



การแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สาย
ENERGY SHARING IN WIRELESS POWERED COMMUNICATION NETWORKS

นางสาวชาลิสา นาคพิทักษ์
นางสาวนิภาธร ปัญญาวัฒน์

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559

การแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สาย
ENERGY SHARING IN WIRELESS POWERED COMMUNICATION NETWORKS

นางสาวชวลีสา นาคพิทักษ์
นางสาวนิภาธร ปัญญาวัฒน์

โครงงานวิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โครงการวิศวกรรม
เรื่อง
การแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สาย
ของ
นางสาวชาลิสา นาคพิทักษ์
นางสาวนิภาธร ปัญญาวัฒน์

ได้รับอนุมัติจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.เวศิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

.....ประธาน
(อาจารย์ธำนิษฐ์ ดวงจันทร์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.บำรุง ท้าวศรีสกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์)

การแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สาย

ปีการศึกษา 2559

โดย

นางสาวชาลิสา นาคพิทักษ์
นางสาวนิภาธร ปัญญาวัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมฉบับนี้ ศึกษาเกี่ยวกับการสื่อสารไร้สาย ซึ่งเป็นที่นิยมในการสื่อสารในปัจจุบัน จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำเสนอการประมวลผลให้บริการแก่ผู้ใช้โดยมีสถานีฐานเพียงสถานีเดียวและค่าผลตอบแทนที่ได้ยังไม่มากพอ ดังนั้นโครงการนี้นำเสนอการแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สาย เพื่อให้ได้อัตราการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีฐานจำนวน 2 สถานี โดยแบ่งการทำงานเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรกสถานีฐานทั้ง 2 ให้บริการแก่ผู้ใช้โดยอิสระจากกัน และกรณีที่สองสถานีฐานทั้ง 2 ให้บริการแก่ผู้ใช้โดยมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างสถานีฐาน ซึ่งในการให้บริการแก่ผู้ใช้จะคำนึงถึงอัตราการรับส่งข้อมูลต่อผู้ใช้บริการและคำนึงถึงระดับพลังงานของสถานีฐานในการให้บริการในแต่ละรอบ โดยสถานีฐานแต่ละสถานีจะได้รับพลังงานจากโซลาร์เซลล์ และใช้โปรแกรม MATLAB ควบคุมกับทฤษฎีกระบวนการตัดสินใจมาร์คอฟในการคำนวณ ซึ่งการจำลองของโครงการนี้สามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลได้มากกว่างานวิจัยก่อนหน้า และสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้มากขึ้น

คำสำคัญ: ไอโอที กระบวนการตัดสินใจมาร์คอฟ การเก็บเกี่ยวพลังงาน วิทยุรู้คิด

ENERGY SHARING IN WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS

Academic Year 2016

By

Miss Chalisa Narkpitak
Miss Nipathorn Panyanuwat

Advisor

Asst. Prof. Dr. Kampol Woradit

Abstract

This engineering project considers energy sharing in wireless powered communication networks, which is nowadays widely used in the communication systems. In a previous work, optimal service auction for users is presented. There is only one base station available today. However, it has been gained a low compensation. This project presents the energy sharing in wireless powered communication networks in order to improve a rate of data transferring. The networks are consisted of two base stations, dividing into two cases. In the first case, both base stations are independent to each other in providing a device service to the users. In the second case, both base stations provide a device service to the users by sharing the energy between each other. The project focuses on the service management of the base stations. There are two functions involved in the service, namely device service allocation provided to the user, and the energy management. However, each of the base stations obtains the energy from the solar cell. This project proposes an optimization framework based on the Markov Decision Process the MATLAB software to randomly simulate the results. Thus, the simulation of this project is contributed to an improvement of the rate of data transferring, compared to the previous research. In addition, it is capable of accommodating even more users.

Keywords: Internet of Things, Markov Decision Process, Energy Harvesting, Cognitive radio

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่างๆ ระหว่างจัดทำโครงการนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

ท้ายที่สุดนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิศวกรรมนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากนักน้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากโครงการวิศวกรรมนี้ ขอมอบให้กับ ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญรูป | ซ |
| รายการสัญลักษณ์ | ญ |
| ประมวลคำย่อ | ฎ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 ทฤษฎี | 3 |
| 2.1.1 อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง | 3 |
| 2.1.2 การกล้าสัญญาณดิจิทัล | 6 |
| 2.1.3 ความแรงของสัญญาณกับวิธีการกล้าสัญญาณ | 9 |
| 2.1.4 กระบวนการตัดสินใจมาร์คอฟ | 10 |
| 2.1.5 โปรแกรมเชิงเส้น | 11 |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 12 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 | 13 |
| วิธีการดำเนินงาน | 13 |
| 3.1 การออกแบบการทำงานของโครงการ | 13 |
| 3.1.1 สถานะ | 13 |
| 3.1.2 ระดับพลังงานของสถานีฐาน | 14 |
| 3.1.3 ความน่าจะเป็นของแสงแดด | 15 |
| 3.1.4 ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ | 15 |
| 3.1.5 การตัดสินใจ | 15 |
| 3.1.6 เมตริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ | 15 |
| 3.2 กลไกการทำงานของโครงข่าย | 23 |
| 3.2.1 กรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานโดยอิสระจากกัน | 23 |
| 3.2.2 กรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 26 |
| บทที่ 4 | 30 |
| ผลการดำเนินงาน | 30 |
| 4.1 การหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล | 30 |
| 4.1.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในกรณีที่สถานีฐานทำงาน อิสระจากกัน | 30 |
| 4.1.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในกรณีที่สถานีฐานมีการถ่าย โอนพลังงานร่วมกัน | 34 |
| 4.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลระหว่างกรณีสถานีฐานทั้ง 2 ทำงานอิสระจากกันและกรณีที่สถานีฐานทั้ง 2 ทำงานโดยมีการถ่ายโอน พลังงานร่วมกัน | 38 |
| 4.2.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่ง ข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ร้องขอเข้าใช้บริการของทั้ง 2 กรณี | 38 |
| 4.2.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่ง ข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ถอนการเข้าใช้บริการของทั้ง 2กรณี | 39 |
| 4.2.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่ง ข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด | 41 |
| 4.2.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่ง ข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลสำเร็จ | 42 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|-------------------------------|------|
| บทที่ 5 สรุปลผล และข้อเสนอแนะ | 44 |
| 5.1 สรุปลผล | 44 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 44 |
| เอกสารอ้างอิง | 45 |
| ประวัติย่อผู้ทำโครงการ | 46 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้บริการ กรณีสถานีฐานทำงานโดยอิสระจากกัน | 30 |
| 4.2 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้ บริการกรณีสถานีฐานทำงานโดยอิสระจากกัน | 31 |
| 4.3 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดกรณีสถานีฐาน ทำงานโดยอิสระจากกัน | 32 |
| 4.4 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จกรณี สถานีฐานทำงานโดยอิสระจากกัน | 33 |
| 4.5 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้บริการ กรณีสถานีฐานทำงานร่วมกัน | 34 |
| 4.6 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้ บริการกรณีสถานีฐานทำงานร่วมกัน | 35 |
| 4.7 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดกรณีสถานีฐาน ทำงานร่วมกัน | 36 |
| 4.8 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จกรณี สถานีฐานทำงานร่วมกัน | 37 |
| 4.9 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับความน่าจะเป็นที่มีผู้ร้องขอ เข้าใช้บริการ | 39 |
| 4.10 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ ถอนการเข้าใช้บริการ | 40 |
| 4.11 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับความน่าจะเป็นที่มี แสงแดด | 42 |
| 4.12 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับความน่าจะเป็นที่ส่ง ข้อมูลสำเร็จ | 43 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 เครือข่ายตรวจจับไร้สาย | 3 |
| 2.2 การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางแอมพลิจูด | 6 |
| 2.3 การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางความถี่ | 7 |
| 2.4 การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางเฟส | 7 |
| 2.5 แผนภาพเฟสของสัญญาณ QPSK | 8 |
| 2.6 แสดงตำแหน่งบนระนาบเชิงซ้อนด้วยการกล้ำสัญญาณแบบ 16QAM และ 64QAM | 9 |
| 2.7 การกล้ำสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับระยะทาง | 10 |
| 2.8 ตัวอย่างกระบวนการตัดสินใจมาร์คอฟที่มี 3 สถานะและ 2 การกระทำ | 11 |
| 3.1 สถานะทั้งหมดในระบบ | 13 |
| 3.2 ระดับพลังงานกรณีสถานีฐานทำงานอิสระจากกัน | 14 |
| 3.3 ระดับพลังงานกรณีสถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 14 |
| 3.4 การทำงานของระบบสถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกัน | 23 |
| 3.5 ผังงานกระบวนการทำงานของโปรแกรม MATLAB ในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานโดยอิสระจากกัน | 24 |
| 3.6 การทำงานของระบบสถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 26 |
| 3.7 ผังงานกระบวนการทำงานของโปรแกรม MATLAB ในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 27 |
| 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีผู้รบกวนขอเข้าใช้บริการสำหรับกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน | 30 |
| 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีผู้รบกวนการเข้าใช้บริการสำหรับกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน | 31 |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน | 32 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน | 33 |
| 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีผู้รบกวนขอเข้าใช้บริการกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 34 |
| 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีผู้รบกวนการเข้าใช้บริการกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 35 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 36 |
| 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน | 37 |
| 4.9 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ที่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอการเข้าใช้บริการระหว่าง 2 กรณี | 38 |
| 4.10 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ที่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการระหว่าง 2 กรณี | 39 |
| 4.11 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ที่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดระหว่าง 2 กรณี | 41 |
| 4.12 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ที่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จระหว่าง 2 กรณี | 42 |

รายการสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---------------|---|----------------------------|
| α | ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ช่องในแต่ละรัศมี | - |
| β | ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการถอนการเข้าใช้ช่องในแต่ละรัศมี | - |
| δ | ความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด | - |
| ε | ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ | - |
| a_{ac} | การตัดสินใจ | - |
| b^\dagger | คำร้องขอสูงสุดในรอบนั้น ๆ | - |
| D | สถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ กัน | - |
| L | สถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่ของสถานีฐาน | - |
| R | ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้น | บิตต่อวินาที ต่อเฮิรตซ์ |

ประมวลคำย่อ

| คำย่อ | คำอธิบาย |
|-------|--|
| ASK | การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางแอมพลิจูด |
| BPSK | การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางเฟสแบบไบนารี |
| FSK | การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางความถี่ |
| IoT | แนวความคิดเพื่อเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน |
| MDP | การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีผลลัพธ์บางส่วนเป็นแบบสุ่มและบางส่วนอยู่ภายใต้การควบคุมการตัดสินใจ |
| QAM | การกล้ำสัญญาณทางแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์ |
| QPSK | การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางเฟสแบบควอดเรเจอร์ |
| PSK | การกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางเฟส |
| WSN | เครือข่ายตรวจจับไร้สาย |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันอินเทอร์เน็ตได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ทั้งในสถานที่ต่าง ๆ เช่น บ้าน สำนักงาน มหาวิทยาลัย สถานที่ราชการ สถานประกอบการทางธุรกิจต่าง ๆ เป็นต้น สถานที่เหล่านี้ล้วนจำเป็นต้องใช้อินเทอร์เน็ตเพื่อใช้ในการถ่ายโอนข้อมูล ติดต่อสื่อสารกันระหว่างประเทศ หรืออัปเดตข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ ทำให้เกิดแนวคิดที่เรียกว่า อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things: IoT) ซึ่งเป็นแนวความคิดสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน

นอกจากเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจะเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งแล้ว ยังมีตัวแปรอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องอีก คือ โหนดตรวจจับต่าง ๆ จำนวนมาก ที่ทำให้เกิดเครือข่ายตรวจจับไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) ทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อเข้ามาได้ เครือข่ายตรวจจับไร้สายสามารถตรวจจับปริมาณกายภาพต่าง ๆ ในเครือข่ายได้ เช่น แสง อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น เพื่อส่งค่าไปยังอุปกรณ์ในระบบให้ทำงานหรือสั่งการอื่น ๆ ต่อไป

อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งมี 3 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบของการบริการ วัตถุที่เป็นนามธรรมและการบริหารการบริการ ซึ่งในโครงการเราสนใจการบริหารการบริการ เพราะองค์ประกอบนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการใช้งานของระบบ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการ เพิ่มรายได้ของการให้บริการ เพิ่มกำไรของการบริการ และให้ผู้ใช้บริการได้ประโยชน์สูงสุด

ดังนั้นจึงก่อให้เกิดโครงการการแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สายนี้ขึ้นมา ในโครงการนี้จะปรับปรุงงานวิจัยที่ศึกษาก่อนหน้านี้ โดยการเพิ่มอุปกรณ์ไอโอที่เป็นสถานีฐาน 2 สถานี เพื่อศึกษาสมรรถนะในการให้บริการของอุปกรณ์ที่ทำงานอิสระจากกันและสมรรถนะในการให้บริการของอุปกรณ์ที่สามารถถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน โดยสถานีฐานทั้ง 2 สถานี จะได้รับพลังงานจากแหล่งพลังงานที่ไม่แน่นอน คือ แผงโซลาร์เซลล์ ในการให้บริการแก่ผู้ใช้จะนำกระบวนการตัดสินใจของมาร์คอฟ (Markov Decision Process: MDP) มาใช้ในการพิจารณาให้บริการ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ โปรแกรม MATLAB สามารถแก้ไขปัญหาทางด้านคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนได้ง่าย รวดเร็ว และสามารถสร้างแบบจำลองที่สามารถนำไปสร้างบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้ทดสอบและประเมินผลของระบบก่อนนำไปใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อออกแบบการให้บริการสื่อสารข้อมูลขาขึ้นที่มีการแบ่งพลังงานระหว่างสองสถานีฐานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สาย ที่มีแหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์เท่านั้น ด้วยกระบวนการการตัดสินใจมาร์คอฟ (MDP)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 พิจารณาสถานการณ์ที่ใช้สถานีฐานจำนวน 2 สถานี

1.3.2 แบตเตอรี่ของสถานีฐานทั้ง 2 สถานีมีความจุเท่ากัน

1.3.3 ผู้ใช้บริการมีจำนวนเท่ากันในแต่ละพื้นที่ให้บริการ

1.3.4 พิจารณาการกล้ำสัญญาณเชิงเลขทางเฟสแบบไบนารี (Binary Phase Shift Keying: BPSK) ทางเฟสแบบควอดเรเจอร์ (Quadrature Phase Shift Keying: QPSK) และทางแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์ (Quadrature Amplitude Modulation: QAM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้อัตราข้อมูลขาขึ้นสูงสุด

1.4.2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้บริการ

บทที่ 2

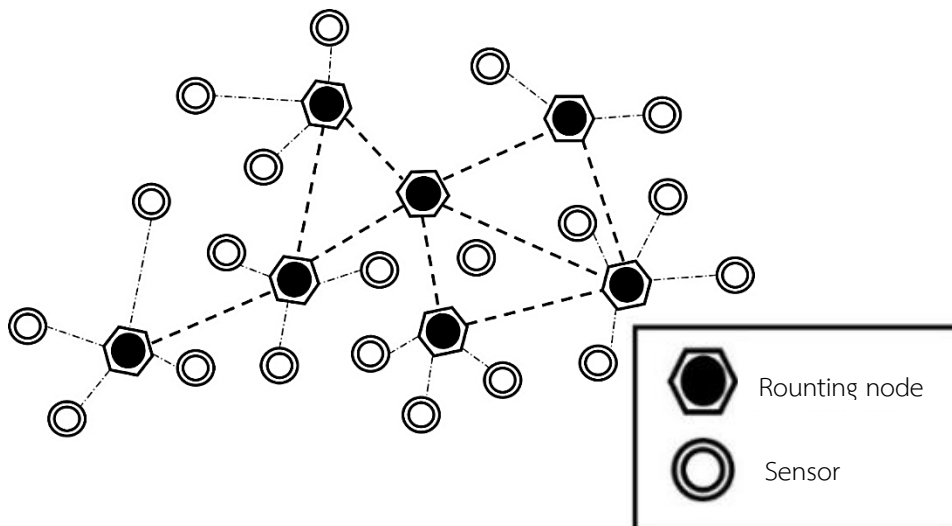
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง

อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งหรือไอโอทีถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1999 เป็นแนวคิดที่สิ่งต่าง ๆ ถูกเชื่อมโยงเข้าสู่โลกอินเทอร์เน็ต เช่น การสั่งเปิด-ปิดอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ โทรศัพท์มือถือ เครื่องมือสื่อสาร เครื่องใช้สำนักงาน เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม อาคาร บ้านเรือน เครื่องใช้ในชีวิตประจำวันต่าง ๆ ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นต้น โดยเทคโนโลยีนี้มีทั้งประโยชน์มหาศาลและความเสี่ยง เพราะหากระบบรักษาความปลอดภัยของอุปกรณ์และเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไม่ดีพอ จะทำให้ผู้ไม่พึงประสงค์เข้ามากระทำการที่ไม่พึงประสงค์ต่ออุปกรณ์ ข้อมูลสารสนเทศและความเป็นส่วนตัวของบุคคลได้ ดังนั้นจึงต้องพัฒนามาตรการในการรักษาความปลอดภัยควบคู่กันไป

ตัวแปรสำคัญนอกเหนือจากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต คือ โหนดตรวจจับต่าง ๆ จำนวนมากที่ทำให้เกิดเครือข่ายตรวจจับไร้สาย (WSN) ให้อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อเข้ามาได้ ซึ่งเครือข่ายตรวจจับไร้สายจะตรวจจับปริมาณกายภาพต่าง ๆ เช่น แสง อุณหภูมิ ความดัน เพื่อส่งค่าไปยังอุปกรณ์ในระบบให้ทำงานต่อไป



รูปที่ 2.1 เครือข่ายตรวจจับไร้สาย

เมื่อมีโครงข่ายโนดตรวจจับแล้วจำเป็นต้องมีโนดตรวจจับ เพื่อจะเชื่อมต่อไปยังโลกอินเทอร์เน็ต โดยตัวเกตเวย์จะทำหน้าที่เชื่อมต่อไปยังเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ให้อุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายโนดตรวจจับทั้งหมดส่งข้อมูลเข้าสู่อินเทอร์เน็ต

2.1.1.1 อันดับการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง

(1) อุปกรณ์สวมใส่ (Wearables) คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งใช้งานบนส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เพื่อความสะดวกในการใช้งาน เพราะสามารถนำติดตัวไปได้ทุกที่ สามารถทำงานอิสระหรือทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นอย่างสมาร์ตโฟน ผ่านทางแอปพลิเคชัน เช่น ตัวตรวจจับวัดระยะทางของการวิ่ง วัดอัตราการเต้นของหัวใจ วัดอุณหภูมิโดยรอบ บอกพิกัดตำแหน่งบนโลก อุปกรณ์ที่วัดการตรวจจับพฤติกรรมของผู้สวมใส่แล้วแปลงค่าออกมา เช่น พฤติกรรมการนอนหลับ พฤติกรรมการออกกำลังกาย รวมถึงการเก็บข้อมูลของผู้ใช้เพื่อแปลงผลไปใช้ในการทำข้อมูลสถิติ และการเข้าใจในพฤติกรรมด้านต่าง ๆ เป็นต้น ส่วนการทำงานเพื่อใช้ในการควบคุมและทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นอย่างสมาร์ตโฟน เช่น การสั่งให้เล่นเพลงจากสมาร์ตโฟน การแสดงสถานะของการโทรเข้าโทรออก การแจ้งเตือนเมื่อมีข้อความอีเมล เฟสบุ๊ค หรือทวิตเตอร์ เข้ามา

(2) เมืองอัจฉริยะ (Smart city) คือเมืองที่มีการนำเทคโนโลยีมาปรับใช้เพื่อทำให้คุณภาพชีวิตของพลเมืองดีขึ้น ส่งผลให้การใช้ชีวิตนั้นสะดวกสบาย พลเมืองสามารถเข้าถึงการบริการของเมืองนั้นได้อย่างรวดเร็ว รวมไปถึงระบบรักษาความปลอดภัยที่เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างการประยุกต์การใช้งาน เช่น การจัดการพลังงานไฟฟ้า ระบบจัดการน้ำ การจัดการขยะ ระบบตรวจจับสำหรับการเฝ้าระวังความปลอดภัยจากสิ่งแวดล้อมในสังคม เป็นต้น

(3) บ้านอัจฉริยะ (Smart home) เป็นการรวมโครงข่ายการสื่อสารของที่อยู่อาศัยเข้าด้วยกันเพื่อเชื่อมต่อเครื่องใช้ไฟฟ้า การบริการ การตรวจตราดูแล รวมทั้งสามารถเข้าถึงการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ซึ่งการควบคุมอุปกรณ์อาจควบคุมได้ทั้งจากภายในและภายนอกบ้าน โครงสร้างของบ้านอัจฉริยะจะต้องประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรก คืออุปกรณ์อัจฉริยะ (Smart Device) ใช้สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับส่วนที่สอง คือเครือข่าย และส่วนที่สาม คือส่วนควบคุมหลักที่เปรียบเสมือนสมองของบ้าน ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมให้บ้านทำงานตามแบบที่เราต้องการได้ เรียกว่า ระบบควบคุมอัจฉริยะ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งกลุ่มตามความต้องการ คือเพื่อความสะดวกสบาย เพื่อความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สิน เพื่อประหยัดพลังงาน เพื่อดูแลสุขภาพของผู้อาศัยภายในบ้าน

(4) อินเทอร์เน็ตสำหรับอุตสาหกรรม (Industrial internet) เป็นไอโอทีสำหรับภาคอุตสาหกรรมและโรงงานการผลิต ขณะที่บริษัททางด้านวิจัยทางการตลาด เช่น Gartner หรือบริษัททางด้านเครือข่าย เช่น Cisco ได้มองว่าเป็นสิ่งที่สามารถสร้างโอกาสและความเป็นไปได้มากที่สุด แต่อุตสาหกรรมอินเทอร์เน็ตไม่ใช่สินค้าสำหรับผู้บริโภคทั่วไปเช่นเดียวกับบ้านอัจฉริยะ ที่คนส่วนใหญ่ให้ความสนใจมากกว่า

(5) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart grid) เป็นโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาบริหารจัดการควบคุมการผลิต ส่ง และจ่ายพลังงานไฟฟ้า สามารถรองรับการเชื่อมต่อบริษัทไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป (Distributed Energy Resource) และระบบบริหารการใช้สินทรัพย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด รวมทั้งให้บริการกับผู้เชื่อมต่อกับโครงข่ายผ่านมิเตอร์อัจฉริยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความมั่นคงปลอดภัยเชื่อถือได้ พร้อมทั้งคุณภาพของไฟฟ้าได้มาตรฐานสากล

โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะเกิดจากการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า ระบบสารสนเทศ และระบบสื่อสารเข้าไว้ด้วยกันเป็นโครงข่าย ซึ่งโครงข่ายดังกล่าวจะสนับสนุนการทำงานซึ่งกันและกันอย่างเป็นระบบ โดยอาศัยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสำคัญ 3 ด้าน ได้แก่ อิเล็กทรอนิกส์และระบบฝังตัว ระบบควบคุมอัตโนมัติ และสารสนเทศและการสื่อสาร

(6) Connected car เป็นรถยนต์อัจฉริยะที่มีการติดตั้งระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย การติดตั้งระบบเครือข่ายดังกล่าวจะช่วยให้รถยนต์สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต และแบ่งปันอินเทอร์เน็ตให้กับอุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ภายในและภายนอกรถยนต์ได้ เทคโนโลยีนี้เป็นการพัฒนาต่อยอดจากแนวคิดของรถยนต์อัจฉริยะซึ่งมีการติดตั้งเทคโนโลยีพิเศษที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ขับขี่ ทั้งในด้านความปลอดภัยและความสะดวกสบาย โดยมีการเพิ่มเติมในเรื่องของการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ส่งผลให้รถยนต์สามารถติดต่อสื่อสารกับสิ่งอื่น ๆ ได้เองอัตโนมัติ

(7) Connected health เป็นแนวคิดการสร้างเครือข่ายเชื่อมโยงชุมชนเข้ากับระบบสุขภาพแบบครบวงจร โดยเชื่อมโยงบริการทุกอย่างที่เกี่ยวข้องกับการบริการสุขภาพเข้าไว้ด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นสถานพยาบาลทั้งในเมืองและในพื้นที่ห่างไกล ผู้ป่วย แพทย์ ร้านขายยา สถาบันวิจัย หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้อง บริษัทประกันไปจนถึงลูกจ้าง พนักงาน และบ้านเรือน

ระบบนี้จะช่วยให้โรงพยาบาลขยายขอบเขตการประสานความร่วมมือกันได้อย่างครอบคลุม ทำให้ลดความซ้ำซ้อนในการทำงาน ช่วยพัฒนาการให้บริการควบคู่ไปกับการควบคุมค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังช่วยเชื่อมโยงบุคลากรทางการแพทย์ถึงกัน และเชื่อมโยงแพทย์เข้ากับข้อมูลสำคัญต่าง ๆ ช่วยให้แพทย์สามารถหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดและให้คำแนะนำผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันก็ช่วยให้ผู้ป่วยมีบทบาทในการตัดสินใจเกี่ยวกับการรักษาพยาบาลหรือดูแลสุขภาพตัวเองมากขึ้น

(8) ฟาร์มอัจฉริยะ (Smart farming) คือการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาผสมผสานเข้ากับงานด้านการเกษตรเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ ให้กับเกษตรกร เทคโนโลยีนี้ตั้งอยู่บนแนวคิดของการทำเกษตรสมัยใหม่ที่เรียกว่า เกษตรแม่นยำสูง เป็นกลยุทธ์ในการทำเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยทำให้เกษตรกรสามารถปรับใช้ทรัพยากรให้สอดคล้องกับสภาพของพื้นที่มากที่สุด รวมไปถึงเรื่องการดูแลอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแนวคิดนี้สามารถนำไปปรับใช้ได้ทั้งฟาร์มพืชและฟาร์มสัตว์ ฟาร์มอัจฉริยะนี้จะมีความแตกต่างจากฟาร์มธรรมดาตรงที่การใช้ทรัพยากรนั้นทำได้อย่างแม่นยำและตรงต่อ

ความต้องการของพืชและสัตว์ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียทรัพยากรและได้ผลผลิตที่ออกมาตรงตามความต้องการของผู้ดูแลมากที่สุด

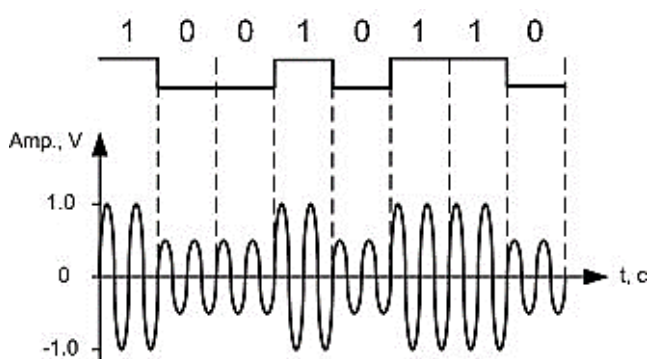
(9) การค้าปลีกอัจฉริยะ (Smart retail) เป็นการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาช่วยเพิ่มโอกาสในการดำเนินธุรกิจห้างร้านได้เป็นอย่างดี ด้วยการเพิ่มประสบการณ์ที่ดีสำหรับลูกค้าในการซื้อสินค้า โดยส่งข้อมูลสินค้าไปยังอุปกรณ์สมาร์ตโฟนของลูกค้า ส่งผลให้ธุรกิจห้างร้านมีความน่าสนใจมากขึ้น

(10) การจัดการห่วงโซ่อุปทานอัจฉริยะ (Smart Supply Chain) หมายถึงการจัดการกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างผู้ผลิตกับผู้ขายวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตอันนำไปสู่การเพิ่มผลกำไรของกิจการ โดยกระบวนการจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการจัดซื้อ การผลิต การจัดเก็บ เทคโนโลยีสารสนเทศ การจัดจำหน่าย ตลอดจนการขนส่ง ซึ่งมีผลสำคัญต่อการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า นอกจากนี้ การนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยเหลือนำมาช่วยทำให้การดำเนินธุรกิจเป็นไปได้อย่างสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

2.1.2 การกล้ำสัญญาณดิจิทัล

ในการกล้ำสัญญาณดิจิทัล คลื่นพาห์แบบแอมพลิจูดจะถูกกล้ำโดยสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง วิธีในการกล้ำดิจิทัลถือได้ว่าเป็นการแปลงดิจิทัลให้เป็นแอมพลิจูด และการ demodulation ที่สอดคล้องก็คือการแปลงแอมพลิจูดเป็นดิจิทัล การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคลื่นพาห์จะถูกเลือกจากจำนวนที่แน่นอนของสัญลักษณ์ (symbol) M (อักขระที่ถูกกล้ำ) เทคนิคการนำพาบิตข้อมูลสามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยนคุณสมบัติของสัญญาณพาห์ ได้แก่ แอมพลิจูด ความถี่ และเฟส ตามค่าข้อมูลบิตที่ต้องการแปลงสัญญาณ

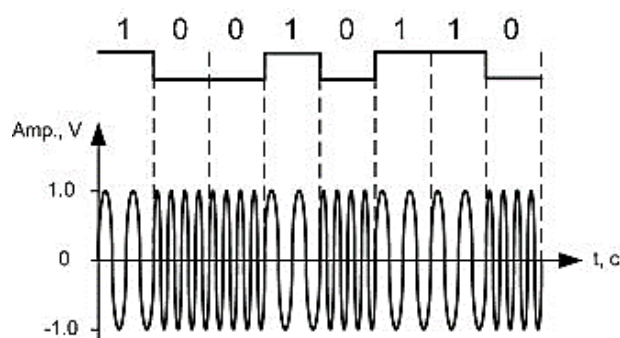
2.1.2.1 การกล้ำสัญญาณทางแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying) เป็นการเปลี่ยนขนาดของสัญญาณพาห์ ซึ่งขนาดที่จะถูกเปลี่ยนมีระดับที่แน่นอน ลักษณะของสัญญาณที่กล้ำนั้นเมื่อค่าของบิตของข้อมูลดิจิทัลเป็น 1 ขนาดของคลื่นพาห์จะสูงกว่าปกติ และเมื่อบิตมีค่าเป็น 0 ขนาดของคลื่นพาห์จะต่ำกว่าปกติ แต่การกล้ำสัญญาณแบบนี้มักไม่ได้รับความนิยม เพราะจะถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นได้ง่าย



