



การวิเคราะห์สมรรถนะการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางและการจัดสรรช่องสัญญาณแบบ

หลายช่องสัญญาณสำหรับการส่งวิดีโอบนเครือข่าย IEEE 802.15.4

**Performance Analysis of Multi-Path Routing and Multi-Channel Assignment for**

**Video Transmission on IEEE 802.15.4 Networks**

สิทธิศักดิ์ ส่องข้าว

Sitthisak Songkhao

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Prince of Songkla University**

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การวิเคราะห์สมรรถนะการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางและการจัดสรร  
ช่องสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณสำหรับการส่งวิดีโอบนเครือข่าย IEEE  
802.15.4

**ผู้เขียน** นายสิทธิศักดิ์ ส่งข่าว

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

---

<p>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก</p> <p>.....</p> <p>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกรม ชีรภาพจรเดช)</p>	<p>คณะกรรมการสอบ</p> <p>.....ประธานกรรมการ</p> <p>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐฐา จินดาเพชร)</p> <p>.....กรรมการ</p> <p>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกรม ชีรภาพจรเดช)</p> <p>.....กรรมการ</p> <p>(รองศาสตราจารย์ ดร. พรชัย พลภักย์ภัทรานนต์)</p> <p>.....กรรมการ</p> <p>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สกฤณา เจริญปัญญาศักดิ์)</p> <p>.....กรรมการ</p> <p>(ดร. ภาสกร ประถมบุตร)</p>
---	---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้า

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน  
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกรม ธีรภาพจรเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายสิทธิศักดิ์ ส่งข้าว)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายสิทธิศักดิ์ ส่งข่าว)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางและการจัดสรรช่องสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณสำหรับการส่งวิดีโอบนเครือข่าย IEEE 802.15.4
ผู้เขียน	นายสิทธิศักดิ์ ส่งข่าว
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการจัดสรรช่องสัญญาณบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายแบบหลายทอด (Multi-hop networks) และยังคงรักษาคุณภาพของวิดีโอในระดับที่ต้องการ วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ออกแบบโดยอาศัยพื้นฐานจากวิธีการการส่งข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณและหลายเส้นทาง (Multi-channel and multi-path approaches) ในอันดับแรก งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาโพรโทคอล Destination sequence distance vector (DSDV) ให้สามารถรองรับการทำงานแบบหลายช่องสัญญาณ โดยโหนดในเครือข่ายประกอบด้วย 3 อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (Interface) กำหนดให้ Interface แรกทำหน้าที่แลกเปลี่ยนข้อมูลการจัดเส้นทาง และอีกสอง Interface ที่เหลือใช้สำหรับการขนส่งข้อมูลวิดีโอ Interface ที่ทำหน้าที่ขนส่งข้อมูลวิดีโอถูกกำหนดให้มีความสามารถในการสลับใช้ช่องสัญญาณทั้งหมดที่ใช้ได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สำหรับ Interface ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนข้อมูลการจัดการเส้นทางถูกกำหนดให้ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันเพื่อส่งข่าวสารเส้นทาง (Routing message) โดยในข่าวสารเส้นทางจะมีการเพิ่มข้อมูลช่องสัญญาณไว้ ซึ่งโพรโทคอลที่นำเสนอนี้เรียกว่า โพรโทคอล 16-channel 3-interface (16C3I) DSDV การจัดสรรช่องสัญญาณของโพรโทคอลนี้ใช้เทคนิคการกระจายช่องสัญญาณ (Receive channel balancing: RCB) เพื่อช่วยลดการแทรกสอดภายในช่องสัญญาณ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถรองรับการให้บริการข้อมูลวิดีโอในระดับที่มีคุณภาพในกรณีการจำลองแบบหลายโหนดต้นทางและหลายโหนดปลายทาง อันดับที่สอง โพรโทคอล 16C3I DSDV ถูกพัฒนาให้สามารถรองรับการทำงานแบบหลายเส้นทาง เรียกว่า 16C3I MDSDV โพรโทคอลนี้สามารถใช้ส่งข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค Multiple descriptions coding (MDC) ผลการจำลองการทำงานในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่เสนอสามารถให้บริการวิดีโอที่มีคุณภาพในกรณีที่ใช้เทคนิค MDC โดยผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของโพรโทคอลที่นำเสนอ และสามารถพัฒนาเป็นงานวิจัยต่อยอดได้ในอนาคต

**Thesis Title** Performance Analysis of Multi-Path Routing and Multi-Channel Assignment for Video Transmission on IEEE 802.15.4 Networks

**Author** Mr. Sitthisak Songkhao

**Major Program** Electrical Engineering

**Academic Year** 2013

### **ABSTRACT**

This thesis investigates how to utilize radio-channel resources in IEEE 802.15.4 such that video sources can transmit traffic over multi-hop networks and still achieve application-specific quality requirements. The proposed solutions studied in this research are based on multi-channel and multi-path approaches. Firstly, this thesis extends the multi-channel capability to the destination sequence distance vector (DSDV) routing protocol. All nodes are assumed to consist of three radio interfaces: One is for routing control and others are for video traffic. The video-traffic interfaces can switch to all available channels in the IEEE 802.15.4 network. The control interface of each node shares a common channel pre-assigned in the network for exchanging routing messages with channel-information attachments. This proposed solution is called 16-channel 3-interface (16C3I) DSDV. The channel assignment of this 16C3I scheme is based on a receive-channel-balancing technique to reduce the channel interference in the network. The simulation results indicate that the 16C3I DSDV can provide sufficient video quality in the multi-source multi-sink scenarios. Secondly, this 16C3I DSDV is extended to a multi-path version called 16C3I MDSDV. The 16C3I MDSDV is proposed to deliver video with the multiple descriptions coding (MDC) technique. The simulation results indicate that the 16C3I MDSDV can provide sufficient video quality when employing with MDC. Extensive simulation analyses also provide a clear limitation of this 16C3I MDSDV for further research developments.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกรม ธีรภาพจรเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และคอยซักเตือน เพื่อพัฒนาการทำงานวิจัย รวมทั้งกรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ในด้านการทำวิจัย เอกสาร ข้อมูลต่างๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งขัดเกลากระบวนการคิดและให้กำลังใจในการแก้ไขปัญหาตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ัญญา จินดาเพ็ชร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พรชัย พฤกษ์ภัทรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สกุนา เจริญปัญญาศักดิ์ และ ดร. ภาสกร ประถมบุตร (ผู้ทรงคุณวุฒิ) ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ วิจารณ์ผลงาน และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าระหว่างการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีเยี่ยม และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

สิทธิศักดิ์ ส่งข่าว

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(12)
รายการภาพประกอบ.....	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ.....	(18)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2.1 การส่งข้อมูลวีดิโอบนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และ โพรโทคอล จัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมกับการขนส่งวีดิโอบนเครือข่ายแบบหลายทอด.....	2
1.2.2 การจัดสรรช่องสัญญาณบน โหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณ วิทยุ.....	5
1.2.3 การจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง.....	8
1.2.4 การจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางบน โหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ.....	12
1.3 ประเด็นวิจัย.....	14
1.4 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	15
1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	15
1.7 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	18
2.1 ลำดับชั้นโพรโทคอลการติดต่อสื่อสาร.....	18
2.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	19
2.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง Destination-sequenced distance-vector (DSDV).....	20
2.4 ความรู้พื้นฐานของภาพและวีดิโอ.....	21
2.4.1 การแสดงข้อมูลภาพ (Image representation).....	21
2.4.2 ระบบสี (Color model).....	22
2.4.3 การบีบอัดข้อมูลวีดิโอด้วยเทคนิค MPEG4.....	23



## สารบัญ (ต่อ)

2.4.4	การแยกข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค Multiple Description Coding (MDC) .....	25
2.4.5	เครื่องมือ EvalVid .....	26
2.5	แบบจำลองประกอบการจำลองการทำงาน.....	32
2.5.1	แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ Two-ray ground reflection.....	32
2.5.2	แบบจำลองพลังงาน (Energy model) .....	33
บทที่ 3	การศึกษาผลกระทบจากการส่งวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	34
3.1	โหมดแบบ 2 ช่องสัญญาณและ 2 อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (2-channel 2-interface: 2C2I).....	34
3.2	การพัฒนาโพรโทคอล DSDV สำหรับโหมดแบบ 2C2I (2C2I DSDV) .....	35
3.3	กำหนดการช่องสัญญาณ (Channel scheduling).....	35
3.4	วัตถุประสงค์การทดลอง .....	36
3.5	การออกแบบการทดลอง .....	36
3.6	ตัววัดสมรรถนะ .....	37
3.7	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	38
3.8	สรุปผลการทดลอง.....	40
บทที่ 4	การศึกษาการทำงานประสานกันระหว่างโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV และการจัดสรรช่องสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ .....	41
4.1	การศึกษาสมรรถนะการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายแบบหลายช่องสัญญาณ .....	41
4.1.1	โหมดแบบ 16 ช่องสัญญาณและ 3 อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (16-channel 3-interface: 16C3I).....	41
4.1.2	การพัฒนาโพรโทคอล DSDV สำหรับโหมดแบบ 16C3I (16C3I DSDV) .....	42
4.1.3	เทคนิคการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล (Receive channel balancing: RCB).....	43
4.1.4	วัตถุประสงค์การทดลอง .....	44
4.1.5	การออกแบบการทดลอง .....	44
4.1.6	ตัววัดสมรรถนะ .....	48
4.1.7	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	48

## สารบัญ (ต่อ)

4.1.8	สรุปผลการทดลอง.....	55
4.2	การศึกษาสมรรถนะของเทคนิคการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล.....	55
4.2.1	สัญญาณแทรกสอด (Interference) .....	55
4.2.2	การปรับปรุงเทคนิค RCB .....	57
4.2.3	วัตถุประสงค์การทดลอง .....	58
4.2.4	การออกแบบการทดลอง .....	59
4.2.5	ตัววัดสมรรถนะ .....	60
4.2.6	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	60
4.2.7	สรุปผลการทดลอง.....	69
บทที่ 5	การศึกษาการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางด้วยโพรโทคอล 16C3I DSDV .....	70
5.1	แนวคิดการหาหลายเส้นทางที่ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดร่วมกัน (Link-disjoint) .....	70
5.2	การพัฒนาการเตรียมหลายเส้นทางด้วยโพรโทคอล 16C3I DSDV .....	70
5.2.1	การพัฒนาตารางเส้นทางด้วยการเพิ่มข้อมูล Last hop .....	71
5.2.2	กระบวนการทำงานของโพรโทคอล 16C3I MDSDV .....	72
5.2.2.1	กระบวนการหาหลายเส้นทาง .....	72
5.2.2.2	กระบวนการซ่อมบำรุงเส้นทาง.....	80
5.2.3	วิธีการส่งข้อมูลด้วยโพรโทคอล 16C3I MDSDV .....	91
5.3	วัตถุประสงค์การทดลอง .....	97
5.4	การออกแบบการทดลอง .....	97
5.5	ตัววัดสมรรถนะ .....	101
5.6	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	102
5.7	สรุปผลการทดลอง.....	122
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	123
6.1	สรุปผลการวิจัย .....	123
6.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	124
6.2.1	ปัญหา.....	124

## สารบัญ (ต่อ)

6.2.2 ข้อเสนอแนะ .....	124
ภาคผนวก .....	130
ภาคผนวก ก การเตรียมข้อมูลวิดีโอเพื่อใช้บนโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 .....	131
ก.1 แนะนำวิดีโอ .....	132
ก.2 วิธีการเข้ารหัสวิดีโอ.....	132
ก.3 การเตรียมข้อมูลวิดีโอเพื่อจำลองการทำงานด้วย NS2 .....	133
ภาคผนวก ข การประเมินสมรรถนะการส่งวิดีโอด้วยเครื่องมือ EvalVid .....	134
ข.1 การประเมินผลสมรรถนะวิดีโอด้านปลายทาง .....	135
ข.2 การประเมินสมรรถนะ PSNR.....	135
ภาคผนวก ค การใช้งานโพรโทคอล 16C3I MDSDV และเครื่องมือ EvalVid บนโปรแกรมจำลอง การทำงานระบบเครือข่าย NS-2 .....	137
ค.1 โปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2.....	138
ค.2 การใช้งานโพรโทคอล 16C3I MDSDV บนโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2.....	138
ค.3 การใช้งานเครื่องมือ EvalVid บนโปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย NS-2.....	140
ประวัติผู้เขียน .....	141

## รายการตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 บทความที่เกี่ยวข้องกับการส่งข้อมูลวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และ โปรโตคอลจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการส่งวิดีโอ.....	4
ตารางที่ 1-2 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรช่องสัญญาณบน โหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ.....	7
ตารางที่ 1-3 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง .....	11
ตารางที่ 1-4 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางบน โหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ.....	13
ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบ PSNR และ MOS .....	25
ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างของไฟล์ Traffic trace .....	31
ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างไฟล์ Sender trace .....	31
ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างไฟล์ Receiver trace.....	31
ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างไฟล์ Frame loss rate .....	31
ตารางที่ 2-6 ตัวอย่างไฟล์ Frame jitter .....	32
ตารางที่ 3-1 ค่าเฉลี่ยของ PSNR.....	40
ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	45
ตารางที่ 5-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	101

## รายการภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างบทที่ 3 - บทที่ 5.....	17
ภาพประกอบที่ 2-1 โพรโทคอลในแต่ละลำดับชั้นที่ใช้ในงานวิจัย .....	19
ภาพประกอบที่ 2-2 รูปแบบเฟรมชั้นควบคุมการใช้สื่อและชั้นกายภาพในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 .....	20
ภาพประกอบที่ 2-3 การเกิดวิดีโอ .....	21
ภาพประกอบที่ 2-4 การกำหนดขอบเขตของภาพตัวอักษรเอที่มีรูปร่าง A ให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม .....	21
ภาพประกอบที่ 2-5 การเก็บข้อมูลภาพตัวอักษรเอซึ่งมีรูปร่าง A ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ .....	22
ภาพประกอบที่ 2-6 โครงสร้างการใช้งาน EvalVid ร่วมกับ NS-2 [35].....	30
ภาพประกอบที่ 2-7 ตัวอย่างการแยกข้อมูลวิดีโอจากแหล่งข้อมูลวิดีโอออกเป็น 2 ส่วนย่อย .....	30
ภาพประกอบที่ 2-8 ตัวอย่างการรวมข้อมูลวิดีโอจาก 2 ส่วนย่อยเข้าด้วยกัน .....	30
ภาพประกอบที่ 3-1 ความแตกต่างของชั้นโพรโทคอลระหว่างโหนดแบบ SCSI และ 2C2I.....	34
ภาพประกอบที่ 3-2 ตัวอย่างการใช้โพรโทคอล 2C2I DSDV ในการขนส่งข้อมูล.....	35
ภาพประกอบที่ 3-3 แผนการทดลอง.....	37
ภาพประกอบที่ 3-4 จำนวนของกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกละทิ้ง .....	38
ภาพประกอบที่ 3-5 สาเหตุของการละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอในกรณี SCSI .....	39
ภาพประกอบที่ 3-6 สาเหตุของการละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอในกรณี 2C2I.....	39
ภาพประกอบที่ 4-1 ความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลข่าวสารเส้นทางของโพรโทคอล DSDV และ โพรโทคอล 16C3I DSDV .....	42
ภาพประกอบที่ 4-2 โครงสร้างระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	46
ภาพประกอบที่ 4-3 ตัวอย่างสถานะเครือข่ายแบบ Fixed location .....	46
ภาพประกอบที่ 4-4 ตัวอย่างสถานะเครือข่ายแบบ Random location.....	47
ภาพประกอบที่ 4-5 ตัวอย่างสถานะเครือข่ายแบบ Many-to-one .....	47
ภาพประกอบที่ 4-6 ระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง .....	50
ภาพประกอบที่ 4-7 เวลาที่ใช้ในการขนส่งข้อมูลวิดีโอจากต้นทางไปยังปลายทาง .....	50
ภาพประกอบที่ 4-8 ปริมาณกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกละทิ้งในเครือข่าย .....	51

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่ 4-9 สัดส่วนของปริมาณข้อมูลวิดีโอที่ปลายทางรับได้สำเร็จต่อปริมาณข้อมูลที่ส่งจากต้นทาง .....	51
ภาพประกอบที่ 4-10 ตัววัดคุณภาพของวิดีโอ Peak signal to noise ratio .....	52
ภาพประกอบที่ 4-11 การหน่วงเวลาของเฟรมวิดีโอตลอดเส้นทาง .....	52
ภาพประกอบที่ 4-12 การบริโภคพลังงานของเครือข่าย.....	53
ภาพประกอบที่ 4-13 รายละเอียดการบริโภคพลังงานของเครือข่ายในกรณี Fixed location.....	53
ภาพประกอบที่ 4-14 รายละเอียดการบริโภคพลังงานของเครือข่ายในกรณี Random location.....	54
ภาพประกอบที่ 4-15 รายละเอียดการบริโภคพลังงานของเครือข่ายในกรณี Many-to-one .....	54
ภาพประกอบที่ 4-16 ระยะเวลาการรับของสัญญาณวิทยุบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	56
ภาพประกอบที่ 4-17 การรับของสัญญาณวิทยุในวิธีการ RCA เมื่อแต่ละโหนดหลักเพียงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดภายในระยะทาง 4 ทอด .....	56
ภาพประกอบที่ 4-18 การกำหนดช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล โดยการหลักเพียงช่องสัญญาณที่โหนดภายในระยะ 5 ทอด ใช้ในการรับข้อมูล.....	57
ภาพประกอบที่ 4-19 เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองกรณี 5 โหนด .....	59
ภาพประกอบที่ 4-20 เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองกรณี 12 โหนด .....	59
ภาพประกอบที่ 4-21 เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองกรณี 15 โหนด .....	59
ภาพประกอบที่ 4-22 เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองกรณี 30 โหนด .....	60
ภาพประกอบที่ 4-23 เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองกรณี 36 โหนด .....	60
ภาพประกอบที่ 4-24 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 5 โหนด .....	62
ภาพประกอบที่ 4-25 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 12 โหนด .....	62
ภาพประกอบที่ 4-26 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 15 โหนด .....	63
ภาพประกอบที่ 4-27 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 30 โหนด .....	63
ภาพประกอบที่ 4-28 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 36 โหนด .....	64
ภาพประกอบที่ 4-29 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 5 โหนด.....	64
ภาพประกอบที่ 4-30 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 5 โหนด .....	65
ภาพประกอบที่ 4-31 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 12 โหนด.....	65
ภาพประกอบที่ 4-32 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 12 โหนด .....	66

