

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมในการประเมินค่าแพ็คเกจตกค้างเฉลี่ย
สำหรับผู้ใช้นพื้นฐานลำดับความสำคัญในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการรบกวนสัญญาณ

นางสาวชिरญา อาจแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558

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.

APPLICATION OF GAME THEORY IN MEAN BACKLOGGED PACKET
EVALUATION FOR PRIORITY-BASED USER IN WIRELESS MESH
NETWORK WITH SIGNAL JAMMING

Ms.Vachiraya Artkaeo

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 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมในการประเมินค่าแพ็คเกจ
ตกค้างเฉลี่ยสำหรับผู้ใช้น้ำมันฐานลำดับความสำคัญ
ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการรบกวนสัญญาณ

โดย

นางสาวชिरญา อาจแก้ว

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัสวกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร.ภัทรชาติ โกมลภิติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....รักษาการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัสวกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ภัทรชาติ โกมลภิติ)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จตุพร ชินรุ่งเรือง)

วชิรญา อาจแก้ว : การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมในการประเมินค่าแพ็กเก็ตตกค้างเฉลี่ย
 สำหรับผู้ใช้นบนพื้นฐานลำดับความสำคัญในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการรบกวน
 สัญญาณ. (APPLICATION OF GAME THEORY IN MEAN
 BACKLOGGED PACKET EVALUATION FOR PRIORITY-BASED
 USER IN WIRELESS MESH NETWORK WITH SIGNAL JAMMING)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ชาวนัดิต อัสวกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 ร่วม : อาจารย์ ดร. ภัทรชาติ โกมลภิติ, 68 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับระบบโครงข่ายไร้สายแบบเมชภายใต้การโจมตีซึ่งอาจเกิดขึ้นได้
 จากการรบกวนสัญญาณในชั้นกายภาพ เพื่อประเมินความรุนแรงของการโจมตีดังกล่าว ปัญหา
 ทฤษฎีเกมที่มีผู้เล่นสองฝ่ายแบบไม่ร่วมมือกันจึงได้ถูกกำหนดขึ้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เล่นที่เป็น
 คู่แข่งกัน ได้แก่ ผู้ที่ประสงค์ร้ายต่อระบบด้วยการรบกวนสัญญาณ และตัวจัดเส้นทางรูปแบบทรีใน
 โครงข่ายไร้สายแบบเมช ผลตอบแทนในเกมถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้าง
 (expected number of backlogged packets, EBPs) ภายในระบบโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่พิจารณา
 โดย EBPs จะถูกทำให้มีค่าสูงสุดโดยผู้รบกวนสัญญาณพร้อมกันกับการถูกทำให้มีค่าต่ำสุดโดยอุปกรณ์
 จัดเส้นทาง ดังนั้นเพื่อให้ผู้ใช้ที่ต้องการระดับการให้บริการที่แตกต่างกันของการส่งออกแพ็กเก็ตผ่าน
 เกตเวย์ที่กระจายตัวอยู่ในโครงข่ายไร้สายแบบเมช วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอเพิ่มเติมในการประเมิน
 การจัดทำหนดการแพ็กเก็ตด้วยแถวคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรมที่ฝั่งขาออกของอุปกรณ์จัดเส้นทาง
 หรือจุดเชื่อมต่อผ่าน (transit access point, TAP) แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช
 ตัวจัดกำหนดการได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกผู้ใช้นบนพื้นฐานลำดับความสำคัญทั้ง 4 คลาส ได้แก่
 ทราฟฟิกลำดับความสำคัญสูงที่เข้ามาโดยตรง (high-priority local traffic, HL) ทราฟฟิกลำดับ
 ความสำคัญต่ำที่เข้ามาโดยตรง (low-priority local traffic, LL) ทราฟฟิกลำดับความสำคัญสูง
 ที่เข้ามารีเลย์ผ่าน (high-priority transit traffic, HT) และทราฟฟิกลำดับความสำคัญต่ำที่เข้า
 มารีเลย์ผ่าน (low-priority transit traffic, LT) จากนั้นค่า EBPs ที่จุดสมมูลของแนชสำหรับผู้ใช้
 แต่ละคลาสจะได้รับการประเมินภายใต้กลยุทธ์การจัดเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสมเพื่อแข่งขันกับ
 กลยุทธ์การเลือกตำแหน่งที่ดีที่สุดของการรบกวนสัญญาณ นอกจากนี้การคำนวณแบบขนานได้
 ถูกนำมาใช้จัดการกับเซตกลยุทธ์ที่มีขนาดใหญ่ จากผลการทดลองพบว่าการคำนวณแบบขนานช่วย
 ประหยัดเวลาในการคำนวณด้วยการเพิ่มความเร็วของระเบียบขั้นตอนวิธีดำเนินการได้โดยเป็นสัดส่วน
 กับจำนวนตัวทำงานคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ที่ใช้ซึ่งมีหน่วยประมวลผล 64 หน่วย
 ผลกระทบจากการจัดทำหนดการแพ็กเก็ตด้วยอัตราที่แตกต่างกันได้ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 โดยการประเมินหาค่า EBPs ที่เกิดขึ้นที่จุดสมมูลของแนชในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ผลการทดลองได้
 ยืนยันว่าระเบียบวิธีที่นำเสนอสามารถประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายไร้สายแบบเมช
 ที่มีเกตเวย์หลายตัว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบโครงข่ายไร้สายแบบเมชให้มีความปลอดภัยสูง
 ขึ้น และมีความคงทนต่อการโจมตีในลักษณะของการรบกวนสัญญาณแบบไร้สายได้ในอนาคต

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670356921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: WIRELESS MESH NETWORK/ GAME THEORY/ SIGNAL JAMMING/
PRIORITY USER/ BACKLOGGED PACKET/ SCHEDULING PACKET.

VACHIRAYA ARTKAE0 : APPLICATION OF GAME THEORY IN MEAN
BACKLOGGED PACKET EVALUATION FOR PRIORITY-BASED USER
IN WIRELESS MESH NETWORK WITH SIGNAL JAMMING. ADVISOR:
ASSOC. PROF. CHAODIT ASWAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: PATRACHART
KOMOLKITI, Ph.D., 68 pp.

This thesis is concerned with the wireless mesh network (WMN) system under possible attacks from physical-layer signal jamming. To evaluate the severity of such attacks, the two-player non-cooperative game theoretic problem has been formulated. Here, competing players refer to the malicious signal jamming adversary and the wireless network tree-routing agents. The game payoff is defined as the mean number of backlogged packets (EBP) inside the considered WMN system. EBP is maximised concurrently by the signal jammer and minimised by the router. In order to provide users requiring different service levels of packet communication through distributed WMN gateways, this research has additionally proposed to evaluate the weighted fair queuing packet scheduler at the outgoing port of each WMN router node or transit access point (TAP). The scheduler is deployed to classify four priority-based user classes, i.e., high-priority local traffic (HL), low-priority local traffic (LL), high-priority transit traffic (HT), low-priority transit traffic (LT). And the Nash-equilibrium value of EBP for each user class is evaluated under the optimal stochastic tree routing strategy to compete with the optimal location selection strategy of signal jamming. In addition, parallel computing is implemented to deal with the resultant large game strategy sets. Based on the reported experimental results, parallel computing can save the computational time proportionally to the number of computing workers on the employed computer cluster with 64 cores. Interesting effects of various packet scheduling rates have then been highlighted by evaluating the EBP at the Nash equilibrium in WMN. The results have confirmed that the proposed framework can evaluate the stable operating region of WMN with multiple gateways, which will be useful to design secured WMN with robustness against wireless signal jamming attacks in the future.

Department : Electrical Engineering
Field of Study : Electrical Engineering
Academic Year : 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เชาว์ดิศ อัครกุล และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.ภัทรชาติ โกมลภิติ ซึ่งได้ให้ความรู้และคำแนะนำ อีกทั้งช่วยตรวจทานงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการขับเคลื่อนการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช (Special Task Force for Activating Research, STAR) ภายใต้กลุ่มวิจัยโครงข่ายไร้สาย และ อินเทอร์เน็ตอนาคต (Wireless Network and Future Internet Research Group, WI-FUN) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยโครงข่าย (Network Research Group, NRG) ซึ่งดูแลโดย รศ.ดร.เชาว์ดิศ อัครกุล และผศ.ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร ที่จัดกิจกรรมเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และการทำงานของผู้วิจัย ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสะดวกราบรื่น

ขอบคุณเพื่อนพี่น้องนักวิจัยทุกคน รวมถึงเจ้าหน้าที่ บุคลากรที่อยู่ในภาควิชาไฟฟ้า สาขา โทรคมนาคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ และเป็นกำลังใจที่ดียิ่ง ต่อผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย ซึ่งได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

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 | 3 |
| 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |
| 1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์ | 4 |
| 2 หลักการและทฤษฎี | 5 |
| 2.1 ทฤษฎีเกม | 5 |
| 2.1.1 เกมในรูปแบบปกติ | 5 |
| 2.1.2 เกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์ | 6 |
| 2.1.3 ทฤษฎีมินิแมกซ์ | 6 |
| 2.1.4 กลยุทธ์เด่น | 6 |
| 2.2 การส่งข้อมูลหลายวิถี | 7 |
| 2.2.1 การกระจายทุกทิศทาง | 8 |
| 2.2.2 การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่ม | 8 |
| 2.3 ทฤษฎีแถวคอย | 8 |
| 2.3.1 ทฤษฎีแถวคอยไม่จำกัด M/M/1 | 8 |
| 2.3.2 ทฤษฎีแถวคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม | 9 |
| 3 ระเบียบวิธีการนำเสนอแนวทางการจัดกำหนดการแพ็กเกจในโครงข่ายไร้สายแบบเมช สำหรับผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญ | 11 |
| 3.1 แบบจำลองโครงข่าย | 12 |
| 3.2 แบบจำลองเกม | 12 |
| 3.3 กำหนดนิยามของตัวแปร | 14 |
| 3.4 สมการพื้นฐาน | 15 |
| 3.5 การหาผลเฉลยของเกมด้วย MSA (Method of Successive Average) | 21 |
| 3.6 การคำนวณแบบขนาน | 22 |
| 4 ผลการทดลอง | 25 |
| 4.1 ผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกจตกค้างจากการตั้งค่าอัตราการจัดกำหนดการ แพ็กเกจ | 26 |

| | |
|---|----|
| 4.2 ผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจำกัดการแพ็กเก็ต | |
| แพ็กเก็ต | 29 |
| 4.2.1 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x3 | 30 |
| 4.2.2 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x4 | 32 |
| 4.2.3 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 4x4 | 34 |
| 4.3 เปรียบเทียบเวลากระทำการของการคำนวณแบบอนุกรมและการคำนวณแบบขนาน . . | 37 |
| 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตี . | 40 |
| 4.5 เปรียบเทียบผลกระทบต่อขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับ | |
| ความสำคัญและไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ | 43 |
| 4.5.1 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x3 | 44 |
| 4.5.2 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x4 | 46 |
| 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 51 |
| 5.1 บทสรุป | 51 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 52 |
| รายการอ้างอิง | 54 |
| ภาคผนวก | 56 |
| ภาคผนวก ก โปรแกรมการทำงานแบบขนานของโปรแกรม MATLAB บนเครื่องคอมพิวเตอร์ | |
| แบบคลัสเตอร์เพื่อคำนวณหารูปแบบทรีที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโครงข่ายไร้สายแบบเมช . . . | 57 |
| ภาคผนวก ข โปรแกรมการทำงานแบบขนานของโปรแกรม MATLAB บนเครื่องคอมพิวเตอร์ | |
| แบบคลัสเตอร์เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความ | |
| สำคัญแต่ละคลาสจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจำกัดการแพ็กเก็ต | 62 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 68 |

สารบัญญัตราสาร

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ผลตอบแทนค่าสูงสุด-ต่ำสุดของเกม | 7 |
| ตารางที่ 2.2 ผลตอบแทนของเกมแสดงกลยุทธ์เด่น | 7 |
| ตารางที่ 3.1 การแจกแจงค่า $c_i(k)$ ของแต่ละ TAP k | 17 |
| ตารางที่ 4.1 ค่าของตัวแปรหลักในการทดลองประเมินหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างที่พึง ได้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมช | 25 |
| ตารางที่ 4.2 ค่าของตัวแปรในการทดลองหาผลกระทบจากการตรึงค่าอัตราการจัดกำหนดการ แพ็กเก็ต | 27 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าของตัวแปรในการทดลองหาผลกระทบต่อค่า EBP^s จากการเปลี่ยนแปลง ω^s | 30 |
| ตารางที่ 4.4 ค่าของตัวแปรในการเปรียบเทียบเวลากระทำการระหว่างการคำนวณแบบอนุกรม และการคำนวณแบบขนาน | 38 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าของตัวแปรในการวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนตำแหน่งที่ส่ง สัญญาณรบกวนสูงสุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตี (N) | 41 |
| ตารางที่ 4.6 ค่าของตัวแปรในการทดลองเปรียบเทียบผลกระทบต่อขอบเขตการทำงานที่ เสถียรระหว่างโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญและไม่มีการแบ่งลำดับความ สำคัญของผู้ใช้ | 44 |
| ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณกราฟฟิกสูงสุดที่รองรับได้ในโครงข่ายขนาดต่าง ๆ | 49 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แลวดคอยขนาดไม่จำกัด M/M/1 | 8 |
| รูปที่ 2.2 แลวดคอยวงวนนำหน้าแบบยุติธรรม | 9 |
| รูปที่ 3.1 โครงข่ายไร้สายแบบเมชเพื่อให้บริการเชื่อมต่อโครงข่ายอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย . . . | 12 |
| รูปที่ 3.2 ตัวอย่างรูปแบบทรีในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์ | 13 |
| รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ดีที่สุด 1000 ตำแหน่งของผู้เล่นฝ่ายโจมตี ที่มีเขตป้องกันระยะ 10 หน่วย | 14 |
| รูปที่ 3.4 แบบจำลองแลวดคอยของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสที่ TAP k แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช | 16 |
| รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการทำ $c_i(k)$ ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์ | 17 |
| รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการคำนวณแบบอนุกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผล Quad-core | 23 |
| รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการคำนวณแบบขนานบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ที่มีหน่วย ประมวลผล 64-core | 23 |
| รูปที่ 3.8 การทำงานของเครื่องมือ MDCE สำหรับการคำนวณแบบขนานในเครื่อง คอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ | 24 |
| รูปที่ 4.1 โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์และตำแหน่งของผู้โจมตีที่ส่งสัญญาณ รบกวนสูงสุด 50 ตำแหน่งแรก | 26 |
| รูปที่ 4.2 ผลกระทบต่อค่า EBP^s จากการตั้งค่า ω^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีเลือก $N = 50$ | 28 |
| รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า EBP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์ที่มีการแบ่ง ลำดับความสำคัญของผู้ใช้และไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ | 29 |
| รูปที่ 4.4 ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และ ผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ | 31 |
| รูปที่ 4.5 ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 3 เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และ ผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ | 31 |
| รูปที่ 4.6 โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x4 2 เกตเวย์และตำแหน่งของผู้โจมตีที่ส่งสัญญาณ รบกวนสูงสุด 50 ตำแหน่งแรก | 32 |
| รูปที่ 4.7 ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x4 2 เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และ ผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ | 33 |
| รูปที่ 4.8 ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x4 3 เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และ ผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ | 33 |

รูปที่ 4.9 ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x4 4 เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ 34

รูปที่ 4.10 โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 4x4 4 เกตเวย์และตำแหน่งของผู้โจมตีที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด 50 ตำแหน่งแรก 35

รูปที่ 4.11 ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 4x4 4 เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0.02, 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ 35

รูปที่ 4.12 เวลากระทำการของการคำนวณแบบอนุกรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์ในการเลือก N ของผู้เล่นฝ่ายโจมตี 38

รูปที่ 4.13 เวลากระทำการของการคำนวณแบบขนานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์ในการเลือก N ของผู้เล่นฝ่ายโจมตี 39

รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพของการเร่งเวลาในการคำนวณในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ . 39

รูปที่ 4.15 EBP^{HL} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N 41

รูปที่ 4.16 EBP^{HT} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N 41

รูปที่ 4.17 EBP^{LL} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N 42

รูปที่ 4.18 EBP^{LT} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N 42

รูปที่ 4.19 ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x3 2 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ 45

รูปที่ 4.20 ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x3 3 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ 45

รูปที่ 4.21 ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x4 2 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ 47

รูปที่ 4.22 ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x4 3 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ 48

รูปที่ 4.23 ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x4 4 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ 48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายไร้สายแบบเมช (wireless mesh network, WMN) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และความสามารถในการปรับขนาดของการจัดตั้งโครงข่ายเพื่อการติดต่อสื่อสาร โดยที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชนั้นจะสามารถจัดสรรเส้นทางแบบอัตโนมัติ (automatic routing) เพื่อใช้ติดต่อสื่อสารกันภายในโครงข่าย อีกทั้งโหนดแต่ละโหนดในโครงข่ายยังสามารถติดต่อสื่อสารกันแบบไร้สายได้จึงทำให้ประหยัดต้นทุนในการจัดตั้งโครงข่าย [1] นอกจากนี้การเชื่อมต่อถึงกันแบบเมชภายในโครงข่ายจึงไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมจากส่วนกลาง โหนดแต่ละโหนดไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้สามารถจัดตั้งเป็นโครงข่ายเฉพาะกิจ (ad hoc network) ได้ และยังมีเส้นทางให้เลือกติดต่อสื่อสารหลายเส้นทางจึงทำให้โครงข่ายมีความน่าเชื่อถือ (reliability) สูง เพราะสามารถหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ไม่ปลอดภัยจากการถูกโจมตี อีกทั้งยังมีโอกาสในการรับส่งข้อมูลสำเร็จสูง โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีบทบาทสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโพรโตคอลโครงข่าย (network protocol) ที่มียูแล้ว ได้แก่ ZigBee WiMAX เป็นต้น เช่นเดียวกันกับการให้บริการโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม (cellular backhaul) โดยที่โหนดแต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชจะรีเลย์ทราฟฟิกผ่านโหนดข้างเคียง (neighbor node) ยกตัวอย่างเช่น ในการติดต่อสื่อสารภาคพื้นดิน (backhaul communication) และการใช้งานของโครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สาย (wireless sensor network) เป็นต้น นอกจากนี้โครงข่ายไร้สายแบบเมชยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายเฉพาะกิจเมื่อเกิดภัยพิบัติ ซึ่งต้องมีความทนต่อการประวิงเวลา (delay tolerance) [2] เนื่องจากสัญญาณมีการขาดหายเป็นช่วง ๆ ติดต่อสื่อสารกันยากลำบาก ทราฟฟิกที่เข้ามาที่โหนดแต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช จะถูกรีเลย์ผ่านเส้นทางที่ได้จัดเตรียมไว้ล่วงหน้าไปยังเกตเวย์ (gateway, GW) ปลายทาง ด้วยการรีเลย์ทราฟฟิกผ่านจุดเชื่อมต่อผ่าน (transit access point, TAP) ในลักษณะช่วงเชื่อมต่อเดียว (single hop) หรือ หลายช่วงเชื่อมต่อ (multiple hops) แต่อย่างไรก็ตามการติดต่อสื่อสารผ่านตัวกลางไร้สาย (wireless medium) ทำให้โครงข่ายถูกโจมตีได้ง่ายในลักษณะของการโจมตีทางกายภาพ (physical attack) ด้วยการรบกวนสัญญาณ (signal jamming) ระหว่างการติดต่อสื่อสารภายในโครงข่าย การโจมตีดังกล่าวนี้ทำให้โหนดที่อยู่ในพื้นที่ครอบคลุมของการรบกวนสัญญาณได้รับผลกระทบที่รุนแรงจนอาจจะทำให้โหนดบางโหนดไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้ตามปกติ และนำไปสู่สถานะที่ผู้ใช้งานไม่สามารถใช้บริการติดต่อสื่อสารกันได้ ซึ่งเกิดจากการขัดขวาง หรือ ก่อการกวนระบบโครงข่าย (denial of service, DoS) [3]

เพื่อจัดการกับปัญหาการถูกโจมตีด้วยสัญญาณรบกวน จึงจำเป็นต้องมีการจัดสรรเส้นทางการรับส่งข้อมูลในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่สามารถหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ไม่ปลอดภัย หรือ เส้นทางที่ง่ายต่อการรบกวนสัญญาณได้ และเพื่อจัดการกับผู้โจมตีอัจฉริยะซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการโจมตี ทำให้ยากต่อการตรวจจับสัญญาณรบกวน การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่ม (stochastic routing) จึงได้ถูกนำเสนอในงานวิจัย [4], [5] โดยที่การเลือกเส้นทางการรับส่งข้อมูลแบบเฟ้นสุ่มจะทำให้ผู้โจมตีคาดเดาเส้นทางในการรับส่งข้อมูลของโครงข่ายได้ยาก และยังช่วยเพิ่มโอกาสในการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้ในโครงข่ายได้อย่างปลอดภัยมากยิ่งขึ้น สถานการณ์ของการเลือกเส้นทางการรับส่งข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณในโครงข่ายสามารถจำลองเป็นเกมที่มีผู้เล่น 2 ฝ่ายแบบไม่

ร่วมมือกัน (two-player non-cooperative game) โดยที่ผู้เล่นฝ่ายแรกจะเป็นฝ่ายป้องกันโครงข่ายไร้สายแบบเมช ส่วนผู้เล่นอีกฝ่ายจะเป็นฝ่ายโจมตี ซึ่งในงานวิจัย [6], [7] ผลตอบแทนของเกมที่ได้จะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยจำนวนเซสชันที่ปลอดภัย (expected number of secured sessions, ESS) [6] และค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตักค้าง (expected number of backlogged packets, EBP) [7] ผู้เล่นทั้ง 2 ฝ่ายจะตัดสินใจเลือกกลยุทธ์เป็นเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีในการรับส่งข้อมูลในโครงข่าย และเลือกตำแหน่งที่จะส่งสัญญาณรบกวนโครงข่ายได้ครอบคลุมจำนวนโหนดมากที่สุด จากทฤษฎีจุดสมดุลของแนช [8] ผลตอบแทนของเกมที่อยู่ในรูปของ ESS และ EBP จะมาจากการเล่นเกมของผู้เล่นที่ใช้หลักการคิดแบบมีเหตุผล (rational thinking) ในกรณีที่ไม่มีผู้เล่นฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งสามารถเพิ่มผลตอบแทนจากการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นในการเลือกกลยุทธ์ของตนเองได้

เซตของกลยุทธ์อาจจะมีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับการคำนวณในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเกตเวย์ในโครงข่าย จำนวนรูปแบบทรีที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการรับส่งข้อมูลในโครงข่าย และจำนวนตำแหน่งของการส่งสัญญาณที่ให้ผลการรบกวนสูงสุดของผู้โจมตี ดังนั้นเพื่อจัดการกับปัญหานี้ งานวิจัยในอดีตได้นำเสนอการหาเซตกลยุทธ์แบบสมมูล (equivalent strategy set) [6] และเซตกลยุทธ์เด่น (dominant strategy set) [7] ก่อนที่จะนำมาหาจุดสมดุลของผลตอบแทนของเกม อย่างไรก็ตามด้วยเทคนิคทั้ง 2 แบบ เมื่อโครงข่ายที่พิจารณามีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดเซตของกลยุทธ์ที่นำมาคำนวณจะมีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับการใช้หน่วยประมวลผลเพียงหน่วยเดียวของการคำนวณแบบอนุกรม (serial computing) ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำการคำนวณแบบขนาน (parallel computing) มาประยุกต์ใช้ โดยวิธีการคำนวณแบบขนานนี้ไม่เพียงสามารถลดเวลากระทำการ (execution time) แต่การคำนวณแบบขนานยังช่วยให้สามารถจำแนกเส้นทางของเกมการจัดเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีในโครงข่ายไร้สายแบบเมชได้อีกด้วย ซึ่งงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แตกต่างจากงานวิจัย [6] และ [7] โดยได้นำเสนอการจำแนกลำดับความสำคัญของผู้ใช้ที่เข้ามาที่ TAP แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชออกเป็น ผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูง (high priority users) และผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำ (low priority users) โดยที่ผู้ดูแลระบบ (administrative users) จะเป็นผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงซึ่งมีหน้าที่รักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่าย ส่วนผู้ใช้ทั่วไป (normal users) ซึ่งได้รับอนุญาตให้เข้ามาใช้บริการในโครงข่ายจากผู้ดูแลระบบจะเป็นผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำด้วยเหตุนี้การโจมตีด้วยสัญญาณรบกวนจึงส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ทั่วไปเท่านั้น แต่ต้องไม่สามารถรบกวนผู้ดูแลระบบได้ ดังนั้นผู้ดูแลระบบจึงสามารถกำหนดเส้นทางการรับส่งข้อมูลในโครงข่ายใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ไม่ปลอดภัย และสามารถกู้คืนข้อมูลที่สูญหายของผู้ใช้ทั่วไปให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการส่งข้อมูลในฝั่งขาขึ้น ทราฟฟิกที่เข้ามาที่โหนดนั้นโดยตรง (locally generated traffic) จะต้องมีลำดับความสำคัญในการรับส่งข้อมูลต่ำกว่าทราฟฟิกที่รีเลย์ผ่านโหนดนั้นไปยังปลายทาง (transit traffic) เพื่อป้องกันการประวิงสะสมมากเกินไปของทราฟฟิกที่ต้องรีเลย์ผ่านโหนดข้างเคียงหลายช่วงเชื่อมต่อไปยังเกตเวย์ปลายทาง ดังนั้นทราฟฟิกของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญจึงถูกแบ่งออกเป็น 4 คลาส โดยที่แต่ละคลาสจะได้รับอัตราเฉลี่ยการให้บริการแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราการกำหนดการแพ็กเกต (packet scheduling rate) จากการประยุกต์ใช้แถวคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม (weighted fair queuing, WFQ) เพื่อจัดการแพ็กเกตที่เข้ามาที่ TAP แต่ละโหนดในโครงข่าย ในงานวิจัย [9], [10] การกำหนดการแพ็กเกตจะช่วยลดเวลาประวิงในการรับส่งข้อมูลในโครงข่าย ซึ่งถ้าหากทราฟฟิกของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่รีเลย์ผ่านมาหลายช่วงเชื่อมต่อไปยังอัตราการกำหนดการแพ็กเกตสูงที่สุดจะทำให้จำนวนแพ็กเกตสะสมที่ TAP แต่ละโหนดนั้นลดลง และช่วยเพิ่มโอกาสที่ผู้ดูแลระบบจะสามารถรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากทราฟฟิกสำคัญที่ใช้ในการร้องขอการจัดสร้างเส้นทางการรับส่ง

ข้อมูลใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ถูกรบกวนสัญญาณนั้นสามารถส่งไปยังปลายทางได้เสร็จสิ้นก่อนที่โครงข่ายจะได้รับความเสียหายรุนแรง ดังนั้นอัตราการจำกัดกำหนดการแพ็กเก็ตจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญในเกมการจัดเส้นทางในโครงข่ายไร้สายแบบเมชเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำหลักการจำกัดกำหนดการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญด้วยแถวคอยการถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม มาประยุกต์ใช้กับเกมการจัดเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการรบกวนสัญญาณจากงานวิจัย [6] และ [7] เพื่อลดการประวิงสะสมของทราฟฟิกของผู้ใช้ที่ต้องริเลย์ผ่านโหนดข้างเคียงหลายช่วงเชื่อมต่อในการส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ปลายทาง รวมถึงเพื่อลดการประวิงสะสมของทราฟฟิกของผู้ดูแลระบบซึ่งมีหน้าที่รักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่าย เมื่อนำทฤษฎีเกมมาหาผลเฉลย ผลตอบแทนที่ได้จะอยู่ในรูปค่าน้อยที่สุดของค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างที่พึงได้ในระยะยาวของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส ซึ่งสามารถบ่งชี้เส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสม และสัดส่วนอัตราการจำกัดกำหนดการแพ็กเก็ตที่เหมาะสม เมื่อถูกโจมตีด้วยสัญญาณรบกวนในกรณีที่รุนแรงที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

เพื่อใช้ทฤษฎีเกมประเมินค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างที่พึงได้ในระยะยาวในโครงข่ายไร้สายแบบเมชสำหรับผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญ จากการจัดเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสมเมื่อโครงข่ายถูกโจมตีด้วยการรบกวนสัญญาณจากภายนอก และอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเก็ตของผู้ใช้ในโครงข่ายถูกถ่วงด้วยอัตราการจำกัดกำหนดการแพ็กเก็ตที่แตกต่างกันตามลำดับความสำคัญ

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีความทนต่อการประวิงเวลา
2. พิจารณาการรับส่งข้อมูลเฉพาะฝั่งขาขึ้นจากจุดเชื่อมต่อผ่านไปยังเกตเวย์
3. การส่งสัญญาณในโครงข่าย จะส่งผ่านช่องสัญญาณเกาส์เซียน และใช้ช่องสัญญาณเดียวกันทั้งโครงข่ายด้วยกลไก CSMA/CA ในชั้นสื่อกลางของการส่งข้อมูล
4. พิจารณาการโจมตีที่ขึ้นกายภาพด้วยการส่งสัญญาณรบกวนจากผู้โจมตีเพียงหนึ่งโหนดเท่านั้น
5. พิจารณาการเลือกเส้นทางในการรับส่งข้อมูลที่ขึ้นโครงข่ายเท่านั้น
6. อัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเก็ตของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสในโครงข่ายไร้สายแบบเมชจะถูกถ่วงด้วยอัตราการจำกัดกำหนดการแพ็กเก็ต
7. ไม่มีการเคลื่อนที่ภายในโครงข่าย
8. ไม่มีการปรับกำลังส่งและความถี่คลื่นสัญญาณไร้สายของจุดเชื่อมต่อผ่านแต่ละโหนดในโครงข่าย
9. ใช้โปรแกรม MATLAB ที่ทำงานแบบขนานบนเครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ เพื่อเร่งการคำนวณในกรณีที่ระบบที่พิจารณามีขนาดใหญ่ขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถกำหนดอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกจที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญ เพื่อเพิ่มโอกาสในการรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายของผู้ดูแลระบบ รวมทั้งสามารถประเมินหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกจตกค้างที่พึงได้ในระยะยาว เมื่อผู้โจมตีเลือกกระตือรือร้นด้วยการส่งสัญญาณรบกวนในกรณีที่รุนแรงที่สุด

1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึง ความสำคัญของเทคโนโลยีโครงข่ายไร้สายแบบเมช ความสอดคล้องกับ ทฤษฎีเกม และลักษณะการโจมตีทางกายภาพ ปัญหาต่าง ๆ และการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยในอดีต การคำนวณแบบขนาน รวมไปถึงการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมต่อการรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่าย

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี: กล่าวถึง ทฤษฎีเกมเบื้องต้น การส่งข้อมูลหลายวิถี และทฤษฎีแควคอย