รูปที่ 2.2 การกล้ำสัญญาณทางแอมพลิจูด

ที่มา: http://www.tmatlantic.com/encyclopedia/index.php?ELEMENT_ID=10420

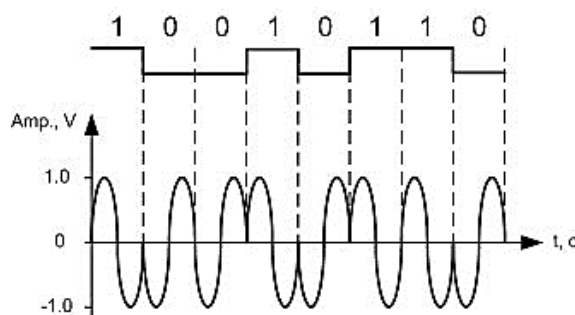
2.1.2.2 การกล้ำสัญญาณทางความถี่ (Frequency Shift Keying) เป็นการเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ ทำนองเดียวกับการกล้ำสัญญาณทางแอมพลิจูด ระดับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาห์ในการกล้ำสัญญาณมีค่าที่แน่นอน ในลักษณะของการเลื่อนความถี่ มักนิยมใช้ในการส่งสัญญาณที่มีอัตราบิตไม่สูงนัก เช่น 800 ถึง 1200 บิตต่อวินาที ซึ่งถ้าเป็นการกล้ำสัญญาณแบบ binary FSK คือมีระดับของบิตข้อมูลคือ 0 กับ 1 ก็จะทำให้คลื่นพาห์เปลี่ยนไปเป็นความถี่สองความถี่ และเมื่อใช้หลายความถี่เพื่อแทนระดับของบิตข้อมูลที่สูงขึ้นจะทำให้ความถี่ของคลื่นพาห์เปลี่ยนไปได้หลายความถี่ ซึ่งเรียกว่า การกล้ำสัญญาณแบบ M-array FSK



รูปที่ 2.3 การกล้ำสัญญาณทางความถี่

ที่มา: http://www.tmatlantic.com/encyclopedia/index.php?ELEMENT_ID=10422&sphrase_id=41037

2.1.2.3 การกล้ำสัญญาณทางเฟส (Phase Shift Keying) เป็นการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณพาห์ตามการเปลี่ยนบิตข้อมูล ในการกล้ำสัญญาณแบบ M-array PSK จะไม่ทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่กล้ำแล้วกว้างมากขึ้นเมื่อ M สูงขึ้น ซึ่งดีกว่าการกล้ำสัญญาณแบบ M-array FSK ทำนองเดียวกับ M-array ASK

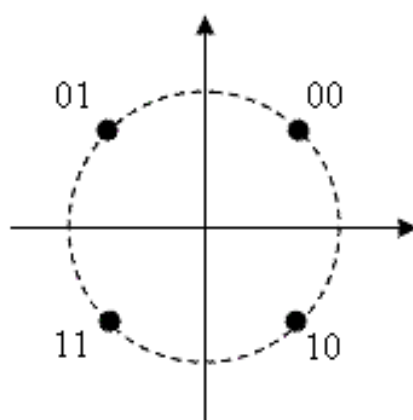


รูปที่ 2.4 การกล้ำสัญญาณทางเฟส

ที่มา: http://www.tmatlantic.com/encyclopedia/index.php?ELEMENT_ID=10478&sphrase_id=41038

2.1.2.4 การกล้ำสัญญาณทางเฟสแบบไบนารี (BPSK) เป็นการผสมข้อมูลแบบดิจิทัลกับคลื่นพาห์ เฟสของคลื่นพาห์สามารถเป็นได้ 2 ค่าที่ต่างกัน 180 องศา ซึ่งแทนข้อมูลที่เป็น 0 และ 1 สามารถทนทานต่อการรบกวนจากสัญญาณรบกวนได้มากกว่าการผสมสัญญาณดิจิทัลกับคลื่นพาห์แบบอื่น แต่สิ้นเปลืองแถบความถี่มาก

2.1.2.5 การกล้ำสัญญาณทางเฟสแบบควอดเรเจอร์ (QPSK) สามารถลำข่าวสารได้ครั้งละ 2 บิต โดยกระแสบิตที่เข้ามาจะถูกแบ่งไปกล้ำกับองค์ประกอบอินเฟสและควอดเรเจอร์เฟสด้วยตัวเปลี่ยนอนุกรมไปขนาน (Serial to parallel converter) จากนั้นจึงรวมสัญญาณทั้ง 2 องค์ประกอบ แล้วส่งผ่านตัวกลางออกไปพร้อม ๆ กัน



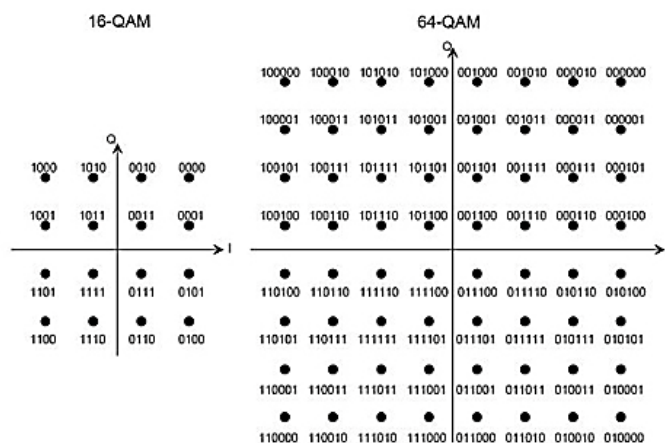
รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสของสัญญาณ QPSK

ที่มา: <http://ricesimulink.groups.et.byu.net/oqpskcr.phtml>

การแบ่งสัญญาณออกเป็นเฟสย่อย ช่วยให้ส่งข้อมูลได้ครั้งละหลายบิตโดยไม่ทำให้ความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลง คือการใช้ความกว้างแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อเราแบ่งสัญญาณออกเป็นเฟสย่อยมากขึ้น วงจรที่ใช้กล้ำสัญญาณจะมีความซับซ้อนจนไม่สามารถใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปทำงานได้ จะต้องใช้ชิปหน่วยประมวลผลทางสัญญาณดิจิทัล เพื่อกล้ำสัญญาณเท่านั้น และการแบ่งเป็นเฟสย่อยนี้ จะมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่ำ จึงทำให้วิธี การกล้ำสัญญาณทางเฟส นิยมแบ่งไม่เกิน 8 เฟส (8-PSK) ดังนั้น ถ้าต้องการส่งข้อมูลได้ครั้งละมากกว่าจะนิยมใช้วิธี QAM

2.1.2.6 การกล้ำสัญญาณทางแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์ (QAM) เป็นวิธีกล้ำสัญญาณดิจิทัลที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน การกล้ำสัญญาณแบบนี้จะมีการแบ่งสัญญาณออกเป็นรูปแบบต่าง ๆ ในระนาบเชิงซ้อน โดยกำหนดขนาดของสัญญาณและเฟส เพื่อแทนค่ากลุ่มบิตข้อมูล ส่วนความละเอียดของการแบ่งจะขึ้นอยู่กับความต้องการในการส่งกลุ่มของบิตข้อมูลว่าจะส่งครั้งละกี่บิต ส่วนใหญ่จะแบ่งตามจำนวนเลขฐานสองยกกำลัง ได้แก่ 16, 32, 64, 128, 256 เป็นต้น

การกล้ำสัญญาณวิธีนี้ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาระดับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบสื่อสารที่ทำให้เครื่องรับไม่สามารถแยกแยะระหว่างข้อมูลและสัญญาณรบกวน วิธีนี้จะกำหนดแต่ละจุดข้อมูลเพื่อแทนค่าดิจิทัล โดยมีระยะห่างเท่ากันทำให้ง่ายต่อการจำแนก วิธีนี้จะช่วยให้ส่งข้อมูลได้ครั้งละหลายบิต ตัวอย่างเช่น วิธี 16-QAM เป็นวิธีที่แบ่งข้อมูลออกเป็น 16 แบบ ซึ่งแทนค่าดิจิทัลได้ 16 ค่า หมายถึงสามารถส่งข้อมูลได้ครั้งละ 4 บิต ($2^4 = 16$)



รูปที่ 2.6 แสดงตำแหน่งการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM และ 64-QAM บนระนาบเชิงซ้อน

ที่มา: <http://www.eefocus.com/book/07-11/285011195106124.html>

จากรูปที่ 2.6 เป็นตำแหน่งในระนาบเชิงซ้อนของการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM และ 64-QAM แสดงให้เห็นว่า ยิ่งต้องการส่งข้อมูลครั้งละหลายบิตก็จะมีจุดบนระนาบเชิงซ้อนที่ใกล้กันมากขึ้น

2.1.3 ความแรงของสัญญาณกับวิธีการกล้ำสัญญาณ

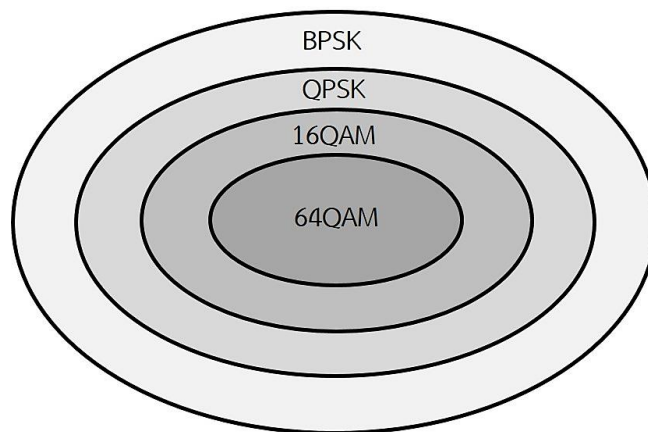
เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ความแรงของสัญญาณก็จะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่สามารถใช้การกล้ำสัญญาณที่ซับซ้อนได้ จึงต้องปรับเปลี่ยนวิธีการกล้ำสัญญาณให้สอดคล้องกับความแรงของสัญญาณ ซึ่งส่งผลต่อความเร็ว โดยมาตรฐาน 802.11g มีดังนี้

2.1.3.1 ระยะไม่เกิน 50 ฟุต ใช้การกล้ำสัญญาณแบบ 64-QAM จะมีความเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 48-54 เมกะบิตต่อวินาที

2.1.3.2 ระยะทางมากกว่า 100 ฟุต ใช้การกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM จะมีความเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 24-36 เมกะบิตต่อวินาที

2.1.3.3 ระยะทาง 150 ฟุตขึ้นไป ใช้การกล้ำสัญญาณแบบ QPSK จะมีความเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 12-18 เมกะบิตต่อวินาที

2.1.3.4 ระยะทางไกลเกิน 200 ฟุตขึ้นไป ใช้วิธีการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK จะมีความเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 6-9 เมกะบิตต่อวินาที



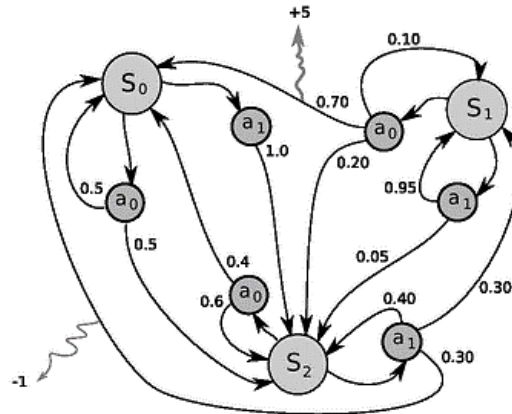
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการกล้าสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับระยะทางที่นำมาใช้ในโรงงาน

2.1.4 กระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ (MDP)

เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีผลลัพธ์บางส่วนเป็นแบบสุ่มและบางส่วนอยู่ภายใต้การควบคุมการตัดสินใจ มีประโยชน์สำหรับการศึกษาความหลากหลายของปัญหา การเพิ่มประสิทธิภาพ การแก้ไขผ่านโปรแกรมแบบพลวัต และการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforced learning) โดยกระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟเป็นกระบวนการสุ่มควบคุมเวลาแบบไม่ต่อเนื่องในแต่ละขั้นตอนของเวลา กระบวนการนี้จะอยู่ในสถานะหนึ่ง และมีการตัดสินใจเลือกการกระทำใด ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง กำหนดให้ผลตอบแทนที่ได้จากการย้ายไปสถานะใหม่ที่เวลาถัดไป ซึ่งความน่าจะเป็นที่กระบวนการจะย้ายไปสถานะใหม่ที่มีผลจากการดำเนินการ จะได้ฟังก์ชันการเปลี่ยนสถานะที่สถานะถัดไปจะขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบันและการตัดสินใจเลือกการกระทำ ดังสมการที่ 2.1

$$P_{ss'}^a = Pr\{s_{t+1} = s' \mid s_t = s, a_t = a\} \quad (2.1)$$

| | | |
|-------|-----------|--------------------------|
| เมื่อ | a_t | คือ การกระทำ ณ เวลาหนึ่ง |
| | s_t | คือ สถานะ ณ เวลาหนึ่ง |
| | s_{t+1} | คือ สถานะที่เวลาถัดไป |



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกระบวนการการตัดสินใจของมาร์คอฟที่มี 3 สถานะ ได้แก่ S_0, S_1, S_2 และในแต่ละสถานะมี 2 การกระทำ ได้แก่ a_0, a_1

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Markov_decision_process

2.1.5 กำหนดการเชิงเส้น (Linear programming)

กำหนดการเชิงเส้น เป็นการนำคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ปัญหาที่ต้องการทราบผลลัพธ์ที่เหมาะสมหรือได้ประโยชน์สูงสุด เช่น กรณีที่เราต้องการหาผลตอบแทนสูงสุดที่เป็นไปได้ (Maximization) หรือ กรณีที่เราต้องการลดเวลาหรือต้นทุนที่ใช้ในการให้บริการให้ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (Minimization) ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

2.1.5.1 รูปแบบกำหนดการเชิงเส้น ประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบ คือ วัตถุประสงค์ (Objective) และเงื่อนไขบังคับ (Constraints) โดยทั่วไปปัญหาของกำหนดการเชิงเส้นหรือปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดมี 2 แบบ ได้แก่ ปัญหาในการหาค่าสูงสุด (Maximization problem) และปัญหาในการหาค่าต่ำสุด (Minimization problem)

$$\begin{aligned}
 \min/ \max \quad & z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j (\geq, \leq, =) b_i \quad \text{for } i=1,2,\dots,m \\
 & x_j \geq 0 \quad \text{for } j=1,2,\dots,n
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

สมการที่ 2.2 คือตัวอย่างการเขียนรูปแบบของปัญหาทางกำหนดการเชิงเส้นอย่างหนึ่ง ซึ่ง s.t. ย่อมาจากคำว่า subject to the constraints

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Dusit Niyato; Ping Wang; & Dong In Kim. 2015: 1-6) ได้วิจัยเรื่อง การประมูลการให้บริการที่ดีที่สุดสำหรับอุปกรณ์ไอโอทีที่รับกำลังแบบไร้สาย (Optimal Service Auction for Wireless Powered Internet of Things Device) นำเสนอการประมูลการให้บริการที่ดีที่สุดสำหรับอุปกรณ์ไอโอทีที่รับกำลังแบบไร้สาย โดยผู้ใช้สามารถเข้าถึงบริการจากอุปกรณ์ได้โดยการประมูล ซึ่งในการตัดสินใจที่จะให้บริการแก่ผู้ใช้นั้น จะต้องได้รับการเสนอราคาที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ โดยนำกระบวนการการตัดสินใจของมาร์คอฟ (MDP) มาประกอบการตัดสินใจ เพื่อเพิ่มผลตอบแทนที่ได้จากการประมูลหักกับค่าใช้จ่ายในการถ่ายโอนพลังงานและค่าใช้จ่ายช่องสัญญาณ ทางผู้เสนอโครงการได้เห็นถึงประสิทธิภาพของงานวิจัยเรื่องนี้ จึงนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