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่ 4-33 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 15 โหนด.....	66
ภาพประกอบที่ 4-34 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 15 โหนด.....	67
ภาพประกอบที่ 4-35 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 30 โหนด.....	67
ภาพประกอบที่ 4-36 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 30 โหนด.....	68
ภาพประกอบที่ 4-37 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 36 โหนด.....	68
ภาพประกอบที่ 4-38 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 36 โหนด.....	69
ภาพประกอบที่ 5-1 ฟิลด์ในตารางเส้นทางของโพรโทคอล 16C3I MDSDV และกลุ่มข้อมูลเส้นทาง .....	71
ภาพประกอบที่ 5-2 ตัวอย่างตารางเส้นทางของโหนด S.....	71
ภาพประกอบที่ 5-3 กระบวนการหาเส้นทางของโพรโทคอล MPMCM I DSDV.....	79
ภาพประกอบที่ 5-4 การปรับปรุงเส้นทางเมื่อเส้นทางขาดการเชื่อมต่อ.....	87
ภาพประกอบที่ 5-5 การปรับปรุงเส้นทางเมื่อการเชื่อมต่อของเส้นทางขาดด้วยการแจ้ง Link failure จากชั้นควบคุมการใช้สื่อ.....	90
ภาพประกอบที่ 5-6 การส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย.....	94
ภาพประกอบที่ 5-7 โครงสร้างระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	100
ภาพประกอบที่ 5-8 เครือข่ายที่ใช้ในการทดลอง.....	100
ภาพประกอบที่ 5-9 เส้นทางการส่งข้อมูลก่อนการปรับปรุง Seq.....	107
ภาพประกอบที่ 5-10 การส่งข้อมูลก่อนเกิดการแย่งชิงช่องสัญญาณ.....	107
ภาพประกอบที่ 5-11 การอัปเดต Seq. 132 ของโหนดหมายเลข 13 โดยโหนดหมายเลข 7.....	108
ภาพประกอบที่ 5-12 การเกิดการชนกันของข้อมูลที่โหนดหมายเลข 9 จากการใช้เส้นทางที่มี Seq. 132 ในการส่งข้อมูล.....	108
ภาพประกอบที่ 5-13 เส้นทางการส่งข้อมูลก่อนการปรับปรุงเส้นทาง.....	108
ภาพประกอบที่ 5-14 เส้นทางการส่งข้อมูลหลังได้รับข้อมูลเส้นทางด้วย Seq. ใหม่.....	109
ภาพประกอบที่ 5-15 เส้นทางที่มีข้อมูล Last hop ตรงกับส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลที่ทำการกระจาย ข้อมูลเส้นทาง.....	109
ภาพประกอบที่ 5-16 การชนกันของข้อมูลที่โหนดหมายเลข 13 จากการใช้เส้นทางที่ตรงและไม่ตรง กับฟิลด์ Last hop ในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูล.....	109

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่ 5-17 เส้นทางการส่งข้อมูลก่อนเกิดการแย่งชิงช่องสัญญาณ .....	110
ภาพประกอบที่ 5-18 การเกิดการชนกันของข้อมูลที่โหนดหมายเลข 10 จากการใช้เส้นทางที่มี Seq. 132 ในการส่งข้อมูล .....	110
ภาพประกอบที่ 5-19 กรณีโหนดหมายเลข 7 ไม่มีเส้นทางสำรอง .....	110
ภาพประกอบที่ 5-20 กรณีโหนดหมายเลข 7 มีเส้นทางสำรอง .....	111
ภาพประกอบที่ 5-21 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ LQI.....	111
ภาพประกอบที่ 5-22 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ CBK.....	112
ภาพประกอบที่ 5-23 เวลาหน่วงในคิวของกลุ่มข้อมูล .....	112
ภาพประกอบที่ 5-24 PSNR.....	113
ภาพประกอบที่ 5-25 เวลาหน่วงของเฟรมจากต้นทางถึงปลายทาง .....	113
ภาพประกอบที่ 5-26 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้ในการทำงาน .....	114
ภาพประกอบที่ 5-27 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้ก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ.....	114
ภาพประกอบที่ 5-28 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการส่งข้อมูลเส้นทางก่อนการส่งข้อมูล วิดีโอ .....	115
ภาพประกอบที่ 5-29 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการรับข้อมูลเส้นทางก่อนการส่งข้อมูล วิดีโอ .....	115
ภาพประกอบที่ 5-30 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณ เพื่อส่งข้อมูลเส้นทางก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ.....	116
ภาพประกอบที่ 5-31 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้เมื่อไม่มีการทำงานก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ...116	
ภาพประกอบที่ 5-32 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้หลังการส่งข้อมูลวิดีโอ .....	117
ภาพประกอบที่ 5-33 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการส่งข้อมูลเส้นทางหลังการส่งข้อมูล วิดีโอ .....	117
ภาพประกอบที่ 5-34 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับรับข้อมูลเส้นทางหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ .....	118
ภาพประกอบที่ 5-35 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณ เพื่อส่งข้อมูลเส้นทางหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ .....	118
ภาพประกอบที่ 5-36 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอ .....	119



**รายการภาพประกอบ (ต่อ)**

ภาพประกอบที่ 5-37 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการรับข้อมูลวิดีโอ .....	119
ภาพประกอบที่ 5-38 ปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการส่ง ACK.....	120
ภาพประกอบที่ 5-39 ปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการรับ ACK.....	120
ภาพประกอบที่ 5-40 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณ เพื่อส่งข้อมูลวิดีโอ .....	121
ภาพประกอบที่ 5-41 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้เมื่อไม่มีการทำงานหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ ...	121

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

16C3I	16-channel 3-interface
2C2I	2-channel 2-interface
ACK	Acknowledgement
AODV	Ad-hoc on-demand distance-vector
AOMDV	Ad hoc on-demand multipath distance-vector
bps	bit per second
c.i.	confident interval
CBR	Constant bit rate
CCA	Clear channel assessment
$Ch_0$	Common control channel
$Ch_1$	Channel number 1
$Ch_2$	Channel number 2
$Ch_R$	Receive channel
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
DSDV	Destination-sequence distance-vector
DSR	Dynamic source routing
DSSS	Direct sequence spread spectrum
fps	frame per second
GOP	Group of pictures
GTS	Guaranteed time slot
HIA	Hybrid interface assignment
$If_0$	Control interface
$If_1$	Interface number 1
$If_2$	Interface number 2
$If_R$	Receive interface
$If_T$	Transmit interface
IRCB	Improved receive channel balancing
LR-WPANs	Low-rate wireless personal area networks

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

MAC	Media access control layer
MANET	Mobile ad-hoc network
MCFI	Multi-channel multi-interface
MDC	Multiple descriptions coding
MDSDV	Multi-path destination-sequenced distance-vector
MOS	Mean opinion score
MPDV	MAC Protocol Data Unit
MPEG	Moving Picture Experts Group
MTU	Maximum transmission unit
NS-2	Network simulator 2
OLSR	Optimized link state routing
OSPF-MCDS	Open shortest path first-minimal connected dominating set
PDR	Packet delivery ratio
PHY	Physical layer
PSNR	Peak signal to noise ratio
QoS	Quality of services
RCA	Receiver-based channel assignment
RCB	Receive channel balancing
RERR	Route error
RREP	Route reply
RREQ	Route request
RTP	Real-time transport protocol
SCSI	Single channel single interface
Seq.	Destination sequence number
SIA	Static interface assignment
SNR	Signal to noise ratio
TCA	Transmitter-based channel assignment
UDP	User datagram protocol

**สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)**

VBR	Variable bit rate
WSNs	Wireless sensor networks

# บทที่ 1

## บทนำ

บทนี้กล่าวถึงภาพรวมทั้งหมดของงานวิจัย เริ่มตั้งแต่การชี้ให้เห็นถึงความสำคัญ เหตุผล ที่มา และประโยชน์ของการวิจัยในเรื่องนี้ หัวข้อที่สองเป็นการสรุปเนื้อหา ผลงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาวิจัยมาแล้วและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ หัวข้อที่สามเป็นประเด็นที่ทำการศึกษาวิจัย หัวข้อที่สี่ ระบุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษา หัวข้อที่ห้าแสดงขอบเขตของปัญหาของงานวิจัย หัวข้อที่หกกล่าวถึงกระบวนการและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย และหัวข้อสุดท้ายเป็นผลที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks: WSNs) ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้รับการออกแบบให้มีคุณภาพการให้บริการ (Quality of services: QoSs) ที่เพียงพอต่อการส่งข้อมูลสเกลาร์ อย่างเช่นข้อมูลอุณหภูมิ ข้อมูลความชื้น หรือข้อมูลความเข้มแสง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ต้องการแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการส่งข้อมูลต่ำ ในทางตรงกันข้ามข้อมูลวิดีโอ ประกอบด้วยข้อมูลจำนวนมหาศาลและต้องการแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลสเกลาร์ [1-2] เพราะข้อจำกัดด้านค่าสูงสุดในการขนส่งข้อมูล (Maximum transmission unit: MTU) ซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ทำให้จำเป็นต้องแบ่งข้อมูลวิดีโอออกเป็นกลุ่มข้อมูล (Packet) ขนาดเล็กจำนวนมาก กลุ่มข้อมูลวิดีโอจำนวนมากเหล่านี้อาจจะมีมากเกินกว่าที่มาตรฐาน IEEE 802.15.4 จะสามารถรักษาคุณภาพการให้บริการที่เพียงพอได้ ดังนั้นการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำอย่างเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 แล้วยังคงรักษาระดับคุณภาพของวิดีโอให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้จึงเป็นประเด็นที่มีความท้าทายอย่างยิ่ง ยิ่งกว่านั้นการส่งข้อมูลวิดีโออย่างมีประสิทธิภาพบนเครือข่าย IEEE 802.15.4 นี้จะเป็นการจุดประกายงานวิจัยใหม่เพิ่มขึ้นอีกมากมาย

โดยปกติทุกโหนดที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกันมักจะถูกกำหนดให้ใช้ช่องสัญญาณ (Channel) เดียวกัน เมื่อหลายโหนดต้องการส่งข้อมูลพร้อมกันบนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 โหนดเหล่านั้นต้องทำการแข่งขันกันเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณโดยใช้กระบวนการ Carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) หลังการแข่งขันกันเข้าใช้ช่องสัญญาณจะมีเพียงหนึ่งโหนดเท่านั้นที่สามารถส่งข้อมูลบนช่องสัญญาณ ณ เวลานั้น สิ่งนี้คือ

ข้อจำกัดจากการใช้งานเพียงช่องสัญญาณเดียวในเครือข่าย ในความเป็นจริงมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ช่วงความถี่ 2.4 GHz ได้เตรียมช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันไว้ 16 ช่องสัญญาณ การจัดการช่องสัญญาณเหล่านี้เพื่อเพิ่มแบนด์วิธของเครือข่ายจนกระทั่งวิดีโอจากหลายโหนดต้นทางสามารถส่งไปยังโหนดปลายทางพร้อมกันได้โดยมีประสิทธิภาพจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

นอกจากนี้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้รับการออกแบบมาให้มีระยะการติดต่อสื่อสารสั้น แต่ระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางสามารถยืดออกได้โดยใช้การติดต่อสื่อสารแบบหลายทอด (Multi-hop) อย่างไรก็ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีการเตรียมการโพรโทคอลไว้เพียงชั้นกายภาพ (Physical layer: PHY layer) และชั้นควบคุมการใช้สื่อ (Medium access control layer: MAC layer) ในขณะที่การสื่อสารแบบหลายทอดต้องการโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง (Routing protocol) ซึ่งอยู่ในชั้นเครือข่าย (Network layer) เพื่อจัดหาเส้นทางการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

นอกจากการเพิ่มแบนด์วิธของเครือข่ายด้วยการใช้หลายช่องสัญญาณแล้ว เรายังสามารถลดแบนด์วิธด้วยการแยกข้อมูลแล้วส่งผ่านหลายเส้นทาง วิธีการนี้ต้องการโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางที่สามารถเตรียมเส้นทางการส่งข้อมูลได้หลายเส้นทาง นอกจากนี้การส่งข้อมูลแบบหลายเส้นทางยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิค Multiple descriptions coding (MDC) ซึ่งเป็นการแบ่งวิดีโอออกเป็นส่วนย่อยก่อนการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย

งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรช่องสัญญาณเพื่อเพิ่มแบนด์วิธของเครือข่ายให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลวิดีโอที่มีคุณภาพบนเครือข่ายแบบหลายทอดได้ ยิ่งกว่านั้นโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางหลังการพัฒนาร่วมกับการจัดสรรช่องสัญญาณได้ถูกพัฒนาต่อให้รองรับการเตรียมหลายเส้นทางเพื่อใช้งานร่วมกับเทคนิค MDC

## 1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.2.1 การส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมกับการขนส่งวิดีโอบนเครือข่ายแบบหลายทอด

ความก้าวหน้าทางด้านเทคนิคการบีบอัดข้อมูลมัลติมีเดียในปัจจุบันอย่างเช่นเทคนิคการบีบอัดข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 ทำให้ความต้องการแบนด์วิธในการส่งวิดีโอลดลง สิ่งนี้ส่งผลให้การส่งข้อมูลวิดีโอที่ถูกบีบอัดบนเครือข่ายไร้สายที่มีความเร็วในการติดต่อสื่อสารต่ำมีความเป็นไปได้ [2-3] อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ทำการศึกษาการส่งข้อมูลวิดีโอ

บนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ตารางที่ 1-1 แสดงการเปรียบเทียบการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมกับการขนส่งวิดีโอบนเครือข่ายแบบหลายทอด

ในบทความ [4] ข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 ถูกส่งในช่วง Guaranteed time slot (GTS) ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้โดยไม่ต้องมีการแข่งขันกันเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention free period) ช่วงนี้เป็นทางเลือกในการส่งข้อมูลทางเลือกหนึ่งในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยในบทความ [4] คือการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายที่มีโครงสร้างแบบดาวมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สมรรถนะของเครือข่าย คุณภาพของวิดีโอ และผลการใช้พลังงานถูกประเมินโดยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย Network simulator 2 (NS-2) นอกจากนี้อุปกรณ์ต้นแบบได้ถูกสร้างและประเมินสมรรถนะด้วย อัลกอริทึมการทำงานของโพรโทคอลแบบ Cross-layer ถูกนำเสนอเพื่อจัดการพารามิเตอร์ในโพรโทคอลชั้นควบคุมการใช้สื่อตามคุณภาพของวิดีโอ อย่างไรก็ตามในบทความ [4] ไม่ได้มีการศึกษาการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายแบบหลายทอด

ในบทความ [5] ศึกษาการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 ด้วยหลายโหนดต้นทางบนเครือข่ายแบบหลายทอดการส่งข้อมูล และหลายช่องสัญญาณ ในบทความ [5] แสดงให้เห็นว่าการใช้หลายช่องสัญญาณสามารถเพิ่มปริมาณงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา (Throughput) ในเครือข่ายแบบไร้สาย และสามารถเพิ่มจำนวนของแหล่งข้อมูลวิดีโอ เมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายทอดได้เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักในบทความ [5] คือการเพิ่มสมรรถนะการส่งวิดีโอบนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 บนพื้นที่ที่มีการใช้งานเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.11 อยู่ด้วย ช่องสัญญาณของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งไม่มีการแทรกสอด (Interference) กับช่องสัญญาณของมาตรฐาน IEEE 802.11 ถูกใช้ในการทดลอง โหนดต้นทางแต่ละโหนดในบทความ [5] จะแบ่งข้อมูลวิดีโอก่อนการบีบอัดเป็นแบบ MPEG4 ออกเป็นสองส่วนโดยใช้เทคนิค MDC สองช่องสัญญาณและสองอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (Interface) จะถูกใช้ในแต่ละโหนดสำหรับการขนส่งข้อมูลวิดีโอแต่ละส่วนบนสองเส้นทาง โดยทั้งสอง Interface จะถูกกำหนดช่องสัญญาณสำหรับการใช้งานอย่างถาวร (Static interface assignment: SIA) บทความ [5] นำเสนอผลการศึกษาสมรรถนะบนเครือข่ายแบบสองทอด โดยแต่ละ Interface และแต่ละทอดการส่งข้อมูลจะถูกกำหนดช่องสัญญาณที่จะใช้งานไว้ล่วงหน้า ทุกโหนดในเครือข่ายจะถูกวางเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดระหว่างกัน เส้นทางระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางจะถูกกำหนดไว้ตายตัวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ถึงแม้ว่าหลายข้อกำหนดในบทความ [5] จะถูกสมมติขึ้น แต่ผลการประเมินสมรรถนะด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 แสดงให้เห็นถึงความ

เป็นไปได้ในการใช้หลายช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอจากหลายโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำและเป็นเครือข่ายแบบหลายทอด

ในบทความ [6] ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดการสรรเส้นทาง Dynamic source routing (DSR) ซึ่งจะมีการหาเส้นทางเมื่อมีข้อมูลที่ต้องการส่ง (On-demand) โพรโทคอลจัดการสรรเส้นทาง Ad-hoc on-demand distance-vector (AODV) ซึ่งจะมีการหาเส้นทางเมื่อมีข้อมูลที่ต้องการส่ง และโพรโทคอลจัดการสรรเส้นทาง Destination-sequence distance vector (DSDV) ซึ่งมีการหาเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลไว้ล่วงหน้า (Proactive) เมื่อมีการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ (Mobile ad-hoc network: MANET) ด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 โดยทำการทดสอบบนมาตรฐาน IEEE 802.11 ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลทั้งสามไม่เหมาะสำหรับการขนส่งข้อมูลวิดีโอ อย่างไรก็ตามสมรรถนะอัตราส่วนของปริมาณข้อมูลที่โหนดปลายทางรับได้สำเร็จต่อปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโหนดต้นทาง (Packet delivery ratio: PDR) ของโพรโทคอลจัดการสรรเส้นทาง DSDV ดีกว่าของโพรโทคอลจัดการสรรเส้นทาง AODV และโพรโทคอลจัดการสรรเส้นทาง DSR ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโพรโทคอลจัดการสรรเส้นทาง DSDV มีการหาเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลไว้ล่วงหน้าแล้ว ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางได้ทันทีที่ต้องการ

**ตารางที่ 1-1** บทความที่เกี่ยวข้องกับการส่งข้อมูลวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และโพรโทคอลจัดการสรรเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการส่งวิดีโอ

บทความ	ข้อมูล	มาตรฐาน	กระบวนการเข้าใช้ช่องสัญญาณ	ศึกษาการสื่อสารแบบหลายทอด	โพรโทคอลจัดการสรรเส้นทาง
[4] 2010	MPEG4	IEEE 802.15.4	GTS	✗	-
[5] 2008	MPEG4	IEEE 802.15.4	CSMA/CA	✓	Fixed route
[6] 2004	MPEG4	IEEE 802.11	CSMA/CA	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>● DSR</li> <li>● AODV</li> <li>● DSDV</li> </ul>



### 1.2.2 การจัดสรรช่องสัญญาณบนโหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ

ตารางเปรียบเทียบการจัดสรรช่องสัญญาณบนโหนดที่ประกอบด้วยหลาย Interface แสดงดังตารางที่ 1-2 ซึ่งมีเพียงบทความ [5] ที่ทำการศึกษามาตรฐาน IEEE 802.15.4 และทำการขนส่งข้อมูลวิดีโอ ในขณะที่บทความอื่นทำการศึกษามาตรฐาน IEEE 802.11 และศึกษาสมรรถนะของโพรโทคอลที่ออกแบบด้วยข้อมูลที่มีอัตราบิตคงที่ (Constant bit rate: CBR) ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 ที่อัตราบิตมีการเปลี่ยนแปลง (Variable bit rate: VBR)

