บทที่ 3
การคิดค่าความยุติธรรมของเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจและการปรับแต่งซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทู

เนื่องจากพฤติกรรมการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ ส่งด้วยวิธีการส่งต่อกันเป็นทอดๆ ผ่านโหนดที่อยู่ในเครือข่าย ทำให้โหนดที่เข้าร่วมกับเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจจะได้รับประโยชน์จากการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายและโหนดจะต้องเสียทรัพยากรจากการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่นๆ ซึ่งผลประโยชน์ที่โหนดได้รับเปรียบเทียบกับสิ่งที่โหนดเสียไปจะเป็นแรงจูงใจของโหนดในการทำงานเพื่อเครือข่าย ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเสนอวิธีการวัดค่าความยุติธรรมในเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจในเชิงปริมาณ โดยแบ่งออกเป็น 1) ค่าความยุติธรรมในระดับโหนด และ 2) ค่าความยุติธรรมในระดับเครือข่าย ซึ่งค่าความยุติธรรมในระดับโหนดจะแสดงให้เห็นว่าแต่ละโหนดมีความได้เปรียบหรือเสียเปรียบอย่างไร เมื่อโหนดเข้าร่วมกับเครือข่าย ความได้เปรียบของโหนดคือ การที่ข้อมูลถูกส่งผ่านเครือข่ายโดยการส่งต่อข้อมูลของโหนดระหว่างทาง ส่วนความเสียเปรียบของโหนดคือ การที่โหนดใช้พลังงานของโหนดไปกับการส่งต่อข้อมูลของโหนดอื่น และสำหรับค่าความยุติธรรมในระดับเครือข่ายจะแสดงให้เห็นว่า โหนดในเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจมีความร่วมมือกันช่วยส่งต่อข้อมูลผ่านเครือข่ายเป็นอย่างไร การวัดค่าความยุติธรรมในเชิงปริมาณนี้ทำให้เราสามารถระบุได้ว่าความยุติธรรมที่วัดได้ มีความแตกต่างกันมากน้อยอย่างไร

เนื่องจากความสะดวกในการใช้งานเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ (Mobile Ad Hoc Network – MANET) และความแพร่หลายของอุปกรณ์เครือข่ายไร้สาย รวมถึงประสิทธิภาพที่ดีในการส่งข้อมูล [5] ทำให้เครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจสามารถนำมาใช้งานได้ในพื้นที่ที่ไม่มีโครงข่าย (No Infrastructure) เช่น พื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติ พื้นที่ทางการทหาร การนำเครือข่ายไปใช้งานในลักษณะนี้ผู้ใช้งานเครือข่ายทุกคนเหล่านี้ล้วนมีจุดมุ่งหมายไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงเกิดความร่วมมือร่วมใจกันในเครือข่ายและผู้ใช้เต็มใจที่จะให้ทรัพยากรของตัวเองกับเครือข่าย แต่สำหรับการใช้งานในกรณีอื่นๆ เช่น การเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจในบริเวณสนามบิน ผู้ใช้อาจไม่เต็มใจที่จะส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่นๆ เนื่องจากต้องการจะประหยัดพลังงานไว้ส่งข้อมูลของตัวเอง ซึ่งการไม่ให้ความร่วมมือกับเครือข่ายนี้อาจจะส่งผลกระทบให้ประสิทธิภาพของเครือข่ายลดลงได้ มีงานวิจัยจำนวนมากได้คิดค้นวิธีการจูงใจให้โหนดหันมาให้ความร่วมมือในการส่งต่อข้อมูลบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจมากขึ้น เพื่อทำให้ทรูพุตของเครือข่ายสูงขึ้น แต่งานวิจัยเหล่านี้แบ่งพฤติกรรมของโหนดออกเป็น 2 ประเภทเท่านั้น ได้แก่ โหนดที่ให้ความร่วมมือกับเครือข่าย และโหนดที่ไม่ให้ความร่วมมือกับเครือข่ายเลยหรือโหนดที่เห็นแก่ตัว เนื่องจากปัจจัยต่างๆ ของเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ เช่น การเคลื่อนที่และ

ตำแหน่งของโหนดทำให้บางครั้งโหนดไม่สามารถให้ความร่วมมือกับเครือข่ายได้ตามที่โหนดต้องการ และจากความเป็นอิสระจากกันของโหนดในเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจจึงอาจทำให้โหนดให้ความร่วมมืออย่างไม่เต็มที่ก็ได้

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของความยุติธรรมในเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ เช่น วิธีการคำนวนหาค่าความยุติธรรม การแยกพลังงานที่โหนดใช้ออกเป็นประเภทต่างๆ เป็นต้น และองค์ประกอบต่างๆ ของซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทูที่เกี่ยวข้องกับการคิดพลังงานของโหนดเคลื่อนที่ เช่น ความหมายและรายละเอียดต่างๆ ของเทรสไฟล์ การแก้ไขซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทูเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการคิดพลังงานตามที่ต้องการ

3.1 ความเป็นธรรมของการส่งข้อมูลบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ

เนื่องจากการส่งข้อมูลบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ เป็นการส่งข้อมูลแบบมัลติฮ๊อป ข้อมูลจากต้นทางจะถูกส่งไปยังปลายทางโดยผ่านการส่งต่อของโหนดระหว่างทาง โดยโหนดต้นทางจะส่งข้อมูลให้กับโหนดข้างเคียงและโหนดนั้นก็จะส่งข้อมูลต่อไปให้กับโหนดข้างเคียงของมัน จนกระทั่งข้อมูลเดินทางถึงปลายทาง โดยโหนดต้นทางจะเลือกว่าจะส่งข้อมูลให้กับโหนดเพื่อนบ้านใดนั้นขึ้นอยู่กับเราติ้งโปรโตคอลที่โหนดเลือกใช้ เมื่อโหนดเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจโหนดจะได้รับประโยชน์จากการรับหรือส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ และโหนดจะต้องใช้พลังงานของตนเองเพื่อส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่นๆในเครือข่าย ดังนั้นค่าความเป็นธรรมของการส่งข้อมูลบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจสามารถใช้เปรียบเทียบประโยชน์ที่โหนดได้รับและสิ่งที่โหนดเสียไปจากการเข้าร่วมเครือข่าย และนอกจากนี้ยังมีความยุติธรรมที่แสดงถึงภาพรวมของเครือข่ายว่าโหนดที่อยู่ในเครือข่ายมีพฤติกรรมการร่วมมือกันในเครือข่ายเป็นอย่างไร สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เราใช้พลังงานเป็นตัวชี้วัดถึงประโยชน์ที่โหนดเสียหรือได้รับ ดังนั้นเราจึงมีค่าความยุติธรรมบนเครือข่ายอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

3.3.1 ความเป็นธรรมในมุมมองของโหนด (Node fairness) คือ ค่าความเป็นธรรมที่โหนดเปรียบเทียบสิ่งที่โหนดได้รับและสิ่งที่โหนดเสียจากการเข้าร่วมเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ สิ่งที่โหนดได้รับประโยชน์คือ ข้อมูลที่รับหรือส่งผ่านเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ ซึ่งสิ่งที่โหนดเสียไปคือ การส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่น เพราะในการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่นโหนดจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรของโหนดในการดำเนินงาน และเนื่องจากพลังงานจัดเป็นทรัพยากรที่สำคัญที่สุดบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจเราจึงใช้พลังงานในการคิดสิ่งที่โหนดได้รับและสิ่งที่โหนดเสียไป การคำนวนหาค่าความยุติธรรมบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ จะคำนวนมากจากพลังงานที่โหนดใช้ไปในการส่งต่อข้อมูลประเภทเพย์โหลด (Pay load) เท่านั้น เนื่องจากข้อมูล

ประเภทนี้สามารถระบุผู้ที่ได้รับประโยชน์จากเครือข่ายได้อย่างชัดเจน ค่าความยุติธรรมในระดับโหนดสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$Node\ Fairness_i = \frac{n(Take_i - Give_i)}{\sum_{j=1}^{n}(Take_j - Give_j)} \quad (3.1)$$

โดยค่า

- Give คือ พลังงานที่โหนดระหว่างทางใช้ในการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง โดยถือว่าเป็นพลังงานที่โหนดระหว่างทางใช้เพื่อโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง
- Take คือ พลังงานที่โหนดระหว่างทางใช้ไปสำหรับการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง โดยถือว่าเป็นประโยชน์ที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางได้รับ
- n คือ จำนวนโหนดทั้งหมดที่อยู่ในเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ
- i คือ โหนดที่ต้องการหาค่าความยุติธรรมในระดับโหนด

ถ้าโหนดบนเครือข่ายมีค่าความยุติธรรมในระดับโหนดเป็นบวก แสดงว่าโหนดได้รับประโยชน์จากเครือข่าย โดยการที่ข้อมูลของโหนดถูกส่งต่อผ่านเครือข่ายโดยโหนดระหว่างทางทำให้โหนดระหว่างทางต้องเสียพลังงานเพื่อการส่งต่อข้อมูลมากกว่าพลังงานที่โหนดใช้ไปในการส่งต่อข้อมูลของโหนดอื่นๆ ในทางกลับกันถ้าค่าความยุติธรรมในระดับของโหนดมีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าโหนดต้องใช้พลังงานในการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่น มากกว่าพลังงานที่โหนดอื่นใช้ไปสำหรับการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนด

แต่ถ้าค่าความยุติธรรมในระดับโหนดมีค่าเป็นศูนย์ อาจจะเกิดจาก 2 กรณีคือ 1) โหนดได้รับประโยชน์และเสียประโยชน์จากเครือข่ายเท่าเทียมกันหรือ 2) โหนดไม่ได้เข้าร่วมกับการส่งต่อข้อมูลผ่านเครือข่ายเลย

3.3.2 ความเป็นธรรมในระดับเครือข่าย (Network fairness) คือ ค่าที่แสดงให้เห็นภาพรวมเครือข่าย ว่ามีความร่วมมือร่วมใจในการส่งต่อข้อมูลของโหนดมากน้อยเพียงใด โดยค่าความยุติธรรมคิดจากการเปรียบเทียบพลังงานที่แต่ละโหนดใช้ไปเพื่อตนเองและใช้ไปเพื่อโหนดอื่น

$$Network\ Fairness = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Give_i - Itself_i)}{n} \quad (3.2)$$

โดยค่า

- Give คือ พลังงานที่โหนดระหว่างทางใช้ในการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง โดยถือว่าเป็นพลังงานที่โหนดระหว่างทางใช้เพื่อโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง
- Itself คือ พลังงานที่โหนดต้นทางใช้สำหรับการส่งข้อมูลของตนเอง หรือพลังงานที่โหนดปลายทางใช้เพื่อรับข้อมูลของตนเอง
- n คือ จำนวนโหนดทั้งหมดที่อยู่ในเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ

ถ้าเครือข่ายใดสามารถวัดค่าความยุติธรรมในระดับเครือข่ายได้เป็นบวกจะแสดงให้เห็นว่าโหนดในเครือข่ายนี้มีความร่วมมือในการส่งต่อข้อมูลเป็นอย่างดี เนื่องจากโหนดบนเครือข่ายนี้ได้ใช้พลังงานของโหนดไปกับการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่นมากกว่าการใช้พลังงานเพื่อส่งข้อมูลของโหนดเอง ซึ่งถ้าค่าความยุติธรรมในระดับเครือข่ายมีค่าติดลบจะหมายความว่าโหนดในเครือข่ายนี้ใช้พลังงานเพื่อการส่งข้อมูลของตนเองมากกว่าการส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดอื่น

3.2 พลังงานในซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทู

ซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทูพัฒนาโมเดลสำหรับการคำนวนค่าพลังงานของโหนดซึ่งก็คือเอ็นเนจีโมเดล โดยเอ็นเนจีโมเดลจะรับผิดชอบการคิดคำนวนและจัดการพลังงานทั้งหมดของโหนดบนการซิมมูเลชั่น เช่น การกำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นของโหนด การคำนวนการใช้พลังงานของแต่ละโหนด โดยการทำงานของเอ็นเนจีโมเดลคือไฟล์ ns/energymodel [.cc และ .h] และถูกเรียกใช้โดย ns/wireless-phy.cc, ns/cmu-trace.cc, ns/tcl/lib[ns-lib.tcl, ns-node.tcl, ns-mobilenode.tcl] พลังงานในเอ็นเอสทูเอ็นเนจีโมเดลจะลดลงก็ต่อเมื่อโหนดมีการรับหรือส่งข้อมูล

1) พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล ได้มาจากกำลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล (P_tx) หน่วยเป็นวัตต์คูณด้วยเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล หน่วยเป็นวินาที
2) พลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล ได้มาจากกำลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล (P_rx) หน่วยเป็นวัตต์คูณด้วย เวลาที่ใช้ในการรับข้อมูล หน่วยเป็นวินาที

โดยที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าต่างๆ ของพลังงานได้ผ่านทางโอทีซีแอลอินเทอร์เฟส (Otcl Interface) ที่กำหนดไว้ให้ เช่น ในรูปที่ 3.1 แสดงว่าในการซิมมูเลชั่นนี้ แต่ละโหนดมีพลังงานเริ่มต้น 10 จูล และใช้กำลังงานในการส่งข้อมูลที่ 0.6 วัตต์ และใช้กำลังงานในการรับข้อมูลที่ 0.3 วัตต์

```
$ns_ node-config -energyModel $energymodel \
                 -rxPower $p_rx 0.3\
                 -txPower $p_tx 0.6\
                 -initialEnergy $initialenergy 10
```

รูปที่ 3.1 การตั้งค่าพลังงานบนซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทู

3.3 วิธีการคิดค่าพลังงานที่ได้จากเอ็นเอสทู

เนื่องจากเราใช้พลังงานเป็นตัวชี้วัดในการคำนวนหาค่าความยุติธรรม ดังนั้นเราจำเป็นต้องทราบว่าแต่ละโหนดบนการทำซิมมูเลชั่นนั้นใช้พลังงานไปกับกิจกรรมใดเป็นจำนวนเท่าไร ซึ่งซิมมูเลชั่นเอ็นเอสทูแสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการซิมมูเลชั่นด้วยเทรสไฟล์ โดยมีรายละเอียดเช่น พลังงานของโหนดในขณะนั้น ตำแหน่งของโหนด รายละเอียดข้อมูลในชั้นแม็กเลเยอร์ เป็นต้น แต่เทรสไฟล์ที่เอ็นเอสทูเตรียมไว้ให้ ยังไม่มีข้อมูลของพลังงานตามที่เราต้องการ ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทู เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในเทรสไฟล์ตามที่เราต้องการ ซึ่งรายละเอียดของเทรสไฟล์มีอยู่บนเอ็นเอสทูมีดังนี้

3.3.1 ประเภทเพ็กเก็ตที่มีในงานวิจัยชิ้นนี้ เนื่องจากเราทดลองเพื่อหาความยุติธรรมที่เกิดขึ้นบนเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ ดังนั้นเราจึงมีการจำลองการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย โดยในการทดลองนี้ใช้ข้อมูลประเภทซีบีอาร์แทนข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการส่ง เครือข่ายจะต้องส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางตามเส้นทางของเราติ้งโปรโตคอล เครือข่ายค้นหาเส้นทางการส่งข้อมูลโดยการแลกเปลี่ยนเราติ้งเมสเสจระหว่าง และนอกจากนี้ยังมีเมสเสจของโปโตคอลต่างๆ ที่ทำให้เครือข่ายสามารถส่งข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์ ประเภทของเพ็กเก็จที่ปรากฏอยู่บนการซิมมูเลชั่นมีดังต่อไปนี้