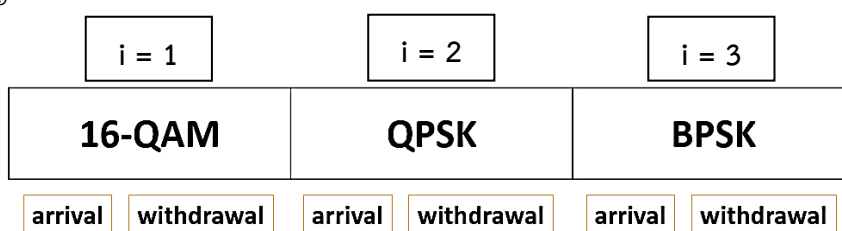
สมมติให้สถานีฐานถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้ในรัศมีใกล้ กลาง และไกล โดยกำหนดให้รัศมีใกล้ กลาง และไกลถูกทำงานโดยการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM, QPSK และ BPSK ตามลำดับ ซึ่งผู้ใช้ที่เข้ามาในรัศมีแต่ละรอบจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ด้วยความน่าจะเป็นเท่า ๆ กัน โดยสถานีฐานตัดสินใจว่า จะรับคำร้องขอเข้าใช้ที่ใกล้ที่สุดหรือไม่ เช่น มีผู้ใช้เข้ามาในรัศมีกลางและรัศมีไกล ผู้ใช้ที่อยู่ในรัศมีกลางจะได้รับการให้บริการ แต่ถ้าในรอบนั้นสถานีฐานตัดสินใจไม่ให้บริการผู้ใช้ในรัศมีใด ๆ ก็จะไม่มีการให้บริการในรอบนั้น เราจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ และใช้กระบวนการตัดสินใจของมาร์คอฟควคูปเพื่อคำนวณหาอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้น โดยปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการส่งข้อมูลขาขึ้น ได้แก่ ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้บริการ ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ ความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด และความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลสำเร็จ กำหนดให้สถานีฐานทุกสถานีได้รับพลังงานจากโซลาร์เซลล์ ในกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน ถ้าสถานีใดสถานีหนึ่งตัดสินใจให้บริการในรอบนั้นแบตเตอรี่ของสถานีนั้นจะลดลง 1 หน่วย แต่ในกรณีที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน แบตเตอรี่แต่ละสถานีจะเชื่อมต่อกัน และเมื่อมีการให้บริการทั้ง 2 สถานี แบตเตอรี่ของแต่ละสถานีจะลดลงสถานีละ 1 หน่วย

3.1 ออกแบบการทำงานของโครงการงาน

เราศึกษา 2 กรณี คือ กรณีที่สถานีฐานทำงานโดยอิสระจากกันและกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างกัน

3.1.1 สถานะ

รัศมีใกล้ กลาง และไกลถูกทำงานโดยการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM, QPSK และ BPSK ตามลำดับ โดยมีโอกาสที่ผู้ใช้จะเข้ามาหรือไม่เข้ามาในแต่ละรัศมี โดยสถานะทั้งหมดกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกันสามารถมีได้ 2^3 สถานะ และกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยถ่ายโอนพลังงานร่วมกันมีได้ $2^3 \times 2^3$ สถานะ



รูปที่ 3.1 สถานะทั้งหมดในระบบ

จากรูปที่ 3.1 เป็นที่สังเกตได้ว่า มี 8 สถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังนี้

- (1) สถานะที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ทั้ง 3 รัศมี
- (2) สถานะที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ในรัศมีใกล้และกลาง แต่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ในรัศมีไกล
- (3) สถานะที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ในรัศมีใกล้และไกล แต่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ในรัศมีกลาง
- (4) สถานะที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ในรัศมีใกล้ แต่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ในรัศมีกลางและไกล
- (5) สถานะที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ในรัศมีกลางและไกล แต่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ในรัศมีใกล้
- (6) สถานะที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ในรัศมีกลาง แต่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ในรัศมีใกล้และไกล
- (7) สถานะที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ในรัศมีไกล แต่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ในรัศมีใกล้และกลาง
- (8) สถานะที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ทั้ง 3 รัศมี

กำหนดให้ α_i คือความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้ในรัศมี

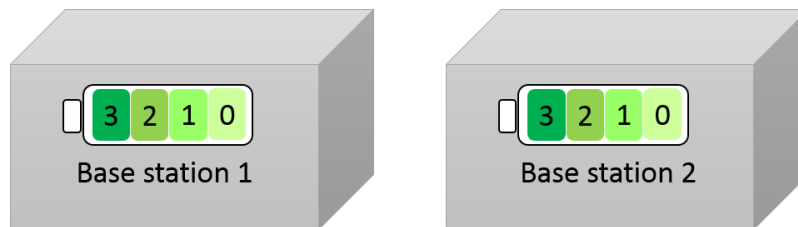
β_i คือความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการรถนอนการเข้าใช้ในแต่ละรัศมี ; $i = 1$ ถึง 3

3.1.2 ระดับพลังงานของสถานีฐาน

3.1.2.1 ระดับพลังงานกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยอิสระจากกัน

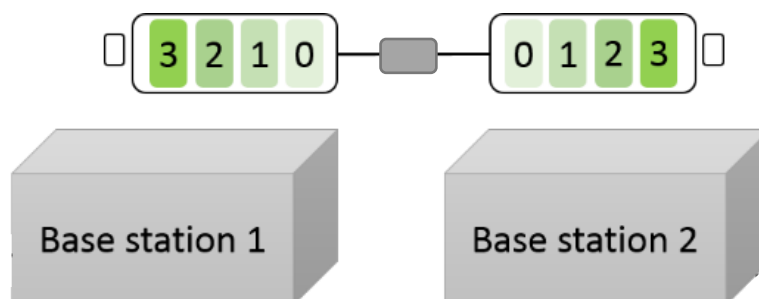
กำหนดให้สถานีฐานแต่ละสถานีมีระดับพลังงานที่มากที่สุด คือ L หน่วย ในโครงการนี้

กำหนดให้ $L = 3$ หน่วย แต่มีได้จำกัดเฉพาะค่า $L = 3$



รูปที่ 3.2 ระดับพลังงานกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน

3.2.2.2 ระดับพลังงานกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี มีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน



รูปที่ 3.3 ระดับพลังงานกรณีที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างกัน

3.1.3 ความน่าจะเป็นของแสงแดด

ความเป็นไปได้ของแสงแดดแบ่งได้ 2 กรณี คือ กรณีมีแสงและกรณีไม่มีแสง โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นในกรณีที่มีแสงมีค่าเป็น δ และความน่าจะเป็นในกรณีที่ไม่มีแสงมีค่าเป็น $1-\delta$

3.1.4 ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ

ความเป็นไปได้ในการส่งข้อมูลแบ่งได้ 2 กรณี คือ กรณีส่งข้อมูลสำเร็จและกรณีส่งข้อมูลไม่สำเร็จ โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นในกรณีส่งข้อมูลสำเร็จมีค่าเป็น ϵ และความน่าจะเป็นในกรณีส่งข้อมูลไม่สำเร็จมีค่าเป็น $1-\epsilon$

3.1.5 การตัดสินใจ

กำหนดให้ a_{ac} คือตัวแปรที่มีค่าเป็นจำนวนนับแสดงถึงสถานะการตัดสินใจ

3.1.5.1 สำหรับกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยอิสระจากกัน การตัดสินใจมีด้วยกัน 2 กรณี คือ กรณีที่สถานีฐานไม่รับการเสนอขอใช้บริการและกรณีที่สถานีฐานรับการเสนอขอใช้บริการ กำหนดให้กรณีที่สถานีฐานไม่รับการเสนอขอใช้บริการมีค่า $a_{ac} = 0$ และกำหนดให้กรณีที่สถานีฐานรับการเสนอขอใช้บริการมีค่า $a_{ac} = 1$

3.1.5.2 การตัดสินใจในกรณีที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างกัน มี 4 กรณี ดังนี้

- (1) สถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 ไม่รับการเสนอขอใช้บริการให้มีค่าเป็น $a_{ac} = 0$
- (2) สถานีที่ 1 รับการร้องขอใช้บริการแต่สถานีที่ 2 ไม่รับการร้องขอใช้บริการให้มีค่าเป็น $a_{ac} = 1$
- (3) สถานีที่ 1 ไม่รับการร้องขอใช้บริการแต่สถานีที่ 2 รับการร้องขอใช้บริการให้มีค่าเป็น $a_{ac} = 2$
- (4) สถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 รับการเสนอขอใช้บริการให้มีค่าเป็น $a_{ac} = 3$

3.1.6 เมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ

ปริภูมิสถานะของสถานีฐานกำหนดไว้ดังต่อไปนี้

$$\Theta = \{(D, L)\}; L \in \{0, \dots, L\} \quad (3.1)$$

โดย D คือ สถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ กัน

L คือ สถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่ของสถานีฐาน

สถานะประกอบของการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ คือ $D = (D_1, \dots, D_i, \dots, D_B)$

โดย D_1 คือ สถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ที่เข้ามาใช้บริการใน 1 รัศมี

D_i คือ สถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ที่เข้ามาใช้บริการใน i รัศมี

D_B คือ สถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ที่เข้ามาใช้บริการในทุกรัศมี

เราสมมติให้คำร้องของผู้ใช้นำค่าจากเซต $B = \{b_1, \dots, b_i, \dots, b_B\}$

โดยที่ b_1 คือ คำร้องขอเข้าใช้บริการที่เข้ามาใน 1 รัศมี

b_i คือ คำร้องขอเข้าใช้บริการที่เข้ามาใน i รัศมี

b_B คือ คำร้องขอเข้าใช้บริการที่เข้ามาในทุกรัศมี

สมมติให้ $b_i < b_{i+1}$ โดยที่ $b_i \in D$ กำหนดให้เป็น

$$D_i = \begin{cases} 1, & \text{if } b_i \text{ is active at the base station,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.2)$$

ดังนั้นสถานะประกอบของคำร้องที่เป็นไปได้ คือ $D = (D_1, \dots, D_i, \dots, D_B)$ ซึ่งตรงกับเซตของคำร้อง

กำหนดให้เป็น $B = \{b_1, \dots, b_i, \dots, b_B\}$ สถานะประกอบทั้งหมดของสถานีฐานกำหนดเป็น $\theta = (D, L)$

การกระทำของสถานีฐาน กำหนดให้เป็นเงื่อนไขดังนี้

$$a_{ac} = \begin{cases} 1, & \text{if accepting the highest request,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.3)$$

ให้ $D_{(d_1, \dots, d_i, \dots, d_B), (d'_1, \dots, d'_i, \dots, d'_B)}(a_{ac})$ มีรูปแบบความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้

จากสถานะ $d = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_B)$ ไปยังสถานะ $d' = (d'_1, \dots, d'_i, \dots, d'_B)$ โดยที่องค์ประกอบนั้น

เกี่ยวข้องกับคำร้อง $b_1, \dots, b_i, \dots, b_B$ ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การตัดสินใจ (a_{ac}) ของสถานีฐาน โดย

ความน่าจะเป็นกำหนดให้เป็น

$$D_{(d_1, \dots, d_i, \dots, d_B), (d'_1, \dots, d'_i, \dots, d'_B)}(a_{ac}) = \prod_{i'=1}^B F(d_{i'}, d'_{i'}, a_{ac}, b^{\dagger}), \quad (3.4)$$

ฟังก์ชัน $F(d_i, d'_i, a_{ac}, b^\dagger)$ จะส่งกลับค่าความน่าจะเป็นในสถานะที่ถูกใช้งานของคำร้องเปลี่ยนจาก d_i ไปยัง d'_i และดำเนินการ a_{ac} โดยให้คำร้องขอที่สูงที่สุดในรอบนั้นแทนด้วย $b^\dagger = \max_{b_i} b_i$ ขึ้นอยู่กับ $d_i = 1$ คือ การถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีที่ใกล้ที่สุด

ในกรณีที่สถานีฐานตัดสินใจไม่รับการร้องขอเข้าใช้ช่อง ($a_{ac} = 0$) หรือรับการร้องขอ แต่คำร้องขอสูงสุดไม่ใช่คำร้องขอปัจจุบัน มีเงื่อนไขความน่าจะเป็นดังนี้

$$F(d_i, d'_i, a_{ac}, b^\dagger) = \begin{cases} 1 - \alpha_{b_i}, & d_i = d'_i = 0, \\ \alpha_{b_i}, & d_i = 0 \text{ and } d'_i = 1, \\ \beta_{b_i}, & d_i = 1 \text{ and } d'_i = 0, \\ 1 - \beta_{b_i}, & d_i = d'_i = 1. \end{cases} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 เป็นที่สังเกตได้ว่า ในกรณีนี้สถานะที่ถูกใช้งาน d_i ของคำร้อง b_i จะเปลี่ยนเป็นสถานะ d'_i เท่านั้น เพราะมีการร้องขอเข้าใช้บริการและถอนการร้องขอเข้าใช้บริการ โดยเฉพาะเงื่อนไขที่ 1 คำร้อง b_i ไม่มาถึง เงื่อนไขที่ 2 คำร้อง b_i มาถึง เงื่อนไขที่ 3 มีการถอนการร้องขอเข้าใช้บริการที่ถูกใช้งาน และเงื่อนไขที่ 4 ไม่มีการถอนการร้องขอเข้าใช้บริการ

หรือในอีกกรณีหนึ่ง ถ้าสถานีฐานรับการร้องขอที่คำร้องขอสูงสุด ($b^\dagger = b_i$) มีเงื่อนไขความน่าจะเป็นดังนี้

$$F(d_i, d'_i, a_{ac}, b^\dagger) = \begin{cases} 1 - \alpha_{b_i}, & d_i = 1 \text{ and } d'_i = 0, \\ \alpha_{b_i}, & d_i = d'_i = 1. \end{cases} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 เป็นที่สังเกตได้ว่า คำร้องขอสูงสุดได้รับการบริการแล้ว คำร้องขอจะถูกใช้งานก็ต่อเมื่อมีคำร้องขอใหม่เข้ามา

ในกรณีที่สถานะพื้นฐานทำงานโดยอิสระจากกัน

กำหนดให้ $\mathbf{D}[0,1]^{8 \times 8}$ คือ เมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ กัน

$\mathbf{L}[0,1]^{32 \times 32}$ คือ เมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่สถานะพื้นฐานผนวกกับเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ กัน

เราทำการผนวกเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่สถานะพื้นฐานกับเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีด้วยองค์ประกอบ $D_{(d_1, \dots, d_i, \dots, d_B), (d'_1, \dots, d'_i, \dots, d'_B)}(a_{ac})$

3.2.6.1 เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะกรณีที่สถานะพื้นฐานทำงานโดยอิสระจากกันมี 2 กรณี ดังนี้

(1) กรณีที่สถานะพื้นฐานไม่รับการร้องขอของผู้ใช้

$$\mathbf{L}(0) = \begin{bmatrix} (1-\delta)\mathbf{D}_1(0) & \delta\mathbf{D}_1(0) & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & & (1-\delta)\mathbf{D}_1(0) & \delta\mathbf{D}_1(0) \\ & & & & \mathbf{D}_1(0) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.7 เป็นที่สังเกตได้ว่า เมื่อไม่มีการให้บริการระดับพลังงานจะเพิ่มขึ้นถึงระดับพลังงานสูงสุด

(2) กรณีที่สถานะพื้นฐานรับการร้องขอของผู้ใช้

$$\mathbf{L}(1) = \begin{bmatrix} (1-\delta)\mathbf{D}_1(0) & \delta\mathbf{D}_1(0) & & & \\ (1-\delta)\mathbf{D}_1(1) & \delta\mathbf{D}_1(1) & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & & (1-\delta)\mathbf{D}_1(1) & \delta\mathbf{D}_1(1) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 เป็นที่สังเกตได้ว่า ระดับพลังงานจะลดลงเมื่อมีการให้บริการแต่ถ้ามีแสงระดับพลังงานจะคงเดิม ยกเว้นในแถวแรกที่ระดับพลังงานจะเพิ่มขึ้น

โดยอัตราการส่งข้อมูลที่ได้จะเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

$$R((\theta), (a_{ac})) = \begin{cases} \varepsilon_{b^*} b^*, & d_{b^*} = 1 \text{ and } a_{ac} = 1 \text{ and } L > 0, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.9 เป็นที่สังเกตได้ว่า สถานีฐานจะได้รับอัตราการส่งข้อมูลถ้าค่าธรรมเนียมสูงสุดถูกใช้งาน และสถานีฐานรับการร้องขอเข้าใช้บริการโดยที่ระดับพลังงานต้องไม่เท่ากับศูนย์

