ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณได้รับ

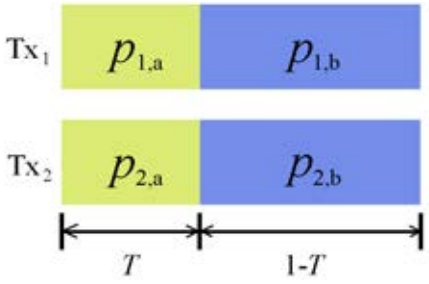
$$\begin{aligned} u_1(c_1,c_2) &= \sqrt{c_1 c_2} \\ u_2(c_3,c_4) &= \sqrt{c_3 c_4} \end{aligned} \tag{3.6}$$

ค. ค่าต่ำสุดของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณได้รับ

$$\begin{aligned} u_1(c_1,c_2) &= \min(c_1,c_2) \\ u_2(c_3,c_4) &= \min(c_3,c_4) \end{aligned} \tag{3.7}$$

3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองเกม

ในการวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายหนึ่ง ๆ จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีการควบคุมกำลังส่ง โดยเครื่องส่งจะส่งสัญญาณด้วยกำลังคงที่ ซึ่งจะพิจารณาเป็นเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน และอีกกรณีหนึ่งคือ กรณีที่มีการควบคุมกำลังส่งโดยมีการใช้กลไลการแบ่งเวลา (time-sharing)[1] ซึ่งจะพิจารณาเป็นเกมที่มีการร่วมมือกัน ดังนี้



รูปที่ 3.2: กลไลการแบ่งเวลา

1. *เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน* ในกรณีนี้ ผู้เล่นแต่ละคนจะพยายามเพิ่มค่าผลประโยชน์ของตนเองให้มากที่สุดโดยไม่คำนึงถึงผู้เล่นอีกคนหนึ่ง ส่งผลให้เครื่องส่งสัญญาณทั้งสองเลือกใช้กำลังส่งที่มากที่สุดเป็น $p_1 = p_2 = p^{\max}$ ตลอดเวลา และให้ผลลัพธ์ของเกมเป็นจุดสมดุลของแนช

2. *เกมที่มีการร่วมมือกัน* สำหรับกรณีนี้ เครื่องส่งจะมีการแบ่งเวลา โดยจะมีการแบ่งช่วงเวลาการส่งสัญญาณออกเป็นสองช่วงในแต่ละคาบการส่งสัญญาณ ซึ่งเครื่องส่งสัญญาณอาจเลือกใช้ค่ากำลังส่งที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา กล่าวคือ หากคาบการส่งสัญญาณมีความยาวเป็นหนึ่งหน่วย ในช่วงเวลา T แรกเครื่องส่งสัญญาณ Tx_1 และ Tx_2 จะส่งสัญญาณด้วยกำลัง $p_{1,\mathrm{a}}$ และ $p_{2,\mathrm{a}}$ ตามลำดับ ส่วนในช่วงเวลา $1-T$ หลัง เครื่องส่งสัญญาณ Tx_1 และ Tx_2 ก็จะส่งสัญญาณด้วยกำลัง $p_{1,\mathrm{b}}$ และ $p_{2,\mathrm{b}}$ ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นทั้งสองเปลี่ยนแปลงเป็น

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{1,\mathrm{a}}T + u_{1,\mathrm{b}}\left(1-T\right), \\ u_2 &= u_{2,\mathrm{a}}T + u_{2,\mathrm{b}}\left(1-T\right), \end{aligned} \tag{3.8}$$

เมื่อ $u_{1,\mathrm{a}}$ เป็นค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นที่หนึ่งในช่วงแรกของการแบ่งเวลา
$u_{2,\mathrm{a}}$ เป็นค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นที่สองในช่วงแรกของการแบ่งเวลา
$u_{1,\mathrm{b}}$ เป็นค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นที่หนึ่งในช่วงหลังของการแบ่งเวลา
$u_{2,\mathrm{b}}$ เป็นค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นที่สองในช่วงหลังของการแบ่งเวลา

การแบ่งเวลาจะส่งผลให้เกมมีเขตผลประโยชน์ที่กว้างขึ้นกว่าเดิม และการที่ผู้เล่นร่วมมือกันจะส่งผลให้ผลลัพธ์ของเกมมาอยู่ที่จุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุด (u_1^*, u_2^*) ซึ่งเกิดจากการใช้กำลังส่งที่เหมาะสม $\{(p_{1,\mathrm{a}}^*, p_{2,\mathrm{a}}^*), (p_{1,\mathrm{b}}^*, p_{2,\mathrm{b}}^*)\}$ โดยจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดนี้ เป็นจุดบนขอบพาเรโตที่ให้ผลประโยชน์แก่โครงข่ายสูงสุดตามลักษณะของฟังก์ชันผลประโยชน์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนี้

ก. เมื่อฟังก์ชันผลประโยชน์เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณตามชุดสมการ (3.5) จุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุด คือจุดที่มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตระหว่างผลประโยชน์ของผู้เล่นทั้งสองสูงสุด

$$(u_1^*, u_2^*) = \arg\max_{(u_1,u_2)} \left(\frac{u_1+u_2}{2}\right). \tag{3.9}$$

ข. เมื่อฟังก์ชันผลประโยชน์เป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณตามชุดสมการ (3.6) จุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุด คือจุดที่มีค่าเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างผลประโยชน์ของผู้เล่นทั้งสองสูงสุด

$$(u_1^*, u_2^*) = \arg\max_{(u_1,u_2)} \left(\sqrt{u_1 u_2}\right). \tag{3.10}$$

ค. เมื่อฟังก์ชันผลประโยชน์เป็นค่าที่ต่ำที่สุดของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณตามชุดสมการ (3.7) จุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดคือ จุดที่มีค่าต่ำสุดของผลประโยชน์ระหว่างผู้เล่นทั้งสองสูงที่สุด

$$(u_1^*, u_2^*) = \arg\max_{(u_1,u_2)}(\min(u_1, u_2)). \tag{3.11}$$

ทั้งนี้ ยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่จะถูกนำมาเพื่อวิเคราะห์โครงข่าย นั่นคือ ดัชนีความยุติธรรม (fairness index)[3]

$$FI_i = \frac{c_i}{\sum_{k=1}^{4} c_k} \tag{3.12}$$

ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณ i ได้รับ ต่อความจุของแชนนอนรวมของโครงข่าย

3.5 ผลลัพธ์เชิงตัวเลข

สำหรับกรณีที่ผู้เล่นมีการร่วมมือกันและมีการแบ่งเวลา จะกำหนดให้ $T = 0.5$ หรือแบ่งเวลาในแต่ละคาบออกเป็นสองช่วงเท่า ๆ กัน โดยใช้สมการ (3.5)-(3.8) ในการคำนวณค่าผลประโยชน์ของผู้เล่น ซึ่งจะให้เกมมีเขตผลประโยชน์ที่กว้างกว่าหรือเท่ากับกรณีที่ไม่มีการร่วมมือกัน และส่งผลให้ได้จุดที่เป็นผลลัพธ์ของเกมที่ไม่ด้อยกว่าเกมที่ไม่มีการร่วมมือกันด้วย โดยการทดลองต่าง ๆ ในบทนี้จะถูกกำหนดให้มีค่ากำลังส่งสูงสุดของเครื่องส่งสัญญาณเป็น $p^{\max} = 1$ วัตต์ ให้ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนในช่องสัญญาณเป็น $\sigma^2 = 0.1$ วัตต์ และเพื่อความง่าย จะให้อัตราขยายของช่องสัญญาณมีค่าขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณเท่านั้น โดยมีค่าแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่าง

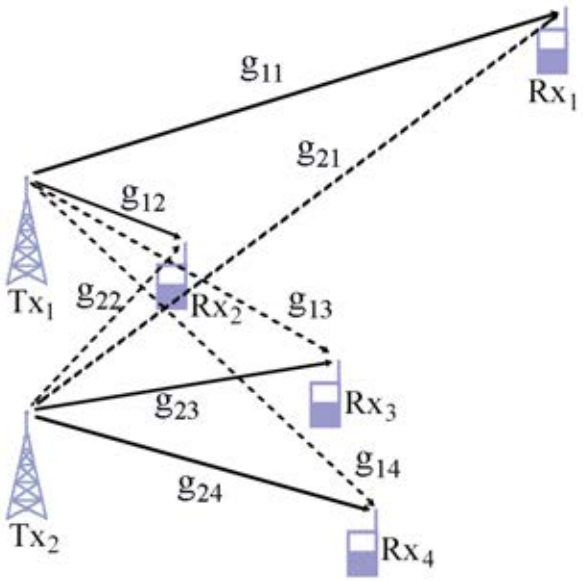
3.5.1 การทดลองที่ 1 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าสูง

เพื่อให้สามารถพิจารณาถึงผลกระทบต่อเครื่องรับสัญญาณ ที่มีระยะห่างจากเครื่องส่งสัญญาณน้อย ปานกลาง และมากได้สะดวก กำหนดตัวอย่างให้ค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณในโครงข่ายมีค่าเป็น

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0.15 & 1.00 & 0.65 & 0.50 \\ 0.10 & 0.90 & 0.70 & 0.60 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

จากเมทริกซ์ของอัตราขยายดังกล่าว เนื่องจากค่าอัตราขยายจะต่ำลงตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณที่มากขึ้น จึงสามารถตีความได้ว่าเครื่องส่งสัญญาณ Tx_1 ส่งสัญญาณให้กับเครื่องรับสัญญาณ Rx_1 ซึ่งอยู่ไกล และ Rx_2 ซึ่งอยู่ใกล้ ในขณะที่เครื่องส่งสัญญาณ Tx_2 ส่งสัญญาณให้กับเครื่องรับสัญญาณ Rx_3 และ Rx_4 ซึ่งมีระยะห่างจากเครื่องส่งสัญญาณ Tx_2 ใกล้เคียงกัน ไม่ใกล้และไม่ไกลเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 3.3 อีกทั้งสังเกตได้ว่าค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณรบกวนตามสมการ (3.13) มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณข้อมูล

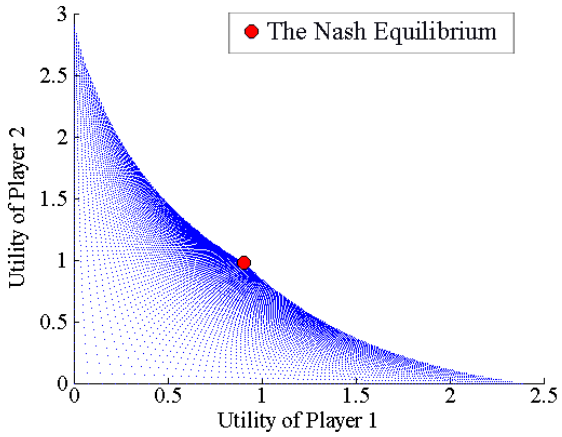
จากระบบดังกล่าว จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยมีรูปที่ 3.4-3.9 แสดงเขตผลประโยชน์ จุดสมดุลของแนช รวมถึงจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดสำหรับกรณีต่าง ๆ และตารางที่ 3.2 แสดงค่าดัชนีความยุติธรรมและความจุรวมของโครงข่ายสำหรับกรณีที่ผู้เล่นมีการร่วมมือกัน



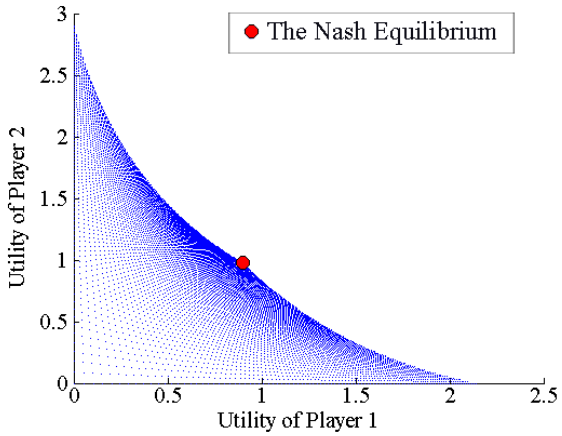
รูปที่ 3.3: โครงข่ายไร้สายสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 3.1: ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการทดลองที่ 1 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าสูง

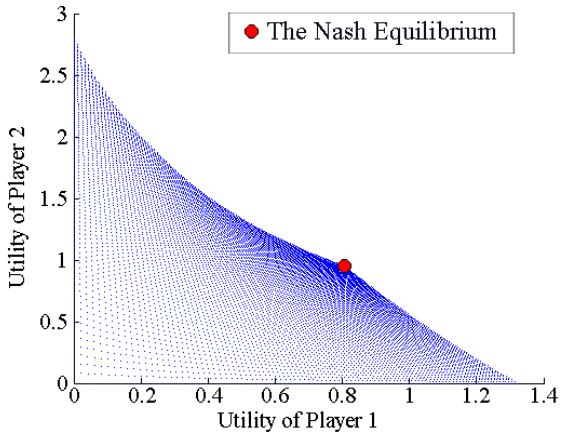
กรณี	(u_1^{NE}, u_2^{NE}) (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	(u_1^*, u_2^*) (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	ความจุของแชนนอน (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)				$\{(p_{1,a}^*, p_{2,a}^*), (p_{1,b}^*, p_{2,b}^*)\}$ (วัตต์)	รูป
			c_1	c_2	c_3	c_4		
ไม่ร่วมมือ เลขคณิต	$(0.9037, 0.9755)$	–	0.81	1.00	0.95	1.00	–	รูปที่ 3.4
ไม่ร่วมมือ เรขาคณิต	$(0.8985, 0.9752)$	–	0.81	1.00	0.95	1.00	–	รูปที่ 3.5
ไม่ร่วมมือ ค่าต่ำสุด	$(0.8074, 0.9511)$	–	0.81	1.00	0.95	1.00	–	รูปที่ 3.6
ร่วมมือ เลขคณิต	$(0.9037, 0.9755)$	$(0.0000, 2.9037)$	0.00	0.00	3.00	2.81	$\{(0, 1), (0, 1)\}$	รูปที่ 3.7
ร่วมมือ เรขาคณิต	$(0.8985, 0.9752)$	$(1.0692, 1.4510)$	0.66	1.73	1.50	1.40	$\{(1, 0), (0, 1)\}$	รูปที่ 3.8
ร่วมมือ ค่าต่ำสุด	$(0.8074, 0.9511)$	$(0.8525, 0.8525)$	0.85	1.10	0.85	0.90	$\{(1, 0.78), (1, 0.95)\}$	รูปที่ 3.9



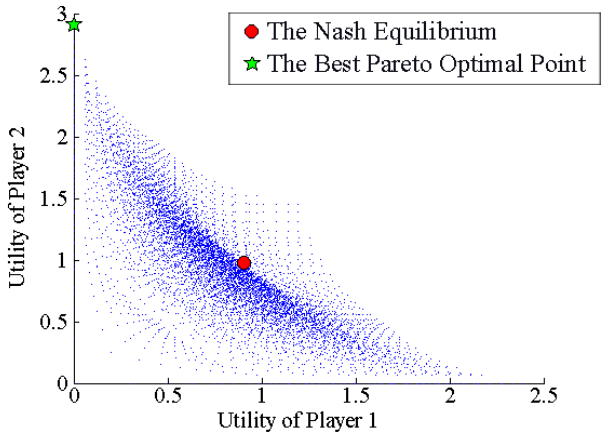
รูปที่ 3.4: เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเลขคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง



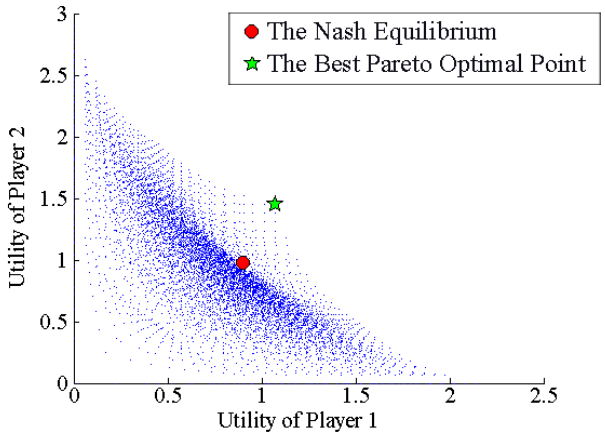
รูปที่ 3.5: เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง



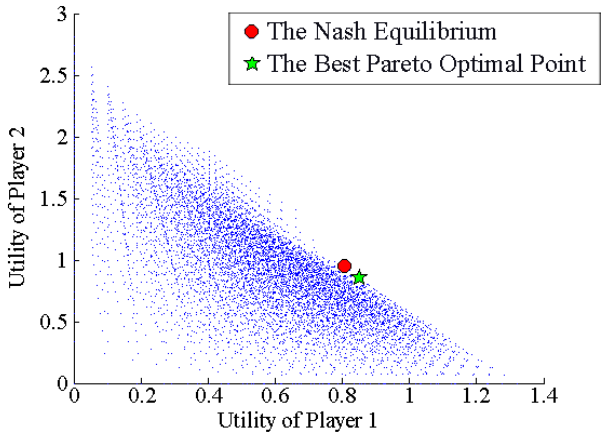
รูปที่ 3.6: เกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าต่ำสุด โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง



รูปที่ 3.7: เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเลขคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง



รูปที่ 3.8: เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง



รูปที่ 3.9: เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าต่ำสุด โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนสูง

ตารางที่ 3.2: ดัชนีความยุติธรรมและความจุรวมของโครงข่ายของการทดลองที่ 1

กรณี	FI_1	FI_2	FI_3	FI_4	$\sum c$ (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)
ร่วมมือ เลขคณิต	0.00	0.00	0.52	0.48	5.8074
ร่วมมือ เรขาคณิต	0.12	0.33	0.28	0.27	5.2944
ร่วมมือ ค่าต่ำสุด	0.23	0.30	0.23	0.24	3.7035

จากผลลัพธ์ในแต่ละกรณีพบว่า เกมที่มีการร่วมมือกันจะให้เขตผลประโยชน์ที่กว้างกว่าและให้ผลประโยชน์โดยรวมของโครงข่ายที่มากกว่าเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน ซึ่งมีสาเหตุจากการแบ่งเวลาและการควบคุมกำลังส่งที่ช่วยลดสัญญาณรบกวนในโครงข่ายลง

พิจารณากรณีของเกมที่มีการร่วมมือกัน หากค่าผลประโยชน์เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณตามสมการ (3.5) และ (3.8) โดยมีจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดตามสมการ (3.9) พบว่ากรณีนี้มีความยุติธรรมต่ำกว่ากรณีอื่นมาก เนื่องจากค่ากำลังส่งที่เหมาะสมจะให้ประโยชน์แก่เครื่องรับสัญญาณที่อยู่ใกล้กับเครื่องส่งสัญญาณเป็นหลัก โดยไม่สนใจเครื่องรับสัญญาณที่อยู่ไกลหรือมีค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณข้อมูลต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ฟังก์ชันผลประโยชน์ให้ความสำคัญกับคู่รับส่งสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน และถึงแม้มีเครื่องรับสัญญาณบางเครื่องได้รับความจุของแชนนอนเป็นศูนย์ก็มิได้ส่งผลต่อค่าผลประโยชน์โดยรวมของโครงข่ายมากนัก แต่ถึงแม้การใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นฟังก์ชันผลประโยชน์นี้จะมีความยุติธรรมต่ำที่สุด กรณีนี้ก็ให้ความจุรวมของโครงข่ายมากที่สุดในขณะเดียวกัน

สำหรับกรณีที่ค่าผลประโยชน์เป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณตามสมการ (3.6) และ (3.8) โดยมีจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดตามสมการ (3.10) ค่ากำลังส่งที่เหมาะสมจะให้ค่าผลประโยชน์ที่ดีแก่ผู้เล่นทั้งสอง เนื่องจากการใช้ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตจะเพิ่มน้ำหนักของผลเสียเมื่อมีเครื่องรับสัญญาณได้รับค่าความจุของแชนนอนต่ำ ดังนั้นกรณีนี้จึงมีความยุติธรรมมากกว่ากรณีที่ใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นฟังก์ชันผลประโยชน์มาก แต่ในขณะเดียวกันก็ให้ค่าความจุรวมของโครงข่ายที่ต่ำกว่าเล็กน้อย

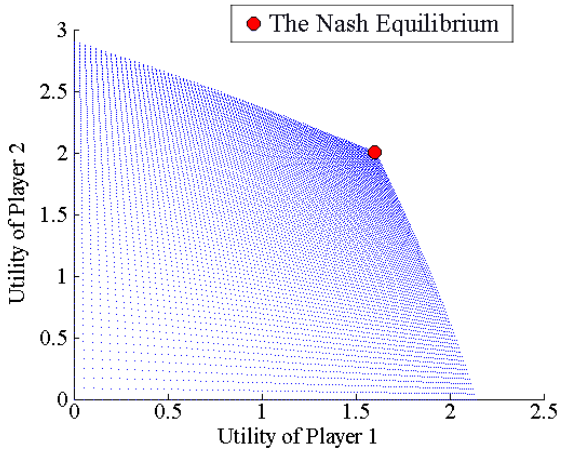
ในกรณีที่ค่าผลประโยชน์เป็นค่าต่ำสุด ของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณตามสมการ (3.7) และ (3.8) โดยมีจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดตามสมการ (3.11) จะได้ว่า ค่ากำลังส่งที่เหมาะสม เป็นค่ากำลังส่งที่เพ่งความสนใจไปที่เครื่องรับสัญญาณที่อยู่ห่างจากเครื่องส่งสัญญาณมากที่สุด โดยไม่สนใจเครื่องรับสัญญาณอื่นที่อยู่ใกล้กว่า ซึ่งเกิดจากการที่ฟังก์ชันผลประโยชน์ชนิดนี้ให้ความสนใจแก่เครื่องรับสัญญาณที่มีค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณต่ำ และได้รับความจุของแชนนอนต่ำกว่าเครื่องรับสัญญาณอื่นเท่านั้น ดังนั้นกรณีนี้จึงให้ความยุติธรรมสูงสุด สังเกตได้จากค่าดัชนีความยุติธรรมของเครื่องรับสัญญาณแต่ละเครื่องที่มีความใกล้เคียงกันมาก แต่ในขณะเดียวกัน กรณีที่ใช้ค่าต่ำสุดเป็นฟังก์ชันผลประโยชน์นี้ มีค่าความจุรวมของโครงข่ายที่ต่ำกว่ากรณีอื่นมาก

3.5.2 การทดลองที่ 2 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ

สำหรับการทดลองนี้ กำหนดให้ค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณในโครงข่ายมีค่าเป็น

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0.15 & 1.00 & 0.13 & 0.10 \\ 0.02 & 0.18 & 0.70 & 0.60 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

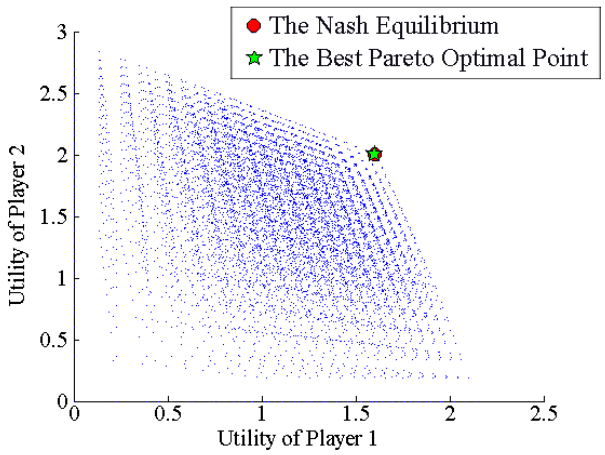
ซึ่งเป็นโครงข่ายในลักษณะเดียวกับการทดลองแรก เพียงแต่ค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำลงมาก โดยมีค่าไม่เกินร้อยละ 20 ของอัตราขยายของช่องสัญญาณข้อมูล ซึ่งทำให้ผลกระทบจากกำลังของสัญญาณรบกวนระหว่างผู้เล่นทั้งสองลดลงอย่างมาก โดยในการทดลองนี้ จะแสดงผลลัพธ์เฉพาะกรณีที่ฟังก์ชันผลประโยชน์เป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของความจุของแชนนอนที่เครื่องรับสัญญาณ เนื่องจากกรณีที่ใช้ฟังก์ชันผลประโยชน์รูปแบบอื่นก็ให้ผลลัพธ์ในทำนองเดียวกัน คือมีความแตกต่างของเขตผลประโยชน์ของเกมระหว่างก่อนและหลังการควบคุมกำลังในลักษณะเดียวกัน โดยผลการทดลองนี้ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 รูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10: เกมที่มีไม่การร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนต่ำ

ตารางที่ 3.3: ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการทดลองที่ 2 กรณีกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ

กรณี	(u_1^{NE}, u_2^{NE}) (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	(u_1^*, u_2^*) (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	$\{(p_{1,a}^*, p_{2,a}^*), (p_{1,b}^*, p_{2,b}^*)\}$ (วัตต์)	รูป
ไม่ร่วมมือเรขาคณิต	$(1.6016, 2.0078)$	–	–	รูปที่ 3.10
ร่วมมือเรขาคณิต	$(1.6016, 2.0078)$	$(1.6016, 2.0078)$	$\{(1,1),(1,1)\}$	รูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11: เกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยมีกำลังของสัญญาณรบกวนต่ำ

จากผลการทดลองพบว่า การแบ่งเวลาไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายหากโครงข่ายมีการรบกวนกันต่ำหรือมีค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณรบกวนต่ำอยู่แล้ว สังเกตได้จากเขตผลประโยชน์ของกรณีที่มีการร่วมมือกันซึ่งไม่ได้ขยายกว้างขึ้นกว่ากรณีที่ไม่มีการร่วมมือกัน และจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดก็เป็นจุดที่เครื่องส่งสัญญาณทั้งสองเลือกใช้กำลังส่งสูงสุด 1 วัตต์ตลอดเวลา ซึ่งเป็นจุดเดียวกับจุดสมดุลของแนช ทั้งนี้มีสาเหตุจากกำลังของสัญญาณรบกวนระหว่างผู้ใช้ในโครงข่ายที่มีค่าไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนในช่องสัญญาณ ดังนั้นการควบคุมกำลังส่งและการแบ่งเวลาอาจไม่สามารถปรับปรุงโครงข่ายให้ดีขึ้น หากโครงข่ายมีระดับการรบกวนกันต่ำ

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้ใช้ทฤษฎีเกมในการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สาย โดยการกำหนดนิยามของผู้เล่น กลยุทธ์ และผลประโยชน์ เพื่อสร้างแบบจำลองเกมจากโครงข่าย ค่ากำลังส่งที่เหมาะสมของเครื่องส่งสัญญาณแต่ละเครื่องจึงหาได้จากกลยุทธ์ที่เหมาะสมของผู้เล่นแต่ละคน โดยปกติหากไม่มีการควบคุมกำลังส่ง เกมจะอยู่ในรูปของเกมที่ไม่มีการร่วมมือกันและให้ผลลัพธ์เป็นจุดสมดุลของแนช แต่หากมีการควบคุมกำลังส่ง และใช้การแบ่งเวลา เกมจะอยู่ในรูปของเกมที่มีการร่วมมือกันและให้ผลลัพธ์เป็นจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ดีที่สุดซึ่งให้ผลประโยชน์โดยรวมของโครงข่ายดีกว่าหรือเท่ากับจุดสมดุลของแนช ส่งผลให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งนี้จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขจะเห็นว่าหากโครงข่ายมีการรบกวนกันมาก การควบคุมกำลังส่งดังกล่าวจะสามารถปรับปรุงโครงข่ายให้ดีขึ้นมากเช่นกัน แต่หากโครงข่ายมีการรบกวนกันน้อย การควบคุมกำลังส่งดังกล่าวอาจไม่สามารถช่วยปรับปรุงโครงข่ายได้ อีกทั้งพบว่าหากต้องการให้โครงข่ายมีค่าความจุรวมสูง ฟังก์ชันผลประโยชน์ควรอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยเลขคณิต แต่หากต้องการแค่ให้มีความยุติธรรมในโครงข่าย ฟังก์ชันผลประโยชน์ก็ควรอยู่ในรูปของค่าต่ำสุด และหากต้องการโครงข่ายที่มีทั้งค่าความจุรวมและความยุติธรรมที่ดี ก็สามารถใช้ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเป็นฟังก์ชันผลประโยชน์

บทที่ 4

การควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้โดยใช้ทฤษฎีเกม

4.1 หลักการควบคุมกำลังส่ง

งานวิจัยนี้จะพิจารณาโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง ซึ่งเป็นโครงข่ายที่ประกอบไปด้วยเครื่องส่งหรือสถานีฐานกับเครื่องรับหรือผู้ใช้ ทำการส่งรับสัญญาณกันเป็นคู่ ดังแสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 4.1 โดยจำแนกผู้ใช้ออกเป็นสองประเภทคือ ผู้ใช้ปฐมภูมิและผู้ใช้ทุติยภูมิ ซึ่งผู้ใช้ปฐมภูมิจะได้รับการรับประกันคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำ ส่วนผู้ใช้ทุติยภูมิจะเข้ามาใช้ประโยชน์ในโครงข่ายให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยไม่กระทบต่อคุณภาพการให้บริการที่ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับ ดังนั้นเพื่อเปิดโอกาสให้ผู้ใช้ทุติยภูมิเข้ามาใช้งานได้ งานวิจัยนี้จะควบคุมกำลังของเครื่องส่งของผู้ใช้ปฐมภูมิให้เป็นค่าต่ำสุดที่ยังคงให้คุณภาพการให้บริการที่ผู้ใช้ปฐมภูมินั้นต้องการ และเพื่อมิให้ผู้ใช้ทุติยภูมิสร้างสัญญาณรบกวนในโครงข่ายมากจนทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับคุณภาพการให้บริการที่ต่ำกว่าคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำ เครื่องส่งสัญญาณของผู้ใช้ทุติยภูมิจะถูกควบคุมกำลังอย่างเหมาะสมเช่นกัน

จากวิธีการควบคุมกำลังสำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ที่กล่าวมาใน [8]-[10], [12]-[14] พบว่าเป็นการควบคุมกำลังของผู้ใช้ทุติยภูมิเพียงฝ่ายเดียว โดยมีเงื่อนไขว่ากำลังของสัญญาณรบกวนที่ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับจากเครื่องส่งผู้ใช้ทุติยภูมิต้องไม่เกินค่าแบ่งขีดค่าหนึ่ง หรือ

$$\sum_{j\in \mathrm{S}} p_j g_{ji} \leq \zeta \tag{4.1}$$

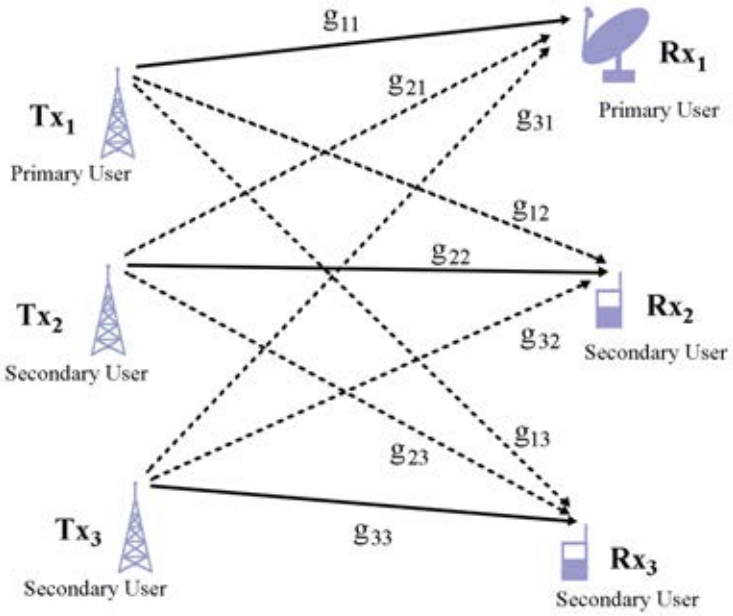
เมื่อ S คือเซตของผู้ใช้ทุติยภูมิ

p_j คือค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง j

g_{ji} คือค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณจากเครื่องส่ง j ไปยังเครื่องรับ i

ζ คือค่าแบ่งขีดสำหรับกำลังของสัญญาณรบกวนรวมจากเครื่องส่งของผู้ใช้ทุติยภูมิ ที่เครื่องรับผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับ

การควบคุมกำลังในลักษณะดังกล่าว ไม่สามารถรับรองคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำหรือความจุของแชนนอนขั้นต่ำสำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิแต่ละคนได้อย่างแท้จริง งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการ DPCPC (Duo Priority Class Power Control) จาก [5] มาใช้ในการควบคุมกำลังของโครงข่ายวิทยุรับรู้ ทั้งนี้การควบคุมกำลังใน [5] ไม่ได้นำทฤษฎีเกมมาใช้ ทั้ง ๆ ที่ทฤษฎีเกมเป็นทฤษฎีที่เหมาะกับการนำมาประยุกต์เพื่อควบคุมกำลังในโครงข่ายไร้สาย และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ทฤษฎีเกมเพื่อควบคุมกำลังสำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง โดยจะรักษาคุณภาพการให้บริการสำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิแต่ละคนให้ไม่ต่ำกว่าคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำที่ผู้ใช้นั้น ๆ ต้องการเช่นเดียวกับ [5]



รูปที่ 4.1: โครงข่ายวิทยุรับรู้ที่มีคู่ส่งรับสัญญาณปฐมภูมิ 1 คู่ และคู่ส่งรับสัญญาณทุติยภูมิ 2 คู่

4.2 กำหนดนิยามของตัวแปร

N	จำนวนผู้ใช้ หรือจำนวนคู่ส่งรับสัญญาณในโครงข่าย
i	ดัชนีผู้ใช้ หรือดัชนีของเครื่องส่งและเครื่องรับของผู้เล่นนั้น โดย $i \in \{1, \ldots, N\}$
p_i	กำลังส่งของผู้ใช้ i หรือค่ากำลังที่เครื่องส่งของคู่ส่งรับสัญญาณที่ i ใช้ในการส่งสัญญาณ
$p_i^{\max}$	กำลังส่งสูงสุดที่ผู้ใช้ i สามารถใช้ได้
p_{-i}	กำลังส่งร่วมของผู้ใช้ทุกคนภายในโครงข่าย ยกเว้นผู้ใช้ i กล่าวคือ ค่ากำลังส่งของเครื่องส่งสัญญาณของคู่ส่งรับสัญญาณต่าง ๆ ยกเว้นคู่ส่งรับสัญญาณที่ i โดย $p_{-i} \in \mathrm{R}^{N-1}$
γ_i	ค่า SINR ของผู้ใช้ i หรือค่า SINR ที่เครื่องรับสัญญาณของคู่ส่งรับสัญญาณที่ i
γ_i^{req}	ค่า SINR ขั้นต่ำที่ต้องการของผู้ใช้ปฐมภูมิ i
c_i	ค่าความจุของแชนนอนของผู้ใช้ i
c_i^{req}	ค่าความจุของแชนนอนขั้นต่ำที่ต้องการของผู้ใช้ปฐมภูมิ i
u_i	ค่าผลประโยชน์ของผู้ใช้ i
$\mathcal{U}$	เขตผลประโยชน์ของเกม
g_{ji}	อัตราขยายจากผู้ใช้ j ไปยังผู้ใช้ i ซึ่งหมายถึงอัตราขยายจากเครื่องส่งของคู่รับส่งที่ j ไปยังเครื่องรับของคู่รับส่งที่ i
σ^2	ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียน หรือกำลังของสัญญาณรบกวน (noise power) ในช่องสัญญาณ
P	เซตของผู้ใช้ปฐมภูมิ
S	เซตของผู้ใช้ทุติยภูมิ

4.3 แบบจำลองเกมที่มีการร่วมมือกัน

เพื่อสร้างแบบจำลองเกมสำหรับโครงข่ายวิทยุรับรู้ดังที่กล่าวไว้ เราจะต้องกำหนดนิยามสำหรับผู้เล่น กลยุทธ์ และผลประโยชน์ของเกม ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ผู้ใช้หรือคู่ส่งรับสัญญาณเป็นผู้เล่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้คำว่าผู้เล่น ผู้ใช้ และคู่ส่งรับสัญญาณ จึงสามารถใช้แทนกันได้ สำหรับกลยุทธ์ของผู้เล่นแต่ละคนจะถูกกำหนดให้เป็นค่ากำลังส่งของผู้เล่นนั้น คือ p_i โดย $0 \leq p_i \leq p_i^{\max}$ และสำหรับค่าผลประโยชน์ จะถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของกำลังส่งของผู้เล่นภายในเกม โดยสำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิให้

$$u_i(p_i; p_{-i}) = \exp(p_i^{\max}) - \exp(p_i) - \exp(\alpha(\gamma_i^{\text{req}} - \gamma_i)) \quad , \forall i \in \mathrm{P} \tag{4.2}$$

เมื่อ $\alpha \in \mathrm{R}^+$ เป็นจำนวนที่มีค่ามากค่าหนึ่ง

$$\gamma_i = \frac{p_i g_{ii}}{\sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} p_j g_{ji} + \sigma^2} \quad , \forall i \tag{4.3}$$

และ

$$\gamma_i^{\text{req}} = 2^{(c_i^{\text{req}})} - 1 \quad , \forall i \in \mathrm{P} \tag{4.4}$$

สำหรับผู้ใช้ทุติยภูมิ ฟังก์ชันผลประโยชน์จะถูกกำหนดให้เป็น

$$u_i(p_i; p_{-i}) = c_i = \log_2(1 + \gamma_i) \quad , \forall i \in \mathrm{S} \tag{4.5}$$

ดังนั้นแบบจำลองเกมนี้จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการ (2.1) ได้เป็น

$$\boldsymbol{G} = (\{1, \ldots, N\}, [0, p_1^{\max}] \times \cdots \times [0, p_N^{\max}], \{u_1, \ldots, u_N\}) \tag{4.6}$$

โดยมีเขตผลประโยชน์

$$\mathcal{U} = \bigcup_{0 \leq p_1 \leq p_1^{\max}, \ldots, 0 \leq p_N \leq p_N^{\max}} \{(u_1, \ldots, u_N)\} \tag{4.7}$$

จากฟังก์ชันผลประโยชน์ของผู้ใช้ปฐมภูมิในสมการ (4.2) สองพจน์แรกในฝั่งขวาของสมการจะทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิพยายามเลือกใช้กำลังส่งที่ต่ำที่สุด ส่วนพจน์ที่สามในฝั่งขวามีไว้เพื่อให้ผู้ใช้ปฐมภูมิเลือกใช้กำลังส่งที่ทำให้ตนเองได้รับค่า SINR ขั้นต่ำ ซึ่งเป็นการรับรองคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำหรือความจุของแชนนอนขั้นต่ำด้วย นั่นคือ

$$c_i \geq c_i^{\text{req}} = \log_2(1 + \gamma_i^{\text{req}}) \quad , \forall i \in P \tag{4.8}$$

เมื่อ

$$c_i = \log_2(1 + \gamma_i) \quad , \forall i \tag{4.9}$$

โดยเนื่องจาก α มีค่ามาก หากผู้ใช้ปฐมภูมิไม่ได้รับ SINR ขั้นต่ำ พจน์ดังกล่าวจะมีค่าติดลบมหาศาล แต่ถ้าผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับ SINR ไม่น้อยกว่า SINR ขั้นต่ำ พจน์ดังกล่าวจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์และสามารถ

ละเลยได้ ดังนั้นฟังก์ชันผลประโยชน์ของผู้ใช้ปฐมภูมิจึงเป็นการกำหนดให้ผู้ใช้ปฐมภูมิเลือกใช้กำลังส่งที่ต่ำที่สุดซึ่งยังคงให้ SINR ที่ไม่ต่ำกว่า SINR ขั้นต่ำ ส่วนฟังก์ชันผลประโยชน์ของผู้ใช้ทุติยภูมิเป็นการกำหนดให้ผู้ใช้ทุติยภูมิเลือกใช้กำลังส่งที่ทำให้ค่าความจุของแชนนอนที่ผู้ใช้นั้นได้รับสูงสุด

งานวิจัยนี้จะแบ่งพิจารณาเกมในสมการ (4.6) ออกเป็นสองกรณี โดยกรณีแรก พิจารณาเกมดังกล่าวเป็นเกมที่มีการร่วมมือกัน ซึ่งผู้เล่นเลือกกลยุทธ์ร่วมกันเพื่อทำให้ผลรวมของผลประโยชน์สูงสุด และในกรณีที่สอง พิจารณาเป็นเกมที่มีการร่วมมือกันที่ผู้เล่นเลือกกลยุทธ์ร่วมกันเพื่อทำให้ผลคูณของผลประโยชน์สูงสุด โดยค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นแต่ละคนไม่ต่ำกว่าศูนย์

4.3.1 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \sum_{i=1}^{N} u_i \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq p_i \leq p_i^{\max} \end{aligned} \tag{4.10}$$

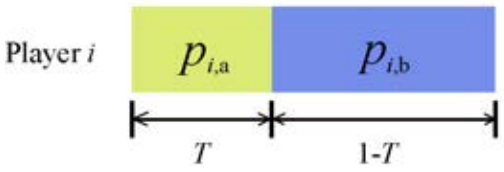
ผลของเกมดังกล่าวจะได้ว่า ผู้ใช้ทุกคนในโครงข่ายจะเลือกใช้กลยุทธ์หรือค่ากำลังส่งที่เหมาะสม $p^* = \{p_1^*, \ldots, p_N^*\}$ ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ของเกมอยู่บนจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่มีผลรวมของผลประโยชน์สูงสุด ซึ่งในเกมนี้ ผู้ใช้ทุติยภูมิจะเข้ามาใช้ประโยชน์จากโครงข่ายที่มีสัญญาณรบกวนไม่มากจนเกินไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่าย โดยพยายามทำให้ความจุรวมของโครงข่าย $\sum_{i=1}^{N} c_i$ สูงที่สุด แต่หากโครงข่ายมีสัญญาณรบกวนสูงอยู่แล้ว ผู้ใช้ทุติยภูมิอาจเลือกที่จะไม่ส่งสัญญาณ หรือเลือกใช้กำลังส่งเป็นศูนย์วัตต์

4.3.2 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \prod_{i=1}^{N} u_i \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq p_i \leq p_i^{\max} \\ & u_i \geq 0 \end{aligned} \tag{4.11}$$

จะทำให้ได้ผลลัพธ์ในทำนองเดียวกับกรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์ คือผลลัพธ์ของเกมจะอยู่บนขอบพาเรโต เพียงแต่จะเป็นจุดเหมาะสมแบบพาเรโตที่ให้ผลคูณของผลประโยชน์สูงสุดแทน เนื่องจากผู้ใช้ทุติยภูมิไม่ได้ตกลงกันเพื่อให้ได้ความจุรวมของโครงข่ายสูงสุด แต่จะตกลงกันเพื่อแบ่งผลประโยชน์เป็นสัดส่วนให้กับผู้ใช้ทุติยภูมิทุกคน และให้ผลในลักษณะของผลการต่อรองของแนช ซึ่งทำให้เกิดความยุติธรรมท่ามกลางผู้ใช้ทุติยภูมิมากขึ้น

ทั้งนี้เนื่องความจุของแชนนอนแปรเป็นสัดส่วนไปทางเดียวกับ SINR จึงได้ว่าในเกมที่มีการร่วมมือกัน ทั้งกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์ และกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของผลประโยชน์ กำลังส่งของผู้ใช้ปฐมภูมิจะแปรไปทางเดียวกับสัญญาณรบกวนที่ได้รับเพื่อคงค่า SINR ไว้ที่ค่า SINR ขั้นต่ำ กล่าวคือ หากผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับสัญญาณรบกวนมากขึ้น ผู้ใช้ปฐมภูมิจะเพิ่มกำลังส่งเพื่อคงค่า SINR ไว้ ส่วนกรณีที่ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับสัญญาณรบกวนที่ต่ำลง ผู้ใช้ดังกล่าว



รูปที่ 4.2: กลไกการแบ่งเวลา

ก็จะลดกำลังส่งลงเพื่อคงค่า SINR ไว้เช่นกัน ในขณะที่กำลังส่งและ SINR ของผู้ใช้ทุติยภูมิจะแปรในทางตรงข้ามกับสัญญาณรบกวนที่ได้รับ กล่าวคือ หากผู้ใช้ทุติยภูมิได้รับสัญญาณรบกวนมากขึ้น ผู้ใช้นั้นก็จะลดกำลังส่งลงเพื่อให้ผู้ใช้ปฐมภูมิสามารถรักษาค่า SINR ขั้นต่ำไว้ได้ ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้ทุติยภูมิดังกล่าวได้รับค่า SINR ที่ต่ำลง ในทางตรงข้ามหากผู้ใช้ทุติยภูมิดังกล่าวได้รับสัญญาณรบกวนที่ต่ำลงก็จะเพิ่มกำลังส่ง และได้รับค่า SINR ที่สูงขึ้น เพราะฉะนั้นการควบคุมกำลังส่งของเกมทั้งสองนี้จึงเป็นไปตามอสมการ (2.5), (2.6) และไม่ทำให้เกิดอสมการ (2.7) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการ DPCPC ใน [5]

4.4 แบบจำลองเกมที่มีการร่วมมือกันโดยมีการแบ่งเวลา

งานวิจัยนี้ยังได้นำการแบ่งเวลา (time-sharing)[1] มาใช้ในโครงข่ายเพื่อลดสัญญาณรบกวน และสามารถเพิ่มความจุรวมของโครงข่ายได้ในบางกรณี โดยกลไกการแบ่งเวลาคือการแบ่งช่วงเวลาการส่งสัญญาณออกเป็นสองช่วงในแต่ละคาบการส่งสัญญาณ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 นั่นคือผู้ใช้ i สามารถเลือกใช้กำลังส่งได้สองค่า คือ $p_{i,\mathrm{a}}$ และ $p_{i,\mathrm{b}}$ โดยหากคาบคาบหนึ่งมีความยาวหนึ่งหน่วย ผู้ใช้จะใช้กำลังส่ง $p_{i,\mathrm{a}}$ ในช่วงเวลา T แรก จากนั้นจะส่งด้วยกำลัง $p_{i,\mathrm{b}}$ เป็นเวลา $1-T$ ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันผลประโยชน์ของผู้เล่นเปลี่ยนจากสมการ (4.2) และ (4.5) มาเป็น

$$\bar{u}_i(p_{i,\mathrm{a}}; p_{-i,\mathrm{a}}; p_{i,\mathrm{b}}; p_{-i,\mathrm{b}}) = Tu_{i,\mathrm{a}}(p_{i,\mathrm{a}}; p_{-i,\mathrm{a}}) + (1-T)u_{i,\mathrm{b}}(p_{i,\mathrm{b}}; p_{-i,\mathrm{b}}) \quad ,\forall i \tag{4.12}$$

เมื่อ $u_{i,\mathrm{a}}$ คือค่าผลประโยชน์สำหรับช่วงเวลา T แรกของผู้เล่น i ซึ่งถูกกำหนดโดยสมการ (4.2) และสมการ (4.5) สำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิและผู้ใช้ทุติยภูมิตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน $u_{i,\mathrm{b}}$ คือค่าผลประโยชน์สำหรับช่วงเวลา $1-T$ หลัง ที่ถูกกำหนดโดยสมการ (4.2) และ (4.5) ทำให้ได้แบบจำลองเกม

$$\boldsymbol{G} = \left(\{1,\ldots,N\}, [0,p_1^{\max}]^2 \times \cdots \times [0,p_N^{\max}]^2, \{\bar{u}_1,\ldots,\bar{u}_N\}\right) \tag{4.13}$$

โดยค่าความจุของแชนนอนที่ผู้เล่นแต่ละคนได้รับมีค่าเป็น

$$\bar{c}_i = Tc_{i,\mathrm{a}} + (1-T)c_{i,\mathrm{b}} \quad ,\forall i \tag{4.14}$$

เมื่อ $c_{i,\mathrm{a}}$ และ $c_{i,\mathrm{b}}$ คือค่าความจุของแชนนอนสำหรับผู้ใช้ i ตามสมการ (4.9) ในช่วงเวลา T แรกและ $1-T$ หลัง ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกับเกมในสมการ (4.6) เราจะแบ่งเกมในสมการ (4.13) ออกเป็นสองกรณีตามวิธีการหาผลลัพธ์ของเกม โดยกรณีแรกกำหนดให้เกมดังกล่าวเป็นเกมที่มีการร่วมมือกันซึ่งผู้เล่นเลือกกลยุทธ์ร่วมกันเพื่อทำให้ผลรวมของผลประโยชน์สูงสุด และกรณีที่สองซึ่งกำหนดให้เป็น