1) **ซีบีอาร์ (CBR – Constant Bit Rate)** ใช้ในการส่งข้อมูลประเภทยูดีพี ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลในทิศทางเดียว คือจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยไม่มีการตอบกลับจากปลายทางมายังต้นทาง เราสามารถกำหนดค่าของซีบีอาร์ได้ดังนี้ จำนวนเพ็กเก็ตที่ต้องการส่งทั้งหมดใน 1 คอนเน็กชั่น ขนาดของเพ็กเก็ต จำนวนเพ็กเก็ตที่ส่งภายใน 1 วินาที (Interval)

2) **อาร์พ (ARP – Address Resolution Protocol)** เป็นโปรโตคอลสำหรับการจับคู่ระหว่างแม็กแอด เดรสกับไอพีแอดเดรส ซึ่งโปรโตคอลอาร์พบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจทำงานเหมือนกับบนเครือข่ายแลนอื่นๆ

3) **คอนโทรลแมสเสจ (Control Messge)** จากปัญหาโหนดที่ซ่อนอยู่ (Hidden Node Problem) ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุการชนกันของข้อมูลบนเครือข่ายแลนไร้สาย ดังนั้นมาตรฐานแลนไร้สายจึงได้พัฒนา คอนโทรลเมจเสจซึ่งประกอบไปด้วย รีเควสท์ทูเซ้น เคลียร์ทูเซ้น และแอ็คโนวเลจเม้นต์ เพื่อที่จะป้องกันปัญหา แต่ทางมาตรฐานไม่ได้บังคับว่าการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายแลนไร้สายทุกๆ ครั้งจะต้องใช้คอนโทรลแมสเสจ แต่โดยปกติแล้วเอ็นเอสทูจะใช้คอนโทรลแมสเสจกับทุกๆ การส่งข้อมูล ซึ่งสามารถยกเลิกได้โดยใช้คำสั่ง Mac/802_11 set RTSThreshold 3000 ซึ่งหมายความว่าให้ใช้คอนโทรลเมสเสจเมื่อเพ็กเก็ตที่จะส่งมีขนาดมากกว่า 3000 ไบต์ ซึ่งไม่สามารถเป็นไปได้สำหรับมาตรฐานแลนไร้สาย 802.11 ลงในไฟล์ซิมมูเลชั่น ตัวอย่างของคอนโทรลเมสเสจในเทรสไฟล์แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงการรับและส่งคอนโทรลเมสเสจประเภทรีเควสทูเซ้นและเคลียร์ทูเซ้นระหว่างโหนดที่ 31 และโหนดที่ 1

```
s -t 368.430266744 -Hs 31 -Hd -2 -Ni 31 -Nx 577.78 -Ny 412.87 -Nz 0.00 -Ne 4.038834 -Nl MAC -Nw --- -Ma 14be -Md 1 -Ms 1f -Mt 0
r -t 368.430619135 -Hs 1 -Hd -2 -Ni 1 -Nx 674.58 -Ny 346.58 -Nz 0.00 -Ne 5.393085 -Nl MAC -Nw --- -Ma 14be -Md 1 -Ms 1f -Mt 0
s -t 368.430629135 -Hs 1 -Hd -2 -Ni 1 -Nx 674.58 -Ny 346.58 -Nz 0.00 -Ne 5.393085 -Nl MAC -Nw --- -Ma 1384 -Md 1f -Ms 0 -Mt 0
r -t 368.430933526 -Hs 31 -Hd -2 -Ni 31 -Nx 577.78 -Ny 412.87 -Nz 0.00 -Ne 4.038532 -Nl MAC -Nw --- -Ma 1384 -Md 1f -Ms 0 -Mt 0
```

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของคอนโทรลเมสเสจในเทรสไฟล์

4) **เราติ้งเมสเสจ (Routing Message)** เป็นข้อมูลที่โหนดแลกเปลี่ยนกันเพื่อค้นหาเส้นทางสำหรับการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ ซึ่งในงานวิจัยนี้เราใช้ดีเอสอาร์เป็นเราติ้งโปรโตคอล ดังนั้นเราติ้งเมสเสจของโปรโตคอลดีเอสอาร์ เช่น ดีเอสอาร์เราติ้งรีเควสต์ ดีเอสอาร์เราติ้งรีพลาย เป็นต้น

3.3.2 เทรสไฟล์ของเอ็นเอสทู เทรสไฟล์ในส่วนของการทดลองเครือข่ายไร้สายพัฒนาโดยซีเอ็มยูโปรเจค ซึ่งปัจจุบันเป็นเทรสไฟล์เวอร์ชั่น 2 หรือเรียกว่านิวเทรสฟอร์เม็ต ซึ่งสามารถเรียกใช้เทรสใหม่ได้โดยเพิ่มคำสั่ง $ns use-newtrace ลงไปในไฟล์ซิมมูเลชั่น ในงานวิจัยนี้เราใช้เทรสไฟล์แบบใหม่ ซึ่งประกอบด้วยเทรส 3 ประเภทด้วยกัน

3.3.2.1 เทรสที่แสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนการซิมมูเลชั่น และรายละเอียดของเหตุการณ์เพื่อที่จะทราบว่าในระหว่างการซิมมูเลชั่นเกิดเหตุการณ์ใดขึ้นบ้าง ซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทูได้