เราพิจารณาค่าอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นเฉลี่ย โดยกำหนดให้เป็น π^* สำหรับสถานีฐาน โดยการแก้เทียบกำหนดการเชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \max_{\phi(\theta, a)} \quad & \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{a \in A} \phi(\theta, a) R(\theta, a), \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{a \in A} \phi(\theta', a) = \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{a \in A} \phi(\theta, a) L_{\theta, \theta'}(a), \quad \theta' \in \Theta, \\ & \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{a \in A} \phi(\theta, a) = 1, \quad \phi(\theta, a) \geq 0, \end{aligned} \quad (3.10)$$

โดยที่ $L_{\theta, \theta'}(a_{ac})$ เป็นองค์ประกอบของเมทริกซ์ $\mathbf{L}(a_{ac})$ ซึ่งสถานะประกอบทั้งหมดของสถานีฐาน กำหนดเป็น $\theta = (D, L)$ และ $\theta' = (D', L')$ ให้การแก้ปัญหาของกำหนดการเชิงเส้นแสดงโดย $\phi^*(\theta, a)$ จะได้ค่าอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นเฉลี่ยดังสมการที่ 3.11

$$\pi^*(\theta, a) = \frac{\phi^*(\theta, a)}{\sum_{a' \in A} \phi^*(\theta, a')}, \quad (3.11)$$

สำหรับ $\theta \in \Theta$ และ $\sum_{a' \in A} \phi^*(\theta, a') > 0$ ถ้า $\sum_{a' \in A} \phi^*(\theta, a') = 0$ เมื่อนั้น $\pi^*(\theta, (0, 0)) = 1$

ในกรณีที่สถานีฐานทำงานโดยถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

กำหนดให้ $\mathbf{D}[0,1]^{64 \times 64}$ คือ เมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ กัน

$\mathbf{L}[0,1]^{256 \times 256}$ คือ เมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่สถานีฐานผนวกกับเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ กัน

เราทำการผนวกเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่สถานีฐานกับเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีด้วยองค์ประกอบ $D_{(d_1, \dots, d_i, \dots, d_B), (d'_1, \dots, d'_i, \dots, d'_B)}(a_{ac})$

3.2.6.2 เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะกรณีที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันมี 4 กรณี ดังนี้

(1) กรณีที่สถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 ไม่รับการร้องขอเข้าใช้บริการ ($a_{ac} = 0$)

$$\mathbf{L}_2(0) = \begin{bmatrix} (1-\delta)\mathbf{D}_2(0) & \delta\mathbf{D}_2(0) & & & \\ (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & \delta\mathbf{D}_2(1) & & & \\ & \ddots & & \ddots & \\ & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & & \delta\mathbf{D}_2(1) \\ & & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & \mathbf{D}_2(0) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.12 เป็นที่สังเกตได้ว่า ระดับพลังงานของสถานีฐานทั้ง 2 จะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับพลังงานสูงสุด

- (2) กรณีที่สถานีที่ 1 รับการร้องขอเข้าใช้บริการ แต่สถานีที่ 2 ไม่รับการร้องขอเข้าใช้
บริการ ($a_{ac} = 1$)

$$\mathbf{L}_2(1) = \begin{bmatrix} (1-\delta)\mathbf{D}_2(0) & \delta\mathbf{D}_2(0) & & & & & \\ (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & \delta\mathbf{D}_2(1) & & & & & \\ & \ddots & & \ddots & & & \\ & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & & \delta\mathbf{D}_2(1) & & \\ & & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & & \delta\mathbf{D}_2(1) & \\ & & & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & & \delta\mathbf{D}_2(1) \\ & & & & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(1) & \delta\mathbf{D}_2(1) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 เป็นที่สังเกตได้ว่า เมื่อมีแสงระดับพลังงานจะเพิ่มขึ้นสถานีละ 1 หน่วย แต่เมื่อมีการให้บริการสถานีใดสถานีหนึ่ง ระดับพลังงานจะลดลง 1 หน่วย

- (3) กรณีที่สถานีที่ 1 ไม่รับการร้องขอเข้าใช้บริการ แต่สถานีที่ 2 รับการร้องขอเข้าใช้
บริการ ($a_{ac} = 2$)

$$\mathbf{L}_2(2) = \begin{bmatrix} (1-\delta)\mathbf{D}_2(0) & \delta\mathbf{D}_2(0) & & & & & \\ (1-\delta)\mathbf{D}_2(2) & \delta\mathbf{D}_2(2) & & & & & \\ & \ddots & & \ddots & & & \\ & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(2) & & \delta\mathbf{D}_2(2) & & \\ & & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(2) & & \delta\mathbf{D}_2(2) & \\ & & & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(2) & & \delta\mathbf{D}_2(2) \\ & & & & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(2) & \delta\mathbf{D}_2(2) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ 3.14 เป็นที่สังเกตได้ว่า เมื่อมีแสงระดับพลังงานจะเพิ่มขึ้นสถานีละ 1 หน่วย แต่เมื่อมีการให้บริการสถานีใดสถานีหนึ่ง ระดับพลังงานจะลดลง 1 หน่วย

(4) กรณีที่สถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 รับการร้องขอเข้าใช้บริการ ($a_{ac} = 3$)

$$\mathbf{L}_2(3) = \begin{bmatrix} (1-\delta)\mathbf{D}_2(0) & & \delta\mathbf{D}_2(0) & & \\ & (1-\delta)\mathbf{D}_2(0) & & \delta\mathbf{D}_2(0) & \\ (1-\delta)\mathbf{D}_2(3) & & \delta\mathbf{D}_2(3) & & \\ & \ddots & & \ddots & \\ & & (1-\delta)\mathbf{D}_2(3) & & \delta\mathbf{D}_2(3) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ 3.15 เป็นที่สังเกตได้ว่า ระดับพลังงานของสถานีฐานทั้ง 2 จะลดลง 2 หน่วย เมื่อมีการให้บริการ โดยค่าเฉลี่ยอัตราที่ได้จะเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

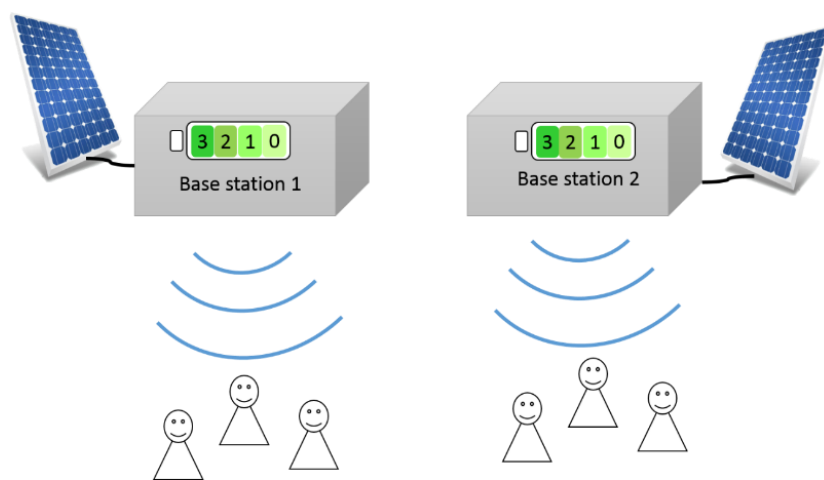
$$R = \begin{cases} \frac{(\varepsilon_{b_1^\dagger} b_1^\dagger + \varepsilon_{b_2^\dagger} b_2^\dagger)}{2}, & d_{b_1^\dagger} \text{ and } d_{b_2^\dagger} = 1 \text{ and } a_{ac} = 1 \text{ and } L > 1, \\ \frac{\varepsilon_{b_1^\dagger} b_1^\dagger}{2}, & d_{b_1^\dagger} = 1 \text{ and } a_{ac} = 1 \text{ and } L > 1, \\ \frac{\varepsilon_{b_2^\dagger} b_2^\dagger}{2}, & d_{b_2^\dagger} = 1 \text{ and } a_{ac} = 2 \text{ and } L > 1, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.16)$$

เราพิจารณาค่าอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นเฉลี่ยโดยกำหนดให้เป็น π^* สำหรับสถานีฐาน โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.10 และ สมการที่ 3.11

3.2 กลไกการทำงานของโครงข่าย

3.2.1 กรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานโดยอิสระจากกัน

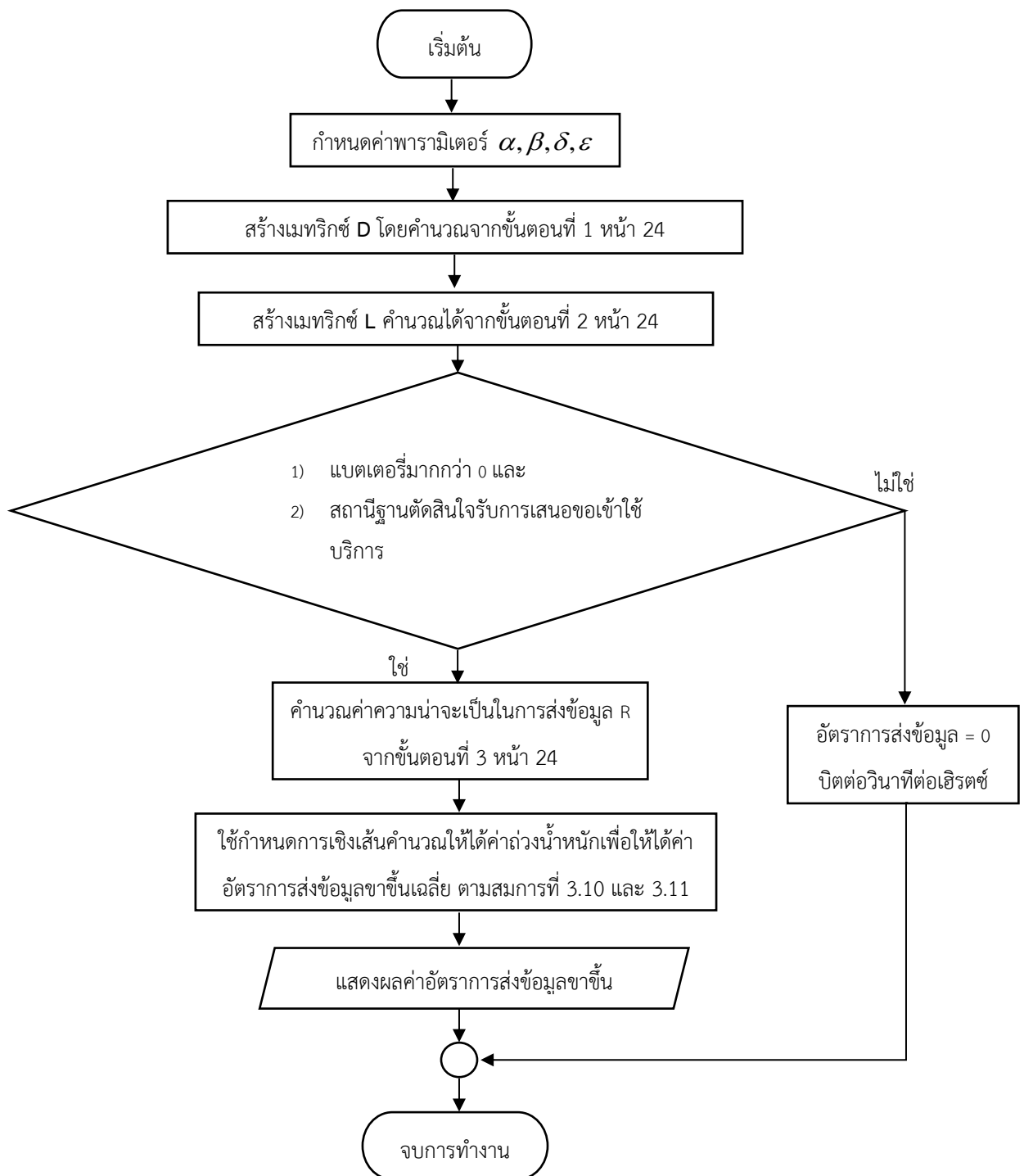
ในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานอิสระจากกัน การตัดสินใจในการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการจะเป็นการตัดสินใจแยกกัน ซึ่งแต่ละสถานีฐานจะมีการตัดสินใจ 2 กรณี คือ การที่สถานีฐานรับการขอเสนอการขอใช้บริการและการที่สถานีฐานไม่รับการเสนอการขอใช้บริการ การให้บริการในแต่ละรอบนั้นจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ที่เข้ามาใน 3 รัศมี ตามการกล้าสัญญาณ ได้แก่ 16-QAM, QPSK และ BPSK ซึ่งเมื่อแบตเตอรี่ของสถานีฐานใดสถานีหนึ่งหมดก็ไม่สามารถรับการร้องขอเข้าใช้บริการในรอบนั้น ๆ ได้ ต้องรอจนกว่าสถานีฐานนั้นมีแบตเตอรี่ถึงจะสามารถรับการร้องขอเข้าใช้บริการต่อไปได้



รูปที่ 3.4 การทำงานของระบบสถานีฐาน 2 สถานี ที่ทำงานโดยอิสระจากกัน

3.2.1.1 การทำงานของระบบในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยอิสระจากกัน

ในกระบวนการโดยการทำงานของสถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกัน เราได้ทำการเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม MATLAB ในการหาค่าอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นเฉลี่ยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการทำงานของสถานีฐาน 2 สถานีที่มีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน โดยการทำงานของสถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกันโดยมีผังคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.5 ผังงานกระบวนการทำงานของโปรแกรม MATLAB ในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยอิสระจากกัน

เรากำหนดให้การทำงานโดยรวมของระบบกรณีที่สถานีฐานทั้ง 2 สถานีทำงานโดยอิสระจากกัน มีค่าตัวแปรดังนี้ อัตราบิต คือ 4 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ สำหรับ 16-QAM 2 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ สำหรับ QPSK และ 1 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ สำหรับ BPSK เพื่อใช้วิเคราะห์ในโครงการนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณเมตริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ $\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$
2. **if** สถานีฐานรับการร้องขอเข้าใช้บริการแต่ค้ำร้งสูงสุดไม่ใช่ค้ำร้งปัจจุบัน
3. **set** เมตริกซ์ **D** ตามเงื่อนไขในสมการที่ 3.5
4. **else** สถานีฐานรับการร้องขอเข้าใช้บริการโดยที่ค้ำร้งขอเป็นค้ำร้งขอสูงสุด
5. **set** เมตริกซ์ **D** ตามเงื่อนไขในสมการที่ 3.6
6. **end if**

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณเมตริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่

สถานีฐานผนวกกับเมตริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ

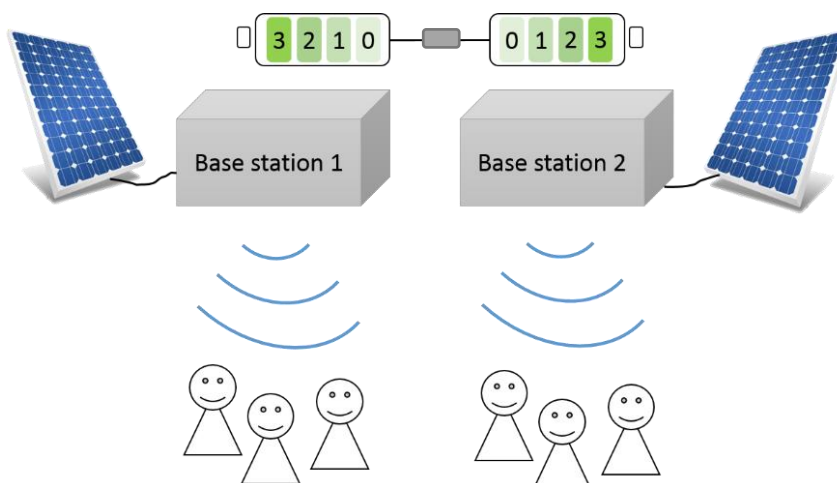
1. **if** สถานีฐานไม่ได้รับการเสนอการขอเข้าใช้บริการ
2. คำนวณค่าเมตริกซ์ $L(0)$ ดังสมการที่ 3.6
3. **else**
4. คำนวณค่าเมตริกซ์ $L(1)$ ดังสมการที่ 3.7
5. **end if**

