

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นผลการทดสอบระเบียบวิธีนำเสนอในการหาการจัดเส้นทางแบบเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งศึกษาผลกระทบของการถูกโจมตีด้วยการดักฟังข้อมูลและการส่งสัญญาณรบกวนข้อมูลในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ซึ่งการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อดังนี้

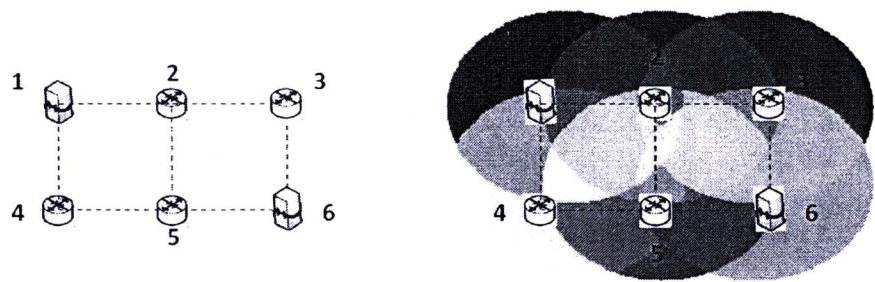
โดยหัวข้อ 4.1 จะเป็นการทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาดเล็กซึ่งจะแสดงระเบียบวิธีการคำนวณหาการจัดเส้นทางแบบเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดอย่างง่าย ต่อมาหัวข้อ 4.2 จะเป็นการทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบต่าง ๆ ออกเป็นหลายหัวข้อย่อยได้แก่ ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าบีมวิคิต ความแตกต่างของค่า *ESS* ในโครงข่ายแบบหนาแน่นกับโครงข่ายแบบเบาบาง ผลกระทบจากการเปลี่ยนตำแหน่งเกตเวย์และจากการเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายให้กับโนดในโครงข่าย การจัดหาเส้นทางเส้นทางของผู้เล่นฝ่ายป้องกันจากทฤษฎีเกมเทียบกับการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม การเลือกพื้นที่การโจมตีของผู้เล่นฝ่ายโจมตีจากทฤษฎีเกมเทียบกับวิธีการเลือกพื้นที่แบบยูนิฟอร์ม และแบบพื้นที่ที่มีการทับซ้อนกันของบีมมากที่สุด และสุดท้ายคือการวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยเมื่อมีจุดเชื่อมต่อใดจุดเชื่อมต่อหนึ่งเกิดความเสียหาย หัวข้อสุดท้ายหัวข้อ 4.3 จะเป็นการวิเคราะห์โครงข่ายสุ่ม

#### 4.1 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาดเล็ก

เพื่อความชัดเจนในหัวข้อที่ 4.1 นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณการจัดหาเส้นทางเส้นทางของผู้เล่นฝ่ายป้องกันโครงข่ายแบบตารางขนาด  $2 \times 3$  โดยในตัวอย่างจะแสดงการจำลองทั้ง 2 แบบ คือ กรณีสายอากาศรอบทิศทาง และกรณีสายอากาศระบุทิศทาง โดยในกรณีของสายอากาศระบุทิศทางจุดเชื่อมต่อและเกตเวย์ทุกตัวมีค่าบีมวิคิตเท่ากันทั้งหมด โดยสีที่แตกต่างกันของพื้นที่ตัดกันของส่วนของวงกลมต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 จะแสดงถึงเซตของตำแหน่งที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีดักฟังหรือส่งสัญญาณรบกวนในพื้นที่ที่มีสีเดียวกันจะให้ผลของการโจมตีเหมือนกัน โดยกำหนดให้จุดเชื่อมต่อและเกตเวย์ทุกโนดที่ติดกันห่างกัน 20 หน่วย และโนดแต่ละโนดมีรัศมีการส่ง 25 หน่วย

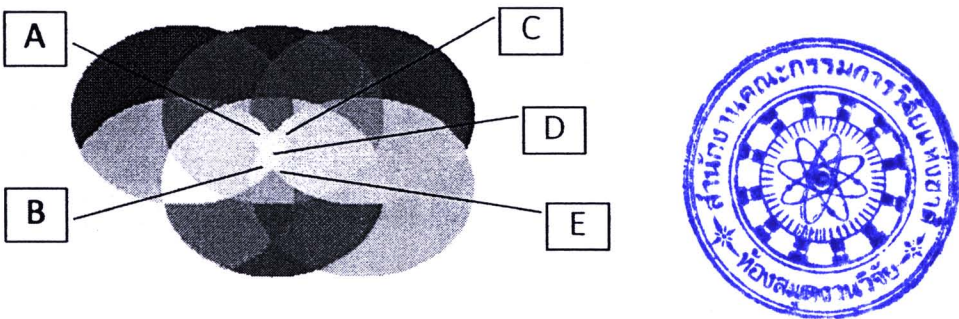
##### 4.1.1 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาด $2 \times 3$ ในกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศรอบทิศทาง

จากรูปที่ 4.1 เป็นการทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาด  $2 \times 3$  โดยโครงข่ายประกอบไปด้วยเกตเวย์ 2 ตัวอยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ 6 ส่วนตำแหน่งโนดที่ 2 ถึง 5 จะทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อซึ่งโนดทั้งหมดวางห่างกัน 20 หน่วยและกำหนดให้รัศมีการส่งสัญญาณไร้สายในแต่ละโนดมีค่าเป็น 25 หน่วย โดยนำมาทดสอบในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและขา



รูปที่ 4.1: โครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 และเซตของตำแหน่งในการดักฟังที่ส่งผลแตกต่างกันในกรณีสายอากาศรอบทิศทาง

ลง ซึ่งนำมาทดสอบทั้งในกรณีการดักฟังข้อมูลและการส่งสัญญาณรบกวน ในกรณีแรกคือการดักฟังข้อมูลปรากฏว่าได้ค่า  $ESS = 0$  ทั้งในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลง นั่นคือไม่ว่าผู้เล่นฝ่ายป้องกันจะเลือกรูปแบบทรีในการส่งแบบใดก็ตาม ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะสามารถดักฟังเซสชันของทุกจุดเชื่อมต่อได้หมด โดยแผนการเล่นของผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกพื้นที่ในการดักฟังดังรูปที่ 4.2



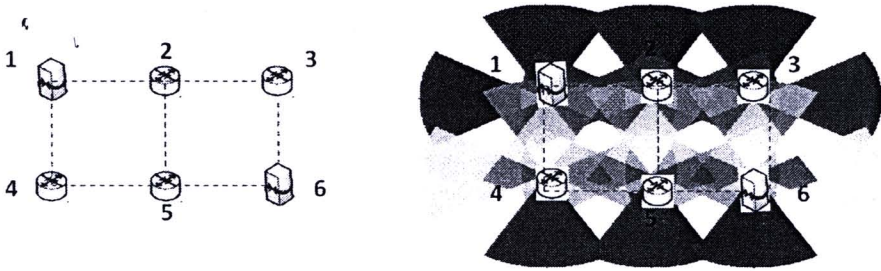
รูปที่ 4.2: ตำแหน่งที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกเพื่อดักฟังข้อมูลในโครงข่ายได้รัยแรงที่สุด

โดยพื้นที่ทั้ง B, C, D จะเป็นตำแหน่งที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือก เพื่อให้สามารถดักฟังจำนวนเซสชันให้ได้มากที่สุดในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง โดย พื้นที่ C จะสามารถดักฟังจุดเชื่อมต่อ {1, 2, 3, 5, 6} ได้ และในพื้นที่ D จะสามารถดักฟังจุดเชื่อมต่อ {1, 2, 3, 4, 5, 6} ได้ สุดท้ายพื้นที่ B จะสามารถดักฟังจุดเชื่อมต่อ {1, 2, 4, 5, 6} ได้ โดยโอกาสที่พื้นที่ B, C, D ถูกเลือกจะมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.32, 0.357 และ 0.323 ตามลำดับ ส่วนในกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นพื้นที่ A, D, E จะเป็นตำแหน่งในการโจมตีที่ดีที่สุดเช่นกัน จะสังเกตได้ว่าผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถดักฟังข้อมูลที่ผ่านเกตเวย์ 1 และ 6 ได้ทั้ง 2 เกตเวย์พร้อมกันทำให้ไม่ว่า ผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกการส่งข้อมูลแบบไหนก็จะมีเซสชันไหนปลอดภัยทั้งสิ้น เพื่อให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างการใช้สายอากาศรอบทิศทางกับสายอากาศระบุทิศทางในตัวอย่างต่อไปจะพิจารณาโครงข่ายเดียวกัน โดยให้ค่าบีมวิดท์ของสายอากาศทุกตัวมีค่าเป็น

60 องศา และมีทิศทางของบีมพุ่งตามทิศทางการกระจัดไปยังจุดเชื่อมต่อหรือเกตเวย์ปลายทาง

จากงานวิจัย [14] ได้แสดงให้เห็นว่าการโจมตีด้วยการดักฟังข้อมูลและการส่งสัญญาณรบกวนในกรณีที่ฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศรอบทิศทางนั้นจะมีผลทำให้ *ESS* เท่ากัน ทั้งการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลง แต่แผนการเล่นทั้งผู้เล่นฝ่ายป้องกันและผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะแตกต่างกัน

4.1.2 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 ในกรณีที่ฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศระบุทิศทาง



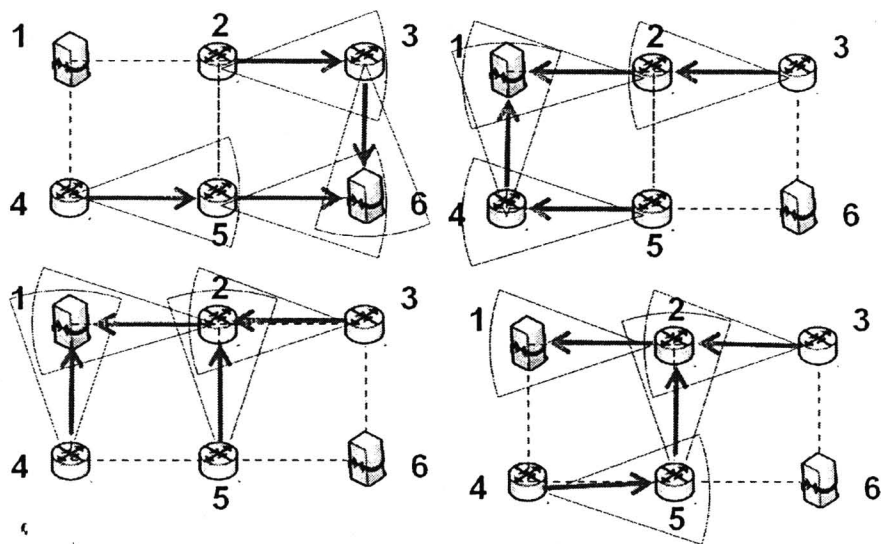
รูปที่ 4.3: โครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 และเซตของตำแหน่งในการดักฟังที่ส่งผลแตกต่างกันในกรณีสายอากาศระบุทิศทาง

จากรูปที่ 4.3 เป็นการทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3 โดยโครงข่ายประกอบไปด้วยเกตเวย์ 2 ตัวอยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ 6 ส่วนตำแหน่งโนดที่ 2 ถึง 5 จะทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อซึ่งโนดทั้งหมดวางห่างกัน 20 หน่วยและกำหนดให้รัศมีในการส่งสัญญาณไร้สายในแต่ละโนดมีค่าเป็น 25 หน่วย และกำหนดให้บีมวิดท์ของโนดทุกโนดมีค่าเป็น 60 องศาโดยการทดสอบได้ทดสอบทั้ง 2 กรณีคือ การส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและขาลง ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1.2.1 กรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น

เมื่อทำการทดสอบปรากฏว่าได้ค่า  $ESS = 2$  ซึ่งหมายความว่า ถ้าผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกรูปแบบการส่งด้วยทรีที่ดีที่สุดและผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกโจมตีพื้นที่ที่ดีที่สุดเช่นกัน จะมีจำนวนเซสชันที่ปลอดภัย 2 เซสชัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ถ้าผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกรูปแบบการส่งด้วยทรีที่ดีที่สุดแล้ว สามารถรับประกันได้ว่าค่าจำนวนเซสชันระหว่างจุดเชื่อมต่อกับเกตเวย์ที่ปลอดภัยจะไม่ต่ำกว่า 2 เซสชัน จากการทดสอบจะได้รูปแบบการส่งข้อมูลแบบทรีที่ดีที่สุดของฝ่ายป้องกันดังรูปที่ 4.4

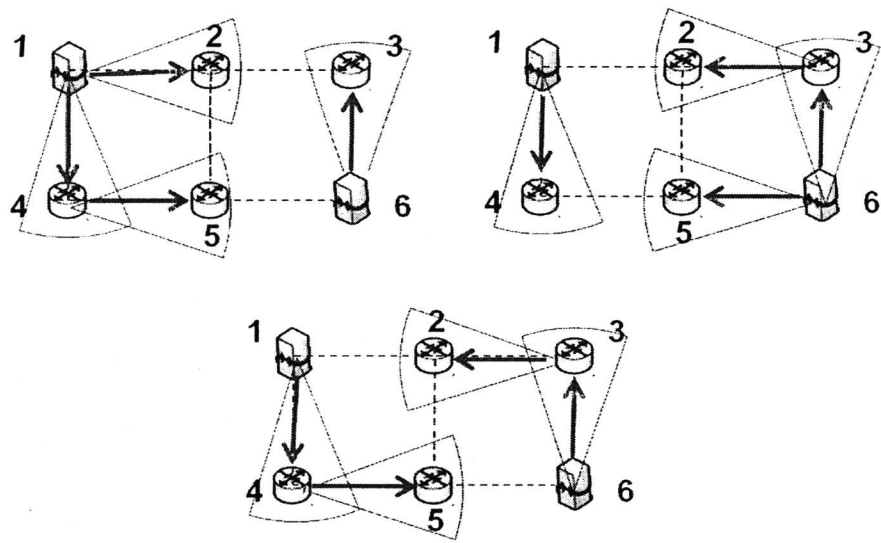
ซึ่งจากการทดสอบจะได้พื้นที่ในการโจมตีที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตีเช่นกัน แต่ในกรณีนี้แผนการเล่นของผู้เล่นฝ่ายโจมตีหรือตำแหน่งในการโจมตีนั้นมีความน่าจะเป็นในการเลือกใกล้เคียงกัน ซึ่งจะอธิบายในตัวอย่างของการส่งข้อมูลฝั่งขาลง