จัดเตรียมเทรสไฟล์ที่แสดงรายละเอียดต่างๆ ของเหตุการณ์ไว้ รายละเอียดของเทรสไฟล์ เช่น เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นที่โหนดใด พลังงานของโหนดนั้นเป็นอย่างไร ข้อมูลที่ส่งเป็นข้อมูลประเภทใด ตัวอย่างของเทรสไฟล์แสดงไว้ในรูปที่ 3.3

```
s -t 0.267662078 -Hs 0 -Hd -1 -Ni 0 -Nx 5.00 -Ny 2.00 -Nz 0.00 -Ne
-1.000000 -Nl RTR -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 0.255 -Id -1.255 -It
message -Il 32 -If 0 -Ii 0 -Iv 32
s -t 1.511681090 -Hs 1 -Hd -1 -Ni 1 -Nx 390.00 -Ny 385.00 -Nz 0.00 -Ne
-1.000000 -Nl RTR -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 1.255 -Id -1.255 -It
message -Il 32 -If 0 -Ii 1 -Iv 32
s -t 10.000000000 -Hs 0 -Hd -2 -Ni 0 -Nx 5.00 -Ny 2.00 -Nz 0.00 -Ne
-1.000000 -Nl AGT -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 0.0 -Id 1.0 -It tcp -Il 1000 -If
2 -Ii 2 -Iv 32 -Pn tcp -Ps 0 -Pa 0 -Pf 0 -Po 0
r -t 10.000000000 -Hs 0 -Hd -2 -Ni 0 -Nx 5.00 -Ny 2.00 -Nz 0.00 -Ne
-1.000000 -Nl RTR -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 0.0 -Id 1.0 -It tcp -Il 1000 -If
2 -Ii 2 -Iv 32 -Pn tcp -Ps 0 -Pa 0 -Pf 0 -Po 0
r -t 100.004776054 -Hs 1 -Hd 1 -Ni 1 -Nx 25.05 -Ny 20.05 -Nz 0.00 -Ne
-1.000000 -Nl AGT -Nw --- -Ma a2 -Md 1 -Ms 0 -Mt 800 -Is 0.0 -Id 1.0 -It
tcp -Il 1020 -If 2 -Ii 21 -Iv 32 -Pn tcp -Ps 0 -Pa 0 -Pf 1 -Po 0
s -t 100.004776054 -Hs 1 -Hd -2 -Ni 1 -Nx 25.05 -Ny 20.05 -Nz 0.00 -Ne
-1.000000 -Nl AGT -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 1.0 -Id 0.0 -It ack -Il 40
-If 2 -Ii 22 -Iv 32 -Pn tcp -Ps 0 -Pa 0 -Pf 0 -Po 0
```

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างของเทรสไฟล์แบบใหม่

ความหมายของเทรสไฟล์

ความหมายของเทรสไฟล์แบ่งตามลำดับของช่องที่นำมาแสดงได้ดังนี้

1) **เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่โหนด** โดยที่
   - ก. S คือ โหนดส่งเพ็กเก็ตออกไป
   - ข. R คือ โหนดรับเพ็กเก็ตเข้ามา
   - ค. D คือ โหนดดร็อปเพ็กเก็ต
   - ง. F คือ โหนดส่งต่อเพ็กเก็ต
2) **เวลา**
   - ก. –t แสดงให้เห็นเวลาที่เกิดเหตุการณ์นั้นๆ บนซิมมูเลชั่น
3) **คุณสมบัติของโหนด** ซึ่งจะขึ้นต้นด้วย –N
   - ก. –Ni คือ โหนดไอดี
   - ข. –Nx คือ ค่าตำแหน่งของโหนดในแกน x
   - ค. –Ny คือ ตำแหน่งของโหนดในแกน y
   - ง. –Nz คือ ตำแหน่งของโหนดในแกน z
   - จ. –Ne คือ ระดับพลังงานของโหนด

ฉ. –Nl คือ ระดับในการ trace เช่น AGT คือ การเทรสในระดับเอเจนท์ของโหนด, RTR คือ การเทรสในระดับเราติ้ง, MAC คือ การเทรสในระดับแม็กเลเยอร์

ช. –Nw คือ เหตุผลที่โหนดดร็อปเพ็กเก็ต

- "END" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อจบการซิมมูเลชั่น
- "COL" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อเกิดการชนกันในชั้นแม็กเลเยอร์
- "DUP" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อแม็กแอดเดรสซ้ำกัน
- "ERR" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อเกิดความผิดพลาดในชั้นแม็ก
- "RET" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อจำนวนครั้งในการลองใหม่ถึงที่กำหนด
- "STA" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อสเตทไม่ถูกต้อง
- "BSY" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อแม็กไม่ว่าง
- "NRTE" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อไม่มีเส้นทางในการส่งข้อมูล
- "LOOP" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อเส้นทางวนซ้ำ
- "TTL" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อค่าไทม์ทูลีฟเป็นศูนย์
- "TOUT" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อเพ็กเก็ตหมดอายุ (หมดเวลาที่อยู่ในคิว)
- "CBK" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อเพ็กเก็ตถูกเรียกกลับโดยเราติ้ง
- "IFQ" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อคิวเต็ม
- "ARP" – ดร็อปเพ็กเก็ตเมื่อคิวของอาร์พเต็ม
- "OUT" – ดร็อปเพ็กเก็ตโดยโหนดที่อยู่นอกเหนือโดเมน