ในบทความ [7] นำเสนอการพัฒนาโพรโทคอลชั้นการเชื่อมต่อ (Link layer) และโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV สำหรับเครือข่ายที่ โดยแต่ละโหนดในเครือข่ายจะประกอบด้วย 2-interface โดยหนึ่ง Interface ถูกใช้สำหรับการส่งข้อมูล (Receive interface) ในขณะที่อีกหนึ่ง Interface ถูกใช้สำหรับการรับข้อมูล (Transmit interface) วิธีการจัดสรรช่องสัญญาณตามผู้รับ (Receiver-based channel assignment: RCA) ถูกนำมาใช้งานเพื่อจัดการการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนด วิธีการนี้จะกำหนดหนึ่งช่องสัญญาณให้กับ Receive interface ของแต่ละโหนด ซึ่งช่องสัญญาณนี้จะถูกใช้เป็นเวลาที่ยาวนาน ในทางตรงกันข้าม Transmit interface ของแต่ละโหนดจะสามารถสลับช่องสัญญาณได้บ่อยๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดข้างเคียง (Neighbor) ที่โหนดต้องการติดต่อสื่อสารด้วย การกำหนดให้หนึ่ง Interface ทำงานบนช่องสัญญาณหนึ่งเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ส่วนอีกหนึ่ง Interface สลับช่องสัญญาณบ่อยๆ แบบนี้ว่าการจัดสรรอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุแบบผสม (Hybrid interface assignment: HIA) วิธีการ RCA เหมาะกับการแพร่กระจายสัญญาณที่ต้องการการตอบกลับจากผู้รับ (Acknowledgement: ACK) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องการแผนการในการลดสัญญาณแทรกสอดในเครือข่าย เพื่อลดสัญญาณแทรกสอด โหนดที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการรับข้อมูลจะถูกกระจายออกเท่ากันทั่วทั้งเครือข่าย โดยแต่ละโหนดจะหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่โหนดภายในระยะทาง 2 ทอดใช้ในการรับข้อมูล โดยพิจารณาจากตารางโหนดข้างเคียง (Neighbor table) ซึ่งได้จากการแลกเปลี่ยนกลุ่มข้อมูล Hello กลุ่มข้อมูล Hello จะถูกแทรกข้อมูลช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล Transmit interface จะกระจายสำเนาของกลุ่มข้อมูล Hello บนทุกช่องสัญญาณเพื่อแจ้งช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับรับข้อมูลให้กับโหนดข้างเคียงใช้ในการรักษาการเชื่อมต่อของเครือข่าย ยิ่งกว่านั้นสำเนาของกลุ่มข้อมูล Route request (RREQ) จะถูกกระจายบนทุกช่องสัญญาณในกระบวนการค้นหาเส้นทางสำเนาของกลุ่มข้อมูล Hello และ RREQ จำนวนมากเหล่านี้จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการส่งกลุ่มข้อมูลควบคุมเหล่านี้สูง และยังคงต้องมีการสลับช่องสัญญาณบ่อยๆ

ในบทความ [8] ซึ่งมีโครงสร้างของโหนดเหมือนกับในบทความ [7] แต่ได้แก้ไขปัญหาประเด็นของค่าใช้จ่ายและการสลับช่องสัญญาณในบทความ [7] โดย Transmit interface ของ

แต่ละโหนดจะกระจายกลุ่มข้อมูล Hello บนช่องสัญญาณควบคุมที่ถูกใช้ร่วมกันในทุกโหนด (Common control channel) ก็ต่อเมื่อโหนดไม่ได้ทำการส่งข้อมูล ใดๆก็ตามทุกโหนดอาจจะไม่ได้อยู่บน Common control channel ที่เวลาเดียวกัน ดังนั้นบางโหนดอาจจะพลาดการรับกลุ่มข้อมูล Hello ในบางครั้ง นอกจากนี้ในบทความ [8] ยังลดสำเนาของกลุ่มข้อมูล RREQ จากบทความ [7] โดยการส่งกลุ่มข้อมูล RREQ บนช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่โหนดข้างเคียงกำลังใช้อยู่เท่านั้น อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังคงให้ผลของค่าใช้จ่ายในการส่งกลุ่มข้อมูลควบคุมสูง และยังคงต้องการสลับช่องสัญญาณบ่อยๆ

ในบทความ [9] โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง Open shortest path first-minimal connected dominating set (OSPF-MCDS) ซึ่งมีการหาเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลไว้ล่วงหน้า ถูกพัฒนาสำหรับเครือข่ายแบบ MCMI การติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดใช้วิธีการ RCA หนึ่ง Interface ในแต่ละโหนดอุทิศให้ใช้ Common control channel เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการหาเส้นทาง ข้อมูลช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของแต่ละโหนดจะถูกแลกเปลี่ยนพร้อมกับข้อมูลเส้นทาง เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดในเครือข่าย แต่ละโหนดจะหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่โหนดภายในระยะทาง 2 ทอดใช้ในการรับข้อมูล โดยพิจารณาข้อมูลช่องสัญญาณจากตารางเส้นทาง แต่ละโหนดมีเพียง Interface เดียวที่สามารถขนส่งข้อมูลได้ ด้วยการใช้วิธีการ RCA ทุกโหนดตลอดเส้นทางการส่งข้อมูลจะใช้ช่องสัญญาณเดียวกับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดปลายทางในการขนส่งข้อมูล ดังนั้นสัญญาณแทรกสอดภายในเส้นทางการส่งข้อมูล (Intra-flow interference) จึงเกิดขึ้น

ในบทความ [10] โพรโทคอล Optimized link state routing (OLSR) ถูกพัฒนาสำหรับการติดต่อสื่อสารในเครือข่ายแบบ MCMI ซึ่งใช้วิธีการ RCA จัดการการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนด แต่ละโหนดประกอบด้วย 3-interface หนึ่ง Interface อุทิศสำหรับการขนส่งข่าวสารควบคุม (Control interface) ส่วน Interface ที่เหลือถูกใช้สำหรับการขนส่งข้อมูล หนึ่ง Interface คือ Receive interface ส่วนอีกหนึ่ง Interface คือ Transmit interface สำหรับ Control interface จะทำงานบน Common control channel โดย Control interface จะถูกใช้เพื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารเส้นทางเท่านั้น ข้อมูลช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของแต่ละโหนดจะถูกแลกเปลี่ยนพร้อมกับข้อมูลเส้นทาง เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดในเครือข่าย แต่ละโหนดจะหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่โหนดภายในระยะทาง 2 ทอดใช้ในการรับข้อมูล โดยพิจารณาข้อมูลช่องสัญญาณจากตารางเส้นทาง

ตารางที่ 1-2 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรช่องสัญญาณบนโหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์  
ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ

ก. ข้อมูลพื้นฐาน

บทความ	ข้อมูล	มาตรฐาน	โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง
[5] 2008	MPEG4	IEEE 802.15.4	-
[7] 2006	CBR	IEEE 802.11	AODV
[8] 2010	CBR	IEEE 802.11	AODV
[9] 2006	CBR	IEEE 802.11	OSPF-MCDS
[10] 2006	CBR	IEEE 802.11	OLSR

ข. ข้อมูลการจัดสรรช่องสัญญาณบนโหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ

บทความ	วิธีกำหนด Interface	จำนวน interface	วิธีกำหนด Channel	จำนวน Channel	Common interface	Common Channel
[5] 2008	SIA	2	Fixed	4	✗	✗
[7] 2006	HIA	2	RCA	12	✗	✗
[8] 2010	HIA	2	RCA	12	✗	✓
[9] 2006	HIA	2	RCA	12	✓	✓
[10] 2006	HIA	3	RCA	7	✓	✓

### 1.2.3 การจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง

**ตารางที่ 1-3** แสดงการเปรียบเทียบบทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง บทความ [11-13] เป็นการส่งวิดีโอบนโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง (Multi-path) บทความ [14-15] เป็นการพัฒนาโพรโทคอล DSDV และโพรโทคอล AODV ให้สามารถจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางตามลำดับ อย่างไรก็ตามโพรโทคอลเหล่านี้ศึกษาการส่งข้อมูลบนมาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งมีความเร็วสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 802.15.4

ในบทความ [11-12] จะมีการหาหลายเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลวิดีโอตามลำดับความสำคัญ โดยจะใช้เส้นทางที่ดีที่สุดสำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอเฟรมที่มีความสำคัญสูงสุด และใช้เส้นทางอื่นเพื่อส่งวิดีโอเฟรมที่มีลำดับความสำคัญลดลงมา ซึ่งทั้งคู่ไม่ได้พิจารณาการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC ในบทความ [13] เป็นการส่งวิดีโอด้วยเทคนิค MDC บนโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง เพื่อลดการสูญหายของเฟรมวิดีโอหลัก (Reference frame) โหนดต้นทางจะประเมินโอกาสที่จะเกิดการสูญหายของกลุ่มข้อมูล โดยใช้กลุ่มข้อมูล Route error (RERR) และหลีกเลี่ยงการส่งเฟรมวิดีโอหลัก ถ้าหากโอกาสที่จะเกิดการสูญหายของกลุ่มข้อมูลมีสูงกว่าที่กำหนดไว้

ในบทความ [14] เป็นการพัฒนาโพรโทคอล DSDV ให้รองรับการเตรียมหลายเส้นทาง โดยทุกเส้นทางสำหรับการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเดียวกันจะไม่มีการใช้งานโหนดระหว่างทางร่วมกัน (Node disjoint) โดยเรียกโพรโทคอลหลังการพัฒนาว่า Multi-path destination-sequenced distance-vector (MDSDV) เพื่อเก็บหลายเส้นทาง ฟิ��ลด์ Second hop และ Link-ID ถูกเพิ่มเข้าไปในตารางเส้นทาง (Routing table) ฟิ��ลด์ Second hop คือโหนดในทอดที่สองเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ฟิ��ลด์ Link-ID คือหมายเลขระบุคู่เชื่อมต่อ ซึ่งสร้างโดยคู่เชื่อมต่อใหม่ในเครือข่าย นอกจากนี้แต่ละโหนดจะต้องรักษาตารางเส้นทาง และตารางโหนดข้างเคียง ตารางเส้นทางใช้เพื่อเก็บเส้นทางสำหรับโหนดปลายทางแต่ละโหนด เพื่อให้โหนดต้นทางใช้ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไปยังโหนดปลายทาง ตารางโหนดข้างเคียงจะใช้เก็บโหนดข้างเคียงที่สามารถติดต่อสื่อสารได้โดยตรง ตารางโหนดข้างเคียงจะถูกปรับปรุงเสมอโดยใช้การแลกเปลี่ยนข้อมูล Hello หรือเมื่อโหนดข้างเคียงออกไปนอกระยะการส่งข้อมูล กระบวนการทำงานของโพรโทคอล MDSDV แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการหาเส้นทางและกระจายเส้นทางของโหนดใหม่ และส่วนการรักษาสภาพเส้นทาง สำหรับการหาและกระจายเส้นทางของโหนดใหม่เป็นกระบวนการที่แสดงให้เห็นว่าโหนดใหม่ที่เข้าร่วมเครือข่ายสามารถหาหลายเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังแต่ละโหนดในเครือข่ายได้อย่างไร และโหนดในเครือข่ายจะสามารถหาหลายเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังโหนดใหม่ในเครือข่ายได้อย่างไร นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังบอกอีกว่าแต่ละโหนดในเครือข่ายจะ

สามารถส่งข้อมูลผ่านโหนดใหม่ไปยังโหนดอื่นในเครือข่ายได้อย่างไร สำหรับส่วนการรักษาสภาพเส้นทางจะแสดงให้เห็นการทำงานของโพรโทคอล เมื่อโหนดไม่ได้รับข้อมูลเส้นทางจากโหนดข้างเคียงเป็นเวลานาน (Broken link) หรือเมื่อโหนดไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดถัดไปในเครือข่าย (Link failure) การหาและกระจายเส้นทางของโหนดใหม่ เริ่มขึ้นเมื่อมีโหนดใหม่ต้องการเข้าร่วมเครือข่าย โหนดใหม่จะกระจายกลุ่มข้อมูล Hello ไปให้กับโหนดข้างเคียง โหนดข้างเคียงจะเพิ่มข้อมูลของโหนดใหม่ลงในตารางโหนดข้างเคียง และตารางเส้นทาง โดยกำหนดฟิลด์ Link-ID เป็น 0 จากนั้นโหนดข้างเคียงส่งข้อมูลตารางเส้นทางทั้งหมด (Full dump) กลับไปให้กับโหนดใหม่ โดยใช้การส่งแบบ Unicast ซึ่งเป็นการสื่อสารระหว่างคู่ส่ง-รับข้อมูลเพียงคู่เดียว เมื่อโหนดที่ต้องการเข้าร่วมเครือข่ายได้รับตารางเส้นทางที่โหนดข้างเคียงส่งมา โหนดใหม่จะสร้างตารางเส้นทางและตารางโหนดข้างเคียงของตนเอง โดยโหนดจะกำหนด Link-ID ให้กับ Link-ID ที่มีค่าเท่ากับ 0 หลังจากสร้างตารางเส้นทางเรียบร้อย โหนดจะกระจายกลุ่มข้อมูล Update ให้กับโหนดข้างเคียง เพื่อให้โหนดข้างเคียงปรับปรุง Link-ID ซึ่งก่อนหน้านี้ได้กำหนดไว้เท่ากับ 0 และเพื่อให้โหนดข้างเคียงได้รับเส้นทางใหม่สำหรับส่งข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียงของโหนดใหม่ ซึ่งเส้นทางเหล่านั้นจะถูกส่งผ่านทางโหนดใหม่ เพื่อให้ทุกโหนดในเครือข่ายได้รับข้อมูลเส้นทางจากโหนดใหม่ ทุกโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูล Update จะนำข้อมูลเส้นทางที่ได้รับไปปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเองและกระจายกลุ่มข้อมูล Update ที่ได้รับต่อไปยังโหนดอื่น เมื่อเส้นทางการส่งข้อมูลเกิดปัญหา กระบวนการรักษาสภาพเส้นทางจะถูกใช้งาน เพื่อให้โหนดยังสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ กระบวนการนี้เป็นการแก้ปัญหา 2 ปัญหา คือ ปัญหา Broken link และปัญหา Link failure เมื่อโหนดพบว่าเกิด Broken link โหนดจะปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเอง โดยการลบข้อมูลเส้นทางของโหนดข้างเคียงที่เกิด Broken link และโหนดที่ใช้โหนดที่เกิด Broken link เป็นทางผ่านในทอดแรก พร้อมทั้งกระจายกลุ่มข้อมูล Error สำหรับโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูล Error โหนดจะตรวจสอบตารางเส้นทางของตนเอง ถ้าหากโหนดพบว่ามีส่วนที่ใช้ Link-id ที่เกิด Broken link โหนดจะลบเส้นทางนั้นออก และถ้ากลุ่มข้อมูล Error ที่โหนดได้รับทำให้โหนดต้องปรับปรุงตารางเส้นทาง โหนดจะส่งกลุ่มข้อมูล Error ที่ได้รับนั้นต่อ กรณีปัญหา Link failure จะเกิดขึ้นเมื่อโหนดต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง แต่ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดถัดไปที่จะใช้ในเส้นทางได้ โหนดจะส่งกลุ่มข้อมูล Failure กลับไปยังโหนดต้นทาง เพื่อให้โหนดต้นทางหยุดการส่งข้อมูลในเส้นทางนั้น แล้วกลับไปใช้เส้นทางอื่นที่ได้เตรียมไว้ ในกระบวนการส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจะระบุข้อมูล Second hop ลงไปในส่วนหัวของข้อมูล เพื่อใช้ระบุโหนดถัดไปที่จะใช้ในเส้นทาง อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถเตรียมได้หลายเส้นทาง โพรโทคอล MSDV มีความสลับซับซ้อนมากกว่าโพรโทคอล

DSDV ดังเดิม นอกจากนี้โพรโทคอล MDSDV จำเป็นต้องแลกเปลี่ยนกลุ่มข้อมูลเส้นทางจำนวนมากเมื่อเทียบกับการทำงานของโพรโทคอล DSDV ดังเดิม สิ่งนี้ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการหาหลายเส้นทางสูง

ในบทความ [15] โพรโทคอล AODV ถูกพัฒนาให้มีการเตรียมหลายเส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทาง โดยเรียกโพรโทคอลหลังการพัฒนาว่า Ad hoc on-demand multipath distance-vector (AOMDV) โพรโทคอล AOMDV รับประกันว่าจะไม่เกิดการวนซ้ำในการส่งข้อมูล (Loop) และแต่ละเส้นทางที่ไปยังโหนดปลายทางเดียวกันจะไม่ใช้สมาชิกของโหนดร่วมกันหรือการเชื่อมโยงระหว่างโหนดร่วมกัน (Link disjoint) เพื่อเก็บหลายเส้นทาง ฟิวด์ Last hop จึงถูกเพิ่มเข้ามาในตารางเส้นทาง โดยข้อมูล Last hop ของเส้นทางจากโหนดต้นไปยังโหนดปลายทาง หมายถึงโหนดบนเส้นทางที่อยู่ก่อนจะถึงโหนดปลายทางและสามารถติดต่อกับโหนดปลายทางได้โดยตรง เพื่อให้ได้หลายเส้นทางที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกัน (Disjoint path) ทุกโหนดบนเส้นทางต้องทำให้แน่ใจได้ว่าทุกเส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทางมาจากโหนดที่มี Next hop แตกต่างกันและมี Last hop แตกต่างกัน AOMDV มีขั้นตอนการหาเส้นทางคล้ายกับโพรโทคอล AODV กล่าวคือเมื่อโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลหาโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะกระจาย RREQ ออกไปในเครือข่าย โหนดที่ได้รับ RREQ ที่ซ้ำกันจะไม่ถูกละทิ้ง (Drop) เหมือนใน AODV แต่จะนำมาพิจารณาสำหรับสร้างเส้นทางสำรอง โดย RREQ ที่จะนำไปสร้างเป็นเส้นทางสำหรับการตอบ Route reply (RREP) กลับไปให้กับโหนดต้นทาง (Reverse path) จะต้องไม่ทำให้เกิดลูปและจะต้องเป็นเส้นทางที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกันกับเส้นทางอื่นที่เก็บไว้ในตารางเส้นทาง การป้องกันการเกิดลูปพิจารณาจากจำนวนทอคใน RREQ ที่ได้รับจากโหนดข้างเคียงต้องน้อยกว่าจำนวนทอคที่น้อยที่สุดที่ได้กระจายออกไป ถ้าโหนดระหว่างทางได้รับ RREQ แล้วพบว่าไม่มีเส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทางโหนดจะตอบ RREP กลับไปให้กับโหนดต้นทางทันที แต่ถ้าไม่มีเส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทางก็จะกระจาย RREQ ต่อถ้า RREQ นั้นถูกพิจารณาเก็บเป็น Reverse path เมื่อโหนดปลายทางได้รับ RREQ โหนดปลายทางจะตอบ RREP สำหรับทุก RREQ ที่ได้รับและต้องเป็นไปตามเงื่อนไขการสร้าง Reverse path ในส่งของการบำรุงรักษาเส้นทาง เมื่อโหนดพบเส้นทางขาดโหนดจะสร้าง RERR สำหรับ Last hop ที่ทำให้ส่งไปยังโหนดปลายทางที่ระบุไว้ไม่ได้ไปให้กับโหนดต้นทาง เพื่อให้โหนดต้นทางใช้เส้นทางอื่นในการส่งข้อมูล สำหรับการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 เมื่อทำการส่งข้อมูลที่มีอัตราบิตคงที่บนมาตรฐาน IEEE 802.11

ตารางที่ 1-3 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง

ก. ข้อมูลพื้นฐาน

บทความ	ข้อมูล	มาตรฐาน	โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง
[11] 2006	MPEG2	IEEE 802.11	DSR
[12] 2012	MPEG4	IEEE 802.11	AODV
[13] 2011	วิดีโอ	IEEE 802.11	DSR
[14] 2007	CBR	IEEE 802.11	DSDV
[15] 2007	CBR	IEEE 802.11	AODV