บทที่ 3 ระเบียบวิธีที่นำเสนอการกำหนดการแพ็กเกจที่เหมาะสมที่สุดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช: กล่าวถึง วิธีการนำทฤษฎีเกมมาประยุกต์ใช้จัดสรรเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณจากผู้โจมตี การนำแควคอยถ่วงน้ำหนักแบบยูติลิตีมาประยุกต์ใช้ในการจัดกำหนดการแพ็กเกจของผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญ การจำลองแควคอยแบบ M/M/1 เพื่อประเมินหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกจตกค้างที่พึงได้ในระยะยาว ด้วยวิธีการตอบสนองที่ดีที่สุดกรรมวิธี MSA และการคำนวณแบบขนาน

บทที่ 4 ผลการทดลอง: แสดงผลการจัดกำหนดการแพ็กเกจในโครงข่ายไร้สายแบบเมชสำหรับผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญ และการประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายด้วยทฤษฎีเกมเมื่อมีการโจมตีด้วยสัญญาณรบกวน

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: สรุปงานวิจัยทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกม

ทฤษฎีเกมเป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงผลได้ผลเสียจากการแข่งขันกันของผู้เล่นทุกฝ่าย [11] โดยที่ผู้เล่นอาจเป็นบุคคล หรือ กลุ่มบุคคลตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป ผลลัพธ์ของเกมจะมาจากการตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ของผู้เล่นทุกฝ่ายในเกมซึ่งใช้หลักการติดตามเหตุผลในทุกรอบของการเล่นเกม เพื่อให้ได้ผลประโยชน์ที่ดีที่สุดจากการตัดสินใจเลือกกลยุทธ์นั้น แบ่งออกเป็น

- เกมร่วมมือกัน (cooperative game) ผู้เล่นทุกฝ่ายต่างร่วมมือกันเพื่อให้ได้ผลประโยชน์ตอบแทนมากที่สุด เมื่อผู้เล่นฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งเพิ่มผลประโยชน์ของตนเอง จะทำให้ผู้เล่นอื่นเสียผลประโยชน์ไป ซึ่งผลตอบแทนสูงสุดจากการเล่นเกมหลาย ๆ รอบ จะเป็นค่าผลประโยชน์โดยรวมสูงสุดของเกม โดยขอบเขตของผลประโยชน์จะเป็นจุดที่เหมาะสมแบบพาเรโต (Pareto optimum) [12]
- เกมที่ไม่ร่วมมือกัน (non-cooperative game) เป็นเกมที่ผู้เล่นแต่ละฝ่ายพยายามโจมตีผู้เล่นฝ่ายตรงข้ามให้ได้มากที่สุด ซึ่งผลตอบแทนสูงสุดจากการเล่นเกมจะเข้าสู่ค่า ๆ หนึ่ง เรียกว่า สมดุลของแนช (Nash's equilibrium) เป็นจุดที่เมื่อผู้เล่นแต่ละฝ่ายพยายามจะปรับเปลี่ยนกลยุทธ์หรือวิธีการเล่นของตัวเองแล้ว ผลตอบแทนที่ได้รับจะไม่มีทางเกินค่าที่ได้ที่จุดสมดุลนี้

ผู้เล่นมีหลักการเลือกกลยุทธ์ 2 รูปแบบ คือ

1. กลยุทธ์แบบบริสุทธิ์ (pure strategy) เป็นกรณีที่ผู้เล่นแต่ละฝ่ายจะตัดสินใจเลือกกลยุทธ์แบบใดแบบหนึ่งในการเล่นเกมรอบแรก และการเล่นเกมในรอบถัดไปผู้เล่นแต่ละฝ่ายยังคงเลือกกลยุทธ์เดิมอยู่โดยไม่สนว่าผู้เล่นอีกฝ่ายจะเลือกกลยุทธ์แบบใด
2. กลยุทธ์แบบผสม (mixed strategy) เป็นกรณีที่มีการกำหนดความน่าจะเป็นให้แก่กลยุทธ์ของผู้เล่นแต่ละฝ่าย โดยที่ผู้เล่นแต่ละฝ่ายจะตัดสินใจเลือกกลยุทธ์แบบใดแบบหนึ่งอย่างสุ่ม (random strategy) ดังนั้นผลตอบแทนของผู้เล่นแต่ละฝ่ายจึงจัดอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของผลตอบแทน (expected payoff) จากการสุ่มเลือกกลยุทธ์ทั้งหมดที่ผู้เล่นแต่ละฝ่ายได้ทำการตัดสินใจเลือกไว้

2.1.1 เกมในรูปแบบปกติ

เกมในรูปแบบปกติ (normal-form game) จะเป็นสถานการณ์ที่ผู้เล่นทุกฝ่ายเล่นเกมด้วยการตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ของตนเองพร้อมกัน โดยที่ไม่มีการแบ่งลำดับการเล่น เกมผู้เล่นแต่ละฝ่ายจึงไม่ทราบถึงกลยุทธ์ของผู้เล่นฝ่ายตรงข้าม ในการเล่นเกมแต่ละรอบ เกมในรูปแบบปกติมีองค์ประกอบอยู่ 3 ประการดังนี้

1. ผู้เล่น (player) คือผู้ตัดสินใจในเกม
2. กลยุทธ์ (strategy) คือวิธีการที่ผู้เล่นสามารถเลือกใช้ได้

3. ผลประโยชน์ (utility) หรือผลตอบแทน (payoff) คือค่าของเกมที่ผู้เล่นได้รับ ซึ่งผู้เล่นจะพยายามเลือกกลยุทธ์ที่ทำให้ค่าดังกล่าวมีค่าสูงที่สุด

2.1.2 เกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์

เกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์ (two-person zero-sum game) เป็นเกมที่มีความขัดแย้งกันอย่างชัดเจน โดยที่ผู้เล่นแต่ละฝ่ายพยายามจะโจมตีผู้เล่นฝ่ายตรงข้าม ผลตอบแทนที่ได้จากเกมจะมีผู้เล่นฝ่ายหนึ่งได้รับผลประโยชน์ ส่วนผู้เล่นอีกฝ่ายเสียผลประโยชน์โดยที่ผลรวมของผลประโยชน์ที่ได้ในเกมนี้เท่ากับศูนย์เท่านั้น

2.1.3 ทฤษฎีมินิแมกซ์

สำหรับเกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์นั้น หากผู้เล่นทั้ง 2 ฝ่ายมีกลยุทธ์เป็นเซตจำกัดแล้ว จะเรียกเกมประเภทนี้ว่า เกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์แบบจำกัด (finite two-person zero-sum game) ซึ่งเกมประเภทนี้จะสามารถหาจุดสมดุลหรือผลเฉลยของเกมได้โดยใช้ทฤษฎีมินิแมกซ์ (minimax theory) จากทฤษฎีกล่าวไว้ว่า ถ้าเกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์เป็นแบบจำกัดแล้ว

1. จะมีค่าของเกม (value of game) ซึ่งเป็นค่าที่ผู้เล่นทั้งสองฝ่ายพอใจและเป็นค่าที่รับประกันว่าจากการเล่นเกมทั้งหมดโดยเฉลี่ยแล้วจะได้รับค่าที่จ่ายจากเกมไปไม่ต่ำกว่าค่านี้
2. จะมีกลยุทธ์แบบผสมสำหรับผู้เล่น 1 ซึ่งทำให้ผู้เล่น 1 ได้รับผลประโยชน์โดยเฉลี่ยขั้นต่ำเท่ากับค่า V ไม่ว่าผู้เล่น 2 จะเลือกใช้กลยุทธ์ใดก็ตาม ซึ่งแผนของผู้เล่น 1 เป็นการหาค่ามากที่สุดของผลได้ขั้นต่ำ (maximise minimum gain)
3. จะมีกลยุทธ์แบบผสมสำหรับผู้เล่น 2 ซึ่งทำให้ผู้เล่น 2 เสียผลประโยชน์โดยเฉลี่ยอย่างมากเท่ากับค่า V ไม่ว่าผู้เล่น 1 จะเลือกใช้กลยุทธ์ใดก็ตาม ซึ่งแผนของผู้เล่น 2 เป็นการหาค่าน้อยที่สุดของผลเสียอย่างมากที่สุด (minimise maximum loss)

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นเกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์ทุกเกมนั้นจะสามารถหาค่าของเกมได้ ซึ่งจะสอดคล้องกับแผนของผู้เล่น 1 และ 2 ที่ทำให้ได้ค่าที่พอใจในผลได้ผลเสียทั้งสองฝ่าย โดยแผนที่ทั้งคู่เลือกมาเล่นนี้จะเรียกว่า กลยุทธ์แบบมินิแมกซ์หรือกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด (optimal strategy)

ตัวอย่างผลตอบแทนสูงที่สุดและต่ำที่สุดของเกมดังตารางที่ 2.1 ค่าในตารางคือ ผลประโยชน์ หรือผลตอบแทนที่ผู้เล่น 1 ได้รับจากการเลือกใช้กลยุทธ์ต่าง ๆ ของผู้เล่นทั้งสองฝ่าย จากตารางจะเห็นว่าเมื่อผู้เล่น 1 เลือกกลยุทธ์ A_2 จะเป็นการหาค่ามากที่สุดของผลได้ขั้นต่ำ และเมื่อผู้เล่น 2 เลือกกลยุทธ์ B_2 จะเป็นการหาค่าน้อยที่สุดของผลเสียอย่างมากที่สุด

2.1.4 กลยุทธ์เด่น

สำหรับเกมที่มีผู้เล่น 2 ฝ่ายแบบไม่ร่วมมือกัน กลยุทธ์ที่ผู้เล่นฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งเลือกแล้วได้ผลตอบแทนดีที่สุด ไม่ว่าผู้เล่นอีกฝ่ายจะเลือกกลยุทธ์ใดก็ตาม กลยุทธ์นั้นถือว่าเป็นกลยุทธ์เด่น (dominant strategy) [13] จากนิยาม เมื่อกลยุทธ์ S ให้ผลตอบแทนที่ดีกว่ากลยุทธ์ T เมื่อนั้นกลยุทธ์ S จะเป็นกลยุทธ์เด่นกว่ากลยุทธ์ T และถือว่ากลยุทธ์ T เป็นกลยุทธ์ที่ด้อยกว่ากลยุทธ์ S ดังนั้นจากหลักกลยุทธ์เด่นนี้ ทำให้ผู้เล่นทุกฝ่ายซึ่งใช้การตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ตามหลักเหตุผล จะ

ตารางที่ 2.1: ผลตอบแทนค่าสูงสุด-ต่ำสุดของเกม

| | | ผู้เล่น 2 | | | ผลได้ขั้นต่ำของผู้เล่น 1 |
|-----------|----------------------------------|-----------|----------|----|--------------------------|
| | | กลยุทธ์ | B1 | B2 | |
| ผู้เล่น 1 | A1 | 3 | -2 | 2 | -2 |
| | A2 | -1 | 0 | 4 | -1 |
| | A3 | -4 | -3 | 1 | -4 |
| | ผลเสียอย่างมากที่สุดของผู้เล่น 2 | 3 | 0 | 4 | |

สามารถลดความซับซ้อนในการหาผลเฉลยของเกม โดยที่ผู้เล่นจะไม่เลือกกลยุทธ์ที่ด้อยกว่ามาใช้เพื่อเล่นเกม และสามารถตัดกลยุทธ์ด้อยออกโดยที่ผลตอบแทนที่ได้จากเกมจะไม่เปลี่ยนแปลง

ตัวอย่างการหากลยุทธ์เด่นจากตารางที่ 2.2 ค่าในตารางคือ ผลได้ผลเสียของผู้เล่นแนวแถว หรือผู้เล่น 1 ซึ่งผลได้ผลเสียที่ดีกว่าสำหรับผู้เล่น 1 จะหมายถึง ค่าผลได้ผลเสียที่มากกว่า จากตารางจะเห็นว่า กลยุทธ์ A1 นั้นเด่นกว่ากลยุทธ์ A2 และกลยุทธ์ A2 นั้นเด่นกว่ากลยุทธ์ A3 อย่างชัดเจน เนื่องจากค่าผลได้ผลเสียทุกค่าของกลยุทธ์ A1 มีค่ามากกว่าค่าผลได้ผลเสียของกลยุทธ์ A2 และค่าผลได้ผลเสียทุกค่าของกลยุทธ์ A2 มีค่ามากกว่าค่าผลได้ผลเสียของกลยุทธ์ A3 ในทุกกรณี

สำหรับผู้เล่น 2 เนื่องจากค่าในตารางเป็นค่าผลได้ผลเสียของผู้เล่น 1 ดังนั้นค่าผลได้ผลเสียที่ดีกว่าสำหรับผู้เล่น 2 จะหมายถึง ค่าผลได้ผลเสียที่น้อยกว่า จากตารางจะเห็นว่า กลยุทธ์ B1 นั้นเด่นกว่ากลยุทธ์ B2 และกลยุทธ์ B2 นั้นเด่นกว่ากลยุทธ์ B3 อย่างชัดเจนเนื่องจากค่าผลได้ผลเสียทุกค่าของกลยุทธ์ B1 น้อยกว่าค่าผลได้ผลเสียของกลยุทธ์ B2 และค่าผลได้ผลเสียทุกค่าของกลยุทธ์ B2 น้อยกว่าค่าผลได้ผลเสียของกลยุทธ์ B3 ไม่ว่าผู้เล่น 1 จะเลือกกลยุทธ์ใดก็ตาม

ตารางที่ 2.2: ผลตอบแทนของเกมแสดงกลยุทธ์เด่น

| | | ผู้เล่น 2 | | |
|-----------|----|-----------|----|----|
| | | กลยุทธ์ | B1 | B2 |
| ผู้เล่น 1 | A1 | 5 | 6 | 8 |
| | A2 | 4 | 5 | 6 |
| | A3 | 3 | 4 | 5 |

2.2 การส่งข้อมูลหลายวิถี

เมื่อต้องการส่งข้อมูลจาก TAP หนึ่งไปยัง TAP ข้างเคียง โครงข่ายจะต้องมีกระบวนการจัดการเส้นทางในการรับส่งข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลถูกส่งไปตามเส้นทางที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เช่น ในด้านต้นทุน ความน่าเชื่อถือ เป็นต้น โดยปกติแล้วการจัดการเส้นทางในการรับส่งข้อมูลจะส่งไปตามเส้นทางใดเส้นทางหนึ่ง (single path routing) จากต้นทางไปยังปลายทาง ซึ่งถ้าหากเกิดปัญหาเส้นทางนั้นเสียหายไม่ว่าจะจากอุปกรณ์การส่งหรือสายเชื่อมโยง จะทำให้การส่งข้อมูลในขณะนั้นใช้งานไม่ได้และเกิดความเสียหายต่อข้อมูลบนเส้นทางดังกล่าว ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากการส่งข้อมูลถูกโจมตีด้วยการส่งสัญญาณรบกวนแล้ว โครงข่ายจะถูกโจมตีได้โดยง่ายเพราะสามารถคาดเดาหรือรู้

เส้นทางการส่งที่แน่นอน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดการส่งข้อมูลที่ใช้มากกว่าหนึ่งเส้นทาง (multi-path routing) [14] เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งทำได้หลายลักษณะดังนี้

2.2.1 การกระจายทุกทิศทาง

การกระจายทุกทิศทาง (flooding) เป็นวิธีการส่งที่ง่ายที่สุดของการส่งข้อมูลหลายวิถี คือการส่งข้อมูลไปในทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งจะเป็นวิธีการส่งที่หลีกเลี่ยงความเสียหายของอุปกรณ์โครงข่ายแต่ว่าเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรโครงข่ายเป็นอย่างมาก

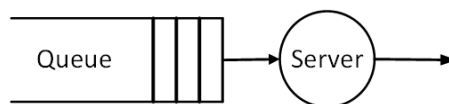
2.2.2 การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่ม

การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่ม (stochastic routing) ถูกนำเสนอในงานวิจัย [4] เป็นวิธีการเลือกเส้นทางการรับส่งข้อมูลมาหนึ่งเส้นทางอย่างสุ่ม ด้วยวิธีนี้เป็นการยากต่อผู้โจมตี เพราะไม่สามารถคาดเดาเส้นทางการรับส่งข้อมูลที่แน่นอนได้ และเป็นการบังคับให้ผู้โจมตีเลือกโจมตีทุกเส้นทางที่เป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มยังไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรโครงข่ายมากเท่าการส่งแบบกระจายทุกทิศทาง

2.3 ทฤษฎีแถวคอย

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองให้ที่ TAP แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชจะมีแพ็กเก็ตที่เข้ามาโดยตรงที่โหนดนั้น และแพ็กเก็ตที่ต้องการรีเลย์ผ่านไปยังโหนดข้างเคียง ดังนั้นจึงต้องมีบัฟเฟอร์หรือแถวคอยสำหรับรองรับแพ็กเก็ตที่เข้ามาที่ TAP แต่ละโหนดก่อนการส่งแพ็กเก็ตออกไป แพ็กเก็ตที่รอการส่งออกหรือรอรับบริการอยู่ที่แถวคอยจะได้รับอัตราการส่งแพ็กเก็ตออก หรือ การให้บริการที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลำดับความสำคัญ ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำแถวคอยแบบ M/M/1 มาจำลองการเข้าออกของแพ็กเก็ตที่ TAP แต่ละโหนดด้วยการประยุกต์ใช้ร่วมกับการจำแนกการให้บริการแพ็กเก็ตตามลำดับความสำคัญด้วยแถวคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม

2.3.1 ทฤษฎีแถวคอยไม่จำกัด M/M/1



รูปที่ 2.1: แถวคอยขนาดไม่จำกัด M/M/1

เพื่อจำลองการเข้าออกของแพ็กเก็ตที่ TAP แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกใช้ระบบแถวคอยขนาดไม่จำกัด M/M/1 ซึ่งประกอบไปด้วย บัฟเฟอร์ (buffer) หรือแถวคอย (queue) ซึ่งรองรับแพ็กเก็ตที่เข้ามาที่ TAP แต่ละโหนด ตัวให้บริการ (server) ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมการส่งออกแพ็กเก็ต ดังรูปที่ 2.1 โดยระบบแถวคอยขนาดไม่จำกัด M/M/1 มีลักษณะดังนี้

1. แพ็กเก็ตของผู้ใช้มีการเข้ามาขอใช้บริการที่ TAP แต่ละโหนดตามกระบวนการเข้ามาแบบกระบวนการปัวส์ซง (Poisson process) ด้วยอัตราเฉลี่ย λ

2. ตัวให้บริการที่ TAP แต่ละโหนดสามารถส่งแพ็กเก็ต หรือ ให้บริการแต่ละแพ็กเก็ตโดยใช้ระยะเวลาตามการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง ด้วยค่าเฉลี่ย $\frac{1}{\mu}$
3. ที่ TAP แต่ละโหนดมีตัวให้บริการหนึ่งตัว
4. ไม่จำกัดขนาดแถวคอย
5. มีระเบียบการให้บริการแบบเข้าก่อนได้ออกก่อน
6. อัตราเฉลี่ยการเข้ามาขอใช้บริการต้องน้อยกว่าอัตราเฉลี่ยการให้บริการ ($\lambda < \mu$)

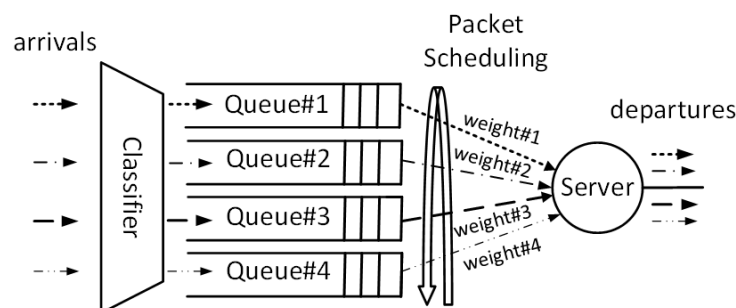
เมื่อพิจารณาจำนวนแพ็กเก็ตที่รอส่งออกที่ TAP โดยเฉลี่ย (b) เทียบกับจำนวนเฉลี่ยของผู้เข้าใช้บริการที่รอรับบริการในระบบ M/M/1 [15] จะได้ว่า

$$b = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ คือ ปริมาณทราฟฟิกเฉลี่ยที่ต้องการเข้ามาต่อตัวให้บริการ

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (2.2)$$

2.3.2 ทฤษฎีแถวคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม



รูปที่ 2.2: แถวคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม

แถวคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรมได้ถูกนำมาใช้ในการกำหนดการแพ็กเก็ตของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสที่เข้ามาที่ TAP แต่ละโหนด โดยแถวคอยจะประกอบไปด้วยตัวจำแนก (classifier) ซึ่งทำหน้าที่จำแนกแพ็กเก็ตของผู้ใช้แต่ละลำดับความสำคัญก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตไปยังบัฟเฟอร์ของแถวคอยขนาดไม่จำกัดที่กำหนดไว้สำหรับผู้ใช้แต่ละลำดับความสำคัญ โดยที่แพ็กเก็ตของผู้ใช้แต่ละลำดับความสำคัญนั้น จะได้รับการจัดกำหนดการแพ็กเก็ตด้วยอัตราที่แตกต่างกัน จากการแบ่งสัดส่วนของความจุช่องสัญญาณที่มีอยู่ที่ TAP แต่ละโหนด [16] จึงทำให้แพ็กเก็ตของผู้ใช้แต่ละลำดับความสำคัญนั้นได้รับอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเก็ตแตกต่างกันก่อนจะส่งออกไปยังโหนดข้างเคียงด้วยดังรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตามแพ็กเก็ตสำคัญบางแพ็กเก็ตของผู้ดูแลระบบซึ่งจำเป็นต้องรีเลย์ผ่าน TAP หลายช่วงเชื่อมต่อจึงอาจทำให้เกิดการประวิงมากเกินไปซึ่งแพ็กเก็ตสำคัญเหล่านี้ต้องการส่งไปถึงปลายทางให้สำเร็จก่อนที่โครงข่ายจะถูกโจมตีจนไม่สามารถใช้งานได้อีก ทั้งนี้อัตราการจัด

กำหนดการยังขึ้นอยู่กับปริมาณกราฟฟิคที่เข้ามาให้บริการอยู่ที่บัพเฟอร์แควคอยอีกด้วย ดังนั้นการจัดกำหนดการแพ็กเก็ตจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดการประวิง และความคับคั่งของปริมาณกราฟฟิคที่เข้ามาให้บริการจนก่อให้เกิดแพ็กเก็ตตกค้างที่ TAP แต่ละโนด รวมถึงให้ความยุติธรรมแก่แพ็กเก็ตของผู้ใช้ที่ต้องรีเลย์ผ่าน TAP หลายช่วงเชื่อมต่อ ซึ่งรายละเอียดการแบ่งประเภทกราฟฟิคจะได้นำเสนอในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการนำเสนอแนวทางการจัดกำหนดการแพ็กเกจใน โครงข่ายไร้สายแบบเมชสำหรับผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความ สำคัญ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอหลักการจัดกำหนดการแพ็กเกจสำหรับผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญ มาประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการรบกวนสัญญาณในงานวิจัย [6] และ [7] โดยใช้ทฤษฎีเกมในการจัดเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสมของฝ่ายป้องกันโครงข่ายเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณจากฝ่ายโจมตีภายนอกซึ่งพยายามเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณรบกวนโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชให้ได้จำนวนโนดที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด งานวิจัยเดิมมุ่งหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกจตกค้างที่พึงได้ในระบบโดยที่ไม่ได้พิจารณาลำดับความสำคัญของผู้ใช้ในโครงข่าย ทำให้ผู้ใช้ได้รับอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกจที่เท่ากัน จึงอาจส่งผลทำให้เกิดความล่าช้าในการรับส่งข้อมูลสำคัญบางข้อมูล ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้เสนอให้มีการแบ่งคลาสของผู้ใช้ตามลำดับความสำคัญ โดยที่ผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงต้องการส่งข้อมูลไปถึงปลายทางได้เสร็จก่อนผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำ เช่น ผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงนั้นเป็นผู้ดูแลระบบมีหน้าที่รักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่าย จึงจำเป็นต้องส่งข้อมูลสำคัญไปยังเกตเวย์ปลายทางให้สำเร็จก่อนรวมถึงการส่งข้อมูลร้องขอเส้นทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างโนด หรือ ข้อมูลที่จำเป็นต่อการปรับเปลี่ยนเส้นทางเพื่อฟื้นฟูการใช้งานของโครงข่ายเมื่อถูกโจมตีด้วยการรบกวนสัญญาณ เป็นต้น ส่วนผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำนั้นเป็นเพียงแค่ผู้ใช้ทั่วไปที่เข้ามาขอใช้งานระบบที่มีอยู่แล้ว นอกจากนี้โนดต้นทางที่อยู่ไกล ๆ ต้องการจะส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ปลายทางจำเป็นต้องรีเลย์ข้อมูลผ่าน TAP หลายโนด ทำให้แพ็กเกจตกค้างของผู้เข้ามาขอใช้บริการที่โนดต้นทางไกล ๆ มีจำนวนมากกว่าแพ็กเกจตกค้างของผู้เข้ามาขอใช้บริการโดยตรงที่โนดที่อยู่ใกล้กับเกตเวย์ปลายทาง ดังนั้นเพื่อช่วยลดค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกจตกค้างทั้งหมดในโครงข่าย และให้ความยุติธรรมแก่กราฟฟิกของผู้ที่เข้ามาใช้บริการที่ต้องรีเลย์ผ่าน TAP หลายช่วงเชื่อมต่อไปยังเกตเวย์ปลายทาง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้แบ่งการพิจารณาแฉกคอยที่ TAP แต่ละโนดเพื่อรองรับแพ็กเกจจากผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสออกเป็น 4 แฉกคอย ได้แก่

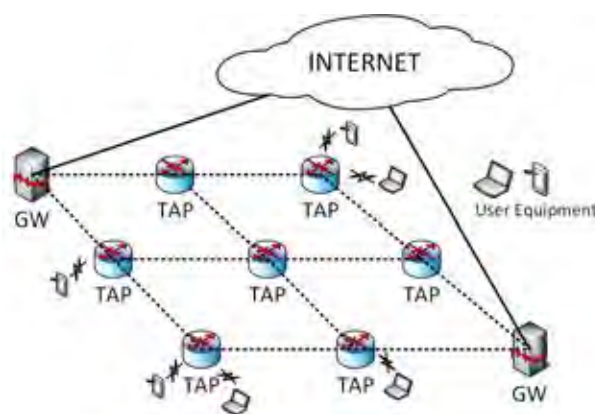
- แฉกคอยของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่เข้ามาที่ TAP นั้นโดยตรง
- แฉกคอยของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่ต้องการรีเลย์ข้อมูลผ่าน TAP นั้น
- แฉกคอยของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่เข้ามาที่ TAP นั้นโดยตรง
- แฉกคอยของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ต้องการรีเลย์ข้อมูลผ่าน TAP นั้น

การจัดกำหนดการแพ็กเกจที่ TAP แต่ละโนดนั้น จะส่งผลต่ออัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกจที่กำหนดให้กับผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสตามเงื่อนไขของแฉกคอยการถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม และวิทยานิพนธ์นี้มีข้อสมมุติพื้นฐานให้สามารถประเมินหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกจตกค้างของผู้ใช้งานพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสได้จากทฤษฎีแฉกคอยขนาดไม่จำกัดแบบ M/M/1 โดยอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกจมีค่าแปรผันตรงกับค่าถ่วงน้ำหนักที่กำหนดให้ผู้ใช้แต่ละคลาส และค่าอัตราการ

ส่งแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ TAP นั้นสามารถส่งออกไปได้เพื่อไป TAP ถัดไปบนเส้นทางที่ฝ่ายป้องกันได้เลือกใช้อาไว้

3.1 แบบจำลองโครงข่าย

โครงข่ายไร้สายแบบเมชประกอบไปด้วยโหนด 2 ประเภท ได้แก่ เกตเวย์ (GW) และ จุดเชื่อมต่อผ่าน (TAP) ดังรูปที่ 3.1 โดยเกตเวย์จะเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านสายสื่อสาร (wired line) และตั้งอยู่ที่ตำแหน่งขอบเขตของโครงข่าย ทั้งนี้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชจะต้องมีเกตเวย์ตั้งแต่ 2 เกตเวย์ขึ้นไป เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีที่ผู้โจมตีเลือกโจมตีที่ตำแหน่งใกล้เคียงเกตเวย์จนทำให้โครงข่ายไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป ส่วน TAP แต่ละโหนดนั้นจะช่วยรีเลย์ข้อมูลจากโหนดข้างเคียงที่อยู่บนเส้นทางเดียวกันในฝั่งขาขึ้นไปยังเกตเวย์ปลายทางและติดต่อสื่อสารกันผ่านตัวกลางไร้สาย ทำให้ง่ายต่อการถูกโจมตีด้วยสัญญาณรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 3.1: โครงข่ายไร้สายแบบเมชเพื่อให้บริการเชื่อมต่อโครงข่ายอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย

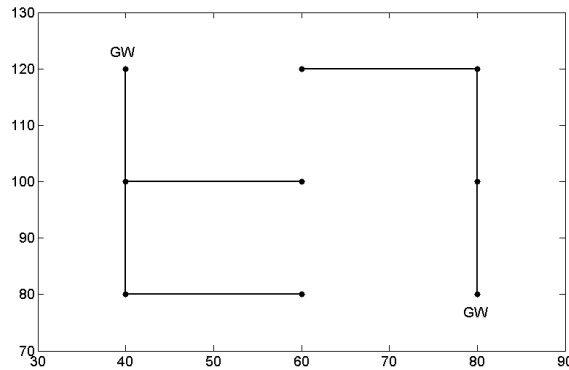
3.2 แบบจำลองเกม

ทฤษฎีเกมถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของผู้เล่น 2 ฝ่ายที่ไม่ร่วมมือกัน ผู้เล่นฝ่ายแรก คือผู้เล่นฝ่ายป้องกัน ซึ่งจะตัดสินใจเลือกเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงการโจมตีด้วยสัญญาณรบกวน ส่วนผู้เล่นอีกฝ่าย คือผู้เล่นฝ่ายโจมตี จะตัดสินใจเลือกตำแหน่งในการส่งสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อโครงข่ายมากที่สุด โดยที่ค่าที่ได้จากการเล่นเกมจะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างที่พึงได้ในโครงข่ายของผู้ใช้แต่ละลำดับความสำคัญที่จุดสมตุดจากการเล่นเกมหลาย ๆ รอบ

- ฝ่ายป้องกัน

โหนดทั้งหมดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชจะถูกกำหนดให้เป็นผู้เล่นฝ่ายป้องกัน ซึ่งตัดสินใจเลือกเส้นทางผ่านสุมแบบทรีที่เหมาะสมในการรับส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ปลายทาง เพื่อให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีคาดเดากลยุทธ์ของฝ่ายป้องกันได้ยากขึ้น โดยรูปแบบทรีนั้นจะต้องมีรากอยู่ที่เกตเวย์ และเชื่อมต่อกับ TAP ทุกโหนดในโครงข่ายดังรูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างรูปแบบทรีในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3

2 เกตเวย์ โดยจุดในรูปแสดงตำแหน่งของ TAP และเส้นเชื่อมระหว่างจุดแสดงเส้นทางแบบทรีที่ถูกเลือกใช้งาน