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้น R

1. **if** มีการตัดสินใจรับเสนอการเข้าใช้บริการ และ แบตเตอรี่มากกว่า 0 หน่วย
2. **set** คำนวณอัตราการส่งข้อมูล จากเงื่อนไขในสมการที่ 3.9
3. **end if**

3.2.2 กรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

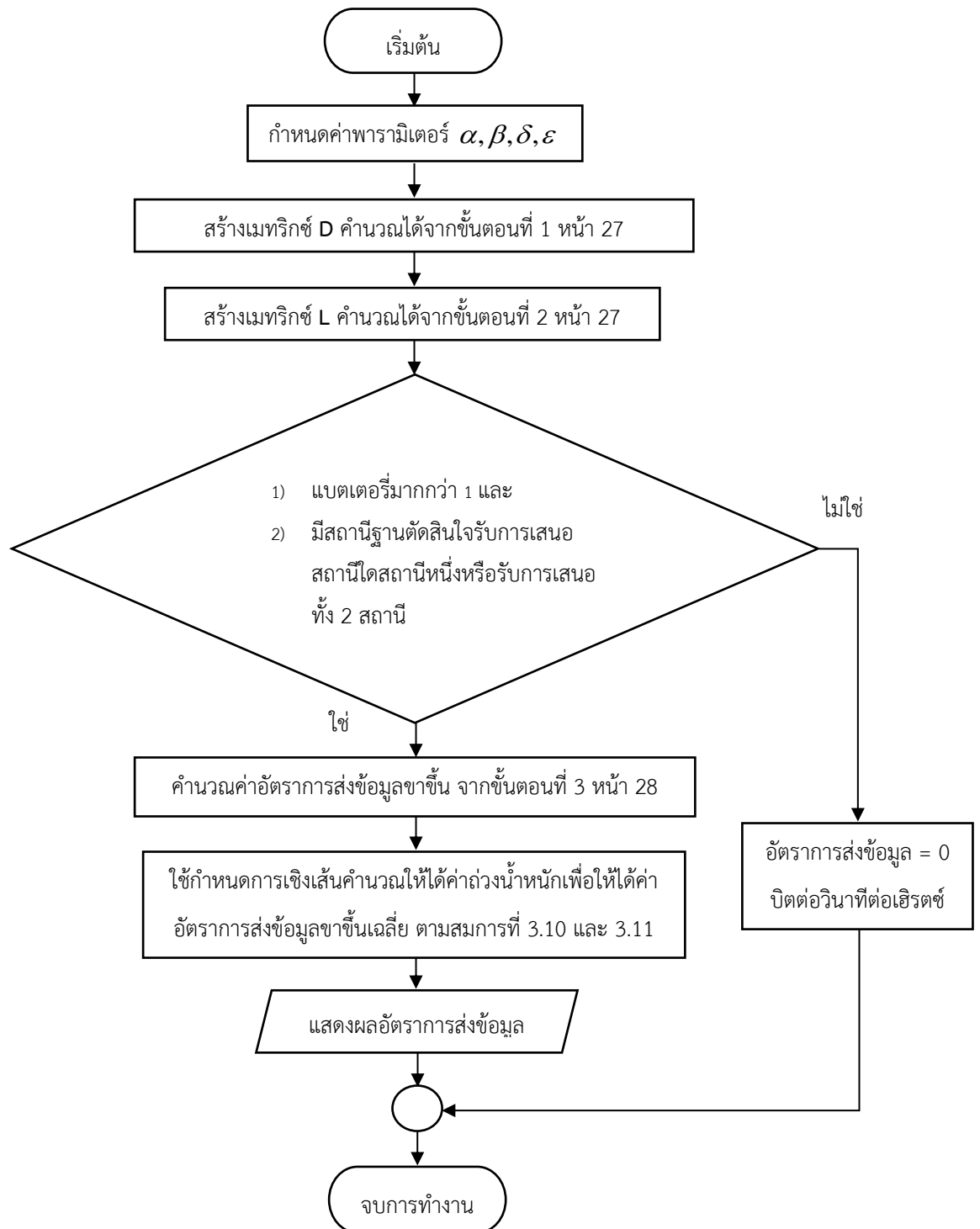
ในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน การตัดสินใจในการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการนั้นจะเป็นการร่วมมือกันทั้ง 2 สถานี ซึ่งการตัดสินใจนี้ใช้ความน่าจะเป็นในการถ่วงน้ำหนักเพื่อเลือกให้บริการ สถานีฐานทั้ง 2 สถานีนี้จะมีกรณีการตัดสินใจ 4 กรณี และในการให้บริการในแต่ละรอบนั้นจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ที่เข้ามาในรัศมีที่มีการกล้าสัญญาณ 3 แบบ ได้แก่ 16-QAM, QPSK และ BPSK โดยสถานีฐานมีการใช้แบดเตอร์ร่วมกัน และค่าแบดเตอร์สูงสุดคือ 6 หน่วย เมื่อสถานีฐานใดสถานีหนึ่งมีการรับการเสนอขอเข้าใช้บริการ ระดับแบดเตอร์ของสถานีฐานนั้นจะลดลงทีละ 1 หน่วย ในทางตรงกันข้ามเมื่อสถานีฐานใดสถานีหนึ่งไม่รับการเสนอขอเข้าใช้บริการ แบดเตอร์ของสถานีนั้นก็จะไม่ลดลง เมื่อสถานีฐานทั้ง 2 สถานีรับการเสนอขอเข้าใช้บริการพร้อมกัน แบดเตอร์ของทั้ง 2 สถานีจะลดลงทีละ 1 หน่วย หากแบดเตอร์ของสถานีใดสถานีหนึ่งหมด สถานีนั้นก็จะไม่รับการเสนอขอเข้าใช้บริการ



รูปที่ 3.6 การทำงานของระบบสถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

3.2.2.1 การทำงานของระบบในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานโดยถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

ในกระบวนการการทำงานของสถานีฐาน 2 สถานี ที่ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน เราได้ทำการเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการหาค่าอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นเฉลี่ยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการทำงานของสถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกัน โดยมีผังการคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.7 ผังงานกระบวนการทำงานของโปรแกรม MATLAB ในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

เรากำหนดให้การทำงานโดยรวมของระบบกรณีที่สถานีฐานทั้ง 2 สถานีทำงานโดยอิสระจากกัน มีค่าตัวแปรดังนี้ อัตราบิต คือ 4 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ สำหรับ 16-QAM 2 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ สำหรับ QPSK และ 1 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ สำหรับ BPSK เพื่อใช้วิเคราะห์ในโครงการนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ $\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$
2. **if** สถานีฐานรับการร้องขอเข้าใช้บริการแต่คำร้องสูงสุดไม่ใช่คำร้องปัจจุบัน
3. **set** เมทริกซ์ **D** ตามเงื่อนไขในสมการที่ 3.5
4. **else** สถานีฐานรับการร้องขอเข้าใช้บริการโดยที่คำร้องขอเป็นคำร้องขอสูงสุด
5. **set** เมทริกซ์ **D** ตามเงื่อนไขในสมการที่ 3.6
6. **end if**
7. สร้างเมทริกซ์ **D** เป็น 4 กรณี คือ
 - 1) สถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 ไม่รับการร้องขอเข้าใช้บริการ
 - 2) สถานีที่ 1 รับการร้องขอ แต่สถานีที่ 2 ไม่รับการร้องขอ
 - 3) สถานีที่ 1 ไม่รับการร้องขอ แต่สถานีที่ 2 รับการร้องขอ
 - 4) สถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 รับการร้องขอเข้าใช้บริการ

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่ สถานีฐานผนวกกับเมทริกซ์แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการถูกใช้งานของผู้ใช้ในรัศมีต่าง ๆ

1. **if** สถานีฐานตัวที่ 1 และสถานีฐานตัวที่ 2 ไม่รับการร้องขอเข้าใช้บริการ ($a_{ac}=0$)
2. คำนวณค่าเมทริกซ์ $L_2(0)$ ดังสมการที่ 3.11
3. **elseif** สถานีฐานตัวที่ 1 รับการร้องขอเข้าใช้บริการ แต่สถานีฐานตัวที่ 2 ไม่รับการร้องขอเข้าใช้บริการ ($a_{ac}=1$)
4. คำนวณค่าเมทริกซ์ $L_2(1)$ ดังสมการที่ 3.12
5. **elseif** สถานีฐานตัวที่ 1 ไม่รับการร้องขอเข้าใช้บริการ แต่สถานีฐานตัวที่ 2 รับการร้องขอเข้าใช้บริการ ($a_{ac}=2$)
6. คำนวณค่าเมทริกซ์ $L_2(2)$ ดังสมการที่ 3.13
7. **else** สถานีฐานตัวที่ 1 และตัวที่ 2 รับการร้องขอเข้าใช้บริการ ($a_{ac}=3$)
8. คำนวณค่าเมทริกซ์ $L_2(3)$ ดังสมการที่ 3.14
9. **end if**

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้น R

1. **if** สถานีใดสถานีหนึ่งหรือสถานีทั้ง 2 รับการร้องขอเข้าใช้บริการและแบตเตอรี่มากกว่า 1 หน่วย
2. **set** คำนวณอัตราการส่งข้อมูล จากเงื่อนไขในสมการที่ 3.16
3. **end if**

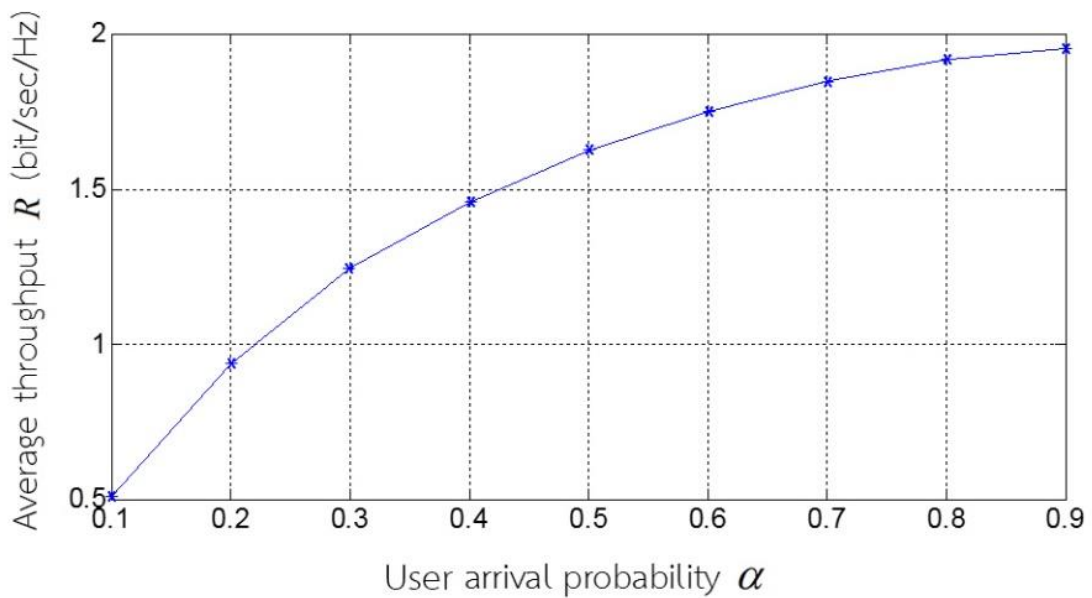
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

สำหรับในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาของบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการทดลองต่าง ๆ ทั้งหมดที่ได้มีการอธิบายหลักทฤษฎีเอาไว้แล้วในตอนต้น เพื่อพิสูจน์ให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า การแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้บริการ

4.1 การหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล

4.1.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน

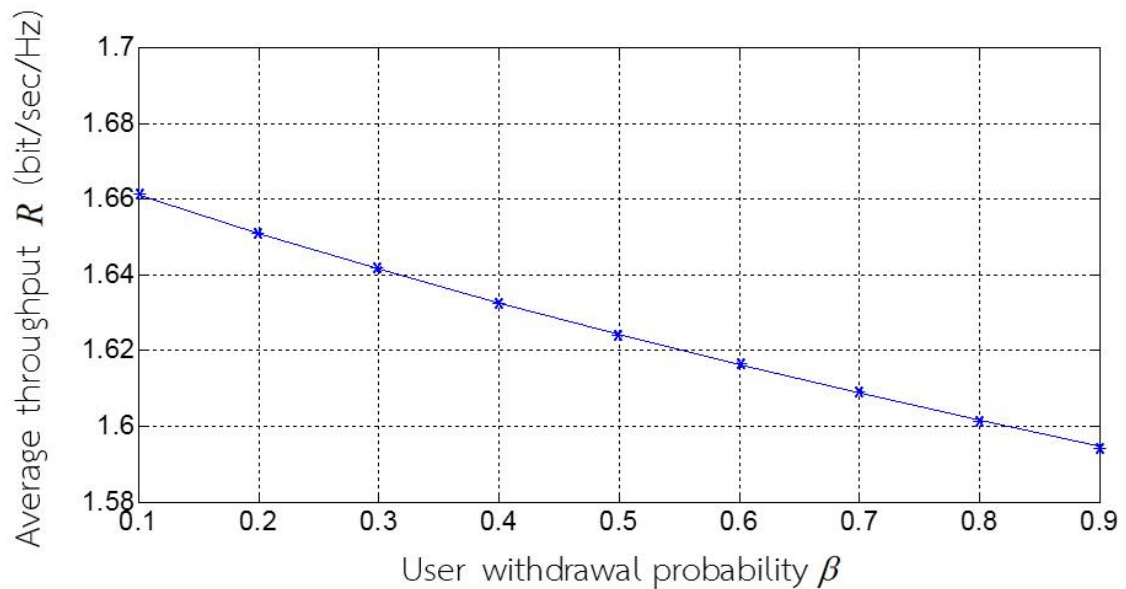


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้บริการสำหรับกรณีที่สถานีฐานทำงานอิสระจากกัน

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้บริการ

| α | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R | 0.5073 | 0.9353 | 1.2464 | 1.4561 | 1.6243 | 1.7471 | 1.8478 | 1.9174 | 1.9518 |

จากตารางที่ 4.1 เป็นที่สังเกตได้ว่า เมื่อมีผู้ใช้ร้องขอการเข้าใช้บริการลดลง ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะลดลงตาม และเมื่อมีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้บริการมากขึ้นค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะเพิ่มขึ้น

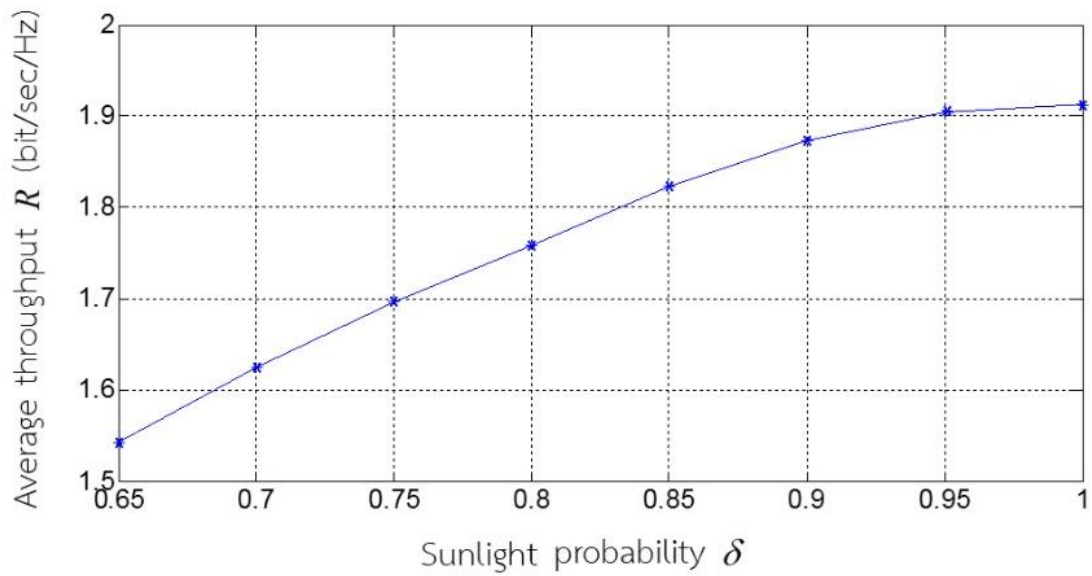


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการสำหรับกรณีทำงานอิสระจากกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ

| β | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R | 1.6610 | 1.6509 | 1.6415 | 1.6326 | 1.6243 | 1.6164 | 1.6089 | 1.6017 | 1.5949 |

