ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246150

การประยุกต์ทฤษฎีเกมในการวิเคราะห์ความปลอดภัยของการจัดเส้นทางแบบพื้นฐานในโครงข่ายไร้สายแบบเฉพาะที่มีสายอากาศระบุทิศทาง

นายภัทร บุญญกาญจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b0025617

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246150

การประยุกต์ทฤษฎีเกมในการวิเคราะห์ความปลอดภัยของการจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีสายอากาศระบุทิศทาง

นายภัทร บุญญกาญจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5270683721

Game Theoretical Application in Security Analysis of Stochastic Routing in Wireless Mesh Network with Directional Antenna

Mr.Pat Boonyakarn

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 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ทฤษฎีเกมในการวิเคราะห์ความปลอดภัยของการจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีสายอากาศระบุทิศทาง
โดย	นายภัทร บุญญกาญจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาวน์ดิศ อัศวกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาวน์ดิศ อัศวกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัสกา วิสุทธิวิเศษ)

ภัทร บุญญกาญจน์ : การประยุกต์ทฤษฎีเกมในการวิเคราะห์ความปลอดภัยของการจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีสายอากาศระบุทิศทาง (Game Theoretical Application in Security Analysis of Stochastic Routing in Wireless Mesh Network with Directional Antenna) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. เชาวน์ดิศ อัศวกุล, 53 หน้า.

246150

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอระเบียบวิธีการจัดหาเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มเพื่อป้องกันการดักฟังและส่งสัญญาณรบกวนข้อมูลในโครงข่ายไร้สายแบบเมชด้วยสายอากาศระบุทิศทางที่ใช้โมเดลแบบโคน โดยทฤษฎีเกมได้สามารถหารูปแบบเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าความคาดหวังของจำนวนเซสชั่นที่ปลอดภัย (expected number of secure sessions: ESS) สูงที่สุดภายใต้สถานการณ์ที่โครงข่ายถูกโจมตีอย่างร้ายแรงได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองเกมโครงข่ายไร้สายแบบเมชเป็นแบบเกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์ โดยผู้เล่นสองคนแบ่งเป็น ผู้เล่นฝ่ายป้องกันโครงข่ายและผู้เล่นฝ่ายที่มาโจมตีโครงข่าย ซึ่งผู้เล่นฝ่ายป้องกันทำหน้าที่เลือกรูปแบบการส่งข้อมูลแบบทรีด้วยความน่าจะเป็นค่าต่าง ๆ เพื่อให้ค่า ESS มีค่ามากที่สุด ในทางกลับกันผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกตำแหน่งในการโจมตีด้วยความน่าจะเป็นค่าต่าง ๆ เพื่อให้ค่า ESS ต่ำที่สุด จากการหาผลเฉลยทำให้ค่าของเกมนั้นสามารถการันตีจำนวนเซสชั่นที่ปลอดภัยเสมอได้ไม่ว่าผู้โจมตีจะโจมตีแบบใด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สายอากาศระบุทิศทางทำให้ค่า ESS สูงกว่าในกรณีที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางเสมอในแบบจำลองเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นการลดค่าบีมวิดท์ของสายอากาศระบุทิศทางในการดักฟังข้อมูลสามารถเพิ่มค่า ESS เฉพาะกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาลงเท่านั้นและโครงข่ายจะต้องมีขนาดไม่เล็กจนเกินไป ในทางกลับกันกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นถ้าต้องการจะเพิ่ม ESS จะต้องเพิ่มจำนวนเกตเวย์แทน และจากผลการทดลองของโครงข่ายสุ่มแสดงให้เห็นว่ากรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นนั้นจะถูกโจมตีได้ร้ายแรงกว่าฝั่งขาลง ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าชี้วัด ESS นี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่มีความทนทานต่อการถูกโจมตีได้ในอนาคต

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อนิสิต**	.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**	.....
ปีการศึกษา	2553		

5270683721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: WIRELESS MESH NETWORK (WMN)/ GAME THEORY/ STOCHASTIC ROUTING/ INTELLIGENT EAVESDROPPING AND JAMMING/ DIRECTIONAL ANTENNA/.

PAT BOONYAKARN : GAME THEORETICAL APPLICATION IN SECURITY ANALYSIS OF STOCHASTIC ROUTING IN WIRELESS MESH NETWORK WITH DIRECTIONAL ANTENNA . ADVISOR: ASST. PROF. CHAODIT ASWAKUL, Ph.D., 53 pp.