รูปที่ 3.2: ตัวอย่างรูปแบบทรีในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์

• ฝ่ายโจมตี

ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะตัดสินใจเลือกตำแหน่งที่สามารถส่งสัญญาณรบกวนการรับส่งข้อมูลของโหนดในโครงข่ายให้ได้จำนวนโหนดมากที่สุด เพื่อป้องกันผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกตำแหน่งเดียวกับผู้เล่นฝ่ายป้องกัน จนกระทั่งทำให้โหนดนั้นเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้อีก และถือเป็นการเลือกกลยุทธ์ที่ไม่ยุติธรรมแก่ผู้เล่นฝ่ายป้องกัน จึงต้องมีการกำหนดขอบเขตของเขตป้องกัน (guard zone) เพื่อให้โหนดนั้นได้รับความเสียหายจนทำให้ระบบล่ม ตัวอย่างดังรูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งที่ดีที่สุด 1,000 ตำแหน่งของผู้เล่นฝ่ายโจมตี เมื่อกำหนดให้ฝ่ายโจมตีเข้าใกล้ฝ่ายป้องกันได้ในรัศมีไม่ต่ำกว่า 10 หน่วย เนื่องจากตำแหน่งที่เป็นไปได้ของฝ่ายโจมตีเป็นอนันต์ จึงจะพิจารณาแค่ตำแหน่งที่สามารถส่งสัญญาณรบกวนได้สูงที่สุดเรียงตามลำดับลงมาตามค่าที่คำนวณได้จากสมการ (3.1) และจะถือว่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ นอกเหนือจากนี้ ไม่ส่งผลต่อการรับส่งข้อมูลในโครงข่ายไร้สายแบบเมชอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือตามทฤษฎีเกมตำแหน่งการโจมตีอื่น ๆ อาจนับเป็นกลยุทธ์ที่ถูกครอบงำโดยตำแหน่ง 1,000 ตำแหน่งแรกดังกล่าว

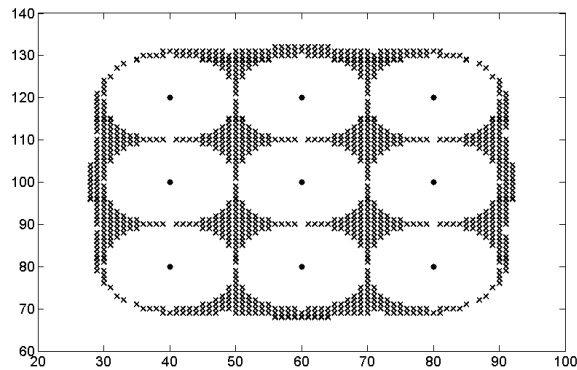
$$\text{ผลรวมเอนโทรปีของสัญญาณรบกวน} = \sum_{k=1}^K \frac{1}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (3.1)$$

เมื่อฝ่ายโจมตีอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y)

เมื่อ (x_k, y_k) แทนตำแหน่งในพิกัดคาร์ทีเซียนของ TAP k โดย $k = 1, \dots, K$ ซึ่งสมการ (3.1) ได้ปรับตั้งค่าตัวแปรอื่น ๆ ตามสมการความจุของแซนนอนให้เป็น 1 ทั้งหมด

• ผลได้ผลเสียหรือค่าของเกม

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ผลได้ผลเสีย หรือค่าของเกมที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างในโครงข่ายของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสที่พึงได้ในระยะยาว จากการที่ผู้เล่นทั้ง 2 ฝ่ายเลือกกลยุทธ์ที่ดีที่สุด เมื่อฝ่ายป้องกันต้องการให้มีค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างน้อยที่สุดจากการโดนโจมตีที่ร้ายแรงที่สุดของฝ่ายโจมตี ส่วนฝ่ายโจมตีต้องการให้มีค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างมากที่สุดจากการป้องกันที่ดีที่สุดของฝ่ายป้องกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีมินิแมกซ์ของเกมเล่น 2 คน ผลรวมเป็นศูนย์ หรือจะเรียกได้ว่าเป็นกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยค่าเฉลี่ยผลได้ผลเสียนี้คำนวณจากการเล่นเกมหลาย ๆ รอบ จนค่าของเกมลู่เข้าสู่ค่า ๆ หนึ่งที่จุดสมดุล



รูปที่ 3.3: ตำแหน่งที่ดีที่สุด 1000 ตำแหน่งของผู้เล่นฝ่ายโจมตี ที่มีเขตป้องกันระยะ 10 หน่วย

3.3 กำหนดนิยามของตัวแปร

สัญลักษณ์พื้นฐานจากงานวิจัย [6], [7] ที่ได้นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่

| | |
|----------------|---|
| k, l | หมายเลขของ TAP |
| M | จำนวนรูปแบบการเลือกรับส่งข้อมูลในลักษณะของทรีซึ่งมีรากอยู่ที่เกตเวย์ และเชื่อมต่อกับ TAP ทุกโนดที่ต้องการรับส่งข้อมูลกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต |
| N | จำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนได้ผลรวมนอร์มอลไลซ์สูงสุดตามลำดับของฝ่ายโจมตี |
| i | หมายเลขของรูปแบบการเลือกรับส่งข้อมูลในลักษณะของทรีซึ่งมีรากอยู่ที่เกตเวย์ และเชื่อมต่อกับ TAP ทุกโนดที่ต้องการรับส่งข้อมูลกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ($i = 1, \dots, M$) |
| j | หมายเลขของตำแหน่งของฝ่ายโจมตีที่เป็นไปได้ ($j = 1, \dots, N$) |
| p_i | ความน่าจะเป็นที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันจะเลือกทรีรูปแบบที่ i ในการรับส่งข้อมูลระหว่างเกตเวย์และ TAP ทุกโนดที่ต้องการรับส่งข้อมูลกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต |
| P | การแจกแจงความน่าจะเป็นในการเลือกรูปแบบการรับส่งข้อมูลของผู้เล่นฝ่ายป้องกัน |
| q_j | ความน่าจะเป็นที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกตำแหน่งที่ j |
| Q | การแจกแจงความน่าจะเป็นในการเลือกตำแหน่งของผู้เล่นฝ่ายโจมตี |
| k'_i | หมายเลขของ TAP หรือ GW ที่อยู่ถัดจาก TAP k ซึ่ง TAP k ต้องการส่งข้อมูลไปให้ เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i |
| B | ความจุช่องสัญญาณของ TAP k ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากันสำหรับทุกค่าของ k |
| $W(k)$ | กำลังส่งของ TAP k |
| $d(k, k'_i)$ | ระยะทางระหว่าง TAP k กับ TAP k'_i |
| $W(l)$ | กำลังส่งของ TAP l |
| $d(l, k'_i)$ | ระยะทางระหว่าง TAP l กับ TAP k'_i |
| $W(a)$ | กำลังส่งของฝ่ายโจมตี |
| $d(a_j, k'_i)$ | ระยะทางระหว่างฝ่ายโจมตีกับ TAP k'_i เมื่อฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์ที่ j |

| | |
|----------|---|
| $c_i(k)$ | จำนวน TAP ที่ต้องการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i |
| x_i | ตัวแปรช่วย |
| y_i | ตัวแปรช่วย |
| n | รอบของการเล่นเกม |

ในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการเพิ่มเติมสัญลักษณ์พื้นฐานขึ้นมา ดังนี้

| | |
|------------------|--|
| s | คลาสของผู้ใช้ |
| $\lambda_i^s(k)$ | อัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้คลาส s ที่ TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i |
| $\mu_{i,j}^s(k)$ | อัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกตของผู้ใช้คลาส s ที่ TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i และฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์ที่ j |
| $b_{i,j}^s(k)$ | ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตของผู้ใช้คลาส s ที่ตกค้างอยู่ที่ TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i และฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์ที่ j |
| ω^s | น้ำหนักอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกตที่ผู้ใช้คลาส s พึ่งได้รับในการใช้บริการที่ TAP k โดยที่ $\omega^s \geq 0, \forall s$ และ $\sum_{\forall s} \omega^s = 1$ |
| γ | ตัวแปรช่วย |

3.4 สมการพื้นฐาน

สัญญาณรบกวนรวมที่ TAP k แต่ละโนดได้รับนั้นจะมาจาก สัญญาณรบกวนจากโนดข้างเคียง ซึ่งต้องการรับส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันด้วยช่องสัญญาณเดียวกัน สัญญาณรบกวนจากฝ่ายโจมตี และ สัญญาณรบกวนอื่น ๆ (noise) โดยผลกระทบต่อการส่งข้อมูลออกจาก TAP k ไปยัง TAP k'_i ซึ่งเป็นโนดในลำดับถัดไปบนเส้นทางแบบทรีที่ได้เลือกไว้ จะสามารถคำนวณได้จากค่า SINR (signal-to-interference-plus-noise-ratio) ที่ TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i และฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์ที่ j ตามสมการ

$$SINR_{i,j}(k) = \frac{\frac{W(k)}{(d(k,k'_i))^2}}{\sum_{l \neq k} \frac{W(l)}{(d(l,k'_i))^2} + \frac{W(a)}{(d(a_j,k'_i))^2} + \sigma^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ σ^2 แทนกำลังของสัญญาณรบกวนอื่น ๆ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาลำดับความสำคัญของผู้ใช้ที่เข้ามาในโครงข่ายไร้สายแบบเมช โดยกำหนดเงื่อนไขในการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ดังนี้

1. กำหนดให้ผู้ดูแลระบบเป็นผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูง และผู้ใช้ทั่วไปที่ได้รับอนุญาตจากผู้ดูแลระบบให้เข้ามาใช้บริการในโครงข่ายได้เป็นผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำ โดยที่เป้าหมายต้องการให้สัญญาณรบกวนอาจจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำเท่านั้น แต่ไม่สามารถส่งผลกระทบต่อผู้ดูแลระบบได้ เพื่อให้สอดคล้องกับตัวอย่างสถานการณ์ เช่น ผู้ดูแลระบบต้องการรับส่งข้อมูลสำคัญเพื่อรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่าย ส่วนผู้ใช้ทั่วไปต้องการรับส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตเท่านั้น
2. กำหนดให้ทราฟฟิกของผู้ใช้ที่ต้องรีเลย์ผ่าน TAP k แต่ละโนดไปยังเกตเวย์ มีลำดับความสำคัญสูงกว่าทราฟฟิกของผู้ใช้ที่เข้ามาที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง เพื่อให้ความยุติธรรม

แก่ผู้ใช้ที่ต้องการส่งข้อมูลจากต้นทางซึ่งอยู่ห่างจากปลายทางมาก และเพื่อป้องกันความล่าช้าที่เกิดขึ้น จนอาจจะส่งผลให้ข้อมูลเกิดการสูญหายระหว่างทางได้

ทราฟฟิกของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงถูกแบ่งออกเป็น 4 คลาส ดังนี้

$$s \in \{HT, HL, LT, LL\}$$

HT แทนคลาสของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่ต้องการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP *k*

HL แทนคลาสของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่เข้ามาที่ TAP *k* โดยตรง

LT แทนคลาสของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ต้องการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP *k*

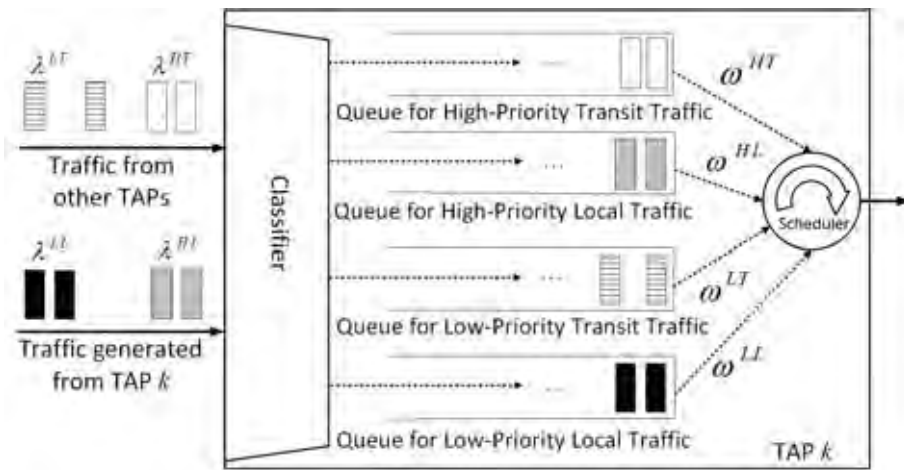
LL แทนคลาสของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่เข้ามาที่ TAP *k* โดยตรง

เพราะฉะนั้นเงื่อนไขที่กำหนดไว้จะได้ว่า ค่าลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยเรียงลำดับได้เป็น

$$\text{ค่าลำดับความสำคัญของทราฟฟิกในคลาส } HT > HL \geq LT > LL \quad (3.3)$$

จากการนำแถวคอยการถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรมมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการจัดกำหนดการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ใช้นบนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส *s* ที่ TAP *k* ด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.4 ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก ω^s มีค่าเป็นดังนี้

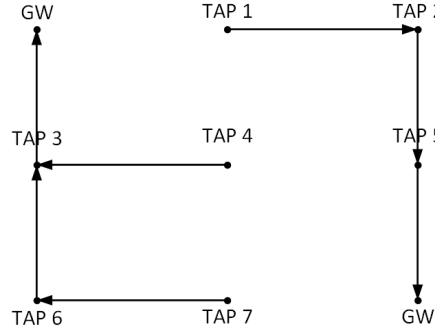
$$\omega^s = \begin{cases} \frac{1}{(\gamma+1)(c_i(k)+1)}, & s = HL \\ \frac{\gamma}{(\gamma+1)(c_i(k)+1)}, & s = LL \\ \frac{c_i(k)}{(\gamma+1)(c_i(k)+1)}, & s = HT \\ \frac{\gamma c_i(k)}{(\gamma+1)(c_i(k)+1)}, & s = LT \end{cases} \quad \text{โดยที่ } \sum_s \omega^s = 1 \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.4: แบบจำลองแถวคอยของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสที่ TAP *k* แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช

ค่าพารามิเตอร์ $c_i(k)$ แทนจำนวนโหนดที่ต้องการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP *k* เมื่อผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ *i* ตัวอย่างดังรูปที่ 3.5 เส้นทางในการรับส่งข้อมูลแบบทรีของผู้เล่นฝ่ายป้องกันใน

โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 ซึ่งประกอบไปด้วย TAP 7 โหนด และเกตเวย์ 2 เกตเวย์ ซึ่งสามารถแจกแจงการหาค่า $c_i(k)$ ของ TAP k แต่ละโหนดได้ตามตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า TAP 3 กับ TAP 5 ที่อยู่ติดกับเกตเวย์จะมีค่า $c_i(k)$ มากกว่า TAP อื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจาก TAP 3 กับ TAP 5 ต้องรองรับทราฟฟิกมาจากโหนดข้างเคียงที่ต้องการรีเลย์ผ่านไปยังเกตเวย์



รูปที่ 3.5: ตัวอย่างการหา $c_i(k)$ ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์

ตารางที่ 3.1: การแจกแจงค่า $c_i(k)$ ของแต่ละ TAP k

| TAP k | $c_i(k)$ |
|---------|----------|
| TAP 1 | 0 |
| TAP 2 | 1 |
| TAP 3 | 3 |
| TAP 4 | 0 |
| TAP 5 | 2 |
| TAP 6 | 1 |
| TAP 7 | 0 |

จากสมมติฐานในทฤษฎีแควคอย ตัวให้บริการจะกำหนดเวลาในการให้บริการส่งข้อมูลของผู้ใช้ที่เข้ามาใช้บริการผ่านโครงข่าย [17] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตัวให้บริการหมายถึงช่องสัญญาณที่ TAP ทุกโหนดในโครงข่ายต้องใช้ร่วมกัน ซึ่ง TAP k แต่ละโหนดจะได้รับการแบ่งการใช้งานช่องสัญญาณด้วยความจุที่แตกต่างกันและเป็นอิสระต่อกันขึ้นอยู่กับค่า $SINR_{i,j}(k)$ ตามสมการ (3.2) ด้วยเหตุนี้เราจึงสามารถหาเวลาในการใช้ช่องสัญญาณสำหรับส่งแพ็กเก็ตของผู้ใช้แต่ละคลาส s ที่เข้ามาแบบอิสระต่อกันที่ TAP k แต่ละโหนดได้จากสมการความจุของแซนอนอน ในรูปของอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเก็ตของผู้ใช้แต่ละคลาส s ที่ TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i และฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์ที่ j ดังนี้

$$\mu_{i,j}^s(k) = \omega^s B \log_2(1 + SINR_{i,j}(k)) \quad (3.5)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดแบบจำลองแควคอยเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เข้ามาที่ TAP k เป็นแควคอยขนาดไม่จำกัดแบบ M/M/1 สำหรับผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญทั้ง 4 คลาส ดังรูปที่ 3.4 โดยที่ทราฟฟิกที่เข้ามาของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s ที่ TAP k โดยตรงจะ

ถูกจำลองด้วยกระบวนการเข้ามาแบบปัวส์ซงด้วยอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกต λ^s (แพ็กเกตต่อวินาที) และอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตที่ต้องการรีเลย์ผ่าน TAP k เป็นจำนวน $c_i(k)$ เท่าของทราฟฟิกที่เข้ามาที่ TAP k โดยตรง ดังนั้น

$$\lambda_i^s(k) = \begin{cases} \lambda^s & \text{เมื่อ } c_i(k) = 0, s \in \{HL, LL\} \\ \lambda^s c_i(k) & \text{เมื่อ } c_i(k) > 0, s \in \{HT, LT\} \end{cases} \quad (3.6)$$

โดยที่วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ TAP k แต่ละโนดมีปริมาณทราฟฟิกเข้ามาโดยตรงเท่ากันทุกโนดซึ่งแบ่งเป็นทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส HL และทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส LL จึงทำให้ปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการรีเลย์ผ่าน TAP k ของผู้ใช้คลาส HT และผู้ใช้คลาส LT จึงมีค่าเป็น $c_i(k)$ เท่าของทราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงของผู้ใช้คลาส HL และผู้ใช้คลาส LL ตามลำดับดังสมการ (3.6) แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากมีทราฟฟิกเข้ามาโดยตรงที่ TAP k แต่ละโนดด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้ปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการรีเลย์ผ่าน TAP k แต่ละโนดมีค่าเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงของ TAP ทุกโนดรวมกันซึ่ง TAP แต่ละโนดนั้นจะอยู่บนเส้นทางเฟ้นสุ่มรูปแบบทรีเดียวกันที่ต้องการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP k ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 3.5 TAP 3 จะมีทราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงของ TAP 4 TAP 6 และ TAP 7 ซึ่งต้องการรีเลย์ผ่าน TAP 3 ไปยังเกตเวย์ปลายทางประเด็นนี้อาจจะพิจารณาเป็นงานวิจัยในอนาคตต่อไปในการพิจารณารูปแบบของปริมาณทราฟฟิกซึ่งมีค่าแตกต่างกันที่เข้ามาโดยตรงที่ TAP k

จากสมการ (2.1) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับหาจำนวนแพ็กเกตเฉลี่ยที่ตกค้างในโครงข่าย จะได้ว่าจำนวนแพ็กเกตที่ตกค้างเฉลี่ยของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s ที่ TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i และฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ j สามารถเขียนได้เป็น

$$b_{i,j}^s(k) = \frac{\lambda_i^s(k)}{\mu_{i,j}^s(k) - \lambda_i^s(k)} \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.4) ซึ่งเป็นการถ่วงน้ำหนักอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (ω^s) ที่ TAP k แต่ละโนด ดังนั้นสำหรับทุก TAP k ที่มีทราฟฟิกจากโนดข้างเคียงรีเลย์ผ่าน จะได้ว่า

$$\frac{\omega^{LL}}{\omega^{HL}} = \frac{\omega^{LT}}{\omega^{HT}} \quad (3.8)$$

ซึ่งอัตราส่วนในสมการ (3.8) จะถูกกำหนดเป็นพารามิเตอร์ γ ทำให้ได้ว่าอัตราส่วนที่กำหนดให้ทราฟฟิกของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำและผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่ TAP k แต่ละโนดนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับว่าทราฟฟิกที่เข้ามาเป็นทราฟฟิกประเภทที่เข้ามาโดยตรง หรือ ทราฟฟิกประเภทที่ต้องการรีเลย์ผ่าน ในทางปฏิบัติอัตราส่วน γ มีค่ามากกว่า 0 เสมอและสามารถมีค่ามากกว่า 1 ได้ถ้าหากปริมาณทราฟฟิกที่เข้ามาที่ TAP k λ^{LL} มีค่ามากกว่า λ^{HL}

นอกจากนี้สมการ (3.4) ยังทำให้ได้อีกว่า

$$\frac{\omega^{LT}}{\omega^{LL}} = \frac{\omega^{HT}}{\omega^{HL}} \quad (3.9)$$

ซึ่งอัตราส่วนในสมการ (3.9) จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $c_i(k)$ หรือ จำนวนโนดข้างเคียงที่ต้องการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP k เมื่อผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i

เมื่อพิจารณานับจำนวนแพ็กเกตที่ตกค้างเฉลี่ยของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s ที่ TAP k เมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i และฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ j ($b_{i,j}^s(k)$) ในสมการ (3.7)

การกำหนดอัตราส่วนการจัดกำหนดการแพ็คเกจของผู้ใช้แต่ละคลาส s (ω^s) ในสมการ (3.4) นั้นมีคุณสมบัติพิเศษที่พิสูจน์ได้ดังต่อไปนี้

โดยใช้เงื่อนไขของการกำหนดให้ที่ TAP k แต่ละโนดมีกราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงด้วยปริมาณที่เท่ากันทุกโนดสำหรับกราฟฟิกของผู้ใช้คลาส HL และสำหรับกราฟฟิกของผู้ใช้คลาส LL ดังสมการ (3.6) กำหนดอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็คเกจ ($\mu_{i,j}^s(k)$) ของผู้ใช้แต่ละคลาส s ดังสมการ (3.5) จากเงื่อนไขสมการ (3.4) จะได้ว่า หากที่ TAP k แต่ละโนดมีกราฟฟิกของผู้ใช้ทั้ง 4 คลาส

แล้ว หากกำหนดให้ $\gamma = \frac{\lambda_i^{LL}(k)}{\lambda_i^{HL}(k)}$ และ $\gamma = \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\lambda_i^{HT}(k)}$ จะได้ว่า

$$b_{i,j}^{LL}(k) = b_{i,j}^{HL}(k) = b_{i,j}^{LT}(k) = b_{i,j}^{HT}(k) \quad (3.10)$$

ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

จากสมการ (3.4) หรือ (3.8) จะได้ $\frac{\omega^{LL}}{\omega^{HL}} = \frac{\lambda_i^{LL}(k)}{\lambda_i^{HL}(k)} = \gamma$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} b_{i,j}^{LL}(k) &= \frac{\lambda_i^{LL}(k)}{\mu_{i,j}^{LL}(k) - \lambda_i^{LL}(k)} \\ &= \frac{\gamma \lambda_i^{HL}(k)}{\gamma \mu_{i,j}^{HL}(k) - \gamma \lambda_i^{HL}(k)} \\ &= \frac{\lambda_i^{HL}(k)}{\mu_{i,j}^{HL}(k) - \lambda_i^{HL}(k)} \\ &= b_{i,j}^{HL}(k) \end{aligned} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.4) จะได้ $\frac{\omega^{HL}}{\omega^{LT}} = \frac{\lambda_i^{HL}(k)}{\lambda_i^{LT}(k)} = \frac{1}{\gamma c_i(k)}$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} b_{i,j}^{HL}(k) &= \frac{\lambda_i^{HL}(k)}{\mu_{i,j}^{HL}(k) - \lambda_i^{HL}(k)} \\ &= \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\gamma c_i(k)} \\ &= \frac{\mu_{i,j}^{LT}(k)}{\gamma c_i(k)} - \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\gamma c_i(k)} \\ &= \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\mu_{i,j}^{LT}(k) - \lambda_i^{LT}(k)} \\ &= b_{i,j}^{LT}(k) \end{aligned} \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.4) หรือ (3.8) จะได้ $\frac{\omega^{LT}}{\omega^{HT}} = \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\lambda_i^{HT}(k)} = \gamma$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} b_{i,j}^{LT}(k) &= \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\mu_{i,j}^{LT}(k) - \lambda_i^{LT}(k)} \\ &= \frac{\gamma \lambda_i^{HT}(k)}{\gamma \mu_{i,j}^{HT}(k) - \gamma \lambda_i^{HT}(k)} \\ &= \frac{\lambda_i^{HT}(k)}{\mu_{i,j}^{HT}(k) - \lambda_i^{HT}(k)} \\ &= b_{i,j}^{HT}(k) \end{aligned} \quad (3.13)$$

สุดท้ายรวมจากสมการ (3.11)-(3.13) สามารถสรุปว่าสมบัติตามสมการ (3.10) เป็นจริง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาประเภทของกราฟฟิกที่เข้ามาที่ TAP k แต่ละโนดแล้ว จะพบว่า

- ถ้าหากที่ TAP k แต่ละโนดมีเพียงกราฟฟิกประเภทที่เข้ามาโดยตรงของผู้ใช้คลาส HL และ LL เท่านั้นจะได้ว่า $b_{i,j}^{LL}(k) = b_{i,j}^{HL}(k)$
- ถ้าหากที่ TAP k แต่ละโนดมีเพียงกราฟฟิกประเภทที่ต้องการรีเลย์ผ่านของผู้ใช้คลาส HT และ LT เท่านั้นจะได้ว่า $b_{i,j}^{LT}(k) = b_{i,j}^{HT}(k)$

สำหรับค่าของเกมที่ได้จากการตัดสินใจเลือกกลยุทธ์กรณีต่าง ๆ นั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ผลได้ผลเสียของผู้เล่นทั้ง 2 ฝ่าย โดยผู้เล่นในแนวแถวคือผู้เล่นฝ่ายป้องกัน และผู้เล่นในแนวหลักคือผู้เล่นฝ่ายโจมตี ซึ่งสามารถเขียนเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$B^s = \begin{bmatrix} b_{1,1}^s & \cdots & b_{1,N}^s \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M,1}^s & \cdots & b_{M,N}^s \end{bmatrix} \text{ เมื่อ } b_{i,j}^s = \sum_{k=1}^K b_{i,j}^s(k)$$

สำหรับกลยุทธ์ของฝ่ายป้องกัน และกลยุทธ์ของฝ่ายโจมตี สามารถเขียนได้ดังนี้

$$P = [p_1, \dots, p_M]$$

$$Q = [q_1, \dots, q_N]$$

และสุดท้ายสามารถคำนวณค่าของเกม EBP หรือค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างสำหรับทุกคลาสได้จาก $EBP = \sum_{\forall s} EBP^s$ หรือ

$$EBP = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_i q_j b_{i,j} \quad (3.14)$$

เมื่อค่า EBP^s หรือค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างทั้งหมดในโครงข่ายของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s สามารถหาได้จาก

$$EBP^s = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_i q_j b_{i,j}^s \quad (3.15)$$

ในการกำหนดอัตราส่วน γ สำหรับการจำกัดกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s ที่ TAP k แต่ละโนดตั้งสมการ (3.4) ถ้าหากพิจารณาเป็นโครงสร้างตรีในโครงข่ายไร้สายแบบเมชแล้ว พบว่า TAP k บางโนดซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดในโครงสร้างตรีจะไม่มีโนดข้างเคียงที่ต้องการรีเลย์กราฟฟิกผ่านจึงทำให้ที่ TAP k นั้นมีค่า $c_i(k) = 0$ ดังนั้น $b_{i,j}^{HT}(k) = b_{i,j}^{LT}(k) = 0$ เช่นกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างทั้งหมดในโครงข่ายของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (EBP^s) ในสมการ (3.15) จะหาได้จากจำนวนแพ็กเกตที่ตกค้างเฉลี่ยของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s ที่ TAP k ทุกโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชเมื่อฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ i และฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ที่ j ($\sum_{k=1}^K b_{i,j}^s(k)$) เพราะฉะนั้นถ้าที่ TAP k มี $b_{i,j}^{HT}(k) = b_{i,j}^{LT}(k) = 0$ แล้วจะส่งผลให้ $EBP^{LL} = EBP^{HL}$ และ $EBP^{HT} = EBP^{LT}$ แต่ $EBP^{LL} \neq EBP^{LT}$ ในลักษณะเดียวกัน $EBP^{HL} \neq EBP^{HT}$ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้บน

พื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s เพื่อหาผลกระทบต่อค่า EBP^s ในโครงข่ายที่มีขนาดและจำนวนเกตเวย์แตกต่างกันโดยสุดท้ายค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างทั้งหมดในโครงข่ายของผู้ใช้แต่ละคลาส s (EBP^s) อาจจะมีค่าไม่เท่ากันได้ถึงแม้ว่าหากพิจารณาใน TAP k แต่ละโนดแล้วจะมีจำนวนแพ็กเกตที่ตกค้างเฉลี่ยของผู้ใช้แต่ละคลาส s ที่มีทราฟฟิกเข้ามาถึง TAP k นั้น ($b_{i,j}^s(k)$) เท่ากันก็ตาม

3.5 การหาผลเฉลยของเกมด้วย MSA (Method of Successive Average)

ในการหาผลเฉลยของเกมนั้น งานวิธานิพนธ์นี้ได้นำหลักการโต้ตอบที่ดีที่สุด (best response) มาใช้ร่วมกับกระบวนการปรับปรุงความน่าจะเป็นด้วยกรรมวิธี MSA ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นที่รู้จักและถูกใช้ในการแก้ปัญหาทางวิจัยซึ่งศึกษาการจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่ม เช่น [6], [7] โดยวิธีการหาผลเฉลยดังกล่าวมีขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มต้นจากกำหนดความน่าจะเป็นในการเลือกกลยุทธ์ของทั้ง 2 ฝ่าย โดยให้แต่ละกลยุทธ์มีโอกาสที่จะถูกเลือกเท่ากัน ดังนี้
ฝ่ายป้องกัน มีความน่าจะเป็น p_i ที่รูปแบบทรีที่ i ที่มีปลายทางเป็นเกตเวย์และเชื่อมต่อกับ TAP ทุกโนดในโครงข่าย จะถูกเลือก

$$p_i = \frac{1}{M}, \forall i$$

ฝ่ายโจมตี มีความน่าจะเป็น q_j ที่ตำแหน่ง j จะถูกเลือก

$$q_j = \frac{1}{N}, \forall j$$

และกำหนดรอบของการเล่นเกมเริ่มแรกเป็นรอบที่ 1 ($n = 1$)