รูปที่ 4.4: รูปแบบการส่งด้วยทรีที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายป้องกันกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น

4.1.2.2 กรณีการดักฟังข้อมูลการส่งข้อมูลฝั่งขาลง

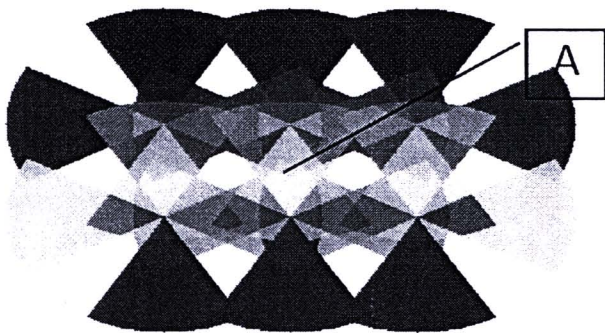
เมื่อทำการทดสอบปรากฏว่าได้ค่า  $ESS = 2$  เหมือนกับกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น แต่เมื่อพิจารณาแผนของผู้เล่นทั้ง 2 ฝ่าย คือ ทั้งการเลือกรูปแบบการส่งด้วยทรีของฝ่ายป้องกันและการเลือกพื้นที่ในการดักฟังของฝ่ายโจมตี ปรากฏว่ามีรูปแบบไม่เหมือนกัน โดยรูปแบบการส่งข้อมูลแบบทรีที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝั่งป้องกันแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5: รูปแบบการส่งแบบทรีที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายป้องกันกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลง

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 รูปแบบการส่งด้วยทรีจะมีรูปแบบที่สมมาตรกันเนื่องจากรูปแบบโครงข่ายมีความสมมาตรทำให้ผู้เล่นฝ่ายป้องกันสามารถเลือกรูปแบบหนึ่ง ๆ ขึ้นมาจาก

รูปแบบที่สมมาตรกันทั้งหมดโดยที่รูปแบบที่สมมาตรนั้นจะต้องไม่เปลี่ยนตำแหน่งการโจมตีของผู้เล่นฝ่ายโจมตีทำให้ค่าของเกมยังคงไม่เปลี่ยนแปลงและลดต้นทุนที่ใช้ได้เนื่องจากไม่จำเป็นจะต้องใช้บีมทุกบีมในการส่งข้อมูล นอกจากนี้จากการทดสอบได้พื้นที่ที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝั่งโจมตีเพื่อการดักฟัง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6: เซตของตำแหน่งในการดักฟังที่ส่งผลแตกต่างกันทั้งการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและขาลง

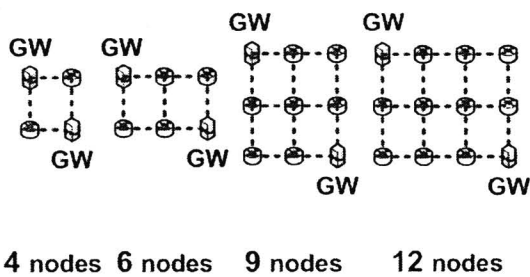
โดยพื้นที่ A จะเป็นตำแหน่งที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือก เพื่อให้สามารถดักฟังจำนวนเซสชันให้ได้มากที่สุด ซึ่งการคำนวณจะแตกต่างจากกรณีของสายอากาศรอบทิศทางเนื่องจากในจุดเชื่อมต่อหนึ่งหนึ่งนั้นจะมีบีมออกไป 4 ทิศทาง วิธีการแสดงค่าพื้นที่ของผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะแสดงโดยกำหนดให้ตัวเลขจำนวนเต็มหน้าทศนิยมแสดงถึงจุดเชื่อมต่อ และตัวเลขหลังทศนิยมหมายถึงทิศทางของบีมที่ใช้ส่งโดยอ้างอิงกับเข็มนาฬิกา เช่น 1.12 หมายถึง บีมที่อยู่ในจุดเชื่อมต่อที่ 1 และทิศทางบีมพุ่งไปด้านบนหรือ 12 นาฬิกา อีกตัวอย่างคือ 3.9 หมายถึง บีมที่อยู่ในจุดเชื่อมต่อที่ 3 และทิศทางบีมพุ่งไปด้านซ้ายหรือ 9 นาฬิกา พื้นที่ A จะสามารถดักฟังจุดเชื่อมต่อ {1.3, 2.6, 3.9, 4.3, 5.12, 6.9} ได้ โดยพื้นที่ที่ดีที่สุดของฝ่ายโจมตีนั้นจะมีแค่พื้นที่เดียวในกรณีนี้ จากการทดสอบทำให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างการใช้สายอากาศรอบทิศทางมาเป็นสายอากาศระบุทิศทางตรงที่ ผู้เล่นฝ่ายโจมตีไม่สามารถดักฟังพื้นที่บีมที่เกิดเวกเตอร์สองเวกเตอร์ใช้ในการส่งข้อมูลพร้อมกันได้ และต้องเลือกดักฟังแค่บางบีมเท่านั้นจึงทำให้ถ้าผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกรูปแบบการส่งข้อมูลด้วยวิธีที่ดีที่สุดแล้วและผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกพื้นที่ในการดักฟังที่ดีที่สุดเช่นกันจะมี 2 เซสชันที่ปลอดภัย ณ จุดสมดุลของเกม เนื่องจากการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลงมีรูปแบบแผนของผู้เล่นฝ่ายป้องกันและฝ่ายโจมตีที่ไม่เหมือนกันทำให้ต้องพิจารณาแยกกรณีในการป้องกันที่แตกต่างกัน

4.1.2.3 กรณีการส่งสัญญาณรบกวนในโครงข่าย

จากหัวข้อ 3.1 ที่ได้กล่าวมา ทำให้ทราบว่าจากรูปที่ 3.2 ในกรณีของการดักฟังข้อมูลนั้น ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกโจมตีตำแหน่งที่อยู่ในพื้นที่บีมที่มีทิศทางพุ่งจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทาง เพื่อที่จะทำให้เซสชันของโนดต้นทางนั้นไม่ปลอดภัย แต่ในทางกลับกันจากรูปที่ 3.3 ในกรณีของการส่งสัญญาณรบกวนผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกพื้นที่บีมของโนดตัวรับที่หันบีมมารับข้อมูลจากโนดต้นทางแทนเพื่อที่จะทำให้เซสชันของโนดไม่ปลอดภัยหรือ

ไม่ได้ยืนยันสัญญาณ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีในกรณีของการส่งสัญญาณรบกวนนั้นมีรัศมีของสัญญาณรบกวนเท่ากับรัศมีของการส่งแต่ละโนดจึงทำให้สรุปได้ว่า *ESS* และแผนการเล่นของทั้งฝ่ายป้องกันและฝ่ายโจมตีของกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นจะมีค่าเหมือนกันกับกรณีการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง ในทำนองเดียวกัน *ESS* และแผนการเล่นของทั้งสองฝ่ายของกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงจะมีค่าเหมือนกันกับกรณีการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นเช่นกัน

4.2 การทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

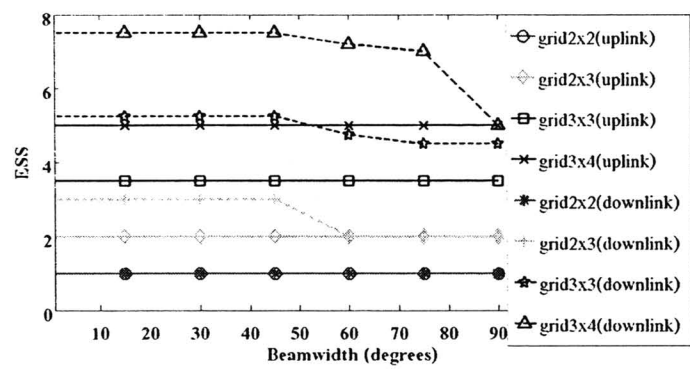


รูปที่ 4.7: โครงข่ายแบบตารางที่ใช้ในการทดสอบ

จาก [14] ได้มีการทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางเนื่องจากเป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่อแบบง่ายที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้โดยโครงข่ายที่นำมาทดสอบนั้นประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อที่เป็นเกตเวย์ 2 จุดติดตั้งอยู่ที่มุมซ้ายบนและมุมขวาล่างของโครงข่าย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์นำเอาสายอากาศระบุทิศทางเข้ามาเพื่อพัฒนาความปลอดภัยให้กับโครงข่ายมากยิ่งขึ้น รวมถึงได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบต่าง ๆ ได้แก่ ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าบีบอัดสัญญาณ, ผลกระทบต่อโครงข่ายแบบหนาแน่น (dense network) และโครงข่ายแบบเบาบาง (sparse network), ผลกระทบต่อการเปลี่ยนตำแหน่งเกตเวย์ รวมถึงการวิเคราะห์ตำแหน่งของโนดแต่ละโนดที่มีผลต่อความปลอดภัยที่ต่างกันและสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบค่า *ESS* ว่ามีผลอย่างไรเมื่อผู้เล่นฝ่ายป้องกันและผู้เล่นฝ่ายโจมตีใช้วิธีอื่นนอกเหนือจากทฤษฎีเกม

4.2.1 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าบีบอัดสัญญาณ

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง *ESS* กับบีบอัดสัญญาณโดยทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางดังรูปที่ 4.7 ซึ่งกำหนดให้ระยะทางในการส่งของโนดแต่ละโนดเท่ากันหมดและมีทิศทางในการส่งพุ่งตรงไปยังโนดปลายทางเสมอ จากผลการทดลองจะเห็นว่าในกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น ค่า *ESS* ที่ได้จะคงที่และไม่ขึ้นกับค่าบีบอัดสัญญาณ โดยมีจำนวนเซสชันที่ปลอดภัยเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเซสชันทั้งหมด เพราะในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น



รูปที่ 4.8: ความแตกต่างของค่า ESS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงบีมวิดท์

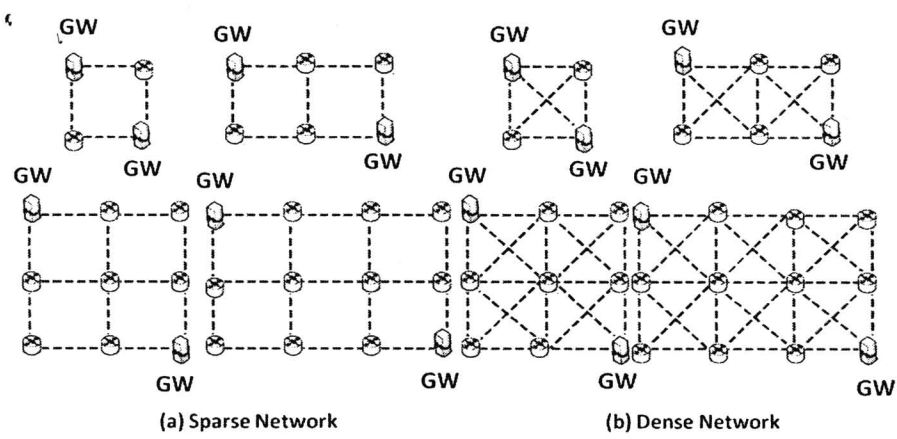
ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะสามารถดักฟังข้อมูลที่ส่งเข้ามายัง GW ตัวหนึ่งได้เสมอ และในโครงข่ายที่นำมาทดสอบนี้มี GW 2 ตัว ทำให้แผนการเล่นที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายป้องกันคือการส่งข้อมูลไปยัง GW ทั้ง 2 ตัวแบบสุ่ม เพื่อหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีทำให้จำนวนเชสชั้นที่ปลอดภัยมีจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเชสชั้นทั้งหมด

ในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลงจะมีค่า ESS มากกว่ากรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าพื้นที่บีมที่ส่งออกจาก GW ตัวเดียวกันเพื่อส่งข้อมูลไปยังจุดเชื่อมต่อแต่ละตัวจะไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งจากโครงข่ายแบบตารางที่นำมาทดสอบ ค่าบีมวิดท์จะต้องมีค่าไม่เกิน 90 องศา เพื่อให้เงื่อนไขตามที่กล่าวมาเป็นจริง ทำให้ในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลง แผนการเล่นที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตีคือการไปดักฟังพื้นที่ที่มีการซ้อนทับกันของบีมที่มาจากจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ มากที่สุด โดยการดักฟังพื้นที่ในกรณีนี้นั้นจะทำให้ดักฟังข้อมูลของเชสชั้นได้จำนวนน้อยกว่าในกรณีของการดักฟังบริเวณรอบ GW ของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นในกรณีที่โครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีจำนวน TAP ที่มากขึ้นเส้นทางในการส่งข้อมูลของผู้เล่นฝ่ายป้องกันเพื่อใช้ในการหลบหลีกจึงมีมากขึ้นด้วย ถึงแม้ว่าค่าบีมวิดท์จะมาก แต่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีก็จะสามารถดักฟังข้อมูลจากโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ยากกว่าโครงข่ายขนาดเล็ก และ ESS ในกรณีการส่งข้อมูลขาลงจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มบีมวิดท์ โดยเมื่อเพิ่มบีมวิดท์ไปเรื่อย ๆ ค่า ESS จะลดลงก็ต่อเมื่อค่าบีมวิดท์ที่ค่านั้น ทำให้แผนของผู้เล่นฝ่ายโจมตีเปลี่ยนหรือทำให้เกิดพื้นที่ที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีมาดักฟังแล้วได้จำนวนเชสชั้นมากกว่าเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบีมวิดท์ที่มีค่า 45 องศา จะเป็นค่าที่ทำให้เกิดพื้นที่ซ้อนทับของบีมเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองทำให้ขัดกับความรู้สึกที่ว่า เมื่อเราลดค่าบีมวิดท์ไปเรื่อย ๆ ค่า ESS จะไม่เพิ่มขึ้นตามเสมอไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นิยามต้นทุนแปรผกผันกับบีมวิดท์ ทำให้สามารถกล่าวอีกนัยได้ว่า การเพิ่มต้นทุนให้กับโครงข่ายนั้นอาจจะไม่ได้ทำให้ค่า ESS เพิ่มขึ้นเสมอไปยกตัวอย่างเช่นกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น ส่วนในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลงการเพิ่มต้นทุนจะต้องเพิ่มจนถึงค่าที่ทำให้บีมวิดท์แคบจนลดพื้นที่ที่เป็นแผนที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตีใช้ในการโจมตีได้ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าในโครงข่ายรูปแบบต่าง ๆ ควรจะเพิ่มต้นทุนหรือลดบีมวิดท์เท่าไรเพื่อให้ค่า ESS นั้นเพิ่มขึ้น