246150

This thesis is concerned with the framework for finding the optimal stochastic routing to defend intelligent eavesdropping and jamming attacks in the Wireless Mesh Network (WMN) with a cone-based, directional antenna. A game-theoretical model is used to find the best strategy to maximize the expected number of secure sessions (ESS) under the most severe circumstance. In particular, the WMN has been modeled by the two-person zero-sum game with two players, namely, a network defender and a network attacker. The defender tries to maximize ESS by assigning the best selection probabilities to the tree patterns for forwarding data to and from gateways. The attacker tries to minimize ESS by assigning the best selection probabilities to the positioning of attacker. In this regard, the obtained value of game represents the minimum guarantee on the number of secure sessions at the defender optimality in WMNs under any attacks. Numerical results show that using directional antenna can lead to higher ESS values when compared to the corresponding cases with only the omni-directional antenna capability. The enhancement of antenna directionality by decreasing the beamwidth can help improve ESS in the sufficiently large network case of downlink. On the contrary, in the case of uplink, the increasing number of gateways will add to the improvement of ESS. In addition, based on reported numerical results on both deterministic and random topologies, the uplink loading case can be attacked more severely than in the downlink case. The analyzed ESS here would benefit the design of WMN in terms of robustness.

Department	:	Electrical Engineering	**Student's Signature**	.....
Field of Study	:	Electrical Engineering	**Advisor's Signature**	.....
Academic Year	:	2010		

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยโครงข่าย (Network Reserch Group) ซึ่งดูแลโดย ผศ. ดร. เชาวน์ดิศ อัศวกุล และ ผศ. ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร ที่จัดกิจกรรมเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และการทำงานของผู้วิจัยให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น รวมถึงให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือในการทำงานแก่ผู้วิจัย ทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสะดวกราบรื่น

ขอขอบคุณโครงการ GE12 และทุนศิษย์ก้นกุฏิของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึงโครงการ TRIDI CE in Lightwave and high-speed Communications at EeDept CU ที่สนับสนุนด้านทุนการศึกษาวิจัยและคุรุพัฒน์

ขอขอบคุณอาจารย์ภัทรชาติ โกมลกิติ ผู้คอยให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีเสมอมา

ขอบคุณเพื่อนพี่น้องนักวิจัยทุกคน รวมถึงเจ้าหน้าที่ บุคลากรที่อยู่ในภาควิชาไฟฟ้า สาขาโทรคมนาคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ และเป็นกำลังใจที่ดียิ่งต่อผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย ซึ่งได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย . . . . . ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ . . . . . จ
กิตติกรรมประกาศ . . . . . ฉ
สารบัญ . . . . . ช
สารบัญตาราง . . . . . ฌ
สารบัญภาพ . . . . . ญ
สารบัญตัวย่อ . . . . . ฏ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 ทฤษฎีเกม 6
2.1.1 เกมเล่นสองคนที่มีผลรวมเป็นศูนย์ (two–person zero–sum game) . . 6
2.1.2 ทฤษฎีมินิแมกซ์ (minimax theorem) 7
2.1.3 แผนการเล่นเด่น (dominant strategy) 7
2.2 การส่งข้อมูลหลายวิถี (multi-path routing) 9
2.2.1 การส่งแบบระยะทางที่สั้นที่สุด (shortest path) 9
2.2.2 การจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่ม 9
3 ระเบียบวิธีที่นำเสนอในการจัดเส้นทางแบบเฟ้นสุ่มด้วยทฤษฎีเกม 10
3.1 แบบจำลองโครงข่าย 10
3.1.1 ความแตกต่างระหว่างการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลงในโครงข่าย . . . 11
3.1.2 ผลกระทบของการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลง . . . 11
3.1.3 ผลกระทบของการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลง 12
3.2 สัญลักษณ์พื้นฐาน 13
3.3 แบบจำลองเกมของการส่งข้อมูลในโครงข่าย 14
3.3.1 ผู้เล่นฝ่ายป้องกัน (defender) 14
3.3.2 ผู้เล่นฝ่ายโจมตี (attacker) 15
3.3.3 ค่าของเกม 16
3.3.4 การวิเคราะห์และแก้ปัญหาด้วยวิธี MSA (method of successive average) 16
4 ผลการทดสอบ 19