4) ข้อมูลเพ็กเก็ตในระดับไอพี ซึ่งจะมี –I นำหน้า

ก. –Is แสดงโดยที่อยู่ต้นทาง.พอร์ทของต้นทาง

ข. –Id แสดงโดยที่อยู่ปลายทาง.พอร์ทของปลายทาง

ค. –It ชนิดของเพ็กเก็ต

ง. –Il ขนาดของเพ็กเก็ต

จ. –If โฟล์วไอดี

ฉ. –Ii ค่ายูนิคไอดี

ช. –Iv ค่าทีทีแอล

5) ข้อมูลของฮ็อปถัดไป

ก. –Hs ค่าไอดีของโหนดนี้

ข. –Hd ค่าไอดีของฮ็อปถัดไป

6) ข้อมูลในระดับแม็กเลเยอร์

ก. –Ma ช่วงเวลา

ข. –Md อีเธอร์เน็ตแอ็ดเดรสของปลายทาง

ค. –Ms อีเธอร์เน็ตแอ็ดเดรสของต้นทาง

ง. –Mt ชนิดของอีเธอร์เน็ต

7) **ข้อมูลในระดับแอพพลิเคชั่น** จะประกอบด้วยข้อมูลของโปรแกรมประยุกต์แบบต่างๆ เช่น ARP, TCP หรือเราติ้งโปรโตคอล เช่น DSR ข้อมูลประเภทนี้จะขึ้นต้นด้วย -P

ก. –P arp ข้อมูลของแอดเดรสรีโซลูชั่นโปรโตคอล

- –Po คือ อาร์พรีเควสต์หรือรีพลาย
- –Pm คือ ค่าแม็กแอดเดรสของต้นทาง
- –Ps คือ แอดเดรสต้นทาง
- –Pa คือ ค่าแม็กแอดเดรสปลายทาง
- –Pd คือ แอดเดรสปลายทาง

ข. –P dsr เป็นเพ็กเก็ตประเภทเราติ้งโปรโตคอล ชื่อว่าดีเอสอาร์

- –Pn แสดง จำนวนโหนดที่เพ็กเก็ตเดินทางผ่านมา
- –Pq คือ เราติ้งรีเควสต์
- –Pi คือ ซีเควนซ์นัมเบอร์ของเรารีเควสต์
- –Pp คือ เราติ้งรีพลาย
- –Pl คือ ความยาวของการรีพลาย
- –Pe แสดง ต้นทางของซอร์ทเราติ้ง -> ปลายทางของซอร์ทเราติ้ง
- –Pw แสดง ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
- –Pm คือ จำนวนข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
- –Pc แสดง ว่าต้องรายงานข้อผิดพลาดให้กับโหนดใด
- –Pb คือ ไม่สามารถลิงค์จาก a-> b ได้

ค. –P cbr รายละเอียดของข้อมูลประเภทคอนสเต้นท์บิตเรท

- –Pi คือ ค่าซีเควนซ์นัมเบอร์
- –Pf คือ จำนวนครั้งที่เพ็กเก็ตนี้ถูกฟอร์เวิร์ด
- –Po คือ จำนวนที่เหมาะสมที่สุดในการฟอร์เวิร์ด

ซึ่งข้อมูลเทรสไฟล์เหล่านี้กำลังอยู่ในช่วงการพัฒนา ดังนั้นอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้

3.3.2.2 เทรสของพลังงาน ตัวอย่างเทรสของระดับพลังงานบนโหนด

```
N -t 190.457613 -n 8 -e 6.787152
N -t 190.457614 -n 6 -e 6.154187
N -t 190.457614 -n 4 -e 6.591763
N -t 190.457614 -n 2 -e 6.233338
```

รูปที่ 3.4 เทรสแสดงค่าพลังงาน

ความหมายของเทรสนี้คือ

1) N คือ เทรสของพลังงาน
2) –t คือ เวลาที่พลังงานของโหนดเปลี่ยนไป
3) –n คือ โหนดที่พลังงานเปลี่ยนไป
4) –e คือ พลังงานที่คงเหลืออยู่ที่โหนด ณ ขณะนั้น

3.3.2.3 เทรสของการเคลื่อนที่

```
M 1.00000 0 (671.20, 964.48, 0.00), (274.14, 333.60), 3.52
M 1.00000 1 (241.43, 699.24, 0.00), (915.94, 684.89), 2.88
M 1.00000 2 (929.71, 918.84, 0.00), (691.86, 632.31), 4.61
M 1.00000 3 (917.70, 558.29, 0.00), (316.68, 139.96), 2.81
```

รูปที่ 3.5 เทรสแสดงการเคลื่อนที่ของโหนด

จากรูปที่ 3.5 ทำให้เราทราบว่าที่วินาทีที่ 1 ในการซิมมูเลชั่น โหนด 0 ได้เคลื่อนที่จากพิกัด 671.20 ในแนวแกน พิกัด 964.48 ในแนวแกน y และพิกัดที่ 0 ในแนวแกน z เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ x = 274.14, y = 333.60 ด้วยความเร็วคงที่ที่ 3.52 เมตรต่อวินาที

แต่จากเทรสไฟล์ที่มีอยู่ในขณะนี้ไม่สามารถแสดงพลังงานที่ใช้ไปในแต่ละเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากพลังงานที่โหนดแสดงในเหตุการณ์ s เกิดขึ้นที่ข้อมูลอยู่ในชั้นแม็กเลเยอร์ของโหนด ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการส่งจริงๆ จะคิดเพื่อข้อมูลเดินทางผ่านชั้นฟิสิกซ์คอลเลเยอร์ไปแล้ว ทำให้พลังงานที่อยู่ในเหตุการณ์ s ไม่ใช่พลังงานที่โหนดใช้ไป แต่เป็นพลังงานของโหนดก่อนที่โหนดส่งข้อมูล และเมื่อโหนดส่งข้อมูลออกไปแล้ว ไม่มีเหตุการณ์ N ที่แสดงพลังงานที่เปลี่ยนไปจากเหตุการณ์ s จึงต้องมีการแก้ไขซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทูเพื่อให้แสดงพลังงานที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ s ได้อย่างถูกต้อง