4.2.2 การเปรียบเทียบค่า *ESS* ของโครงข่ายแบบหนาแน่นและโครงข่ายแบบเบาบางในโครงข่ายแบบตาราง

เพื่อต้องการศึกษาถึงการวางโครงข่ายแบบหนาแน่นและโครงข่ายแบบเบาบางโดยสมมติให้โครงข่ายที่ใช้ทดสอบจากรูปที่ 4.9(a) เป็นโครงข่ายแบบเบาบาง โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างโนดห่างกัน 20 หน่วย และมีเกตเวย์ 2 ตัวอยู่ในตำแหน่งมุมซ้ายบนและมุมขวาล่าง กำหนดให้รัศมีการส่งสัญญาณไร้สายมีค่า 29 หน่วย หลังจากนั้นได้เพิ่มการเชื่อมต่อระหว่างโนดในแนวเส้นทะแยงมุมของทุกสี่เหลี่ยมในโครงข่ายแบบตารางดังรูปที่ 4.9(b) ทำให้กลายเป็นโครงข่ายแบบหนาแน่น ซึ่งการทดสอบทั้ง 2 กรณีนี้จะทดสอบที่ค่าบิมาตรที่ 45 องศา เพราะเป็นค่าบิมาตรที่ค่ามากที่สุดที่ไม่ทำให้เซกเตอร์จากจุดเชื่อมต่อต้นทางเดียวกันซ้อนทับกัน



รูปที่ 4.9: โครงข่ายแบบเบาบางและโครงข่ายแบบหนาแน่น

ตารางที่ 4.1: ค่า *ESS* ที่โครงข่ายขนาดต่าง ๆ ทั้งแบบเบาบางและแบบหนาแน่นในกรณีการดักฟังข้อมูล

| Network | grid 2x2<br>(uplink,downlink) | grid 2x3<br>(uplink,downlink) | grid 3x3<br>(uplink,downlink) | grid 3x4<br>(uplink,downlink) |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| sparse  | (1,1)                         | (2,3)                         | (3.5,5)                       | (5,7.5)                       |
| dense   | (1,1)                         | (2,3)                         | (3.5,5.5)                     | (5,8.5)                       |

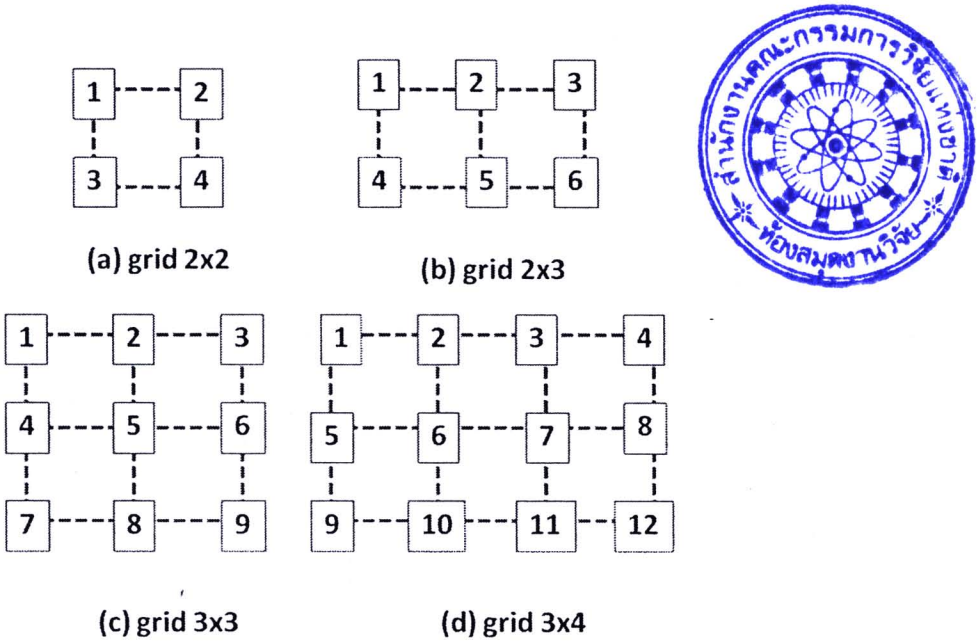
จากการทดสอบโครงข่ายในรูป 4.9(a) และ 4.9(b) พบว่าค่า *ESS* ของโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x2 และ 2x3 ที่ได้มีค่าเท่ากันทั้งในกรณีการดักฟังและส่งสัญญาณรบกวน ข้อมูลดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 โดยแผนในการเล่นของผู้เล่นฝ่ายป้องกันก็ยังคงเหมือนเดิมนั้นหมายความว่าสิ่งที่เราเพิ่มการเชื่อมต่อในแต่ละโนดให้มีเส้นทางการส่งที่มากขึ้นดังรูปที่ 4.9(b) ไม่ได้ช่วยเพิ่มค่า *ESS* หรือเพิ่มความปลอดภัยให้กับโครงข่าย เพราะ ตำแหน่งที่ดีที่สุดจากทฤษฎีเกมของผู้เล่นฝ่ายโจมตีใช้เพื่อโจมตีโครงข่ายนั้น สามารถโจมตีได้ครอบคลุม

ตารางที่ 4.2: ค่า *ESS* ที่โครงข่ายขนาดต่าง ๆ ทั้งแบบเบาบางและแบบหนาแน่นในกรณีการส่งสัญญาณรบกวน

| Network | grid 2x2<br>(uplink,downlink) | grid 2x3<br>(uplink,downlink) | grid 3x3<br>(uplink,downlink) | grid 3x4<br>(uplink,downlink) |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| sparse  | (1,1)                         | (3,2)                         | (5,3.5)                       | (7.5,5)                       |
| dense   | (1,1)                         | (3,2)                         | (5.5,3.5)                     | (8.5,5)                       |

ช่วยเชื่อมโยงตามเส้นทะแยงมุมที่ได้เพิ่มเข้ามาเนื่องจากโครงข่ายมีขนาดเล็ก ทำให้แผนที่ที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายป้องกันในการส่งข้อมูลก็ยังคงเป็นการส่งตามเส้นรอบรูปของสี่เหลี่ยมในรูป 4.9(a) เหมือนเดิม ส่วนในกรณีโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 และ 3x4 จะพบว่าการดักฟังข้อมูลในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลง โครงข่ายแบบหนาแน่นจะให้ค่า *ESS* มากกว่าโครงข่ายแบบเบาบาง เนื่องจากการเชื่อมต่อตามแนวเส้นทะแยงมุมที่เพิ่มเข้ามาเป็นการเพิ่มเส้นทางการส่งข้อมูลหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีให้กับเกตเวย์ทำให้ค่า *ESS* ในกรณีนี้เพิ่มขึ้น ส่วนในการดักฟังกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นนั้นถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มการเชื่อมโยงตามเส้นทะแยงมุมเข้ามาผู้เล่นฝ่ายโจมตีก็ยังคงสามารถโจมตีบริเวณพื้นที่รอบเกตเวย์เป็นผลทำให้สามารถดักฟังข้อมูลจากบีมที่พุ่งเข้าหาเกตเวย์ทั้งหมดได้

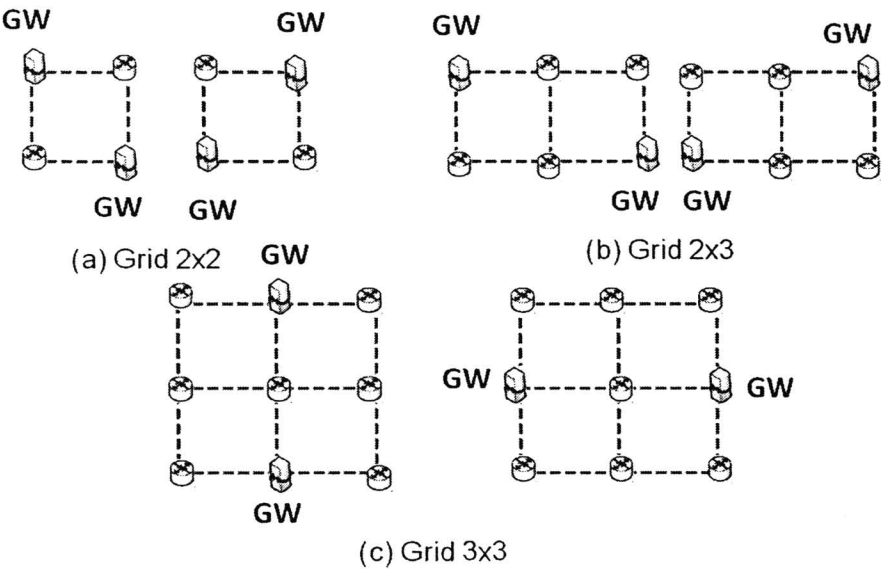
4.2.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนตำแหน่งเกตเวย์



รูปที่ 4.10: ตัวเลขแทนตำแหน่งต่าง ๆ ในโครงข่ายแบบตาราง

ในหัวข้อการทดสอบนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบต่อค่า *ESS* เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งของเกตเวย์ โดยโครงข่ายที่นำมาทดสอบจะเป็นโครงข่ายดังรูปที่ 4.7 แต่ได้เปลี่ยนตำแหน่ง

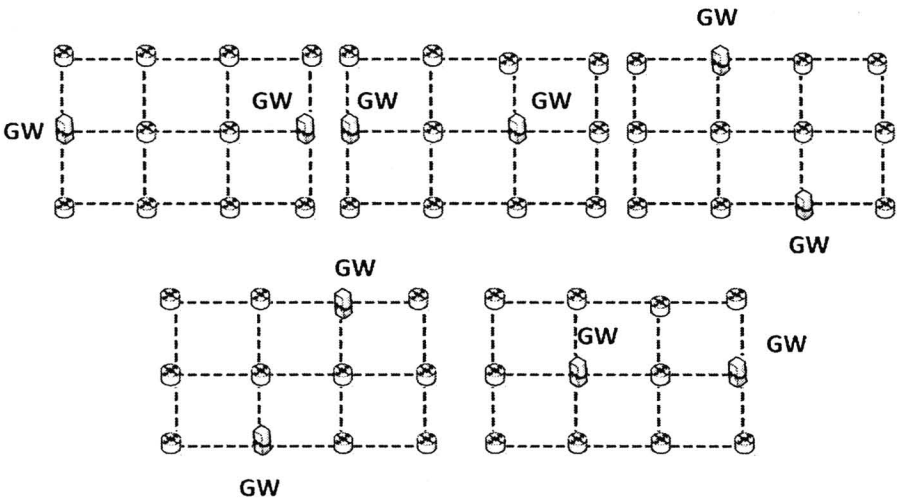
เกตเวย์ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ แทนที่จุดเชื่อมต่อ โดยยังคงให้จำนวนของเกตเวย์มี 2 เกตเวย์เท่าเดิมและกำหนดให้ระยะห่างระหว่างโนดแต่ละตัวเป็น 20 หน่วย โดยให้บีมวิสัยมีค่า 45 องศา ส่วนรัศมีในการส่งแต่ละโนดและรัศมีของการส่งสัญญาณรบกวนมีค่า 25 หน่วย ซึ่งตำแหน่งต่าง ๆ นั้นจะแทนด้วยตัวเลขดังรูปที่ 4.10 โดยผลการทดสอบโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x2 ดังรูปที่ 4.10(a) พบว่า ตำแหน่งของเกตเวย์ที่ทำให้ค่า *ESS* สูงที่สุด คือ เกตเวย์อยู่ในตำแหน่งที่ 1, 4 ซึ่งหมายความว่าตำแหน่งที่ 2, 3 เป็นจุดเชื่อมต่อ เนื่องจากโครงข่ายเป็นโครงข่ายสมมาตรจึงสามารถให้เกตเวย์อยู่ในตำแหน่ง 2, 3 ได้ และให้ตำแหน่งที่ 1, 4 เป็นจุดเชื่อมต่อ ซึ่งการวางเกตเวย์แบบนี้จะทำให้ค่า *ESS* กรณีการดักฟังข้อมูลและการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลงมีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าวางเกตเวย์แบบอื่น เช่น ให้เกตเวย์อยู่ในตำแหน่ง 1, 3 แล้ว จะทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถดักฟังข้อมูลที่ทั้งออกและเข้าจากเกตเวย์ทั้ง 2 ตัวได้พร้อมกันทำให้ค่า *ESS* ในทุกกรณีมีค่าเท่ากับ 0 เพราะฉะนั้นตำแหน่งการวางเกตเวย์ที่ดีที่สุดของโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x2 จะเป็นดังรูปที่ 4.11(a)



รูปที่ 4.11: ตำแหน่งเกตเวย์ที่ทำให้ค่า *ESS* สูงที่สุดในโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x2, 2x3, 3x3

หลังจากนั้นได้ทดสอบกับโครงข่ายแบบตารางแต่ละขนาดดังรูปที่ 4.10(b), 4.10(c), 4.10(d) ทำให้พบว่าค่า *ESS* ในเกตเวย์ตำแหน่งต่าง ๆ และจากการโจมตีทั้งแบบดักฟังข้อมูลและส่งสัญญาณรบกวนมีค่าเป็นเท่าใด โดยแสดงค่าต่าง ๆ ออกมาในตารางที่ 4.3, 4.4, 4.5 เนื่องจากโครงข่ายขนาด 3x3 และ 3x4 มีตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเกตเวย์เป็นจำนวนมากเพื่อให้กระชับจะขอแสดงค่าแค่ตำแหน่งที่ไม่ซ้ำเท่านั้น เนื่องจากโครงข่ายมีความสมมาตรโดยตำแหน่งของเกตเวย์ที่ทำให้ค่า *ESS* สูงที่สุดจะแสดงในรูปที่ 4.11(a), 4.11(b), 4.11(c) และ 4.12