2. ถ้าฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ i แล้ว ค่า EBP ที่ฝ่ายป้องกันจะได้ คือ

$$EBP_i = \sum_{\forall s} EBP_i^s$$

เมื่อ

$$EBP_i^s = \sum_{j=1}^N [q_j b_{i,j}^s]$$

3. ถ้าฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์ j แล้วค่า EBP ที่ฝ่ายโจมตีจะได้ คือ

$$EBP_j = \sum_{\forall s} EBP_j^s$$

เมื่อ

$$EBP_j^s = \sum_{i=1}^M [p_i b_{i,j}^s]$$

4. ผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์โต้ตอบที่ดีที่สุด \hat{i} ซึ่งทำให้ค่า EBP_i มีค่าต่ำที่สุด

$$\hat{i} = \arg \min_i \{EBP_i\}$$

5. ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์โต้ตอบที่ดีที่สุด \hat{j} ซึ่งทำให้ค่า EBP_j มีค่าสูงที่สุด

$$\hat{j} = \arg \max_j \{EBP_j\}$$

6. ผู้เล่นฝ่ายป้องกันปรับการแจกแจงความน่าจะเป็นในการเลือกกลยุทธ์ P โดยปรับความน่าจะเป็นตามรูปแบบพริที่ได้เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 4 โดยระเบียบวิธี MSA ดังสมการ

$$p_i \rightarrow \left(\frac{1}{n}\right) x_i + \left(\frac{n-1}{n}\right) p_i$$

โดยที่ค่าตัวแปรช่วย x_i จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $i = \hat{i}$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อ $i \neq \hat{i}$

7. ผู้เล่นฝ่ายโจมตีปรับการแจกแจงความน่าจะเป็นในการเลือกกลยุทธ์ Q โดยปรับความน่าจะเป็นตามตำแหน่งที่ได้เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 5 โดยระเบียบวิธี MSA ดังสมการ

$$q_j \rightarrow \left(\frac{1}{n}\right) y_j + \left(\frac{n-1}{n}\right) q_j$$

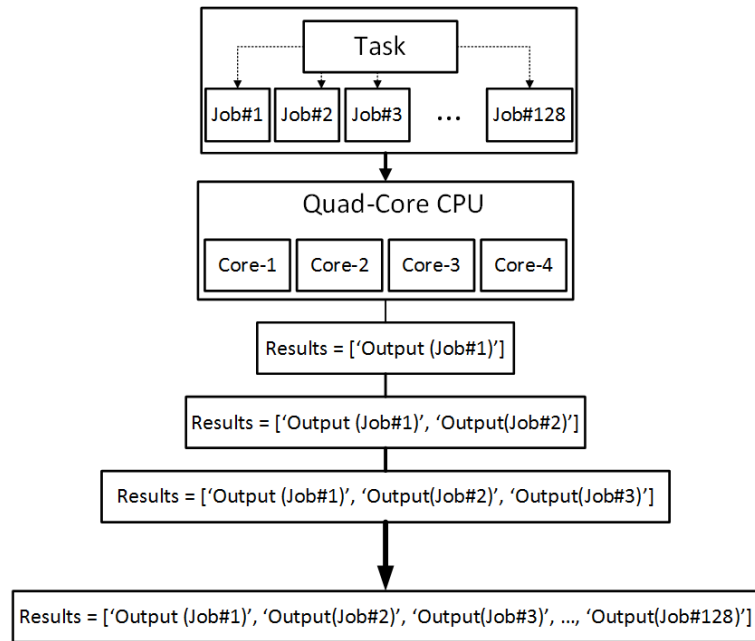
โดยที่ค่าตัวแปรช่วย y_j จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $j = \hat{j}$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อ $j \neq \hat{j}$

8. หาค่า EBP และ EBP^s ของระบบจากสมการ (3.14) และ (3.15)

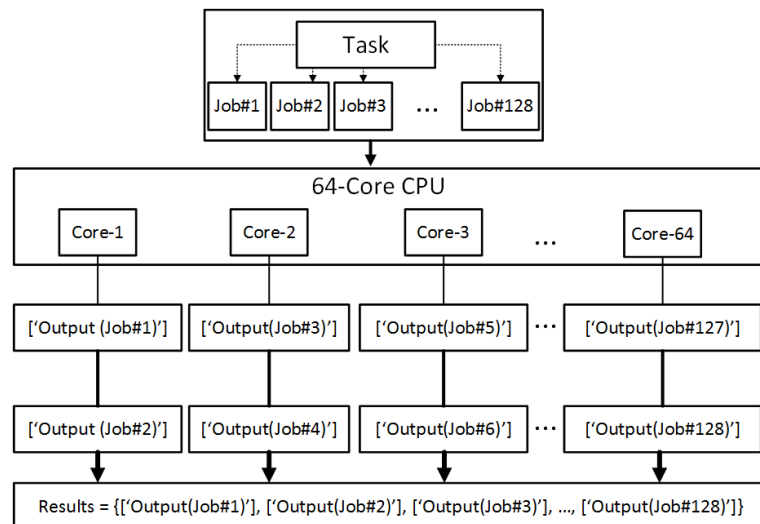
9. ปรับค่ารอบของการเล่น $n \leftarrow n + 1$ และกลับไปทำขั้นตอนที่ 2-8 ใหม่จนกระทั่งเกิดการลู่เข้าของค่า EBP

3.6 การคำนวณแบบขนาน

เริ่มแรกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การคำนวณแบบอนุกรม เพื่อหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างที่พึงได้ในโครงข่ายของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสด้วยโปรแกรม MATLAB บนคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผล Quad-core Intel® Core™i5 M450 ซีพียู 2.4 กิกะเฮิรตซ์ แรม 4 กิกะไบต์ โดยการคำนวณแต่ละครั้งจะมีการกำหนดภารกิจ (task) ซึ่งประกอบไปด้วยงาน (job) หลาย ๆ งาน แต่อย่างไรก็ตามเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาจะมีหน่วยประมวลผลเพียงหน่วยเดียว (single-core) เท่านั้น ทำให้การคำนวณแบบอนุกรมเป็นการคำนวณแบบต่อเนื่องกันทีละงานดังตัวอย่างการคำนวณในรูปที่ 3.6 เมื่อกำหนดให้หนึ่งภารกิจประกอบด้วยงานทั้งหมด 128 งาน การคำนวณแบบอนุกรมแต่ละครั้งจะให้ผลลัพธ์ (result) ออกมาทีละหนึ่งงานเท่านั้น และผลลัพธ์จะเก็บอยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ต่อกันในแนวหลักจากการคำนวณต่อเนื่อง 128 ครั้งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการทั้งหมด ทั้งนี้เมื่อโครงข่ายที่ต้องการพิจารณามีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ผู้เล่นฝ่ายป้องกันมีเส้นทางรูปแบบพริในการรับส่งข้อมูลได้หลายเส้นทาง รวมถึงการเลือกจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุดของผู้โจมตีซึ่งจะส่งผลกระทบต่อขนาดของเมตริกซ์ผลได้ผลเสียจากการเล่นเกม นอกจากนี้ยังทำให้การประเมินหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างที่พึงได้ในระยะยาวของโครงข่ายมีความซับซ้อน และใช้เวลานานยิ่งขึ้น

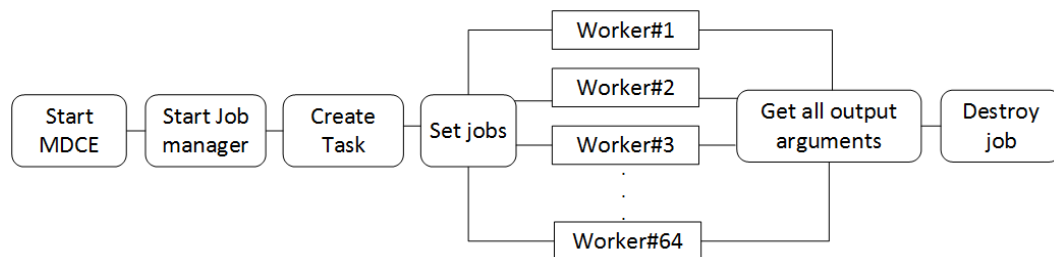


รูปที่ 3.6: ตัวอย่างการคำนวณแบบอนุกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผล Quad-core



รูปที่ 3.7: ตัวอย่างการคำนวณแบบขนานบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผล 64-core

ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้เสนอให้ใช้การคำนวณแบบขนาน (parallel computing) เพื่อนำมาแก้ปัญหาการคำนวณเมตริกซ์ต่าง ๆ ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งงานจะถูกแบ่งให้กับหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยที่มีอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ จากรูปที่ 3.7 เป็นตัวอย่างการคำนวณแบบขนานของภารกิจหนึ่งซึ่งบรรจุนานทั้งหมด 128 งานบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผล 64 หน่วย โดยจะกำหนดงานให้กับหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วย 2 งานเท่ากัน และเริ่มทำงานพร้อมกันจนกระทั่ง 128 งานเสร็จสมบูรณ์ ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยจะถูกเก็บรวมเป็นเซลล์อาร์เรย์ (cell array) ขนาดใหญ่ การคำนวณแบบขนานนอกจากจะช่วยเร่งการคำนวณแล้วยังช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณเมตริกซ์ขนาดใหญ่ด้วย



รูปที่ 3.8: การทำงานของเครื่องมือ MDCE สำหรับการคำนวณแบบขนานในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์

ในวิทยานิพนธ์ได้นำแพลตฟอร์มของ MATLAB[®] Distributed Computing Engine (MDCE) [18] ซึ่งเป็นเครื่องมือในการกระจายการทำงานของโปรแกรม MATLAB ให้แก่หน่วยประมวลผลที่มีอยู่ทั้งหมดในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ 64-core ซึ่งหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยจะประกอบด้วยซีพียู 2.21 กิกะเฮิรตซ์ แรม 16 กิกะไบต์ โดยมีวิธีการดังรูปที่ 3.8 หลังจากเริ่ม MDCE แล้ว ผู้ดูแลระบบเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์จะสร้างผู้จัดการงาน (job manager) และกำหนดจำนวนผู้ทำงาน (worker) ซึ่งหมายถึงจำนวนหน่วยประมวลผลที่ใช้ในการทำภารกิจ หรือ การคำนวณในแต่ละครั้งให้แก่ผู้จัดการงานนั้น จากนั้นจะสร้างภารกิจสำหรับบรรจุนานทั้งหมดแล้วแจกแจงงานให้กับผู้ทำงานที่มีอยู่ของผู้จัดการงานนี้ หลังจากคำนวณเสร็จสมบูรณ์จนได้ผลลัพธ์ทั้งหมด ผู้จัดการงานจะทำการลบงานทั้งหมดทิ้งเพื่อรับภารกิจใหม่เข้ามาตามการจัดกำหนดการทำงานของระบบ ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การคำนวณแบบขนานในภารกิจ 2 ภารกิจ คือ

1. การคำนวณหารูปแบบทรีที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ หรือ เซตกลยุทธ์ของผู้เล่นฝ่ายป้องกัน จำนวนเส้นทางจาก TAP แต่ละโหนดไปยังโหนดข้างเคียงทั้งหมดที่เป็นไปได้ถูกกำหนดให้เป็นงานทั้งหมดที่ต้องการคำนวณ ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปแบบทรีที่มีรากอยู่ที่เกตเวย์และเชื่อมต่อกับ TAP ทุกโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชโดยที่ไม่มีการวนซ้ำไปที่ TAP เดิม ดังตัวอย่างรายละเอียดของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นในภาคผนวก ก
2. การจัดกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส โดยกำหนดให้ภารกิจเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกตด้วยค่า γ ในสมการ (3.4) ของโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้โจมตีเลือกจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุดในกรณีที่ร้ายแรงที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาสจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกต ดังตัวอย่างรายละเอียดของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นในภาคผนวก ข

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงผลลัพธ์เชิงวิเคราะห์จากการจัดกำหนดการแพ็กเกตสำหรับผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการรบกวนสัญญาณ ด้วยแบบจำลองเกมที่เสนอไว้ โดยจะพิจารณาการรับส่งแพ็กเกตที่ TAP k แต่ละโนดในผังขาขึ้นซึ่งมีปลายทางอยู่ที่เกตเวย์ ค่าของตัวแปรหลักในการทดลองถูกกำหนดดังตารางที่ 4.1 TAP แต่ละโนดจะส่งสัญญาณด้วยกำลังส่ง $(W(k), W(l))$ 1 วัตต์ ผ่านช่องสัญญาณเกาส์เซียนที่มีกำลังสัญญาณรบกวน (σ^2) 10^{-12} วัตต์ และมีความจุช่องสัญญาณที่ TAP k แต่ละโนด (B) 1,000 แพ็กเกตต่อวินาที ผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญในโครงข่ายไร้สายแบบเมชถูกแบ่งออกเป็น 4 คลาสตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในสมการ (3.3) อัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกตของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญคลาส s $(\mu_{i,j}^s(k))$ ที่ TAP k แต่ละโนดจะขึ้นอยู่กับอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกต (ω^s) และค่า $SINR_{i,j}(k)$ เมื่อผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ i และผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์ j กำหนดให้ระยะห่างระหว่างโนดในโครงข่ายที่อยู่ติดกัน $(d(k, k'_i), d(l, k'_i))$ เท่ากับ 20 หน่วย ทั้งในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง ส่วนฝ่ายโจมตีจะส่งสัญญาณรบกวนด้วยกำลังส่ง $(W(a))$ 1 วัตต์ และมีเขตป้องกันซึ่งผู้โจมตีไม่สามารถเลือกตำแหน่งในการส่งสัญญาณรบกวนใกล้กับ TAP k ภายในระยะรัศมี $(d(a_j, k'_i))$ 1 หน่วยในกรณีที่ร้ายแรงที่สุด โดยที่ TAP k แต่ละโนดยังสามารถรับส่งข้อมูลได้อยู่

ตารางที่ 4.1: ค่าของตัวแปรหลักในการทดลองประเมินหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างที่พึงได้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมช

| ตัวแปร | ค่า |
|--------------------------|------------------------|
| $W(k), W(l), W(a)$ | 1 วัตต์ |
| σ^2 | 10^{-12} วัตต์ |
| B | 1,000 แพ็กเกตต่อวินาที |
| $d(k, k'_i), d(l, k'_i)$ | 20 หน่วย |
| $d(a_j, k'_i)$ | 1 หน่วย |

ทั้งนี้เนื่องจากผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูง หรือผู้ดูแลระบบสามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางในการรับส่งข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณได้ ทำให้สามารถฟื้นฟูการใช้งานของโครงข่ายและกู้คืนแพ็กเกตที่สูญหายของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำซึ่งเป็นผู้ใช้ทั่วไปเพื่อส่งไปยังเส้นทางใหม่ ดังนั้นเพื่อประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายจากการจัดกำหนดการแพ็กเกตสำหรับผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญ บทนี้ได้แบ่งพิจารณาผลกระทบจากการจัดกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีลักษณะเป็นกริดทอพอโลยี (grid topology) ขนาด 3×3 3×4 และ 4×4 ซึ่งมีจำนวนเกตเวย์ตั้งแต่ 2 เกตเวย์ขึ้นไปจนถึง 4 เกตเวย์ ด้วยการประเมินหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างที่พึงได้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชของผู้ใช้ลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (EBP^s) โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อที่ 4.1 เป็นผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างจากการตรึงค่าอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกต หัวข้อที่ 4.2 เป็นผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างจากการ

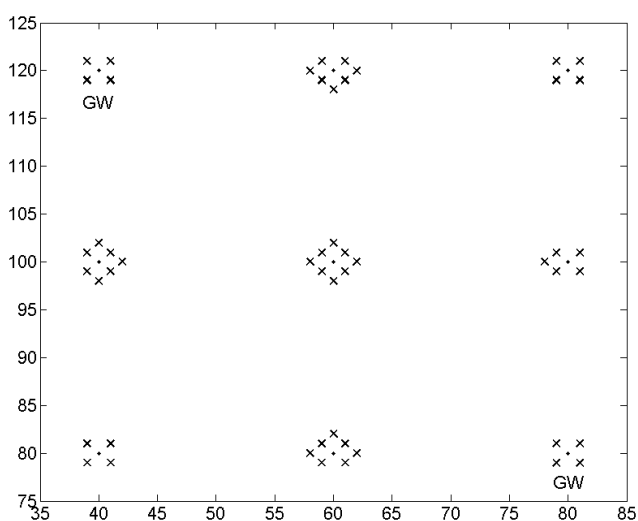
เปลี่ยนแปลงอัตราการจำกัดการแพ็กเกต หัวข้อที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบเวลากระทำการของการคำนวณแบบอนุกรมและการคำนวณแบบขนาน หัวข้อที่ 4.4 เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตี และหัวข้อที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้และไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม MATLAB จำลองสถานการณ์และใช้การคำนวณแบบอนุกรม บนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา ร่วมกับการคำนวณแบบขนาน บนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ด้วยโปรแกรม MDCE

4.1 ผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างจากการตั้งค่าอัตราการจำกัดการแพ็กเกต

จากแถวคอยการถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรม การทดลองนี้เป็นการหาผลกระทบต่อค่า EBP^s จากการตั้งค่าอัตราการจำกัดการแพ็กเกต ซึ่งด้วยเงื่อนไขของค่าลำดับความสำคัญของทราฟฟิกในสมการ (3.3) ทำให้สามารถกำหนดค่าของอัตราการจำกัดการแพ็กเกตสำหรับผู้ใช้แต่ละคลาส s (ω^s) ได้ดังนี้

$$\omega^{HT} > \omega^{HL} \geq \omega^{LT} > \omega^{LL} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1: โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์และตำแหน่งของผู้โจมตีที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด 50 ตำแหน่งแรก

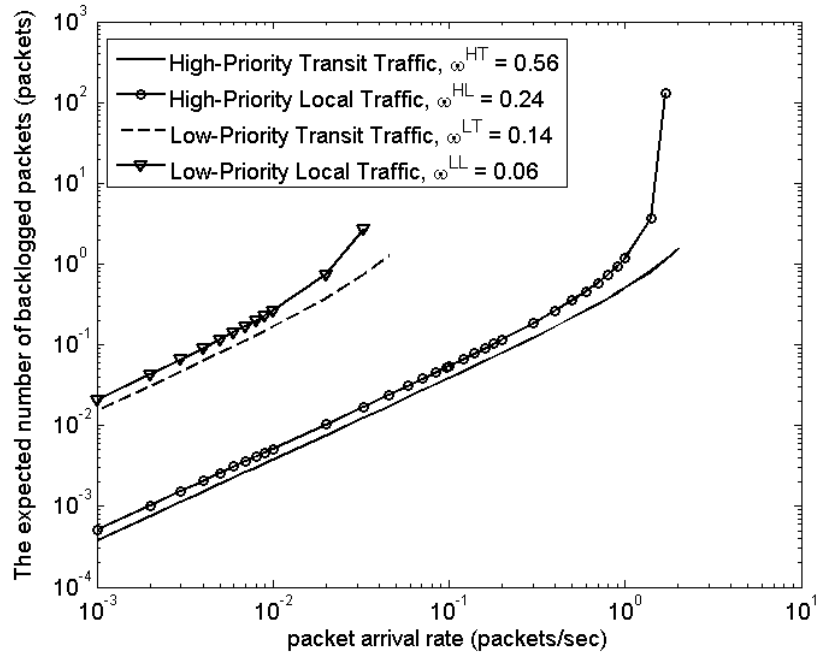
พิจารณาโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 ซึ่งประกอบไปด้วย TAP 7 โหนด 2 เกตเวย์ ที่ตำแหน่งมุมบนซ้ายและมุมขวาล่างของโครงข่ายดังรูปที่ 4.1 กำหนดค่าของตัวแปรในการทดลองนี้ดังตารางที่ 4.2 อัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่ TAP k แต่ละโหนดโดยตรง ($\lambda_k^{HL}(k)$) ตั้งแต่ 0.001 ถึง 2 แพ็กเกตต่อวินาที และอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ TAP k แต่ละโหนดโดยตรง ($\lambda_k^{LL}(k)$) ตั้งแต่ 0.01 ถึง 20 แพ็กเกตต่อวินาที

เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์เป็นจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด (N) 50 ตำแหน่ง เนื่องจากแพ็กเกตของผู้ใช้คลาส HT และ LT จะต้องรียผ่าน TAP k อย่างน้อยหนึ่งโหนด ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่า ω^{HT} และ ω^{LT} มากกว่า ω^{HL} และ ω^{LL} อย่างน้อย 2 เท่าตามลำดับ ซึ่งการกำหนดค่า ω^s ในรูปแบบดังกล่าวเป็นไปได้หลายรูปแบบ แต่เพื่อให้ TAP k แต่ละโหนดสามารถรับประกันการส่งออกแพ็กเกตของผู้ใช้คลาส HT และคลาส LT ซึ่งรียผ่าน TAP อื่น ๆ บนเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีเดียวกันมาแล้วมากกว่าหนึ่งช่วงเชื่อมต่อก่อนที่จะรียผ่าน TAP k ด้วยอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกตที่มากกว่าผู้ใช้คลาส HL และคลาส LL ($\mu_{i,j}^{HT}(k) > \mu_{i,j}^{HL}(k)$ และ $\mu_{i,j}^{LT}(k) > \mu_{i,j}^{LL}(k)$) นอกจากนี้ผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงต้องสามารถส่งออกแพ็กเกตไปยังเกตเวย์ปลายทางได้เสร็จสิ้นก่อนผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำเพื่อเพิ่มโอกาสในการรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรมากยิ่งขึ้น ผู้ดูแลระบบซึ่งเป็นผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงจึงต้องได้รับอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกตที่สูงกว่าผู้ใช้ทั่วไป ซึ่งเป็นผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำเป็นค่าหลายเท่าตัวตามเงื่อนไขการกำหนด ω^s ในสมการ (4.1) ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกค่า $\omega^{HT} = 0.56$ $\omega^{HL} = 0.24$ $\omega^{LT} = 0.14$ และ $\omega^{LL} = 0.06$

ตารางที่ 4.2: ค่าของตัวแปรในการทดลองหาผลกระทบจากการตรึงค่าอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกต

| ตัวแปร | ค่า |
|---------------------|----------------------------|
| $\lambda_i^{HL}(k)$ | 0.001 - 2 แพ็กเกตต่อวินาที |
| $\lambda_i^{LL}(k)$ | 0.01 - 20 แพ็กเกตต่อวินาที |
| N | 50 ตำแหน่ง |
| ω^{HT} | 0.56 |
| ω^{HL} | 0.24 |
| ω^{LT} | 0.14 |
| ω^{LL} | 0.06 |

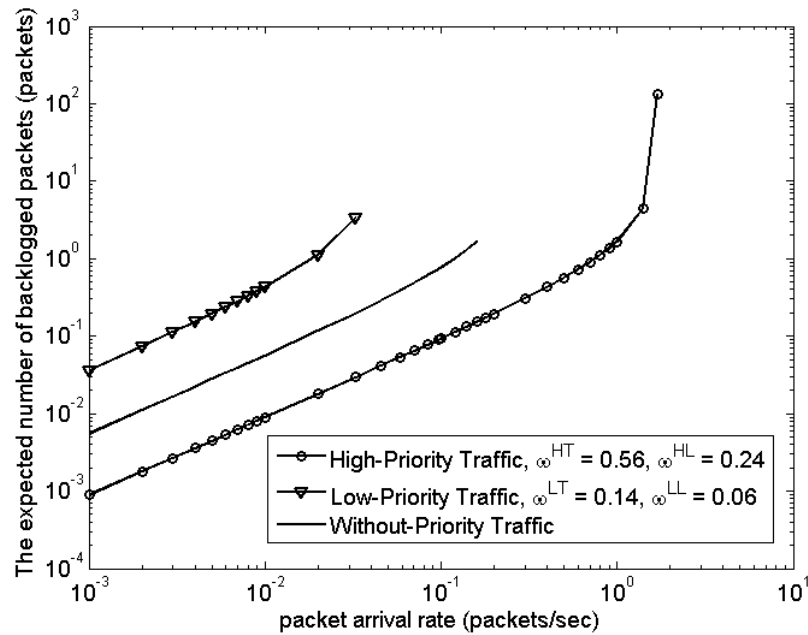
รูปที่ 4.2 แสดงผลกระทบต่อค่า EBP^s จากการตรึงค่า ω^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 3 \times 2$ เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$ โดยจากกราฟแกน x เป็นค่าของ $\lambda_i^{HL}(k)$ และที่จุดทำงานเดียวกัน $\lambda_i^{LL}(k) = 10\lambda_i^{HL}(k)$ พบว่าเมื่อมีอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตที่ TAP k แต่ละโหนดเพิ่มขึ้น ค่า EBP^{LL} มีค่ามากที่สุด ส่วนค่า EBP^{HT} มีค่าน้อยที่สุดเสมอเป็นไปตามเงื่อนไขการกำหนดค่าลำดับความสำคัญของผู้ใช้ในสมการ (3.3) โดยผู้เล่นฝ่ายป้องกันต้องการค่า EBP^{HT} น้อยที่สุดเพื่อเพิ่มโอกาสในการรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายจากการปรับแก้เส้นทางในการรับส่งข้อมูลของผู้ดูแลระบบ ซึ่งค่า EBP^s จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่งที่ระบบไม่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เข้ามาในโครงข่ายได้อีก $\lambda_i^{HT}(k)$ สูงสุดที่ระบบรองรับได้มีค่าเท่ากับ 2 แพ็กเกตต่อวินาที $\lambda_i^{HL}(k)$ สูงสุดที่ระบบรองรับได้มีค่าเท่ากับ 1.7 แพ็กเกตต่อวินาที $\lambda_i^{LT}(k)$ สูงสุดที่ระบบรองรับได้มีค่าเท่ากับ 0.4 แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k)$ สูงสุดที่ระบบรองรับได้มีค่าเท่ากับ 0.3 แพ็กเกตต่อวินาที เพราะว่าเมื่อโครงข่ายใช้การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มที่เหมาะสมที่สุด และฝ่ายโจมตีเลือกตำแหน่งส่งสัญญาณรบกวนในกรณีที่ย่ำแรงที่สุดแล้ว แต่ฝ่ายป้องกันโครงข่ายไม่สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนจากฝ่ายโจมตีได้ ส่งผลให้ที่ TAP k แต่ละโหนดมีอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเกตของผู้ใช้คลาส s น้อยกว่าอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้คลาส s ($\mu_{i,j}^s(k) < \lambda_i^s(k)$) ระบบจึงไม่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เข้ามาใหม่ได้อีก นอกจากนี้ที่ TAP k แต่ละโหนดยังมีปริมาณ $\lambda_i^{HL}(k)$ น้อยกว่า $\lambda_i^{LL}(k)$ 10 เท่า และผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงยังได้รับ ω^{HT}



รูปที่ 4.2: ผลกระทบต่อค่า EBP^s จากการตั้งค่า ω^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีเลือก $N = 50$

มากกว่า ω^{LT} 4 เท่าเช่นเดียวกันกับ ω^{HL} ซึ่งมากกว่า ω^{LL} 4 เท่า โครงข่ายจึงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงได้มากกว่าทราฟฟิกของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำ และมีแพ็กเกตที่ตกค้างเฉลี่ยทั้งหมดในโครงข่ายต่ำกว่าด้วย

ผลการเปรียบเทียบค่า EBP ในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้กับโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ในงานวิจัย [7] เพื่อประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x3 2 เกตเวย์แสดงดังรูปที่ 4.3 เมื่ออัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรงในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้เท่ากับอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตจากผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงรวมกับอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตจากผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง ($\lambda_i(k) = \lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$) จากกราฟแกน x เป็นค่าของ $\lambda_i^{HL}(k)$ และที่จุดทำงานเดียวกัน $\lambda_i^{LL}(k) = 10\lambda_i^{HL}(k)$ พบว่าค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูง ($EBP^H = EBP^{HT} + EBP^{HL}$) มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างในโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ (EBP) โดยที่ $\lambda_i^H(k)$ สูงสุดที่ระบบรองรับได้มีค่าเท่ากับ 1.7 แพ็กเกตต่อวินาที $\lambda_i^L(k)$ สูงสุดที่ระบบรองรับได้มีค่าเท่ากับ 0.32 แพ็กเกตต่อวินาที ดังนั้นโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกสูงสุดได้เท่ากับ $\lambda_i^H(k) + \lambda_i^L(k) = 1.7 + 0.32 = 2.02$ แพ็กเกตต่อวินาที ส่วน $\lambda_i(k)$ สูงสุดที่ระบบรองรับได้มีค่าเท่ากับ 1.76 แพ็กเกตต่อวินาที ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าการส่งสัญญาณรบกวนของฝ่ายโจมตีจะส่งผลต่อค่า $SINR_{i,j}(k)$ และทำให้ค่า $\mu_{i,j}(k)$ ที่ TAP k แต่ละโนดลดลงตามไปด้วย ในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ แพ็กเกตของผู้ใช้แต่ละคลาส s ซึ่งเข้ามาที่ TAP k จะรออยู่ที่แถวคอยของผู้ใช้แต่ละคลาส และถูกส่งออกไปด้วย $\mu_{i,j}^s(k)$ แตกต่างกันจากการแบ่งสัดส่วนความจุช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับค่า ω^s ส่วนโครงข่าย



รูปที่ 4.3: เปรียบเทียบค่า EBP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 3 \times 2$ เกตเวย์ที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้และไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้

ที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญ แพ็กเก็ตจากผู้ใช้ทุกคลาส s ซึ่งเข้ามาที่ TAP k จะถูกรวมอยู่ที่แควคอยเดียวกัน และถูกส่งออกไปด้วย $\mu_{i,j}(k)$ โดยที่ไม่มีการแบ่งความจุของสัญญาณ โดยที่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณทราฟฟิกสูงสุด ดที่รองรับได้ในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้กับโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้จะได้ว่า $\frac{\lambda_i^H(k) + \lambda_i^L(k)}{\lambda_i(k)} = \frac{2.02}{1.76} = 1.48$ การจัดการการแพ็กเก็ตในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้สามารถช่วยให้ระบบรองรับปริมาณทราฟฟิกได้เพิ่มขึ้นเป็น 1.48 เท่า กล่าวคือช่วยให้โครงข่ายมีขอบเขตการทำงานที่เสถียรยาวนานขึ้น ด้วยการเพิ่มโอกาสในการรองรับแพ็กเก็ตสำคัญสำหรับปรับแก้เส้นทางในการรับส่งข้อมูลของผู้ดูแลระบบได้มากขึ้น ทั้งนี้ยังเพิ่มโอกาสสำหรับการกู้คืนแพ็กเก็ตที่สูญหายของผู้ใช้ทั่วไปได้ในระยะหนึ่งก่อนที่โครงข่ายจะไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้อีกต่อไป ดังนั้นจึงได้นำไปสู่การทดลองถัดไป ในการหาอัตราการจัดการการแพ็กเก็ตที่เหมาะสมในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนเกตเวย์มากกว่า 2 เกตเวย์

4.2 ผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดการการแพ็กเก็ต

เพื่อประเมินผลกระทบต่อค่า EBP^s จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดการการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ใช้นั้นพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (ω^s) ด้วยการนำแควคอยถ่วงน้ำหนักแบบยุติธรรมมาประยุกต์ใช้ เมื่อโครงข่ายที่พิจารณามีขนาดใหญ่ขึ้น การคำนวณหาผลเฉลยจากเกมด้วยกรรมวิธี MSA จะมีความซับซ้อนมากกว่าโครงข่ายที่มีขนาดเล็กเนื่องจากขนาดเมตริกซ์ผลได้ผลเสียจะขึ้นอยู่กับเขตกลยุทธ์ของฝ่ายป้องกันและฝ่ายโจมตี ซึ่งถ้าโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้เส้นทาง