เกมที่มีการร่วมมือกันที่ผู้เล่นเลือกกลยุทธ์ร่วมกันเพื่อทำให้ผลคูณของผลประโยชน์สูงสุด โดยค่าผลประโยชน์ของผู้เล่นแต่ละคนไม่ต่ำกว่าศูนย์

4.4.1 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \sum_{i=1}^{N} \bar{u}_i \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq p_{i,\mathrm{a}} \leq p_i^{\max} \\ & 0 \leq p_{i,\mathrm{b}} \leq p_i^{\max} \end{aligned} \tag{4.15}$$

4.4.2 กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \prod_{i=1}^{N} \bar{u}_i \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq p_{i,\mathrm{a}} \leq p_i^{\max} \\ & 0 \leq p_{i,\mathrm{b}} \leq p_i^{\max} \\ & \bar{u}_i \geq 0 \end{aligned} \tag{4.16}$$

ซึ่งทั้งสองกรณีจะให้ผลลัพธ์ในทำนองเดียวกับเกมในสมการ (4.6) แต่จะให้เขตผลประโยชน์ที่กว้างกว่า และส่งผลให้ผลลัพธ์ของเกมซึ่งอยู่บนขอบพาเรโตดีขึ้น ทั้งนี้ผลลัพธ์ของเกมดังกล่าวยังคงสอดคล้องกับ DPCPC เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีการแบ่งเวลา โดยเป็นไปตามตามอสมการ (2.5) และ (2.6) และไม่ทำให้เกิดอสมการ (2.7)

4.5 แบบจำลองเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน

ในสถานการณ์จริง การควบคุมกำลังส่งด้วยเกมที่มีการร่วมมือกันดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นอาจทำได้ยาก เนื่องจากผู้ใช้แต่ละคนในโครงข่ายจะต้องตกลงกันเพื่อเลือกค่ากำลังส่งที่สอดคล้องกันและให้ผลประโยชน์แก่โครงข่ายมากที่สุด ส่งผลให้ผู้ใช้แต่ละคนจำเป็นต้องทราบถึงข้อมูลต่าง ๆ ของผู้ใช้อื่น อาทิเช่น ค่าอัตราขยายและค่ากำลังส่ง ดังนั้นโครงข่ายอาจต้องอยู่ในรูปของโครงข่ายแบบรวมศูนย์ (centralized network) ซึ่งมีหน่วยประมวลผลกลางทำหน้าที่รับส่งผ่านข้อมูลต่าง ๆ ระหว่างผู้ใช้ทุกคนในโครงข่าย หากโครงข่ายมีขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อนมาก การควบคุมกำลังส่งด้วยเกมที่มีการร่วมมือกันก็จะทำได้ยากขึ้นเช่นเดียวกัน

เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงออกแบบแบบจำลองเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน ซึ่งผู้เล่นแต่ละคนในเกมสามารถคำนวณหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมของตนเองได้ ทำให้การควบคุมกำลังส่งด้วยเกมในลักษณะนี้ สามารถนำไปใช้กับโครงข่ายที่อยู่ในรูปของโครงข่ายแบบกระจาย (distributed network) ได้

ในทำนองเดียวกับเกมที่มีการร่วมมือกัน กำหนดให้ผู้เล่นเป็นผู้ใช้หรือคู่รับส่งสัญญาณในโครงข่าย และกำหนดให้กลยุทธ์ของผู้เล่นแต่ละคนเป็นค่ากำลังส่ง p_i ของผู้เล่นนั้น ๆ โดยมีค่าผลประโยชน์สำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิเป็น

$$u_i(p_i; p_{-i}) = \exp(p_i^{\max}) - \exp(p_i) - \exp(\alpha(\gamma_i^{\text{req}} - \gamma_i)) \quad , \forall i \in \mathrm{P} \tag{4.17}$$

เมื่อ $\alpha \in \mathrm{R}^+$ เป็นจำนวนมีค่ามากค่าหนึ่ง

$$\gamma_i = \frac{p_i g_{ii}}{\sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} p_j g_{ji} + \sigma^2} \quad , \forall i \tag{4.18}$$

และ

$$\gamma_i^{\text{req}} = 2^{(c_i^{\text{req}})} - 1 \quad , \forall i \in \mathrm{P} \tag{4.19}$$

แต่สำหรับค่าผลประโยชน์ของผู้ใช้ทุติยภูมิ เนื่องจากในเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน ผู้เล่นแต่ละคนจะเลือกกลยุทธ์อย่างเห็นแก่ตัวเพื่อเพิ่มผลประโยชน์แก่ตนเองให้มากที่สุดโดยไม่สนใจผู้เล่นอื่น หากใช้ค่าผลประโยชน์ตามสมการ (4.5) เช่นเดียวกับเกมที่มีการร่วมมือกัน จะส่งผลให้ผู้ใช้ทุติยภูมิแต่ละคนเลือกใช้ค่ากำลังส่งเป็นค่ากำลังส่งสูงสุด $p_i^{\max}$ ในทุกกรณี ดังนั้นในเกมที่ไม่มีการร่วมมือกันนี้ ค่าผลประโยชน์สำหรับผู้ใช้ทุติยภูมิจะถูกเปลี่ยนเป็น

$$u_i(p_i; p_{-i}) = \log_2(\gamma_i) - \omega \sum_{j\in \mathrm{P}} \log_2(1 + p_i g_{ij}) \quad , \forall i \in \mathrm{S} \tag{4.20}$$

เมื่อ $\omega \in \mathrm{R}^+$ เป็นค่าเพื่อเพิ่มน้ำหนักของต้นทุนสำหรับผู้ใช้ทุติยภูมิ โดยกำหนดให้เป็นค่าต่ำสุดที่ยังคงทำให้โครงข่ายสามารถรักษาคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิไว้ได้ ดังนั้นแบบจำลองเกมนี้จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการ (2.1) ได้เป็น

$$\boldsymbol{G} = (\{1, \ldots, N\}, [0, p_1^{\max}] \times \cdots \times [0, p_N^{\max}], \{u_1, \ldots, u_N\}) \tag{4.21}$$

โดยมีเขตผลประโยชน์เป็น

$$\mathcal{U} = \bigcup_{0\leq p_1 \leq p_1^{\max}, \ldots, 0 \leq p_N \leq p_N^{\max}} \{(u_1, \ldots, u_N)\} \tag{4.22}$$

ค่าผลประโยชน์ของผู้ใช้ปฐมภูมิในสมการ (4.17) เป็นสมการเดียวกันกับค่าผลประโยชน์ของผู้ใช้ปฐมภูมิของเกมที่มีการร่วมมือกันในสมการ (4.2) และมีผลต่อเกมในลักษณะเดียวกันคือ สองพจน์แรกในฝั่งขวาของสมการจะทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิเลือกใช้ค่ากำลังส่งที่ต่ำที่สุด ในขณะที่พจน์ที่สามในฝั่งขวาจะทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิเลือกใช้กำลังส่งที่ทำให้ตนเองได้รับค่า SINR ไม่น้อยไปกว่าค่า SINR ขั้นต่ำซึ่งเป็นการรับรองคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำหรือความจุของแชนนอนขั้นต่ำของผู้ใช้ปฐมภูมินั่นเอง

สำหรับค่าผลประโยชน์ของผู้ใช้ทุติยภูมิในสมการ (4.20) จะแตกต่างจากสมการ (4.5) ของเกมที่มีการร่วมมือกัน โดยในพจน์แรกมีลักษณะคล้ายค่าความจุของแชนนอนหรือค่าผลประโยชน์ของกรณีเกมที่มีการร่วมมือกัน แต่ถูกเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพื่อทำให้ผู้ใช้ทุติยภูมิที่ส่งสัญญาณด้วยกำลังใกล้ศูนย์ ได้รับค่าผลประโยชน์ติดลบมหาศาล ดังนั้นผู้ใช้ทุติยภูมิจะพยายามส่งสัญญาณด้วยกำลังค่าหนึ่ง ๆ ที่มากกว่าศูนย์เสมอ นอกจากนี้ยังได้เพิ่มพจน์ของต้นทุนสำหรับค่าผลประโยชน์เข้าไป โดยต้นทุน

ดังกล่าวมีค่าเป็นค่าน้ำหนัก ω คูณด้วยกำลังของสัญญาณรบกวนรวมจากเครื่องส่งสัญญาณของผู้ใช้ทุติยภูมินั้น ๆ ไปยังเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้ปฐมภูมิอื่น ๆ ในโครงข่าย ดังนั้นค่าผลประโยชน์นี้มีผลให้ผู้ใช้ทุติยภูมิไม่สามารถเลือกใช้ค่ากำลังส่งที่สูงเกินไปได้ เนื่องจากจะทำให้ต้นทุนมีค่าสูงและเสียผลประโยชน์ไป ทั้งนี้เนื่องจากค่าน้ำหนัก ω จะต้องมีค่ามากพอเพื่อรักษาคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิ ผู้ใช้ปฐมภูมิจึงควรเป็นผู้กำหนดค่าดังกล่าว และโครงข่ายอาจจำเป็นต้องมีช่องทางที่จะส่งผ่านค่าดังกล่าวจากผู้ใช้ปฐมภูมิไปยังผู้ใช้ทุติยภูมิ

ด้วยเกมตามสมการ (4.21) ผู้เล่นแต่ละคนจะเลือกใช้แผนการเล่นแบบการตอบสนองที่ดีที่สุด (best response) กล่าวคือ ผู้เล่นแต่ละคนจะเลือกใช้ค่ากำลังส่งที่ทำให้ตนเองได้รับผลประโยชน์มากที่สุด ซึ่งจะทำให้เกมลู่เข้าสู่จุดสมดุลของแนช และได้มาซึ่งค่ากำลังส่งที่ต้องการ

4.6 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงเงื่อนไขและหลักการสำหรับการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ นั่นคือผู้ใช้ปฐมภูมิจะต้องได้รับคุณภาพการให้บริการหรือความจุของแชนนอนที่ไม่ต่ำกว่าค่าที่ต้องการ และได้นำหลักการ DPCPC มาเป็นหลักการในการแปรค่ากำลังส่งของผู้ใช้แต่ละคน จากนั้นจึงได้สร้างแบบจำลองเกมเพื่อใช้ควบคุมกำลังส่งให้สอดคล้องกับเงื่อนไขและหลักการดังกล่าว โดยการกำหนดนิยามของผู้เล่น กลยุทธ์ และผลประโยชน์ โดยได้แบ่งผู้เล่นเป็นสองกลุ่ม คือ ผู้ใช้ปฐมภูมิและผู้ใช้ทุติยภูมิ ซึ่งผู้เล่นแต่ละในกลุ่มจะมีฟังก์ชันค่าผลประโยชน์ที่แตกต่างกัน สำหรับกลยุทธ์ของเกมจะถูกกำหนดให้เป็นค่ากำลังส่งที่ผู้ใช้นั้น ๆ ใช้ในการส่งสัญญาณ ดังนั้นเมื่อหาผลลัพธ์ของเกมหรือกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับผู้เล่นแต่ละคนได้ ก็จะหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้แต่ละคนได้เช่นกัน ทั้งนี้ได้สร้างแบบจำลองเกมในสองรูปแบบ คือ เกมที่มีการร่วมมือกันและเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน โดยเกมที่มีการร่วมมือกันได้ถูกแบ่งเป็นสองกรณีย่อยคือ กรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ และกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ นอกจากนี้ยังได้นำกลไกการแบ่งเวลามาประยุกต์ใช้ในเกมที่มีการร่วมมือกันเพื่อลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายอีกด้วย สำหรับผลการทดลองของการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ด้วยแบบจำลองเกมในบทนี้ จะถูกแสดงไว้ในบทที่ 5

บทที่ 5

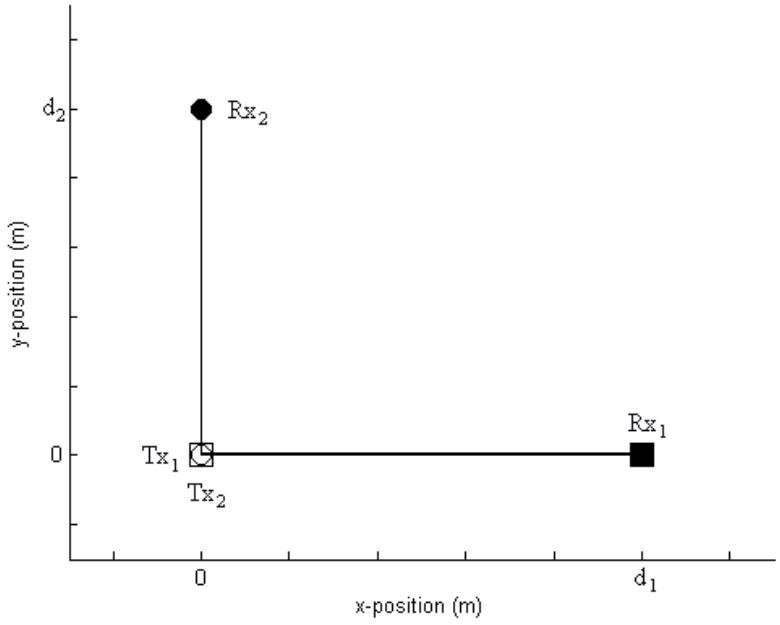
ผลลัพธ์เชิงตัวเลข

ในบทนี้จะแสดงผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ ด้วยแบบจำลองเกมที่เสนอไว้ ทั้งเกมที่มีการร่วมมือกันและเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน โดยจะพิจารณาโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลงที่ประกอบไปด้วยคู่ส่งรับสัญญาณ ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเกาส์เซียนที่มีกำลังสัญญาณรบกวน (noise power) เป็น 10^{-6} วัตต์ซึ่งเป็นค่า โดยเครื่องส่งในโครงข่ายเป็นเครื่องส่งสัญญาณภายในอาคารที่มีขีดความสามารถเท่า ๆ กัน ซึ่งสามารถส่งสัญญาณได้ด้วยกำลังสูงสุด 200 มิลลิวัตต์ หรือ $p_i^{\max} = p^{\max} = 0.2$ วัตต์ และมีค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณที่คำนวณจากสูตรการสูญเสียกำลังในอวกาศว่าง (free-space path loss) อย่างง่าย

$$g_{ji} = \frac{1}{d_{ji}^2} \tag{5.1}$$

เมื่อ d_{ji} คือระยะห่างระหว่างเครื่องส่งของผู้ใช้ j และเครื่องรับของผู้ใช้ i หากวิเคราะห์โครงข่ายดังกล่าวด้วยทฤษฎีเกม แล้วสร้างแบบจำลองเกมที่มีการร่วมมือกันตามสมการ (4.6) และแบบจำลองเกมที่ไม่มีการร่วมมือกันตามสมการ (4.21) โดยให้ $\alpha = 10^8$ เพื่อไม่ให้ค่าความจุของแชนนอนที่ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับมีค่าต่ำกว่าความจุของแชนนอนที่ต้องการ

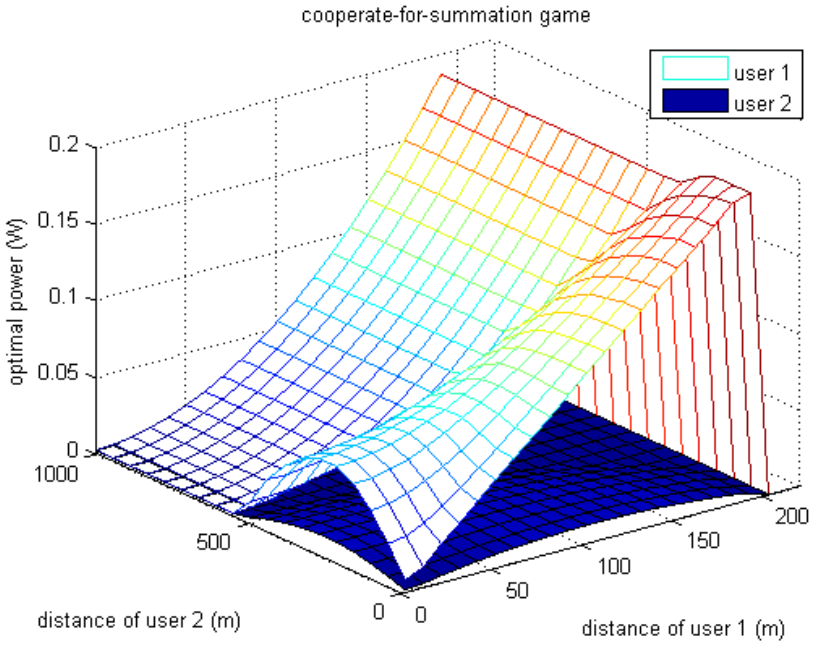
5.1 การทดลองที่ 1 ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของผู้ใช้