ข. ข้อมูลการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง

บทความ	วัตถุประสงค์การหาหลายเส้นทาง	ชนิดของ Multi-path	จำนวนเส้นทาง
[11] 2006	ส่งข้อมูลตามความสำคัญ	Non disjoint	2
[12] 2012	ส่งข้อมูลตามความสำคัญ	Node disjoint	2
[13] 2011	ส่งข้อมูลร่วมกับเทคนิค MDC	Non disjoint	2
[14] 2007	เส้นทางสำรอง	Node disjoint	-
[15] 2007	เส้นทางสำรอง	Node หรือ Link disjoint	3

#### 1.2.4 การจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางบนโหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ

บทความ [16-17] เป็นการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายแบบหลายเส้นทางและแต่ละโหนดเป็นโหนดแบบ MCMI ในบทความ [16] พิจารณาความยุติธรรมของการบิดเบือน (Distortion-Fairness) ของหลายแหล่งข้อมูลวิดีโอที่มีการส่งพร้อมกัน เพื่อให้แต่ละแหล่งข้อมูลวิดีโอให้คุณภาพของวิดีโอที่เท่าเทียมกันและมีการแกว่งของคุณภาพวิดีโอน้อย ข้อมูลวิดีโอที่มีความสำคัญน้อยจะถูกครอบงำเมื่อเครือข่ายเกิดความแออัดในเครือข่าย ในบทความ [17] พัฒนาโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AOMDV ซึ่งเป็นโพรโทคอลแบบหลายเส้นทางให้รองรับการทำงานแบบ MCMI เพื่อเพิ่มคุณภาพการส่งวิดีโอบนเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.11 ข้อมูลวิดีโอจะถูกส่งผ่านเส้นทางที่มีเวลาหน่วงและจำนวนข้อมูลรวมในคิวน้อยที่สุด นอกจากนี้เมื่อเส้นทางขาดข้อมูลจะสามารถถูกสลับไปส่งผ่านเส้นทางอื่นซึ่งได้เตรียมไว้แล้วโดยไม่ต้องเสียเวลาในการหาเส้นทางใหม่ อย่างไรก็ตามเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล และเพื่อค้นหาเส้นทาง โหนดจะมีการกระจาย (Broadcast) ข้อมูลเส้นทางเป็นจำนวนมาก สิ่งนี้ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับการจัดสรรเส้นทางเป็นจำนวนมาก บทความ [16-17] ไม่ได้พิจารณาการส่งวิดีโอด้วยเทคนิค MDC

ในบทความ [18] พัฒนาโพรโทคอล AODV บนเครือข่ายแบบตาข่าย (Mesh) สำหรับโหนดแบบ MCMI ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในบทความ [18] มีการใช้งานชั้นควบคุมการใช้สื่อแบบ Superframe ซึ่งจำเป็นต้องมีการประสานเวลา (Synchronize) ของทุกโหนดในเครือข่ายให้ตรงกัน ดังนั้นทุกโหนดต้องตื่นขึ้นมาทำการประสานเวลาเป็นประจำ สิ่งนี้อาจจะส่งผลให้ต้องใช้พลังงานสูงกว่าการใช้งานชั้นควบคุมการใช้สื่อที่ไม่มีการใช้งาน Superframe ในบทความ [18] ใช้วิธีการจัดการช่องสัญญาณตามผู้ส่ง (Transmitter-based channel assignment: TCA) ซึ่งเป็นวิธีการที่โหนดที่ต้องการรับข้อมูลจำเป็นต้องปรับช่องสัญญาณให้ตรงกับช่องสัญญาณของผู้ส่ง วิธีการ TCA เหมาะกับการแพร่กระจายสัญญาณที่ไม่ต้องการการตอบกลับจากผู้รับ [9]

ตารางเปรียบเทียบบทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางบนโหนดแบบ MCMI แสดงดัง **ตารางที่ 1-4** บทความทั้งหมดไม่มีการพิจารณาการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC และมีเพียงบทความ [18] เท่านั้นที่พิจารณาบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4



ตารางที่ 1-4 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางบนโหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ

ก. ข้อมูลพื้นฐาน

บทความ	ข้อมูล	มาตรฐาน	กระบวนการเข้าใช้ช่องสัญญาณ	โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง
[16] 2010	MPEG4	IEEE 802.11	CSMA/CA	-
[17] 2011	MPEG4	IEEE 802.11	CSMA/CA	AOMDV
[18] 2010	CBR	IEEE 802.15.4	GTS	DSR

ข. ข้อมูลการจัดสรรช่องสัญญาณบนโหนดที่ประกอบด้วยหลายอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ

บทความ	วิธีกำหนด Interface	จำนวน Interface	วิธีกำหนด Channel	จำนวน Channel	Common Interface	Common Channel
[16] 2010	Static	3	Fixed	3	✗	✗
[17] 2011	Hybrid	2	RCA	3	✗	✗
[18] 2010	Dynamic	2	TCA	-	✗	✓

ค. ข้อมูลการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง

บทความ	วัตถุประสงค์การหาหลายเส้นทาง	ชนิดของ Multi-Path	จำนวนเส้นทาง
[16] 2010	ส่งข้อมูลตามความสำคัญ	-	-
[17] 2011	เส้นทางสำรอง	Link disjoint	2
[18] 2010	เส้นทางสำรอง	Non disjoint	2

### 1.3 ประเด็นวิจัย

จากการตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 1.2 ได้แสดงให้เห็นถึงปัญหาและข้อจำกัดของการส่งข้อมูลวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 การบีบอัดข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 พร้อมกับการใช้งาน โหนดแบบ MCMI สามารถลดปัญหาและทะลายนข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจนทำให้การส่งข้อมูลวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีความเป็นไปได้ [5] อย่างไรก็ตาม การกำหนดเส้นทางการส่งข้อมูลที่แน่นอนในบทความ [5] ทำให้การประยุกต์ใช้งานเป็นไปได้ยาก การใช้งาน โหนดแบบ MCMI ต้องการการจัดการกับ Interface และการจัดการกับช่องสัญญาณที่มีอย่างมีประสิทธิภาพ การจัดการ Interface ด้วยวิธีการ HIA และการจัดการช่องสัญญาณด้วยวิธีการ RCA พร้อมด้วยการใช้งาน Common control interface เช่นเดียวกับในบทความ [10] ถูกใช้ใน งานวิจัยนี้ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาแผนการลดสัญญาณแทรกสอดด้วยเทคนิคการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล (Receive channel balancing: RCB) ในบทความ [8] ให้เหมาะสมกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV ซึ่งดูเหมือนจะดีกว่าโพรโทคอลอื่นเมื่อเครือข่ายมีการขนส่งข้อมูลวิดีโอ [6] นอกจากนี้โพรโทคอลนี้ยังเหมาะกับการใช้งานร่วมกับวิธีการ RCA เนื่องจากโพรโทคอลนี้สามารถให้ข้อมูลของเครือข่ายทั้งหมดกับแต่ละโหนดได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นสามารถนำมาใช้สำหรับการกำหนดช่องสัญญาณที่จะใช้ในแต่ละโหนด และใช้สำหรับการสลับช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูล [9] ดังนั้นการพัฒนาการทำงานประสานกันระหว่างโพรโทคอล DSDV และโหนดแบบ MCMI เพื่อศึกษาการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 อย่างมีประสิทธิภาพเป็นประเด็นวิจัยที่น่าสนใจ ยิ่งกว่านั้นโพรโทคอล DSDV หลังการพัฒนาให้ทำงานร่วมกับโหนดแบบ MCMI ยังสามารถพัฒนาต่อให้มีการเตรียมหลายเส้นทาง เพื่อประยุกต์ใช้กับการส่งข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค MDC อัลกอริทึมการเตรียมหลายเส้นทางในบทความ [15] ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ โพรโทคอลที่ออกแบบจะถูกดำเนินการทดสอบสมรรถนะของเครือข่าย คุณภาพของวิดีโอ และการบริโภคพลังงาน ด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2

### 1.4 วัตถุประสงค์การวิจัย

วิจัยและพัฒนาโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง DSDV ให้รองรับเครือข่ายแบบ MCMI พร้อมทั้งสามารถเตรียมเส้นทางได้หลายเส้นทาง เพื่อใช้สำหรับการส่งวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ผ่านการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 โดยมีประเด็นวิจัยเพื่อพัฒนาโพรโทคอลที่นำเสนอ ดังนี้

- การพัฒนาการทำงานร่วมกันระหว่างโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางและวิธีการการจัดสรรช่องสัญญาณแบบ เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ในเครือข่าย
- การพัฒนาวิธีการเลือกเส้นทางและเลือกช่องสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการส่งหลายเส้นทาง เพื่อรองรับการกระจายข้อมูลในเครือข่ายด้วยการใช้เทคนิค MDC

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

พัฒนาการทำงานร่วมกันระหว่างโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง DSDV และวิธีการการจัดสรรช่องสัญญาณให้รองรับการทำงานของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายแบบ MCMI พร้อมทั้งพัฒนาให้สามารถเตรียมหลายเส้นทางการส่งข้อมูล เพื่อให้สามารถส่งวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ผ่านการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 ให้มีลักษณะเฉพาะตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

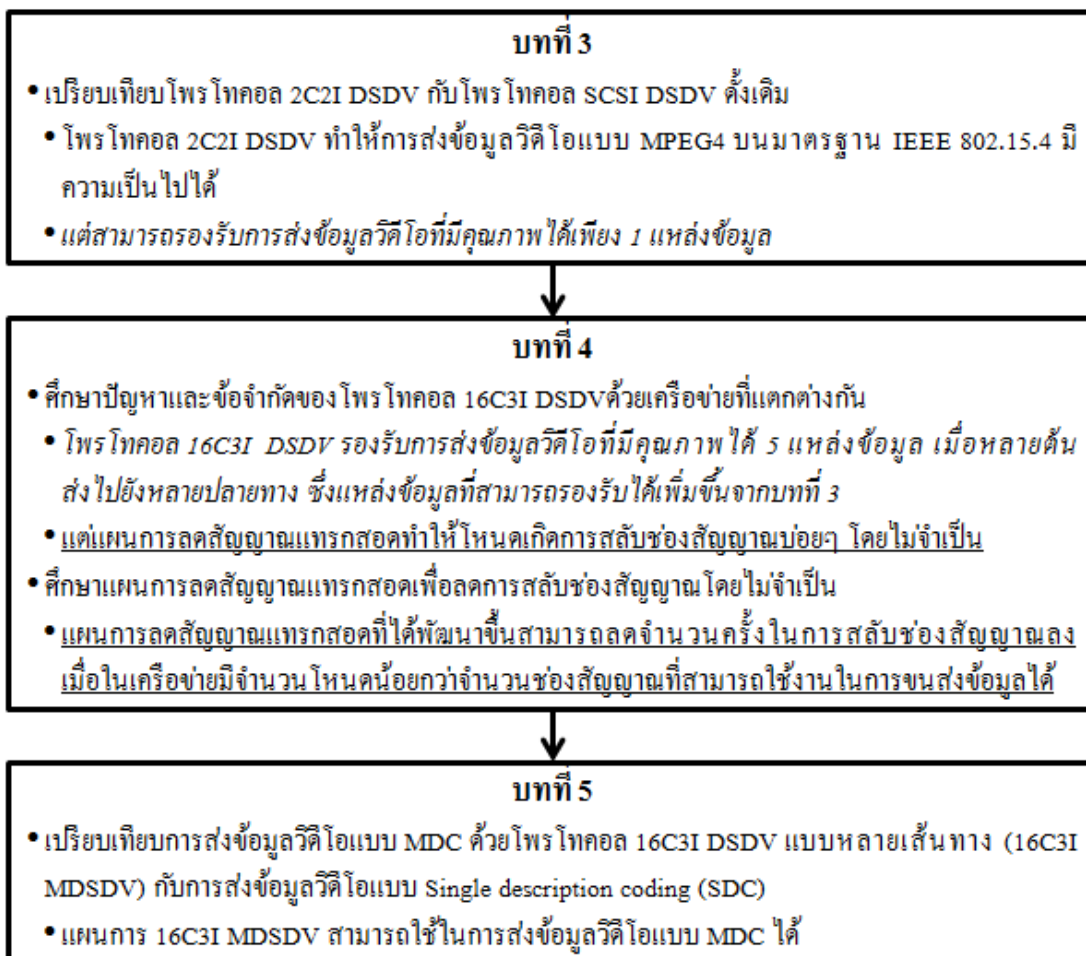
### 1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- ศึกษาทฤษฎี และบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย
- ออกแบบ ปรับปรุง พัฒนา และนำเสนออัลกอริทึมการทำงานประสานกันระหว่างโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV และโหนดแบบ MCMI เพื่อให้มีลักษณะเฉพาะตามวัตถุประสงค์ของโครงการ
- ออกแบบ ปรับปรุง พัฒนาและนำเสนออัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง เพื่อให้มีลักษณะเฉพาะตามวัตถุประสงค์ของโครงการ
- ตรวจสอบสรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

### 1.7 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องและจำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ บทที่ 3 ซึ่งได้นำเสนอและตีพิมพ์ในบทความ [19] ทำการศึกษาปัญหาและข้อจำกัดของการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายแบบหลายทอดที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยเปรียบเทียบโพรโทคอล DSDV ซึ่งได้รับการพัฒนาสำหรับโหนดแบบ 2-channel 2-interface (2C2I) กับโพรโทคอล DSDV ซึ่งใช้บนโหนดแบบ Single-channel single-interface (SCSI) คั้งเดิม ผลการจำลองการทำงานของเครือข่ายแสดงให้เห็นว่าการใช้แผนการ 2C2I ทำให้การส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีความเป็นไปได้ อย่างไรก็ตามแผนการ 2C2I สามารถรองรับการส่ง

ข้อมูลวิดีโอที่มีคุณภาพได้เพียง 1 แหล่งข้อมูลเท่านั้น บทที่ 4 ซึ่งได้ตีพิมพ์ในบทความ [20] ได้ศึกษาปัญหาและข้อจำกัดของการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายแบบหลายทอดที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ด้วยโพรโทคอล DSDV ซึ่งได้รับการพัฒนาสำหรับโหนดแบบ 16-channel 3-interface (16C3I) ผลการจำลองการทำงานของเครือข่ายแสดงให้เห็นว่าการใช้แผนการ 16C3I DSDV สามารถรองรับการส่งข้อมูลวิดีโอที่มีคุณภาพได้ถึง 5 แหล่งข้อมูล เมื่อข้อมูลถูกส่งจากหลายต้นทางไปยังหลายปลายทาง ซึ่งสามารถรองรับแหล่งข้อมูลได้มากกว่าแผนการ 2C2I DSDV ในบทที่ 3 อย่างไรก็ตามแผนการลดสัญญาณแทรกสอดที่นำมาใช้งานทำให้เกิดการสลับช่องสัญญาณบ่อยๆ โดยไม่จำเป็น ดังนั้นในบทที่ 4 จึงได้ทำการศึกษาแผนการลดสัญญาณแทรกสอดเพื่อลดการสลับช่องสัญญาณโดยไม่จำเป็น ซึ่งผลการจำลองการทำงานของเครือข่ายแสดงให้เห็นว่าแผนการลดสัญญาณแทรกสอดที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถลดจำนวนครั้งในการสลับช่องสัญญาณลง เมื่อในเครือข่ายมีจำนวนโหนดน้อยกว่าจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานในการขนส่งข้อมูลได้ บทที่ 5 ศึกษาปัญหาและข้อจำกัดของการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC บนเครือข่ายแบบหลายทอดที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ด้วยการพัฒนาโพรโทคอล 16C3I DSDV ในบทที่ 4 ให้สามารถเตรียมหลายเส้นทาง (16C3I MDSDV) โดยได้ทำการเปรียบเทียบโพรโทคอลหลังการพัฒนาด้วยการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC กับการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ Single description coding (SDC) ผลการจำลองการทำงานของเครือข่ายแสดงให้เห็นว่าการใช้แผนการ 16C3I MDSDV สามารถใช้ในการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC ได้ สุดท้ายบทที่ 6 กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากงานวิจัย พร้อมทั้งกล่าวถึงข้อเสนอแนะที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างบทที่ 3 - บทที่ 5 แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 1-1



ภาพประกอบที่ 1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างบทที่ 3 - บทที่ 5

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่นำมาอ้างอิงและใช้เป็นองค์ความรู้ประกอบในการทำวิจัย โดยในบทนี้จะเริ่มต้นด้วยภาพรวมของลำดับชั้นโพรโทคอลที่ทำการวิจัย จากนั้นจะเป็นส่วนของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของมาตรฐานนี้ หลังจากนั้นจะเป็นส่วนของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง DSDV ซึ่งจะกล่าวถึงหลักการและกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอลนี้ อันคืบต่อมาความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิดีโอ และสุดท้ายการใช้งานแบบจำลองต่างๆ ในโปรแกรมจำลองการทำงาน NS-2

#### 2.1 ลำดับชั้นโพรโทคอลการติดต่อสื่อสาร

ชั้นของโพรโทคอลในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายถูกนำเสนอในบทความ [21] ซึ่งประกอบด้วย 5 ชั้นโพรโทคอลการติดต่อสื่อสาร เริ่มด้วยชั้นการติดต่อสื่อสารชั้นล่างสุดนั่นคือชั้นกายภาพ ถัดมาเป็นชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (Data Link layer) ลำดับถัดมาชั้นเครือข่าย ต่อมาชั้นขนถ่าย (Transport layer) และสุดท้ายเป็นชั้นประยุกต์ (Application layer) ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในชั้นกายภาพ และชั้นควบคุมการใช้สื่อ ซึ่งชั้นควบคุมการใช้สื่อเป็นชั้นย่อยของชั้นเชื่อมโยง ชั้นเครือข่ายใช้โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV เพื่อส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายไร้สาย User datagram protocol (UDP) ถูกใช้งานในชั้นขนถ่าย และสุดท้ายที่ชั้นประยุกต์ ข้อมูลวิดีโอจะถูกส่งบนโพรโทคอล Real-time transport protocol (RTP) โพรโทคอลที่ใช้ในแต่ละลำดับชั้นในโครงการวิจัยนี้แสดงดังภาพประกอบที่ 2-1 โดยรายละเอียดต่างๆ ของแต่ละชั้นจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไปในบทนี้

Sensor network protocol stack in thesis	The sensor networks protocol stack
Video Codecs	Application Layer
Real-time Transport Protocol (RTP)	
User Datagram Protocol (UDP)	Transport Layer
Routing Protocol	Network Layer
IEEE 802.2 Logical Link Control (LLC) Layer	Data Link Layer
IEEE 802.15.4 Medium Access Control (MAC) Sublayer	
IEEE 802.15.4 Physical (PHY) Layer	

ภาพประกอบที่ 2-1 โพรโทคอลในแต่ละลำดับชั้นที่ใช้ในงานวิจัย

## 2.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4

มาตรฐานสากล IEEE802.15.4 low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs) [5][22-25] เป็นการสื่อสารแบบไร้สายที่มีอัตราการส่งรับข้อมูลต่ำ ใช้พลังงานต่ำ และมีราคาถูก ใช้ในการเฝ้าระวังหรือติดตาม (Monitoring) สิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่สนใจ มาตรฐานนี้มีการแบ่งการทำงานโพรโทคอลออกเป็น 2 ลำดับชั้น คือ ชั้นกายภาพ และชั้นควบคุมการใช้สื่อ