เพิ่มสุ่มแบบทรีในการรับส่งข้อมูลมีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย การคำนวณแบบขนานจึงได้ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้ โดยกำหนดค่าของตัวแปรดังตารางที่ 4.3 ภารกิจในการคำนวณแบบขนานบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ถูกกำหนดให้เป็นค่าของการเปลี่ยนแปลง γ ตั้งแต่ 0 ถึง 20 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 ดังนั้น γ แต่ละค่าจึงเป็นงานที่กำหนดให้แก่ผู้ทำงาน หรือหน่วยประมวลผลที่มีอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ เมื่อฝ่ายโจมตีเลือกกลยุทธ์เป็นจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด (N) 50 ตำแหน่ง อัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเก็ตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง ($\lambda_i^{HL}(k)$) เท่ากับ 0.001 แพ็กเก็ตต่อวินาที และอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเก็ตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง ($\lambda_i^{LL}(k)$) เท่ากับ 0.01 แพ็กเก็ตต่อวินาที การทดลองนี้ได้แบ่งการพิจารณาการกำหนดการแพ็กเก็ตในโครงข่ายไร้สายแบบ

ตารางที่ 4.3: ค่าของตัวแปรในการทดลองหาผลกระทบต่อค่า EBP^s จากการเปลี่ยนแปลง ω^s

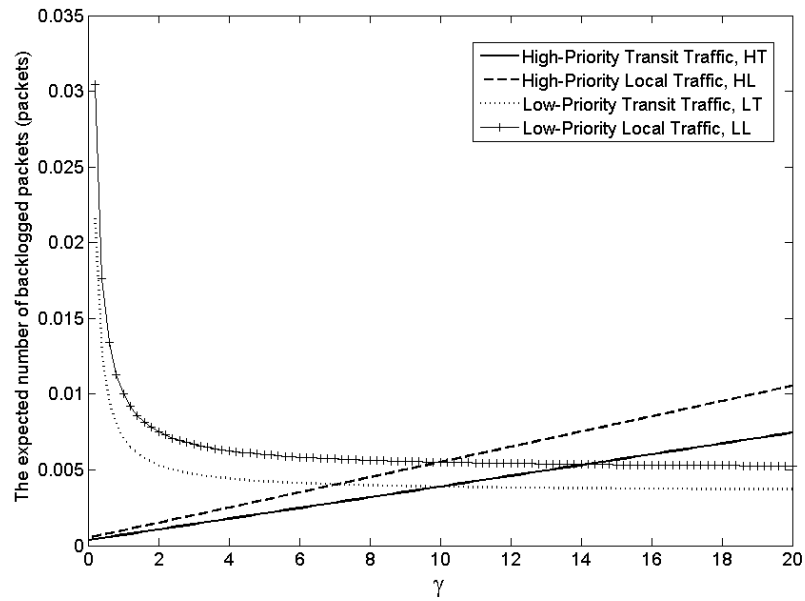
| ตัวแปร | ค่า |
|---------------------|-------------------------|
| $\lambda_i^{HL}(k)$ | 0.001 แพ็กเก็ตต่อวินาที |
| $\lambda_i^{LL}(k)$ | 0.01 แพ็กเก็ตต่อวินาที |
| N | 50 ตำแหน่ง |
| γ | 0:0.2:20 |

เมชที่มีขนาด และจำนวนเกตเวย์แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ หัวข้อที่ 4.2.1 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x3 หัวข้อที่ 4.2.2 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x4 และหัวข้อที่ 4.2.3 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 4x4 ดังนี้

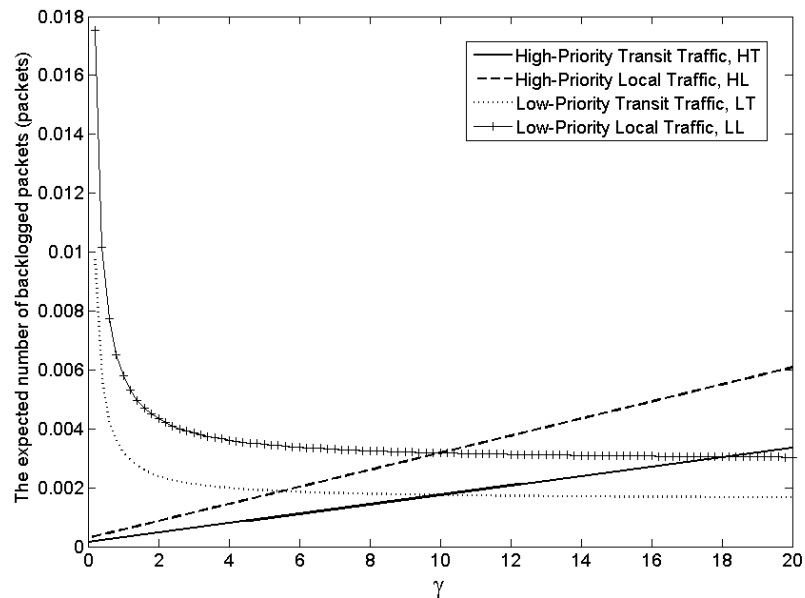
4.2.1 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x3

พิจารณาในกรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x3 2 เกตเวย์ในรูปที่ 4.1 และโครงข่ายขนาด 3x3 3 เกตเวย์ โดยการเพิ่มเกตเวย์ที่ตำแหน่งมุมขวาบนของโครงข่ายขนาด 3x3 2 เกตเวย์

ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการกำหนดการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ใช้นบนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (ω^s) ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ γ ในสมการ (3.4) พบว่าเมื่อ γ มีค่าเดียวกัน EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสในโครงข่ายขนาด 3x3 2 เกตเวย์ดังรูปที่ 4.4 มีค่ามากกว่า EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสในโครงข่ายขนาด 3x3 3 เกตเวย์ดังรูปที่ 4.5 นอกจากนี้ในโครงข่ายขนาด 3x3 2 เกตเวย์ เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 7 ทำให้ EBP^{HL} มีค่าเท่ากับ EBP^{LT} และเมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 14.4 ทำให้ EBP^{HT} มีค่าเท่ากับ EBP^{LL} ดังรูปที่ 4.4 ส่วนในโครงข่ายขนาด 3x3 3 เกตเวย์ EBP^{HL} มีค่าเท่ากับ EBP^{LT} เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 5.6 และเมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 18.2 ทำให้ EBP^{HT} มีค่าเท่ากับ EBP^{LL} ดังรูปที่ 4.5 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า โครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีขนาดเท่ากันเมื่อมีจำนวนเกตเวย์เพิ่มขึ้น ทำให้จำนวน TAP ในโครงข่ายลดลง ส่งผลให้ปริมาณกราฟฟิกของผู้ใช้แต่ละคลาสลดลง รวมถึงจำนวนโนดที่ต้องอาศัยการรีเลย์กราฟฟิกผ่าน TAP k แต่ละโนดไปยังเกตเวย์ปลายทาง ($c_i(k)$) มีจำนวนลดลงเช่นกัน ดังนั้น EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสในโครงข่ายที่มี 3 เกตเวย์จึงมีค่าน้อยกว่าในโครงข่ายที่มี 2 เกตเวย์ ทั้งนี้เนื่องจากค่า EBP^s ในสมการ (3.15) หาได้จากค่าเฉลี่ยของผลรวม $b_{i,j}^s(k)$ ที่ TAP k ทุกโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ซึ่งจากการกำหนดอัตราส่วนสำหรับการกำหนดการแพ็กเก็ตของผู้ใช้คลาส HL และ LT ในสมการ (3.4) พบว่าที่ TAP k แต่ละโนดจะมี $\frac{\omega^{LT}}{\omega^{HL}} = \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\lambda_i^{HL}(k)} = \gamma c_i(k)$ กล่าวโดยสรุปคือถ้าหาก $c_i(k)$ มีค่าลดลง อัตราส่วนของปริมาณกราฟฟิกระหว่าง



รูปที่ 4.4: ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 3 \times 2$ เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$

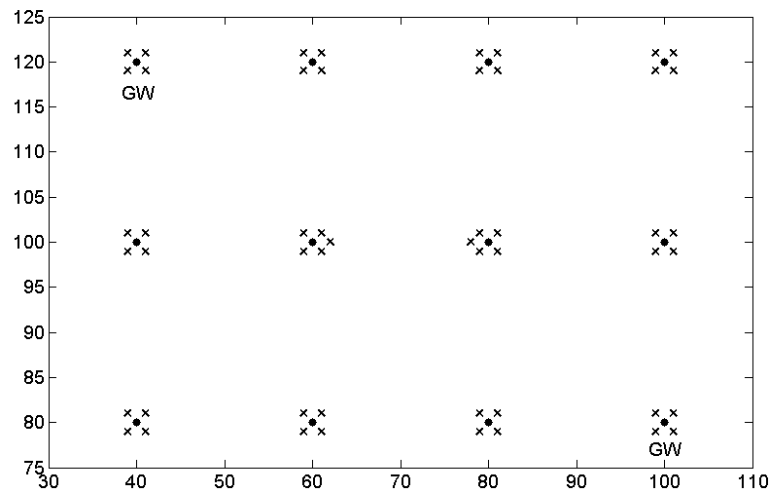


รูปที่ 4.5: ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 3 \times 3$ เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$

ผู้ใช้คลาส LT และ HL มีค่าลดลง จึงส่งผลให้อัตราส่วน γ ที่ทำให้ $EBP^{LT} = EBP^{HL}$ มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน และจากการกำหนดอัตราส่วนสำหรับการจัดกำหนดการแพ็คเกจของผู้ใช้คลาส HT และ LL ในสมการ (3.4) พบว่าที่ TAP k แต่ละโนดจะมีค่า $\frac{\omega^{LL}}{\omega^{HT}} = \frac{\lambda_i^{LL}(k)}{\lambda_i^{HT}(k)} = \frac{\gamma}{c_i(k)}$ เพราะฉะนั้นถ้าหาก $c_i(k)$ มีค่าลดลง อัตราส่วนของปริมาณกราฟฟิกระหว่างผู้ใช้คลาส LL และ HT มีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อัตราส่วน γ ที่ทำให้ $EBP^{HT} = EBP^{LL}$ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการกำหนดอัตราส่วน γ เหล่านี้ทำให้ผู้ดูแลระบบสามารถรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายไว้ได้จากการส่งแพ็คเกจสำหรับปรับแก้เส้นทางการรับส่งข้อมูลของ TAP k แต่ละโนดเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนจากผู้โจมตีซึ่ง ณ เวลานั้น EBP ของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงยังมีค่าไม่เกิน EBP ของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำตามเงื่อนไขค่าลำดับความสำคัญของกราฟฟิในสมการ (3.3)

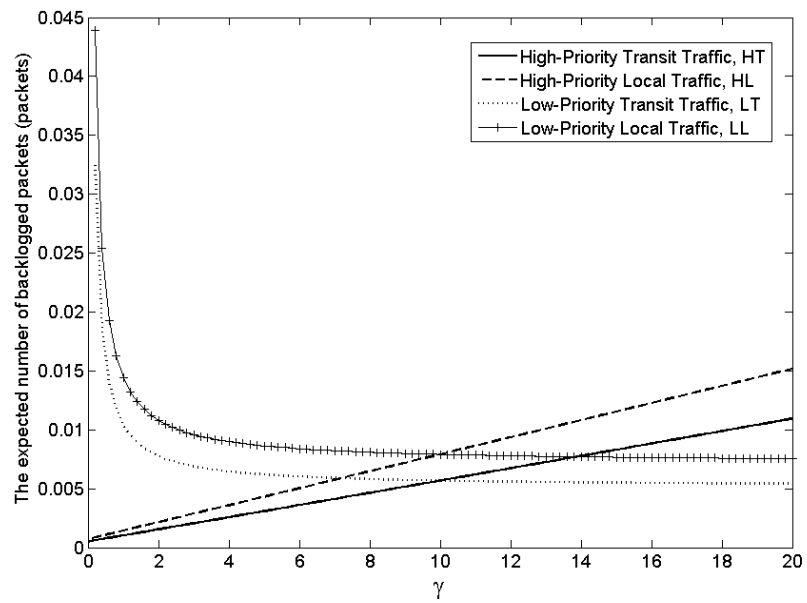
4.2.2 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x4

พิจารณาในกรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 3x4 2 เกตเวย์ในรูปที่ 4.6 นอกจากนี้ยังเพิ่มเกตเวย์ที่ตำแหน่งมุมขวาบนและมุมซ้ายล่างของโครงข่ายขนาด 3x4 2 เกตเวย์เป็นโครงข่ายที่มีขนาด 3x4 3 เกตเวย์ และโครงข่ายขนาด 3x4 4 เกตเวย์ ตามลำดับ

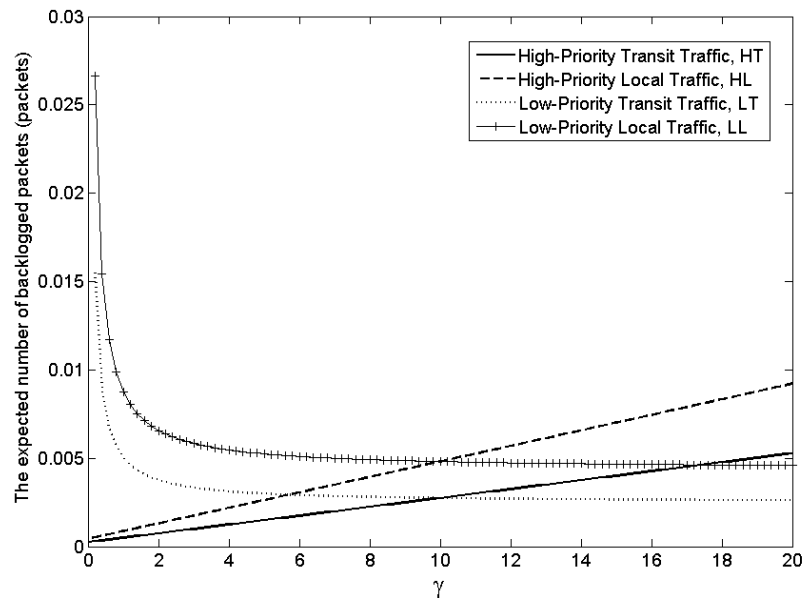


รูปที่ 4.6: โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x4 2 เกตเวย์และตำแหน่งของผู้โจมตีที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด 50 ตำแหน่งแรก

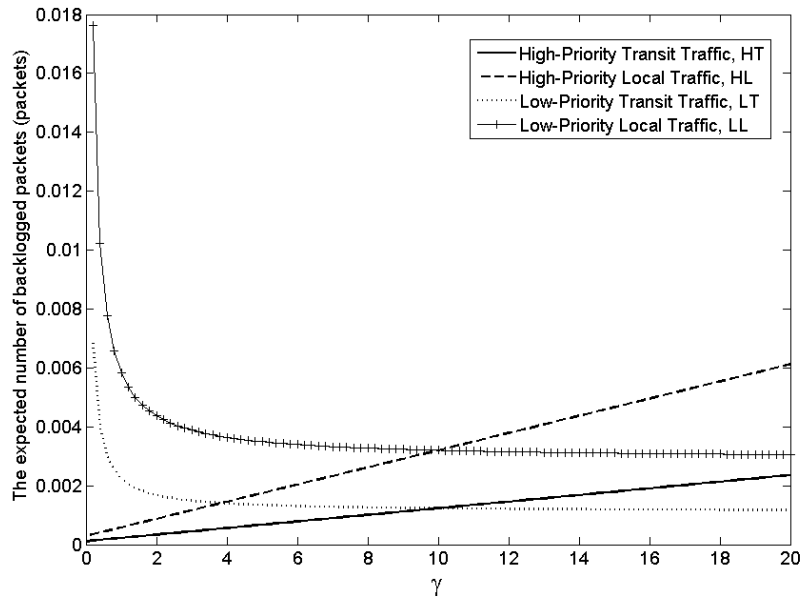
ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดกำหนดการแพ็คเกจสำหรับผู้ใช้นบนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (ω^s) ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ γ ในสมการ (3.4) พบว่าเมื่อ γ มีค่าเดียวกัน EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสในโครงข่ายขนาด 3x4 2 เกตเวย์ในรูปที่ 4.7 มีค่ามากที่สุด ซึ่งในทางกลับกันโครงข่ายขนาด 3x4 4 เกตเวย์ในรูปที่ 4.9 จะมีค่า EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสน้อยที่สุด โดยในโครงข่ายขนาด 3x4 2 เกตเวย์ เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 7.2 ทำให้ EBP^{HL} มีค่าเท่ากับ EBP^{LT} และเมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 13.8 ทำให้ EBP^{HT} มีค่าเท่ากับ EBP^{LL} ดังรูปที่ 4.7 ส่วนในโครงข่ายขนาด 3x4 3 เกตเวย์ เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 5.8 ทำให้โครงข่ายมีค่า EBP^{HL} เท่ากับ EBP^{LT} และเมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 17.2 ทำให้ EBP^{HT} มีค่าเท่ากับ EBP^{LL} ดังรูปที่ 4.8 และสุดท้ายในโครงข่ายขนาด 3x4 4 เกตเวย์ เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 3.8 ทำให้โครงข่ายมีค่า EBP^{HL} เท่ากับ EBP^{LT} ดังรูปที่ 4.9 เป็นเพราะว่าโครงข่ายขนาด



รูปที่ 4.7: ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 4 \times 2$ เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$



รูปที่ 4.8: ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 4 \times 3$ เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$



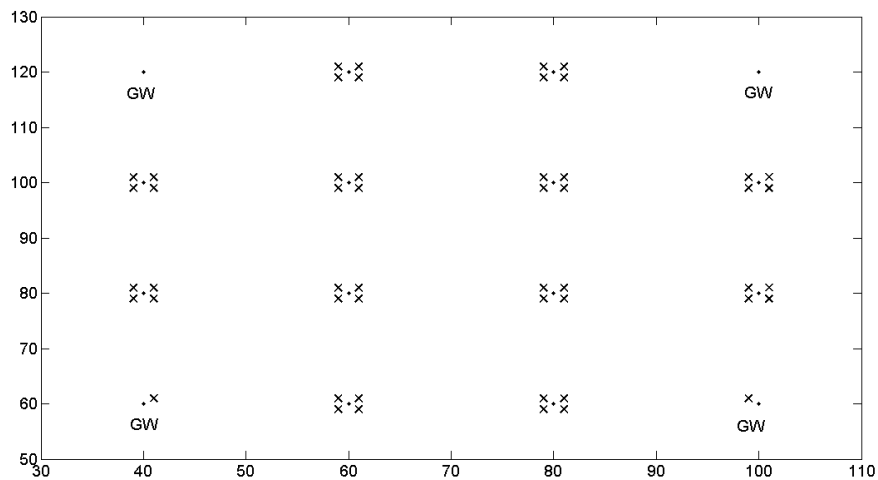
รูปที่ 4.9: ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 4 \times 4$ เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$

$3 \times 4 \times 2$ เกตเวย์มีจำนวน TAP มากที่สุด ทำให้ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดในโครงข่ายมีจำนวนมากกว่าในโครงข่ายขนาด $3 \times 4 \times 3$ เกตเวย์และ 4 เกตเวย์ตามลำดับ เนื่องจากเริ่มแรกผู้โจมตีจะกระจายตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด และเลือกโจมตีที่ตำแหน่งกึ่งกลางของโครงข่ายมากที่สุดเพราะสามารถโจมตีได้ครอบคลุมจำนวนโนดสูงสุด หลังจากนั้นผู้โจมตีจะเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับเกตเวย์มากที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้ผู้เล่นฝ่ายป้องกันสามารถส่งข้อมูลออกไปทางเกตเวย์นั้นได้ การที่โครงข่ายมี 2 เกตเวย์ดังรูปที่ 4.6 จะทำให้ผู้โจมตีคาดเดาเส้นทางในการรับส่งข้อมูลได้ง่าย และเลือกตำแหน่งโจมตีที่เกตเวย์ใดเกตเวย์หนึ่งทำให้โครงข่ายสามารถส่งข้อมูลออกไปได้แค่ทางเกตเวย์ที่เหลืออยู่จึงก่อให้เกิด EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสมากกว่าในโครงข่ายที่มี 3 เกตเวย์และ 4 เกตเวย์ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วน γ ที่ทำให้ EBP^{LT} มีค่าเท่ากับ EBP^{HL} ในโครงข่ายขนาด $3 \times 4 \times 2$ เกตเวย์มีค่ามากที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส LT และ HL ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น รวมถึงจำนวนโนดที่ต้องรีเลย์แพ็กเกตผ่าน TAP k แต่ละโนด ($c_i(k)$) ที่เพิ่มขึ้นเช่นกันดังสมการ (3.4) แต่ในทางกลับกันอัตราส่วน γ ที่ทำให้ EBP^{LL} มีค่าเท่ากับ EBP^{HT} ในโครงข่ายขนาด $3 \times 4 \times 2$ เกตเวย์จะมีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส LL และ HT รวมถึงจำนวนโนดข้างเคียงที่ต้องรีเลย์แพ็กเกตผ่าน TAP k แต่ละโนด ($c_i(k)$) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงต้องลดอัตราส่วน γ ลง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มโอกาสให้ผู้ดูแลระบบยังสามารถรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายไว้ได้จากการส่งแพ็กเกตสำหรับปรับแก้เส้นทางการรับส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ปลายทางสำเร็จสูงขึ้น

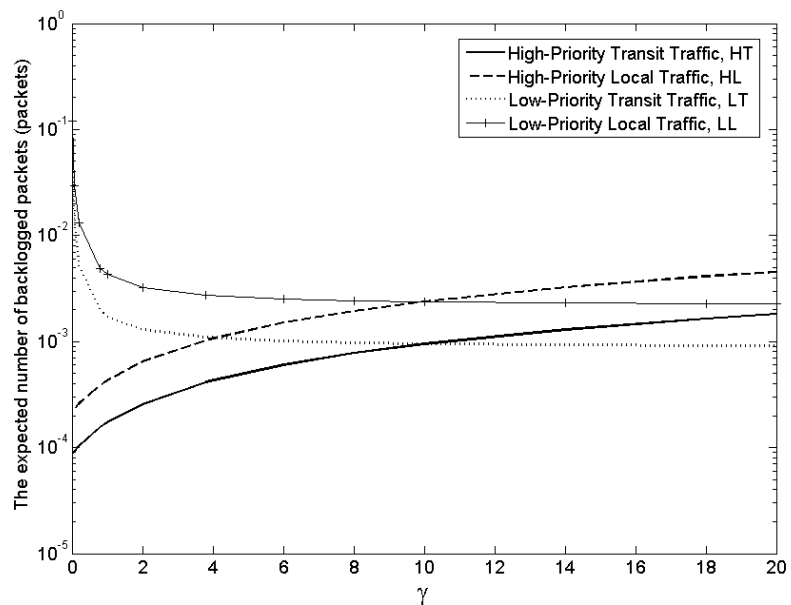
4.2.3 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 4×4

พิจารณาในกรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด $4 \times 4 \times 4$ เกตเวย์ดังรูปที่ 4.10 เนื่องจากกลยุทธ์ของฝ่ายป้องกันซึ่งเป็นเส้นทางพื้นสู่รูปแบบทรีในโครงข่ายขนาด $4 \times 4 \times 4$ เกตเวย์มีจำนวนเพิ่มขึ้น

มากเมื่อเทียบกับโครงข่ายขนาดอื่น ๆ ที่ผ่านมาในการทดลองที่ 4.2.1 และการทดลองที่ 4.2.2 ทำให้แรมซึ่งมีอยู่เพียง 16 กิกะไบต์บนคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์แต่ละโหนด ไม่เพียงพอต่อการคำนวณเมตริกซ์ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนมาใช้ในการคำนวณแบบอนุกรมบนคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะซึ่งมีแรม 32 กิกะไบต์



รูปที่ 4.10: โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 4x4 4 เกตเวย์และตำแหน่งของผู้โจมตีที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด 50 ตำแหน่งแรก



รูปที่ 4.11: ค่า EBP^s ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 4x4 4 เกตเวย์เมื่อ $\lambda_i^{HL}(k) = 0.001$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที $\gamma = [0.02, 20]$ และผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$

ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการกำหนดการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ใช้นพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (ω^s) ด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ γ พบว่าโครงข่ายขนาด 4×4 4 เกตเวย์จะมีค่า EBP^{HL} เท่ากับ EBP^{LT} เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 4 ดังรูปที่ 4.11 นอกจากนี้เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 10 ยังทำให้ $EBP^{HL} = EBP^{LL}$ และ $EBP^{HT} = EBP^{LT}$

เมื่อพิจารณาโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จำนวนเกตเวย์เท่ากัน จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราการกำหนดการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ใช้นพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส s (ω^s) ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ γ ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีขนาดและจำนวนเกตเวย์แตกต่างกันในรูปที่ 4.4, รูปที่ 4.5, รูปที่ 4.7- รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.11 พบว่ากราฟมีจุดตัด 3 ช่วง ได้แก่

1. $EBP^{HL} = EBP^{LT}$

เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จำนวนเกตเวย์เท่ากัน γ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่าโครงข่ายมีจำนวน TAP เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส HL เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส LT เพิ่มขึ้นเช่นกันเนื่องจากจำนวนโหนดที่ต้องอาศัยการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP k แต่ละโหนดไปยังเกตเวย์ปลายทาง ($c_i(k)$) มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่า EBP^s ในสมการ (3.15) สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของผลรวม $b_{i,j}^s(k)$ ที่ TAP k ทุกโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ซึ่งจากการกำหนดอัตราการกำหนดการแพ็กเก็ตของผู้ใช้คลาส LT และ HL ในสมการ (3.4) หรือสมการ (3.8) พบว่า TAP k แต่ละโหนดจะมี $\frac{\omega^{LT}}{\omega^{HL}} = \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\lambda_i^{HL}(k)} = \gamma c_i(k)$ กล่าวโดยสรุปคือถ้าหาก $c_i(k)$ มีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของปริมาณทราฟฟิกระหว่างผู้ใช้คลาส LT และ HL มีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้อัตราส่วน γ ที่ทำให้ $EBP^{HL} = EBP^{LT}$ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

2. $EBP^{HL} = EBP^{LL}$ และ $EBP^{HT} = EBP^{LT}$

เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จำนวนเกตเวย์เท่ากันจะมี $EBP^{HL} = EBP^{LL}$ และ $EBP^{HT} = EBP^{LT}$ เมื่อ γ มีค่าเท่ากับ 10 เท่ากันทุกขนาดของโครงข่าย เนื่องจากการกำหนดอัตราส่วนในสมการ (3.4) จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า $c_i(k)$ ที่ TAP k แต่ละโหนด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดและจำนวนเกตเวย์จึงไม่มีผลต่อการกำหนดการแพ็กเก็ตของผู้ใช้ทุกคลาสในโครงข่าย โดยที่ TAP k แต่ละโหนดจะมีค่า $b_{i,j}^{LL}(k) = b_{i,j}^{HL}(k)$ และ $b_{i,j}^{LT}(k) = b_{i,j}^{HT}(k)$ ก็ต่อเมื่อ $\frac{\omega^{LL}}{\omega^{HL}} = \frac{\omega^{LT}}{\omega^{HT}} = \frac{\lambda_i^{LL}(k)}{\lambda_i^{HL}(k)} = \frac{\lambda_i^{LT}(k)}{\lambda_i^{HT}(k)} = \gamma$ โดยในการทดลองนี้กำหนดอัตราส่วน $\frac{\lambda_i^{LL}(k)}{\lambda_i^{HL}(k)} = \frac{0.01}{0.001} = 10$ เท่า การที่ TAP k ทุกโหนดซึ่งอยู่บนโครงสร้างทรีเดียวกันมีค่า $b_{i,j}^{LL}(k) = b_{i,j}^{HL}(k)$ และ $b_{i,j}^{LT}(k) = b_{i,j}^{HT}(k)$ เหมือนกันทุกโหนด การหาค่า EBP^s ในสมการ (3.15) ซึ่งคิดรวมจากทุก TAP k บนโครงสร้างทรีเดียวกัน จึงทำให้ $EBP^{HL} = EBP^{LL}$ และ $EBP^{HT} = EBP^{LT}$ ที่ $\gamma = 10$ ด้วยเหมือนกัน

3. $EBP^{HT} = EBP^{LL}$

เมื่อโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จำนวนเกตเวย์เท่ากันจะมีค่า γ ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากจำนวน TAP ในโครงข่ายมีมากขึ้นทำให้ปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส LL เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส HT เพิ่มขึ้นเช่นกันเนื่องจากจำนวนโหนดที่ต้องอาศัยการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP k แต่ละโหนดไปยังเกตเวย์ปลายทาง ($c_i(k)$) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่การประเมินค่า EBP^s ในสมการ (3.15) จะหาได้จากค่าเฉลี่ยของผลรวม $b_{i,j}^s(k)$ ที่ TAP k ทุกโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ซึ่งจากการกำหนดอัตราการกำหนดการแพ็กเก็ตของผู้ใช้คลาส LL และ HT ในสมการ (3.4) หรือสมการ (3.8) พบว่า