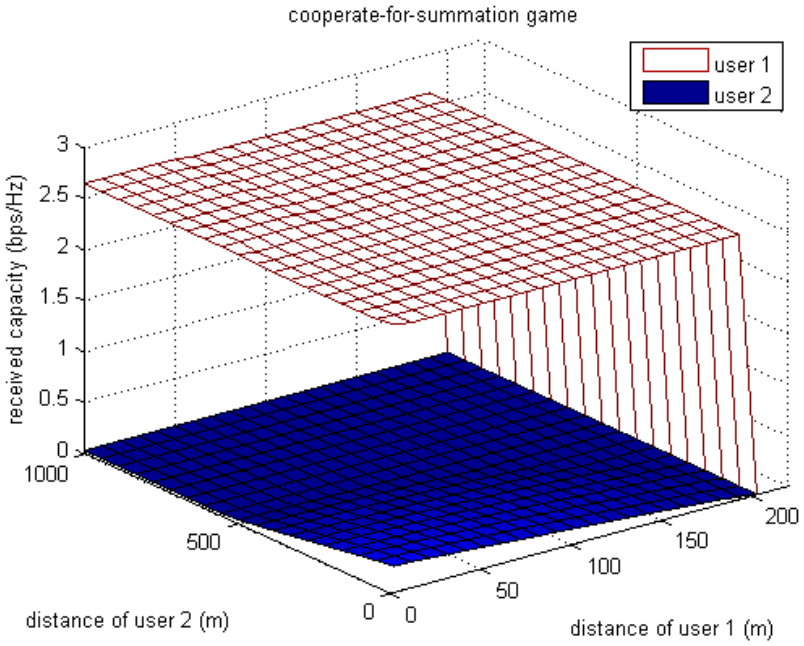
รูปที่ 5.1: โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 1 ซึ่งมีการเปลี่ยนตำแหน่งของผู้ใช้ทั้งสอง

พิจารณาโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลงที่ประกอบไปด้วยคู่ส่งรับสัญญาณจำนวน 2 คู่ ซึ่งมีเครื่องส่งสัญญาณอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน โดยผู้ใช้ 1 เป็นผู้ใช้ปฐมภูมิที่ต้องการ SINR ขั้นต่ำเป็น 5 และผู้ใช้ 2 เป็นผู้ใช้ทุติยภูมิ ซึ่งจะได้ว่า $\mathrm{P} = \{1\}$, $c_1^{\mathrm{req}} = 2.5850$ บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์และ $\mathrm{S} = \{2\}$ โดยในการทดลองนี้ จะเปลี่ยนตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้แต่ละคน จากตำแหน่งใกล้กับเครื่องส่งออกไปยังตำแหน่งไกลจากเครื่องส่ง ตามโครงข่ายซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 เมื่อเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้ 1 ซึ่งเป็นผู้ใช้ปฐมภูมิอยู่ห่างจากเครื่องส่งสัญญาณเป็นระยะ d_1 เมตร ในขณะที่ผู้ใช้ 2 ซึ่งเป็นผู้ใช้ทุติยภูมิมีเครื่องรับสัญญาณอยู่ห่างจากเครื่องส่งสัญญาณเป็นระยะ d_2 เมตร หากแปรค่า d_1 ดังกล่าวจากน้อยไปมากจะทำให้ค่าอัตราขยาย g_{11} และ g_{21} ลดลงตามสมการ $g_{11} = g_{21} = 1/d_1^2$ ในทำนองเดียวกัน การแปรค่า d_2 จากน้อยไปมากจะทำให้ค่าอัตราขยาย g_{12} และ g_{22} ลดลงตามสมการ $g_{12} = g_{22} = 1/d_2^2$

ในกรณีที่ควบคุมกำลังโดยใช้เกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ ตามเกมในสมการ (4.6) และการหาค่าเหมาะสมใน (4.10) จะได้ค่ากำลังส่งที่เหมาะสมและค่าความจุของแชนนอนของผู้ใช้ทั้งสองสำหรับระยะต่าง ๆ ของ d_1 และ d_2 ดังแสดงในรูปที่ 5.2-5.3 ซึ่งเห็นได้ว่าค่ากำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิ p_1^* สำหรับระยะ d_2 ต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่าง d_1 ที่มากขึ้น จนถึงช่วงที่ระยะ d_1 มีค่าเป็น 200 เมตร ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้ปฐมภูมิได้รับความจุของแชนนอนเป็นค่าความจุของแชนนอนที่ต้องการ แต่หลังจากช่วงที่ระยะ d_1 มีค่าเป็น 200 เมตร โครงข่ายนี้จะไม่สามารถรักษาค่าความจุขั้นต่ำที่ผู้ใช้ปฐมภูมิต้องการไว้ได้ เป็นผลให้โครงข่ายดังกล่าวเป็นโครงข่ายที่ไม่สามารถปฏิบัติได้ (infeasible) ส่วนกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้ทุติยภูมิ p_2^* ที่ระยะ d_2 ต่ำ ๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะ d_1 ในช่วงแรก เนื่องจากผู้ใช้ปฐมภูมิใช้กำลังส่งมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนที่ผู้ใช้ทุติยภูมิมากขึ้น ผู้ใช้ทุติยภูมิจึงต้องส่งสัญญาณด้วยกำลังที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ความจุของแชนนอนที่คุ้มค่า แต่ในช่วงหลังที่ระยะ d_1 มีค่ามาก ผู้ใช้ทุติยภูมิจะส่งสัญญาณด้วยกำลังต่ำลงและ



รูปที่ 5.2: กำลังส่งที่เหมาะสมในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์

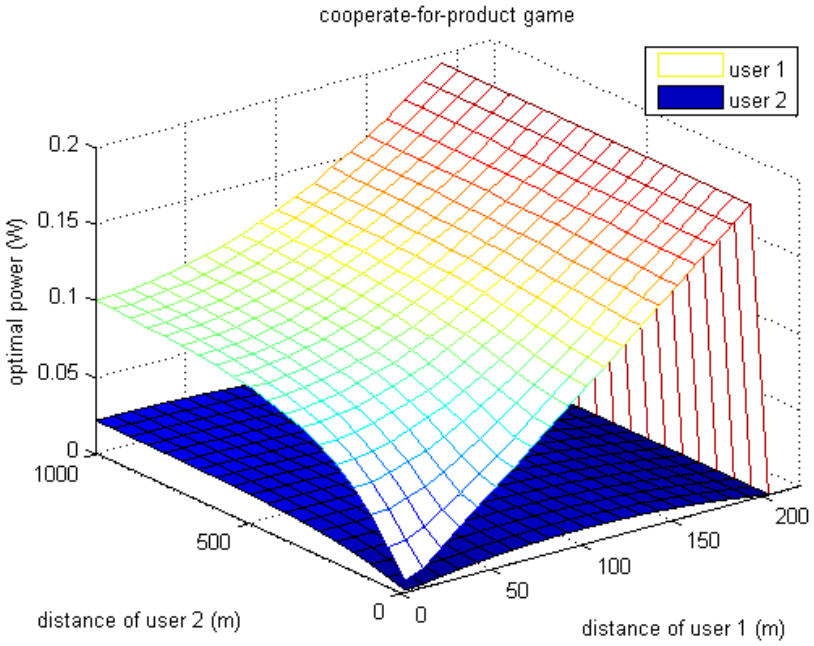


รูปที่ 5.3: ความจุของแชนนอนในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์

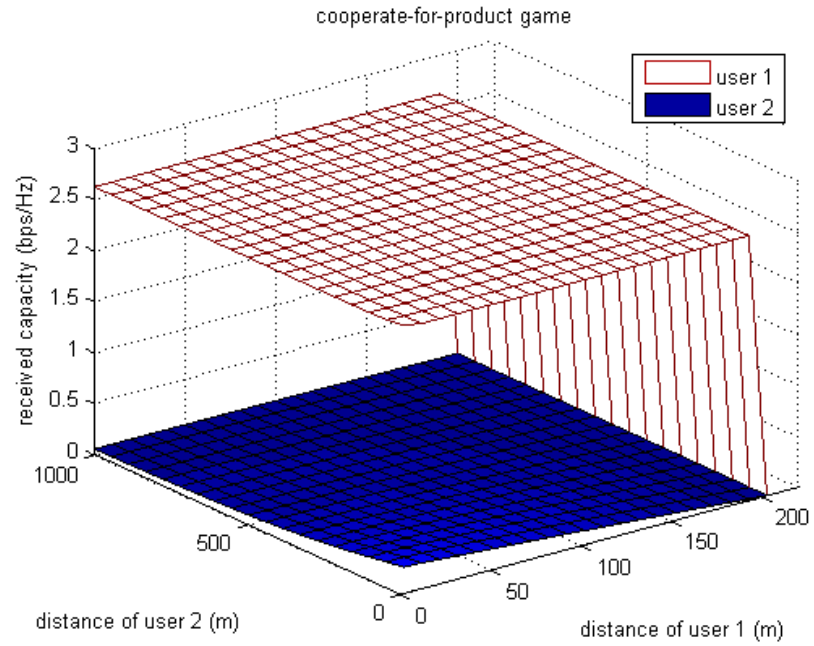
ลดลงตามระยะ d_1 เพื่อไม่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิมากจนเกินไป สำหรับช่วงที่ระยะ d_2 มีค่ามาก ผู้ใช้ทุติยภูมิจะส่งสัญญาณด้วยกำลัง $p_2^* = 0$ วัตต์ หรือไม่ส่งสัญญาณเลยนั่นเอง ส่งผลให้ค่าความจุของแชนนอนสำหรับผู้ใช้ทุติยภูมิมีค่าเป็นศูนย์ และทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิส่งสัญญาณด้วยค่ากำลังซึ่งต่ำที่สุดที่ยังคงให้ค่าความจุของแชนนอนที่ต้องการ

สำหรับกรณีที่ให้ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ตามเกมในสมการ (4.6) และการหาค่าเหมาะสมใน (4.11) จะให้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.4-5.5 ซึ่งสังเกตได้ว่าการเพิ่มระยะ d_1 ให้ผลลัพธ์ในทำนองเดียวกับกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ แต่มีผลกระทบจากการเพิ่มระยะ d_2 ที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มระยะ d_2 จะไม่ส่งผลให้ผู้ใช้ทุติยภูมิลดค่ากำลังส่ง p_2^* จนเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของเกมในทำนองเดียวกับผลการต่อรองของแนช (Nash bargaining solution) ที่ผู้เล่นแต่ละคนในเกมจะต้องได้รับผลประโยชน์ที่ไม่น้อยจนเกินไป ดังนั้นในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์นี้ จะทำให้เกิดความยุติธรรม (fairness) ระหว่างผู้เล่นมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิมากขึ้น ผู้ใช้ปฐมภูมิจึงต้องใช้ค่ากำลังส่ง p_1^* ที่มากขึ้นเพื่อรักษาค่าความจุของแชนนอนที่ต้องการไว้

ส่วนกรณีที่ควบคุมกำลังส่งโดยใช้เกมที่ไม่มีการร่วมมือกันดังเกมในสมการ (4.21) จะได้ค่ากำลังส่งที่เหมาะสมและค่าความจุของแชนนอนสำหรับผู้ใช้ทั้งสอง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.6-5.7 จากผลลัพธ์ดังกล่าว ค่ากำลังส่งที่เหมาะสมของผู้ใช้ปฐมภูมิ p_1^* มีค่าเป็นค่ากำลังส่งสูงสุด 0.2 วัตต์สำหรับทุกค่าของ d_1 และd_2 เว้นแต่กรณีที่ระยะห่างของผู้ใช้ปฐมภูมิ d_1 มีค่ามากกว่า 200 เมตร ซึ่งเป็นช่วงที่โครงข่ายไม่มีทางรักษาความจุของแชนนอนขั้นต่ำของผู้ใช้ปฐมภูมิไว้ได้ ส่วนค่ากำลังส่งของผู้ใช้ทุติยภูมิ p_2^* มีค่าลดลงตามระยะทาง d_1 ที่เพิ่มขึ้น จนมีค่าเป็น 0 วัตต์ในที่สุด ในขณะที่ระยะห่างของผู้ใช้ทุติยภูมิ d_2 ไม่ส่งผลต่อกำลังส่งที่เหมาะสมของผู้ใช้ทุติยภูมิ p_2^* โดยการควบคุมกำลังส่งในลักษณะนี้จะทำให้ผู้ใช้ทั้งสองได้รับค่าความจุของแชนนอนใน



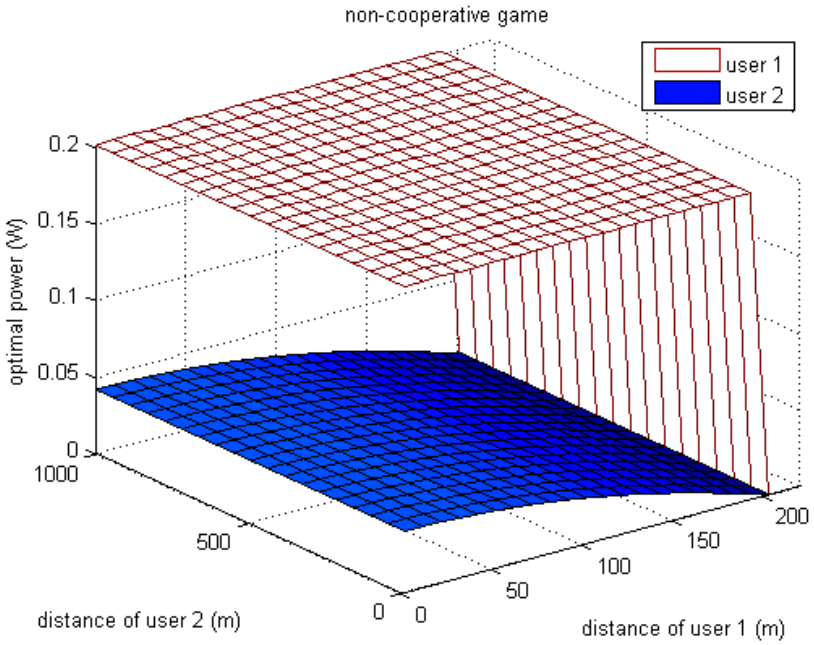
รูปที่ 5.4: กำลังส่งที่เหมาะสมในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์



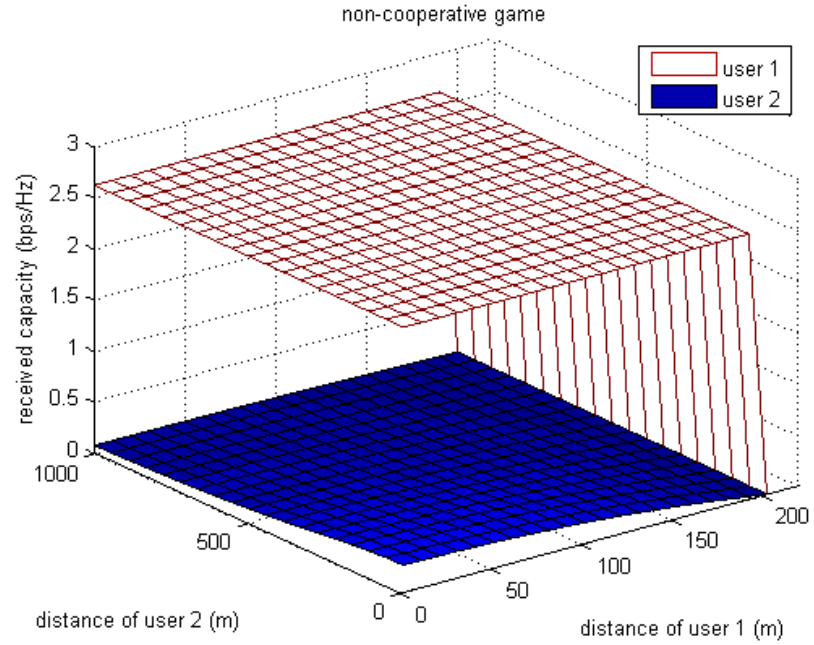
รูปที่ 5.5: ความจุของแชนนอนในเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์

ทำนองเดียวกับกรณีของเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ กล่าวคือผู้ใช้ปฐมภูมิจะได้รับค่าความจุของแชนนอนที่ต้องการเสมอ เว้นแต่กรณีที่ระยะห่างของผู้ใช้ปฐมภูมิ d_1 มีค่ามากกว่า 200 เมตร ส่วนผู้ใช้ทุติยภูมิจะได้รับค่าความจุของแชนนอนที่ต่ำลงตามระยะทาง d_1 และ d_2 ที่เพิ่ม

ขึ้น โดยหากระยะ d_1 มีค่าถึง 200 เมตร ค่าความจุของแชนนอนของผู้ใช้ทุติยภูมิจะลดลงเป็นศูนย์ ในขณะที่การเพิ่มระยะ d_2 จะไม่ส่งผลให้ค่าความจุของแชนนอนของผู้ใช้ทุติยภูมิลดลงจนเป็นศูนย์



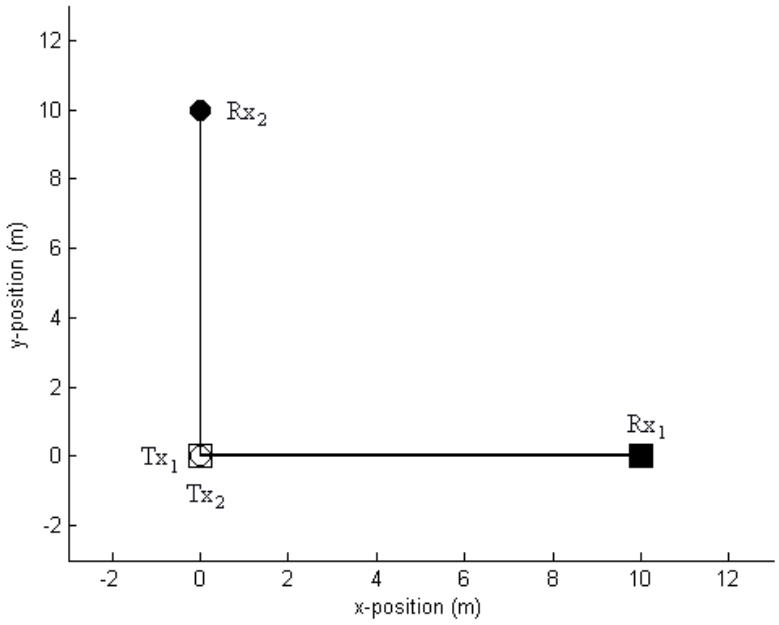
รูปที่ 5.6: กำลังส่งที่เหมาะสมในเกมที่ผู้เล่นไม่มีการร่วมมือกัน



รูปที่ 5.7: ความจุของแชนนอนในเกมที่ผู้เล่นไม่มีการร่วมมือกัน

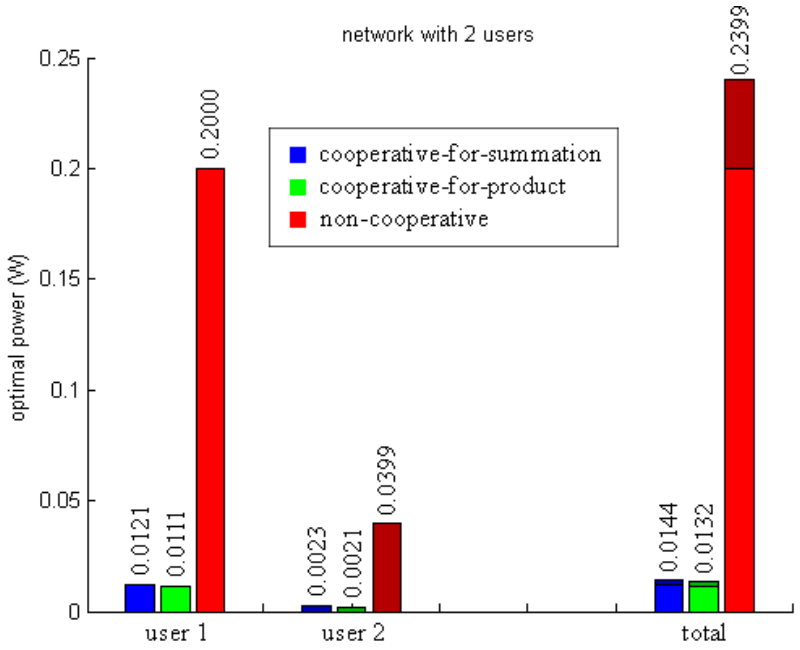
5.2 การทดลองที่ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้

5.2.1 โครงข่ายที่มีผู้ใช้ 2 คน

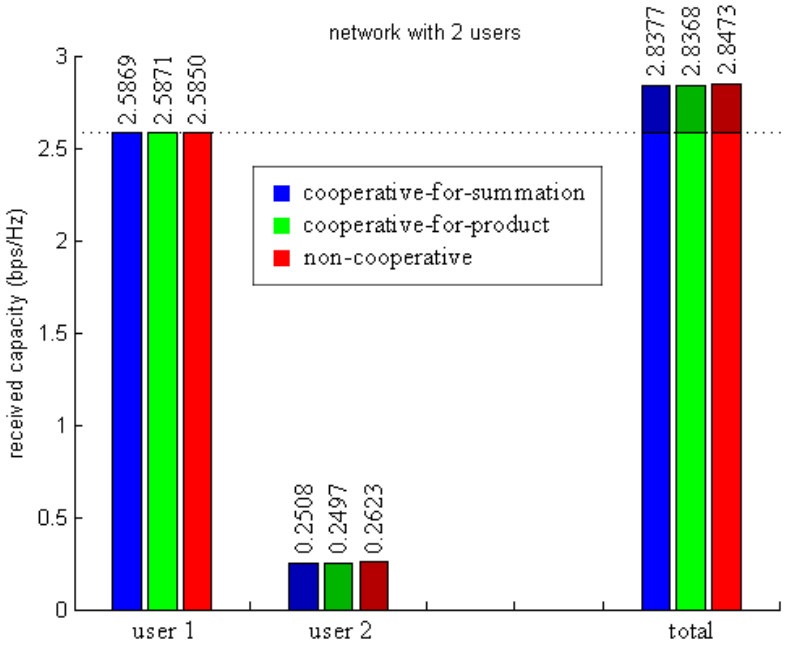


รูปที่ 5.8: โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 2 ซึ่งมีผู้ใช้ 2 คน

พิจารณาโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลงดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งประกอบไปด้วยคู่ส่งรับสัญญาณจำนวน 2 คู่ โดยมีเครื่องส่งสัญญาณอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน และเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้ทั้งสองอยู่ห่างจากเครื่องส่งสัญญาณ 10 เมตรเท่ากัน ในทำนองเดียวกับการทดลองแรก กำหนดให้ผู้ใช้ 1 เป็นผู้ใช้ปฐมภูมิที่ต้องการ SINR ขั้นต่ำเป็น 5 และผู้ใช้ 2 เป็นผู้ใช้ทุติยภูมิ ซึ่งจะได้ว่า $\mathrm{P} = \{1\}$, $c_1^{\mathrm{req}} = 2.5850$ บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์และ $\mathrm{S} = \{2\}$ เมื่อควบคุมกำลังด้วยเกมจะให้ผลลัพธ์เป็นค่ากำลังส่งที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 5.9 และความจุของแชนนอนที่ได้รับดังแสดงในรูปที่ 5.10 สำหรับทั้งในกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ กรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ และกรณีที่ไม่มีการร่วมมือกัน ซึ่งพบว่าในทั้งสามกรณี ผู้ใช้ 1 ซึ่งเป็นผู้ใช้ปฐมภูมิจะได้รับความจุของแชนนอนตามที่ต้องการ โดยในกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ จะให้ความจุรวมของโครงข่ายที่มากกว่ากรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์เล็กน้อย แต่จะใช้กำลังรวมในโครงข่ายมากกว่าเล็กน้อยเช่นกัน ในขณะที่กรณีที่ไม่มีการร่วมมือกัน โครงข่ายจะใช้กำลังส่งที่สูงกว่ากรณีที่มีการร่วมมือกันทั้งสองกรณีมาก โดยผู้ใช้ 1 ซึ่งเป็นผู้ใช้ปฐมภูมิจะส่งสัญญาณด้วยกำลังสูงสุด ส่งผลให้ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนในช่องสัญญาณลดต่ำลง และทำให้ค่าความจุรวมของโครงข่ายสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการร่วมมือกัน

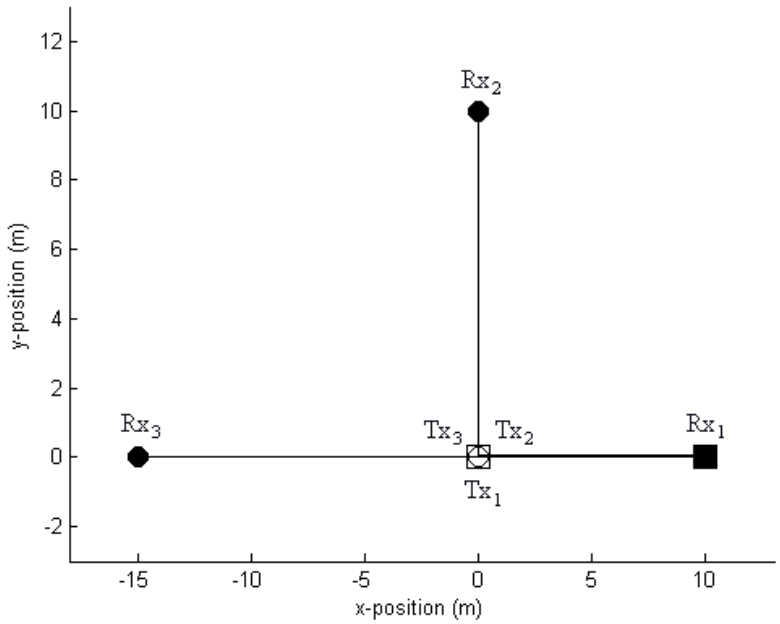


รูปที่ 5.9: กำลังส่งที่เหมาะสมในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 2 คน



รูปที่ 5.10: ความจุของแชนนอนที่ได้รับในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 2 คน

5.2.2 โครงข่ายที่มีผู้ใช้ 3 คน



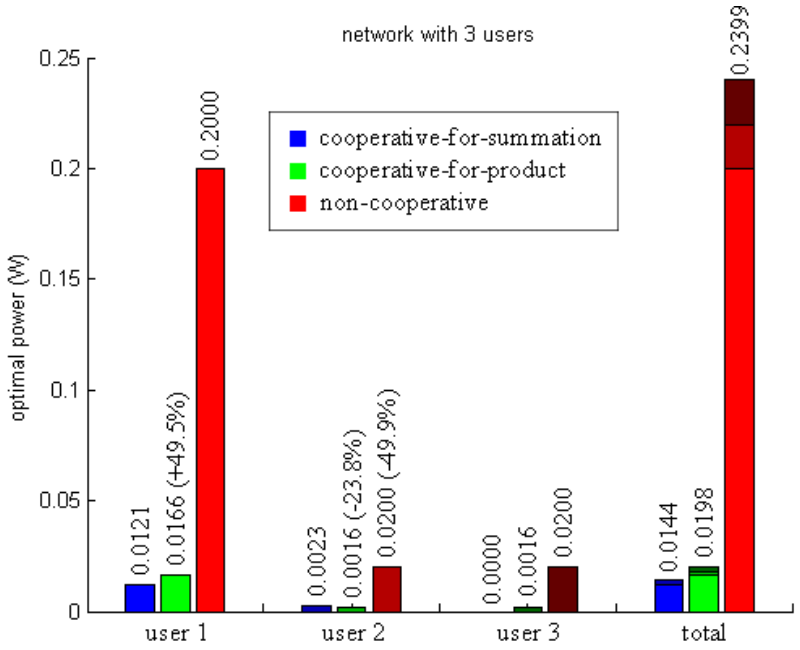
รูปที่ 5.11: โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 2 ซึ่งมีผู้ใช้ 3 คน

พิจารณาโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลงในรูปที่ 5.11 ซึ่งเกิดจากการเพิ่มผู้ใช้หนึ่งคนเข้าไปในโครงข่ายในรูปที่ 5.8 โดยกำหนดให้ผู้ใช้ 3 เป็นผู้ใช้ทุติยภูมิที่อยู่ห่างจากเครื่องส่ง 15 เมตร ซึ่งจะได้ว่า $\mathrm{P} = \{1\}$, $c_1^{\mathrm{req}} = 2.5850$ บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์และ $\mathrm{S} = \{2, 3\}$ ทำให้ค่ากำลังส่งและค่าความจุของแชนนอนของผู้ใช้ 1 และผู้ใช้ 2 เปลี่ยนแปลงไป ดังในรูปที่ 5.12-5.13 โดยมีค่าในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับขณะที่โครงข่ายมีผู้ใช้ 2 คน จากผลดังกล่าวสังเกตได้ว่ากรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์ ผู้ใช้ทุติยภูมิทั้งสองจะร่วมมือกันเลือกค่ากำลังส่งเพื่อทำให้ความจุรวมของโครงข่ายสูงสุด โดยในที่นี้ ผู้ใช้ 3 ซึ่งอยู่ไกลจากเครื่องส่งมากกว่าผู้ใช้ 2 เลือกที่จะไม่ส่งสัญญาณ ในขณะที่ผู้ใช้ปฐมภูมิจะใช้กำลังส่งที่เพียงพอเพื่อจะรักษาค่าความจุที่ต้องการไว้

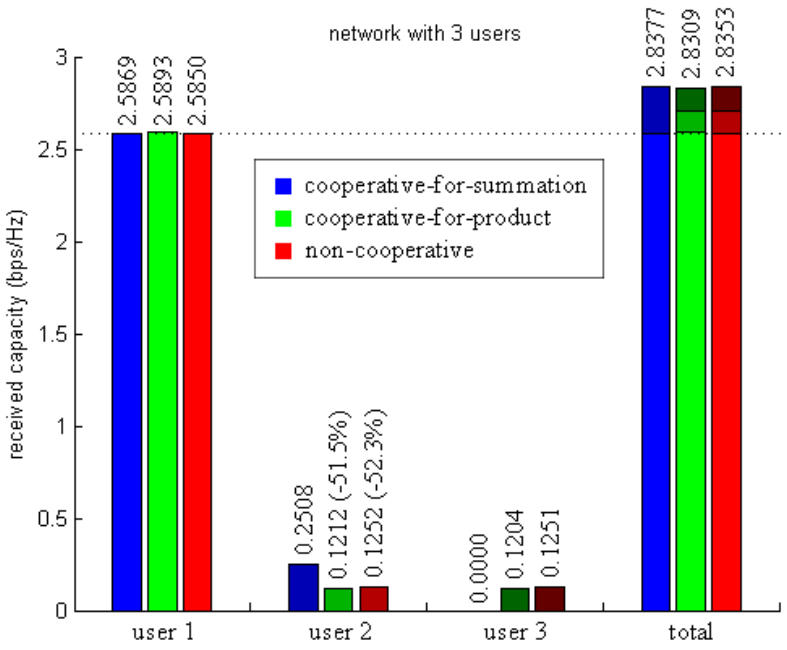
ส่วนในกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของผลประโยชน์ ผู้ใช้ 3 จะได้ส่งสัญญาณด้วย นั่นคือเกิดความยุติธรรมในหมู่ผู้ใช้ทุติยภูมิมากขึ้น แต่จะให้ความจุรวมของโครงข่ายต่ำกว่ากรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์เล็กน้อย ในขณะที่ผู้ใช้ปฐมภูมิจะเลือกใช้กำลังส่งที่เพียงพอเพื่อจะรักษาค่าความจุที่ต้องการไว้เช่นกัน