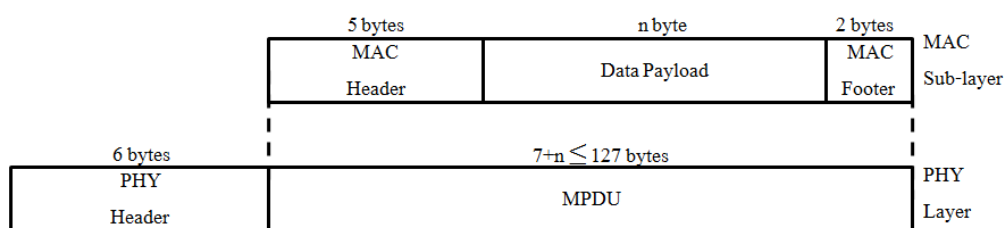
ชั้นกายภาพให้บริการในการส่งและรับข้อมูลในช่วงความถี่ที่จัดสรรไว้ โดยช่วงความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอยู่ระหว่างความถี่ 2400-2483.5 MHz มีการใช้งานมากที่สุด และมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดซึ่งเท่ากับ 250 kbps แบ่งได้เป็น 16 ช่องสัญญาณ ใช้เทคนิค Direct sequence spread spectrum (DSSS) ในการเข้ารหัสสัญญาณ เทคนิคนี้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่มีการแทรกสอดจากคลื่นวิทยุอื่น ๆ อย่างรุนแรง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ต้องระบุคลื่นความถี่ที่จะใช้ในการติดต่อสื่อสารที่แน่นอน ดังนั้นด้วยเทคนิคนี้ทั้ง 16 ช่องสัญญาณสามารถใช้งานพร้อมกันได้

ลำดับชั้นควบคุมการใช้สื่อมีหน้าที่ในการจัดการการเข้าใช้ช่องสัญญาณ โดยใช้กระบวนการแย่งชิงกันเข้าใช้ช่องสัญญาณ CSMA/CA ในชั้นนี้

รูปแบบเฟรม (Frame format) สำหรับส่งกลุ่มข้อมูลในชั้นกายภาพแสดงได้ดังภาพ PHY Layer ในภาพประกอบที่ 2-2 เฟรมนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ PHY header และ MAC Protocol Data Unit (MPDU) ในส่วนของ PHY header ต้องการพื้นที่ในกลุ่มข้อมูลจำนวน 6 ไบต์

(bytes) ส่วน MPDU เป็นกลุ่มข้อมูลที่ส่งมาจากชั้นควบคุมการใช้สื่อ ซึ่งตามมาตรฐานนี้จะมีขนาดของกลุ่มข้อมูล (Packet size) ได้ไม่เกิน 127 ไบต์

รูปแบบเฟรมสำหรับส่งกลุ่มข้อมูลในชั้นควบคุมการใช้สื่อแสดงได้ดังภาพ MAC Sub-layer ในภาพประกอบที่ 2-2 เฟรมนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ MAC header Data payload และ MAC footer ในส่วนของ MAC header ต้องการพื้นที่ในกลุ่มข้อมูลจำนวน 5 ไบต์ ส่วน MAC footer ต้องการพื้นที่ในกลุ่มข้อมูลจำนวน 2 ไบต์ ส่วนของ Data payload (n byte) จะมีข้อมูลได้สูงสุด  $127 - (5 + 2) = 120$  ไบต์ เนื่องจาก MPDU มีขนาดได้ไม่เกิน 127 ไบต์ ดังที่กล่าวมาแล้วในส่วน of รูปแบบเฟรมสำหรับส่งกลุ่มข้อมูลในชั้นกายภาพ



ภาพประกอบที่ 2-2 รูปแบบเฟรมชั้นควบคุมการใช้สื่อและชั้นกายภาพในมาตรฐาน IEEE 802.15.4

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 รองรับโครงสร้างเครือข่าย (Topology) สามแบบ คือ เครือข่ายแบบดาว (Star topology) เครือข่ายแบบตาข่าย (Mesh topology) และเครือข่ายแบบต้นไม้ (Cluster-Tree topology) งานวิจัยนี้เลือกทำการทดสอบสมรรถนะบน โครงสร้างแบบตาข่าย ซึ่งทุก โหนดในเครือข่ายสามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยอิสระ

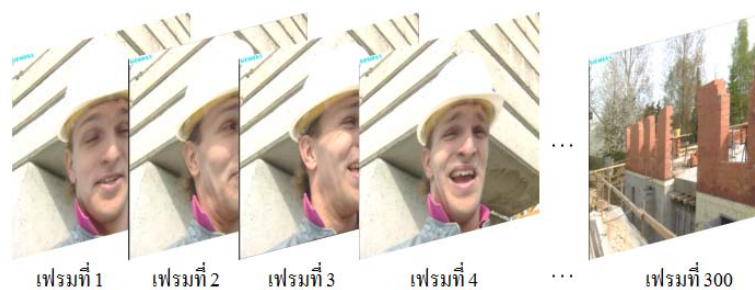
### 2.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง Destination-sequenced distance-vector (DSDV)

โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง Destination-sequenced distance-vector (DSDV)[6][21][26-27] เป็นโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางที่มีการเตรียมเส้นทางส่งข้อมูลไว้ล่วงหน้า โพรโทคอลนี้แก้ปัญหาการวนซ้ำการส่งข้อมูลที่เกิดขึ้นบนอัลกอริทึมชนิด Distance vector โดยใช้หมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง (Destination sequence number) โพรโทคอล DSDV จะบอกระยะห่าง (Distance) และทิศทาง (Vector) การส่งข้อมูลตามอัลกอริทึมชนิด Distance vector โพรโทคอลนี้ใช้การส่งข้อมูลแบบทอดต่อทอด (Hop-by-hop) ซึ่งเป็นการใช้โหนดข้างเคียงส่งข้อมูลต่อกันไปจนถึงปลายทาง แต่ละโหนดจะเก็บตารางเส้นทางเพื่อใช้ส่งข้อมูลไปยังทุกโหนดในเครือข่าย ข้อมูลตารางเส้นทางของแต่ละโหนดจะถูกแลกเปลี่ยนกันเป็นประจำเพื่อให้เส้นทางใหม่ อยู่เสมอ



## 2.4 ความรู้พื้นฐานของภาพและวิดีโอ

วิดีโอเกิดจากการนำภาพที่ต่อเนื่องกัน มาแสดงตามลำดับทีละภาพไปเรื่อยๆ โดยเรียกภาพแต่ละภาพที่นำมาแสดงตามลำดับนั้นว่าเฟรม (frame) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-3 และเพื่อให้เข้าใจถึงที่มาของวิดีโอมากขึ้น ในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงที่มาของภาพและการเกิดของวิดีโอ โดยแบ่งหัวข้ออธิบายออกเป็น 3 หัวข้อ คือ หัวข้อที่ 2.4.1 การแสดงข้อมูลภาพ (Image representation) เพื่อให้เข้าใจถึงส่วนประกอบของภาพ หัวข้อที่ 2.4.2 ระบบสี (Color model) เพื่อให้เข้าใจถึงรูปแบบสีของภาพที่ใช้ในการทดลองนี้ และสุดท้ายหัวข้อที่ 2.4.3 การบีบอัดข้อมูลวิดีโอ MPEG4 เพื่อให้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิดีโอตามมาตรฐาน MPEG4



ภาพประกอบที่ 2-3 การเกิดวิดีโอ

### 2.4.1 การแสดงข้อมูลภาพ (Image representation)

วัตถุที่มีอยู่ตามธรรมชาติหรือที่มนุษย์สร้างขึ้นจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป เช่น ตัวอักษรเอมีรูปร่าง A ตัวอักษรบีมีรูปร่าง B สำหรับการจัดเก็บภาพของวัตถุที่มีรูปร่างแตกต่างกัน เหล่านี้นิยมกำหนดขอบเขตให้ภาพอยู่ในรูปสี่เหลี่ยม [28] เช่น ในการเก็บภาพตัวอักษรเอที่มีรูปร่าง A จะทำการจัดเก็บโดยกำหนดขอบเขตให้ภาพอยู่ในรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4 ข้อดีของการกำหนดขอบเขตภาพให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม คือ ทำให้การอ่านภาพและการจัดเก็บข้อมูลภาพในหน่วยความจำ และการแสดงภาพออกทางอุปกรณ์ต่างๆ เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งภาพวิดีโอที่ใช้ในการทดลองนี้ก็ได้กำหนดขอบเขตให้ภาพในลักษณะเดียวกันนี้

A

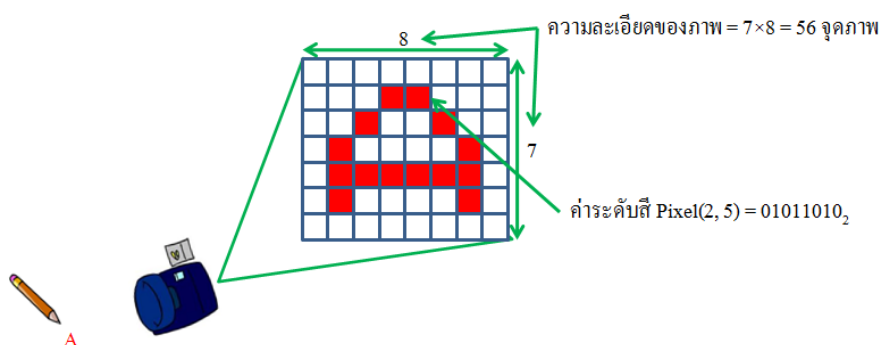
อักษรเอที่มีรูปร่าง A



กำหนดขอบเขตของภาพให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม

ภาพประกอบที่ 2-4 การกำหนดขอบเขตของภาพตัวอักษรเอที่มีรูปร่าง A ให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม

ภาพแต่ละภาพประกอบด้วยจุดภาพ (Pixel) จำนวนมาก ซึ่งจำนวนของจุดภาพจะเป็นตัวบอกถึงความละเอียดของภาพ (Image resolution) เช่น ในภาพขนาด  $7 \times 8$  จุดภาพ โดยตัวเลข 7 แสดงแถวในแนวนอน และตัวเลข 8 แสดงจำนวนคอลัมน์ จะมีความละเอียดของภาพ  $7 \times 8 = 56$  จุดภาพ จุดภาพแต่ละจุดจะเก็บค่าสีไว้ ซึ่งค่าสีนี้จะบอกถึงความแตกต่างของสีที่เป็นไปได้สูงสุด เช่น ในภาพแบบ 8 บิต (bit) แต่ละจุดสามารถมีสีที่แตกต่างกันได้สูงสุดเท่ากับ  $2^8 = 256$  สี ภาพประกอบที่ 2-5 แสดงตัวอย่างของภาพแบบ 8 bits ของตัวอักษรเอที่มีรูปร่าง A มีความละเอียด  $7 \times 8$  จุดภาพ และมีค่าระดับสีของจุดภาพในแถวที่ 2 คอลัมน์ที่ 5 (Pixel(2, 5)) =  $01011010_2$



ภาพประกอบที่ 2-5 การเก็บข้อมูลภาพตัวอักษรเอซึ่งมีรูปร่าง A ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์

#### 2.4.2 ระบบสี (Color model)

สำหรับวิดีโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบสี YUV เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของวิดีโอรองรับวิดีโอที่ใช้รูปแบบสี YUV เท่านั้น รูปแบบสี YUV [28] แบ่งชั้นของสีออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้นสี Y ชั้นสี U และชั้นสี V โดยในชั้นสี Y จะแสดงสีที่เกิดจากการรวมกันของแสงสี 3 สี คือ แสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน ดังนั้นในชั้นสี Y จะแสดงส่วนที่สว่างและส่วนที่มีมืดของภาพ ลำดับต่อมาชั้นสี U เกิดจากการตัดข้อมูล Y ออกจากแสงสีน้ำเงิน และสุดท้ายชั้นสี V เกิดจากการตัดข้อมูล Y ออกจากแสงสีแดง

ภาพที่ใช้รูปแบบสี YUV สามารถทำการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) จุดภาพในชั้นสี เพื่อให้ได้ภาพที่มีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่นำไปใช้งาน เช่น ในงานสิ่งพิมพ์โฆษณาต้องใช้ภาพที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้ได้งานโฆษณาที่มีคุณภาพดี แต่สำหรับวิดีโอการลดจุดภาพบางส่วนจะทำให้สามารถจัดเก็บวิดีโอได้ยาวนานขึ้น เป็นต้น โดยรูปแบบการสุ่มตัวอย่างจุดภาพในชั้นสีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย รวมถึงวิดีโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แบบ 4:2:0 การสุ่มตัวอย่างจุดภาพในชั้นสีรูปแบบนี้มีวิธีการสุ่มตัวอย่างจุดภาพในชั้นสี คือ ในจำนวนจุดภาพ 4 จุดที่ตรงกันของแต่ละชั้น

สี จะทำการเลือกจุดภาพ 4 จุดภาพในชั้นสี Y สำหรับชั้นสี U และชั้นสี V จะทำการสุ่มเลือกจุดภาพในชั้นสีละ 1 จุดภาพ

เราสามารถคำนวณเนื้อที่สำหรับเก็บภาพในหน่วยความจำของภาพที่ใช้ระบบสี YUV ที่มีการสุ่มตัวอย่างจุดภาพในชั้นสีแบบ 4:2:0 ได้ดังสมการที่ (2-1)

$$(M \times N \times g) + [2 \times (M \times N \times g \times \frac{1}{4})] \quad (2-1)$$

โดย  $g$  คือ จำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ

$M$  และ  $N$  คือ ความละเอียดของภาพ

จากสมการที่ (2-1) เนื้อที่ในการเก็บภาพที่ใช้ระบบสี YUV ที่มีจำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ 8 บิต มีความละเอียดของภาพ 352x288 จุดภาพ และมีการสุ่มตัวอย่างจุดภาพในชั้นสีแบบ 4:2:0 จะเท่ากับ  $(352 \times 288 \times 8) + [2 \times (352 \times 288 \times 8 \times \frac{1}{4})] = 1216512$  บิต

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าวิดีโอเกิดจากการนำภาพที่ต่อเนื่องกัน มาแสดงตามลำดับทีละภาพไปเรื่อยๆ ดังนั้นสามารถคำนวณเนื้อที่สำหรับเก็บวิดีโอในหน่วยความจำได้ดังสมการที่ (2-2)

$$\{(M \times N \times g) + [2 \times (M \times N \times g \times \frac{1}{4})]\} \times F \quad (2-2)$$

โดย  $g$  คือ จำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ

$M$  และ  $N$  คือ ความละเอียดของภาพ

$F$  คือ จำนวนของเฟรม

จากสมการที่ (2-2) เนื้อที่ในการเก็บวิดีโอที่ใช้ระบบสี YUV ที่มีจำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ 8 บิต มีความละเอียดของภาพ 352x288 จุดภาพ มีการสุ่มตัวอย่างจุดภาพในชั้นสีแบบ 4:2:0 และมีจำนวนเฟรม 300 เฟรม จะเท่ากับ  $\{(352 \times 288 \times 8) + [2 \times (352 \times 288 \times 8 \times \frac{1}{4})]\} \times 300 = 364953600$  บิต

#### 2.4.3 การบีบอัดข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค MPEG4

วิดีโอ MPEG4 [5-6][22][28-34] เป็นหนึ่งในมาตรฐานที่ใช้สำหรับการบีบอัดวิดีโอ ได้รับการพัฒนาโดยกลุ่มนักพัฒนาระบบมาตรฐานการเข้ารหัสวิดีโอและออกดิโอ (Moving Picture Experts Group: MPEG) ของ ISO/IEC วิดีโอ MPEG4 มีข้อดี คือ ใช้เนื้อที่การจัดเก็บวิดีโอเล็กลงอย่างมาก ในขณะที่คุณภาพของวิดีโอที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การบีบอัดวิดีโอแบบ

MPEG4 แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นการบีบอัดภาพและส่วนที่เป็นการบีบอัดเสียง ในที่นี้ให้ความสนใจเฉพาะส่วนที่เป็นการบีบอัดภาพ

เฟรมของวิดีโอ MPEG4 แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ เฟรม I (Intra-coded) เฟรม P (Predictive-coded) และเฟรม B (Bi-directionally predictive-coded) โดยเฟรม I ใช้เพื่อแสดงภาพนิ่ง เฟรม P ใช้เพื่อแสดงทิศทางการเคลื่อนไหวของวัตถุในภาพ และสุดท้ายเฟรม B ใช้เพื่อทำให้การแสดงผลและสีของวัตถุในภาพดูสมนุญมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างเฟรม I เฟรม P และเฟรม B ในวิดีโอแบบ MPEG4 จะถูกแสดงด้วย Group of pictures (GOP) โดย 1 GOP จะมีเฟรม I แค่หนึ่งเฟรมเท่านั้น รูปแบบของ GOP จะถูกกำหนดคุณสมบัติโดย 2 พารามิเตอร์ ( $G(X, Y)$ ) คือ  $X$  และ  $Y$  ซึ่ง  $X$  แสดงระยะห่างระหว่างเฟรม I กับเฟรม I และ  $Y$  แสดงระยะห่างระหว่างเฟรม I กับเฟรม P และเฟรม P กับเฟรม P ดังตัวอย่างเช่น  $G(12, 3)$  หมายความว่า GOP ที่มีเฟรม I ห่างกัน 12 เฟรม และมีเฟรม I กับเฟรม P และเฟรม P กับเฟรม P ห่างกัน 3 เฟรม

MPEG4 ใช้หลักการบีบอัดแบบคงข้อมูลหลัก (Lossy compression) ซึ่งหมายความว่าเมื่อทำการนำข้อมูลกลับมา ข้อมูลที่ได้จะมีความแตกต่างจากข้อมูลต้นฉบับแต่ก็เพียงพอต่อการใช้งาน นั่นหมายความว่าเกิดการสูญเสียในการบีบอัด ค่าที่นิยมนำมาใช้ทำการชี้วัดความแตกต่างระหว่างวิดีโอที่ได้ทำการบีบอัดแล้วกับวิดีโอต้นฉบับคือ PSNR (Peak signal to noise ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของสัญญาณและค่าของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างวิดีโอที่ได้ทำการบีบอัดแล้วกับวิดีโอต้นฉบับโดยถ้ามีค่า PSNR สูงจะถือว่ามีประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-3) โดยปกติแล้วไม่จำเป็นต้องนำทุกชั้นสิมาคำนวณค่า PSNR เนื่องจากตาคนมีความไวต่อแสงมากกว่าสี ดังนั้นการคำนวณ PSNR บนชั้นสี Y ก็เพียงพอแล้ว [35]

$$PSNR(s, d) = 20 \log \frac{V_{peak}}{MSE(s, d)} (dB) \quad (2-3)$$

โดย  $V_{peak} = 2^k - 1$  เมื่อ  $k$  คือจำนวนบิตของสี

$MSE(s, d) =$  Mean Square Error of  $s$  and  $d$

$$\frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |(s_{i,j} - d_{i,j})|$$

( $s =$  Source frame,  $d =$  Destination frame)

ตัวอย่างการคำนวณ PSNR ด้วยสมการที่ (2-3) สำหรับ  $4 \times 4$  บล็อกที่มีความละเอียด 4 บิต

$$s = \begin{bmatrix} 10 & 12 & 4 & 11 \\ 1 & 7 & 5 & 4 \\ 13 & 9 & 5 & 6 \\ 8 & 7 & 14 & 0 \end{bmatrix}$$