3.3.2.4 เทรสไฟล์ที่แก้ไข

วิธีที่งานวิจัยชิ้นนี้แก้ไขให้เทรสไฟล์สามารถแสดงพลังงานที่เกิดจากการส่งข้อมูลโหนดได้อย่างถูกต้องตามที่ต้องการ โดยกำหนดให้ซิมมูเลเตอร์แสดงเทรสพลังงาน (N trace) ทันทีหลังจากที่พลังงานในโหนดเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นหลังจากโหนดเกิดเหตุการณ์ส่งข้อมูล (S event) ทันทีที่เพ็กเก็ตถูกส่งออกจากโหนดและพลังงานเกิดการเปลี่ยนแปลงซิมมูเลเตอร์จะแสดง

เทรสพลังงานของโหนดนั้นขึ้นมาทันที ทำให้เราทราบได้ว่าพลังงานที่โหนดใช้ในการส่งข้อมูลเป็นเท่าไร

การทำงานของซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทู เมื่อข้อมูลถูกส่งออกจากไวรเลสฟิสิกซ์คอล จะมีการเรียกเมธธอดเอ็นเนจีของอ็อปเจ็กเอ็นเนจีโมเดล เพื่อคำนวนหาพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล และถ้าพลังงานของโหนดเหลืออยู่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ อ็อปเจ็กโมบายโหนดก็จะเรียกเมธธอดล็อกเอ็นเนจีด้วยพารามิเตอร์ 0 (Method log_energy(0)) เพื่อบันทึกในเทรสไฟล์ว่าพลังงานของโหนดเหลือเท่ากับศูนย์ ซึ่งเราแก้ไขโดยการเพิ่มข้อแม้ไปว่าถ้าพลังงานเหลือมากกว่าศูนย์ให้เรียกเมธธอดล็อกเอ็นเนจีด้วยพารามิเตอร์ 1 (Method log_energy(1)) เพื่อให้ซิมมูเลเตอร์บันทึกค่าพลังงานที่เหลืออยู่ในปัจจุบันของโหนดลงไปในเทรสไฟล์ โดยการแก้ไขที่ไฟล์ wireless-phy.cc ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6

```
285          if (em()->energy() <= 0) {
286              em()->setenergy(0);
287              ((MobileNode*)node())->log_energy(0);
288          } else {
289              ((MobileNode*)node())->log_energy(1);
290              }
```

รูปที่ 3.6 ส่วนที่แก้ไขบนซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทู

จากการแก้ไข ทำให้เมื่อโหนดส่งข้อมูลผ่านทางไวร์เลสฟิสิกซ์คอลแล้ว ซิมมูเลเตอร์จะแสดงระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของโหนดทันทีไม่ว่าพลังงานที่เหลืออยู่จะน้อยกว่าศูนย์หรือไม่ก็ตาม

3.3.3 วิธีการคิดค่าพลังงานจากเทรสไฟล์ที่แก้ไขแล้ว

3.3.3.1 การคำนวนหาพลังงานของแต่ละเหตุการณ์บนซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทูที่ถูกแก้ไขแล้ว เทรสไฟล์ใหม่ที่ได้จากการแก้ไขซิมมูเลเตอร์จะมีลำดับการแสดงผลของพลังงานดังต่อไปนี้

1) เมื่อโหนดมีการส่งเพ็กเก็ต ลำดับในเทรสไฟล์จะเป็นเหตุการณ์ s และตามด้วย N ของโหนดเดียวกัน ดังนั้นถ้าเรานำพลังงานในเหตุการณ์ s ซึ่งเป็นพลังงานก่อนที่โหนดจะส่งข้อมูล มาลบด้วยพลังงานในเหตุการณ์ N คือพลังงานของโหนดที่เปลี่ยนแปลงไป จะได้เป็นพลังงานที่โหนดใช้ในการส่งข้อมูลของเหตุการณ์ s

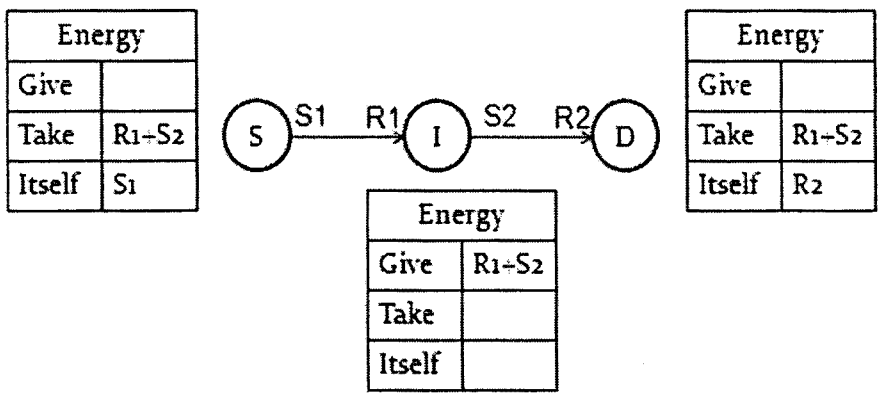
2) เมื่อโหนดรับเพ็กเก็ต ลำดับในเทรสไฟล์จะเป็นเหตุการณ์ N และตามด้วย r ซึ่งทั้ง 2 เหตุการณ์จะมีพลังงานเท่ากัน ดังนั้นค่าพลังงานที่โหนดใช้ในการรับเพ็กเก็ตคือพลังงานของโหนดในเหตุการณ์ก่อนหน้าลบด้วยพลังงานของเหตุการณ์ r หรือ N