สำหรับกรณีที่ไม่มีการร่วมมือกันผู้ใช้ 1 ซึ่งเป็นปฐมภูมิยังคงส่งสัญญาณด้วยกำลังสูงสุดเช่นเดิม ในขณะที่ผู้ใช้ 2 ลดกำลังส่งลง เพื่อให้ผู้ใช้ 3 ได้เข้ามาใช้งานในโครงข่ายโดยไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ปฐมภูมิ ซึ่งพบว่ากรณีนี้ให้ความยุติธรรมในหมู่ผู้ใช้ทุติยภูมิเช่นเดียวกับกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือเพื่อผลคูณของผลประโยชน์ แต่จะให้ค่าความจุรวมของโครงข่ายที่มากกว่าเล็กน้อย ซึ่งมีสาเหตุจากการใช้ค่ากำลังส่งสูง ทำให้ผลกระทบของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนลดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังส่งที่เหมาะสมและความจุของแชนนอนที่ได้รับกับโครงข่ายที่มีผู้ใช้เพียง 2 คน พบว่า ในกรณีของเกมที่มีการร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์ ผู้ใช้ 3 ซึ่งเป็นผู้ใช้ที่เข้ามา



รูปที่ 5.12: กำลังส่งที่เหมาะสมในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 3 คน



รูปที่ 5.13: ความจุของแชนนอนที่ได้รับในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 3 คน

ใหม่เลือกที่จะไม่ส่งสัญญาณ ทำให้โครงข่ายอยู่ในสภาพเดิมเช่นเดียวกับขณะที่มีผู้ใช้เพียง 2 คน จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังส่งและความจุของแชนนอนของผู้ใช้ในโครงข่าย

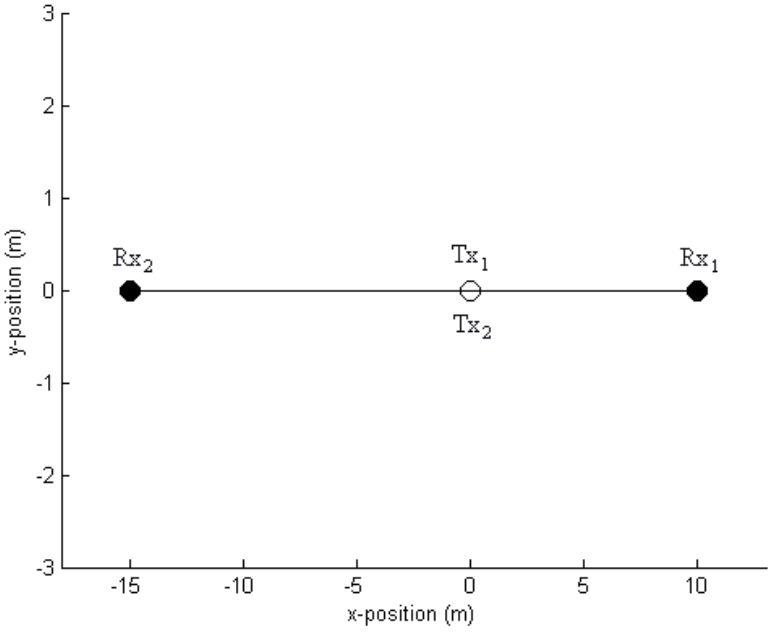
ในกรณีของเกมที่มีการร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ เมื่อมีผู้ใช้ 3 เข้ามาส่งสัญญาณ

ในโครงข่าย จะทำให้กำลังของสัญญาณรวบกวนรวมที่ผู้ใช้ 1 และผู้ใช้ 2 ได้รับ มีค่ามากขึ้น ผู้ใช้ 1 ซึ่งเป็นผู้ใช้ปฐมภูมิจึงใช้กำลังส่งที่สูงขึ้น ดังแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับขณะที่โครงข่ายมีผู้ใช้ 2 คน ไว้ในวงเล็บในรูปที่ 5.12 เพื่อรักษาความจุของแชนนอนที่ได้รับไม่ให้ต่ำไปกว่าความจุของแชนนอนที่ต้องการ ในขณะที่ผู้ใช้ 2 ซึ่งเป็นผู้ใช้ทุติยภูมิจะใช้กำลังส่งที่ต่ำลงและได้รับความจุของแชนนอนที่ต่ำลงเช่นกัน

ส่วนกรณีของเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน เมื่อมีผู้ใช้ 3 เข้ามาใช้งานในโครงข่าย พบว่าผู้ใช้ 2 จะลดกำลังส่งของตนเองอย่างมาก เพื่อให้กำลังของสัญญาณรบกวนรวมที่ผู้ใช้ 1 ได้รับ ไม่แตกต่างไปจากเดิม ส่งผลให้ผู้ใช้ 2 ได้รับค่าความจุของแชนนอนที่ต่ำลง ในขณะที่ค่ากำลังส่งและความจุของแชนนอนของผู้ใช้ 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เนื่องจากความจุของแชนนอนแปรไปในทางเดียวกับ SINR ดังนั้นผลลัพธ์ของการควบคุมกำลังส่งในทั้งสามกรณีจึงสอดคล้องกับอสมการ (2.5) ในสัจพจน์ข้อหนึ่ง และอสมการ (2.6) ในสัจพจน์ข้อสองของหลักการ DPCPC และเนื่องจากการควบคุมกำลังด้วยวิธีนี้สามารถรักษาคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำสำหรับผู้ใช้ปฐมภูมิ หรือไม่ทำให้เกิดอสมการ (2.7) ได้ จึงสอดคล้องกับสัจพจน์ข้อสามเช่นกัน เพราะฉะนั้นผลลัพธ์ของการควบคุมกำลังด้วยเกมตามสมการ (4.6) และ (4.21) ในการทดลองนี้จึงมีสอดคล้องกับหลักการ DPCPC ใน [5]

5.3 การทดลองที่ 3 ผลของการแบ่งเวลาในเกมที่มีการร่วมมือกัน



รูปที่ 5.14: โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 3 ซึ่งมีผู้ใช้ทุติยภูมิ 2 คน

สำหรับการใช้กลไกการแบ่งเวลาในโครงข่าย เพื่อให้เห็นผลลัพธ์และเขตผลประโยชน์ของเกมได้อย่างชัดเจน โครงข่ายที่พิจารณาจึงประกอบไปด้วยคู่ส่งรับสัญญาณทุติยภูมิ 2 คู่ ซึ่งจะได้แบบจำลองเกมเป็นเกมที่มีผู้เล่นสองคน (two-person game) ซึ่งสามารถแสดงเขตผลประโยชน์เป็นพื้นที่

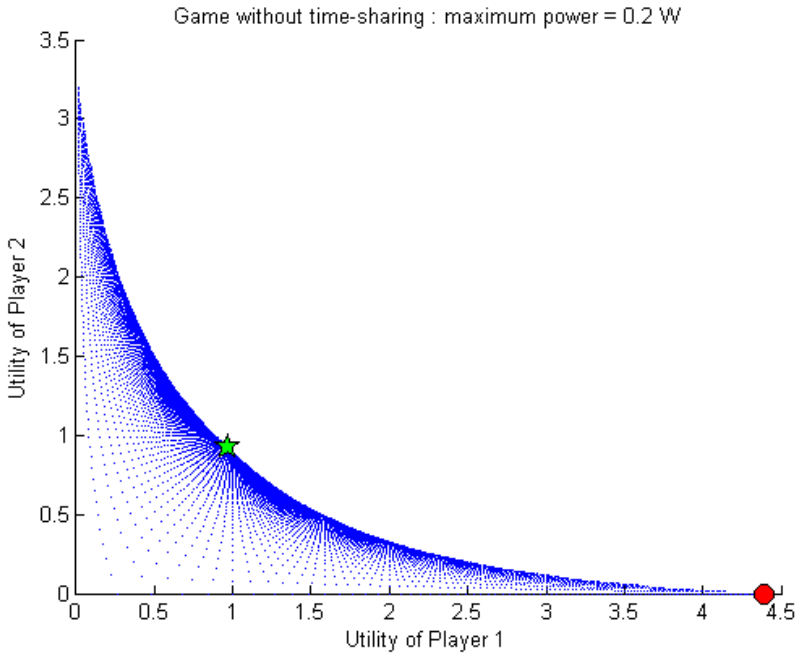
สองมิติได้ โดยพิจารณาโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลงในรูปที่ 5.14 เมื่อผู้ใช้ 1 และผู้ใช้ 2 เป็นผู้ใช้ทุติยภูมิ โดยหากควบคุมกำลังโดยไม่มีการแบ่งเวลาตามเกมที่มีการร่วมมือกันในสมการ (4.6) จะได้เขตผลประโยชน์ดังรูปที่ 5.15 และให้ผลลัพธ์ของเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์และผลคูณของผลประโยชน์ แสดงเป็นจุดรูปวงกลมและรูปดาวตามลำดับ แต่ถ้าใช้การแบ่งเวลาโดยการใช้แบบจำลองเกมในสมการ (4.13) ด้วย $T = 0.5$ หรือแบ่งเวลาแต่ละคาบออกเป็นสองช่วงที่ยาวเท่ากัน จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.16 โดยจุดรูปวงกลมและรูปดาวแสดงจุดเหมาะสมบนขอบพาเรโตซึ่งเป็นผลลัพธ์ของเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกัน เพื่อผลรวมของผลประโยชน์ และผลคูณของผลประโยชน์ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าเขตผลประโยชน์ขยายกว้างขึ้นกว่ากรณีที่ไม่มีการแบ่งเวลา ส่งผลให้ผลลัพธ์ของเกมซึ่งอยู่บนขอบพาเรโตดีขึ้นด้วย โดยค่ากำลังส่งที่เหมาะสมและค่าความจุของแชนนอนที่จุดเหมาะสมของผู้ใช้ทั้งสองสำหรับเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมผลประโยชน์ทั้งกรณีที่ไม่มีและมีการแบ่งเวลา ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งผลในส่วนนี้ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ณ จุดเหมาะสม ผู้ใช้ที่ 1 จะส่งสัญญาณด้วยกำลังสูงสุด 0.2 วัตต์ตลอดเวลา ในขณะที่ผู้ใช้ที่ 2 จะไม่ได้ส่งสัญญาณเลย ในทั้งสองกรณี ส่วนตารางที่ 5.2 แสดงผลของเกมที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์ทั้งกรณีที่ไม่มีและมีการแบ่งเวลา ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการแบ่งเวลา ความจุของแชนนอนที่ผู้ใช้ทั้งสองได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความจุรวมของโครงข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ตารางที่ 5.1: ผลของการแบ่งเวลา ในกรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของค่าผลประโยชน์

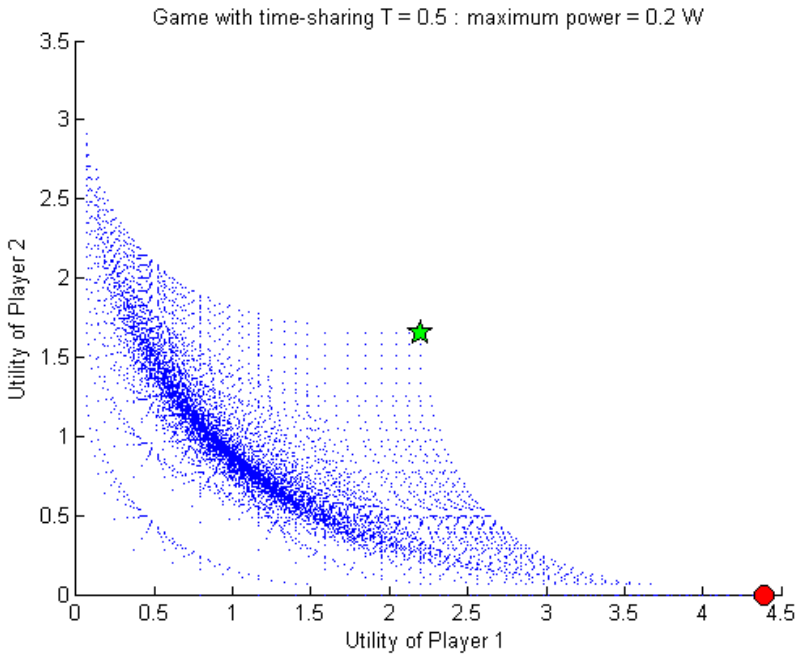
กรณีไม่มีการแบ่งเวลา	ผู้ใช้ 1	ผู้ใช้ 2	รวม
กำลังส่งที่เหมาะสม p_i^* (วัตต์)	0.200	0.000	0.200
ความจุของแชนนอนที่ได้รับ c_i^* (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	4.392	0.0000	4.392
กรณีมีการแบ่งเวลา	ผู้ใช้ 1	ผู้ใช้ 2	รวม
กำลังส่งที่เหมาะสม $(p_{i,\mathrm{a}}^*, p_{i,\mathrm{b}}^*)$ (วัตต์)	(0.200,0.200)	(0.000,0.000)	(0.200,0.200)
ความจุของแชนนอนที่ได้รับ $\bar{c}_i^*$ (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	4.392	0.000	4.392

ตารางที่ 5.2: ผลของการแบ่งเวลา ในกรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของค่าผลประโยชน์

กรณีไม่มีการแบ่งเวลา	ผู้ใช้ 1	ผู้ใช้ 2	รวม
กำลังส่งที่เหมาะสม p_i^* (วัตต์)	0.200	0.200	0.400
ความจุของแชนนอนที่ได้รับ c_i^* (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	0.965	0.925	1.890
กรณีมีการแบ่งเวลา	ผู้ใช้ 1	ผู้ใช้ 2	รวม
กำลังส่งที่เหมาะสม $(p_{i,\mathrm{a}}^*, p_{i,\mathrm{b}}^*)$ (วัตต์)	(0.000,0.200)	(0.200,0.000)	(0.200,0.200)
ความจุของแชนนอนที่ได้รับ $\bar{c}_i^*$ (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	2.196	1.653	3.849



รูปที่ 5.15: เขตผลประโยชน์และจุดเหมาะสมทั้งสองของการทดลองที่ 3 ที่ไม่มีการแบ่งเวลา

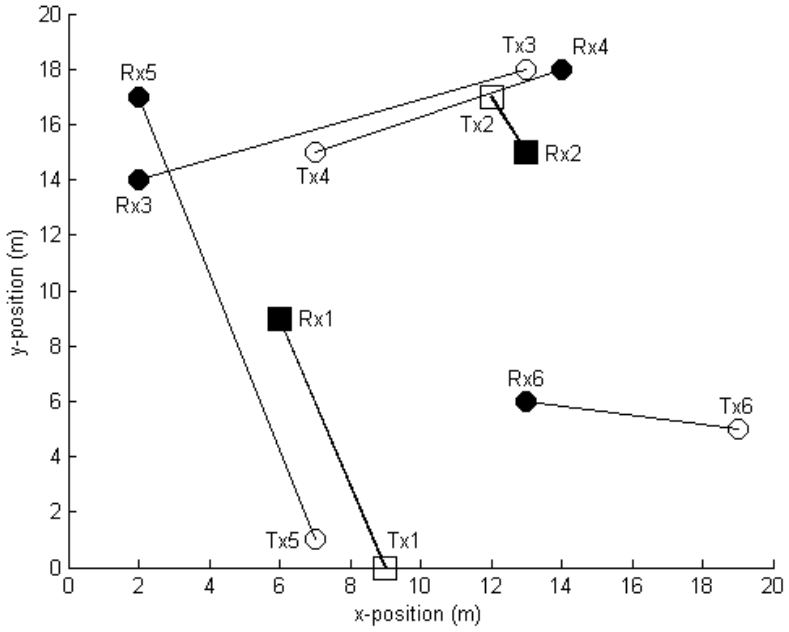


รูปที่ 5.16: เขตผลประโยชน์และจุดเหมาะสมทั้งสองของการทดลองที่ 3 ที่มีการแบ่งเวลา

ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมกำลังด้วยเกมที่มีการร่วมมือกันซึ่งมีการแบ่งเวลาตามสมการ (4.13) ใช้วิธีการควบคุมกำลังในแต่ละช่วงการแบ่งเวลาแบบเดียวกับเกมที่มีการร่วมมือกันตามสมการ (4.6) ดังนั้นการควบคุมกำลังในลักษณะนี้จึงยังคงสอดคล้องกับหลักการ DPCPC เช่นเดิม

5.4 การทดลองที่ 4 โครงข่ายที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

การทดลองนี้จะแสดงการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งหากใช้เกมที่มีการร่วมมือกัน จะจำเป็นต้องใช้เวลาค่อนข้างนานเพื่อการคำนวณหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสม แต่ด้วยเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน การคำนวณหาค่ากำลังส่งสามารถทำได้รวดเร็วกว่ามาก ดังนั้นการทดลองนี้จะใช้เกมที่ไม่มีการร่วมมือกันตามสมการ (4.21) เพื่อควบคุมกำลังส่ง โดยได้พิจารณาโครงข่ายวิทยุรับรู้ที่มีผู้ใช้ 6 คน โดยมีตำแหน่งของเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้แต่ละคนดังแสดงในรูปที่ 5.17 เมื่อผู้ใช้ 1 และผู้ใช้ 2 เป็นผู้ใช้ปฐมภูมิที่ต้องการ SINR ขั้นต่ำเป็น 3 ส่วนผู้ใช้ 3-6 เป็นผู้ใช้ทุติยภูมิ ซึ่งจะได้ว่า $\mathrm{P} = \{1, 2\}$, $c_1^{\mathrm{req}} = c_2^{\mathrm{req}} = 2$ บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์และ $\mathrm{S} = \{3, 4, 5, 6\}$ เมื่อควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายดังกล่าวด้วยเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน จะให้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.17: โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลองที่ 4 ซึ่งมีผู้ใช้ปฐมภูมิ 2 คนและผู้ใช้ทุติยภูมิ 4 คน

ตารางที่ 5.3: กำลังส่งที่เหมาะสมและความจุของแชนนอนที่ได้รับ ในโครงข่ายที่มีผู้ใช้ 6 คน

กรณีไม่มีการร่วมมือกัน	ผู้ใช้ 1	ผู้ใช้ 2	ผู้ใช้ 3	ผู้ใช้ 4	ผู้ใช้ 5	ผู้ใช้ 6
กำลังส่งที่เหมาะสม p_i^* (วัตต์)	0.2000	0.0223	0.0025	0.0054	0.0149	0.0230
ความจุของแชนนอนที่ได้รับ c_i^* (บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์)	2.0000	2.0003	0.0189	0.0173	0.0695	0.1929

จากผลการทดลองพบว่าผู้ใช้ 1 และผู้ใช้ 2 ซึ่งเป็นผู้ใช้ปฐมภูมิต่างก็ได้รับค่าความจุของแชนนอนเป็นค่าที่ต้องการ โดยผู้ใช้ที่ 1 ต้องใช้ค่ากำลังสูงสุดในการส่งสัญญาณ ขณะที่ผู้ใช้ 2 ใช้กำลังส่งต่ำกว่าเนื่องจากมีระยะห่างระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณที่น้อยกว่าผู้ใช้ 1

ในส่วนของผู้ใช้ทุติยภูมิพบว่า ยิ่งเครื่องส่งสัญญาณของผู้ใช้ทุติยภูมิอยู่ใกล้กับเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้ปฐมภูมิมาก กำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้ทุติยภูมินั้น ๆ จะยิ่งต่ำลงเพื่อมิให้เกิดสัญญาณรบกวนแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิมากจนเกินไป โดยค่าความจุของแชนนอนสำหรับผู้ใช้ทุติยภูมิแต่ละคนจะขึ้นอยู่กับกำลังส่งที่ใช้ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งสัญญาณกับเครื่องรับสัญญาณ และกำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้รับ

5.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอผลการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลงด้วยแบบจำลองเกมต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 รวมถึงการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วยเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน โดยจากผลการทดลองต่าง ๆ พบว่าการควบคุมกำลังส่งที่เสนอมีความสอดคล้องกับหลักการ DPCPC และสามารถรักษาคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิได้

โดยจากผลลัพธ์ของเกมที่มีการร่วมมือกัน กรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์จะให้ความสำคัญกับผู้ใช้ทุติยภูมิที่อยู่ใกล้สถานีฐาน มากกว่าผู้ใช้ทุติยภูมิที่อยู่ไกล โดยหากผู้ใช้ทุติยภูมิหรือผู้ใช้ปฐมภูมิอยู่ไกลจากสถานีฐาน ผู้ใช้ทุติยภูมิอาจไม่ได้ส่งสัญญาณเลย ส่วนกรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของผลประโยชน์ จะทำให้เกิดความยุติธรรมในหมู่ผู้ใช้มากกว่ากรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์ โดยผู้ใช้ทุกคนจะมีความจุของแชนนอนที่มากกว่าศูนย์ แต่อาจทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิต้องใช้กำลังส่งที่มากขึ้น นอกจากนี้การนำกลไกการแบ่งเวลามาประยุกต์ใช้กับการควบคุมกำลังส่งด้วยเกมที่มีการร่วมมือกัน อาจสามารถขยายเขตผลประโยชน์ของเกมให้กว้างขึ้น ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้ทุติยภูมิซึ่งมีค่าผลประโยชน์เป็นความจุของแชนนอน ได้รับความจุของแชนนอนที่มากขึ้น และทำให้ความจุรวมของโครงข่ายมากขึ้นด้วยเช่นกัน

สำหรับผลลัพธ์ของเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน ได้แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังส่งที่ผู้ใช้ทุติยภูมิแต่ละคนเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเครื่องส่งสัญญาณของผู้ใช้ทุติยภูมินั้น ๆ กับเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้ปฐมภูมิ ทั้งนี้ค่ากำลังส่งของผู้ใช้ทุติยภูมิโดยรวมจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับกรณีของเกมที่มีการร่วมมือกัน ทำให้มีผู้ใช้ปฐมภูมิในโครงข่ายที่จำเป็นต้องส่งสัญญาณด้วยค่ากำลังสูงสุดเพื่อรักษาคุณภาพการให้บริการของตนเองไว้ อีกทั้งพบว่าเกมที่ไม่มีการร่วมมือกันจะสามารถคำนวณค่ากำลังส่งที่เหมาะสมได้ง่ายกว่าเกมที่มีการร่วมมือกัน และส่งผลให้สามารถนำไปใช้กับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนได้ง่ายกว่า

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายไร้สายด้วยทฤษฎีเกม โดยได้สร้างแบบจำลองเกมสำหรับโครงข่ายจากการนิยามผู้เล่น กลยุทธ์ และผลประโยชน์ จากนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมได้จากกลยุทธ์ที่เหมาะสมของเกม ทั้งนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากการใช้เกมที่มีการร่วมมือกันที่มีการแบ่งเวลา ซึ่งมีการกำหนดฟังก์ชันผลประโยชน์และลักษณะการร่วมมือกันของผู้เล่นเป็นแบบต่าง ๆ 3 รูปแบบ ได้แก่ การใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต การใช้ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต และการใช้ค่าต่ำสุด โดยผลลัพธ์เชิงตัวเลขได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตทำให้ความจุรวมของโครงข่ายมีค่าสูง แต่หากใช้ค่าต่ำสุดจะได้โครงข่ายที่มีความยุติธรรมในหมู่ผู้เล่นสูง และใช้ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตจะทำให้ได้โครงข่ายที่มีทั้งค่าความจุรวมและความยุติธรรมที่อยู่ในเกณฑ์ดี นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่ากรณีที่โครงข่ายมีการรบกวนกันต่ำอยู่แล้ว การควบคุมกำลังส่งดังกล่าวอาจไม่สามารถช่วยปรับปรุงโครงข่ายให้ดีกว่าเดิมได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ด้วยทฤษฎีเกม โดยการกำหนดนิยามของผู้เล่น กลยุทธ์ และผลประโยชน์ เพื่อสร้างแบบจำลองเกมสำหรับโครงข่าย จากนั้นจึงสามารถหากลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับผู้เล่นแต่ละคน และได้มาซึ่งค่ากำลังส่งที่เหมาะสมของผู้ใช้นั้น ๆ ทั้งนี้ลักษณะพิเศษของโครงข่ายวิทยุรับรู้คือการแบ่งผู้ใช้ออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ผู้ใช้ปฐมภูมิซึ่งจะต้องได้รับคุณภาพการให้บริการหรือความจุของแชนนอนที่ไม่ต่ำกว่าค่าที่ต้องการ และผู้ใช้ทุติยภูมิซึ่งไม่ได้รับการรับประกันใด ๆ จากโครงข่าย ดังนั้นแบบจำลองเกมต่าง ๆ ที่เสนอจึงถูกกำหนดให้สอดคล้องกับหลักการดังกล่าว โดยได้เสนอแบบจำลองทั้งกรณีที่ใช้เกมที่มีการร่วมมือกันและเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน โดยผลลัพธ์เชิงตัวเลขได้แสดงให้เห็นว่า หากนำไปใช้ควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายวิทยุรับรู้ฝั่งขาลง ในเกมที่มีการร่วมมือกันโดยผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์ ผู้ใช้ทุติยภูมิที่อยู่ไกลจากสถานีฐานจะไม่สามารถส่งสัญญาณได้เลย ในขณะที่กรณีผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลคูณของผลประโยชน์ ผู้ใช้ทุกคนจะมีความจุของแชนนอนที่มากกว่าศูนย์ ทำให้เกิดความยุติธรรมในหมู่ผู้ใช้มากกว่ากรณีที่ผู้เล่นร่วมมือกันเพื่อผลรวมของผลประโยชน์ แต่อาจทำให้ผู้ใช้ปฐมภูมิต้องใช้กำลังส่งที่มากขึ้น นอกจากนี้หากนำกลไกการแบ่งเวลามาประยุกต์ใช้กับการควบคุมกำลังส่งด้วยเกมที่มีการร่วมมือกันก็อาจสามารถช่วยเพิ่มความจุรวมของโครงข่ายมากขึ้นได้ สำหรับเกมที่ไม่มีการร่วมมือกัน โครงข่ายจะใช้กำลังส่งโดยรวมสูงกว่ากรณีของเกมที่มีการร่วมมือกัน โดยผู้ใช้ปฐมภูมิในโครงข่ายบางคนจำเป็นต้องใช้ค่ากำลังส่งสูงสุด ทั้งนี้เกมที่ไม่มีการร่วมมือกันจะคำนวณหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมได้รวดเร็วกว่า ทำให้สามารถใช้ควบคุมกำลังส่งในโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้นได้ง่ายกว่า

อย่างไรก็ตามข้อสังเกตของผลลัพธ์ต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ได้มาจากตัวอย่างของโครงข่ายเพียงบางกรณี ดังนั้นหากสามารถวิเคราะห์หาผลลัพธ์ด้วยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ก็จะทำให้ข้อสรุปในวิทยานิพนธ์นี้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

หัวข้อที่ควรศึกษาและวิจัยต่อไปในอนาคตคือ

1. การพิจารณาโครงข่ายที่มีหลายช่องสัญญาณในหลายช่วงความถี่

   ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างแบบจำลองเกม เพื่อใช้ควบคุมโครงข่ายไร้สายที่ใช้ช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวร่วมกันทั้งโครงข่ายเท่านั้น หากพัฒนาแบบจำลองเกมให้มีการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณที่ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ จะทำให้แบบจำลองเกมสอดคล้องกับโครงข่ายไร้สายในปัจจุบันมากขึ้น

2. การตรวจสอบความต้องการใช้งานของผู้ใช้

   ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือให้ผู้ใช้ทุกคนในโครงข่ายต้องการส่งและรับสัญญาณตลอดเวลา แต่ในความเป็นจริง อาจมีช่วงเวลาที่ผู้ใช้ไม่ต้องการส่งสัญญาณและไม่ต้องการค่าความจุของแชนนอนใด ๆ ซึ่งหากนำส่วนนี้มาพิจารณา จะเป็นการเปิดโอกาสให้ผู้ใช้อื่นที่ต้องการใช้งานในขณะนั้นได้รับความจุของแชนนอนมากขึ้นได้

3. การพิจารณากรณีที่โครงข่ายไม่มีทางรักษาคุณภาพการให้บริการขั้นต่ำแก่ผู้ใช้ปฐมภูมิทุกคนได้

   ในสถานการณ์จริง อาจมีโครงข่ายที่ไม่สามารถให้คุณภาพการให้บริการตามที่ผู้ใช้ปฐมภูมิแต่ละคนต้องการได้ เช่น โครงข่ายที่มีผู้ใช้ปฐมภูมิจำนวนมาก หรือผู้ใช้ปฐมภูมิมีเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณที่อยู่ห่างกันมากเกินไป ดังนั้นหากพิจารณาถึงโครงข่ายดังกล่าว อาจพบวิธีการควบคุมกำลังที่เหมาะสมที่สุดบนเงื่อนไขที่ปฏิบัติได้ แม้ว่าผู้ใช้ปฐมภูมิอาจไม่ได้รับคุณภาพการให้บริการที่ต้องการก็ตาม

4. การเลือกช่วงการแบ่งเวลาที่เหมาะสม

   ในผลลัพธ์เชิงตัวเลขของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้พิจารณาเฉพาะการแบ่งเวลาด้วย $T = 0.5$ ซึ่งเป็นการแบ่งคาบการส่งสัญญาณแต่ละคาบออกเป็นสองช่วงที่มีระยะเวลาเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติอาจมีค่า T อื่น ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับลักษณะของโครงข่ายนั้น ๆ และสามารถทำให้สมรรถนะของโครงข่ายสูงขึ้นกว่ากรณีที่ใช้การแบ่งเวลาด้วย $T = 0.5$ ได้

รายการอ้างอิง

[1] Larsson, E. G., Jorswieck, E., Lindblom, J., and Mochaourab, R. Game Theory and the Flat-Fading Gaussian Interference Channel: Analyzing Resource Conflicts in Wireless Networks. IEEE signal processing magazine 26 5 (2009) : 18-27.

[2] Donmez, N. A Game-Theoretic Approach to Efficient Power Control in CDMA Data Networks. Proceedings of Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA). pp.248-252. Istanbul-Kadikoy : 2011.

[3] Roy, S., Wu, L., and Zawodniok, M. Spectrum Management for Wireless Networks Using Adaptive Control and Game Theory. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.1062-1067. Cancun : 2011.

[4] Akkarajitsakul, K., Hossain, E., Niyato, D., and Kim, D. I. Game Theoretic Approaches for Multiple Access in Wireless Networks: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials 13 3 (2011) : 372-395.

[5] Sorooshyari, S., Tan, C. W., and Chiang, M. Power Conrol For Cognitive Radio Networks: Axiom, Algorithms, and Analysis. IEEE/ACM Transactions on Networking 20 3 (2012) : 878-891.

[6] Huang, J. Distributed Interference Compensation for Wireless Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 24 5 (2006) :1074-1084.

[7] Feiten, A., and Mathar, R. Optimal Power Control for Multiuser CDMA Channels. Proceedings of International Information Theory, pp.1903-1907. Adelaide : 2005.

[8] Neel, J. O., Menon, R., MacKenzie, A. B., Reed J. H., and Gilles, R. P. Interference Reducing Networks. Proceedings of 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communication (CrownCom). pp.96-104. Orlando : 2007.

[9] Martyna, J. Power Allocation Games for Cognitive Radio Networks with Incomplete Information. Proceedings of Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP). pp.1-4. Poznan : 2012.

[10] Omidvar, N., and Khalaj, B. H. A Game Theoretic Approach for Power Allocation in the Downlink of Cognitive Radio Networks. Proceedings of Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). pp.158-162. Kyoto : 2011.

[11] La, Q. D., Chew, Y. H., and Soong B. H. Performance Analysis of Downlink Multi-Cell OFDMA Systems Based on Potential Game. IEEE Transactions on Wireless Communications 11 9 (2012) : 3358-3367.

[12] Omidvar, N., and Khalaj B. H., A Game-Theoretic Approach for Joint Channel and Power Allocation in Downlink of Cellular Cognitive Radio Networks. Proceedings of Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). pp.1198-1202. Sydney : 2012.

[13] Hoang, A. T., and Liang, Y. Downlink Channel Assignment and Power Control for Cognitive Radio Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications 7 8 (2008) : 3106-3117.

[14] Asghari, V., and Aissa, S. Resource Management in Spectrum-Sharing Cognitive Radio Broadcast Channels: Adaptive Time and Power Allocation. IEEE Transactions on Communications 59 5 (2011) : 1446-1457.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

กตัญญ์ วัฒนวิบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมัธยมสาธิต มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาในปี พ.ศ. 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสองในปี พ.ศ. 2554 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2556

บทความทางวิชาการจากวิทยานิพนธ์

[1] Katan Vattanaviboon, Patrachart Komolkiti, and Chaodit Aswakul. Capacity and Fairness Analysis of Game Theoretic Power Controlled Wireless Access Network. Proceedings of the 4th International conference on Intelligent Systems Modelling & Simulation, pp.578-583. Bangkok : 2013.