จากผลการทดสอบจะสังเกตได้ว่าตำแหน่งเกตเวย์ที่ทำให้ค่า *ESS* สูงที่สุด จะเป็นตำแหน่งที่มีค่าองศาอิสระ (degree of freedom) มากกว่าตำแหน่งที่องศาอิสระน้อย



รูปที่ 4.12: ตำแหน่งเกตเวย์ที่ทำให้ค่า *ESS* สูงที่สุดในโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x4

ตารางที่ 4.3: ค่า *ESS* ในตำแหน่งเกตเวย์ต่าง ๆ ของโครงข่ายแบบตารางขนาด 2x3

| Position of GW<br>(GW1,GW2) | Eavesdropping-case <i>ESS</i><br>(uplink,downlink) | Jamming-case <i>ESS</i><br>(uplink,downlink) |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| (1,2)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (1,3)                       | (2,2.5)                                            | (2.5,2)                                      |
| (1,4)                       | (0,0)                                              | (0,0)                                        |
| (1,5)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (1,6)                       | (2,3)                                              | (3,2)                                        |
| (2,3)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (2,4)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (2,5)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (2,6)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (3,4)                       | (2,3)                                              | (3,2)                                        |
| (3,5)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (3,6)                       | (0,0)                                              | (0,0)                                        |
| (4,5)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |
| (4,6)                       | (2,2.5)                                            | (2.5,2)                                      |
| (5,6)                       | (2,2)                                              | (2,2)                                        |

เนื่องจากยังมีค่าองศาอิสระ มากก็ยิ่งเหมือนกับมีเส้นทางในการที่จะหลบหลีกผู้โจมตีได้มาก ข้อสังเกตข้อที่สองคือตำแหน่งเกตเวย์ทั้งสองตัวนั้นจะต้องไม่อยู่ติดกัน ยกตัวอย่างเช่นในกรณีโครงข่ายขนาด 3x4 ถ้าเราให้เกตเวย์มีตำแหน่งที่ 6, 7 แล้ว จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งเกตเวย์ทั้งสองอยู่มีค่าองศาอิสระ 4 ทั้งคู่ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดถ้าเทียบกับที่ตำแหน่ง

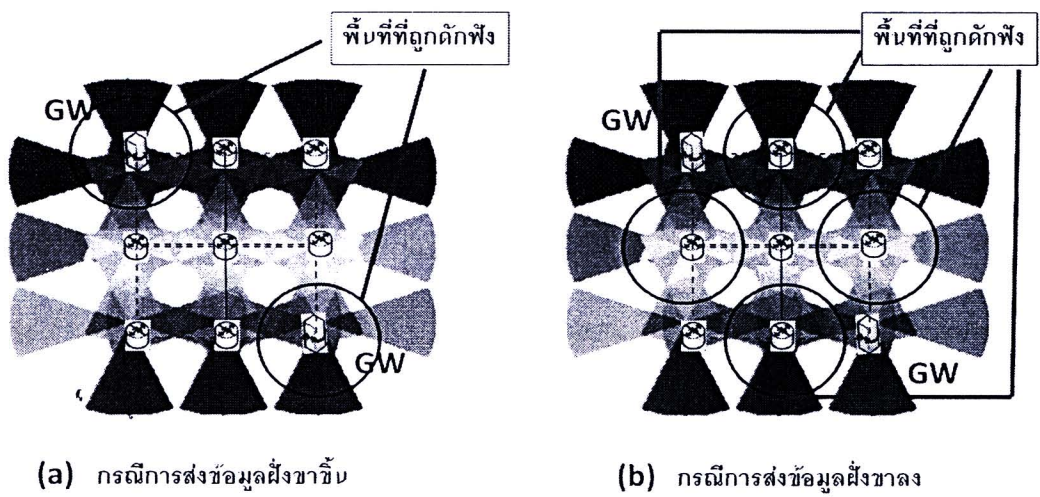
ตารางที่ 4.4: ค่า *ESS* ในตำแหน่งเกตเวย์ต่าง ๆ ของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3

| Position of GW<br>(GW1,GW2) | Eavesdropping-case <i>ESS</i><br>(uplink,downlink) | Jamming-case <i>ESS</i><br>(uplink,downlink) |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| (1,2)                       | (3.5,5)                                            | (5,3.5)                                      |
| (1,3)                       | (3.5,4)                                            | (4,3.5)                                      |
| (1,5)                       | (3.5,4.5)                                          | (4.5,3.5)                                    |
| (1,6)                       | (3.5,5)                                            | (5,3.5)                                      |
| (1,9)                       | (3.5,5)                                            | (5,3.5)                                      |
| (2,4)                       | (3.5,4.5)                                          | (4.5,3.5)                                    |
| (2,5)                       | (3.5,4.5)                                          | (4.5,3.5)                                    |
| (2,8)                       | (3.5,5.5)                                          | (5.5,3.5)                                    |

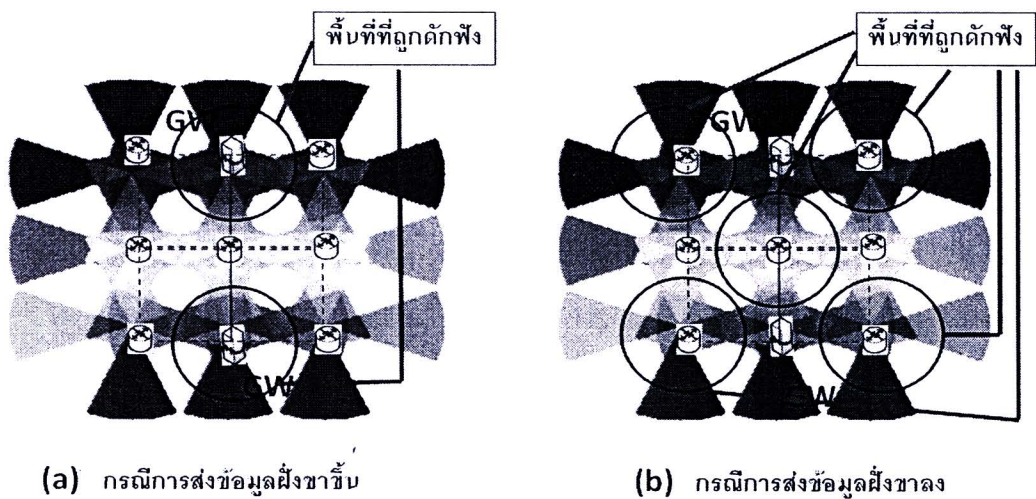
ตารางที่ 4.5: ค่า *ESS* ในตำแหน่งเกตเวย์ต่าง ๆ ของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x4

| Position of GW<br>(GW1,GW2) | Eavesdropping-case <i>ESS</i><br>(uplink,downlink) | Jamming-case <i>ESS</i><br>(uplink,downlink) |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| (1,2)                       | (5,5)                                              | (5,5)                                        |
| (1,3)                       | (5,6)                                              | (6,5)                                        |
| (1,4)                       | (5,6)                                              | (6,5)                                        |
| (1,5)                       | (5,5)                                              | (5,5)                                        |
| (1,9)                       | (5,5.5)                                            | (5.5,5)                                      |
| (1,10)                      | (5,6.5)                                            | (6.5,5)                                      |
| (1,11)                      | (5,7.5)                                            | (7.5,5)                                      |
| (1,12)                      | (5,7.6)                                            | (7.6,5)                                      |
| (2,5)                       | (5,6)                                              | (6,5)                                        |
| (2,6)                       | (5,6)                                              | (6,5)                                        |
| (2,6)                       | (5,7.3)                                            | (7.3,5)                                      |
| (2,10)                      | (5,7)                                              | (7,5)                                        |
| (2,11)                      | (5,8)                                              | (8,5)                                        |
| (5,7)                       | (5,8)                                              | (8,5)                                        |
| (5,8)                       | (5,8)                                              | (8,5)                                        |
| (6,7)                       | (5,7.3)                                            | (7.3,5)                                      |

อื่น ๆ แต่กลับมีค่า *ESS* กรณีดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงน้อยกว่าในกรณีที่เกตเวย์วางอยู่ในรูปที่ 4.12 ทั้งนี้เพราะเมื่อเกตเวย์ทั้งสองตัวติดกันแล้วทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถดักฟังหรือส่งสัญญาณรบกวนข้อมูลที่ออกมาจากเกตเวย์ทั้งสองตัวพร้อมกันได้จึงเป็นเหตุทำให้ค่า *ESS* ลดต่ำลง



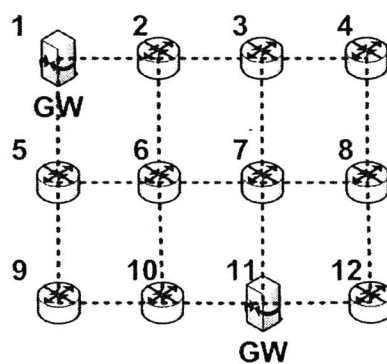
รูปที่ 4.13: พื้นที่ที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกในการโจมตีกรณีของการดักฟังข้อมูลของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โดยมีเกตเวย์ในตำแหน่งที่ 1, 9



รูปที่ 4.14: พื้นที่ที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกในการโจมตีกรณีของการดักฟังข้อมูลของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โดยมีเกตเวย์ในตำแหน่งที่ 2, 8

ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งคือในโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ในที่นี้คือขนาด  $3 \times 3$  และ  $3 \times 4$  จะพบว่า การเปลี่ยนตำแหน่งของเกตเวย์นั้น ไม่มีผลต่อค่า *ESS* กรณีของการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นหรือการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง แต่จะมีผลเฉพาะกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงและการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นเท่านั้น เพื่อความชัดเจนและไม่สับสนจะขออธิบายจากการโจมตีแบบดักฟัง เหตุที่การเปลี่ยนตำแหน่งของเกตเวย์ส่งผลต่อ *ESS* กรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลงเท่านั้น เพราะว่าในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกดักฟังข้อมูลในพื้นที่รอบ ๆ เกตเวย์เท่านั้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.13(a) และ 4.14(a) ทำให้ไม่ว่าจะย้ายตำแหน่งเกตเวย์ไปจุดใดผู้เล่นฝ่ายโจมตีก็จะยังคงโจมตีบริเวณรอบเกตเวย์ทั้งสองตัวเช่นเดิมเปรียบได้กับมีประตูทางหนึ่งอยู่ 2 ประตูเท่านั้นทำให้ค่าความน่าจะเป็นในการหนีไปทางเกตเวย์ตัวที่ 1 และ 2 มีค่าอย่างละครึ่งเท่ากันจึงเป็นผลทำให้ค่า *ESS* กรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเซตทั้งหมดเสมอ ถ้าหากว่าต้องการจะเพิ่มค่า *ESS* ของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นจะต้องเพิ่มที่จำนวนเกตเวย์แทน ต่อมาในส่วนการส่งข้อมูลฝั่งขาลงนั้นแผนที่ที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตีคือเลือกดักฟังข้อมูลบริเวณรอบ ๆ จุดเชื่อมต่อที่ติดกับเกตเวย์ดังรูปที่ 4.13(b) และ 4.14(b) จึงทำให้การที่เกตเวย์มีค่าองศาอิสระมากเช่นตัวอย่างที่เกตเวย์อยู่ตำแหน่งที่ 2, 8 ดังรูปที่ 4.14 เกตเวย์ทั้งสองตัวมีค่าองศาอิสระตัวละ 3 ซึ่งเมื่อเทียบกับโครงข่ายที่เกตเวย์ตั้งอยู่ตำแหน่งที่ 1, 9 ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเกตเวย์แต่ละตัวมีค่าองศาอิสระอย่างละ 2 แล้ว ทำให้ผู้โจมตีจากที่โจมตีแค่ 4 บริเวณดังรูปที่ 4.13(b) กลับต้องเพิ่มมาโจมตี 5 บริเวณดังรูปที่ 4.14(b) จึงเป็นเหตุทำให้เส้นทางส่งข้อมูลหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีมีหลากหลายเส้นทางมากขึ้นเป็นผลทำให้ค่า *ESS* ในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลงมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 4.2.4 ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายของโนดในโครงข่าย

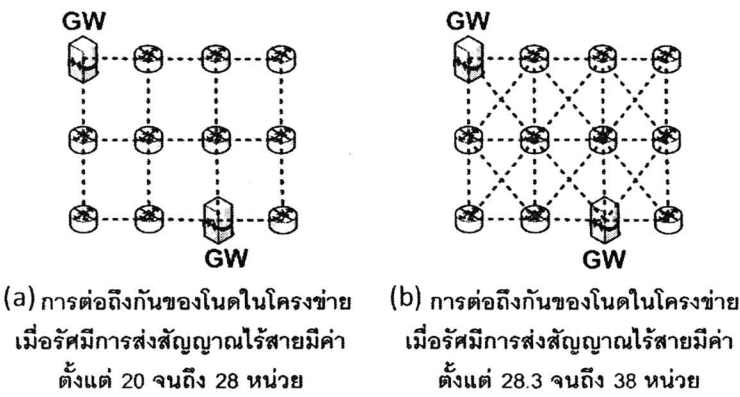


รูปที่ 4.15: โครงข่ายแบบตารางขนาด  $3 \times 4$  ที่ใช้ศึกษาผลกระทบต่อการเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายของโนดในโครงข่าย

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาต่อจากงานวิจัย [14] เพื่อศึกษาผลกระทบเมื่อเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณให้กับโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมช โดยทดสอบทั้งกรณีการดักฟังข้อมูลและการส่งสัญญาณรบกวน ซึ่งในกรณีของการส่งสัญญาณรบกวนนั้นจะให้รัศมีการส่งสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับรัศมีการส่งของโนดในโครงข่ายเพื่อให้ผู้เล่นฝ่าย