จากตารางที่ 4.2 เป็นที่สังเกตได้ว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะสูงขึ้น เมื่อมีจำนวนผู้ใช้ที่ถอนการเข้าใช้บริการลดลง และเมื่อมีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการมากขึ้น ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นก็จะลดลง

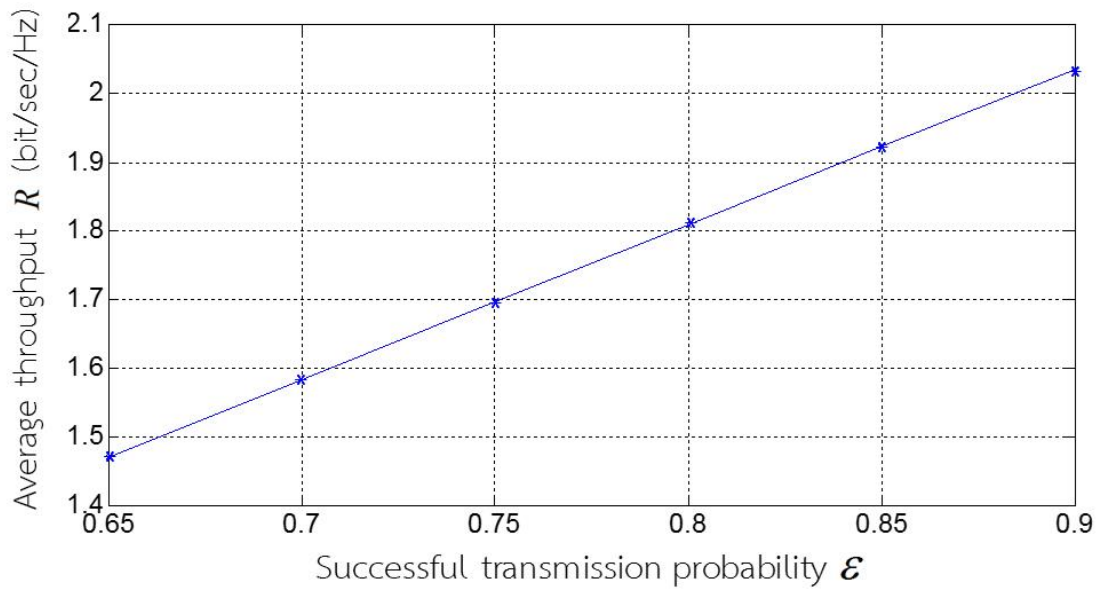


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดกรณีที่ตั้งสถานีฐานทำงานอิสระจากกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด

| δ | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R | 1.5438 | 1.6243 | 1.6961 | 1.7589 | 1.8225 | 1.8734 | 1.9046 | 1.9125 |

จากตารางที่ 4.3 เป็นที่สังเกตได้ว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดมากขึ้น



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ
กรณีทำงานอิสระจากกัน

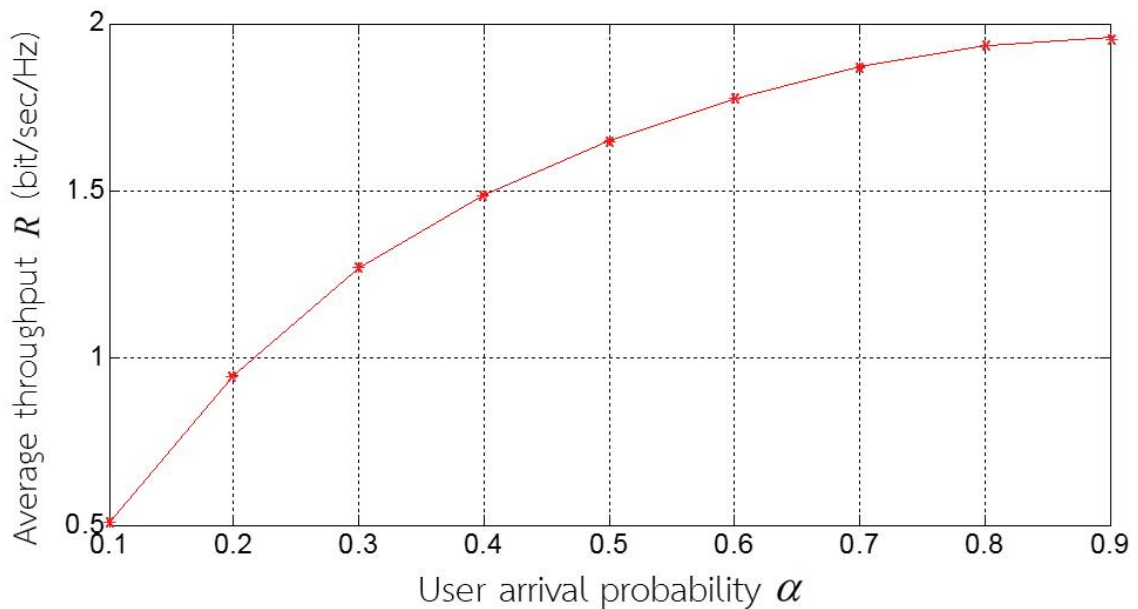
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ

| | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ϵ | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 |
| R | 1.4703 | 1.5834 | 1.6965 | 1.8096 | 1.9227 | 2.0358 |

จากตารางที่ 4.4 เป็นที่สังเกตได้ว่า เมื่อค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ย
อัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นก็จะเพิ่มขึ้น

4.1.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในกรณีที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงาน

ร่วมกัน

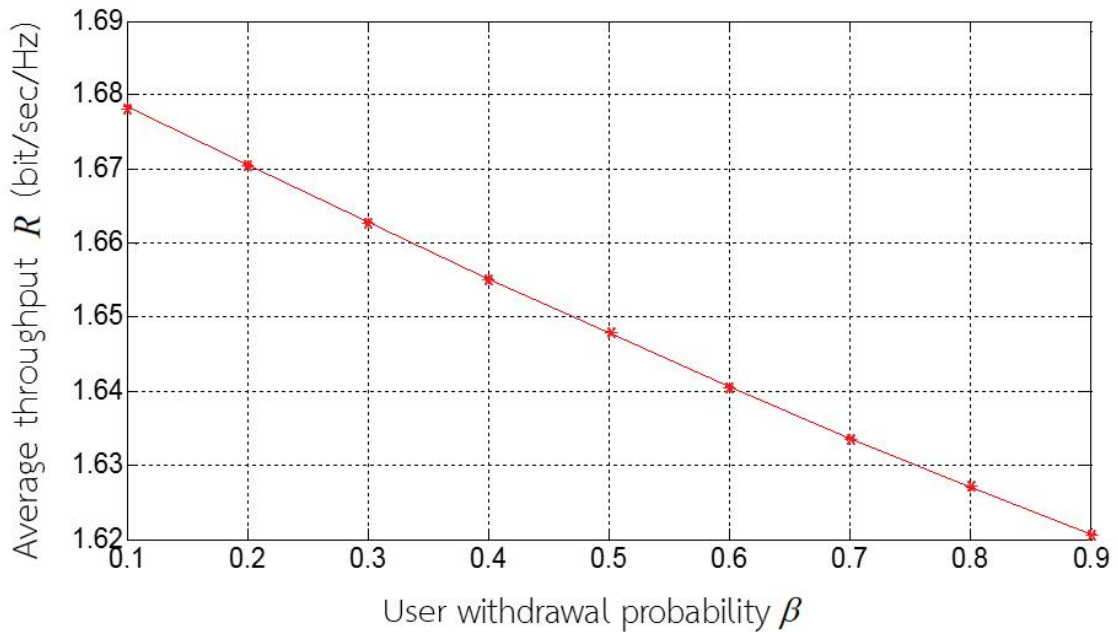


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีผู้ร้องขอเข้าใช้บริการกรณีถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ร้องขอเข้าใช้บริการ

| α | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R | 0.5084 | 0.9479 | 1.2696 | 1.4877 | 1.6478 | 1.7726 | 1.8691 | 1.9324 | 1.9569 |

จากตารางที่ 4.5 เป็นที่สังเกตได้ว่า เมื่อมีผู้ร้องขอการเข้าใช้บริการลดลง ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะลดลงตาม และเมื่อมีผู้ร้องขอเข้าใช้บริการมากขึ้น ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะเพิ่มขึ้น

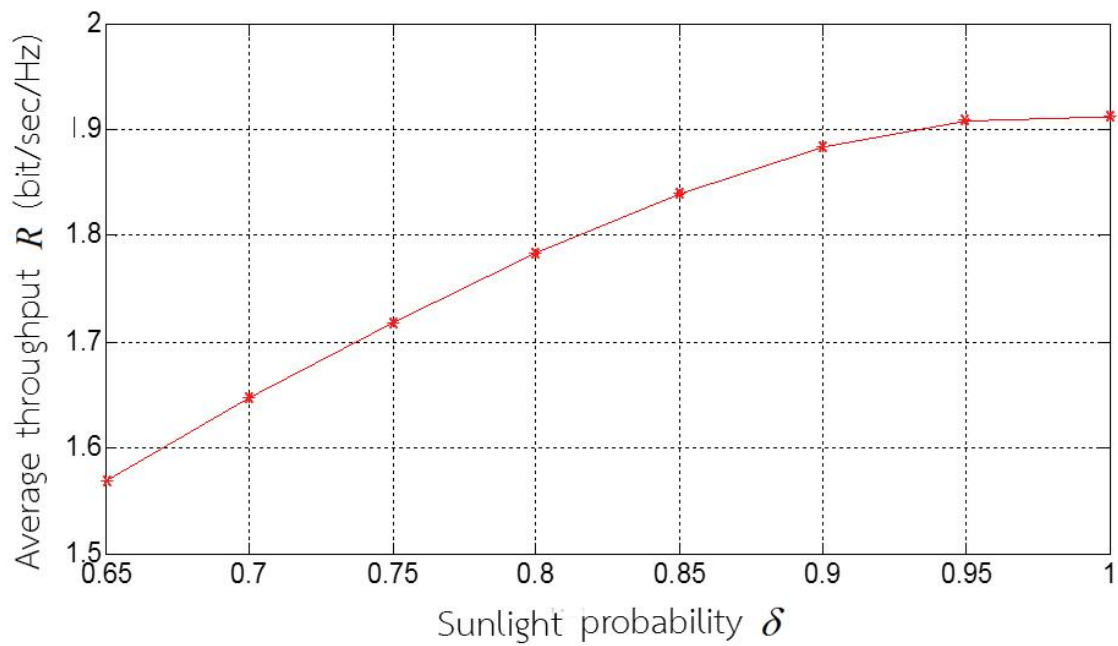


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการกรณีถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ

| β | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R | 1.6784 | 1.6706 | 1.6628 | 1.6552 | 1.6478 | 1.6406 | 1.6336 | 1.6270 | 1.6207 |

จากตารางที่ 4.6 เป็นที่สังเกตได้ว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการลดลง และเมื่อมีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการมากขึ้น ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นก็จะลดลง

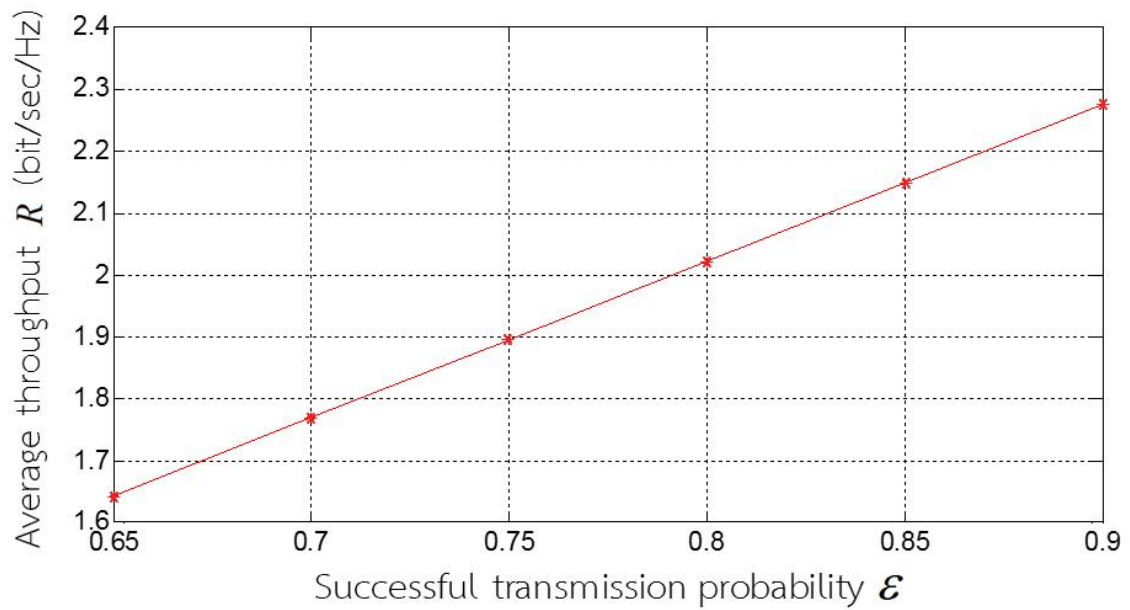


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดกรณีถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด

| | | | | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| δ | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1 |
| R | 1.5694 | 1.6478 | 1.7183 | 1.7842 | 1.8393 | 1.8831 | 1.9080 | 1.9125 |

จากตารางที่ 4.7 เป็นที่สังเกตได้ว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดมากขึ้น



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นกับความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จกรณีถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

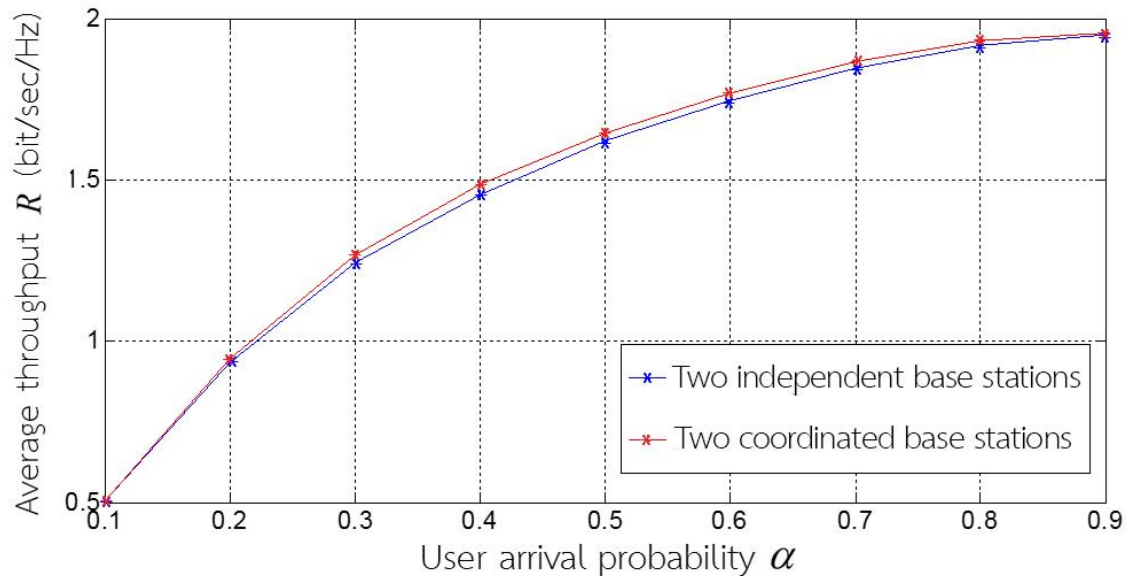
ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นในแต่ละค่าของความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ

| ϵ | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R | 1.6433 | 1.7697 | 1.8961 | 2.0225 | 2.1489 | 2.2753 |