และหลังการบีบอัด

$$d = \begin{bmatrix} 8 & 9 & 7 & 13 \\ 5 & 14 & 8 & 8 \\ 14 & 7 & 10 & 9 \\ 8 & 5 & 12 & 4 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2-3)

$$PSNR(s, d) = 20 \log \frac{V_{peak}}{MSE(s, d)} (dB)$$

ได้

$$V_{peak} = 2^4 - 1 = 15$$

และ

$$MSE(s, d) = \frac{1}{m*n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |(s_{i,j} - d_{i,j})|$$

$$MSE(s, d) = \frac{1}{16} \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 |(s_{i,j} - d_{i,j})|$$

$$MSE(s, d) = \frac{1}{16} \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \begin{bmatrix} 2 & 3 & -3 & -2 \\ -4 & -7 & -3 & -4 \\ -1 & 2 & -5 & -3 \\ 0 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$MSE(s, d) = \frac{1}{16} |(2 + 3 + -3 + -2 + -4 + -7 + -3 + -4 + -1 + 2 + -5 + -3 + 0 + 2 + 2 + 0)$$

$$MSE(s, d) = \frac{1}{16} |(-21)| = \frac{1}{16} (21) = 1.3125$$

เพราะฉะนั้น

$$PSNR(s, d) = 20 \log \frac{15}{1.3125} = 21.16 \text{ dB}$$

นอกจากนี้ค่าของ PSNR ยังสามารถนำมาเปรียบเทียบกับ Mean opinion score (MOS) ได้จากตารางที่ 2-1 ซึ่ง MOS เป็นเมตริกซ์ที่ใช้วัดคุณภาพของข้อมูลมัลติมีเดียต่างๆ ซึ่งได้มาจากความพึงพอใจในคุณภาพของผู้ใช้ แบ่งได้เป็น 5 ระดับ

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบ PSNR และ MOS

PSNR (dB)	MOS
>37	5 (Excellent)
31-37	4 (Good)
25-31	3 (Fair)
20-25	2 (Poor)
<20	1 (Bad)

#### 2.4.4 การแยกข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค Multiple Description Coding (MDC)

เทคนิคการแยกข้อมูลวิดีโอ Multiple Description Coding (MDC) [5][36] เป็นการแยกวิดีโอออกเป็นส่วนย่อยโดยส่วนย่อยแต่ละส่วนสามารถทำการเข้ารหัสและถอดรหัสวิดีโออย่างเช่น MPEG4 ได้ด้วยตัวเอง ยิ่งกว่านั้นถ้ามีส่วนย่อยบางส่วนขาดหายไปก็ยังสามารถแสดงวิดีโอได้

สำหรับการทำงานของเทคนิคนี้ แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการแบ่งข้อมูลวิดีโอออกเป็นส่วนย่อยๆ และส่วนของการรวมข้อมูลส่วนย่อยๆ เหล่านี้ให้กลับมาเป็นเหมือนเดิมในส่วนแรก เริ่มจากการแบ่งข้อมูลวิดีโอซึ่งอยู่ในรูปของ YUV ออกเป็นส่วนย่อยๆ จากนั้นนำส่วนย่อยๆ แต่ละส่วนเหล่านั้นไปทำการเข้ารหัส ซึ่งในที่นี้ทำการเข้ารหัสเป็น MPEG4 หลังเข้ารหัสก็นำข้อมูลส่วนย่อยๆ เหล่านี้มาใช้งาน ซึ่งในที่นี้คือการนำมาส่งผ่านเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายดังนั้นเห็นได้ว่าการทำงานในส่วนแรกเกิดขึ้นที่โหนดต้นทาง ในส่วนที่สองจะนำส่วนย่อยๆ ที่ได้เข้ารหัสไว้มาทำการถอดรหัส จากนั้นก็ทำการรวมส่วนย่อยๆ ที่ได้ทำการถอดรหัสแล้วเหล่านั้นให้กลับมาเป็นเหมือนเดิม เห็นได้ว่าการทำงานในส่วนที่สองเกิดขึ้นที่โหนดปลายทางของเครือข่าย ซึ่งแม้ว่าในกระบวนการรวมส่วนย่อยๆ มีส่วนย่อยๆ บางส่วนขาดหาย ก็ยังสามารถแสดงวิดีโอได้

ดังนั้นการใช้เทคนิคนี้ก่อนการเข้ารหัส MPEG4 ทำให้เครือข่ายสามารถทำการกระจายการใช้งานแบนด์วิดท์ในการส่งวิดีโอออกไปหลายๆ เส้นทางแทนที่แบนด์วิดท์จะถูกใช้อย่างสูงในเส้นทางเดียว และถ้ามีข้อมูลในเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งเกิดความเสียหาย ปลายทางก็ยังคงสามารถแสดงวิดีโอได้ จึงต้องมีการปรับปรุงโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางให้เหมาะสมกับการทำงานแบบนี้ด้วย

#### 2.4.5 เครื่องมือ EvalVid

EvalVid [29][32] เป็นกลุ่มเครื่องมือที่ใช้สำหรับการประเมินผลคุณภาพของวิดีโอที่ถูกส่งบนเครือข่ายการติดต่อสื่อสารจริงหรือการจำลองเครือข่ายการติดต่อสื่อสารด้วยเครื่องมือจำลองการทำงานของเครือข่าย ซึ่ง EvalVid มีความสามารถในการประเมินตัวชี้วัดคุณภาพของวิดีโออย่างอัตราการสูญเสียของกลุ่มข้อมูลหรือเฟรม (Packet/frame loss rate) ความแปรปรวนของกลุ่มข้อมูลหรือเฟรม (Packet/frame jitter) และ PSNR

ในงานวิจัยนี้ EvalVid ถูกใช้งานร่วมกับ NS-2 เพื่อให้สามารถจำลองการส่งข้อมูลวิดีโอและประเมินผลคุณภาพของข้อมูลวิดีโอหลังการจำลองการส่งข้อมูลวิดีโอผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้ โครงสร้างการใช้งาน EvalVid ร่วมกับ NS-2 แสดงดังภาพประกอบที่ 2-6 การประเมินผลการส่งข้อมูลวิดีโอผ่านโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 เริ่มจากการนำข้อมูลวิดีโอจากแหล่งข้อมูลวิดีโอ (Video source) ไปทำการแยกข้อมูลวิดีโอ (เครื่องมือ splitter) ในกรณีที่ต้องการส่งข้อมูลด้วยเทคนิค MDC จากนั้นนำข้อมูลวิดีโอจากแหล่งข้อมูลวิดีโอไปทำการเข้ารหัสเป็น MPEG4 ด้วยเครื่องมือเข้ารหัสวิดีโอ MPEG4 (MPEG4 video encoder) แล้วทำการสร้างข้อมูลวิดีโอเพื่อนำไปใช้ในการจำลองการทำงานเครือข่ายบน NS-2 โดยใช้เครื่องมือสร้าง

ข้อมูลวิดีโอสำหรับส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย (เครื่องมือ mp4trace) เมื่อได้ข้อมูลวิดีโอสำหรับการส่งผ่านเครือข่ายไร้สายแล้ว ก็ทำการจำลองการส่งข้อมูลวิดีโอบนโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2 หลังจำลองการส่งวิดีโอเสร็จสิ้น ก็จะทำการประเมินการสูญเสียของข้อมูลวิดีโอและการหน่วงเวลาที่เกิดจากการจำลองการส่งข้อมูลวิดีโอผ่านเครือข่ายไร้สายด้วยเครื่องมือในการประเมินสมรรถนะการส่งวิดีโอบนเครือข่ายไร้สาย (เครื่องมือ ctmp4) เพื่อประเมินคุณภาพของวิดีโอด้วยเครื่องมือประเมินคุณภาพ PSNR ของวิดีโอ วิดีโอ MPEG4 ที่อาจจะมียุติพลาดเนื่องจากการส่งผ่านเครือข่ายไร้สายถูกถอดรหัสกลับเป็นรูปแบบสี YUV ด้วยเครื่องมือถอดรหัสวิดีโอ MPEG4 (MPEG4 video decoder) และทำการรวมแต่ละส่วนย่อยของวิดีโอเข้าด้วยกันด้วยเครื่องมือรวมข้อมูลวิดีโอ (เครื่องมือ merger) ในกรณีที่มีการส่งข้อมูลแบบ MDC แสดงรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

แหล่งข้อมูลวิดีโอที่จะนำมาใช้กับเครื่องมือ EvalVid ต้องอยู่ในระบบสี YUV ซึ่งจะต้องมีความละเอียดของภาพเท่ากับ 176x144 จุดภาพ หรือ 352x288 จุดภาพ

เครื่องมือแยกและรวมข้อมูลวิดีโอจะถูกใช้ในกรณีที่ต้องการส่งข้อมูลโดยใช้เทคนิค MDC ซึ่งเครื่องมือแยกข้อมูลวิดีโอจะแยกข้อมูลวิดีโอจากแหล่งข้อมูลวิดีโอออกเป็นส่วนย่อยๆ หลายๆ ส่วนตามลำดับของเฟรมดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-7 โดยวิดีโอจากแหล่งข้อมูลทั้งหมด 400 เฟรม (F1 – F 400) จะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนตามลำดับคี่และคู่ (F 1 F 3 – F 399 และ F 2 F 4 – F 400) ส่วนเครื่องมือรวมข้อมูลวิดีโอจะทำการรวมข้อมูลวิดีโอจากหลายๆ ส่วนย่อยๆ เข้าด้วยกันดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-8 เฟรมซึ่งถูกแยกออกเป็นสองส่วนตามลำดับคี่และคู่ (F' 1 F' 3 – F' 399 และ F' 2 F' 4 – F' 400) จะถูกรวมเป็นข้อมูลวิดีโอเดียวกัน (F' 1 F' 2 – F' 400)

เครื่องมือเข้ารหัสและถอดรหัสวิดีโอ MPEG4 ทำหน้าที่ในการเข้ารหัสข้อมูลจากแหล่งข้อมูลวิดีโอหรือข้อมูลหลังผ่านเครื่องมือแยกข้อมูลวิดีโอให้เป็นข้อมูลวิดีโอ MPEG4 ในโครงการนี้เลือกใช้เครื่องมือ x264 ร่วมกับ MP4Box โดยเครื่องมือ x264 ถูกใช้เพื่อเข้ารหัสวิดีโอ MPEG4 แบบ H.264 ในขณะที่ MP4Box ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟล์ข้อมูลวิดีโอที่ได้จากเครื่องมือ x264 (เครื่องมือ x264 จะทำให้ได้ไฟล์ข้อมูลวิดีโอที่มีนามสกุล 264) ให้เป็นไฟล์ข้อมูล MPEG4 แบบมาตรฐาน (เครื่องมือ MP4Box จะทำให้ได้ไฟล์ข้อมูลวิดีโอที่มีนามสกุล mp4) นอกจากนี้เครื่องมือ MP4Box ยังมีการเตรียมการสำหรับการส่งวิดีโอผ่านเครือข่ายไร้สาย โดยการแบ่งวิดีโอเฟรมซึ่งมีขนาดใหญ่ออกเป็นส่วนย่อย ซึ่งแต่ละส่วนย่อยจะถูกจัดรูปแบบข้อมูลตามมาตรฐาน RTP เครื่องมือ ffmpeg ถูกใช้ในการถอดรหัสวิดีโอที่มีนามสกุล mp4 ให้กลับมาเป็นข้อมูลวิดีโอในรูปแบบ YUV

เครื่องมือสร้างข้อมูลวิดีโอสำหรับส่งผ่านเครือข่ายไร้สายจะอ่านข้อมูลวิดีโอหลังการเข้ารหัสจากเครื่องมือเข้ารหัส MPEG4 หลังจากนั้นจะทำการสร้างไฟล์ Traffic trace ดังแสดงในตารางที่ 2-2 เพื่อเตรียมการไว้สำหรับใช้ในการจำลองการทำงานเครือข่ายบน NS2 โดยภายในไฟล์ Traffic trace จะประกอบด้วยข้อมูล ลำดับเฟรม (Frame number) ชนิดของเฟรม (Frame type) ขนาดของเฟรม (Frame size) จำนวนกลุ่มข้อมูล UDP ของเฟรม (Number of UDP-packets) และเวลาที่ทำการส่งเฟรม (Sender time)

งานวิจัยนี้ทำการจำลองการส่งข้อมูลวิดีโอบนโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 เพื่อให้ NS-2 และ EvalVid ทำงานร่วมกันต้องมีการเพิ่มส่วนติดต่อประสานงานระหว่างกัน โดยต้องมีการเพิ่มฟังก์ชัน MyTrafficTrace MyUDP MyUDPSink ลงไปบนโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2 ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการเตรียมไฟล์ข้อมูลวิดีโอสำหรับส่งบนโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2 และสร้างไฟล์ที่ EvalVid ต้องใช้ในการประเมินคุณภาพการส่งข้อมูลวิดีโอ ฟังก์ชัน MyTrafficTrace ทำหน้าที่ในการดึงค่า Frame type และ Frame size จากไฟล์ Traffic trace แล้วทำการแยกเฟรมวิดีโอเป็นส่วนย่อย จากนั้นทำการส่งส่วนย่อยเหล่านี้ให้กับฟังก์ชัน MyUDP ตามเวลาที่ระบุในไฟล์ Simulation script ฟังก์ชัน MyUDP เป็นฟังก์ชันที่ขยายการทำงานมาจากฟังก์ชัน UDP ทำหน้าที่ในการสร้างไฟล์ Sender trace และส่งข้อมูลวิดีโอไปให้กับโหนดต้นทางในเครือข่าย ฟังก์ชัน MyUDPSink ทำหน้าที่ในรับข้อมูลที่ส่งมาจาก MyUDP และทำการสร้างไฟล์ Receiver trace ไฟล์ Sender trace และ Receiver trace มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2-3 และ ตารางที่ 2-4 โดยภายใน Sender trace และ Receiver trace ประกอบด้วยเวลาที่ทำการส่งหรือรับกลุ่มข้อมูล (Time stamp) หมายเลขเฉพาะตัวของกลุ่มข้อมูล (Packet ID) ชนิดของกลุ่มข้อมูล (Packet type) และขนาดของกลุ่มข้อมูลที่ส่งหรือได้รับ (Payload size)

หลังการจำลองการส่งข้อมูลวิดีโอบนส่งผ่านเครือข่ายไร้สายด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 ข้อมูลวิดีโอจะถูกประเมินสมรรถนะ โดยใช้เครื่องมือในการประเมินสมรรถนะการส่งวิดีโอบนเครือข่ายไร้สาย เครื่องมือนี้จะนำข้อมูลก่อนและหลังการจำลองการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายมาใช้ในการประเมินสมรรถนะของเครือข่าย โดยข้อมูลก่อนการจำลองการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายที่เครื่องมือนี้ต้องใช้เพื่อการประเมินสมรรถนะประกอบด้วย วิดีโอที่ถูกเข้ารหัสเป็น MPEG4 และ Sender trace และข้อมูลหลังการจำลองการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายที่เครื่องมือนี้ต้องใช้เพื่อการประเมินสมรรถนะคือ Receiver trace ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินสมรรถนะการส่งวิดีโอบนเครือข่ายไร้สายด้วยเครื่องมือนี้ประกอบด้วย อัตราการสูญเสียของเฟรม (Frame loss rate) ความแปรปรวนทางเวลาของเฟรม (Frame jitter) และข้อมูลวิดีโอ MPEG4 ที่อาจจะมีข้อผิดพลาดเนื่องจากการส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย (Reconstructed erroneous MPEG4 video)



ข้อมูลในไฟล์อัตราการสูญเสียของเฟรมประกอบด้วย ร้อยละการสูญเสียของเฟรม I (I frame loss (%)) ร้อยละการสูญเสียของเฟรม P (P frame loss (%)) ร้อยละการสูญเสียของเฟรม B (B frame loss (%)) และร้อยละการสูญเสียของเฟรมทั้งหมด (Overall frame loss (%)) สมการที่ใช้ในการหาค่าร้อยละการสูญเสียของเฟรมชนิดต่างๆ แสดงดังสมการที่ (2-4) แสดงตัวอย่างไฟล์อัตราการสูญเสียของเฟรมดังตารางที่ 2-5

$$\text{Frame loss} \quad FL_T = 100 \frac{n_{Trecv}}{n_{Tsent}} \quad (2-4)$$

โดย  $T$  คือ ชนิดของเฟรม (I P B หรือ Overall)

$n_{Tsent}$  คือ จำนวนของเฟรมชนิด  $T$  ที่ถูกส่ง

$n_{Trecv}$  คือ จำนวนของเฟรมชนิด  $T$  ที่ถูกรับได้สำเร็จ

ข้อมูลในไฟล์ความแปรปรวนทางเวลาของเฟรมประกอบด้วย ลำดับของเฟรม (Frame number) เครื่องหมายแสดงการสูญเสียของเฟรม (Loss flag) เวลาหน่วงจากต้นทางถึงปลายทาง (End-to-end delay) ระยะห่างของเวลาระหว่างเฟรมทางฝั่งส่ง (Sender inter-frame lag) ระยะห่างของเวลาระหว่างเฟรมทางฝั่งรับ (Receiver inter-frame lag) และความแปรปรวนของเวลาสะสม (Cumulative jitter) สมการที่ใช้ในการหา Inter-frame แสดงดังสมการที่ (2-5) และสมการที่ (2-6) ใช้ในการหาความแปรปรวนทางเวลาของเฟรม แสดงตัวอย่างไฟล์ความแปรปรวนทางเวลาของเฟรมดังตารางที่ 2-6

$$\text{Inter-frame time} \quad it_{F_o} = 0 \quad (2-5)$$

$$it_{F_m} = t_{F_m} - t_{F_{m-1}}$$

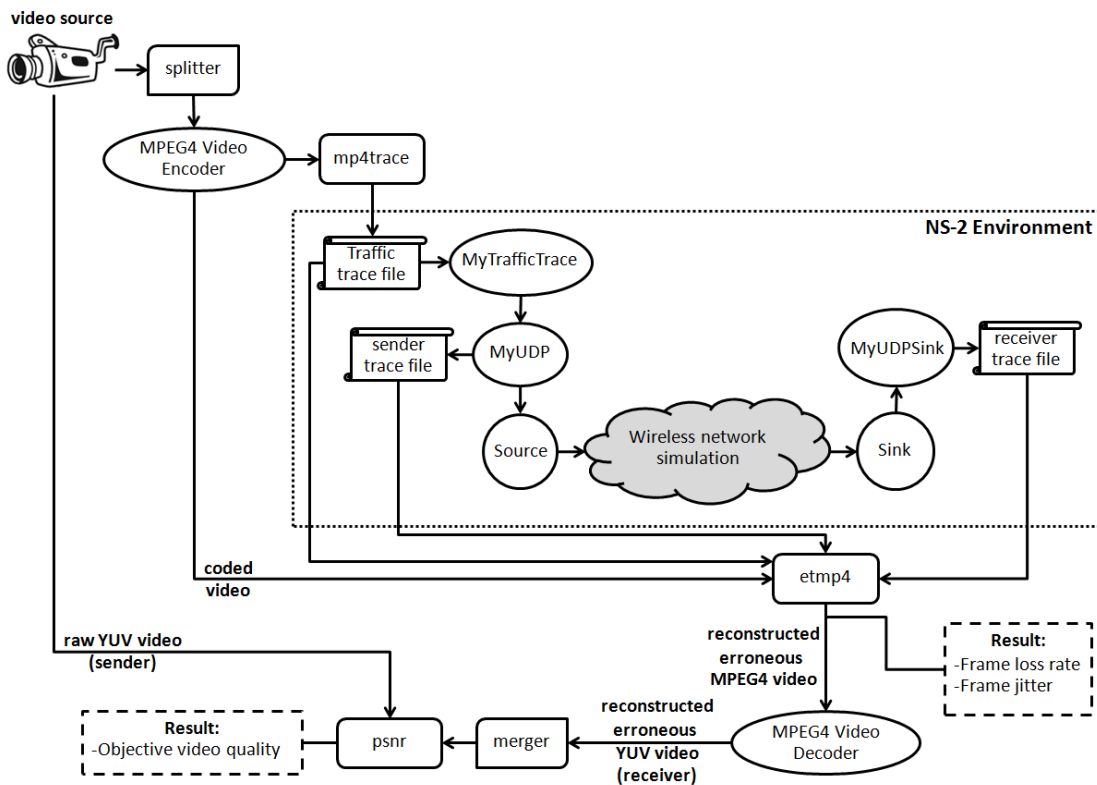
โดย  $t_{F_m}$  คือ เวลาที่ส่วนย่อยสุดท้ายของเฟรมลำดับที่  $m$

$$\text{Frame jitter} \quad j_F = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (it_t - \bar{it}_K)^2 \quad (2-6)$$

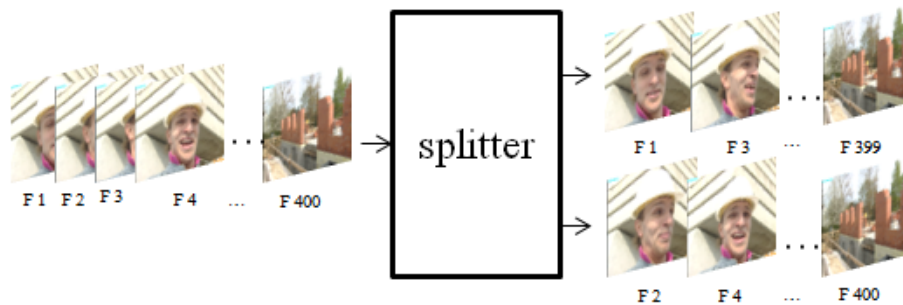
โดย  $K$  คือ จำนวนของเฟรม

$\bar{it}_K$  คือ ค่าเฉลี่ยของระยะห่างของเวลาระหว่างเฟรม

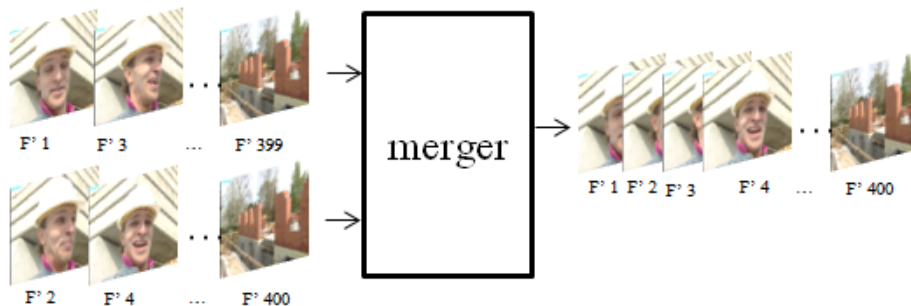
เครื่องมือประเมินคุณภาพ PSNR ของวิดีโอเป็นการประเมินความแตกต่างระหว่างข้อมูลวิดีโอต้นฉบับและวิดีโอที่อาจจะมีข้อผิดพลาดเนื่องจากการส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย



ภาพประกอบที่ 2-6 โครงสร้างการใช้งาน EvalVid ร่วมกับ NS-2 [35]



ภาพประกอบที่ 2-7 ตัวอย่างการแยกข้อมูลวิดีโอจากแหล่งข้อมูลวิดีโอออกเป็น 2 ส่วนย่อย



ภาพประกอบที่ 2-8 ตัวอย่างการรวมข้อมูลวิดีโอจาก 2 ส่วนย่อยเข้าด้วยกัน

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างของไฟล์ Traffic trace

Frame number	Frame type	Frame size (bytes)	Number of UDP-packets	Sender time (sec)
1	I	1696	19	0.04
2	P	84	1	0.16
3	B	56	1	0.16
4	B	58	1	0.16
5	P	162	2	0.28

ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างไฟล์ Sender trace

Time stamp (sec)	Packet ID	Packet Type	Payload Size (bytes)
200.04	1	udp	92
200.04	2	udp	92
200.04	3	udp	92
200.04	4	udp	92
200.04	5	udp	92

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างไฟล์ Receiver trace

Time stamp (sec)	Packet ID	Packet Type	Payload Size (bytes)
200.074763	1	udp	112
200.083723	2	udp	112
200.090764	3	udp	112
200.097805	4	udp	112
200.105166	5	udp	112

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างไฟล์ Frame loss rate

I frame loss (%)	P frame loss (%)	B frame loss (%)	Overall frame loss (%)
5.88	1.49	0	1

ตารางที่ 2-6 ตัวอย่างไฟล์ Frame jitter

Frame number	Loss flag	End-to-end delay (s)	Sender inter-frame lag (s)	Receiver inter-frame lag (s)	Cumulative jitter (s)
0	0	0.149914	0	0	0
1	0	0.034779	0.12	0.004865	-0.115135
2	0	0.040668	0	0.005889	-0.109246
3	0	0.04662	0	0.005952	-0.103294
4	0	0.032779	0.12	0.106159	-0.117135

## 2.5 แบบจำลองประกอบการจำลองการทำงาน

จากประเด็นวิจัยตามวัตถุประสงค์ของโครงการ การจำลองการทำงานจำเป็นต้องเพิ่ม 2 แบบจำลอง ดังต่อไปนี้

### 2.5.1 แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ Two-ray ground reflection

ระบบเครือข่ายไร้สายใช้คลื่นสัญญาณวิทยุในการสื่อสารข้อมูล การส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางทำได้โดยการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุ ในระบบสื่อสารไร้สายมีแบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ ซึ่งถูกนำมาใช้ทำนายความแรงของสัญญาณที่โหนดได้รับ แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่พิจารณา ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ Two-ray ground reflection

แบบจำลอง Two-ray ground reflection เป็นแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุแบบ Large-scale สำหรับแบบจำลองนี้ค่าความแรงของสัญญาณที่โหนดรับได้จะขึ้นตรงต่อระยะทาง ความแรงของสัญญาณที่รับได้ไม่ได้ถูกพิจารณาจากสัญญาณที่ถูกส่งจากโหนดฝ่ายส่งไปยังโหนดฝ่ายรับได้โดยตรง (Line-of-sight) อย่างเดียว แต่ความแรงของสัญญาณที่รับได้เกิดจากผลรวมของสัญญาณที่ส่งตรงมายังตัวรับสัญญาณ โดยตรง และสัญญาณที่สะท้อนพื้นโลกมายังตัวรับ (Ground reflection) แสดงการคำนวณดังสมการที่ (2-7)

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (2-7)$$

โดย  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างเสาอากาศฝั่งรับและฝั่งส่งในหน่วยเมตร

$P_r(d)$  คือ ความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะทาง  $d$  ในหน่วยวัตต์

$P_t$  คือ กำลังส่งในหน่วยวัตต์

$G_t$	คือ	อัตราขยายของเสาอากาศฝั่งส่งในหน่วย dB, dBi, dBd
$G_r$	คือ	อัตราขยายของเสาอากาศฝั่งรับในหน่วย dB, dBi, dBd
$h_t$	คือ	ความสูงของเสาอากาศฝั่งส่งในหน่วยเมตร
$h_r$	คือ	ความสูงของเสาอากาศฝั่งรับในหน่วยเมตร
$L$	คือ	การสูญเสียของระบบ ซึ่ง $L \geq 1$

### 2.5.2 แบบจำลองพลังงาน (Energy model)

แบบจำลองพลังงาน (Energy model) แสดงถึงระดับการใช้พลังงานของโหนดที่ใช้ในการทำกิจกรรมการติดต่อสื่อสาร ทุกโหนดในเครือข่ายจะถูกกำหนดพลังงานเริ่มต้นผ่านตัวแปร `initialEnergy_` เมื่อเริ่มจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย ทุกกิจกรรมการติดต่อสื่อสารของโหนดจะเริ่มขึ้น พลังงานที่กำหนดไว้ตอนเริ่มต้นก็จะถูกใช้ไป เราสามารถกำหนดค่าพลังงานที่ใช้ในการทำกิจกรรมการติดต่อสื่อสารของโหนดได้ โดยกำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูลสามารถกำหนดได้ผ่านทางตัวแปร `txPower` และกำลังที่ใช้ในการรับข้อมูลสามารถกำหนดได้ผ่านทางตัวแปร `rxPower` นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดค่าการใช้พลังงานเมื่อโหนดอยู่นิ่งเฉย (Idle power) ได้อีกด้วย ซึ่งค่านี้สามารถกำหนดผ่านทางตัวแปร `Idlepower`

การคำนวณพลังงานที่ใช้ไปเมื่อมีการส่งข้อมูลจะเท่ากับ `txPower * transmission time` โดย `transmission time` คือเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล เมื่อมีการรับข้อมูลจะเท่ากับ `rxPower * receiving time` โดย `receiving time` คือเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูล และเมื่อออกจากโหมด IDLE จะเท่ากับ `IdlePower * idle time` โดย `idle time` คือเวลาที่อยู่ในสถานะนิ่งเฉย

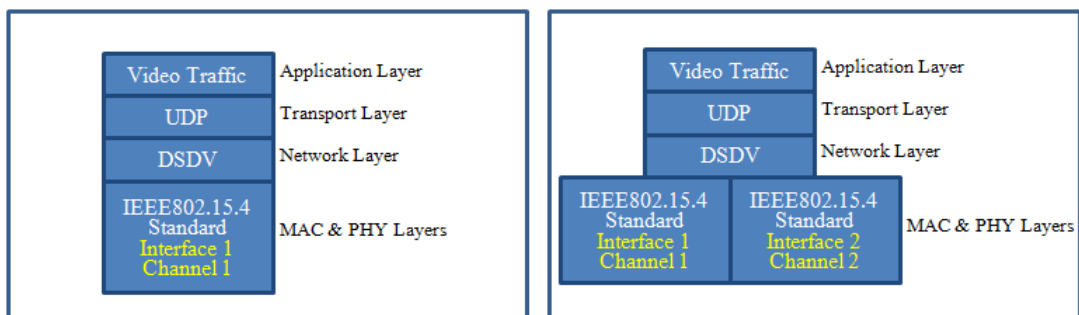
### บทที่ 3

#### การศึกษาผลกระทบจากการส่งวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4

บทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาสมรรถนะการส่งข้อมูลวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยให้แต่ละโหนดมี 2 Interfaces และพัฒนาการจัดสรรช่องสัญญาณในแต่ละเส้นทางการติดต่อสื่อสาร เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นภายในช่องสัญญาณ ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรโตคอล DSDV ให้รองรับการทำงานดังที่กล่าวมา และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลที่นำเสนอกับโปรโตคอล DSDV ดั้งเดิม

#### 3.1 โหนดแบบ 2 ช่องสัญญาณและ 2 อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (2-channel 2-interface: 2C2I)

โหนดแบบ 2 ช่องสัญญาณและ 2 อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (2-channel 2-interface: 2C2I) ในงานวิจัยนี้เหมือนกับในบทความ [26] แต่ละโหนดประกอบด้วย 2 Interfaces คือ Interface number 1 ( $If_1$ ) และ Interface number 2 ( $If_2$ ) และมีการใช้งาน 2 ช่องสัญญาณวิทยุ คือ Channel number 1 ( $Ch_1$ ) และ Channel number 2 ( $Ch_2$ ) โดยกำหนดให้  $If_1$  และ  $If_2$  ในแต่ละโหนดใช้  $Ch_1$  และ  $Ch_2$  ตามลำดับ ความแตกต่างของลำดับชั้นของโปรโตคอลในโหนดแบบ Single-channel single-interface (SCSI) ดั้งเดิม และโหนดแบบ 2C2I แสดงดังภาพประกอบที่ 3-1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าชั้นประยุกต์ ชั้นถ่ายทอด และชั้นเครือข่าย ของทั้งสองแผนการไม่ได้แตกต่างกัน มีเพียงชั้นควบคุมการใช้สื่อ และชั้นกายภาพเท่านั้นที่แตกต่างกัน



ก. โหนดแบบ SCSI

ข. โหนดแบบ 2C2I

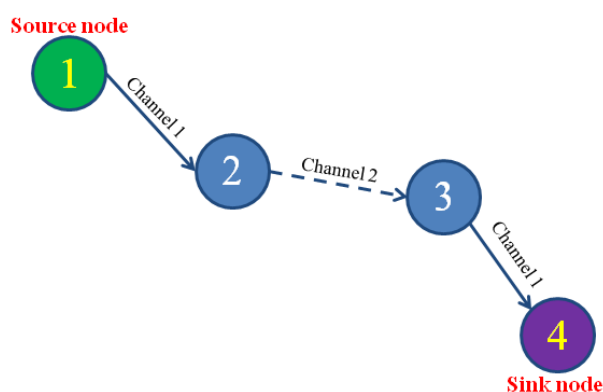
ภาพประกอบที่ 3-1 ความแตกต่างของชั้นโปรโตคอลระหว่างโหนดแบบ SCSI และ 2C2I

### 3.2 การพัฒนาโปรโตคอล DSDV สำหรับโหนดแบบ 2C2I (2C2I DSDV)

โปรโตคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV จะมีการกระจายตารางเส้นทางของตนเองให้กับโหนดข้างเคียงอย่างสม่ำเสมอ สำหรับโหนดที่มีโครงสร้างแบบ 2C2I โหนดมีการกระจายตารางเส้นทางของตนเองออกไปทั้งสองช่องสัญญาณพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้จะเรียกโปรโตคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV สำหรับโหนดแบบ 2C2I ว่าโปรโตคอล 2C2I DSDV

### 3.3 กำหนดการช่องสัญญาณ (Channel scheduling)

โปรโตคอล 2C2I DSDV ใช้งานแผนกำหนดการช่องสัญญาณ (Channel scheduling) เช่นเดียวกับในบทความ [26] เพื่อให้โหนดสามารถส่งและรับข้อมูลได้พร้อมกัน กำหนดการช่องสัญญาณที่ว่าจะทำโดยโหนดที่ได้รับข้อมูล โดยเริ่มจากการตรวจสอบว่าได้รับช่องสัญญาณที่ได้รับข้อมูล ( $Ch_{in}$ ) คือ  $Ch_0$  หรือ  $Ch_1$  หลังจากตรวจสอบเรียบร้อยแล้วก็จะทำการส่งข้อมูลนั้นออกไปอีกช่องสัญญาณหนึ่ง ( $Ch_{out}$ ) นอกจากนี้กำหนดให้โหนดต้นทางเริ่มส่งข้อมูลออกทาง  $Ch_0$  เท่านั้น การจัดการช่องสัญญาณแบบนี้ยังส่งผลให้ช่องสัญญาณที่มีอยู่ถูกกระจายการใช้งานเท่ากันทั่วทั้งเครือข่ายอีกด้วย แสดงตัวอย่างการส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอล 2C2I DSDV ได้ดังภาพประกอบที่ 3-2 โดยโหนดต้นทางหมายเลข 1 จะทำการส่งข้อมูลผ่านโหนดหมายเลข 2 และ 3 ไปให้กับโหนดปลายทางหมายเลข 4 ตามลำดับ โหนดต้นทางจะส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณหมายเลข 1 ไปให้กับโหนดหมายเลข 2 เมื่อโหนดหมายเลข 2 ได้รับข้อมูลจากโหนดหมายเลข 1 ผ่านทางช่องสัญญาณหมายเลข 1 โหนดหมายเลข 2 จะใช้ช่องสัญญาณหมายเลข 2 ในการส่งข้อมูลต่อไปยังโหนดหมายเลข 3 เมื่อโหนดหมายเลข 3 ได้รับข้อมูลจากโหนดหมายเลข 2 ผ่านทางช่องสัญญาณหมายเลข 2 โหนดหมายเลข 3 จะใช้ช่องสัญญาณหมายเลข 1 ในการส่งข้อมูลต่อไปยังโหนดปลายทางหมายเลข 4



ภาพประกอบที่ 3-2 ตัวอย่างการใช้โปรโตคอล 2C2I DSDV ในการขนส่งข้อมูล

### 3.4 วัตถุประสงค์การทดลอง

การศึกษาศมรรถนะของการส่งวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายไร้สายแบบหลายทอด ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะทางด้านเครือข่าย และคุณภาพของวิดีโอ ระหว่างโพรโทคอล 2C2I DSDV และโพรโทคอล DSDV ที่ถูกใช้บนโหนดแบบ SCSI ดังเดิม

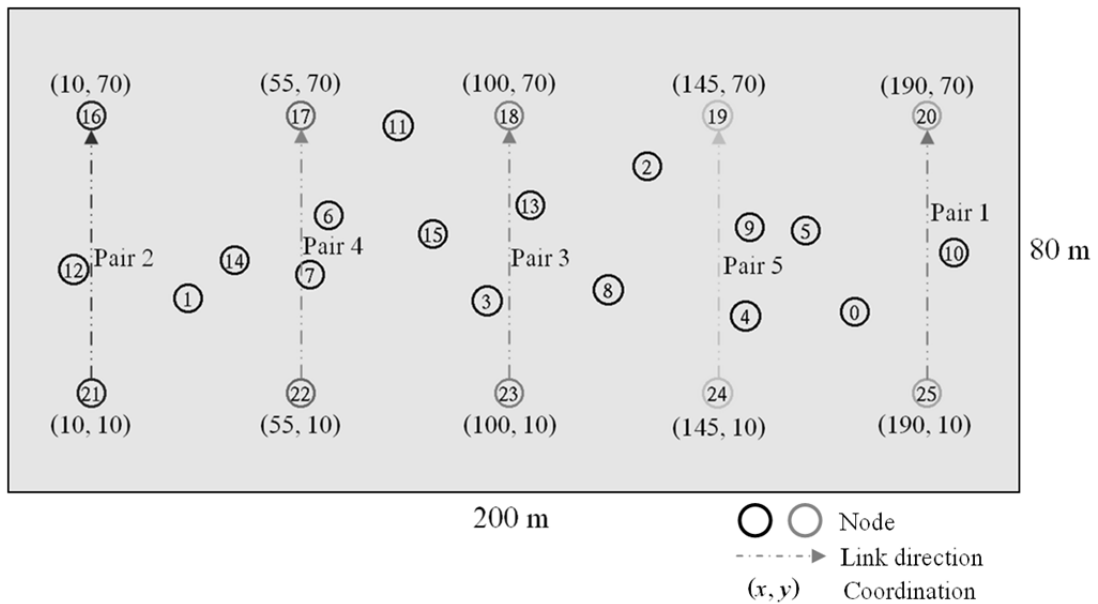
### 3.5 การออกแบบการทดลอง

โพรโทคอล 2C2I DSDV ถูกพัฒนาและนำไปใช้บนโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 เวอร์ชัน 2.34 ซึ่งขยายให้รองรับการทำงานแบบ MCMC [37] โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับโพรโทคอล DSDV ซึ่งใช้บนโหนดแบบ SCSI ดังเดิม EvalVid ถูกใช้ในการประเมินและวิเคราะห์คุณภาพของวิดีโอที่ทำการจำลองการส่งบน NS-2 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองของแต่ละตัววัดสมรรถนะได้มาจากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ยิ่งกว่านั้นแต่ละผลการทดลองเฉลี่ยถูกแสดงด้วย 95% Confident interval (c.i.)