โจมตีมีความเท่าเทียมไม่เสียเปรียบผู้เล่นฝ่ายป้องกัน เนื่องจากต้องการที่จะศึกษาผลกระทบของผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางเปรียบเทียบกับสายอากาศระบุทิศทางจึงได้ทดสอบกับโครงข่ายที่ใช้ศึกษาผลกระทบของการเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายจากงานวิจัย [14] โดยโครงข่ายที่นำมาทดสอบนั้นเป็นโครงข่ายที่มีโนดที่ 1 และ 11 เป็นเกตเวย์ดังรูปที่ 4.15 ส่วนโนดที่เหลืออีก 10 โหนดจะเป็นจุดเชื่อมต่อผ่านทั้งหมด กำหนดให้ระยะทางระหว่างโนดเป็น 20 หน่วย ทั้งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน โดยโนดทุกโนดจะมีรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายเริ่มต้นจาก 20 จนถึง 39 หน่วย สาเหตุที่เพิ่มรัศมีการถึงแค่ 39 หน่วยเป็นเพราะถ้าหากเพิ่มรัศมีการเกิน 39 หน่วยไปแล้วนั้นจะทำให้โนดในแกนเดียวกันสามารถส่งสัญญาณข้ามไปถึงกันได้ ยกตัวอย่างเช่นจากรูป 4.15 โหนด 1 จะสามารถส่งสัญญาณไร้สายไปถึงโนดที่ 3 ได้ ทำให้ขัดกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 นั่นคือจะไม่สามารถรับค่าบิตวิธิต์ที่ทำให้ส่งข้อมูลไปยังโนดที่ 2 และโนดที่ 3 โดยใช้คนละเซกเตอร์ได้ ส่วนในกรณีของการส่งสัญญาณรับกวนก็ได้เพิ่มรัศมีการของสัญญาณรับกวนจาก 20 จนถึง 39 หน่วยเช่นกัน

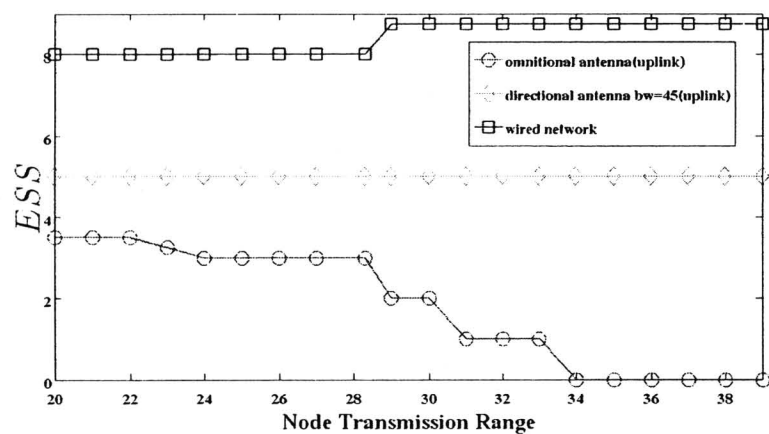
โดยในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศระบุทิศทางกับสายอากาศรอบทิศทางและแบบโครงข่ายแบบสาย (wired network) ซึ่งในกรณีของสายอากาศระบุทิศทางนั้นจะเลือกใช้บิตวิธิต์ที่มีค่า 45 องศา เพราะจำเมื่อเพิ่มรัศมีการแต่ละโนดเกิน 28.3 หน่วยจะทำให้การเชื่อมต่อถึงกันของโครงข่ายจากโครงข่ายแบบบางจะกลายเป็นโครงข่ายแบบหนาแน่นดังรูปที่ 4.16 เมื่อโครงข่ายมีการเชื่อมต่อกันแบบรูปที่ 4.16(b) แล้ว ค่าบิตวิธิต์ที่ค่ามากที่สุดที่ไม่ทำให้เซกเตอร์จากจุดเชื่อมต่อต้นทางเดียวกันซ้อนทับกันจะมีค่าเท่ากับ 45 องศาทำให้กำหนดค่าบิตวิธิต์ที่ 45 องศาเป็นตัวแปรคงที่



รูปที่ 4.16: การต่อถึงกันที่เปลี่ยนไปเมื่อโนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชมีรัศมีการส่งสัญญาณเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มรัศมีการส่งของโนดแต่ละโนดแล้วจะสามารถแยกวิเคราะห์แนวโน้มที่เกิดขึ้นได้ 3 กรณี คือ การดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น การดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงและการส่งสัญญาณรบกวน โดยในแต่ละกรณีจะวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศระบุทิศทางกับสายอากาศรอบทิศทางและยังมีการเทียบกับโครงข่ายแบบมีสายด้วย ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19

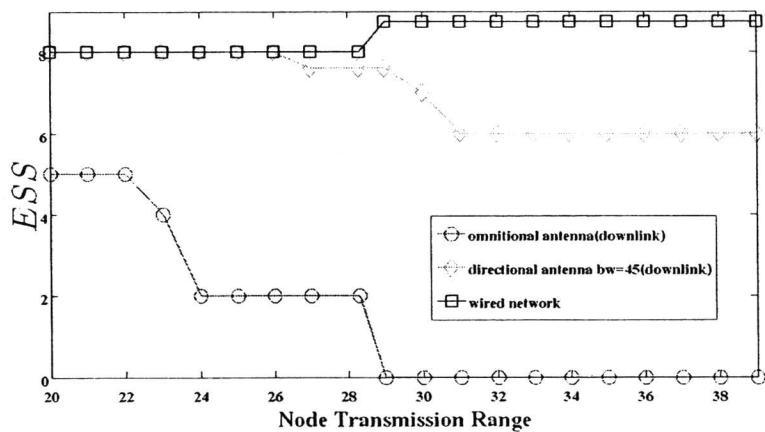
จากรูปที่ 4.17 จะแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณของโนดไร้สายในกรณีที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางนั้น การเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณของโนดแต่ละโนดจะทำให้เกิด



รูปที่ 4.17: ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีของโนดในโครงข่ายจากการถูกโจมตีแบบดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น

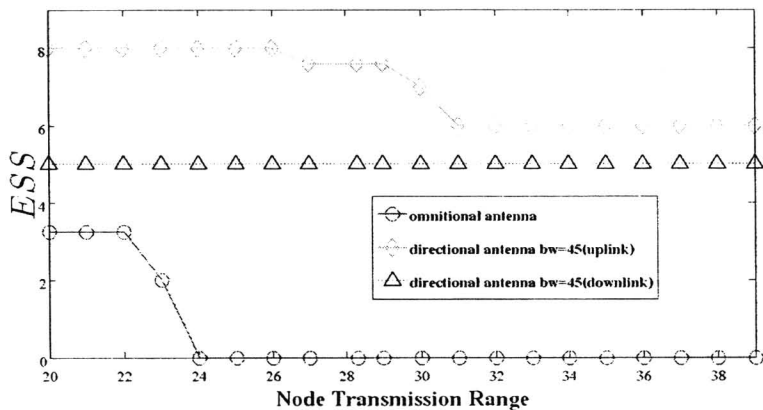
พื้นที่ที่ทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถดักฟังได้หลายคู่สายสื่อสารมากขึ้นทำให้ยิ่งเพิ่มรัศมีการส่งสัญญาณมากขึ้นเท่าไรค่า  $ESS$  ก็จะต้องลดลงไปเรื่อย ๆ จนค่าเป็นศูนย์ในที่สุด ซึ่งค่าที่ลดลงเป็นขั้น ๆ แสดงถึงการเกิดพื้นที่ใหม่ที่ทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถดักฟังข้อมูลได้มากขึ้น ส่วนในกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศระบุทิศทางนั้นไม่มีผลต่อ  $ESS$  เพราะเนื่องจากการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นนั้น ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกโจมตีพื้นที่รอบบริเวณเกตเวย์ทั้งสองตัวเสมอนั้นคือเลือกพื้นที่ระหว่างเกตเวย์ตัวที่แรกหรือตัวที่สอง ทำให้จำนวนเซสชันที่ปลอดภัยมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเซสชันทั้งหมดเสมอนั้นก็คือมีค่าเท่ากับ 5 โดยทราบเท่าที่การเพิ่มรัศมีของโนดทำให้บีมที่หันทิศทางเข้าเกตเวย์ตัวแรกไม่ไปซ้อนทับกับพื้นที่บีมจากโนดอื่น ๆ ที่ส่งเข้าหาเกตเวย์ตัวที่สองแล้ว ค่า  $ESS$  ของผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศระบุทิศทางจากการถูกโจมตีแบบดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นจะมีค่าคงที่ ส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายแบบมีสายปรากฏว่าค่า  $ESS$  ของโครงข่ายมีสายจะคงที่ตลอดจนถึงค่ารัศมีเกิน 28.3 เพราะการเพิ่มรัศมีของโนดนั้นจะมีผลต่อ  $ESS$  ของโครงข่ายแบบมีสายก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงข่ายเกิดขึ้นเท่านั้น ทำให้เมื่อรัศมีของทุกโนดเกิน 28.3 หน่วยแล้ว รูปแบบโครงข่ายจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.16 ทำให้ผู้เล่นฝ่ายป้องกันมีเส้นทางในการที่จะหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีมากยิ่งขึ้นจึงเป็นผลทำให้ค่า  $ESS$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อรัศมีการส่งสัญญาณมีค่ามากกว่า 28.3 หน่วย

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มรัศมีของการส่งสัญญาณทุกโนดในโครงข่ายไร้สายทำให้ค่า  $ESS$  ของผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่ใช้สายอากาศระบุทิศทางจากการถูกโจมตีแบบดักฟังในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงมีค่าลดลงเป็นขั้น ๆ เนื่องจากการเพิ่มรัศมีของโนดนั้นทำให้เกิดพื้นที่ที่ซ้อนทับกันของบีมเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ผู้เล่นโจมตีดักฟังข้อมูลได้มากขึ้นซึ่งเหมือนกับในกรณีที่เพิ่งกล่าวมา แต่ในกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาลงนี้  $ESS$  ของผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศระบุทิศทางนั้นจะมีค่าลดลงจาก  $ESS$  ของโครงข่ายแบบมีสายลดลงไปเรื่อย ๆ จนหยุดที่ค่าค่าหนึ่งซึ่งหมายความว่า การเพิ่มรัศมีของโนดไร้สายนั้นไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ซ้อนทับกันของบีมที่จะทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถโจมตีได้ร้ายแรงมากขึ้นไปกว่านี้ ซึ่งจะแตกต่าง



รูปที่ 4.18: ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีของโนดในโครงข่ายจากการถูกโจมตีแบบดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาส่ง

กับกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศรอบทิศทางซึ่งเมื่อเพิ่มรัศมีของโนดไปถึงค่าที่ทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถโจมตีจุดเชื่อมต่อทุกจุดได้พร้อมกันจึงทำให้ค่า  $ESS$  ในกรณีนี้เป็นศูนย์

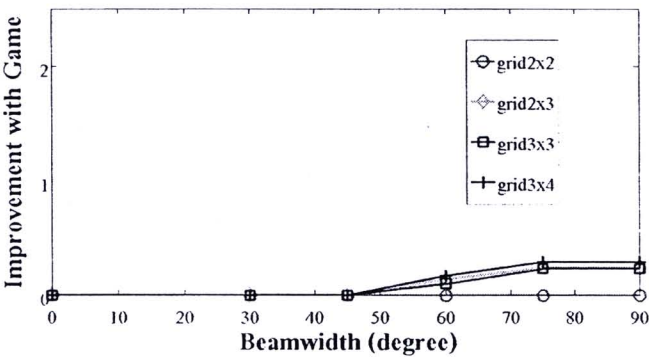


รูปที่ 4.19: ผลกระทบของการเพิ่มรัศมีของโนดในโครงข่ายจากการถูกโจมตีแบบส่งสัญญาณรบกวน

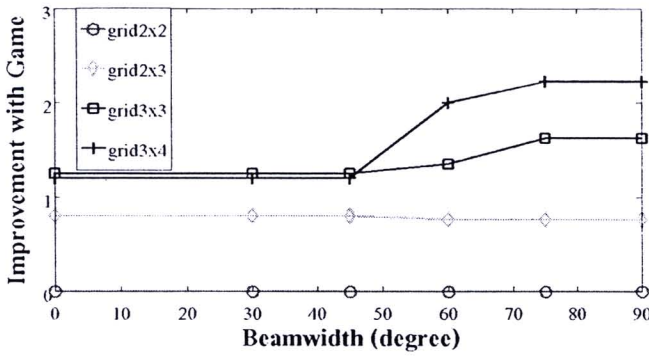
จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าค่า  $ESS$  ที่เกิดจากการถูกส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลทั้งฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลงมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งแตกต่างจากค่า  $ESS$  กรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้สายอากาศรอบทิศทางซึ่งในงานวิจัยที่ [14] สรุปไว้ว่าการส่งสัญญาณรบกวนนั้นผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะคำนึงแต่รัศมีการส่งของสัญญาณรบกวนเท่านั้น แต่ไม่ได้คำนึงถึงพื้นที่รัศมีของโนดที่ใช้ส่งข้อมูลในโครงข่าย ซึ่งแตกต่างจากการกรณีที่ใช้สายอากาศระบุทิศทางตรงที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะไม่ได้เพียงคำนึงถึงแต่รัศมีของสัญญาณรบกวนที่จะต้องครอบคลุมโนดที่จะโจมตีเท่านั้น แต่จะต้องอยู่ในตำแหน่งพื้นที่ปริมที่โนดภาครับนั้นหันทิศทางมาเพื่อรับปริมจากโนดภาคส่งด้วยถึงจะสามารถรบกวนสัญญาณได้สำเร็จ โดยผลการทดสอบกรณีการส่ง

สัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลงนั้นจะกลับกันกับของการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงและฝั่งขาขึ้นซึ่งตามที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว

4.2.5 ผลกระทบ ต่อ ESS ใน กรณี ผู้ เล่น ฝ่าย ป้อง กั้น ส่ง ข้อมูล แต่ละ ทิศ ทาง ด้วย ความน่าจะเป็นแบบยูนิฟอร์ม