ที่ TAP k แต่ละโนดจะมี $\frac{\omega^{LL}}{\omega^{HT}} = \frac{\lambda_i^{LL}(k)}{\lambda_i^{HT}(k)} = \frac{\gamma}{c_i(k)}$ นั่นคือถ้า $c_i(k)$ มีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของปริมาณกราฟฟิกระหว่างผู้ใช้คลาส LL และ HT จะมีค่าลดลง ดังนั้นอัตราส่วน γ ที่ทำให้ $EBP^{LL} = EBP^{HT}$ จึงมีค่าลดลงเช่นกัน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกตเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายขนาด 3×3 3 เกตเวย์ในรูปแบบที่ 4.5 กับโครงข่ายขนาด 3×4 4 เกตเวย์ในรูปแบบที่ 4.9 พบว่าโครงข่ายทั้ง 2 ขนาดมีค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างของผู้ใช้ประเภทที่เข้ามาโดยตรงที่ TAP k แต่ละโนด (EBP^{HL} และ EBP^{LL}) ใกล้เคียงกันมาก เป็นเพราะว่าเมื่อฝ่ายป้องกันที่ต้องการค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างที่พึงได้ในโครงข่ายน้อยที่สุด จึงกำหนดการส่งออกกราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงที่ TAP k แต่ละโนดไปยังเกตเวย์แต่ละโนดด้วยปริมาณกราฟฟิกที่เท่ากันทุกเกตเวย์ ซึ่งในการทดลองนี้โครงข่ายขนาด 3×3 3 เกตเวย์ และโครงข่ายขนาด 3×4 4 เกตเวย์ จะมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนเกตเวย์ต่อจำนวน TAP ทั้งหมดในโครงข่ายเท่ากับ 3:6 และ 4:8 ซึ่งก็คืออัตราส่วน 1:2 เท่ากัน ดังนั้นเกตเวย์แต่ละโนดจะต้องรองรับปริมาณกราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงจาก TAP จำนวน 2 TAP เท่ากันทุกเกตเวย์ โดยที่โครงข่ายขนาด 3×3 3 เกตเวย์มีทอพอโลยีแบบกริดในลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำให้ TAP k แต่ละโนดสามารถส่งออกกราฟฟิกไปยังเกตเวย์โดยอาศัยการรีเลย์กราฟฟิกผ่านโนดข้างเคียงน้อยกว่าในโครงข่ายขนาด 3×4 4 เกตเวย์ ดังนั้นการที่ TAP k แต่ละโนดได้รับอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกต (ω^{HL} และ ω^{LL}) ที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้โครงข่ายขนาด 3×3 3 เกตเวย์มีค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างของผู้ใช้ประเภทที่เข้ามาที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง (EBP^{HL} และ EBP^{LL}) น้อยกว่าโครงข่ายขนาด 3×4 4 เกตเวย์ประมาณ 1.006 เท่า เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างของผู้ใช้ประเภทที่เข้ามาโดยตรงที่ TAP k แต่ละโนด (EBP^{HL} และ EBP^{LL}) ในโครงข่ายขนาด 3×4 3 เกตเวย์ดังรูปที่ 4.8 และโครงข่ายขนาด 4×4 4 เกตเวย์ดังรูปที่ 4.11 พบว่าถึงแม้โครงข่ายจะมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนเกตเวย์ต่อจำนวน TAP ทั้งหมดในโครงข่ายเท่ากับ 3:9 และ 4:12 ซึ่งก็คืออัตราส่วน 1:3 เท่ากัน ทำให้เกตเวย์แต่ละโนดจะต้องรองรับปริมาณกราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงจาก TAP จำนวน 3 TAP เท่ากันทุกเกตเวย์ แต่ในโครงข่ายขนาด 4×4 4 เกตเวย์จะมีค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างของผู้ใช้ประเภทที่เข้ามาที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง (EBP^{HL} และ EBP^{LL}) น้อยกว่าโครงข่ายขนาด 3×4 3 เกตเวย์ประมาณ 2.03 เท่า

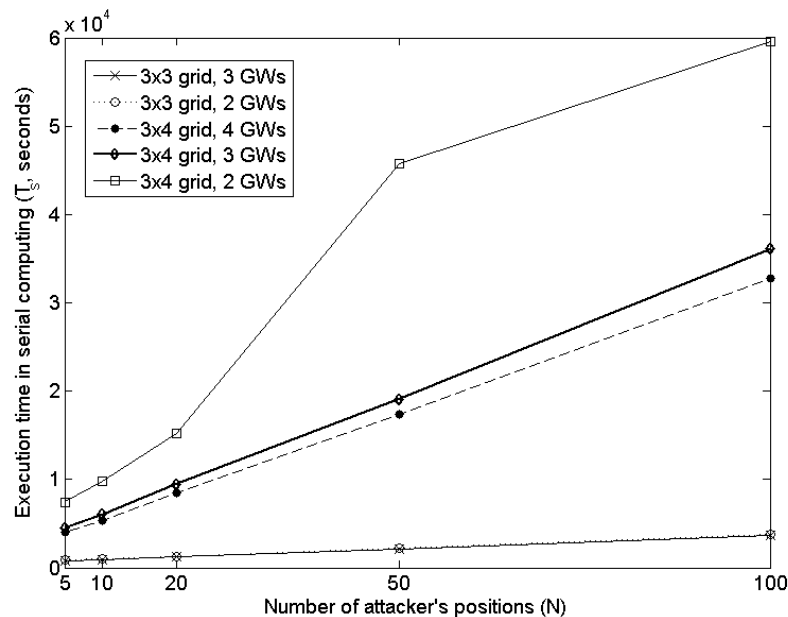
4.3 เปรียบเทียบเวลากระทำการของการคำนวณแบบอนุกรมและการคำนวณแบบขนาน

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำการคำนวณแบบขนานมาช่วยเร่งการคำนวณ เพื่อหาผลได้ผลเสียจากเกมในรูปแบบของตัวชี้วัด EBP^s ของผู้ใช้แต่ละคลาส ดังนั้นในการทดลองนี้จึงพิจารณาเวลากระทำการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณแบบอนุกรมและการคำนวณแบบขนาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผล 64-core ซึ่งหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยจะประกอบด้วยซีพียู 2.21 กิกะเฮิร์ตซ์ แรม 16 กิกะไบต์ และทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผล Quad-core Intel® Core™ i5 M450 ซีพียู 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ แรม 4 กิกะไบต์ โดยที่ค่าของตัวแปรถูกกำหนดดังตารางที่ 4.4 เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้แต่ละคลาส s (ω^s) ในการทดลองหัวข้อที่ 4.2 ด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ γ ตั้งแต่ 0 ถึง 20 โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ทีละ 0.2 นอกจากนี้ฝ่ายโจมตีจะทำการเปลี่ยนแปลงเซตกลยุทธ์ซึ่งเป็นจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด (N) ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ ตั้งแต่ 5 ตำแหน่ง 10 ตำแหน่ง 20 ตำแหน่ง 50 ตำแหน่งจนถึง 100 ตำแหน่ง เมื่อมีอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเก็ตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่ TAP k แต่ละโหนดโดยตรง ($\lambda_i^{HL}(k)$) เท่ากับ 0.001 แพ็กเก็ตต่อวินาที ส่วนอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเก็ตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ TAP k แต่ละโหนดโดยตรง ($\lambda_i^{LL}(k)$) เท่ากับ 0.01 แพ็กเก็ตต่อวินาที

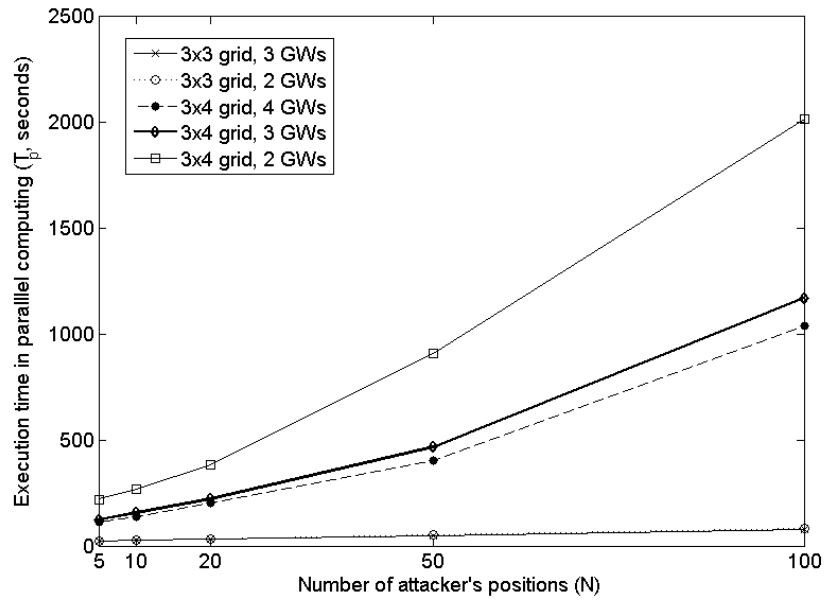
ตารางที่ 4.4: ค่าของตัวแปรในการเปรียบเทียบเวลากระทำการระหว่างการคำนวณแบบอนุกรมและการคำนวณแบบขนาน

| ตัวแปร | ค่า |
|---------------------|-------------------------------|
| $\lambda_i^{HL}(k)$ | 0.001 แพ็กเก็ตต่อวินาที |
| $\lambda_i^{LL}(k)$ | 0.01 แพ็กเก็ตต่อวินาที |
| N | 5, 10, 20, 50 และ 100 ตำแหน่ง |
| γ | [0:0.2:20] |

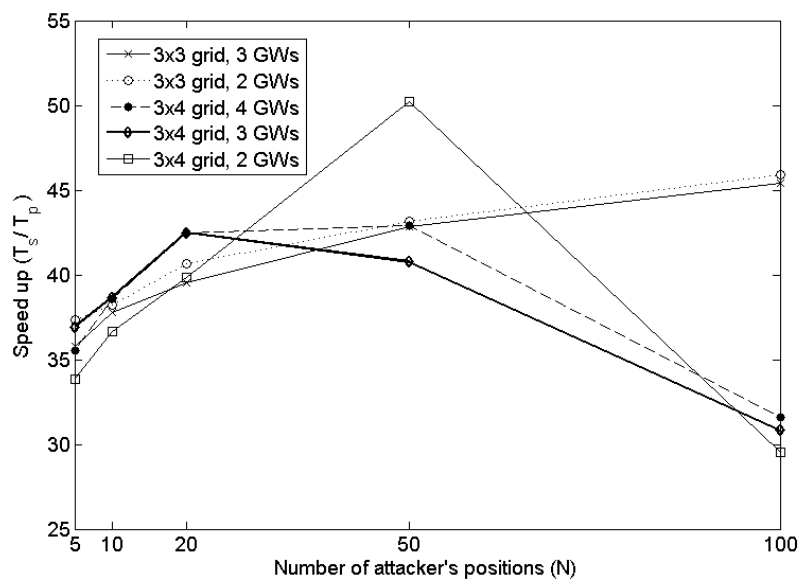


รูปที่ 4.12: เวลากระทำการของการคำนวณแบบอนุกรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์ในการเลือก N ของผู้เล่นฝ่ายโจมตี

วิเคราะห์เวลากระทำการในการคำนวณแบบอนุกรม (T_s) ในรูปที่ 4.12 เปรียบเทียบกับเวลากระทำการในการคำนวณแบบขนาน (T_p) ในรูปที่ 4.13 เมื่อ N เพิ่มขึ้นการคำนวณแบบอนุกรมและการคำนวณแบบขนานจะใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน โดยโครงข่ายขนาด 3x4 2 เกตเวย์จะใช้เวลากระทำการนานที่สุด ส่วนโครงข่ายขนาด 3x3 3 เกตเวย์จะใช้เวลาน้อยที่สุด เนื่องจากการประเมินตัวชี้วัด EBP^s จะขึ้นอยู่กับเซตกลยุทธ์ของฝ่ายป้องกันซึ่งเป็นจำนวนเส้นทาง



รูปที่ 4.13: เวลากระทำการของการคำนวณแบบขนานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์ในการเลือก N ของผู้เล่นฝ่ายโจมตี



รูปที่ 4.14: ประสิทธิภาพของการเร่งเวลาในการคำนวณในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ

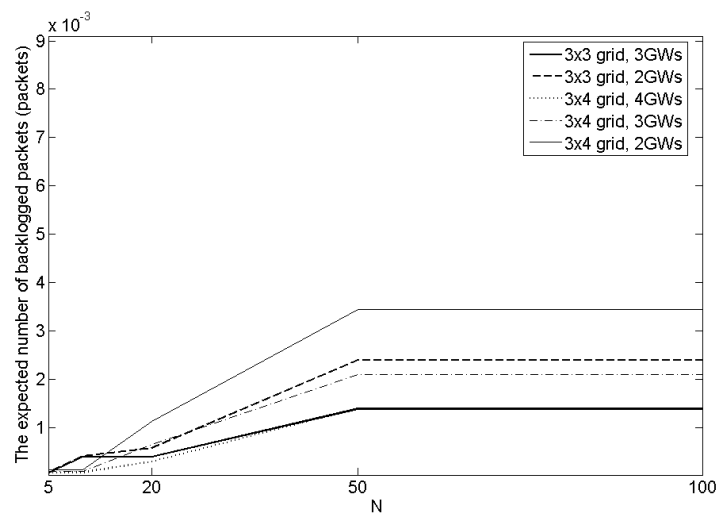
เฟ้นสุ่มแบบทรี ถ้าโครงข่ายมี TAP จำนวนมากก็จะส่งผลให้เส้นทางเฟ้นสุ่มรูปแบบทรีมีจำนวน มากจึงทำให้การประเมินหาค่า EBP^s ที่จุดสมดุลของแนชมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นและใช้เวลานานขึ้น นอกจากนี้โครงข่ายขนาด 3×3 2 เกตเวย์ กับโครงข่ายขนาด 3×3 3 เกตเวย์ยังใช้เวลากระทำการ ใกล้เคียงกันทั้งในการคำนวณแบบอนุกรมและการคำนวณแบบขนาน เพราะมีจำนวนเส้นทางเฟ้นสุ่ม แบบทรีแตกต่างกันไม่มากเท่ากับโครงข่ายขนาดใหญ่ การคำนวณหาค่า EBP^s จะมาจากค่าเฉลี่ย การถ่วงน้ำหนักด้วยความน่าจะเป็นที่ผู้เล่นทั้งสองฝ่ายตัดสินใจเลือกกลยุทธ์แต่ละกลยุทธ์ของตนเอง ในสมการ (3.15) เมื่อฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลงเซตกลยุทธ์ พบว่าเวลากระทำการในการคำนวณแบบ ขนานของโครงข่ายขนาด 3×4 ในรูปที่ 4.13 จะมีความลาดชันน้อยกว่าเวลากระทำการในการคำนวณ แบบอนุกรมในรูปที่ 4.12 เมื่อ N มีค่าตั้งแต่ 20 ตำแหน่งจนถึง 100 ตำแหน่ง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ในการคำนวณแบบขนานค่า $\gamma = [0 : 0.2 : 20]$ ทั้งหมด 101 ค่าจะถูกกำหนดให้เป็นงานที่ต้อง แจกแจงให้กับหน่วยประมวลผลที่มีอยู่ทั้งหมด 64 หน่วย ดังนั้นหน่วยประมวลผล 37 หน่วยแรกต้อง คำนวณ 2 รอบ ส่วนหน่วยประมวล 27 หน่วยที่เหลือจะทำการคำนวณเพียง 1 รอบเท่านั้น เมื่อ ขนาดของเมตริกซ์ผลได้ผลเสียมีขนาดใหญ่ขึ้นอันเนื่องมาจากจำนวนเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้การแบ่งกันทำงานสามารถช่วยเร่งการคำนวณให้เสร็จสมบูรณ์ของการคำนวณแบบขนานเร็ว ขึ้นกว่าการคำนวณแบบอนุกรมอย่างเห็นได้ชัดเจน จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง คอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์เปรียบเทียบกับเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา ดังรูปที่ 4.14 พบว่าการ คำนวณแบบขนานช่วยเร่งเวลา (speed up, $\frac{T_s}{T_p}$) เพิ่มขึ้น 35-40 เท่า ในกรณีที่เมตริกซ์ผลได้ ผลเสีย มีขนาดเล็กของโครงข่ายขนาด 3×3 2 เกตเวย์ และ 3 เกตเวย์ นอกจากนี้เมื่อโครงข่ายมีขนาด 3×4 4 เกตเวย์ ที่ N เท่ากับ 50 ตำแหน่ง พบว่าการคำนวณแบบขนานจะช่วยเร่งการคำนวณสูงที่สุด ถึง 50 เท่า แต่เมื่อ N มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 100 ตำแหน่งการคำนวณแบบขนานจะช่วยเร่งเวลาได้ลดลง เป็นเพราะโครงข่ายมีเส้นทางรับส่งข้อมูลหลายเส้นทางและจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวน สูงสุดมีมากขึ้น ในการประเมินหาค่า EBP^s จากการลู่เข้าด้วยการเล่นเกมหลาย ๆ รอบเพื่อปรับการ แจกแจงความน่าจะเป็นในการเลือกกลยุทธ์ของผู้เล่นแต่ละฝ่ายนั้นจึงใช้เวลานานขึ้นด้วย

4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด ของผู้เล่นฝ่ายโจมตี

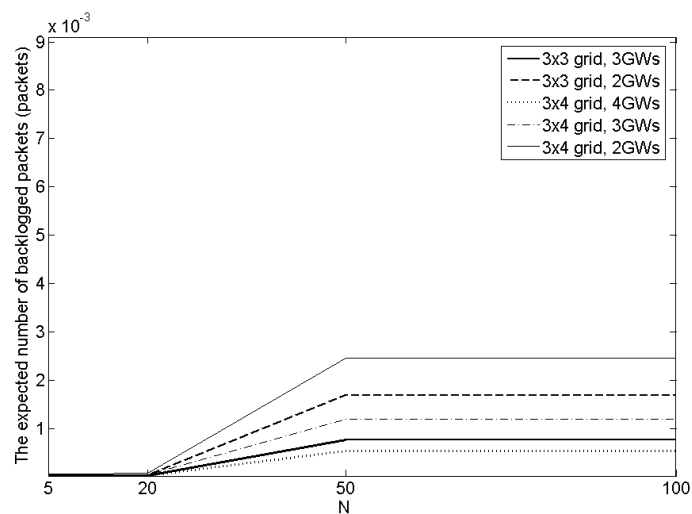
ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงการเลือกเซตกลยุทธ์ของผู้เล่นฝ่ายโจมตีซึ่ง เป็นจำนวนตำแหน่งที่สามารถส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด (N) ที่จะทำให้การหาผลได้ผลเสียของเกม ในรูปของตัวชี้วัด EBP^s ของผู้ใช้แต่ละคลาสมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้น การ ทดลองนี้ได้นำการคำนวณแบบขนานมาช่วยเร่งการคำนวณ และกำหนดค่าตัวแปรดังตารางที่ 4.5 โดย ทดสอบการเปลี่ยนแปลง N ตั้งแต่ 5 ตำแหน่ง 10 ตำแหน่ง 20 ตำแหน่ง 50 ตำแหน่งจนถึง 100 ตำแหน่ง ในกรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาดและจำนวนเกตเวย์แตกต่างกัน เมื่อมีอัตรา เฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง ($\lambda_i^{HL}(k)$) เท่า กับ 0.001 แพ็กเกตต่อวินาที ส่วนอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง ($\lambda_i^{LL}(k)$) เท่ากับ 0.01 แพ็กเกตต่อวินาที และจากการทดลองหัวข้อที่ 4.2 จึงกำหนดให้ค่า γ ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 3.8 ซึ่งทำให้ค่า EBP^{HL} ยังคงไม่เกิน EBP^{LT} ใน โครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3×4 4 เกตเวย์ และยังเป็นค่า γ ต่ำสุดที่ทำให้โครงข่ายไร้สายแบบเมช ทุกขนาดยังสามารถรักษาค่า EBP^{HL} ให้ไม่เกินค่า EBP^{LT} ได้ตามเงื่อนไขในการแบ่งลำดับความ สำคัญของผู้ใช้ในสมการ (3.3) อีกด้วย

ตารางที่ 4.5: ค่าของตัวแปรในการวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตี (N)

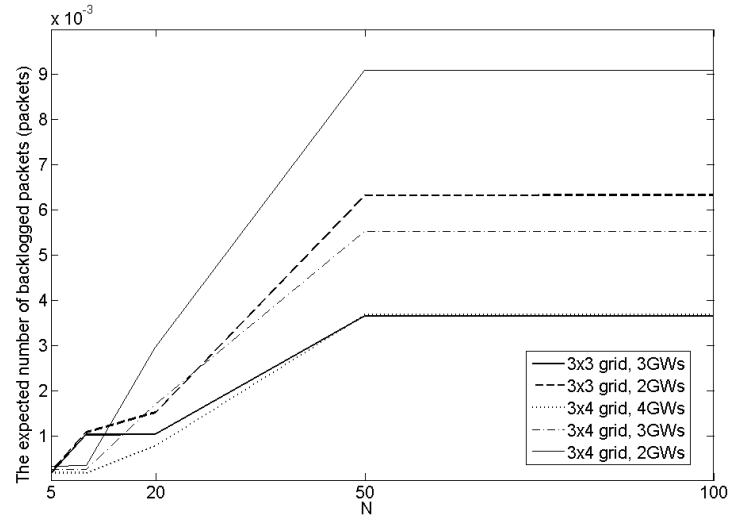
| ตัวแปร | ค่า |
|---------------------|-------------------------------|
| $\lambda_i^{HL}(k)$ | 0.001 แพ็กเกตต่อวินาที |
| $\lambda_i^{LL}(k)$ | 0.01 แพ็กเกตต่อวินาที |
| N | 5, 10, 20, 50 และ 100 ตำแหน่ง |
| γ | 3.8 |



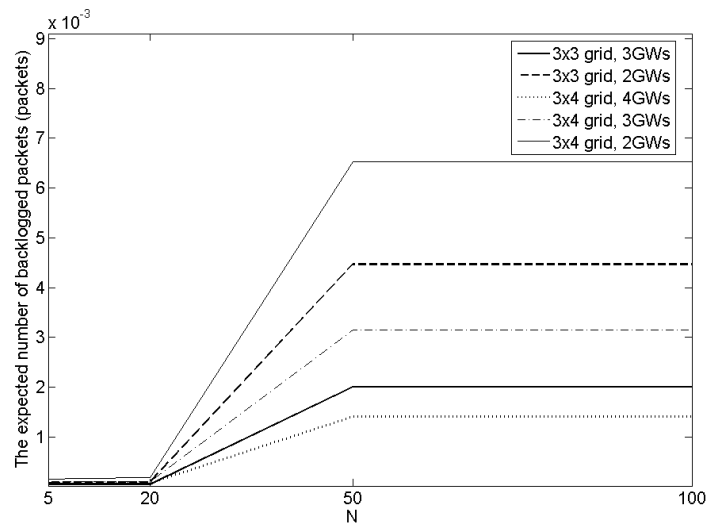
รูปที่ 4.15: EBP^{HL} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N



รูปที่ 4.16: EBP^{HT} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N



รูปที่ 4.17: EBP^{LL} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N



รูปที่ 4.18: EBP^{LT} ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลง N

ในรูปที่ 4.15-รูปที่ 4.18 แสดงค่า EBP^s ของผู้ใช้แต่ละคลาสในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3×3 3×4 ที่มี 2 เกตเวย์ 3 เกตเวย์ และ 4 เกตเวย์ เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์ด้วยการเลือกเซตของจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด พบว่าเมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนแปลงเซตของกลยุทธ์จาก $N = 50$ เป็น $N = 100$ พบว่าค่า EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสในโครงข่ายจะมีค่าเท่าเดิม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตำแหน่งที่นอกเหนือจาก 50 ตำแหน่งแรกที่ส่งสัญญาณรบกวนโครงข่ายสูงสุดเรียงตามลำดับแล้วจะไม่สามารถส่งผลกระทบต่อการรับส่งข้อมูลในโครงข่ายได้มากไปกว่านี้ ดังนั้นกลยุทธ์เด่นของผู้เล่นฝ่ายโจมตีคือเซตของจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด 50 ตำแหน่งซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่โครงข่ายโดนโจมตีแบบรุนแรงที่สุด และทำให้โครงข่ายได้รับความเสียหายมากที่สุดจนอาจจะไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้อีกต่อไป พิจารณาเพิ่มเติมเมื่อค่า N เพิ่มขึ้นทำให้ค่า EBP^s ของผู้ใช้ทุกคลาสในโครงข่ายแต่ละขนาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะมีโอกาสมากขึ้นในการคาดเดาเส้นทางการรับส่งข้อมูลของผู้เล่นฝ่ายป้องกัน ดังนั้น TAP k แต่ละโนดได้รับค่า $SINR_{i,j}(k)$ ลดลง และส่งผลให้ $\mu_{i,j}^s(k)$ มีค่าลดลงด้วย แพ็กเกตเฉลี่ยที่ตกค้างอยู่ที่ TAP k จึงมีค่ามากขึ้น โดยที่ EBP^{HL} ในรูปที่ 4.15 และ EBP^{LL} ในรูปที่ 4.17 ของโครงข่ายขนาด 3×3 เกตเวย์กับโครงข่ายขนาด 3×4 4 เกตเวย์จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ N มีค่าตั้งแต่ 50 ตำแหน่งจนถึง 100 ตำแหน่ง เนื่องจากโครงข่ายมีจำนวน TAP ใกล้เคียงกัน และปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส HL และ LL ที่ TAP k แต่ละโนดไม่ขึ้นอยู่กับค่า $c_i(k)$ ดังนั้นเมื่อผู้โจมตีเลือกกลยุทธ์เด่นที่ส่งผลกระทบร้ายแรงที่สุดต่อตัวชี้วัด EBP แล้วจึงทำให้โครงข่ายที่มีจำนวน TAP ใกล้เคียงกันมีค่า EBP^{HL} และ EBP^{LL} ใกล้เคียงกันด้วย นอกจากนี้ EBP^{HT} ในรูปที่ 4.16 และ EBP^{LT} ในรูปที่ 4.18 ของโครงข่ายทุกขนาดมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อ N มีค่าตั้งแต่ 5 ตำแหน่งจนถึง 20 ตำแหน่ง เนื่องจากปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้คลาส HT และ LT ที่ TAP k แต่ละโนดจะขึ้นอยู่กับค่า $c_i(k)$ เมื่อผู้โจมตีเลือก กลยุทธ์เป็นจำนวนตำแหน่งไม่กี่ตำแหน่งทำให้คาดเดาเส้นทางการรับส่งข้อมูลของฝ่ายป้องกันได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อ $\mu_{i,j}^{HT}(k)$ และ $\mu_{i,j}^{LT}(k)$ ไม่ว่าโครงข่ายจะมีขนาดเท่าใดก็ตาม EBP^{HT} และ EBP^{LT} ของโครงข่ายทุกขนาดจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

4.5 เปรียบเทียบผลกระทบต่อขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญและไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้

การทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบขอบเขตการทำงานที่เสถียรระหว่างโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญและโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ในงานวิจัย [7] ด้วยการกำหนดการแพ็กเกตสำหรับผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญแต่ละคลาส การทดลองนี้กำหนดค่าของตัวแปรดังตารางที่ 4.6 อัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงที่จุดเชื่อมต่อกับแต่ละโนดโดยตรง ($\lambda_i^{HL}(k)$) มีค่าตั้งแต่ 0.001 จนถึง 1 แพ็กเกตต่อวินาที และอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรง ($\lambda_i^{LL}(k)$) มีค่าตั้งแต่ 0.01 จนถึง 10 แพ็กเกตต่อวินาที ส่วนอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตที่ TAP k แต่ละโนดโดยตรงในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญเท่ากับอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงรวมกับอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำ ($\lambda_i(k) = \lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$) ซึ่งก็คือตั้งแต่ 0.011 จนถึง 11 แพ็กเกตต่อวินาที ผู้โจมตีเลือกจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด (N) 50 ตำแหน่งซึ่งเป็นกลยุทธ์เด่นของผู้เล่นฝ่ายโจมตีที่ได้จากการทดลองหัวข้อที่ 4.4 และค่า

γ สำหรับการกำหนดการแพ็กเกตในสมการ (3.4) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 20 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 จากการเปลี่ยนแปลงอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกตที่ TAP k แต่ละโนด ซึ่งค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูง ($EBP^H = EBP^{HT} + EBP^{HL}$) เกิดจากการส่งแพ็กเกตสำหรับปรับเปลี่ยนเส้นทางในการรับส่งข้อมูลของ TAP k แต่ละโนดเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณจากผู้โจมตี โดยสัญญาณรบกวนนั้นจะส่งผลกระทบต่อ $SINR_{i,j}(k)$ ที่ TAP k แต่ละโนดได้รับ ในกรณีที่ร้ายแรงที่สุดอาจทำให้ TAP k บางโนดไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้ตามปกติ เนื่องจากในสมการ (3.5) ถ้าค่า $SINR_{i,j}(k)$ ลดลงจนกระทั่งทำให้ $\mu_{i,j}^r(k) < \lambda_i^r(k)$ แล้วจะก่อให้เกิดแพ็กเกตตกค้างเป็นจำนวนอนันต์ กล่าวคือผู้ดูแลระบบไม่สามารถรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายไว้ได้ การทดลองนี้ได้แบ่งการพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้และไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x3 และกรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมี 3x4 ดังนี้

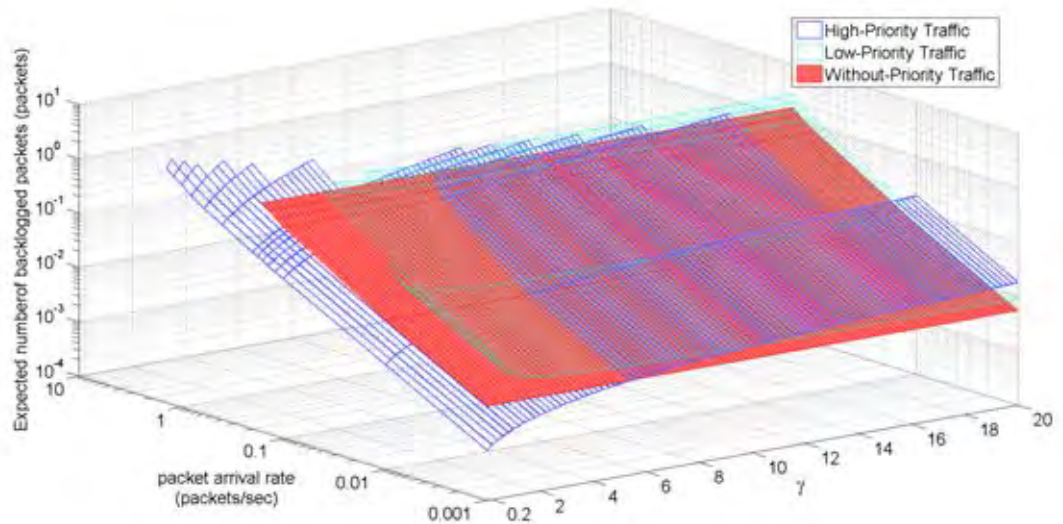
ตารางที่ 4.6: ค่าของตัวแปรในการทดลองเปรียบเทียบผลกระทบต่อขอบเขตการทำงานที่เสถียรระหว่างโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญและไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้

| ตัวแปร | ค่า |
|---------------------|-----------------------------|
| $\lambda_i^{HL}(k)$ | 0.001 - 1 แพ็กเกตต่อวินาที |
| $\lambda_i^{LL}(k)$ | 0.01 - 10 แพ็กเกตต่อวินาที |
| $\lambda_i(k)$ | 0.011 - 11 แพ็กเกตต่อวินาที |
| N | 50 ตำแหน่ง |
| γ | 0:0.2:20 |

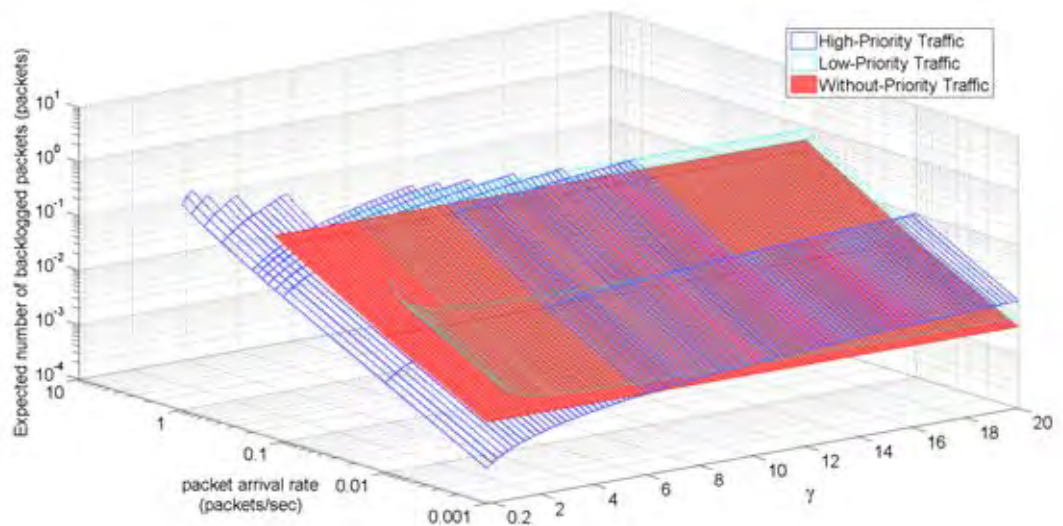
4.5.1 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3x3