จากตารางที่ 4.8 เป็นที่สังเกตได้ว่า ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นก็จะเพิ่มขึ้น

4.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลระหว่างกรณีที่สถานีฐานทั้ง 2 ทำงานอิสระจากกันและกรณีที่สถานีฐานทั้ง 2 ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกัน

4.2.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ร้องขอเข้าใช้บริการ (α) ของทั้ง 2 กรณี



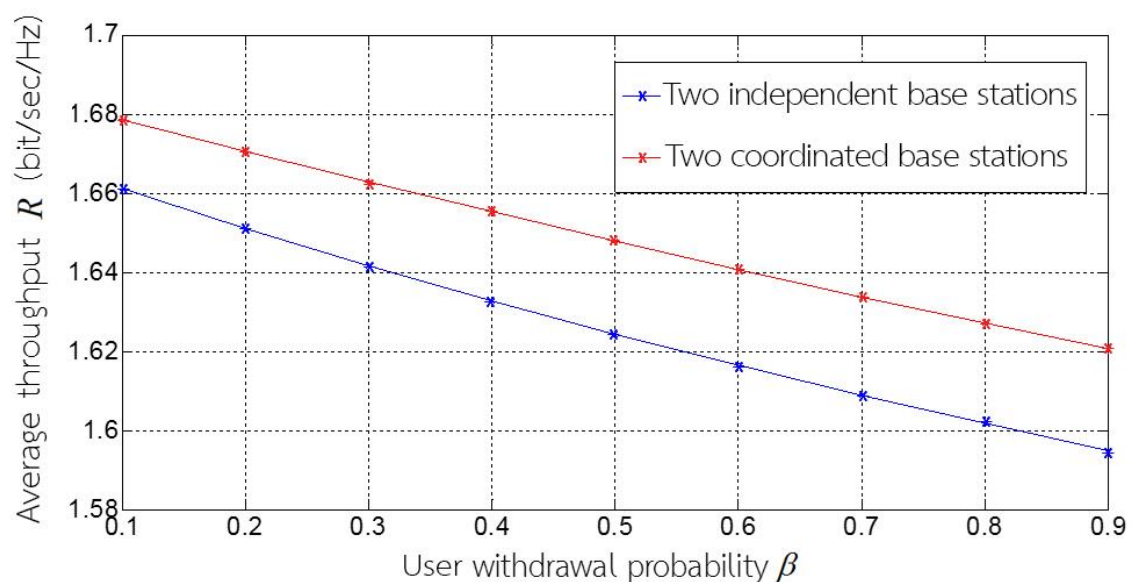
รูปที่ 4.9 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ระหว่าง 2 กรณี

จากรูปที่ 4.9 เราได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลโดยการกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ร้องขอเข้าใช้บริการเป็นการกำหนดค่าระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 โดยที่ระยะห่างระหว่าง 2 ค่าที่ติดกันคือ 0.1 สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันสูงกว่าในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกัน

ตารางที่ 4.9 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล

| ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล | ค่าที่กำหนด |
|--|---|
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอการเข้าใช้บริการ α | 0.1 ถึง 0.9 แปรค่าขึ้นละ 0.1 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ β | 0.5 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด δ | 0.7 |
| ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ ϵ | 0.7 สำหรับ 16-QAM 0.8 สำหรับ QPSK และ 0.9 สำหรับ BPSK |
| แบตเตอรี่สูงสุด | 3 หน่วย |
| อัตราบิต | 4, 2 และ 1 บิตต่อวินาทีต่อ เฮิรตซ์ |

4.2.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ (β) ของทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 4.10 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ระหว่าง 2 กรณี

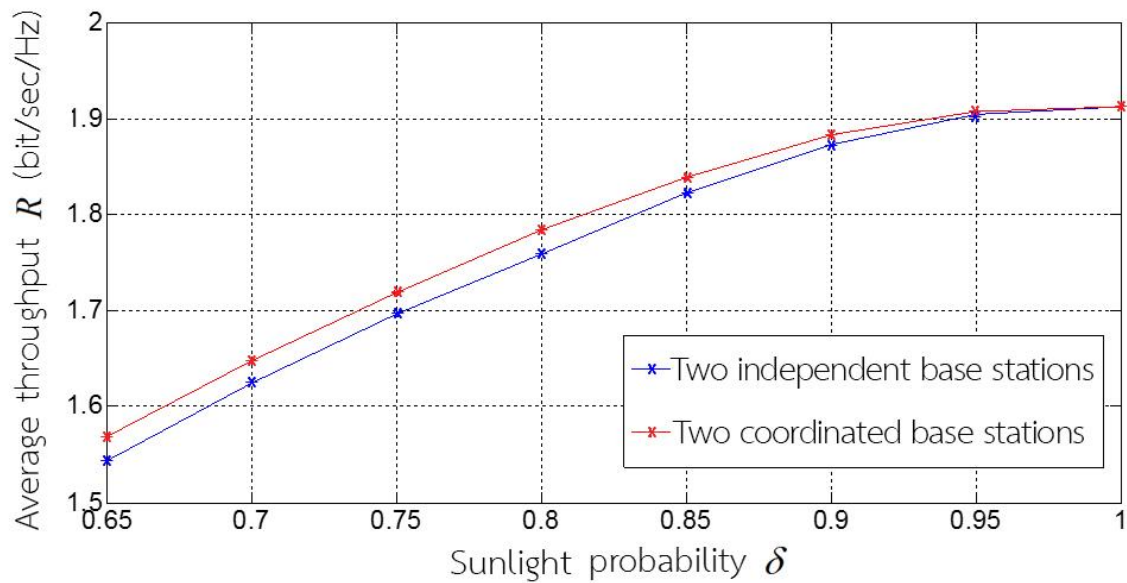
จากรูปที่ 4.10 เราได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลโดยการกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการเป็นการกำหนดค่าระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 โดยที่ระยะห่างระหว่าง 2 ค่าที่ถัด

กันคือ 0.1 สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันสูงกว่าในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกัน

ตารางที่ 4.10 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล

| ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล | ค่าที่กำหนด |
|---|---|
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ร้องขอการเข้าใช้บริการ α | 0.5 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ก่อนการเข้าใช้บริการ β | 0.1 ถึง 0.9 แปรค่าขั้นละ 0.1 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด δ | 0.7 |
| ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ ϵ | 0.7 สำหรับ 16-QAM 0.8 สำหรับ QPSK และ 0.9 สำหรับ BPSK |
| แบนด์เวดจ์สูงสุด | 3 หน่วย |
| อัตราบิต | 4, 2 และ 1 บิตต่อวินาทีต่อ เฮิรตซ์ |

4.2.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด (δ) ของทั้ง 2 กรณี



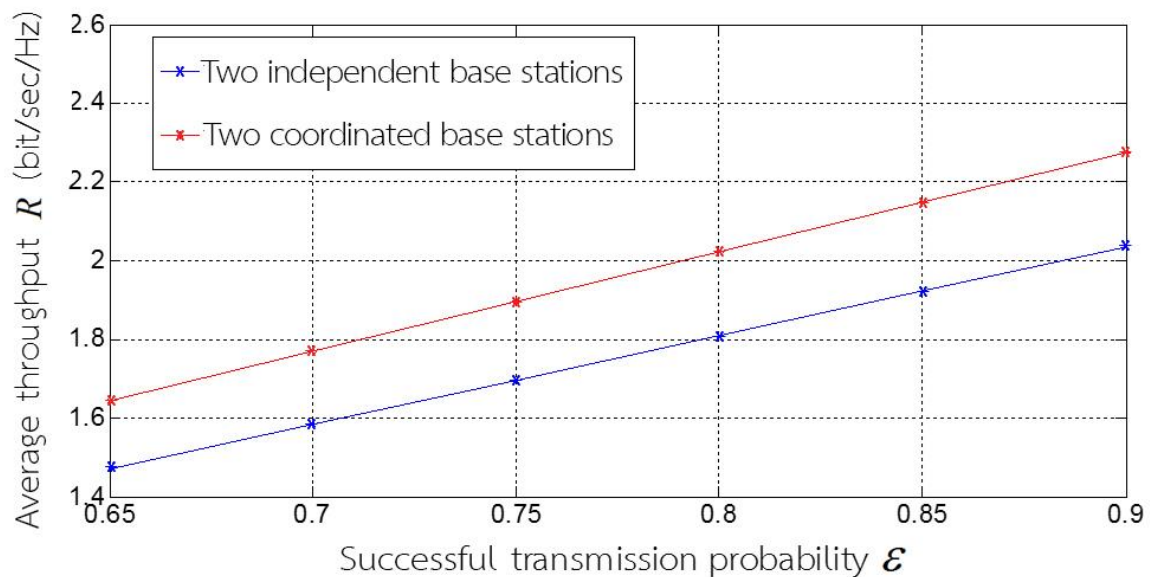
รูปที่ 4.11 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ระหว่าง 2 กรณี

จากรูปที่ 4.11 เราได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลโดยการกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดดเป็นการกำหนดค่าระหว่าง 0.65 ถึง 1 โดยที่ระยะห่างระหว่าง 2 ค่าที่ติดกันคือ 0.05 สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันสูงกว่าในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกัน

ตารางที่ 4.11 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล

| ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล | ค่าที่กำหนด |
|--|---|
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอการเข้าใช้บริการ α | 0.5 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ β | 0.5 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด δ | 0.65 ถึง 1 แปรค่าขั้นละ 0.05 |
| ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ ϵ | 0.7 สำหรับ 16-QAM 0.8 สำหรับ QPSK และ 0.9 สำหรับ BPSK |
| แบตเตอรี่สูงสุด | 3 หน่วย |
| อัตราบิต | 4, 2 และ 1 บิตต่อวินาทีต่อ เฮิรตซ์ |

4.2.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ (ϵ) ของทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 4.12 ความต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล ระหว่าง 2 กรณี

จากรูปที่ 4.12 เราได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลโดยการกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จเป็นการกำหนดค่าระหว่าง 0.65 ถึง 1 โดยที่ระยะห่างระหว่าง 2 ค่าที่ติดกันคือ 0.05 สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูลในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานี ทำงานโดยมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันสูงกว่าในกรณีที่สถานีฐาน 2 สถานีที่ทำงานโดยอิสระจากกัน

ตารางที่ 4.12 ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล

| ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งข้อมูล | ค่าที่กำหนด |
|--|--|
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอการเข้าใช้บริการ α | 0.5 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ β | 0.5 |
| ค่าความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด δ | 0.7 |
| ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ ϵ | 0.65 ถึง 0.9 แปรค่าขึ้นละ 0.05 |
| แบตเตอรี่สูงสุด | 3 หน่วย |
| อัตราบิต | 4, 2 และ 1 บิตต่อวินาทีต่อ เฮิร์ตซ์ |

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในบทสุดท้ายนี้จะเป็นการกล่าวสรุปผลทั้งหมดที่ได้จำลองขึ้นในโครงการวิศวกรรมฉบับนี้ รวมทั้งการเปรียบเทียบผลของการจำลองในกรณีต่าง ๆ เพื่อให้ได้อัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นที่สูงที่สุด และข้อเสนอแนะหรือแนวทางในการที่จะพัฒนาแบบจำลองงานให้ก้าวหน้าขึ้นไปในอนาคตและเป็นโครงการตัวอย่างให้แก่ผู้ที่สนใจนำไปประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต

5.1 สรุปผล

จากการจำลองการให้บริการในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สาย ซึ่งเราได้พิจารณาจาก 4 ปัจจัย ได้แก่

ปัจจัยที่ 1 คือ ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ร้องขอเข้าใช้บริการ จะเห็นได้ว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันมีค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นสูงกว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานให้บริการโดยอิสระจากกัน 1.4 เปอร์เซ็นต์

ปัจจัยที่ 2 คือ ค่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้ถอนการเข้าใช้บริการ จะเห็นได้ว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันมีค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นสูงกว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานให้บริการโดยอิสระจากกัน 1.9 เปอร์เซ็นต์

ปัจจัยที่ 3 คือ ความน่าจะเป็นที่มีแสงแดด จะเห็นได้ว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันมีค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นสูงกว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานให้บริการโดยอิสระจากกัน 13.4 เปอร์เซ็นต์

ปัจจัยที่ 4 คือ ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ จะเห็นได้ว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานมีการถ่ายโอนพลังงานร่วมกันมีค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาขึ้นสูงกว่าการให้บริการแบบที่สถานีฐานให้บริการโดยอิสระจากกัน 11.4 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับในอนาคต การปรับปรุงหรือพัฒนาการแบ่งพลังงานในเครือข่ายการสื่อสารกำลังไร้สายสามารถทำได้โดยการเพิ่มสถานีฐานให้มากขึ้นหรือเพิ่มระดับพลังงานให้มากขึ้น เพื่อให้ระยะการทำงานเพิ่มมากขึ้น โดยนำข้อมูลจากโครงการนี้ไปปรับปรุงและพัฒนาในลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- พงศธร เศรษฐสุวรรณ. (2558). *การสื่อสารดิจิทัล*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- อรรณพ ชันธิกุล; และ อำนาจ มีมงคล. (2553). *ออกแบบและติดตั้งระบบ Wireless LAN 2nd Edition*. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: อินโฟเพรส
- ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์. (2555). *การสื่อสารดิจิทัล กับการประยุกต์ใช้โปรแกรม SCILAB*. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
- https://en.wikipedia.org/wiki/Markov_decision_process
online: 22 Oct. 2016
- <http://www.veedvil.com/news/internet-of-things-iot/>
online: 22 Oct. 2016
- Niyato, Dusit; Wang, Ping; & Kim, Dong In. (2015). *Optimal Service Auction for Wireless Powered Internet of Things (IoT) Device*.


ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

| | |
|-----------------------|--|
| ชื่อ ชื่อสกุล | นางสาวชาลิสสา นาคพิทักษ์ |
| วันเดือนปีเกิด | 22 กันยายน 2537 |
| สถานที่เกิด | เขตราชเทวี จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน | 44 หมู่บ้านศิรินทรา ซอยร่มเกล้า 19/7 ถนนร่มเกล้า แขวงคลองสามประเวศ เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520 |
| หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ | 080-173-5723 |
| ประวัติการศึกษา | |
| พ.ศ. 2555 | มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเซนต์โยเซฟ บางนา |
| พ.ศ. 2560 | กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |



ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

| | | |
|-----------------------|--|---|
| ชื่อ ชื่อสกุล | นางสาวนิภาธร ปัญญาวัฒน์ |  |
| วันเดือนปีเกิด | 12 กรกฎาคม 2537 | |
| สถานที่เกิด | เขตดอนเมือง จังหวัดกรุงเทพมหานคร | |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน | 19/50 หมู่บ้านสุขวัลย์นคร4 ถนนสรงประภา แขวงดอนเมือง เขตดอนเมือง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10210 | |
| หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ | 084-557-2127 | |
| ประวัติการศึกษา | | |
| พ.ศ. 2555 | มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสีกัน(วัฒนานันทอุปถัมภ์) | |
| พ.ศ. 2560 | กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ | |