

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีเป้าหมายเพื่อออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอด โดยอาศัยการจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรม TOSSIM ของระบบปฏิบัติการ TinyOS ประเด็นการศึกษา คือ การออกแบบอัลกอริทึมในการบีบอัดข้อมูลภาพให้ทนต่อการสูญหายของข้อมูลภาพในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดใหญ่บนแนวคิด 2 ประเด็น คือ การลดทอนความขึ้นต่อกันของข้อมูล และการชดเชยข้อมูลภาพที่ขาดหายไปด้วยข้อมูลเดิมดังนี้

3.1.1 แนวคิดในการบีบอัดข้อมูลภาพ

ข้อมูลภาพโดยทั่วไปมีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดสัญญาณทางกายภาพอื่นๆ จึงมีการบีบอัดข้อมูลภาพให้มีขนาดเล็กลงก่อนจัดเก็บหรือส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย การบีบอัดข้อมูลภาพแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การบีบอัดแบบไม่มีการสูญเสียข้อมูล กับ การบีบอัดแบบสูญเสียข้อมูลบางส่วน อัลกอริทึมในการบีบอัดอาศัยแนวคิดในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลแต่ละจุดภาพเพื่อลดความซ้ำซ้อน ทำให้ข้อมูลภาพมีขนาดเล็กลงมาก แต่มีความขึ้นต่อกันของข้อมูลสูง ดังนั้นหากมีการสูญเสียข้อมูลภาพในระหว่างการจัดเก็บ หรือส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย ย่อมทำให้เกิดความเสียหายต่อภาพในรูปของการไม่สามารถขยายขนาดได้ หรือเกิดความผิดเพี้ยนของสี

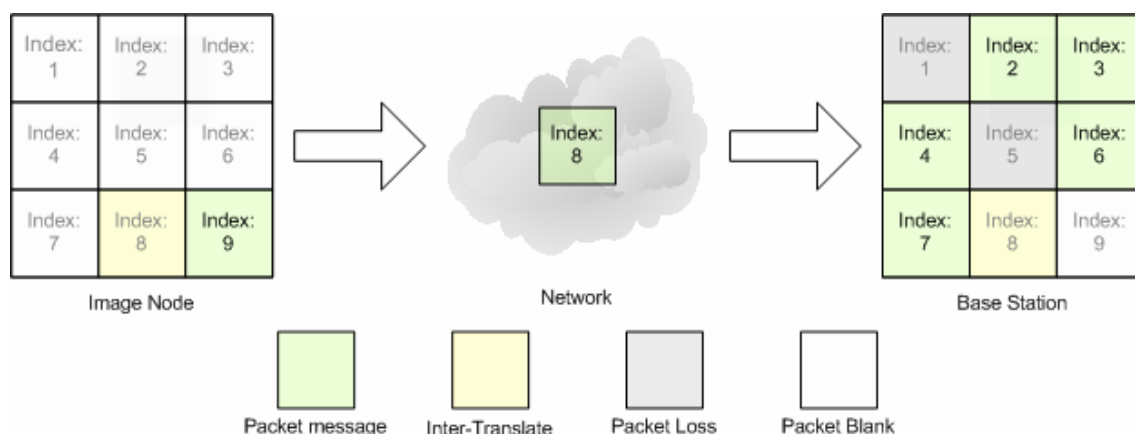
การส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์สื่อสารทั่วไปโดยปกติจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการสูญเสียข้อมูลระหว่างจัดส่ง โดยอาศัยช่องสัญญาณที่มีอัตราสูญเสียข้อมูลต่ำมาก ร่วมกับการปกป้องกันการสูญหายของแพคเกจข้อมูล เช่น การตอบกลับ (ACK) ร่วมกับการส่งซ้ำ (Retransmission) แต่ในกรณีการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ยืนยันความครบถ้วนของข้อมูล และมีอัตราการสูญเสียข้อมูลสูง จึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการแปลงข้อมูลกลับมาเป็นภาพที่ปลายทาง ทำให้ภาพที่ได้ผิดเพี้ยนไปจากภาพต้นฉบับ

แนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ การบีบอัดข้อมูลภาพที่เหมาะสมกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายควรเป็นการบีบอัดข้อมูลด้วยจำนวนข้อมูลที่เหมาะสมกับการส่งในแต่ละแพคเกจ

เพื่อลดความขึ้นต่อกันของข้อมูล ทำให้การสูญหายของแพคเกจไม่ส่งผลกระทบต่อการแปลงข้อมูลกลับเป็นภาพ นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังนำเสนอแนวคิดของการชดเชยข้อมูลที่สูญหายด้วยแพคเกจข้อมูลของภาพก่อนหน้าเพื่อเติมเต็มข้อมูลส่วนที่ขาดหายไป ซึ่งมีผลกระทบต่อการมองและจดจำของมนุษย์

3.1.2 การลดความขึ้นต่อกันของข้อมูล

แนวโน้มหลักของการส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นการส่งข้อมูลขนาดเล็กทีละแพคเกจ (Packet Radio) ตามคาบเวลา ในกรณีข้อมูลภาพซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความต่อเนื่องกันของข้อมูลสูง หากบีบอัดข้อมูลทั้งภาพก่อน แล้วนำมาแบ่งเป็นแพคเกจย่อย เพื่อทยอยส่งผ่านเครือข่าย ข้อมูลที่อยู่ในแต่ละแพคเกจย่อมไม่สอดคล้องกับโครงสร้างของข้อมูลที่ถูกบีบอัดอยู่ หากบางแพคเกจสูญหายระหว่างการส่ง ย่อมส่งผลกระทบต่อข้อมูลอื่นๆ ที่อยู่ถัดไป การบีบอัดข้อมูลภาพควรทำหลังจากแบ่งข้อมูลออกเป็นแพคเกจย่อยแล้ว เพื่อป้องกันความเกี่ยวเนื่องกันระหว่างแพคเกจข้อมูล โดยการแบ่งข้อมูลภาพออกเป็นบล็อกเล็กๆ พร้อมทั้งระบุหมายเลขของบล็อกกำกับไว้ หลังจากนั้น ทำการบีบอัดบล็อกข้อมูลภาพให้มีขนาดเล็กลง ที่ภาครับนำข้อมูลที่ได้อาจถอดรหัสแล้วนำมาประกอบกลับเป็นภาพโดยอ้างอิงจากหมายเลขบล็อกที่กำกับไว้ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แนวคิดการบีบอัดข้อมูลภาพเพื่อส่งข้อมูลแบบแพคเกจ

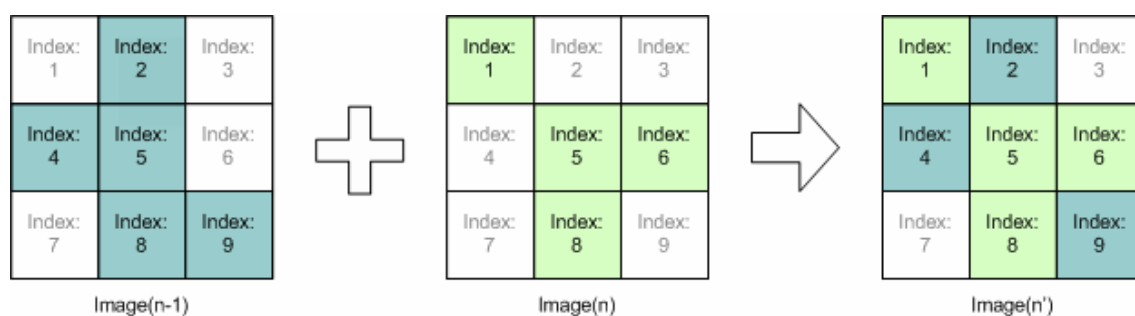
3.1.3 การชดเชยการสูญหายของแพคเกจ

การส่งข้อมูลแบบหลายทอดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมักจะไม่รับประกันความครบถ้วนของข้อมูล รวมทั้งมีความน่าจะเป็นในการสูญหายของแพคเกจข้อมูลระหว่างจัดส่ง การสูญหายของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ทำให้ตำแหน่งของแพคเกจข้อมูลที่สูญหายในแต่ละครั้งแตกต่างกัน ดังนั้น

ความผิดเพี้ยนของภาพเมื่อถูกขยาย ณ ปลายทาง จึงกระจายอยู่ทั้งภาพ ทั้งนี้ เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายไม่ใช้วิธีการส่งแพ็คเกจเดิมซ้ำหลายๆ รอบ เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องพลังงาน และการรับส่งข้อมูลก็ใช้พลังงานกว่าครึ่งหนึ่งของการใช้พลังงานทั้งหมด ดังนั้น การส่งข้อมูลเท่าที่จำเป็นจะช่วยประหยัดพลังงาน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ แนวทางการลดขนาดการส่งข้อมูลภาพโดยการแนบตัวแทนข้อมูลของแพ็คเกจก่อนหน้าและการแทนที่แพ็คเกจที่สูญหายด้วยแพ็คเกจตำแหน่งเดียวกันของข้อมูลชุดก่อนหน้านั้น เมื่อนำข้อมูลส่วนที่รับได้มารวมกัน ก็สามารถเติมเต็มส่วนที่ขาดหายไปได้ เมื่อจำนวนครั้งในการส่งภาพในบริเวณเดิมมากขึ้น โอกาสในการเติมเต็มส่วนที่สูญหายไปยิ่งมากขึ้น หลักในการเลือกใช้ข้อมูลที่ซ้ำกันคือ ใช้ภาพที่รับครั้งล่าสุดเป็นหลัก และให้ความสำคัญของข้อมูลลดลงตามระยะเวลาที่ห่างจากปัจจุบัน ทำให้ได้ภาพที่ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลภาพในปัจจุบัน ดังรูปที่

3.2



รูปที่ 3.2 การแทนที่ข้อมูลในส่วนที่ขาดหายไป

3.2 การออกแบบอัลกอริทึม

การส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะทยอยส่งทีละแพ็คเกจ โดยขนาดข้อมูลที่ส่งได้ในแต่ละแพ็คเกจจะมีขนาดเล็ก ในกรณีข้อมูลขนาดใหญ่เมื่อแบ่งเป็นแพ็คเกจขนาดเล็กย่อมมีจำนวนแพ็คเกจมาก ข้อมูลภาพเป็นข้อมูล 2 มิติ เมื่อเกิดการสูญหายของข้อมูลย่อมส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพ ทั้งนี้การออกแบบอัลกอริทึมประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพ
2. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น
3. การปรับปรุงคุณภาพภาพ

3.2.1 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพ

รูปแบบการจัดเก็บภาพในปัจจุบันมักจะอยู่ในรูปของข้อมูลที่บีบอัดแล้ว เช่น ไฟล์แบบ JPG PNG เป็นต้น เมื่อส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไร้สายแบบหลายทอดแล้วเกิดการสูญหายข้อมูลบางแพคเกจจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพอย่างมาก เนื่องจากรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลที่ใช้ในปัจจุบัน ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ไม่มีการสูญเสียข้อมูล วิทยานิพนธ์นี้จึงเริ่มต้นด้วยการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพโดยเปรียบเทียบระหว่าง BMP แทนการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูล และ JPG แทนการบีบอัดแบบสูญเสียข้อมูลบางส่วน ทั้งนี้ เราไม่สามารถดำเนินการเปรียบเทียบกับการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลเช่น PNG ได้ เพราะอัลกอริทึมในการขยายขนาดข้อมูลไม่ทำงาน เมื่อข้อมูลไม่ครบถ้วน การพิจารณาจำนวนครั้งที่ใช้ในการส่งพบว่า BMP มีจำนวนครั้งที่ใช้ในการส่งข้อมูล 1 ภาพสูงกว่ามาก เนื่องจากขนาดของข้อมูลจะใหญ่กว่าข้อมูลที่ถูกบีบอัดอย่าง JPG มาก การเปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดกับข้อมูลทั้งสองชนิดเมื่อมีการสูญหายของแพคเกจจะพิจารณาในปัจจัยดังนี้ ตำแหน่งและจำนวนของแพคเกจที่สูญหาย ขนาดของแพคเกจที่ใช้ส่ง และขนาดของภาพต้นฉบับ เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้กับค่าคุณภาพภาพ เราได้ออกแบบการทดสอบ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดสอบ

เงื่อนไขในการทดสอบ	ค่าที่ใช้ทดสอบ
1.จำนวนแพคเกจที่สูญหาย	1,5 และ 9%
2.ตำแหน่งของแพคเกจที่สูญหาย	1-100 แพคเกจ
3.ขนาดของแพคเกจที่ใช้ส่ง	4x4, 8x8 และ 16x16 พิกเซล
4.ขนาดของภาพต้นฉบับที่ใช้	160x120, 320x240 และ 640x480 พิกเซล

3.2.2 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น

การบีบอัดข้อมูลภาพที่ดีนั้นพิจารณาทั้งจากประสิทธิภาพในการบีบอัดและคุณภาพภาพ อัลกอริทึมที่เลือกใช้ในการบีบอัดข้อมูลภาพ คือ BTC และ CDF 5/3

BTC เป็นการบีบอัดข้อมูลภาพอย่างง่ายสำหรับเฟรมอ้างอิงหรือเฟรมเปลี่ยนแปลงในข้อมูลภาพเคลื่อนไหว แต่ไม่ได้รับความนิยมในการบีบอัดข้อมูลภาพนิ่ง เนื่องจากใช้อัตราการบีบอัดสูงมากทำให้รายละเอียดของภาพบางส่วนสูญหาย การบีบอัดด้วยเทคนิค BTC เริ่มจากการแบ่งข้อมูลภาพออกเป็นบล็อกย่อยๆ แล้วหาค่าเฉลี่ยที่ละบล็อก เพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูล และ

หาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อใช้เป็นตัวแทนของการกระจายตัวของข้อมูล หลังจากนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าข้อมูลทีละจุดภาพ เพื่อแบ่งระดับข้อมูลให้มีขนาดเล็กลง แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้พร้อมทั้งหมายเลขบล็อก ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสามมารวมเป็นแพ็คเกจเดียว

โหนดเซ็นเซอร์เป็นหน่วยประมวลผลขนาดเล็ก มีพลังงานจำกัดในการประมวลผลภาพ และการส่งข้อมูล จึงต้องการอัลกอริทึมที่ไม่ซับซ้อน และใช้พื้นที่หน่วยความจำน้อย เทคนิค BTC จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับเงื่อนไขดังกล่าว เนื่องจากการแบ่งระดับข้อมูลจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งคำนวณผลหารได้จากการเลื่อนบิตไปทางขวาเรียกว่า binary transform ในการประมาณค่า ซึ่งมีเฉพาะการบวกและการหาร ทั้งนี้ หน่วยประมวลผลขนาดเล็กที่ไม่มีส่วนคำนวณทศนิยม จะคำนวณการบวกลบการเลื่อนบิตได้เร็วและใช้หน่วยความจำน้อยกว่าการคำนวณทศนิยมมาก

วิทยานิพนธ์นี้ใช้การบีบอัดข้อมูลภาพแบบ AMBTC โดยใช้บล็อกขนาดเล็ก แพ็คเกจข้อมูลประกอบด้วย หมายเลขบล็อก ข้อมูลภาพที่ถูกบีบอัดแล้ว ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขนาดไม่เกิน 100 ไบต์ ทอยส่งข้อมูลที่ละบล็อกจนครบทั้งภาพ และเติมบล็อกที่ขาดหายไปจากการส่งข้อมูลภาพในรอบถัดไป สำหรับการเข้ารหัสแบบ BTC ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบีบอัดและคุณภาพภาพ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบีบอัดภาพแบบ BTC

เงื่อนไขในการทดสอบ	ค่าในการทดสอบ
1.ขนาดบล็อก	4x4, 8x8 และ 16x16
2.ระดับการควอนไทซ์	1 และ 2 บิต

CDF 5/3 เป็นเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบเวฟเลตสำหรับการบีบอัดแบบไม่มีการสูญเสียข้อมูลซึ่งมีประสิทธิภาพสูงเป็นที่ยอมรับและนำไปใช้ในการบีบอัดภาพ เช่น JPEG2000 เป็นต้น การแปลงข้อมูลแบบเวฟเลตใช้บล็อกข้อมูลขนาด $m \times m$ พิกเซล ของภาพทั้ง R, G และ B เมื่อผ่านการแปลงแล้ว เหลือข้อมูลขนาด $\frac{m}{2} \times \frac{m}{2}$ พิกเซลของทั้ง 3 สี แพ็คเกจข้อมูลประกอบด้วย หมายเลขบล็อก ข้อมูลที่ผ่านการแปลงแล้วเฉพาะบางส่วน ขนาดไม่เกิน 100 ไบต์ ทอยส่งข้อมูลที่ละบล็อกจนครบทั้งภาพ และเติมบล็อกที่ขาดหายไปจากการส่งข้อมูลภาพในรอบถัดไป สำหรับการเข้ารหัสแบบ CDF 5/3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบีบอัดและคุณภาพภาพ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบีบอัดภาพแบบ CDF 5/3

เงื่อนไขในการทดสอบ	ค่าในการทดสอบ
1. ส่วนของข้อมูลที่เลือกส่ง	LL, LL+HL, LL+LH, LL+HL+LH
2. วิธีการบีบอัด	แบบทั้งภาพกับแบบที่ละบล็อก

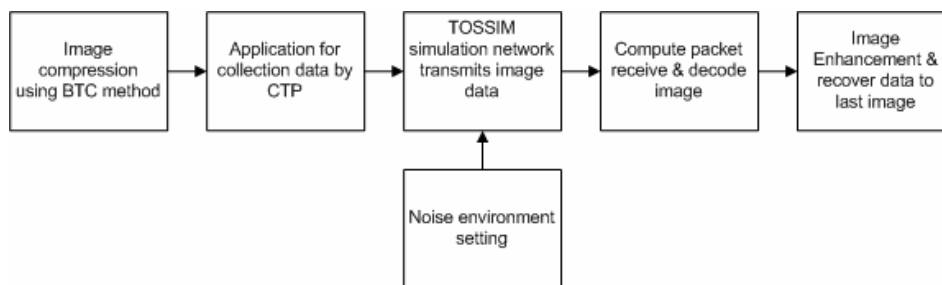
3.2.3 การปรับปรุงคุณภาพภาพ

แนวคิดของการปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลภาพในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การชดเชยแพคเก็ตข้อมูลที่ขาดหายไปด้วยข้อมูลจากการส่งภาพครั้งก่อนหน้า กระบวนการชดเชยข้อมูลจะกระทำหลังจากรับบล็อกข้อมูลจากเครือข่ายแล้ว นำบล็อกข้อมูลที่ได้มาเรียงลำดับตามหมายเลขบล็อก แล้วเลือกข้อมูลที่ซ้ำออก เลือกข้อมูลจากการส่งภาพครั้งก่อนหน้ามาทดแทนบล็อกข้อมูลที่สูญหาย แล้วถอดรหัสกลับเป็นภาพ

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม TOSSIM ร่วมกับซอฟต์แวร์ที่เขียนบนระบบปฏิบัติการ TinyOS เพื่อสร้างสถานการณ์จำลองของการส่งข้อมูลภาพแบบหลายทอดผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย การจำลองการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอด ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การจัดการข้อมูลภาพ เพื่อลดขนาดของข้อมูลภาพให้เหมาะสมกับการส่งข้อมูลที่ละแพคเก็ต โดยใช้การบีบอัดข้อมูลภาพด้วยเทคนิค BTC
2. การแบ่งหน้าที่ และออกแบบการทำงานของโหนดชนิดต่างๆ ให้สอดคล้องกัน ออกแบบขั้นตอน และลำดับการทำงานของโหนดแต่ละชนิด
3. การเตรียมสภาพแวดล้อม และโครงสร้างเครือข่าย การสร้างรูปแบบการเชื่อมต่อของโหนดในเครือข่าย กำหนดตำแหน่งโหนดเซ็นเซอร์ ค่ากำลังขยายของสัญญาณ และค่าสัญญาณรบกวนอื่นๆ
4. การส่งข้อมูลภาพเข้าสู่เครือข่าย การส่งข้อมูลภาพไปยังโหนดฐานพร้อมทั้งตรวจสอบการทำงานในแต่ละขั้นตอนของทุกโหนด
5. การรับข้อมูลจากโหนดฐาน ไปคัดแยก และเรียงลำดับแพคเก็ตกลับมาให้อยู่ในรูปเดิม
6. การประมวลผลภาพ การถอดรหัสแพคเก็ตที่โหนดฐานได้รับกลับเป็นภาพพร้อมทั้งชดเชยแพคเก็ตที่ขาดหายไป วิเคราะห์คุณภาพภาพ ปรับปรุงคุณภาพภาพ

ภาพรวมในการจำลองสถานการณ์การส่งข้อมูลภาพ แสดงดังรูปที่ 3.3



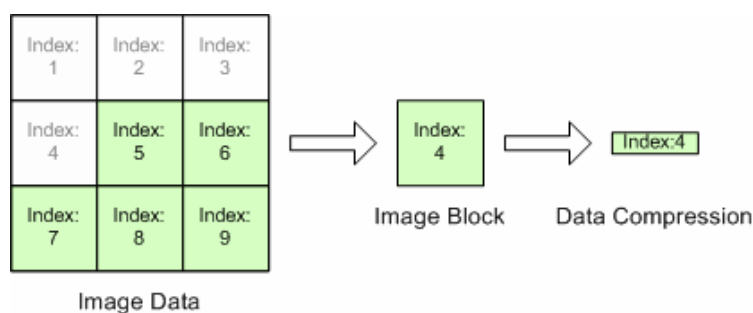
รูปที่ 3.3 ภาพรวมในการจำลองสถานการณ์ส่งข้อมูลภาพ

3.3 การเตรียมข้อมูลภาพ

การบีบอัดข้อมูลจะใช้วิธีการแบ่งข้อมูลภาพออกเป็นบล็อกเล็กๆ แล้วนำมาเข้ารหัสที่ละบล็อกโดยเพิ่มข้อมูลตัวแทนของบล็อกก่อนหน้าเพิ่มเข้าไปด้วย อัลกอริทึมที่ใช้ในการบีบอัดข้อมูลภาพ คือ BTC ซึ่งเป็นรูปแบบการบีบอัดข้อมูลภาพในรูปแบบเชิงเส้น บีบอัดที่ละระนาบสีจนครบทั้งสามระนาบ การส่งข้อมูลแต่ละครั้งมีขนาดไม่เกินขนาดข้อมูลสูงสุดที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะส่งได้ ดังสมการที่ 3.1 และแนวคิดในการแบ่งข้อมูลเป็นบล็อกแสดงดังรูปที่ 3.4

$$\text{Maximum_Payload} \geq \text{Header} + n * (\text{Header_image} + 3 * (\text{data_encode})) \quad (3.1)$$

เมื่อ Maximum_Payload คือ ความยาวข้อมูลสูงสุดที่อุปกรณ์สื่อสารสามารถรับส่งได้
 Header คือ ข้อมูลส่วนหัวของโพรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสาร
 n คือ จำนวนแพ็คเกจที่สามารถส่งได้
 Header_image คือ ข้อมูลส่วนหัวของบล็อกภาพที่ระบุตำแหน่งของบล็อก
 data_encode คือ ส่วนของข้อมูลภาพในบล็อกที่ถูกเข้ารหัสแล้วในแต่ละระนาบ



รูปที่ 3.4 แนวคิดการแบ่งและบีบอัดข้อมูลภาพ

ขั้นตอนการเตรียมภาพเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยมีขั้นตอนการเข้ารหัสภาพ ดังนี้

1. รับภาพที่มีระบบสีแบบ RGB
2. แบ่งข้อมูลภาพในแต่ละระนาบเป็นบล็อกขนาดที่กำหนด
3. นำมาเข้ารหัส BTC โดยการหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้การควอนไทซ์ที่ระดับ 1 หรือ 2 บิต
4. ส่งค่าข้อมูลที่เข้ารหัสแล้วเข้าสู่เครือข่าย

การคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพในแต่ละบล็อกใช้วิธีการเลื่อนบิต ส่วนการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานใช้วิธีการแยกค่าเศษส่วนออกจากกัน เพื่อลดความผิดพลาดจากการปัดเศษและลดขนาดข้อมูลเมื่อเทียบกับการคำนวณข้อมูลชนิดทศนิยม

โครงสร้างของข้อมูลที่ใช้ส่งจะอิงตาม CC2420 ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับส่งมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นโหนดเซ็นเซอร์จำลองในสภาพแวดล้อม TOSSIM ซึ่งมีความยาวของข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ 128 ไบต์ [TEP 126] รวมข้อมูลในส่วนหัวของแพ็คเกจซึ่งมีโครงสร้างรวม 11 ไบต์ ตามข้อจำกัดของเฟรมข้อมูลในระดับกายภาพของ CC2420 ดังตารางที่ 3.4 ทั้งนี้แพ็คเกจข้อมูลภาพจะถูกควบคุมการส่งด้วยซอฟต์แวร์ที่เขียนด้วย TinyOS ด้วยการบรรจุโครงสร้างของข้อมูลชนิด `message_t` ซึ่งมีข้อมูลส่วนหัวรวม 4 ไบต์ ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลส่วนหัวของอุปกรณ์สื่อสาร CC2420

ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
length	1 byte	ความยาวของแพ็คเกจ
fcf	2 bytes	ข้อมูลควบคุมของเฟรม
dsn	1 byte	ลำดับของข้อมูล
ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
destpan	2 bytes	หมายเลขกลุ่มเครือข่ายปลายทาง
dest	2 bytes	หมายเลขปลายทางของแพ็คเกจ
src	2 bytes	หมายเลขต้นทางของแพ็คเกจ
type	1 byte	ประเภทของแพ็คเกจ

ตารางที่ 3.5 โครงสร้างส่วนหัวของ message_t

ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
header[0]	1 byte	รายละเอียดต้นทางปลายทางของข้อมูล
data[0]	1 byte	ข้อมูลที่ต้องการจัดส่ง
footer[0]	1 byte	ส่วนท้ายของข้อมูล
metadata[0]	1 byte	ส่วนเพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อมูลที่จะส่ง เช่น tx power, rssi, lqi, crc, ack ฯลฯ

การจำลองสถานการณ์รับส่งข้อมูลภาพเป็นการส่งข้อมูลแบบหลายทอด ใช้โปรโตคอล CTP โดยมีโครงสร้างของเฟรมข้อมูล CTP รวม 9 ไบต์ และเฟรมหาเส้นทาง 6 ไบต์ ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 เฟรมข้อมูลของโปรโตคอล CTP

ชนิดเฟรมข้อมูล	ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
เฟรมข้อมูล	options	1 byte	ตัวเลือก
	thl	1 byte	เวลาในการใช้งาน
	etx	2 bytes	expected transmissions
	origin	2 bytes	หมายเลขต้นทาง
	originSeqNo	1 byte	ลำดับการส่งข้อมูลจากต้นทาง
	type	1 byte	ประเภทโปรโตคอล
	(COUNT(0) data)[0]	1 byte	ข้อมูลที่ต้องการส่ง
เฟรมหาเส้นทาง	options	1 byte	ตัวเลือก
	parent	2 bytes	หมายเลขต้นทางของแพคเกจ
	etx	2 bytes	expected transmissions
	(COUNT(0) data)[0]	1 byte	ข้อมูลที่ต้องการส่ง

จากโครงสร้างของโปรโตคอลทั้ง 2 ชนิด (message_t และ CTP) รวมแล้วจะมีข้อมูลที่เป็นส่วนหัวทั้งสิ้น 26 ไบต์ ซึ่งเหลือข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูลได้ 102 ไบต์ ซึ่งการส่งข้อมูลภาพแต่ละแบบ จะมีโครงสร้างของแพคเกจข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังนี้

ข้อมูลภาพแบบ BMP ส่งด้วยข้อมูลขนาด 67 ไบต์/แพ็คเกจ ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 โครงสร้างการส่งข้อมูลภาพชนิด BMP

ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
index	2 bytes	หมายเลขบล็อกข้อมูล
layer	1 byte	ระนาบของสี
data[0]	1 byte	ข้อมูลที่ต้องการส่ง [64]

ข้อมูลภาพบีบอัดแบบ JPEG ส่งด้วยข้อมูลขนาด 102 ไบต์/แพ็คเกจ ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 โครงสร้างการส่งข้อมูลภาพชนิด JPEG

ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
index	2 bytes	หมายเลขบล็อกข้อมูล
data[0]	1 byte	ข้อมูลที่ต้องการส่ง [100]

ข้อมูลภาพบีบอัดแบบ BTC ส่งด้วยข้อมูลขนาด 76 ไบต์/แพ็คเกจ โดยประกอบด้วย 2 บล็อก/แพ็คเกจ ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 โครงสร้างการส่งข้อมูลภาพชนิด BTC

ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
Index[0]	2 bytes	หมายเลขบล็อกข้อมูล[4]
mean[0]	2 byte	ค่าเฉลี่ยของบล็อก [6]
std[0]	2 bytes	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [12]
data[0]	1 byte	ข้อมูลที่เข้ารหัสแล้ว [48]

ข้อมูลภาพบีบอัดแบบ CDF 5/3 ส่งด้วยข้อมูลขนาด 100 ไบต์/แพ็คเกจ โดยประกอบด้วย 2 บล็อก/แพ็คเกจ ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 โครงสร้างข้อมูลภาพชนิด CDF 5/3

ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
Index[0]	2 bytes	หมายเลขบล็อกข้อมูล[4]
data[0]	1 byte	ข้อมูลที่เข้ารหัสแล้ว [96]

3.4 การสร้างแผนผังของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ลักษณะการจัดวางเซ็นเซอร์ในเครือข่ายแบ่งเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ แบบโปรย กับแบบกำหนดตำแหน่ง การจัดวางแบบแรกจะเป็นวิธีการศึกษาในเชิงทฤษฎี คือ เป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดใหญ่ เช่น การศึกษาพฤติกรรมการดำรงชีวิตของสัตว์บนเกาะร้าง หรือในเขตสงวนพันธุ์สัตว์ป่า การติดตามความเคลื่อนไหวของข้าศึกในสมรภูมิรบ เป็นต้น ส่วนการนำเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายไปใช้ในทางปฏิบัติจะเป็นการกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนตามสภาพภูมิประเทศของบริเวณนั้นๆ หากเป็นบริเวณที่ราบ เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีการแบ่งพื้นที่เป็นสัดส่วนอย่างชัดเจนจะใช้การกำหนดตำแหน่งแบบตาราง เพื่อสะดวกต่อการกำหนดระยะห่างระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ทั่วถึง ตัวอย่างรูปแบบโครงสร้างเครือข่ายดังรูปที่ 3.5

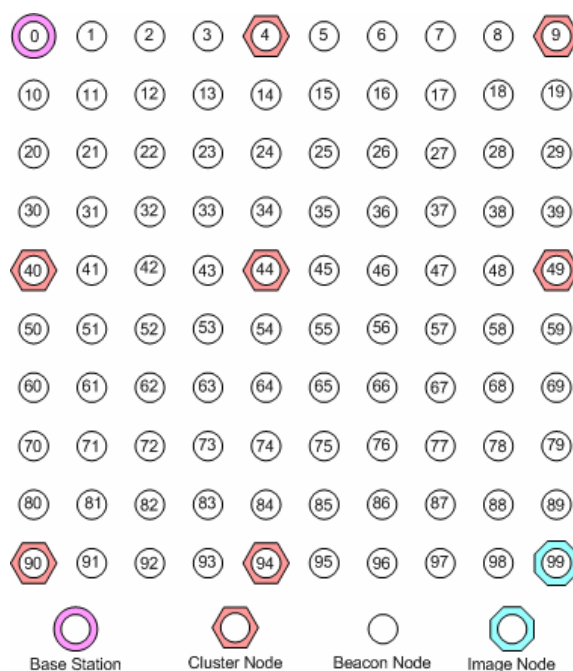


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายแบบต่างๆ

เป้าหมายในการนำวิทยานิพนธ์นี้ไปใช้งาน คือ ศึกษาการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอดในการเกษตร จึงเลือกใช้วิธีการจัดวางเซ็นเซอร์โหนดแบบกำหนดตำแหน่งในลักษณะตาราง การวางลักษณะนี้ช่วยในการควบคุมพื้นที่แต่ละส่วนได้ง่ายขึ้น โดยการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนย่อยๆ แต่ละส่วนจะมีโหนดเซ็นเซอร์ที่ทำหน้าที่จัดการรวบรวมข้อมูลจากโหนดในพื้นที่ของตนเอง 1 โหนด แล้วจึงส่งข้อมูลที่ไปยังโหนดวัดสภาพแวดล้อม และส่งไปยัง

โหนดฐานอีกทอดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ต่างๆ ในเครือข่าย การจำลองการส่งข้อมูลภาพนี้ใช้โหนดเซ็นเซอร์จำนวน 100 โหนด คือหมายเลข 0-99 โดยการจัดวาง ดังรูปที่

3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะการจัดวางโหนดเซ็นเซอร์ทั้งหมด

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยโหนด 4 ชนิด คือ โหนดฐาน โหนดกล้อง โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม และโหนด กระจายข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- โหนดฐาน คือโหนดหมายเลข 0 เป็นตัวรับข้อมูลจากโหนดอื่นๆ เข้าสู่คอมพิวเตอร์
- โหนดกล้อง คือโหนดหมายเลข 99 ทำหน้าที่ถ่ายภาพ บีบอัดภาพ แล้วส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายมายังโหนดฐาน
- โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม คือโหนดหมายเลข 4, 9, 40, 44, 49, 90 และ 94 ทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิแล้วส่งค่ามายังโหนดฐาน
- โหนดกระจายข้อมูล คือโหนดที่เหลือทั้งหมด ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณในเครือข่ายให้สื่อสารถึงกันได้

สถานการณ์ในการจำลองเครือข่ายมีรายละเอียดดังนี้ โหนดต้องจับภาพการเกษตรทุก 1 ชั่วโมง ทายส่งข้อมูลกลับมายังโหนดฐาน ในขณะเดียวกัน โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อมจะส่งข้อมูลทุกๆ 1 นาที เพื่อสร้างภาระโหนดเข้าไปในเครือข่าย หลังจากนั้นนำข้อมูลภาพที่ได้จากโหนดฐานมาแปลงกลับเป็นภาพ

การจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรม TOSSIM โดยปกติแล้วลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณภาพการเชื่อมต่อสัญญาณแบบไร้สายจะขึ้นอยู่กับ 2 ส่วนหลัก คือ ลักษณะของสัญญาณวิทยุที่ใช้ และสภาพแวดล้อมของช่องสัญญาณในบริเวณนั้น วิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาสถานการณ์จำลองให้ครอบคลุมจึงต้องกำหนดค่าทั้งสองส่วน โดยรูปแบบที่นำมาใช้ในการจำลองเป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบ link-layer ทั่วไปที่ทาง ANRG (Autonomous Networks Research Group) ประกาศไว้ให้ใช้กับสภาพแวดล้อมที่นิ่ง หรือมีการเคลื่อนที่น้อย การสร้างสภาพแวดล้อมของสัญญาณรบกวนต้องกำหนดค่าแปร 3 ส่วน คือ ช่องสัญญาณความถี่ (Channel), สัญญาณคลื่นวิทยุ (Radio) และโทโพโลยี (Topology) ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.1.3

การจำลองเครือข่ายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดค่าตัวแปรในไฟล์ grid10x10.txt โดยกำหนดการลดลงของค่าความแรงของสัญญาณเป็น 4.7 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการรับสัญญาณที่เกิดจากการส่งแบบหลายทางเป็น 3.2 dB การลดลงของกำลังของสัญญาณที่ระยะ 1 เมตรอยู่ที่ 55.4 dB ซึ่งเป็นค่าการลดลงของสัญญาณในสภาพแวดล้อมโล่งกว้างคล้ายสนามฟุตบอล ค่าเฉลี่ยของ NOISE_FLOOR อยู่ที่ -105 dBm เป็นการวางแบบสมมาตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ WHITE_GAUSSIAN_NOISE อยู่ที่ 4 dB และเป็นการจัดวางแบบผู้ใช้เป็นผู้กำหนดตามไฟล์ topo.txt รายละเอียดในการป้อนค่าต่างๆ อยู่ในภาคผนวก ก เราได้สร้างข้อกำหนดของเครือข่ายและสภาพแวดล้อมโดยใช้คำสั่งดังนี้

```
$ java net.tinyos.sim.LinkLayerModel grid10x10.txt
```

โดยผลลัพธ์จะได้ออกมาเป็นค่าอัตราขยายลิงค์ (Link Gain) จะถูกเขียนออกมาเป็นไฟล์ชื่อว่า linkgain.out ซึ่งภายในประกอบด้วยค่าอัตราขยายของการเชื่อมต่อแต่ละส่วนในเครือข่าย และค่า ระดับพื้นสัญญาณรบกวนของแต่ละโหนด รูปแบบของแต่ละบรรทัดในไฟล์ linkgain.out

```
"gain" src dest link_gain
```

```
"noise" node_id noise_floor additive_white_gaussian_noise เช่น
```

```
gain 0 1 -55.64
```

```
gain 1 0 -55.64
```

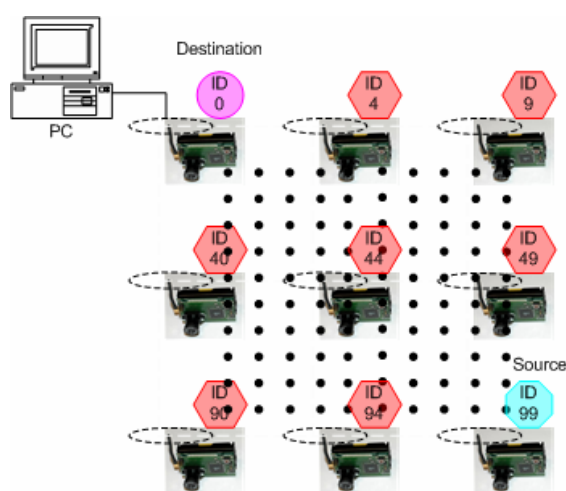
```
noise 0 -105.0 4.0
```

noise 1 -105.0 4.0

ส่วนผลลัพธ์ที่เป็นโทโพโลยีของเครือข่ายจะถูกเขียนเป็นไฟล์ชื่อ topology.out โดยรูปแบบคือ noise_id x_coordinate y_coordinate เช่นเดียวกับการกำหนดตำแหน่งของโหนดในไฟล์ topo.txt

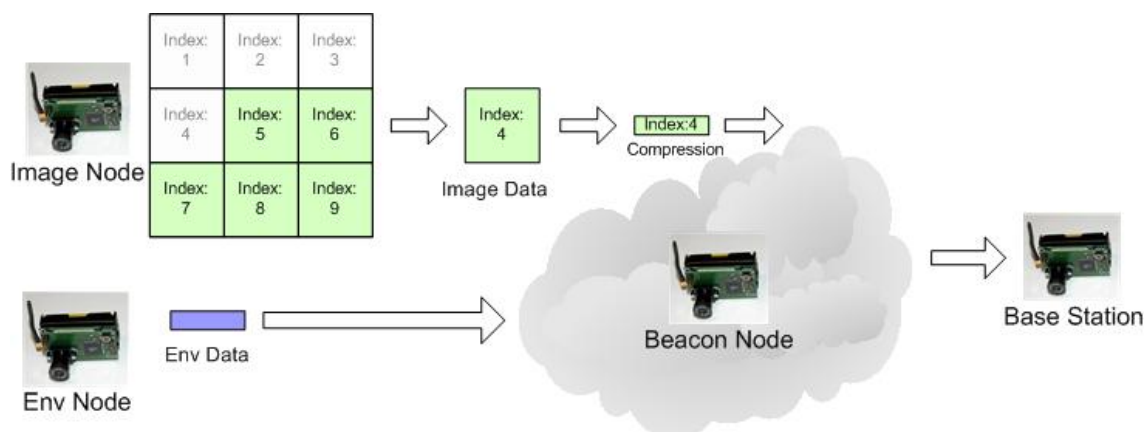
3.5 การออกแบบการทำงานของโหนดเซ็นเซอร์

เมื่อพิจารณาเฉพาะโหนดที่ทำหน้าที่หลักๆ สามารถมองภาพรวมได้ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างเครือข่ายที่ใช้ทดสอบ

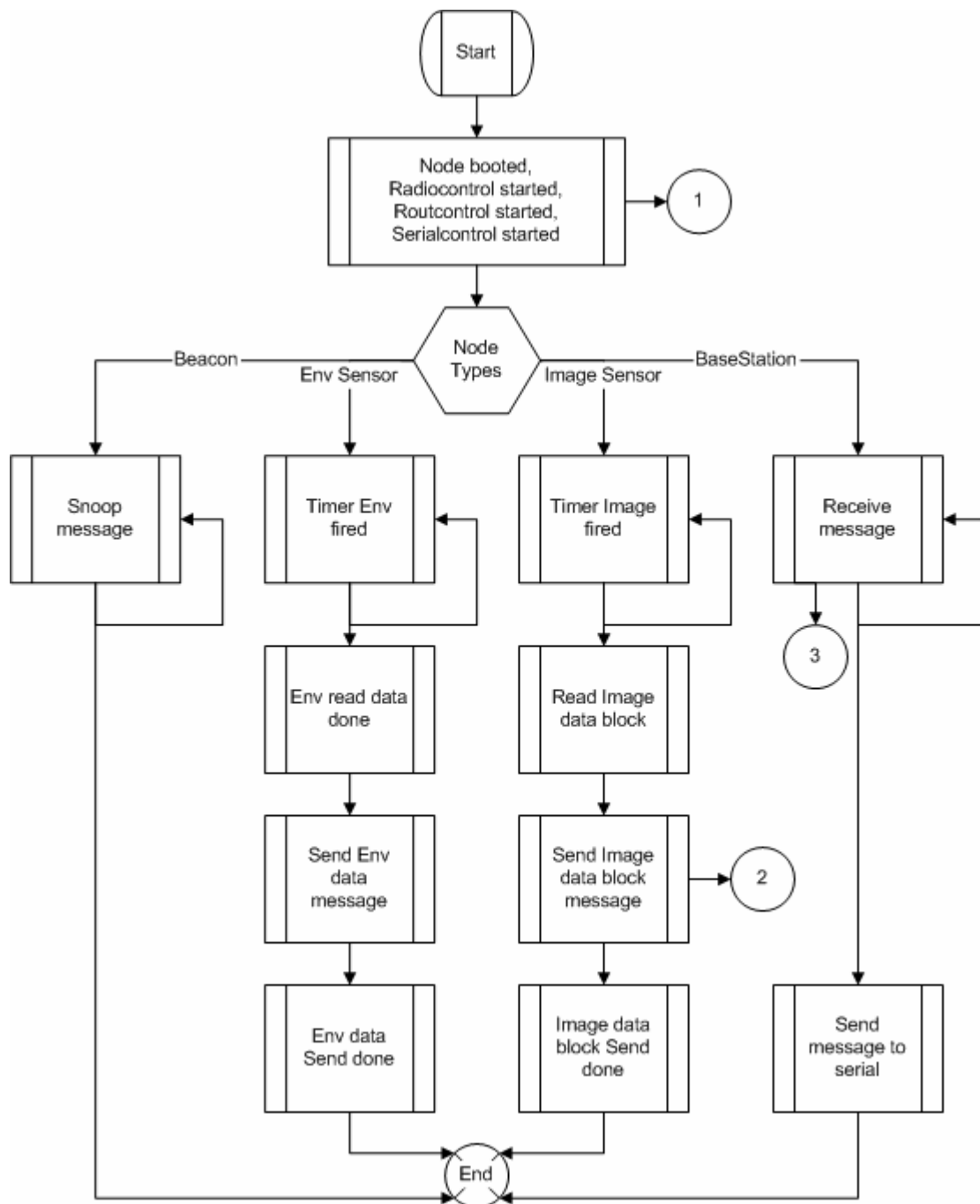
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จำลองสถานการณ์การส่งภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายซึ่งประกอบด้วยโหนด 4 ชนิด คือ (1.) โหนดฐานเป็นตัวรับข้อมูลจากโหนดอื่นๆ เข้าสู่คอมพิวเตอร์ (2.) โหนดกล้องทำหน้าที่ถ่ายภาพ บีบอัดภาพ แล้วส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายมายังโหนดฐาน (3.) โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อมทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิแล้วส่งค่ามายังโหนดฐาน เพื่อเพิ่มความคับคั่งของข้อมูล และ (4.) โหนดกระจายข้อมูลทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณในเครือข่ายให้สื่อสารถึงกันได้ ดังรูปที่ 3.8



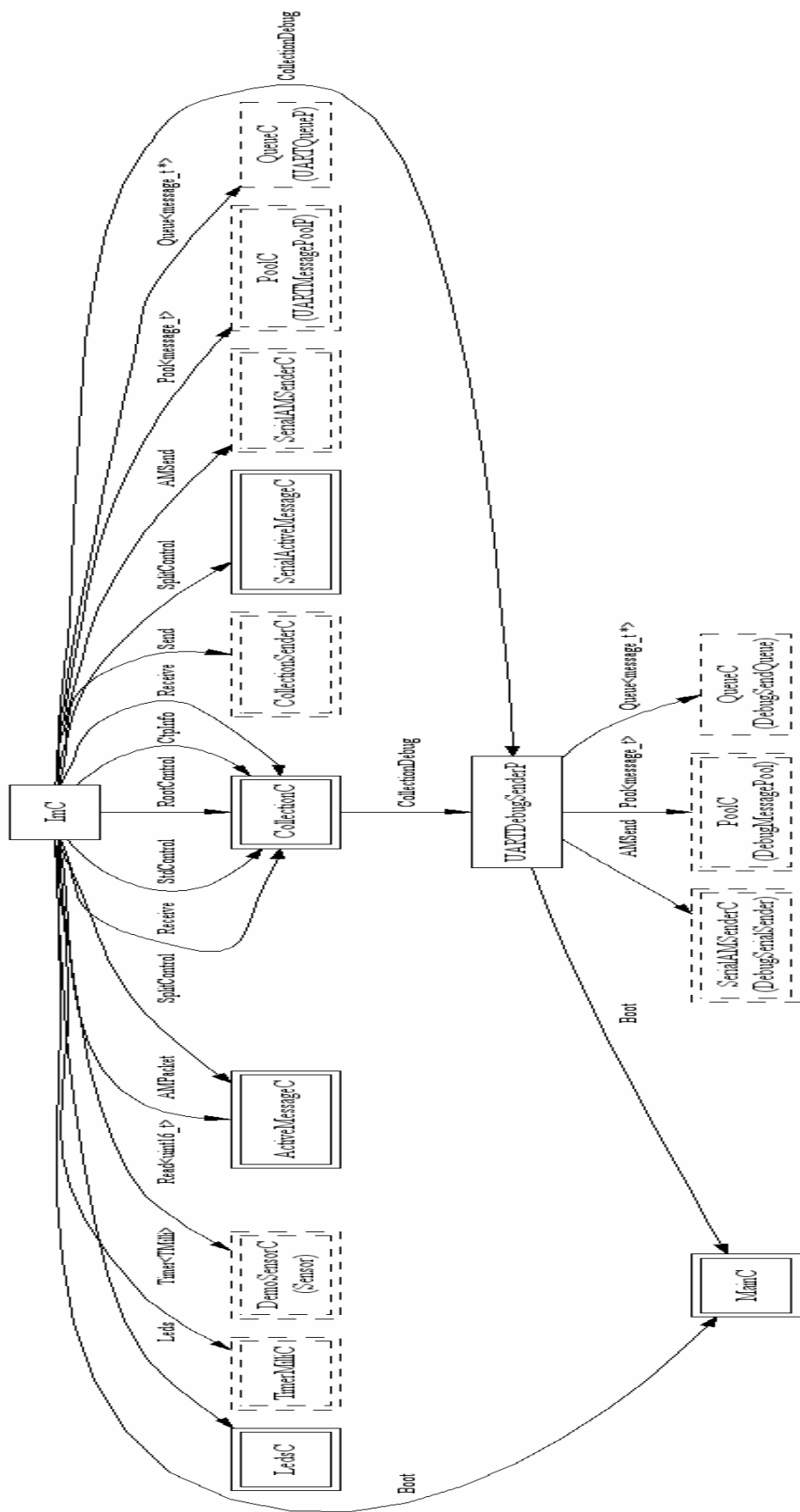
รูปที่ 3.8 การทำงานของโหนดแต่ละชนิด

แผนผังการทำงานรวมดังรูปที่ 3.9 โครงสร้างรวมของซอฟต์แวร์ดังรูปที่ 3.10 การทำงานของระบบเริ่มจากการเรียกการควบคุมทาง Radio, Rout, และ Serial แล้วแยกประเภทของโหนดในหน่วยที่ 1 ดังรูปที่ 3.11 หลังจากนั้น การทำงานของแต่ละโหนดจะขึ้นอยู่กับชนิดของโหนดนั้น

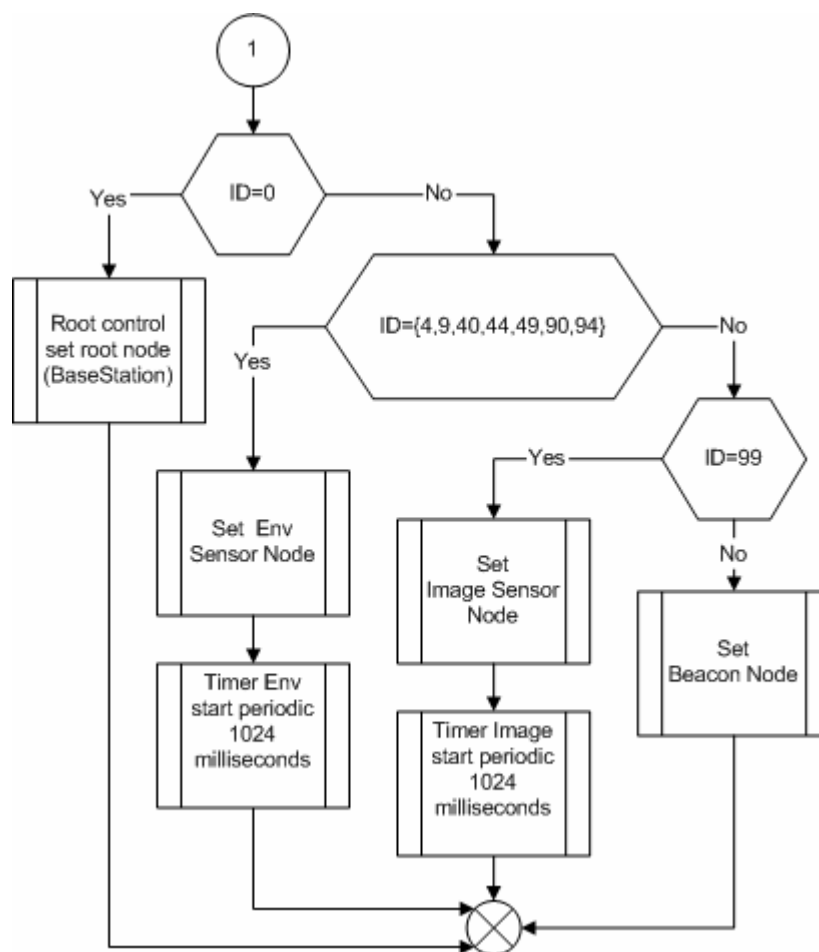
- โหนดกระจายข้อมูล ทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลตลอดเวลา
- โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม ตั้งเวลาขึ้นมาทำงานทุก 1 วินาที อ่านค่าอุณหภูมิ ส่งค่าอุณหภูมิเข้าสู่เครือข่าย
- โหนดกล้อง อ่านข้อมูลภาพทุก 1 วินาที ส่งแพ็คเกจข้อมูลเข้าสู่เครือข่ายตามหน่วยที่ 2
- โหนดฐาน รวบรวมข้อมูลจากเครือข่ายตามหน่วย 3 ทายอดส่งข้อมูลผ่านพอร์ทอนุกรม



รูปที่ 3.9 แผนผังการทำงานรวม



รูปที่ 3.10 โครงสร้างรวมของซอฟต์แวร์



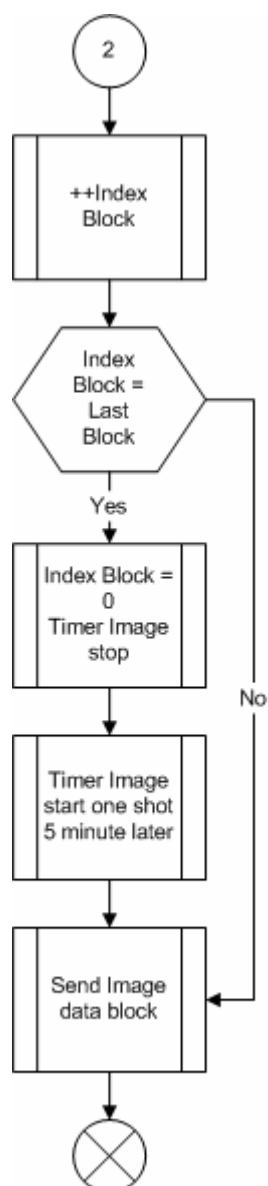
รูปที่ 3.11 การแยกประเภทโหนด

จากรูปที่ 3.11 มีขั้นตอนการแยกประเภทโหนดในหน่วยที่ 1 ดังนี้ พิจารณามายเลขโหนดหากเท่ากับ 0 ให้กำหนดเป็นโหนดฐานหรือเป็น Root ของเครือข่าย จากนั้นหากหมายเลขโหนดตรงกับหมายเลข 4, 9, 40, 44, 49, 90 และ 94 ให้กำหนดเป็นโหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม ตั้งเวลาให้ขึ้นมาทำงานทุก 1 วินาที หลังจากนั้นหากเป็นโหนดหมายเลข 99 กำหนดให้เป็นโหนดกล้อง และตั้งเวลาขึ้นทำงานทุก 1 วินาที ส่วนที่เหลือให้เป็นโหนดกระจายข้อมูล

3.5.1 ซอฟต์แวร์ของโหนดจับภาพ

โหนดหมายเลข 99 ทำหน้าที่ส่งข้อมูลภาพ ทำงานตลอดเวลา 1 วินาที มีขั้นตอนการตัดสินใจในการส่งข้อมูลภาพ ดังนี้ อ่านค่า index block เพิ่มค่า index block ขึ้น 1 ค่า หากมากกว่าค่าบล็อกสุดท้ายของภาพ ให้ค่า index block เท่ากับ 0 และสั่งหยุดการจับเวลา แล้วสั่งตั้งเวลาให้

ขึ้นมาทำงานในอีก 5 นาทีถัดไป แล้วจึงส่งข้อมูลบล็อกใหม่ แต่ถ้าน้อยกว่าค่าหมายเลขบล็อกสุดท้าย ให้ส่งข้อมูลได้เลย ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เงื่อนไขในการส่งข้อมูลภาพ

3.5.2 ซอฟต์แวร์ของโหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม

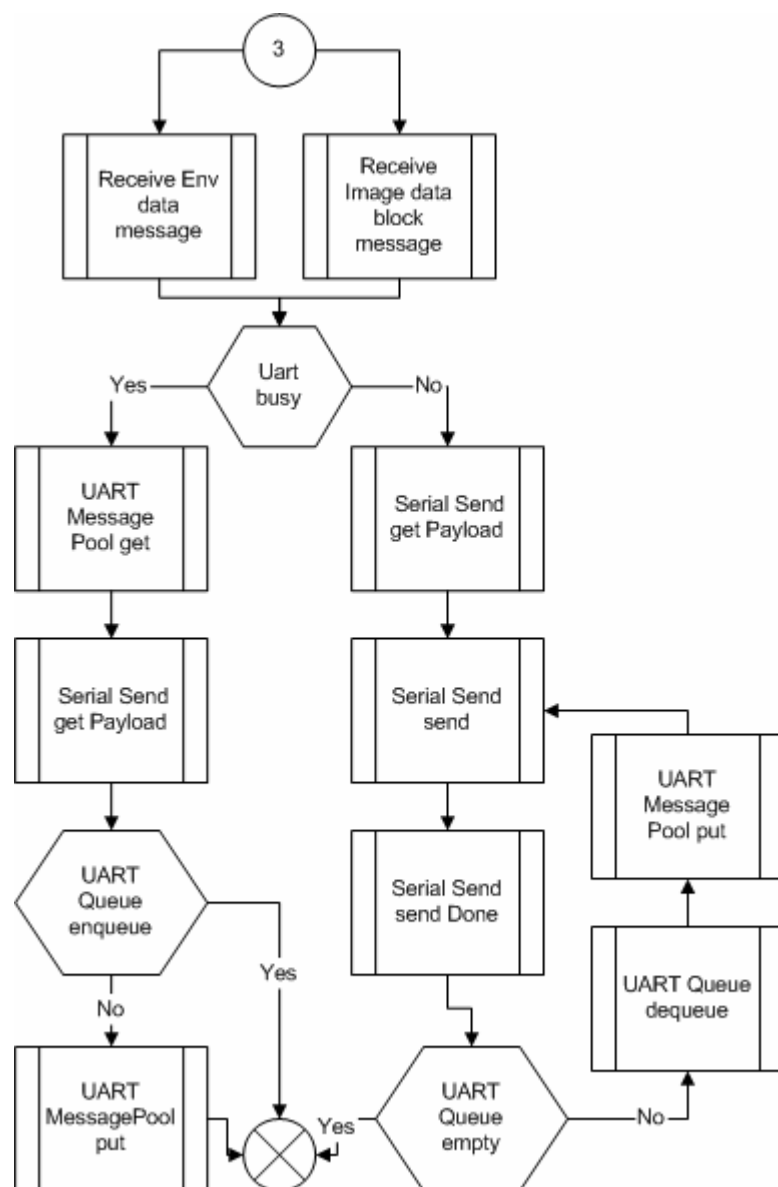
โหนดหมายเลข 4, 9, 40, 44, 49, 90 และ 94 ทำหน้าที่ส่งข้อมูลสภาพแวดล้อมเข้าสู่เครือข่าย ทำงานทุก 1 วินาที เพื่อเพิ่มความถี่ของสัญญาณในเครือข่าย

3.5.3 ซอฟต์แวร์ของโหนดกระจายข้อมูล

โหนดอื่นๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่โหนดกล้อง โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม และโหนดฐาน ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลภาพ และข้อมูลสภาพแวดล้อม ทำงานตามเวลารับข้อมูล

3.5.4 ซอฟต์แวร์ของโหนดฐาน

โหนดหมายเลข 0 ทำหน้าที่รับข้อมูลภาพ และข้อมูลสภาพแวดล้อม ทำงานตามเวลารับข้อมูล ลำดับการทำงานของโหนดฐาน เมื่อได้รับข้อมูลจากเครือข่าย ก็จะแยกว่าเป็นข้อมูลอุณหภูมิ หรือข้อมูลภาพ หลังจากนั้น จะมาตรวจสอบว่าพอร์ทอนุกรมว่างอยู่หรือไม่ หากว่างให้รับค่าข้อมูลเข้ามา แล้วส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ทอนุกรม แล้วจึงดูว่าออกจากลำดับแล้วหรือยัง ถ้าใช้ก็รอรับคำสั่งต่อไป หากไม่ให้ไปนำข้อมูลเข้าสู่ลำดับ แต่ถ้าพอร์ทอนุกรมไม่ว่าง ให้ส่งข้อมูลเข้าสู่พอร์ทอนุกรมต่อจนเสร็จ แล้วมาตรวจสอบว่าออกจากลำดับหรือยัง ถ้าใช้ก็รอรับคำสั่งถัดไป ถ้าไม่ให้เอาลำดับออก แล้วจึงสั่งดึงค่าข้อมูลถัดไป เพื่อส่งอีกรอบหนึ่งจนข้อมูลถูกส่งครบ แล้วเอาลำดับออก ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ซอฟต์แวร์ของโหนดฐาน

3.6 การจำลองสถานการณ์รับส่งข้อมูลภาพ

การจำลองระบบประกอบด้วยการแทรกส่วนตรวจสอบการทำงานของระบบ ณ จุดเชื่อมต่อ และเวลาต่างๆ ในการทำงานของโปรแกรม ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 เงื่อนไขและการตรวจสอบการทำงานของระบบ

ประเภท	เงื่อนไข	ข้อมูลที่สนใจ
ทุกโหนด	การขึ้นมาทำงาน	เวลาที่โหนดทำงาน
โหนดกล้อง	การส่งข้อมูลภาพในแต่ละแพคเกจ	จำนวนครั้งของการส่งข้อมูลภาพ
โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม	การการส่งข้อมูลสภาพแวดล้อมในแต่ละแพคเกจ	จำนวนครั้งในการส่งข้อมูลสภาพแวดล้อม
โหนดกระจายข้อมูล	การส่งข้อมูลภาพและข้อมูลอุณหภูมิต่อไปยังโหนดฐาน	การเดินทางของแพคเกจข้อมูลภาพและแพคเกจข้อมูลสภาพแวดล้อมในเครือข่าย
โหนดฐาน	การรับข้อมูลภาพและข้อมูลสภาพแวดล้อม	จำนวนข้อมูลภาพและข้อมูลสภาพแวดล้อมที่ได้รับจริงแพคเกจข้อมูลที่ต้องการและส่วนของข้อมูลที่รับซ้ำซ้อน

3.6.1 กระบวนการจำลองสถานการณ์

ขั้นตอนการจำลองเครือข่ายของโหนดเซ็นเซอร์ และการรับส่งข้อมูลภายในเครือข่าย

- กำหนดพิกัดและสภาพการสื่อสารของแต่ละโหนด โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สร้างจาก LinklayerModel.java
- เพิ่มช่องตรวจสอบลงในโค้ดของโหนดเซ็นเซอร์ด้วยคำสั่ง addChannel() เพื่อตรวจสอบการทำงานแต่ละขั้น คำสั่งในการควบคุม addChannel(channel, output) เมื่อ channel คือ ช่องตรวจสอบ และ output คือ ผลลัพธ์จากการตรวจสอบ
- กำหนดเวลาในการเริ่มต้นการทำงานของโหนดต่างๆ ในเครือข่าย เริ่มจากโหนดหมายเลข 0 ถึงโหนดหมายเลข 99 ตามลำดับ คำสั่งในการควบคุม bootAtTime(time) เมื่อ time คือ เวลาที่ขึ้นมาทำงานตามเวลาสัญญาณนาฬิกาของการจำลอง
- เมื่อโหนดหมายเลข 0 (โหนดฐาน) เริ่มทำงานก็จะทำหน้าที่รอรับข้อมูลที่จะถูกส่งมาเพียงอย่างเดียว แล้วเก็บข้อมูลที่รับได้ด้วยโครงสร้าง ดังนี้ DEBUG(0) Received packet is 1 โดยแทรกคำสั่งในโค้ด dbg("ReceiveIm", "Received packet is %hhu\n", in->count)

5. เมื่อโหนด 4, 9, 40, 44, 49, 90, 94 (โหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม) เริ่มทำงานตั้งเวลาให้มีการวัดเซ็นเซอร์ทุกๆ 1 วินาทีแล้วส่งข้อมูลไปยังโหนดฐาน โดยข้อมูลที่ถูส่งแต่ละครั้งจะเก็บด้วยโครงสร้าง ดังนี้ DEBUG(0) packet sent is 255 โดยแทรกคำสั่งในโค้ด `dbg("SendEnv", "packet sent is %hu\n", localim.count)`

6. โหนดหมายเลข 99 (โหนดกล้อง) การทำงานจะคล้ายกับโหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม คือ เมื่อเริ่มทำงานจะตั้งเวลาทุกๆ 1 นาที ให้มีการส่งบล็อคของข้อมูลภาพ 1 ครั้งจนครบทั้งภาพจึงหยุดส่ง ซึ่งหมายเลขบล็อคข้อมูลภาพที่ส่งไปจะถูกจัดเก็บด้วยโครงสร้าง ดังนี้ DEBUG(0) packet sent is 1 โดยแทรกคำสั่งในโค้ด `dbg("SendIm", "packet sent is %hu\n", localim.count)`

7. เมื่อโหนดกระจายข้อมูลเริ่มทำงาน จะทำหน้าที่ส่งต่อทั้งข้อมูลภาพ และข้อมูลสภาพแวดล้อม โดยข้อมูลที่ดักไว้ด้วยโครงสร้าง ดังนี้ DEBUG(0) packet snoop is 1 โดยแทรกคำสั่งในโค้ด `dbg("SnoopIm", "packet snoop is %hu\n", omsg->count)`

8. สั่งให้แต่ละโหนดทำงาน เพื่อให้ทุกโหนดบุตรครบทุกตัว โดยเก็บข้อมูลการบูตด้วยโครงสร้างดังนี้ DEBUG(0) booted โดยแทรกคำสั่งในโค้ด `dbg("Control", "booted\n")`

9. สั่ง `runNextEvent` จนโหนดจับภาพส่งข้อมูลภาพครบทั้งหมด แล้วจึงหยุดทำงาน

การศึกษาการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายจะใช้การเขียนโค้ดภาษา Python เพื่อสุ่มสร้างสถานการณ์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในการรับส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นที่ 1 การรับข้อมูลระยะห่างระหว่างโหนดเพื่อใช้ในการอ่านค่าสัญญาณรบกวนที่สร้างไว้แล้ว สร้างไฟล์เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากช่องตรวจสอบที่แทรกอยู่ในโค้ดลงในไดเรกทอรี โดยแยกตามช่องตรวจสอบนั้น

ขั้นที่ 2 การสร้างสภาพแวดล้อมของบริเวณโดยรอบของโหนดเซ็นเซอร์โดยการอ่านค่าสัญญาณรบกวน แล้วเพิ่มค่าอัตราขยายและกำหนดค่าสัญญาณรบกวนให้โหนดแต่ละตัว ใส่ค่าสัญญาณรบกวนให้แก่โหนดแต่ละตัวโดยใช้คำสั่ง `addNoiseTraceReading(noisevalue)` เมื่อ `noisevalue` คือ ค่าสัญญาณรบกวน หลังจากนั้นจึงใช้คำสั่ง `createNoiseModel()`

ขั้นที่ 3 สั่ง `addChannel` เพื่อระบุให้เก็บค่าที่ใด

ขั้นที่ 4 สั่ง `bootAtTime` โดยเริ่ม boot จาก node ถึงโหนด 99 ตามลำดับ

ขั้นที่ 5 สั่ง `runNextEvent` จำนวน 10000 รอบ เพื่อให้ node ทุกตัว boot ครบ

ขั้นที่ 6 สั่ง runNextEvent จนกว่า node 99 จะส่งข้อมูลภาพครบ แล้วให้ delay ไปอีกครั้งชั่วคราว แล้วจึงสั่ง runNextEvent ส่งข้อมูลภาพต่อไป

เมื่อจำลองการทำงานครบทุกขั้นตอนจะได้ไฟล์ออกมาทั้งหมด ดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ชื่อไฟล์และข้อมูลที่จัดเก็บ

Channel	ข้อมูลที่จัดเก็บ	ค่าที่เก็บ	ชื่อไฟล์
Control	ลำดับการ booted ของโหนดแต่ละโหนด	-	Control.txt
SendIm	ลำดับของแพคเกจข้อมูลภาพที่ใช้ส่งข้อมูลอุณหภูมิของโหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อมแต่ละชนิด	หมายเลขแพคเกจ	SendIm.txt
SendCt	จำนวนครั้งทั้งหมดที่ส่งข้อมูลอุณหภูมิของโหนดเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อมแต่ละชนิด	หมายเลขแพคเกจ	SendCt.txt
SnoopIm	จำนวนครั้งของการส่งข้อมูลภาพในเครือข่าย	หมายเลขแพคเกจ	SnoopIm.txt
SnoopCt	จำนวนครั้งของการส่งข้อมูลอุณหภูมิในเครือข่าย	หมายเลขแพคเกจ	SnoopCt.txt
ReceiveIm	จำนวนครั้งในการรับข้อมูลภาพจากเครือข่าย	หมายเลขแพคเกจ	ReceiveIm.txt
ReceiveCt	จำนวนครั้งในการรับข้อมูลอุณหภูมิจากเครือข่าย	หมายเลขแพคเกจ	ReceiveCt.txt

3.6.2 การป้อนข้อมูลภาพ

การป้อนข้อมูลภาพใช้วิธีสร้างแพคเกจที่มีขนาดเท่ากับข้อมูลเท่ากับข้อมูลภาพที่ต้องการส่ง และกำหนดค่าเริ่มต้นให้ข้อมูลนั้น พร้อมทั้งใส่ค่าหมายเลขบล็อกเพื่อใช้เป็นหมายเลขอ้างอิงสำหรับดึงข้อมูลภาพจริงของบล็อกนั้นสำหรับการแปลงข้อมูลกลับมาเป็นไฟล์ภาพภายหลัง

3.6.3 การวิเคราะห์ผลการรับส่งข้อมูลภาพ

การรับส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะใช้ข้อมูลที่ได้รับจากโหนดฐาน เพื่อ นับจำนวนบิตของข้อมูลภาพที่ได้รับทั้งหมด วิเคราะห์หาความซ้ำซ้อนของข้อมูล จำแนกแพ็คเกจที่ไม่ซ้ำกันมากพอควรแล้ว แล้วนำมาประกอบเป็นภาพใหญ่โดยใช้ดัชนีบอกตำแหน่งของบิตในภาพ เมื่อได้รับข้อมูลทั้งหมดแล้ว ก็นำข้อมูลที่ได้มาแปลงเป็นข้อมูลภาพที่ละบิต การแปลงประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การแปลงข้อมูลภาพกลับมา และการแทนบิตของข้อมูลภาพที่ขาดหายไปด้วยข้อมูลที่ได้รับก่อนหน้านี้

การวิเคราะห์คุณภาพแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การเปรียบเทียบคุณภาพกรณีที่ไม่มีการสูญหายของแพ็คเกจเลย คือ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบีบอัดข้อมูลภาพกับภาพต้นฉบับ
2. การเปรียบเทียบคุณภาพที่ปลายทางกับภาพที่ผ่านการบีบอัดแล้ว เพื่อหาความแตกต่างของข้อมูลภาพที่เกิดจากการสูญหายของข้อมูลในรูปของแพ็คเกจ

ในการวิเคราะห์คุณภาพภาพจะใช้วิธีการเปรียบเทียบความแตกต่าง ระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพปลายทางจะใช้ Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) เพื่อเปรียบเทียบขนาดของข้อมูลมากที่สุดกับค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นโดยใช้ Mean Squared Error (MSE) ในการคำนวณหา ค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพปลายทาง ดังสมการ 3.2

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - K(i, j)\|^2 \quad (3.2)$$

เมื่อภาพมีขนาด $m \times n$ โดย $I(i, j)$ เป็นค่าพิกเซลของภาพต้นฉบับ $K(i, j)$ เป็นพิกเซลของภาพปลายทางที่ต้องการหาคุณภาพภาพ และ MAX คือค่าสูงสุดของพิกเซล โดย PSNR ทำให้เห็นความแตกต่างของค่าความผิดพลาดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังสมการที่ 3.3

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (3.3)$$