รูปที่ 4.20: ผลต่างระหว่าง ESS ในกรณีผู้เล่นฝ่ายป้องกันส่งข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีเกมกับการส่งแบบยูนิฟอร์มในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น



รูปที่ 4.21: ผลต่างระหว่าง ESS ในกรณีผู้เล่นฝ่ายป้องกันส่งข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีเกมกับการส่งแบบยูนิฟอร์มในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของ ESS ในกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันส่งข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีเกมกับ ESS ที่ส่งแบบยูนิฟอร์มเทียบกับค่าบีมวิดท์ แสดงให้เห็นว่าในกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น เมื่อค่าบีมวิดท์ต่ำกว่า 45 องศา การส่งข้อมูลแบบทฤษฎีเกมจะไม่ได้เพิ่มความสามารถในการหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตี นั่นก็เพราะว่าจากผลที่กล่าวใน หัวข้อ 4.2.1 ทำให้รู้ว่าแผนที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายป้องกันคือการส่งข้อมูลไปยัง GW 2 ตัวแบบสุ่ม ซึ่งการเลือกรูปแบบทรีในการส่งก็ไม่ได้แตกต่างจากการส่งแบบยูนิฟอร์ม ส่วนในกรณีเมื่อบีมวิดท์มีค่ามากกว่า 45 องศา จะเห็นได้ว่าในโครงข่ายตารางขนาด 2x3,

3x3, 3x4 การส่งแบบทฤษฎีเกมจะสามารถเพิ่มความสามารถในการหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีได้ เนื่องจากบีมวิถ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดพื้นที่ที่เกิดจากการซ้อนทับกันของบีมแล้วทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกพื้นที่นั้นในการดักฟังแล้วได้จำนวนเซสชันที่มากขึ้น ซึ่งถ้าผู้เล่นฝ่ายป้องกันยังคงส่งข้อมูลแบบ ยูนิฟอร์มแล้ว จะทำให้จำนวนเซสชันที่ปลอดภัยจะน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนเซสชันทั้งหมด การส่งแบบทฤษฎีเกมจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ในกรณีนี้ อย่างไรก็ตามในโครงข่ายตารางขนาด 2x2 จะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลแบบทฤษฎีเกมไม่ได้เพิ่มความสามารถในการหลบหลีกผู้โจมตีได้เลย เพราะว่าโครงข่ายมีขนาดเล็กมากจนไม่ว่าผู้เล่นฝ่ายป้องกันจะพยายามส่งข้อมูลด้วยทฤษฎีเกมแบบไหนก็ไม่สามารถหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีได้ดีไปกว่าการส่งข้อมูลแบบยูนิฟอร์ม

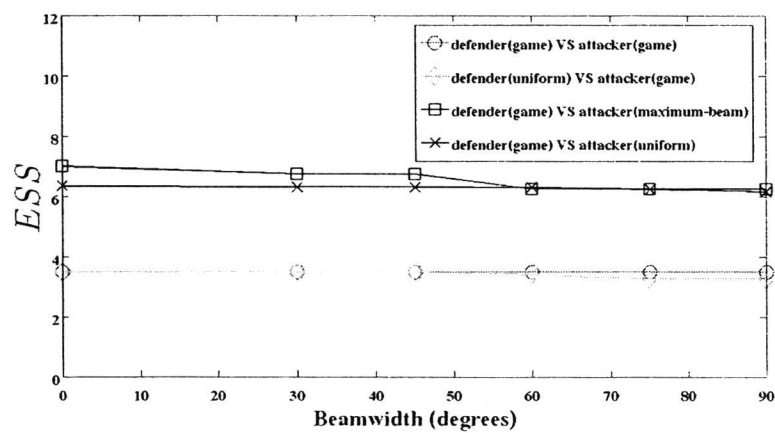
เมื่อพิจารณาการส่งข้อมูลฝั่งขาลงพบว่าการส่งข้อมูลแบบทฤษฎีเกมจะเพิ่มความสามารถในการหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีได้มากกว่าในกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นมาก เนื่องจากในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นนั้น แผนการเล่นที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตีคือเลือกพื้นที่ที่เกิดจากบีมที่ส่งมาจากจุดเชื่อมต่อแต่ละตัวซ้อนทับกันมากที่สุด ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นหลุมพรางที่อยู่ตามเส้นทางต่าง ๆ ทำให้ถ้าหากผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกส่งข้อมูลแบบยูนิฟอร์มแล้ว หมายความว่า จะเดินไปในทุกเส้นทางด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากันซึ่งจะมีโอกาสตกหลุมพรางได้มากกว่าในกรณีที่ส่งข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีเกมซึ่งจะสามารถหลบหลีกเส้นทางที่คิดว่าจะมีหลุมพรางได้

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความสามารถในการหลบหลีกของการส่งข้อมูลด้วยทฤษฎีเกมเทียบกับบีมวิถ์ส่วนใหญ่่นั้นจะเป็นฟังก์ชันเพิ่มแบบขั้นบันได ซึ่งหมายความว่ายิ่งบีมวิถ์มีค่ามากขึ้นก็จะยิ่งเพิ่มหลุมพรางในโครงข่ายมากขึ้นด้วยทำให้การส่งข้อมูลแบบทฤษฎีเกมจึงยังจำเป็นและยังเพิ่มความสามารถในการหลบหลีกได้มากขึ้นเรื่อย ๆ แต่อย่างไรก็ตามในโครงข่ายตารางขนาด 2x3 กรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาลง กลับพบว่า การส่งข้อมูลแบบทฤษฎีเกมแทบจะไม่เพิ่มความสามารถในการหลบหลีกให้มากขึ้นเลยเมื่อบีมวิถ์มีค่ามากขึ้น เพราะจากรูปที่ 4.3 ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกดักฟังในพื้นที่ระหว่างจุดเชื่อมต่อ 2 และจุดเชื่อมต่อ 5 เสมอ เปรียบเสมือนการมีหลุมพรางอยู่ระหว่างเส้นทางและจำนวนเส้นทางนั้นมีน้อยมากเมื่อเทียบกับในโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 และ 3x4 ทำให้ไม่ว่าการส่งข้อมูลแบบทฤษฎีเกมจะพยายามหลบหลีกหลุมพรางอย่างไร แต่ด้วยจำนวนเส้นทางที่น้อยจึงไม่สามารถหลบหลีกได้ดีไปกว่านี้ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าสถานการณ์ไหนผู้เล่นฝ่ายป้องกันควรจะส่งข้อมูลแบบทฤษฎีเกมและสถานการณ์ไหนควรจะส่งข้อมูลแบบยูนิฟอร์ม ทำให้สามารถเลือกรูปแบบในการส่งข้อมูลได้เหมาะสมกับสถานการณ์

#### 4.2.6 ผลกระทบต่อ ESS ในกรณีผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกพื้นที่ในการโจมตีแบบยูนิฟอร์ม และแบบพื้นที่ทับซ้อนบีมที่มากที่สุด

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเป็นการเทียบความแตกต่างระหว่างผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่ใช้ทฤษฎีเกมในการเลือกรูปแบบทริกกับการเลือกรูปแบบทริกแบบยูนิฟอร์ม ส่วนในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการเลือกรูปแบบพื้นที่โจมตีของผู้เล่นฝ่ายโจมตี ซึ่งจะมีวิธีเลือก 3 แบบ แบบแรกคือแบบทฤษฎีเกม แบบที่สองคือแบบพื้นที่ของบีมที่มีการทับซ้อนมากที่สุด หมายถึงผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกตำแหน่งโจมตีในพื้นที่ที่มีบีมซ้อนทับกันมากที่สุดโดยถ้าเกิดมีพื้นที่

ซ้อนทับกันของบีมมากกว่า 1 ตำแหน่งก็จะทำการแบ่งค่าความน่าจะเป็นในการเลือกพื้นที่นั้น ๆ เท่ากันและแบบสุดท้ายคือแบบยูนิฟอร์มหมายถึงผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกพื้นที่ในการโจมตีทั้งหมดด้วยค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากัน โดยจะยกตัวอย่างผลการทดสอบของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 ดังรูปที่ 4.7 กำหนดให้ทุกโนดมีระยะห่างกัน 20 หน่วยและให้รัศมีการส่งสัญญาณไร้สายเท่ากับ 25 หน่วย โดยมีเกตเวย์ 2 ตัวอยู่ที่มุมซ้ายบนและมุมขวาล่าง ทำการทดสอบ 4 กรณีโดย กรณีแรกจะเป็นกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันและฝ่ายโจมตีใช้ทฤษฎีเกมในการเลือกแผนของตัวเองทั้งคู่ กรณีที่สองจะเป็นกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันเลือกแผนแบบยูนิฟอร์มส่วนผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกโจมตีแบบทฤษฎีเกม กรณีที่สามจะเป็นกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้ทฤษฎีเกมในการเลือกแผนส่วนผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกพื้นที่ที่เกิดการซ้อนทับกันของบีมมากที่สุด และกรณีสุดท้ายจะเป็นกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้ทฤษฎีเกมในการเลือกแผนส่วนผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะเลือกพื้นที่โจมตีเป็นแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งจะแสดงผลการทดสอบแยกเป็นการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและการส่งข้อมูลฝั่งขาลงตามลำดับดังรูปที่ 4.22 และ 4.23

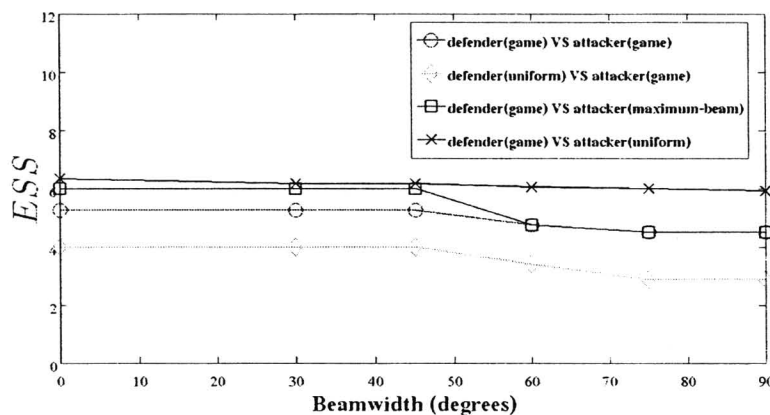


รูปที่ 4.22: ความแตกต่างของค่า ESS เมื่อผู้เล่นแต่ละฝ่ายเลือกรูปแบบแผนการเล่นด้วยวิธีต่าง ๆ กรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและกรณีการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่ากรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นนั้นที่ค่าบีมวิธต่ำกว่า 45 องศา ผู้เล่นฝ่ายโจมตีที่เลือกพื้นที่ดักฟังข้อมูลด้วยความน่าจะเป็นแบบยูนิฟอร์มจะสามารถดักฟังข้อมูลได้มากกว่าผู้โจมตีที่เลือกพื้นที่ในการดักฟังแบบพื้นที่ซ้อนทับกันของบีมมากที่สุด เพราะว่าจากหัวข้อที่ 4.2.1 ทำให้ทราบว่าพื้นที่ดักฟังที่ดีที่สุดของผู้โจมตีคือพื้นที่ที่ซ้อนทับกันของบีมบริเวณรอบ ๆ เกตเวย์ แต่ในที่นี้พื้นที่ซ้อนทับกันมากที่สุดของบีมกลับไปอยู่บริเวณของจุดเชื่อมต่อที่อยู่ตรงกลางของโครงข่ายทำให้ผู้โจมตีดักฟังข้อมูลได้น้อยกว่าการเลือกพื้นที่แบบสุ่มหรือแบบยูนิฟอร์ม แต่เมื่อบีมวิธยิ่งกว้างทำให้เกิดพื้นที่ในการซ้อนทับกันของบีมมากขึ้นเป็นผลให้เกิดพื้นที่ทับซ้อนของบีมบริเวณรอบเกตเวย์เพิ่มขึ้นทำให้ผู้โจมตีที่เลือกพื้นที่การซ้อนทับกันของบีมมากที่สุดสามารถดักฟังข้อมูลได้มากขึ้นเท่ากับการเลือกพื้นที่แบบสุ่ม ส่วนในกรณีของการส่งสัญญาณรบกวนนั้นจะเหมือนกับในกรณี

ของการดักฟังข้อมูลแต่บีมที่เลือกเพื่อดักฟังข้อมูลนั้นจะเปลี่ยนเป็นการส่งสัญญาณรบกวนไปยังบีมที่หันมารับข้อมูลของโนดปลายทาง

ยิ่งไปกว่านั้นจากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าในโครงข่ายนี้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเป็นฝ่ายที่ต้องการใช้ทฤษฎีเกมมากกว่าผู้เล่นฝ่ายป้องกัน เพราะในกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกพื้นที่ในการโจมตีแบบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ทฤษฎีเกมค่า  $ESS$  จะแตกต่างเมื่อเทียบกับตอนใช้ทฤษฎีเกมมากกว่าความแตกต่างกรณีผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่ใช้ทฤษฎีเกมกับไม่ใช่ทฤษฎีเกม นั้นหมายความว่ากรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นหรือการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงพื้นที่ในการโจมตีที่ดีที่สุดของผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะมีจำนวนน้อยและจำเป็นที่จะต้องนำทฤษฎีเกมมาใช้ ซึ่งพื้นที่นั้นก็คือพื้นที่บริเวณรอบเกตเวย์ ผิดกับกรณีของผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่สามารถส่งข้อมูลรูปแบบหรือออกไปแบบสุ่มซึ่งอาจจะได้ผลดีไม่เท่ากับการเลือกรูปแบบทริด้วยเกมแต่ค่าของ  $ESS$  ก็ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับกรณีของผู้เล่นฝ่ายโจมตี



รูปที่ 4.23: ความแตกต่างของค่า  $ESS$  เมื่อผู้เล่นแต่ละฝ่ายเลือกรูปแบบแผนการเล่นด้วยวิธีต่าง ๆ กรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงและกรณีการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น