บทที่

4.1 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาดเล็ก 19
4.1.1 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 ในกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศรอบทิศทาง 19
4.1.2 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 ในกรณีที่ฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศระบุทิศทาง 21
4.2 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางที่มีขนาดใหญ่ขึ้น 24
4.2.1 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าบีมวิดท์ 24
4.2.2 การเปรียบเทียบค่า ESS ของโครงข่ายแบบหนาแน่นและโครงข่ายแบบเบาบางในโครงข่ายแบบตาราง 26
4.2.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนตำแหน่งเกตเวย์ 27
4.2.4 ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายของโนดในโครงข่าย . 32
4.2.5 ผลกระทบต่อ ESS ในกรณีผู้เล่นฝ่ายป้องกันส่งข้อมูลแต่ละทิศทางด้วยความน่าจะเป็นแบบยูนิฟอร์ม 36
4.2.6 ผลกระทบต่อ ESS ในกรณีผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกพื้นที่ในการโจมตีแบบยูนิฟอร์มและแบบพื้นที่ทับซ้อนบีมที่มากที่สุด 37
4.2.7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบระดับความปลอดภัยที่ลดลงเมื่อเกิดความเสียหายกับจุดเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่าง ๆ 40
4.3 การวิเคราะห์โครงข่ายสุ่ม 43
4.3.1 การวิเคราะห์ค่า ESS ในโครงข่ายสุ่มกรณีการดักฟังข้อมูล 44
4.3.2 การวิเคราะห์ค่า ESS ในโครงข่ายสุ่มกรณีการเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวน 45
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 47
5.1 บทสรุป 47
5.2 ข้อเสนอแนะ 49
รายการอ้างอิง 50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 53

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่า ESS ที่โครงข่ายขนาดต่าง ๆ ทั้งแบบเบาบางและแบบหนานแน่นในกรณีการดักฟังข้อมูล 26
ตารางที่ 4.2 ค่า ESS ที่โครงข่ายขนาดต่าง ๆ ทั้งแบบเบาบางและแบบหนานแน่นในกรณีการส่งสัญญาณรบกวน 27
ตารางที่ 4.3 ค่า ESS ในตำแหน่งเกตเวย์ต่าง ๆ ของโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 29
ตารางที่ 4.4 ค่า ESS ในตำแหน่งเกตเวย์ต่าง ๆ ของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 30
ตารางที่ 4.5 ค่า ESS ในตำแหน่งเกตเวย์ต่าง ๆ ของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x4 30
ตารางที่ 4.6 ค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชั่นทั้งหมดกรณีการดักฟังสัญญาณเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 1 41
ตารางที่ 4.7 ค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชั่นทั้งหมดกรณีการดักฟังสัญญาณเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 2 41
ตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชั่นทั้งหมดกรณีการส่งสัญญาณรบกวนเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 1 43
ตารางที่ 4.9 ค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชั่นทั้งหมดกรณีการส่งสัญญาณรบกวนเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 2 43