พิจารณากรณีโครงข่ายมีขนาด 3x3 2 เกตเวย์ และ 3 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีเลือกกลยุทธ์เด่นซึ่งเป็นจำนวนตำแหน่งส่งสัญญาณรุนแรงที่สุด 50 ตำแหน่ง และเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดกำหนดการแพ็กเกตด้วยพารามิเตอร์ γ ในสมการ (3.4) รวมถึงเปลี่ยนแปลงอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกต $\lambda_i^{HL}(k)$ และ $\lambda_i^{LL}(k)$ ที่ TAP k แต่ละโนด ในรูปที่ 4.19 แสดงขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x3 2 เกตเวย์ จากกราฟแกน y เป็นค่าของ $\lambda_i^{HL}(k)$ และที่จุดทำงานเดียวกัน $\lambda_i^{LL}(k) = 10\lambda_i^{HL}(k)$ ส่วน $\lambda_i(k)$ จะมีค่าเท่ากับ $\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$ กราฟสีแดงคือค่า EBP ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดย $\lambda_i(k)$ สูงสุดที่ TAP k แต่ละโนดสามารถให้บริการได้เท่ากับ 1.76 แพ็กเกตต่อวินาที ($\lambda_i^{HL}(k) = 0.16$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 1.6$ แพ็กเกตต่อวินาที) ซึ่งให้ค่า EBP มากที่สุดในโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญ (EBP_{max}) เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟสีน้ำเงินซึ่งคือค่า EBP^H ของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงเพื่อประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายจากความสามารถในการรับส่งข้อมูลของผู้ดูแลระบบ พบว่าเมื่อมี $\lambda_i^{HL}(k)$ เท่ากับ 0.16 แพ็กเกตต่อวินาทีจะให้ค่า EBP^H เท่ากับค่า EBP_{max} ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ซึ่งที่จุด $EBP^H = EBP_{max}$ โครงข่ายจะกำหนดอัตราส่วน γ เท่ากับ 6.4 สำหรับการกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้แต่ละคลาสในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดย

ที่การกำหนดอัตราส่วน $\gamma = 6.4$ ทำให้ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการ $\lambda_i^{HL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 0.2 แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 1.6 แพ็กเกตต่อวินาที ดังนั้นปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่รองรับได้ที่ TAP k แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด $3 \times 3 \times 2$ เกตเวย์ที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ($\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$) มีค่าเท่ากับ 1.8 แพ็กเกตต่อวินาที



รูปที่ 4.19: ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด $3 \times 3 \times 2$ เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$



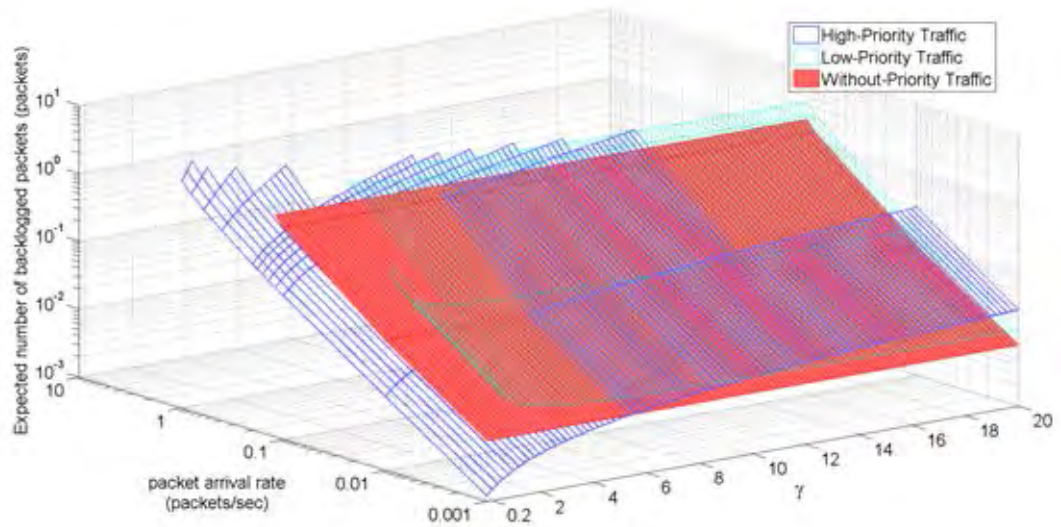
รูปที่ 4.20: ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด $3 \times 3 \times 3$ เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$

ในรูปที่ 4.20 แสดงขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3×3 3 เกตเวย์ จากกราฟ แกน y เป็นค่าของ $\lambda_i^{HL}(k)$ และที่จุดทำงานเดียวกัน $\lambda_i^{LL}(k) = 10\lambda_i^{HL}(k)$ ส่วน $\lambda_i(k)$ จะมีค่าเท่ากับ $\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$ กราฟสีแดงคือค่า EBP ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดย $\lambda_i(k)$ สูงสุดที่ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการได้เท่ากับ 1.32 แพ็กเกตต่อวินาที ($\lambda_i^{HL}(k) = 0.12$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 1.2$ แพ็กเกตต่อวินาที) ซึ่งให้ค่า EBP มากที่สุดในโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ (EBP_{max}) เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟสีน้ำเงินซึ่งคือค่า EBP^H ของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงเพื่อประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายจากความสามารถในการรับส่งข้อมูลของผู้ดูแลระบบ พบว่าเมื่อมี $\lambda_i^{HL}(k)$ เท่ากับ 0.12 แพ็กเกตต่อวินาทีจะให้ค่า EBP^H เท่ากับค่า EBP_{max} ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ซึ่งที่จุด $EBP^H = EBP_{max}$ โครงข่ายจะกำหนดอัตราส่วน γ เท่ากับ 6.4 สำหรับการจำกัดการแพ็กเกตของผู้ใช้แต่ละคลาสในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดยที่การกำหนดอัตราส่วน $\gamma = 6.4$ ทำให้ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการ $\lambda_i^{HL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 0.18 แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 1.2 แพ็กเกตต่อวินาที ดังนั้นปริมาณทราฟฟิกสูงที่สุดที่รองรับได้ที่ TAP k แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3×3 3 เกตเวย์ที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ($\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$) มีค่าเท่ากับ 1.38 แพ็กเกตต่อวินาที

4.5.2 กรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาด 3×4

พิจารณากรณีโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 3×4 ที่มีจำนวนเกตเวย์ 2 เกตเวย์ 3 เกตเวย์ และ 4 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีเลือกกลยุทธ์เด่นซึ่งเป็นจำนวนตำแหน่งส่งสัญญาณรุนแรงที่สุด 50 ตำแหน่ง และเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการจำกัดการแพ็กเกตในสมการ (3.4) ด้วยค่า γ รวมถึงเปลี่ยนแปลงอัตราเฉลี่ยการเข้ามาของแพ็กเกต $\lambda_i^{HL}(k)$ และ $\lambda_i^{LL}(k)$ ที่ TAP k แต่ละโหนดในรูปที่ 4.21 แสดงขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3×4 2 เกตเวย์ จากกราฟแกน y เป็นค่าของ $\lambda_i^{HL}(k)$ และที่จุดทำงานเดียวกัน $\lambda_i^{LL}(k) = 10\lambda_i^{HL}(k)$ ส่วน $\lambda_i(k)$ จะมีค่าเท่ากับ $\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$ กราฟสีแดงคือค่า EBP ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดย $\lambda_i(k)$ สูงสุดที่ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการได้เท่ากับ 1.32 แพ็กเกตต่อวินาที ($\lambda_i^{HL}(k) = 0.12$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 1.2$ แพ็กเกตต่อวินาที) ซึ่งให้ค่า EBP มากที่สุดในโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ (EBP_{max}) เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟสีน้ำเงินซึ่งคือค่า EBP^H ของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงเพื่อประเมินสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายจากความสามารถในการรับส่งข้อมูลของผู้ดูแลระบบ พบว่าเมื่อมี $\lambda_i^{HL}(k)$ เท่ากับ 0.12 แพ็กเกตต่อวินาทีจะให้ค่า EBP^H เท่ากับค่า EBP_{max} ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ซึ่งที่จุด $EBP^H = EBP_{max}$ โครงข่ายจะกำหนดอัตราส่วน γ เท่ากับ 6.4 สำหรับการจำกัดการแพ็กเกตของผู้ใช้แต่ละคลาสในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดยที่การกำหนดอัตราส่วน $\gamma = 6.4$ ทำให้ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการ $\lambda_i^{HL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 0.18 แพ็กเกตต่อวินาที $\lambda_i^{LL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 1.2 แพ็กเกตต่อวินาที ดังนั้นปริมาณทราฟฟิกสูงที่สุดที่รองรับได้ที่ TAP k แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3×4 2 เกตเวย์ที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ($\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$) มีค่าเท่ากับ 1.38 แพ็กเกตต่อวินาที

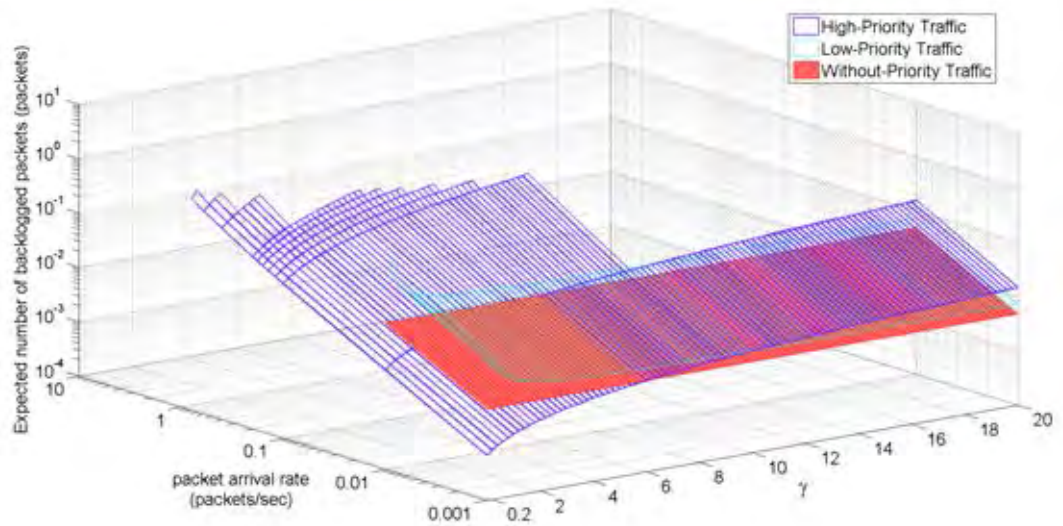
ในรูปที่ 4.22 แสดงขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3×4 3 เกตเวย์ จากกราฟ แกน y เป็นค่าของ $\lambda_i^{HL}(k)$ และที่จุดทำงานเดียวกัน $\lambda_i^{LL}(k) = 10\lambda_i^{HL}(k)$ ส่วน $\lambda_i(k)$ จะ



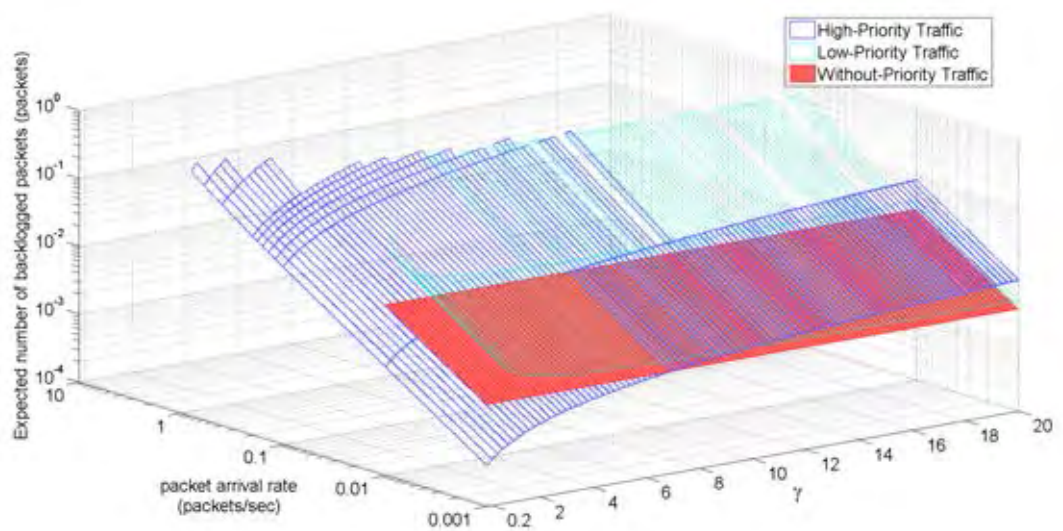
รูปที่ 4.21: ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x4 2 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$

มีค่าเท่ากับ $\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$ กราฟสีแดงคือค่า EBP ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดย $\lambda_i(k)$ สูงสุดที่ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการได้เท่ากับ 0.11 แพ็กเกตต่อวินาที ($\lambda_i^{HL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.1$ แพ็กเกตต่อวินาที) ซึ่งให้ค่า EBP มากที่สุดในโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญ (EBP_{max}) เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟสีน้ำเงินซึ่งคือค่า EBP^H ของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงเพื่อประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายจากความสามารถในการรับส่งข้อมูลของผู้ดูแลระบบ พบว่าเมื่อมี $\lambda_i^{HL}(k)$ เท่ากับ 0.01 แพ็กเกตต่อวินาทีจะให้ค่า EBP^H เท่ากับค่า EBP_{max} ของโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ซึ่งที่จุด $EBP^H = EBP_{max}$ โครงข่ายจะกำหนดอัตราส่วน γ เท่ากับ 6 สำหรับการกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้แต่ละคลาสในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดยที่การกำหนดอัตราส่วน $\gamma = 6$ ทำให้ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการ $\lambda_i^{HL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 0.14 แพ็กเกตต่อวินาที $\lambda_i^{LL}(k)$ สูงที่สุดได้เท่ากับ 0.1 แพ็กเกตต่อวินาที ดังนั้นปริมาณทราฟฟิกสูงที่สุดที่รองรับได้ที่ TAP k แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x4 3 เกตเวย์ที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ($\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$) มีค่าเท่ากับ 0.24 แพ็กเกตต่อวินาที

ในรูปที่ 4.23 แสดงขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x4 4 เกตเวย์ จากกราฟแกน y เป็นค่าของ $\lambda_i^{HL}(k)$ และที่จุดทำงานเดียวกัน $\lambda_i^{LL}(k) = 10\lambda_i^{HL}(k)$ ส่วน $\lambda_i(k)$ จะมีค่าเท่ากับ $\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$ กราฟสีแดงคือค่า EBP ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดย $\lambda_i(k)$ สูงสุดที่ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการได้เท่ากับ 0.11 แพ็กเกตต่อวินาที ($\lambda_i^{HL}(k) = 0.01$ แพ็กเกตต่อวินาที และ $\lambda_i^{LL}(k) = 0.1$ แพ็กเกตต่อวินาที) ซึ่งให้ค่า EBP มากที่สุดในโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญ (EBP_{max}) เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟสีน้ำเงินซึ่งคือค่า EBP^H ของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงเพื่อประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายจากความสามารถในการรับส่งข้อมูลของผู้ดูแลระบบ พบว่าเมื่อมี $\lambda_i^{HL}(k)$ เท่ากับ 0.01 แพ็กเกตต่อวินาทีจะให้ค่า EBP^H เท่ากับค่า EBP_{max} ของโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ซึ่งที่จุด $EBP^H = EBP_{max}$ โครงข่ายจะกำหนดอัตราส่วน γ เท่ากับ 6.8 สำหรับ



รูปที่ 4.22: ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x3 3 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$



รูปที่ 4.23: ขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายขนาด 3x4 4 เกตเวย์ เมื่อผู้โจมตีใช้ค่า $N = 50$

การกำหนดการแพ็กเกตของผู้ใช้แต่ละคลาสในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดยที่การกำหนดอัตราส่วน $\gamma = 6.8$ ทำให้ TAP k แต่ละโหนดสามารถให้บริการ $\lambda_i^{HL}(k)$ สูงที่สุดเท่ากับ 0.14 แพ็กเกตต่อวินาที $\lambda_i^{LL}(k)$ สูงที่สุดเท่ากับ 1 แพ็กเกตต่อวินาที ดังนั้นปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่รองรับได้ที่ TAP k แต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาด 3x4 4 เกตเวย์ที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ($\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$) มีค่าเท่ากับ 1.14 แพ็กเกตต่อวินาที

ตารางที่ 4.7: การเปรียบเทียบปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่รองรับได้ในโครงข่ายขนาดต่าง ๆ

| ขนาดโครงข่าย | $\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)$ (แพ็กเกตต่อวินาที) | $\lambda_i(k)$ (แพ็กเกตต่อวินาที) | $\frac{\lambda_i^{HL}(k) + \lambda_i^{LL}(k)}{\lambda_i(k)}$ |
|---------------|---|--------------------------------------|--|
| 3x3 2 เกตเวย์ | 1.8 | 1.76 | 1.023 |
| 3x3 3 เกตเวย์ | 1.38 | 1.32 | 1.045 |
| 3x4 2 เกตเวย์ | 1.38 | 1.32 | 1.045 |
| 3x4 3 เกตเวย์ | 0.24 | 0.11 | 2.182 |
| 3x4 4 เกตเวย์ | 1.14 | 0.11 | 10.364 |

จากผลการทดลองหัวข้อที่ 4.5.1 และหัวข้อที่ 4.5.2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ และมีการกำหนดการแพ็กเกตที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานเข้ามาในโครงข่ายตามลำดับความสำคัญ จะช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายได้ดีกว่า พิจารณาจากปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่รองรับได้ ($\lambda_i^H(k) + \lambda_i^L(k)$) ที่ TAP k แต่ละโหนดในโครงข่ายที่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ซึ่งมีปริมาณมากกว่า $\lambda_i(k)$ สูงสุดที่รองรับได้ในโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ ในกรณีที่ผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูงได้รับอัตราการกำหนดการแพ็กเกตที่เหมาะสมจะทำให้โครงข่ายสามารถรับส่งข้อมูลต่อไปได้เมื่อถูกโจมตีด้วยการปรับเปลี่ยนเส้นทางในการรับส่งข้อมูล เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นการกำหนดการแพ็กเกตจะช่วยให้โครงข่ายมีขอบเขตการทำงานที่เสถียรยาวนานขึ้น ถ้าหากโครงข่ายมีจำนวนเกตเวย์เท่ากันและโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้มีจำนวน TAP เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจำนวนโหนดที่ต้องการรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP k แต่ละโหนดจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งถ้าแพ็กเกตของผู้ใช้ทั้งหมดในโครงข่ายได้รับอัตราการส่งออกแพ็กเกตเท่ากันจะยิ่งทำให้แพ็กเกตสำคัญบางแพ็กเกตที่ใช้ในการปรับแก้คุณสมบัติของโครงข่ายโดยผู้ดูแลระบบเกิดสูญหายระหว่างทางจนทำให้โครงข่ายไม่สามารถรับส่งข้อมูลของผู้ใช้ทั่วไปได้ตามปกติ นอกจากนี้ยังทำให้แพ็กเกตของผู้ใช้ทั่วไปไม่สามารถส่งไปถึงปลายทางได้อีกเลย และจากตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่รองรับได้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชขนาดต่าง ๆ พบว่าโครงข่ายที่มี 2 เกตเวย์จะสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้สูงสุดแต่มีขอบเขตการทำงานที่เสถียรต่ำสุดเนื่องจากเป็นโครงข่ายที่มีจำนวน TAP มากที่สุด ผู้โจมตีจะสามารถคาดเดาเส้นทางในการรับส่งข้อมูลได้ง่ายที่สุดด้วยการโจมตีใกล้กับเกตเวย์ใดเกตเวย์หนึ่งที่มีอยู่ในโครงข่าย จึงทำให้เหลือเกตเวย์สำหรับส่งข้อมูลออกจากโครงข่ายเพียงหนึ่งเกตเวย์เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้แล้ว การกำหนดการแพ็กเกตจะช่วยส่งผลให้โครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกได้มากกว่า 1.023 เท่าในโครงข่ายขนาด 3x3 2 เกตเวย์ดังรูปที่ 4.19 และ 1.045 เท่าในโครงข่ายขนาด 3x4 2 เกตเวย์ดังรูปที่ 4.21 ส่วนโครงข่ายที่มี 4 เกตเวย์นั้น การกำหนดการแพ็กเกตจะช่วยให้โครงข่ายมีขอบเขตการทำงานที่เสถียรสูงสุด โดยที่โครงข่ายจะสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้มากกว่าโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความ

สำคัญของผู้ใช้ 10.364 เท่าในโครงข่ายขนาด $3 \times 4 \times 4$ เกตเวย์ดังรูปที่ 4.23 การที่มีเกตเวย์อยู่ที่ตำแหน่งมุมทั้ง 4 ด้านของโครงข่ายทำให้มีเส้นทางในการรับส่งข้อมูลที่สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนจากผู้โจมตีได้หลายเส้นทางมากกว่าโครงข่ายที่มี 2 เกตเวย์ และ 3 เกตเวย์ นอกจากนี้การที่จำนวนโหนดที่ต้องรีเลย์ทราฟฟิกผ่าน TAP k แต่ละโหนดมีค่าลดลง โครงข่ายที่มี 4 เกตเวย์จึงไม่จำเป็นต้องรองรับปริมาณทราฟฟิกได้มาก เพราะแพ็กเกตสำคัญของผู้ดูแลระบบที่ใช้สำหรับฟื้นฟูการใช้งานของโครงข่ายไร้สายแบบเมช ด้วยการปรับแก้เส้นทางในการรับส่งข้อมูลสามารถส่งออกไปยังเกตเวย์ปลายทางได้สำเร็จก่อนที่โครงข่ายได้รับผลกระทบรุนแรงจากการส่งสัญญาณรบกวนของฝ่ายโจมตี ผู้ดูแลระบบจึงสามารถกู้คืนแพ็กเกตที่สูญหายของผู้ใช้ทั่วไปเพิ่มขึ้นและส่งไปยังเส้นทางใหม่ที่ปลอดภัยได้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ในโครงข่ายไร้สายแบบเมช การรับส่งข้อมูลของผู้ใช้ในโครงข่ายจะอาศัยการรีเลย์แพ็กเก็ตผ่านจุดเชื่อมต่อผ่านไปยังเกตเวย์ในลักษณะช่วงเชื่อมต่อเดียว หรือ หลายช่วงเชื่อมต่อ แต่อย่างไรก็ตาม การสื่อสารผ่านตัวกลางไร้สายเสี่ยงต่อการรบกวนสัญญาณ ส่งผลให้จุดเชื่อมต่อผ่านแต่ละโหนดได้รับความจุแซนนอนที่มีค่าต่ำ และก่อให้เกิดแพ็กเก็ตตกค้างในโครงข่ายไร้สายแบบเมชเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แพ็กเก็ตของผู้ใช้ทุกประเภทต้องรอเข้ารับบริการที่แถวคอยเดียวกันก่อนจะส่งออกไปจากจุดเชื่อมต่อผ่านนั้น อาจส่งผลให้แพ็กเก็ตของผู้ดูแลระบบสำหรับการปรับแก้คุณสมบัติของโครงข่ายส่งไปถึงเกตเวย์ได้ล่าช้า และยังทำให้โครงข่ายมีขอบเขตการทำงานที่เสถียรลดต่ำลงอีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระเบียบวิธีการกำหนดการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ใช้นั้นฐานลำดับความสำคัญในโครงข่ายไร้สายแบบเมช โดยนำเสนอประเด็นต่าง ๆ ได้แก่

- การจำลองสถานการณ์ที่ฝ่ายป้องกันโครงข่ายจัดเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณของฝ่ายโจมตีเป็นเกมที่มีผู้เล่น 2 ฝ่ายแบบไม่ร่วมมือกัน และจำลองการเข้าออกของแพ็กเก็ตที่จุดเชื่อมต่อผ่านแต่ละโหนดด้วยระบบแถวคอยแบบยุติธรรมร่วมกับระบบแถวคอยขนาดไม่จำกัดแบบ M/M/1
- การประยุกต์การคำนวณแบบขนานมาใช้สามารถเร่งเวลาในการคำนวณเพื่อประเมินหาผลได้ผลเสียที่ดีที่สุดของผู้เล่น 2 ฝ่ายในรูปของค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างที่พึงได้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชผ่านตัวชี้วัด *EBP* นอกจากนี้การคำนวณแบบขนานยังสามารถนำมาช่วยในการคำนวณหากลยุทธ์เด่นของฝ่ายโจมตีได้ โดยคำนึงถึงตำแหน่งที่ส่งผลกระทบร้ายแรงที่สุดต่อโครงข่าย
- ด้วยแบบจำลองที่นำเสนอ ทำให้ระเบียบวิธีที่นำเสนอสามารถแยกพิจารณาผลกระทบต่อผู้ดูแลระบบ และผลกระทบต่อผู้ใช้ทั่วไปได้อย่างชัดเจน รวมถึงสามารถแยกพิจารณาแพ็กเก็ตที่เข้ามารีเลย์ผ่านจุดเชื่อมต่อผ่าน และแพ็กเก็ตที่เข้ามาที่จุดเชื่อมต่อผ่านโดยตรง รวมถึงสามารถประเมินขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายผ่านตัวชี้วัด *EBP* ที่นำเสนอได้อีกด้วย

ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงให้เห็นว่า

- ในกรณีที่ปริมาณเกตเวย์เท่ากัน เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นผลของความเสียหายจากการรบกวนสัญญาณมีความรุนแรงขึ้น เนื่องจากโครงข่ายจะมีจำนวนจุดเชื่อมต่อผ่านมากขึ้น ถ้าหากผู้ดูแลระบบต้องการจะส่งแพ็กเก็ตสำหรับปรับแก้เส้นทางในการรับส่งข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวน จึงทำให้มีปริมาณกราฟฟิกของผู้ดูแลระบบในโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นอัตราการกำหนดการแพ็กเก็ตของผู้ดูแลระบบในโครงข่ายขนาดใหญ่จะต้องมีค่ามากกว่าในโครงข่ายขนาดเล็ก ส่วนผู้ใช้ทั่วไปจะได้รับการถ่วงน้ำหนักอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเก็ตด้วยอัตราการกำหนดการแพ็กเก็ตที่เหมาะสมจากสัดส่วนความจุแซนนอนที่เหลืออยู่

- ในกรณีที่โครงข่ายมีขนาดเท่ากัน เมื่อมีเกตเวย์จำนวนเพิ่มขึ้นจะช่วยลดผลของความเสียหายจากการโจมตีได้ จากการจัดเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสม และการจัดกำหนดการแพ็กเกตที่เหมาะสม ทำให้ผู้ดูแลระบบสามารถรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายที่ไม่มีการแบ่งลำดับความสำคัญของผู้ใช้ โดยที่อัตราส่วนการจัดกำหนดการแพ็กเกตสำหรับผู้ใช้แต่ละประเภทที่กำหนดไว้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชต้องทำให้ตัวชี้วัด *EBP* ของผู้ดูแลระบบยังคงมีค่าไม่เกินตัวชี้วัด *EBP* ของผู้ใช้ทั่วไป ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อมีเกตเวย์อยู่ที่ตำแหน่งมุมทุกด้านของโครงข่ายที่มีทอพอโลยีแบบกริดด้วยแล้ว จะช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถกู้คืนแพ็กเกตที่สูญหายของผู้ใช้ทั่วไปได้เพิ่มขึ้นด้วย
- ในกรณีที่โครงข่ายไร้สายแบบเมชมีขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนเกตเวย์กับจำนวนจุดเชื่อมต่อผ่านทั้งหมดในโครงข่ายเท่ากัน อาจมีค่า *EBP* ของผู้ใช้ประเภทที่เข้ามาที่จุดเชื่อมต่อผ่านโดยตรงเท่ากันได้ จากการเลือกเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสมซึ่งทำให้สามารถส่งออกกราฟฟิกของผู้ใช้ประเภทที่เข้ามาที่จุดเชื่อมต่อผ่านแต่ละโนดโดยตรงออกไปได้เร็วที่สุด ด้วยการกำหนดให้เกตเวย์ทุกเกตเวย์รองรับปริมาณกราฟฟิกที่เข้ามาโดยตรงจากจุดเชื่อมต่อผ่านจำนวนเท่ากัน แต่โครงข่ายที่มีทอพอโลยีลักษณะสี่เหลี่ยมจตุรัสจะมีปริมาณกราฟฟิกที่ต้องอาศัยการรีเลย์ผ่านโนดข้างเคียงไปยังเกตเวย์น้อยกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นจึงทำให้เกิดค่า *EBP* ของผู้ใช้ประเภทที่เข้ามาที่จุดเชื่อมต่อผ่านโดยตรงน้อยกว่าด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

หัวข้อที่ควรศึกษาและวิจัยต่อไปในอนาคตคือ

1. การตรวจสอบการใช้งานของผู้ใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กำหนดให้มีแพ็กเกตของผู้ใช้ทั่วไปเข้ามาที่จุดเชื่อมต่อผ่านโดยตรงด้วยปริมาณเท่ากันทุกโนด แต่ในความเป็นจริงอาจมีช่วงเวลาจุดเชื่อมต่อผ่านไม่มีผู้ใช้ทั่วไปเข้ามาใช้งาน และไม่ต้องการค่าความจุแชนนอนใด ๆ ซึ่งถ้าหากนำส่วนนี้มาพิจารณา จะเป็นการเปิดโอกาสให้ผู้ดูแลระบบได้ใช้ความจุแชนนอนที่มีอยู่ได้เต็มที่ และสามารถรักษาขอบเขตการทำงานที่เสถียรของโครงข่ายได้มากขึ้น

2. การพิจารณาโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีหลายช่องสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างแบบจำลองเกมที่ใช้ช่องสัญญาณร่วมกันทั้งโครงข่ายเท่านั้น หากพัฒนาแบบจำลองเกมให้ผู้ดูแลระบบสามารถปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณได้ จะทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณในช่องสัญญาณเดียวกันกับผู้โจมตี โครงข่ายจึงมีความปลอดภัยยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีเส้นทางเฟ้นสุ่มที่หลากหลายขึ้นได้ โดยที่การติดต่อสื่อสารระหว่างโนดที่อยู่ติดกันนั้นต้องใช้ช่องสัญญาณร่วมกัน และจะทำให้การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มที่ได้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงมากขึ้น