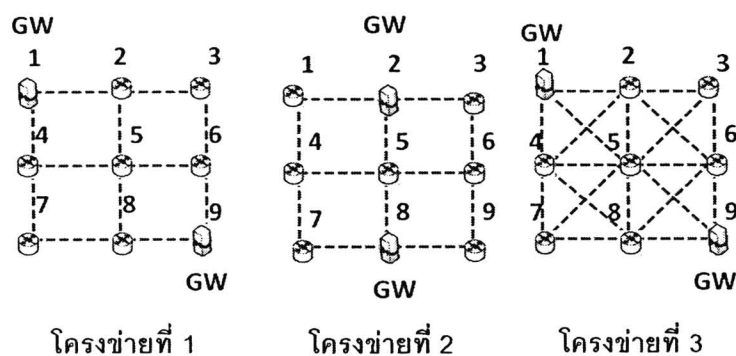
จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่ากรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงหรือการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นนั้น จากหัวข้อที่ 4.2.1 ทำให้ทราบว่าพื้นที่ในการโจมตีที่ดีที่สุดคือบริเวณพื้นที่ซ้อนทับกันของบีมที่จุดเชื่อมต่อแต่ละตัวเป็นผลทำให้การเลือกพื้นที่โจมตีด้วยจำนวนการซ้อนทับของบีมที่มากที่สุดสามารถโจมตีโครงข่ายได้ร้ายแรงกว่าในกรณีการเลือกพื้นที่โจมตีแบบสุ่มหรือแบบยูนิฟอร์ม

ยิ่งไปกว่านั้นจากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าในโครงข่ายนี้ผู้เล่นฝ่ายป้องกันเป็นฝ่ายที่ต้องการใช้ทฤษฎีเกมมากกว่าผู้เล่นฝ่ายโจมตี เนื่องจากความแตกต่างกันของค่า  $ESS$  ในกรณีที่ผู้เล่นฝ่ายป้องกันใช้และไม่ใช่ทฤษฎีเกมมีค่ามากกว่ากรณีที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีเลือกใช้พื้นที่ซ้อนทับของบีมมากที่สุดกับแบบทฤษฎีเกม เนื่องจากในหัวข้อที่ 4.2.5 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การส่งรูปแบบทริด้วยทฤษฎีเกมเทียบกับแบบยูนิฟอร์มในการดักฟังข้อมูลของการส่งข้อมูลฝั่งขาลงนั้นสามารถทำให้ค่า  $ESS$  สูงกว่าแบบยูนิฟอร์มมาก เนื่องจากกรณีนี้ผู้เล่นฝ่ายป้องกันต้องการทฤษฎีเกมมาเพื่อส่งข้อมูลหลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีที่โจมตีอยู่

บริเวณรอบ ๆ จุดเชื่อมต่อที่มีพื้นที่บ่มช้อนทับกันหนาแน่น ตรงกันข้ามกับผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่ถึงแม้จะเลือกพื้นที่ซ้อนทับกันของบีมมากที่สุดก็สามารถโจมตีข้อมูลที่ส่งไปหาจุดเชื่อมต่อได้ใกล้เคียงกับแบบทฤษฎีเกม

#### 4.2.7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบระดับความปลอดภัยที่ลดลงเมื่อเกิดความเสียหายกับจุดเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ในหัวข้อการทดสอบนี้จะเป็นการจำลองสถานการณ์ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชโดยจะคิดค่า *ESS* ที่เกิดขึ้นจากการที่มีจุดเชื่อมต่อหนึ่ง ๆ เกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ เพื่อวิเคราะห์ถึงความสำคัญของจุดเชื่อมต่อตัวนั้น ๆ ว่ามีผลต่อค่าความปลอดภัยของทั้งโครงข่ายมากน้อยแค่ไหน ทำให้ในทางปฏิบัติสามารถบำรุงรักษาและตรวจเช็คสภาพจุดเชื่อมต่อที่มีความสำคัญต่อระบบเพื่อให้โครงข่ายโดยรวมมีประสิทธิภาพในแง่ของความปลอดภัย ในหัวข้อนี้จะทดสอบโดยใช้โครงข่ายดังรูปที่ 4.24 โดยโนดแต่ละโนดจะวางห่างกัน 20 หน่วย และกำหนดให้รัศมีในการส่งสัญญาณไร้สายมีค่า 29 หน่วย ซึ่งจะทดสอบโดยการตัดจุดเชื่อมต่อออกจากโครงข่ายทีละตัวแล้วคำนวณค่า *ESS* ว่าเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อย หลังจากนั้นก็ได้กำหนดค่าบีมวิสัยของโนดในโครงข่ายให้มีค่าเท่ากันทุกโนดและมีค่าเป็น 0, 30, 45, 60, 75, 90 องศาตามลำดับ



รูปที่ 4.24: โครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 ที่ใช้เปรียบเทียบระดับความสำคัญของจุดเชื่อมต่อที่มีผลต่อความปลอดภัยของโครงข่าย

การคำนวณในหัวข้อนี้จะคำนวณค่าความปลอดภัยโดยคิดเป็นร้อยละจาก *ESS* ในกรณีของการดักฟังข้อมูลหารด้วยจำนวนเซสชันทั้งหมดเพื่อให้ค่าความปลอดภัยอยู่ในมาตรฐานเดียวกันซึ่งผลการทดสอบจะแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 ทำให้เห็นว่าการที่จุดเชื่อมต่อใดจุดเชื่อมต่อหนึ่งเกิดการเสียหายจะไม่มีผลต่อค่าความปลอดภัยของโครงข่ายในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นแต่อย่างใด เนื่องจากแผนการเล่นของผู้ดักฟังจะดักฟังบริเวณพื้นที่รอบเกตเวย์เท่านั้นทำให้ทราบใดที่มีเกตเวย์สองตัวถึงแม้จุดเชื่อมต่อใดจุดเชื่อมต่อหนึ่งจะเสียหายไปค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดจะยังคงมีค่า 50 เท่าเดิมเสมอ ส่วนในกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาลงนั้นการเสียหายของจุดเชื่อมต่อบางตัวจะมีผลต่อค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมด ซึ่งจาก

ตารางที่ 4.6: ค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดกรณีการดักฟังสัญญาณเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 1

| จุดเชื่อมต่อที่เสีย | $BW = \{0, 30, 45\}$ | $BW = \{60\}$     | $BW = \{75, 90\}$ |
|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| (TAP or TAP)        | (uplink,downlink)    | (uplink,downlink) | (uplink,downlink) |
| ไม่มี TAP เสีย      | (50.00,75.00)        | (50.00,67.85)     | (50.00,64.28)     |
| 3 or 5 or 7         | (50.00,75.00)        | (50.00,66.66)     | (50.00,58.00)     |
| 2 or 4 or 6 or 8    | (50.00,66.66)        | (50.00,61.00)     | (50.00,50.00)     |

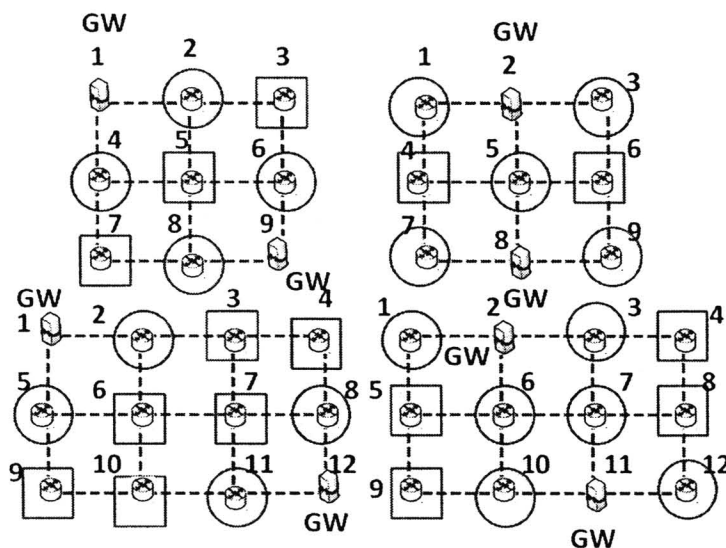
ตารางที่ 4.7: ค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดกรณีการดักฟังสัญญาณเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 2

| จุดเชื่อมต่อที่เสีย   | $BW = \{0, 30, 45\}$ | $BW = \{60\}$     | $BW = \{75, 90\}$ |
|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| (TAP or TAP)          | (uplink,downlink)    | (uplink,downlink) | (uplink,downlink) |
| ไม่มี TAP เสีย        | (50.00,75.00)        | (50.00,67.85)     | (50.00,64.28)     |
| 4 or 6                | (50.00,75.00)        | (50.00,66.66)     | (50.00,58.00)     |
| 1 or 3 or 5 or 7 or 9 | (50.00,66.66)        | (50.00,61.00)     | (50.00,50.00)     |

ผลการทดสอบทำให้เห็นว่าจุดเชื่อมต่อที่อยู่ติดกับเกตเวย์จะมีความสำคัญมากกว่าจุดเชื่อมต่อที่ไม่ติดกับเกตเวย์หรือกว่าอีกนัยหนึ่งได้ว่าถ้าตัดจุดเชื่อมต่อที่อยู่ติดกับเกตเวย์ออกแล้วจะทำให้ค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดลดลงมากกว่ากรณีที่ตัดจุดเชื่อมต่อที่ไม่ติดกับเกตเวย์ออก ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าการที่ตัดจุดเชื่อมต่อที่ติดกับเกตเวย์ออกนั้นเปรียบเหมือนกับการลดเส้นทางการส่งข้อมูลของผู้เล่นฝ่ายป้องกันที่ใช้หลบหลีกผู้เล่นฝ่ายโจมตีทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีมีโอกาสที่จะดักฟังข้อมูลได้มากขึ้นเป็นผลทำให้ค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดลดลง ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มของบีมวิدتจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความสำคัญของจุดเชื่อมต่อแต่จะมีผลต่อค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดซึ่งถ้ายังบีมวิدتที่มีค่าความเสียหายของจุดเชื่อมต่อนั้นจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของโครงข่ายมากตามไปด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบกับโครงข่ายแบบหนาแน่นตามโครงข่ายที่ 3 ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งกำหนดให้ค่าบีมวิدتที่ทุกโนดเป็น 45 องศาตามการปรับค่าบีมวิدتที่เหมาะสมตามที่เคยกล่าวมา ปรากฏว่าเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อ 2 หรือ 4 หรือ 6 หรือ 8 แล้วจะทำให้ค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดของการส่งข้อมูลฝั่งขาลงเป็น 72 และเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อ 3 หรือ 5 หรือ 7 จะทำให้ค่าร้อยละ *ESS* ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดของการส่งข้อมูลฝั่งขาลงเป็น 76 ซึ่งมีค่าสูงกว่าโครงข่ายที่ 1 ในรูป 4.24 ซึ่งเป็นโครงข่ายแบบเบาบาง แสดงให้เห็นว่าในสถานการณ์ที่จุดเชื่อมต่อบางจุดเกิดเสียหายในโครงข่ายแบบหนาแน่นนั้นจะยังมีค่าความปลอดภัยสูงกว่าโครงข่ายแบบเบาบางในสถานการณ์เดียวกัน เพราะการที่แต่ละโนดมีองศาอิสระที่มากกว่าทำให้เมื่อมีจุดเชื่อมต่อบางจุดเกิดเสียหายก็ยังมียังมีเส้นทางในการเลือกเพื่อหลบหลีกผู้โจมตีได้มากกว่า

ยิ่งไปกว่านั้นผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นถึงจุดเชื่อมต่อจะแบ่งความสำคัญออกเป็นสองระดับ คือ ระดับแรกจะเป็นจุดเชื่อมต่อที่อยู่ติดกับเกตเวย์ซึ่งเมื่อติดจุดเชื่อมต่อใดจุดเชื่อมต่อหนึ่งออกแล้วค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดจะเท่ากับการตัดจุดเชื่อมต่ออื่น ๆ ที่ติดกับเกตเวย์เช่นกัน ในทำนองเดียวกันความสำคัญระดับสองจุดเชื่อมต่อที่ไม่ติดกับเกตเวย์จะให้ค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดเท่ากันกับการตัดจุดเชื่อมต่อที่ไม่ติดกับเกตเวย์อื่น ๆ ซึ่งไม่ว่าจะอยู่ห่างจากเกตเวย์เป็นระยะเท่าใดก็ตามซึ่งจะแสดงจุดเชื่อมต่อที่สำคัญระดับแรกผ่านวงกลมสีน้ำเงินและที่สำคัญระดับสองด้วยสี่เหลี่ยมสีเขียวดังรูปที่ 4.25 โดยได้ทำการทดลองแบบเดียวกันกับโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x4 อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์นี้ใช้ได้กับโครงข่ายแบบตารางสมมาตรโดยถ้าเปลี่ยนรูปแบบของโครงข่ายแล้วก็จะมีผลต่อความสำคัญของจุดเชื่อมต่อแต่ละตัวแตกต่างกันแต่ในผลการทดสอบหัวข้อนี้ได้แสดงให้เห็นตัวอย่างของการคำนวณหาความสำคัญของแต่ละโนดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้ต่อไป



รูปที่ 4.25: ระดับความสำคัญของจุดเชื่อมต่อแต่ละตัวในโครงข่าย

ส่วนกรณีของการส่งสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาลง ในทำนองเดียวกันค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดของกรณีการส่งสัญญาณรบกวนฝั่งขาลงจะเท่ากับกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น โดยจะแสดงค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดของกรณีการรบกวนสัญญาณในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งระดับความสำคัญของโนดยังเหมือนกรณีการดักฟังข้อมูลในรูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.8: ค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดกรณีการส่งสัญญาณรบกวนเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 1

| จุดเชื่อมต่อที่เสีย | $BW = \{0, 30, 45\}$ | $BW = \{60\}$     | $BW = \{75, 90\}$ |
|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| (TAP or TAP)        | (uplink,downlink)    | (uplink,downlink) | (uplink,downlink) |
| ไม่มี TAP เสีย      | (75.00,50.00)        | (67.85,50.00)     | (64.28,50.00)     |
| 3 or 5 or 7         | (75.00,50.00)        | (66.66,50.00)     | (58.00,50.00)     |
| 2 or 4 or 6 or 8    | (66.66,50.00)        | (61.00,50.00)     | (50.00,50.00)     |