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 โครงข่ายไร้สายแบบเมชเพื่อให้บริการเชื่อมต่อระบบอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย 1
รูปที่ 1.2 การส่งข้อมูลของสายอากาศรอบทิศทางและสายอากาศระบุทิศทาง 3
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างตารางผลได้ผลเสีย 6
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างตารางผลได้ผลเสียเพื่อแสดงแผนการเล่นเด่นของผู้เล่นทั้งสอง . . 8
รูปที่ 3.1 ความแตกต่างระหว่างการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลง 11
รูปที่ 3.2 การดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลง 12
รูปที่ 3.3 การส่งสัญญาณรบกวนข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลง 13
รูปที่ 3.4 ทิศทางและการปรับค่าบีมวิดท์ที่เหมาะสม 15
รูปที่ 3.5 เซตของพื้นที่ทั้งหมดที่ผู้โจมตีสามารถโจมตีโครงข่ายได้ 15
รูปที่ 4.1 โครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 และเซตของตำแหน่งในการดักฟังที่ส่งผลแตกต่างกันในกรณีสายอากาศรอบทิศทาง 20
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกเพื่อดักฟังข้อมูลในโครงข่ายได้ร้ายแรงที่สุด . 20
รูปที่ 4.3 โครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 และเซตของตำแหน่งในการดักฟังที่ส่งผลแตกต่างกันในกรณีสายอากาศระบุทิศทาง 21
รูปที่ 4.4 รูปแบบการส่งด้วยทรีที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายป้องกันกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น 22
รูปที่ 4.5 รูปแบบการส่งแบบทรีที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายป้องกันกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลง 22
รูปที่ 4.6 เซตของตำแหน่งในการดักฟังที่ส่งผลแตกต่างกันทั้งการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและขาลง 23
รูปที่ 4.7 โครงข่ายแบบตารางที่ใช้ในการทดสอบ 24
รูปที่ 4.8 ความแตกต่างของค่า ESS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงบีมวิดท์ 25
รูปที่ 4.9 โครงข่ายแบบเบาบางและโครงข่ายแบบหนาแน่น 26
รูปที่ 4.10 ตัวเลขแทนตำแหน่งต่าง ๆ ในโครงข่ายแบบตาราง 27
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งเกตเวย์ที่ทำให้ค่า ESS สูงที่สุดในโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x2, 2x3, 3x3 28
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งเกตเวย์ที่ทำให้ค่า ESS สูงที่สุดในโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x4 29
รูปที่ 4.13 พื้นที่ที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกในการโจมตีกรณีของการดักฟังข้อมูลของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โดยมีเกตเวย์ในตำแหน่งที่ 1, 9 31
รูปที่ 4.14 พื้นที่ที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกในการโจมตีกรณีของการดักฟังข้อมูลของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โดยมีเกตเวย์ในตำแหน่งที่ 2, 8 31
รูปที่ 4.15 โครงข่ายแบบตารางขนาด 3x4 ที่ใช้ศึกษาผลกระทบต่อการเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายของโนดในโครงข่าย 32

หน้า

รูปที่ 4.16 การต่อถึงกันที่เปลี่ยนไปเมื่อโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชมีรัศมีการส่งสัญญาณเพิ่มขึ้น 33
รูปที่ 4.17 ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีของโนดในโครงข่ายจากการถูกโจมตีแบบดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น 34
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีของโนดในโครงข่ายจากการถูกโจมตีแบบดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง 35
รูปที่ 4.19 ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีของโนดในโครงข่ายจากการถูกโจมตีแบบส่งสัญญาณรบกวน 35
รูปที่ 4.20 ผลต่างระหว่าง ESS ในกรณีผู้เล่นฝ่ายป้องกันส่งข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีเกมกับการส่งแบบยูนิฟอร์มในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น 36
รูปที่ 4.21 ผลต่างระหว่าง ESS ในกรณีผู้เล่นฝ่ายป้องกันส่งข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีเกมกับการส่งแบบยูนิฟอร์มในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง 36
รูปที่ 4.22 ความแตกต่างของค่า ESS เมื่อผู้เล่นแต่ละฝ่ายเลือกรูปแบบแผนการเล่นด้วยวิธีต่าง ๆ กรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและกรณีการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง 38
รูปที่ 4.23 ความแตกต่างของค่า ESS เมื่อผู้เล่นแต่ละฝ่ายเลือกรูปแบบแผนการเล่นด้วยวิธีต่าง ๆ กรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงและกรณีการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น 39
รูปที่ 4.24 โครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 ที่ใช้เปรียบเทียบระดับความสำคัญของจุดเชื่อมต่อที่มีผลต่อความปลอดภัยของโครงข่าย 40
รูปที่ 4.25 ระดับความสำคัญของจุดเชื่อมต่อแต่ละตัวในโครงข่าย 42
รูปที่ 4.26 อัตราส่วน ESS ต่อจำนวนจุดเชื่อมต่อทั้งหมดในโครงข่ายแบบสุ่มกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น 44
รูปที่ 4.27 อัตราส่วน ESS ต่อจำนวนจุดเชื่อมต่อทั้งหมดในโครงข่ายแบบสุ่มกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง 45
รูปที่ 4.28 ผลกระทบต่อค่า ESS เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น 45
รูปที่ 4.29 ผลกระทบต่อค่า ESS เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง 46

สารบัญตัวย่อ

WMN	wireless mesh network
GW	gateway
TAP	transit access point
ESS	expected number of secure sessions
BW	beamwidth
MSA	method of successive average