3. การนำไปประยุกต์ใช้ในโครงข่ายที่มีการควบคุมจากศูนย์กลาง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างแบบจำลองเกมเพื่อหาการจัดกำหนดการแพ็กเกตสำหรับผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญที่เหมาะสม และการเลือกเส้นทางเฟ้นสุ่มแบบทรีที่เหมาะสม

เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณในกรณีที่ร้ายแรงที่สุด ซึ่งเป็นการกระจายการควบคุมของผู้ดูแลระบบที่จุดเชื่อมต่อผ่านแต่ละโหนด ถ้าหากนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายที่มีการควบคุมจากศูนย์กลางจะช่วยลดปริมาณทราฟฟิกของผู้ดูแลระบบ นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถจัดกำหนดการแพ็กเก็ตสำหรับผู้ที่ใช้เข้ามาขอใช้บริการโครงข่ายเพื่อลดความคับคั่งในโครงข่ายได้อีกด้วย

4. การพิจารณาผลกระทบของการประวิง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ผู้ดูแลระบบเป็นผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูง และมีการกระจายการควบคุมของผู้ดูแลระบบที่จุดเชื่อมต่อผ่านแต่ละโหนดจากการส่งแพ็กเก็ตปรับแก้เส้นทางในการรับส่งข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณ ดังนั้นหากมีการพิจารณาผลกระทบของการประวิงต่อทราฟฟิกของผู้ใช้ลำดับความสำคัญสูง ด้วยการจำลองการขาดหายของสัญญาณจากจุดเชื่อมต่อผ่านที่ได้รับค่า $SINR$ ต่ำกว่าที่กำหนด ซึ่งจะทำให้โครงข่ายไม่สามารถรับส่งข้อมูลผ่านจุดเชื่อมต่อผ่านนั้นได้ และเกิดการประวิงของทราฟฟิกของผู้ใช้ลำดับความสำคัญต่ำที่เข้ามาที่จุดเชื่อมต่อผ่านนั้น หลังจากนั้นถ้าหากจุดเชื่อมต่อผ่านนั้นกลับมาทำงานได้อีกครั้งจะสามารถส่งออกทราฟฟิกของผู้ใช้ลำดับความสำคัญที่มีความทนต่อการประวิงในเวลา ก่อนหน้านี้ออกไปได้อีกครั้งด้วย จึงทำให้แบบจำลองใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากยิ่งขึ้น ค่าที่ได้จากเกมจะเป็นความสำเร็จของการส่งทราฟฟิกไปยังเกตเวย์ปลายทางจากการประวิงผลกระทบของการประวิง

รายการอ้างอิง

- [1] Akyildiz, I. F., and Wang, X. A Survey on Wireless Mesh Networks. Communications Magazine, IEEE 43.9 (2005): 23-30.
- [2] Zhang, L., Wang, H., Xu, L., Xu, Z., and Li, C. Fault Tolerance and Transmission Delay in Wireless Mesh Networks. in Proc. of IEEE NSWCTC, 2009 : 193-196.
- [3] Redwan, H., and Kim, K. H. Survey of Security Requirements, Attacks and Network Integration. in Proc. of IEEE NTMS, 2008 : 1-5.
- [4] Bohacek, S., Hespanha, J. P., Lee, J., and Obraczka, K. Game Theoretic Stochastic Routing for Fault Tolerance and Security in Computer Networks. Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on 18.9(2007): 1227-1240.
- [5] Calinescu, G., Kapoor, S., Qiao, K., and Shin, J. Stochastic Strategic Routing Reduces Attack Effects. in Proc. of IEEE GLOBECOM, 2011 : 1-5.
- [6] บวรรัตน์ จินดาเลิศอุดมดี, การใช้ทฤษฎีเกมเพื่อวิเคราะห์การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีการรบกวนและการดักฟังสัญญาณ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [7] Benromarn, S., Komolkiti, P., and Aswakul, C. Game Theoretic Analysis of Jamming Attack in Wireless Network with Delay Tolerance. in Proc. of IEEE ICSEC, 2013 : 354-358.
- [8] Myerson, R. B., Game Theory. Harvard University Press, 2013.
- [9] Gabale, V., Raman, B., Dutta, P., and Kalyanraman, S. A Classification Framework for Scheduling Algorithms in Wireless Mesh Networks. Communications Surveys and Tutorials, IEEE 15.1 (2013): 199-222.
- [10] Gumel, M. I., Faruk, N., and Ayemi, A. A. Investigation and Addressing Unfairness in Wireless Mesh Networks. CIS Journal 2.10 (2011): 514-524.
- [11] Osborne, M. J., An Introduction to Game Theory, New York: Oxford University Press, 2004.
- [12] Pardalos, P. M., Migdalas, A., and Pitsoulis, L. (eds.). Pareto Optimality, Game Theory and Equilibria. Springer Science and Business Media 17 (2008).
- [13] Han, Z., Game Theory in Wireless and Communication Networks: Theory, Models, and Applications, Cambridge University Press, 2012.

- [14] Radi, M., Dezfouli, B., Bakar, K. A., and Lee, M. Multipath Routing in Wireless Sensor Networks: Survey and Research Challenges. Sensors 12.1 (2012) : 650-685.
- [15] Adan, I., and Resing, J., Queueing Theory (2002).
- [16] Lu, F., Voelker, G. M., and Snoeren, A. C. Weighted Fair Queuing with Differential Dropping. in Proc. of IEEE INFOCOM, 2012 : 2981-2985.
- [17] Kleinrock, L. On the modeling and analysis of computer networks. in Proc. of the IEEE 81.8 (1993) : 1179-1191.
- [18] MATLAB Distributed Computing Server [Online]. Available from : http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/mdce [2014, APRIL].

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการทำงานแบบขนานของโปรแกรม MATLAB บน เครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์เพื่อคำนวณหารูปแบบทรีที่ เป็นไปได้ทั้งหมดของโครงข่ายไร้สายแบบเมช

รายละเอียดการทำงาน of โปรแกรมมีดังนี้

- บรรทัดที่ 3-5: เริ่มบันทึกการแสดงผลบนหน้าจอหลังจากเริ่มคำสั่งนี้ โดยบันทึกข้อมูลลงใน text ไฟล์ชื่อ diary และแสดงวันที่ เวลาปัจจุบันบนหน้าจอแสดงผล ตามลำดับ
- บรรทัดที่ 6: ลบค่าตัวแปรทั้งหมดบนพื้นที่ทำงาน (work space)
- บรรทัดที่ 8: เริ่มจับเวลาการประมวลผล
- บรรทัดที่ 11: ประกาศตัวแปร use_cluster เท่ากับ 1 เมื่อต้องการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ ถ้าต้องการประมวลผลบนคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะให้กำหนดค่า use_cluster เท่ากับ 0
- บรรทัดที่ 14-18: ถ้าตัวแปร use_cluster เท่ากับ 1 จะทำการเพิ่มเส้นทางในการเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ ถ้าตัวแปร use_cluster เท่ากับค่าอื่น ๆ จะทำการเพิ่มเส้นทางในการเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
- บรรทัดที่ 21: ถ่ายข้อมูลจากไฟล์ชื่อ grid3x4_2GW.mat ซึ่งเก็บค่าของตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณไว้
- บรรทัดที่ 22: ประกาศตัวแปร num_core เป็นค่าของจำนวนผู้ทำงาน หรือ หน่วยประมวลผลที่มีอยู่สำหรับการคำนวณนี้
- บรรทัดที่ 23-27: ประกาศตัวแปร neighbor เป็นเซลล์อาร์เรย์ที่เก็บตำแหน่งโนดข้างเคียงที่อยู่ติดกันหนึ่งช่วงเชื่อมต่อของทุกโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ตัวแปร neighbor จึงมีขนาดเท่ากับ 1 x จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย และกำหนดตัวแปร n มีค่าเท่ากับขนาดหลักของเมตริกซ์ A โดยที่เมตริกซ์ A คือเมตริกซ์ที่เก็บค่าเป็น 0 และ 1 โดยถ้าโนดในแนวแถวอยู่ติดกับโนดในแนวหลักหนึ่งช่วงเชื่อมต่อที่ตำแหน่งนั้นจะเก็บค่าเป็น 1 แต่ถ้าไม่อยู่ติดกันจะเก็บค่าที่ตำแหน่งนั้นเป็น 0 เมตริกซ์ A มีขนาดเป็นจำนวนโนด x จำนวนโนด
- บรรทัดที่ 28-31: ประกาศตัวแปร neighborTAP เป็นเซลล์อาร์เรย์ซึ่งเก็บรวบรวมหมายเลขของโนดข้างเคียงของ TAP แต่ละโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช โดยที่ตัวแปร TAP จะเป็นอาร์เรย์ซึ่งเก็บหมายเลขโนดที่เป็น TAP ไว้โดยเก็บต่อกันในแนวหลัก
- บรรทัดที่ 32-36: กำหนดตัวแปร n เป็นค่าของจำนวน TAP ทั้งหมดในโครงข่าย และประกาศตัวแปร k มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 โดยที่ตัวแปร k จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ จากการวนรอบเท่ากับจำนวน n สุดท้ายตัวแปร k จะมีค่าเท่ากับรูปแบบเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้จากการที่โนดทุกโนดในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อถึงกันหมด

- บรรทัดที่ 37-43: ประกาศตัวแปร x เป็นเศษจากการหารของรูปแบบเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้หารด้วยจำนวนผู้ทำงานหรือหน่วยประมวลผลที่มีอยู่ และกำหนดตัวแปร n เป็นเวกเตอร์ซึ่งเก็บค่าของจำนวนงานที่แบ่งให้กับหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วย โดยที่ n จะมีขนาดเท่ากับ $1 \times \text{num_core}$ ถ้าไม่มีเศษจากการหาร x เท่ากับ 0 จำนวนงานที่ถูกแบ่งให้กับผู้ทำงาน หรือ หน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยจะมีจำนวนงานเท่ากัน แต่ถ้ามีเศษจากการหาร x ไม่เท่ากับ 0 จำนวนงานที่แบ่งให้กับหน่วยประมวลผล x หน่วยแรกจะมากกว่าหน่วยประมวลผลที่เหลืออยู่ 1 งาน
- บรรทัดที่ 44-51: ประกาศตัวแปร y มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 และประกาศตัวแปร p เป็นเวกเตอร์สำหรับเก็บค่าเริ่มต้นของรูปแบบเส้นทางที่เป็นไปได้ k ซึ่งจะกำหนดให้กับผู้ทำงานหรือหน่วยประมวลผลที่มีอยู่โดยการปรับค่าจากเวกเตอร์ n และตัวแปร y แล้วเก็บค่าของตัวแปร p ไว้ในตัวแปร n ใหม่ จากนั้นจะลบค่าตัวแปร p ทิ้ง
- บรรทัดที่ 56-62: ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับ 1 จะประกาศตัวแปร `jm` เป็นสตริงอาร์เรย์สำหรับเก็บข้อมูลของการค้นหาผู้จัดการงานบนโฮสต์ ในที่นี้ผู้จัดการงานชื่อ `ann` บน `url: abcd:ee.eng.chula.ac.th` ซึ่งเป็นชื่อโฮสต์ของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ แต่ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับค่าอื่น ๆ จะเป็นการค้นหาผู้จัดการงานแบบ `local` บนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
- บรรทัดที่ 64-70: ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับ 1 จะประกาศตัวแปร `job` เป็นการสร้างเส้นทางในการเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ แต่ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับค่าอื่น ๆ จะเป็นการสร้างเส้นทางเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
- บรรทัดที่ 72: เรียกฟังก์ชันที่ต้องใช้ในการประมวลผลทั้งหมดจากการสร้างเส้นทาง การเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ไว้ของตัวแปร `job` ได้แก่ ฟังก์ชัน `gentree2.m` เป็นฟังก์ชันหลักของโปรแกรมในการรับค่าเพื่อการคำนวณ ฟังก์ชัน `arr_comb2.m` เป็นฟังก์ชันสำหรับสร้างเมตริกซ์ที่เก็บตำแหน่งโนดที่อยู่ติดกันบนเส้นทางแต่ละเส้นทางโดยให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นรูปแบบทรี ฟังก์ชัน `TAP_path.m` เป็นฟังก์ชันสำหรับตรวจสอบรูปแบบทรีที่เป็นผลลัพธ์จากฟังก์ชัน `arr_comb2.m` ซึ่งต้องไม่มีการวนรอบซ้ำที่โนดเดิม และฟังก์ชัน `por.m` เป็นฟังก์ชันที่เก็บตำแหน่งการเชื่อมต่อของโนดแต่ละโนดตามลำดับบนเส้นทางรูปแบบทรี
- บรรทัดที่ 74: เมื่อผู้จัดการงานได้รับงานจากตัวแปร `job` จะแสดงสถานะปัจจุบันของการทำงานของผู้จัดการงาน ได้แก่ มีงานรอประมวลผลอยู่ จำนวนงานที่เสร็จสมบูรณ์ เป็นต้น
- บรรทัดที่ 76-80: สร้างภารกิจของการคำนวณแบบขนานด้วยการแบ่งงานให้แก่ผู้ทำงานหรือหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วย ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร n ด้วยการเรียกตัวแปร `job` และฟังก์ชันหลัก `gentree2` ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ 1 ตัวแปร และรับค่า ตัวแปร `TAP` ซึ่งเป็นหมายเลขของโนดที่เป็น `TAP` ตัวแปร `GW` ซึ่งเป็นหมายเลขของโนดที่เป็น `GW` ตัวแปร `A` เมตริกซ์ของโนดที่อยู่ติดกัน ตัวแปร `neighborTAP` เป็นหมายเลขของโนดข้างเคียงของ `TAP` แต่ละโนด และตัวแปร n ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายของจำนวนงานทั้งหมดที่หน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยต้องคำนวณ
- บรรทัดที่ 82: ผู้จัดการงานเริ่มประมวลผล

- บรรทัดที่ 84: รอกการประมวลจนกว่างานจะเสร็จสมบูรณ์โดยโปรแกรมนี้ตั้งเวลาในการรอสูงสุดเป็นอนันต์ ถ้าต้องการกำหนดเวลาเป็นตัวเลขจะต้องมีหน่วยเป็นวินาที
- บรรทัดที่ 86: ประกาศตัวแปร results เป็นเซลล์อาร์เรย์เพื่อเก็บค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันหลัก gentree2 ของหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วย
- บรรทัดที่ 88: ลบงานทิ้งเพื่อย้ายออกจากข้อมูลของผู้จัดการงาน
- บรรทัดที่ 90-93: ประกาศตัวแปร tree_pattern เป็นเซลล์อาร์เรย์ที่เก็บค่ารูปแบบทรีทั้งหมดที่เป็นไปได้โดยที่รูปแบบทรีนั้นต้องมีรากอยู่ที่เกตเวย์ และเชื่อมต่อกับ TAP ทุกโนดในโครงข่าย โดยจะใช้ฟังก์ชัน addIncolumn เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยมาเก็บต่อกันในตัวแปร tree_pattern
- บรรทัดที่ 97: บันทึกค่าของตัวแปรทั้งหมดบนพื้นที่ทำงานลงบนไฟล์ชื่อ 3x4_2GW_tree.mat
- บรรทัดที่ 100-103: หยุดจับเวลาในการประมวลผล แสดงวันที่และเวลาปัจจุบัน หยุดบันทึกการแสดงผลบนหน้าจอเก็บไว้ใน text ไฟล์ชื่อ diary

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % record screen display
3 diary on;
4 date
5 clock
6 clear all; %this clear is necessary to prevent job manager confusion with
7 %non-updated settings
8 tic
9 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10 %specify if the cluster is used and start measuring execution time
11 use_cluster = 1 %set to 1 if using cluster; otherwise, set to 0 to use PC
12 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
13 %add necessary paths
14 if use_cluster ,
15 addpath / state / partition1 / matlabworks / rwshared / ann / abc
16 else
17 addpath C:\Users\Shaoran2707\Dropbox\MATLAB\ann_proposal
18 end;
19 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20 %load inputs
21 load grid3x4_2GW.mat
22 num_core = 64;
23 neighbor = {} ; %neighbor is array containing one hop neighbor of all nodes
24 n = size(A,2);
25 for i = 1:n
26     neighbor{1,i} = find(A(i,:)) ;
27 end;

```

```

28 neighborTAP = {} ;
29 for i = 1:length(TAP)
30     neighborTAP{1,i} = neighbor{1,TAP(1,i)} ;
31 end;
32 n = size(TAP,2);
33 k = 1;
34 for i = 1:n
35     k = k*size(neighbor{1,i},2) ;
36 end;
37 x = mod(k,num_core);
38 n = [];
39 if(x == 0)
40     n = k/num_core*ones(1,num_core) ;
41 else n(1,1:x) = (floor(k/num_core)+1) ;
42     n(1,x+1:num_core) = (floor(k/num_core)) ;
43 end;
44 y = 0; p = [];
45 p(1,1) = n(1,1);
46 for i = 2:length(n)
47     y = p(1,i-1) ;
48     p(1,i) = n(1,i) + y;
49 end;
50 n = p;
51 clear p;
52 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
53 % start parallel job to evaluate function %
54 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
55 %% find a job manager
56 if use_cluster ,
57     jm = findResource ('scheduler', 'type', 'jobmanager', ...
58                       'name', 'ann', ...
59                       'LookupURL', 'abcd.ee.eng.chula.ac.th')
60 else
61     jm = findResource ('scheduler', 'type', 'local');
62 end;
63 %%create a job to hold a collection of tasks on job manager found
64 if use_cluster ,
65     job = createJob(jm, 'PathDependencies', ...
66                    {'/state/partition1/matlabworks/rwshared/ann/abc'});
67 else
68     job = createJob(jm, 'PathDependencies', ...
69                    {'C:\Users\Shaoran2707\Dropbox\MATLAB\ann_proposal'});
70 end;
71 %%create tasks to add to the job
72 set(job, 'FileDependencies', {'gentree2.m', 'arr_comb2.m', 'TAP_path.m', 'por.m'});
73 %check job status

```


ภาคผนวก ข

โปรแกรมการทำงานแบบขนานของโปรแกรม MATLAB บน เครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ย จำนวนแพ็กเก็ตตกค้างของผู้ใช้บนพื้นฐานลำดับความสำคัญ แต่ละคลาสจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัด กำหนดการแพ็กเก็ต

รายละเอียดการทำงานของโปรแกรมหาดังนี้

- บรรทัดที่ 3-5: เริ่มต้นที่การแสดงผลบนหน้าจอหลังจากเริ่มคำสั่งนี้ โดยบันทึกข้อมูลลงใน text ไฟล์ชื่อ diary และแสดงวันที่ เวลาปัจจุบันบนหน้าจอแสดงผล ตามลำดับ
- บรรทัดที่ 6: ลบค่าตัวแปรทั้งหมดบนพื้นที่ทำงาน (work space)
- บรรทัดที่ 8: เริ่มจับเวลาการประมวลผล
- บรรทัดที่ 11: ประกาศตัวแปร use_cluster เท่ากับ 1 เมื่อต้องการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ ถ้าต้องการประมวลผลบนคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะให้กำหนดค่า use_cluster เท่ากับ 0
- บรรทัดที่ 14-18: ถ้าตัวแปร use_cluster เท่ากับ 1 จะทำการเพิ่มเส้นทางในการเข้าถึงโฟลเดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ ถ้าตัวแปร use_cluster เท่ากับค่าอื่น ๆ จะทำการเพิ่มเส้นทางในการเข้าถึงโฟลเดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
- บรรทัดที่ 21: ถ่ายข้อมูลจากไฟล์ชื่อ grid3x4_2GW_tree.mat ซึ่งเก็บค่าของตัวแปรที่ต้องการใช้ในการคำนวณไว้
- บรรทัดที่ 22-26: ประกาศตัวแปร num_core เป็นค่าของจำนวนผู้ทำงาน หรือ หน่วยประมวลผลที่มีอยู่สำหรับการคำนวณนี้ ประกาศตัวแปร gamma เป็นเวกเตอร์ขนาด 1x101 ซึ่งบรรจุค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 20 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 ประกาศตัวแปร lambda_HL มีค่าเท่ากับ 0.001 ประกาศตัวแปร lambda_LL มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของตัวแปร lambda_HL และประกาศตัวแปร n1 เท่ากับความยาวของรูปแบบทรี หรือ จำนวนกลยุทธ์ของผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่ได้จากการคำนวณในภาคผนวก ก
- บรรทัดที่ 27: ประกาศตัวแปร k มีค่าเท่ากับความยาวของเวกเตอร์ gamma ซึ่งเท่ากับ 101
- บรรทัดที่ 28-34: ประกาศตัวแปร x เป็นเศษจากการหารของรูปแบบเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้หารด้วยจำนวนผู้ทำงานหรือหน่วยประมวลผลที่มีอยู่ และกำหนดตัวแปร n เป็นเวกเตอร์ซึ่งเก็บค่าของจำนวนงานที่แบ่งให้กับหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วย โดยที่ n จะมีขนาดเท่ากับ 1 x num_core ถ้าไม่มีเศษจากการหาร x เท่ากับ 0 จำนวนงานที่ถูกแบ่งให้กับผู้ทำงาน หรือ หน่วย

ประมวลผลแต่ละหน่วยจะมีจำนวนงานเท่ากัน แต่ถ้ามีเศษจากการหาร x ไม่เท่ากับ 0 จำนวนงานที่แบ่งให้กับหน่วยประมวลผล x หน่วยแรกจะมากกว่าหน่วยประมวลผลที่เหลืออยู่ 1 งาน

- บรรทัดที่ 35-42: ประกาศตัวแปร y มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 และประกาศตัวแปร p เป็นเวกเตอร์สำหรับเก็บค่าเริ่มต้นของรูปแบบเส้นทางที่เป็นไปได้ k ซึ่งจะกำหนดให้กับผู้ทำงานหรือหน่วยประมวลผลที่มีอยู่โดยการปรับค่าจากเวกเตอร์ n และตัวแปร y แล้วเก็บค่าของตัวแปร p ไว้ในตัวแปร n ใหม่ จากนั้นจะลบค่าตัวแปร p ทิ้ง
- บรรทัดที่ 47-54: ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับ 1 จะประกาศตัวแปร `job` เป็นสตริงอาเรย์ซึ่งเก็บข้อมูลของการค้นหาผู้จัดการงานบนโฮสต์ ในที่นี้ผู้จัดการงานชื่อ `ann` บน `url:abcd:ee.eng.chula.ac.th` ซึ่งเป็นชื่อโฮสต์ของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ แต่ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับค่าอื่น ๆ จะเป็นการค้นหาผู้จัดการงานแบบ `local` บนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
- บรรทัดที่ 56-61: ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับ 1 จะประกาศตัวแปร `job` เป็นการสร้างเส้นทางในการเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ แต่ถ้าตัวแปร `use_cluster` เท่ากับค่าอื่น ๆ จะเป็นการสร้างเส้นทางเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
- บรรทัดที่ 64-67: เรียกฟังก์ชันที่ต้องใช้ในการประมวลผลทั้งหมดจากการสร้างเส้นทาง การเข้าถึงไฟล์เดอร์ที่เก็บไฟล์ไว้ของตัวแปร `job` ได้แก่ ฟังก์ชัน `run_game.m` เป็นฟังก์ชันหลักของโปรแกรม ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชัน `sum_lambda_c.m` เป็นฟังก์ชันสำหรับหาค่า $c_i(k)$ จำนวนโนดข้างเคียงของ TAP k แต่ละโนดเมื่อผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกกลยุทธ์ i ฟังก์ชัน `service_rate2.m` เป็นฟังก์ชันในการหาอัตราเฉลี่ยการส่งแพ็กเก็ตซึ่งถูกกำหนดด้วยค่า `gamma` และฟังก์ชัน `run_mini_wmn.m`
ฟังก์ชัน `run_mini_wmn.m` เป็นฟังก์ชันในการหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างของผู้ใช้แต่ละคลาส s จากการเปลี่ยนแปลงค่า `gamma` ซึ่งภายในประกอบด้วยฟังก์ชัน `payoffhighlocal.m` ฟังก์ชัน `payoffhighrelay.m` ฟังก์ชัน `payofflowlocal.m` และฟังก์ชัน `payofflowrelay.m` ซึ่งเป็นฟังก์ชันสำหรับหาเมตริกซ์ผลได้ผลเสียของผู้ใช้แต่ละคลาส s และฟังก์ชัน `moMSA.m`
ฟังก์ชัน `moMSA.m` เป็นฟังก์ชันสำหรับกรรมวิธีการหาผลเฉลยจากเกมซึ่งภายในประกอบด้วยฟังก์ชัน `find_router_strategy.m` เป็นฟังก์ชันสำหรับหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดและความน่าจะเป็นที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันจะเลือกเส้นทางนั้น ฟังก์ชัน `find_attacker_strategy.m` เป็นฟังก์ชันสำหรับหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดและความน่าจะเป็นที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกตำแหน่งนั้น และฟังก์ชัน `find_EV.m` เป็นฟังก์ชันสำหรับคำนวณหาค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตตกค้างของผู้ใช้แต่ละคลาส s จากการถ่วงน้ำหนักของจำนวนแพ็กเก็ตเฉลี่ยตกค้างด้วยความน่าจะเป็นในการเลือกกลยุทธ์ทั้งหมดของผู้เล่นทั้ง 2 ฝ่าย
- บรรทัดที่ 68: เมื่อผู้จัดการงานได้รับงานจากตัวแปร `job` จะแสดงสถานะปัจจุบันของการทำงานของผู้จัดการงาน ได้แก่ มีงานรอประมวลผลอยู่ จำนวนงานที่เสร็จสมบูรณ์ เป็นต้น
- บรรทัดที่ 70-75: สร้างภารกิจของการคำนวณแบบขนานด้วยการแบ่งงานให้แก่ผู้ทำงานหรือหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วย ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร n ด้วยการเรียกตัวแปร `job` และฟังก์ชัน

หลัก run_game ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ 4 ตัวแปร และรับค่าตัวแปร TAP เป็นหมายเลขของโนดที่เป็น TAP ตัวแปร J เป็นจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณรบกวนสูงสุด ตัวแปร A เป็นเมตริกซ์ของโนดที่อยู่ติดกัน ตัวแปร Attack_position เป็นตำแหน่งของผู้เล่นฝ่ายโจมตีบนพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y) ตัวแปร Co เป็นพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y) ของแต่ละโนด ตัวแปร gamma ตัวแปร tree_pattern ซึ่งเก็บรูปแบบทรีทั้งหมด ตัวแปร n ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายของจำนวนงานทั้งหมดที่หน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยต้องคำนวณ ตัวแปร lambda_HL และตัวแปร lambda_LL

- บรรทัดที่ 77: ผู้จัดการงานเริ่มประมวลผล
- บรรทัดที่ 79: รอกการประมวลจนกว่างานจะเสร็จสมบูรณ์โดยโปรแกรมนี้ตั้งเวลาในการรอสูงสุดเป็นอนันต์ ถ้าต้องการกำหนดเวลาเป็นตัวเลขจะต้องมีหน่วยเป็นวินาที
- บรรทัดที่ 81: ประกาศตัวแปร results เป็นเซลล์อาร์เรย์เพื่อเก็บค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันหลัก gentree2 ของหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วย
- บรรทัดที่ 83: ลบงานทิ้งเพื่อย้ายออกจากข้อมูลของผู้จัดการงาน
- บรรทัดที่ 85-104: ประกาศตัวแปร EBP_HL_all EBP_HT_all EBP_LL_all และ EBP_LT_all เป็นเวกเตอร์ซึ่งเก็บค่าของค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเกตตกค้างของผู้ใช้แต่ละคลาส s จากการเปลี่ยนแปลงค่า gamma ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของหน่วยประมวลผลแต่ละหน่วยโดยจะเก็บค่าอยู่ในเวกเตอร์ EBP_HL_all EBP_HT_all EBP_LL_all และ EBP_LT_all ต่อกันในแนวหลัก
- บรรทัดที่ 108: บันทึกค่าของตัวแปรทั้งหมดบนพื้นที่ทำงานลงบนไฟล์ชื่อ 3x4_2GW_gamma.mat
- บรรทัดที่ 111-114: หยุดจับเวลาในการประมวลผล แสดงวันที่และเวลาปัจจุบัน หยุดบันทึกการแสดงผลบนหน้าจอเก็บไว้ใน text ไฟล์ชื่อ diary

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % record screen display
3 diary on; % don't forget to diary off and rename file diary at the end
4 date
5 clock
6 clear all; %this clear is necessary to prevent job manager confusion with
7 %non-updated settings
8 tic
9 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10 %specify if the cluster is used and start measuring execution time
11 use_cluster = 1 % set to 1 if using cluster; otherwise, set to 0 to use PC
12 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
13 %add necessary paths
14 if use_cluster,
15 addpath /state/partition1/matlabworks/rwshared/test
16 else

```

```

17 addpath C:\Users\Shaoran2707\Dropbox\MATLAB\ann_proposal
18 end;
19 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20 %load inputs
21 load 3x4_2GW_tree.mat
22 gamma = [0:0.2:20];
23 lambda_HL = 0.001;
24 lambda_LL = lambda_HL * 10;
25 n1 = length(tree_pattern);
26 num_core = 64;
27 k = length(gamma);
28 x = mod(k, num_core);
29 n = [];
30 if(x == 0)
31     n = k/num_core*ones(1, num_core) ;
32 else n(1,1:x) = (floor(k/num_core)+1) ;
33     n(1,x+1:num_core) = (floor(k/num_core)) ;
34 end;
35 y = 0; p = [];
36 p(1,1) = n(1,1);
37 for i = 2:length(n)
38     y = p(1,i-1) ;
39     p(1,i) = n(1,i) + y;
40 end;
41 n = p;
42 clear p;
43 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44 % start parallel job to evaluate function %
45 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
46 %%find a job manager
47 if use_cluster ,
48
49     jm = findResource ('scheduler', 'type', 'jobmanager', ...
50                       'name', 'ann', ...
51                       'LookupURL', 'abcd.ee.eng.chula.ac.th')
52 else
53     jm = findResource ('scheduler', 'type', 'local');
54 end;
55 %%create a job to hold a collection of tasks on job manager found
56 if use_cluster ,
57     job = createJob(jm, 'PathDependencies', ...
58                    {'/state/partition1/matlabworks/rwshared/test'});
59 else
60     job = createJob(jm, 'PathDependencies', ...
61                    {'C:\Users\Shaoran2707\Dropbox\MATLAB\ann_proposal'});
62 end;

```


ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

วชิรญา อาจแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีวิทยาในปี พ.ศ. 2549 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จนสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในปี พ.ศ. 2553 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มวิจัยโครงข่ายโทรคมนาคม และสารสนเทศ ปีการศึกษา 2556

บทความทางวิชาการจากวิทยานิพนธ์

[1] Artkaeo, V., Komolkiti, P., and Aswakul, C. Scheduling Rate Computing Parallelisation in WMN Routing Game with Signal Jammer and User Priority. in Proc. of International Conference on Electronics, Information and Communication (ICEIC 2016), 2016 : 338-341.