3) เมื่อโหนดดร็อปเพ็กเก็ต ลำดับในเทรสไฟล์จะเป็นเหตุการณ์ N และตามด้วย d อย่างน้อย 1 ครั้ง ซึ่งพลังงานในเหตุการณ์ N และ d ทั้งหมดจะเท่ากัน ดังนั้นพลังงานที่โหนดใช้ในการรับเพ็กเก็ตก่อนที่จะดร็อปคิดได้จากพลังงานก่อนหน้าลบด้วยพลังงานของเหตุการณ์ N หรือ d

4) เมื่อโหนดได้ยินเพ็กเก็ตของโหนดอื่น โหนดจะใช้พลังงานไปกับการตรวจจับข้อมูลของโหนดอื่น (sense) ที่อยู่ในรัศมีการตรวจจับของโหนด ซึ่งโหนดจะต้องรับข้อมูลเข้ามาประมวลผล ค่าพลังงานที่ใช้จึงเท่ากับพลังงานที่โหนดใช้ในการรับเพ็กเก็ต คิดได้จากพลังงานของโหนดที่เหตุการณ์ก่อนหน้า ลบด้วยพลังงานของโหนดที่เหตุการณ์ N ในปัจจุบัน

จากเทรสไฟล์ที่เกิดขึ้นเราจำแนกประเภทของการใช้พลังงานของโหนดจากประเภทเพ็กเก็จที่โหนดรับ-ส่ง ได้เป็น 5 ประเภทดังนี้ 1) การรับ-ส่งข้อมูลประเภทคอนโทรเมสเสจ 2) การรับ-ส่งข้อมูลซีบีอาร์ 3) การรับ-ส่งข้อมูลอาร์พ 4) การรับ-ส่งข้อมูลเราติ้ง 5) การฟังข้อมูลในช่องสัญญาณ ซึ่งการฟังข้อมูลช่องสัญญาณจะเกิดขึ้นในกรณีที่โหนดอยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณของโหนดข้างเคียงแต่โหนดไม่ได้เป็นปลายทางการสื่อสารโหนดจึงไม่รับข้อมูล หรือกรณีที่โหนดอยู่ในรัศมีของการทำแคร์เรียเซนซ์ของโหนดต้นทางซึ่งโหนดจะไม่สามารถทราบได้ว่าข้อมูลที่โหนดต้นทางส่งมาคืออะไร

3.3.3.2 การเลือกพลังงานของแต่ละเหตุการณ์มาคิดค่าความยุติธรรม การคิดค่าความยุติธรรมบนเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจคิดจากข้อมูลที่โหนดต้องการจะรับและส่งเท่านั้น (ข้อมูลประเภทที่ 2) ไม่ได้คิดถึงการรับส่งเพ็กเก็ตอื่นๆ ที่โหนดต้องใช้เพื่อเตรียมเส้นทางในการรับส่งข้อมูล เช่น เพ็กเก็ตของเราติ้ง อาร์พเพ็กเก็ต คอนโทรลแมสเสจ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เราเลือกส่งข้อมูลเป็นแบบคอนสเท้นบิตเรท (CBR) โดยกำหนดโฟลว์ไอดีของแต่ละคู่การสื่อสารไว้



รูปที่ 3.7 วิธีการจำแนกพลังงานสำหรับการคิดค่าความยุติธรรม

โหนดต้นทางเอส (Node S) ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางดี (Node D) ผ่านทางโหนดระหว่างทางไอ (Node I) โดยโหนดเอสเริ่มส่งข้อมูลไปให้กับโหนดไอก่อน โดยเอสใช้พลังงานในการส่งเท่ากับเอสหนึ่ง (S1) พลังงานเอสหนึ่งคิดเป็นพลังงานที่โหนดเอสใช้เพื่อกิจกรรมของตนเอง และโหนดไอใช้พลังงานในการรับเท่ากับอาร์หนึ่ง (R1) และโหนดไอส่งข้อมูลต่อไปให้โหนดดี โดยใช้พลังงานในการส่งออกเท่ากับเอสสอง (S2) ซึ่งพลังงานที่โหนดไอใช้ในการรับและส่งต่อข้อมูลคิดเป็นพลังงานที่โหนดไอทำให้กับโหนดเอสและโหนดดี ส่วนโหนดดีใช้พลังงานในการรับเพ็กเก็ตเท่ากับอาร์สอง (R2) คิดเป็นพลังงานที่โหนดดีทำเพื่อตัวเอง

จากทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในบทนี้ ทำให้เราสามารถคำนวนหาพลังงานที่แต่ละโหนดใช้ไปเพื่อการรับหรือส่งข้อมูลบนซิมมูเลเตอร์เอ็นเอสทูได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นเราสามารถแยกพลังงานที่แต่ละโหนดใช้ไปตามประเภทที่เราต้องการ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวนหาค่าความยุติธรรมทั้งในระดับโหนดและในระดับเครือข่ายต่อไป