ตารางที่ 4.9: ค่าร้อยละ ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดกรณีการส่งสัญญาณรบกวนเมื่อตัดจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดออกของโครงข่ายแบบตารางขนาด 3x3 โครงข่ายที่ 2

| จุดเชื่อมต่อที่เสีย   | $BW = \{0, 30, 45\}$ | $BW = \{60\}$     | $BW = \{75, 90\}$ |
|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| (TAP or TAP)          | (uplink,downlink)    | (uplink,downlink) | (uplink,downlink) |
| ไม่มี TAP เสีย        | (75.00,50.00)        | (67.85,50.00)     | (64.28,50.00)     |
| 4 or 6                | (75.00,50.00)        | (66.66,50.00)     | (58.00,50.00)     |
| 1 or 3 or 5 or 7 or 9 | (66.66,50.00)        | (61.00,50.00)     | (50.00,50.00)     |

4.3 การวิเคราะห์โครงข่ายสุ่ม

ในหัวข้อการทดสอบนี้จะเป็นการสุ่มโครงข่ายโดยใช้ Waxman topology generator [15]–[17] เป็นตัวสร้างโครงข่ายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งโมเดลแบบ Waxman นี้จะมีค่าพารามิเตอร์อยู่ 4 ตัว ได้แก่ จำนวนของโนด,  $\alpha$ ,  $\beta$  และ โดเมน โดยในหัวข้อนี้จะแยกการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการทดสอบผลกระทบต่อ ESS ในโครงข่ายแบบสุ่มกรณีการดักฟังข้อมูลและส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบผลกระทบต่อ ESS กรณีการส่งสัญญาณรบกวนโดยจะเพิ่มขนาดรัศมีของสัญญาณรบกวนขึ้นเรื่อย ๆ ในการทดสอบแรกนั้นพารามิเตอร์ตัวแรกคือจำนวนโนดและจากโมเดลของ Waxman ความน่าจะเป็นที่โนด  $u$  จะสามารถเชื่อมต่อกับโนด  $v$  ได้จะเป็นไปดังสมการ

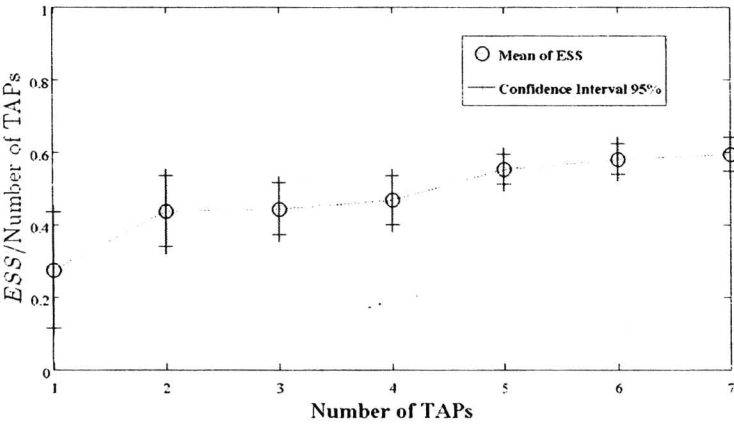
$$P(u, v) = \alpha e^{-\frac{d}{\beta L}}, 0 < \alpha, 1 \leq \beta$$

- $\alpha$  คือพารามิเตอร์ที่กำหนดจำนวนลิงค์โดยค่ายิ่งมากจำนวนลิงค์ (link) จะมากตาม
- $\beta$  คือพารามิเตอร์ควบคุมอัตราส่วนระหว่างลิงค์ที่ยาวต่อลิงค์ที่สั้น
- $d$  คือระยะห่างระหว่างโนด  $u$  และโนด  $v$
- $L$  คือระยะห่างของโนด 2 ตัวใด ๆ ที่มากที่สุดไนโครงข่าย



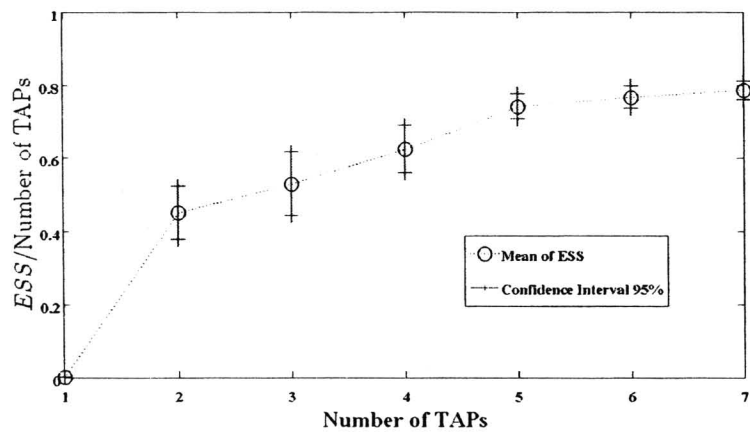
4.3.1 การวิเคราะห์ค่า ESS ในโครงข่ายสุ่มกรณีการดักฟังข้อมูล

กำหนดให้จำนวนโนดมีตั้งแต่ 3 โนดไปจนถึง 9 โนดส่วนค่า  $\alpha = 1$  และ  $\beta = 1$  เพื่อให้โครงข่ายที่สุ่มออกมาเป็นโครงข่ายที่ไม่มีโครงข่ายย่อยแยกออกเป็นส่วน ๆ และมีการเชื่อมต่อกันอย่างหนาแน่นจนใกล้เคียงการเชื่อมต่อแบบเมช ส่วนพารามิเตอร์สุดท้าย domain คือช่วงที่จะใช้ในการสุ่มตำแหน่งของโนดซึ่งได้กำหนดในการทดสอบนี้เป็นช่วงสี่เหลี่ยมโดยมีค่า 10 ถึง 20 หน่วยทั้งในแนวแกนตั้งและแกนนอน เมื่อทำการสุ่มตำแหน่งของโนดในโครงข่ายออกมาแล้วในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดเกตเวย์ 2 ตัวขึ้นจากโนดที่สุ่มมาได้โดยใช้ k-mean ซึ่งค่า  $k = 2$  และกำหนดให้รัศมีในการส่งสัญญาณไร้สายของโนดทุกตัวเท่ากันหมด จากการทดสอบโครงข่ายสุ่มโดยสุ่มมาจำนวนโนดละ 20 ตัวอย่างกรณีการดักฟังข้อมูลหลังจากนั้นได้คำนวณค่าเฉลี่ยของ ESS และคำนวณค่าความเชื่อมั่นที่ 95% (confidence interval 95%) และแยกกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลงได้ผลดังรูปที่ 4.26 และ 4.27



รูปที่ 4.26: อัตราส่วน ESS ต่อจำนวนจุดเชื่อมต่อทั้งหมดในโครงข่ายแบบสุ่มกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น

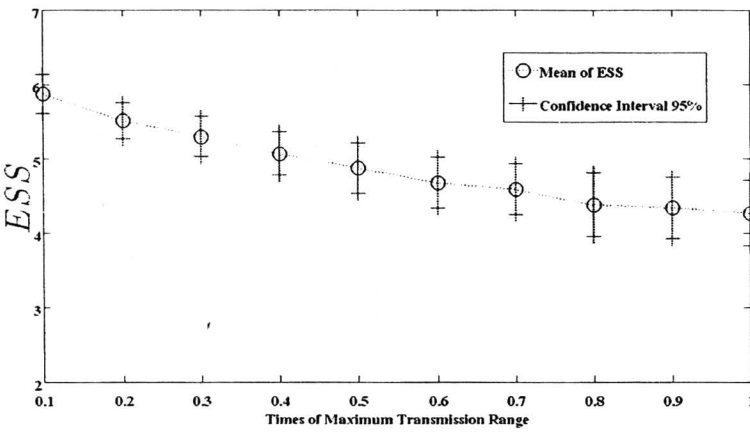
จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 ทำให้เห็นแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโนดแล้วจะทำให้อัตราส่วนค่าเฉลี่ย ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากการเพิ่มของจำนวนโนดนั้นทำให้จำนวนเส้นทางในการส่งข้อมูลเพื่อหลบหลีกผู้โจมตีมีมากขึ้น อีกข้อสังเกตหนึ่งคืออัตราส่วนค่าเฉลี่ย ESS ต่อจำนวนเซสชันทั้งหมดในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงจะมีค่ามากกว่าการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการดักฟังในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นนั้นพื้นที่ที่ดีที่สุดจะเป็นพื้นที่บริเวณรอบ ๆ เกตเวย์ โดยยังโครงข่ายไหนที่สุ่มออกมาแล้วมีเกตเวย์ติดกันและอยู่ตรงกลางของโครงข่ายโดยที่มีจุดเชื่อมต่ออยู่รอบ ๆ โครงข่ายนั้นค่า ESS จะต่ำมาก ในทางกลับกันการส่งข้อมูลฝั่งขาลงนั้นตำแหน่งที่ดีที่สุดในการดักฟังคือพื้นที่บริเวณจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ เป็นผลทำให้ยิ่งจำนวนโนดเพิ่มขึ้นโอกาสที่ผู้เล่นฝ่ายโจมตีจะไปดักฟังข้อมูลบริเวณจุดเชื่อมต่อที่มีมากขึ้นก็จะยิ่งยาก ความชันของกราฟในการส่งข้อมูลฝั่งขาลงจึงสูงกว่ากรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น



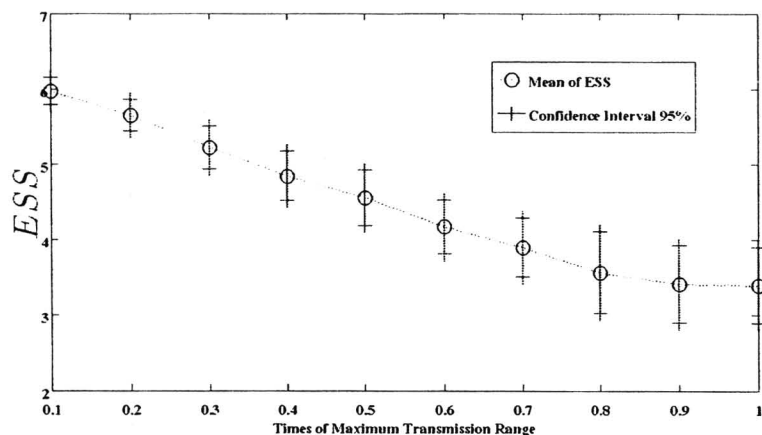
รูปที่ 4.27: อัตราส่วน *ESS* ต่อจำนวนจุดเชื่อมต่อทั้งหมดในโครงข่ายแบบสุ่มกรณีการดักฟังข้อมูลในการส่งข้อมูลฝั่งขา

4.3.2 การวิเคราะห์ค่า *ESS* ในโครงข่ายสุ่มกรณีการเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบผลกระทบต่ค่า *ESS* เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเพิ่มรัศมีของการส่งสัญญาณรบกวนขึ้นเรื่อย ๆ โดยทำการสุ่มโครงข่าย 9 โหนดขึ้นมาทั้งหมด 20 ตัวอย่างและกำหนดให้ค่า  $\alpha = 0.5$  และ  $\beta = 1$  ค่า domain เป็นระยะทาง 10 ถึง 20 หน่วยทั้งแนวแกนตั้งและแนวนอน ซึ่งกำหนดรัศมีในการส่งสัญญาณรบกวนโดยเริ่มจาก 1 ใน 10 เท่าของรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายของโหนดอื่น ๆ ในโครงข่ายและจะเพิ่มรัศมีสัญญาณรบกวนไปที่ละ 1 ใน 10 จนค่าเท่ากับรัศมีการส่งสัญญาณไร้สายของโหนดในโครงข่าย จากผลการทดสอบได้แสดงโดยการหาค่าเฉลี่ย *ESS* และหาค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งได้แยกกรณีของการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและฝั่งขาลงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28: ผลกระทบต่ค่า *ESS* เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้น



รูปที่ 4.29: ผลกระทบต่อค่า *ESS* เมื่อผู้เล่นฝ่ายโจมตีเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวนในการส่งข้อมูลฝั่งขาหลัง

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวนนั้นมีผลทำให้ค่า *ESS* ลดลงเรื่อย ๆ และถ้าหากผู้เล่นฝ่ายโจมตีต้องการจะส่งสัญญาณรบกวนในเครือข่ายจะต้องใช้รัศมีการส่งสัญญาณรบกวนเท่ากับรัศมีของการส่งสัญญาณไร้สายของโหนดอื่น ๆ เพื่อให้ผลของการโจมตีร้ายแรงที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นค่าเฉลี่ยของ *ESS* ในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาหลังจะต่ำกว่าในกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นและความชันของกราฟในการส่งข้อมูลฝั่งขาหลังจะสูงกว่า นั่นหมายความว่า การเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวนและการส่งสัญญาณรบกวนมีผลต่อการส่งข้อมูลฝั่งขาหลังมากกว่า เนื่องจากการส่งข้อมูลฝั่งขาหลังนั้นเกตเวย์จะส่งข้อมูลไปยังจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ ทำให้ผู้เล่นฝ่ายโจมตีสามารถส่งสัญญาณรบกวนจุดเชื่อมต่อที่ติดกับเกตเวย์ได้ง่ายโดยไปอยู่ในตำแหน่งพื้นที่บีมที่จุดเชื่อมต่อตัวนั้นหันมารับข้อมูลที่ส่งมาจากเกตเวย์ ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นผู้โจมตีจะต้องไปส่งสัญญาณรบกวนจุดเชื่อมต่ออื่น ๆ ในเครือข่ายแทนทำให้มีโอกาสที่จะรบกวนยากกว่า และในการเพิ่มรัศมีของสัญญาณรบกวนของการส่งข้อมูลฝั่งขาหลังนั้นด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการรบกวนสัญญาณได้ร้ายแรงกว่าในการส่งข้อมูลฝั่งขาขึ้นความชันของกราฟจึงมีค่าสูงกว่า