วิดีโอที่ใช้ในการทดลองนี้มีชื่อว่า Foreman ก่อนเข้ากระบวนการบีบอัดวิดีโอ วิดีโอ Foreman อยู่ในรูปแบบ YUV ประกอบด้วยเฟรมทั้งหมด 300 เฟรม แต่ละเฟรมมีความละเอียด 352x288 จุดภาพ วิดีโอนี้มีอัตราการแสดงเฟรมอยู่ที่ 30 เฟรมต่อวินาที (frame per second: fps) วิดีโอ Foreman นี้ได้รับการบีบอัดวิดีโอเป็นรูปแบบ MPEG4 ด้วยอัตราบิต (Bit rate) 64000 บิตต่อวินาที (bit per second: bps)

แผนการทดลองแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-3 มีโหนดทั้งหมด 26 โหนด วางอยู่ในพื้นที่ขนาด 200x80 ตารางเมตร ( $m^2$ ) ประกอบด้วยโหนดต้นทางจำนวน 5 โหนด โหนดปลายทางจำนวน 5 โหนด และโหนดซึ่งอยู่ระหว่างกลาง (Intermediate node) จำนวน 16 โหนด จำนวนของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 คู่ (pair) ในแต่ละการทดลอง กำหนดให้ตำแหน่ง  $(x, y)$  หมายถึงตำแหน่งของโหนด โดยทั้ง  $x$  และ  $y$  มีหน่วยเป็นเมตร ตำแหน่งของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางตั้งแต่คู่ที่ 1 ถึง 5 คือ  $[(190, 10), (190, 70)]$ ,  $[(10, 10), (10, 70)]$ ,  $[(100, 10), (100, 70)]$ ,  $[(55, 10), (55, 70)]$  และ  $[(145, 10), (145, 70)]$  ตามลำดับ ซึ่งการจัดลำดับคู่ส่ง-รับข้อมูลแบบนี้ทำให้เครือข่ายมีความหนาแน่นของข้อมูลเพิ่มขึ้นตามลำดับ สำหรับโหนดซึ่งอยู่ระหว่างกลางจะถูกสุ่มตำแหน่งการวางโดยใช้ Uniformly distributed ทุกโหนดมีระยะของสัญญาณวิทยุ (radio range) 40 เมตร ดังนั้นจำนวนฮอปเฉลี่ยในแต่ละเส้นทางเท่ากับ 2 ทอด การทดลองนี้ใช้โมเดลสัญญาณวิทยุแบบ Two-ray ground แต่ละโหนดจะมีการกระจายตารางเส้นทางของตนเองทุก 15 วินาที





ภาพประกอบที่ 3-3 แผนการทดลอง

### 3.6 ตัววัดสมรรถนะ

ตัววัดสมรรถนะของการทดลองนี้ประกอบด้วย 2 ตัวชี้วัดสมรรถนะ คือ จำนวนของกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกละทิ้ง (Number of video packet dorps) ซึ่งใช้ในการวัดสมรรถนะของเครือข่าย และ PSNR ซึ่งใช้ในการวัดสมรรถนะทางด้านคุณภาพของวิดีโอ นอกจากการละทิ้งกลุ่มข้อมูลด้วย 4 ตัวบ่งชี้ใน NS-2 ซึ่งเกิดขึ้นในการทดลองนี้ คือ LQI NOT DUP และ CBK จะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์สาเหตุเชิงลึกของการละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอ

การละทิ้งข้อมูลด้วยตัวบ่งชี้ LQI แสดงว่าโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูลทำการละทิ้งกลุ่มข้อมูลเพราะความแรงสัญญาณของข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ Signal to noise ratio (SNR) ต่ำกว่า 10 dB

การละทิ้งข้อมูลด้วยตัวบ่งชี้ NOT เกิดขึ้นเมื่อโหนดได้รับหลายกลุ่มข้อมูลพร้อมกัน โดยกลุ่มข้อมูลที่ไม่ได้มีกำลังรับสูงที่สุดจะถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ NOT

การละทิ้งกลุ่มข้อมูลด้วยตัวบ่งชี้ DUP เกิดขึ้นเมื่อโหนดได้รับกลุ่มข้อมูลเดียวกันซ้ำ หนึ่งกลุ่มข้อมูลจะถูกนำไปประมวลผล ส่วนกลุ่มข้อมูลอื่นจะถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ DUP

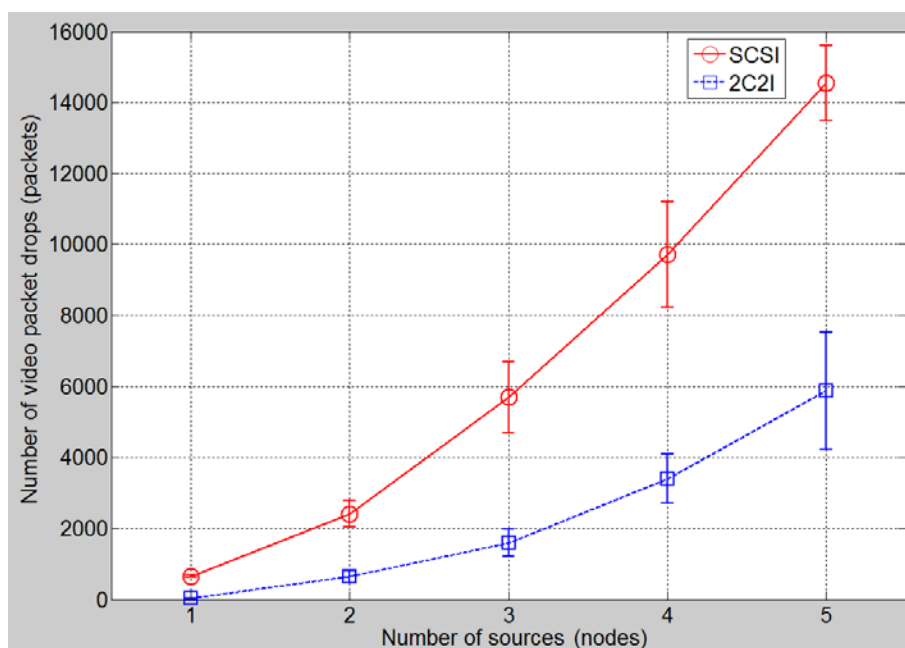
สุดท้ายการละทิ้งกลุ่มข้อมูลด้วยตัวบ่งชี้ CBK บ่งบอกว่ากลุ่มข้อมูลถูกละทิ้งที่โหนดเนื่องจากชั้นควบคุมการใช้สื่อไม่สามารถส่งกลุ่มข้อมูลได้สำเร็จ ซึ่งมี 2 สาเหตุ คือ อันดับแรกไม่สามารถส่งกลุ่มข้อมูลได้เนื่องจากช่องสัญญาณไม่ว่าง อันดับที่สองคือพยายามที่จะส่งกลุ่มข้อมูลเดิมซ้ำจำนวน 3 ครั้งแต่ไม่ได้รับการตอบกลับจากโหนดรับข้อมูล

### 3.7 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

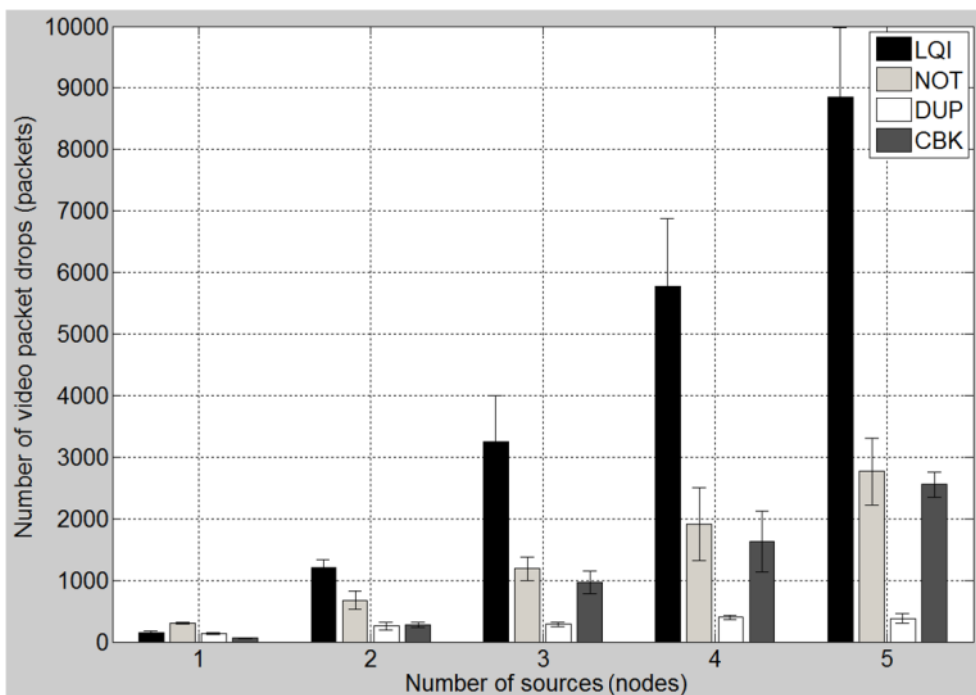
ภาพประกอบที่ 3-4 แสดงผลการจำลองของการละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของแหล่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 โหนด เนื่องจากจำนวนของแหล่งข้อมูลวิดีโอที่มากขึ้นเพิ่มข้อมูลวิดีโอในเครือข่ายให้มากขึ้น ในขณะที่จำนวนช่องสัญญาณและจำนวนของ Interface มีจำนวนจำกัด จำนวนการละทิ้งที่สูงของกลุ่มข้อมูลวิดีโอจึงเกิดขึ้น ภาพประกอบที่ 3-4 ยังแสดงให้เห็นอีกว่ากรณี 2C2I เกิดการละทิ้งของกลุ่มข้อมูลน้อยกว่าในกรณี SCSI ผลการทดลองนี้ช่วยยืนยันว่าการเพิ่มจำนวนของช่องสัญญาณและจำนวนของ Interface สามารถเพิ่มความของเครือข่ายไร้สาย

ภาพประกอบที่ 3-5 และภาพประกอบที่ 3-6 แสดงให้เห็นว่าการละทิ้งกลุ่มข้อมูลด้วยตัวบ่งชี้ LQI เกิดขึ้นสูงที่สุดทั้งในกรณี SCSI และ 2C2I ถัดมาเป็นการละทิ้งกลุ่มข้อมูลด้วยตัวบ่งชี้ NOT และ CBK ยิ่งกว่านั้นแผนการ SCSI เกิดการละทิ้งของกลุ่มข้อมูลสูงกว่าแผนการ 2C2I ประมาณสองเท่าโดยประมาณในทุกตัวบ่งชี้

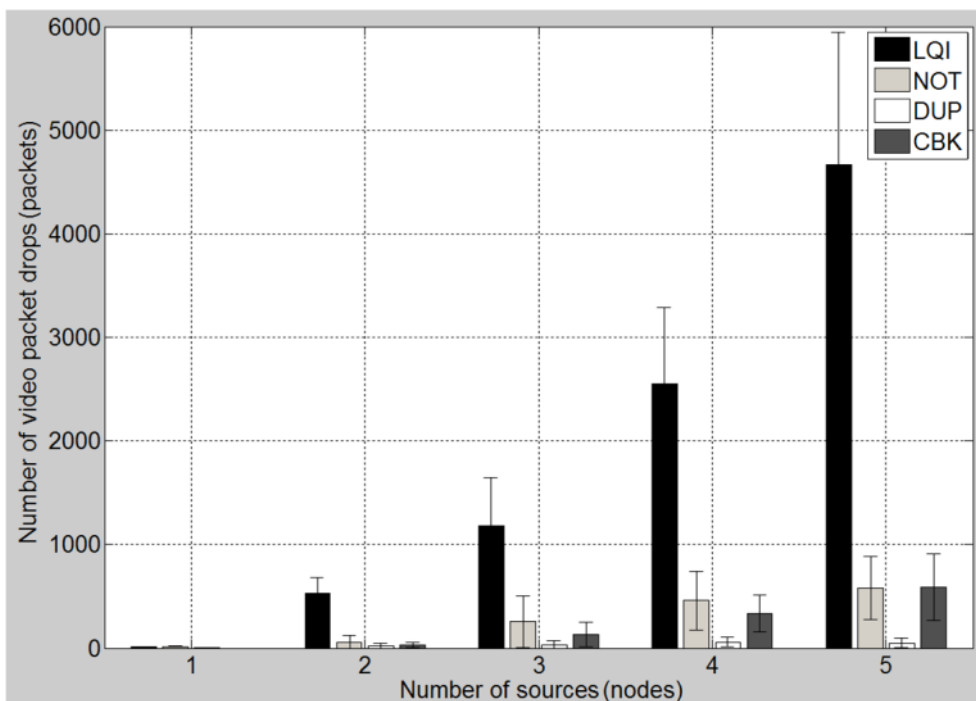
ตารางที่ 3-1 แสดงค่าเฉลี่ย PSNR ของทั้งสองแผนการ ในแผนการ SCSI ซึ่งเป็นแผนการดั้งเดิม ไม่สามารถที่จะสนับสนุน MPEG4 ที่มีการเข้ารหัสที่ 64000 บิตต่อวินาที มีเพียงกรณีที่ตั้งข้อมูลวิดีโอเพียงแหล่งข้อมูลเดียวในแผนการ 2C2I เท่านั้นที่มีสมรรถนะของ PSNR สูงกว่า 25 dB เมื่อมีแหล่งข้อมูลวิดีโอมากกว่าหนึ่งแหล่งข้อมูล แผนการ 2C2I ยังคงเกิดการสูญเสียของเฟรมสูงเพราะการละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่สูงดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-4



ภาพประกอบที่ 3-4 จำนวนของกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกละทิ้ง



ภาพประกอบที่ 3-5 สาเหตุของการละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอในกรณี SCSI



ภาพประกอบที่ 3-6 สาเหตุของการการละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอในกรณี 2C2I

ตารางที่ 3-1 ค่าเฉลี่ยของ PSNR

Number of sources	PSNR (dB)			
	SCSI DSDV scheme		2C2I DSDV scheme	
	Mean	95% c.i.	Mean	95% c.i.
1	12.52	(11.80, 13.24)	27.51	(27.51, 27.51)
2	11.87	(11.76, 11.91)	21.01	(19.50, 22.52)
3	11.33	(9.83, 12.83)	18.52	(17.71, 19.94)
4	10.61	(9.18, 12.02)	16.00	(14.89, 17.12)
5	9.71	(9.54, 9.88)	10.85	(9.54, 12.17)

### 3.8 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้แสดงปัญหาการละทิ้งกลุ่มข้อมูลซึ่งเกิดมาตั้งแต่ดั้งเดิมจากการส่งข้อมูลวิดีโอ MPEG4 บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 การละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่เกิดขึ้นสูงในเครือข่ายจะลดคุณภาพของวิดีโอที่โหนดปลายทางได้รับ การใช้แผนการ 2C2I ยังคงให้คุณภาพของวิดีโอที่แย่เมื่อมีการส่งข้อมูลจากหลายๆ แหล่งข้อมูลพร้อมๆ กัน การละทิ้งกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่เกิดขึ้นเยอะที่สุดเกิดขึ้นเพราะความแรงของสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนของกลุ่มข้อมูลมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามแผนการ 2C2I สามารถรองรับการส่งข้อมูลวิดีโอจากแหล่งข้อมูลเดียวเท่านั้น

## บทที่ 4

### การศึกษาการทำงานประสานกันระหว่างโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV และการจัดสรรช่องสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ

บทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาการทำงานประสานกันระหว่างโพรโทคอล DSDV กับ การจัดสรรช่องสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นภายใน ช่องสัญญาณ เครื่องข่ายในหลายรูปแบบถูกใช้เพื่อศึกษาสมรรถนะของโพรโทคอลที่ได้นำเสนอ นอกจากนี้ยังได้พัฒนาและทดสอบแผนการลดสัญญาณแทรกสอดให้ดีขึ้นอีกด้วย

#### 4.1 การศึกษาสมรรถนะการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายแบบหลายช่องสัญญาณ

การทดลองนี้เป็นการประเมินสมรรถนะของการส่งวิดีโอแบบ MPEG4 บน เครือข่ายไร้สายแบบหลายทอดที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยทำการศึกษาสมรรถนะของโพรโทคอล DSDV ที่ได้ทำการพัฒนาให้รองรับการทำงานของโหนดที่มีการใช้งาน 16 ช่องสัญญาณ และ 3 อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (16-channel 3-interface: 16C3I) บนสถานะเครือข่ายที่แตกต่างกัน โดยได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะทั้งทางด้านสมรรถนะของเครือข่าย และสมรรถนะทางด้านคุณภาพวิดีโอ

##### 4.1.1 โหนดแบบ 16 ช่องสัญญาณและ 3 อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (16-channel 3-interface: 16C3I)

โหนดแบบ 16C3I ในงานวิจัยนี้ใช้แผนการ HIA พร้อมด้วยการใช้งาน Common control interface ดังนั้นแต่ละโหนดในเครือข่ายจะสามารถใช้งานช่องสัญญาณได้ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ โดยหนึ่งใน 16 ช่องสัญญาณที่มีอยู่จะถูกใช้เป็นช่องสัญญาณควบคุม (Common control channel:  $Ch_0$ ) ซึ่งช่องสัญญาณควบคุมนี้จะถูกใช้โดยทุกๆ โหนดในเครือข่าย ส่วน 15 ช่องสัญญาณที่เหลือจะถูกใช้เป็นช่องสัญญาณสำหรับการส่ง-รับข้อมูล (Data channel) นอกจากนี้แต่ละโหนดจะประกอบด้วย 3 interfaces หนึ่งใน 3 Interfaces จะใช้ช่องสัญญาณ  $Ch_0$  ซึ่งจะเรียก Interface นี้ว่า Control interface ( $If_0$ ) ซึ่ง Interface นี้จะถูกใช้สำหรับการส่งรับข้อมูลเส้นทาง ส่วน 2 Interface ที่เหลือคือ Data interface ซึ่งจะใช้ช่องสัญญาณสำหรับการส่ง-รับข้อมูล แต่ละ Data interface ของโหนดเดียวกันจะใช้งานช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน Data interface ประกอบด้วย Receive interface ( $If_R$ ) และ Transmit interface ( $If_T$ )  $If_R$  จะถูกใช้สำหรับการรับข้อมูล ซึ่ง Interface

นี้จะใช้ Receive channel ( $Ch_R$ ) ในส่วนของ  $If_T$  จะถูกใช้สำหรับการส่งข้อมูล ซึ่ง Interface นี้จะมีการสลับช่องสัญญาณบ่อยๆ

วิธีการ RCA ถูกใช้เพื่อกำหนดกระบวนการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนด โดยเมื่อโหนดต้องการส่งข้อมูลโหนดจะสลับช่องสัญญาณที่  $If_T$  ให้อยู่ให้ตรงกับช่องสัญญาณ  $Ch_R$  ของโหนดที่รับข้อมูล เพื่อให้โหนดสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลและโหนดที่รับข้อมูลใช้ช่องสัญญาณ  $Ch_R$  เดียวกัน โหนดจะใช้  $If_R$  ในการส่งข้อมูลแทน  $If_T$  สำหรับการตอบกลับ ACK จะส่งรับบนช่องสัญญาณเดียวกันกับช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูล

#### 4.1.2 การพัฒนาโปรโตคอล DSDV สำหรับโหนดแบบ 16C3I (16C3I DSDV)

การพัฒนาโปรโตคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV ด้วยการแนบข้อมูลช่องสัญญาณ โดยการเพิ่มฟิลด์ใหม่ลงในตารางเส้นทาง เพื่อใช้ในการรักษาหมายเลขของช่องสัญญาณที่ใช้ในการรับข้อมูลของโหนดปลายทาง ดังนั้นฟิลด์ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลจะถูกเพิ่มลงในตารางเส้นทางและกลุ่มข้อมูลข่าวสารเส้นทาง โดยเรียกโปรโตคอลหลังการพัฒนาว่าโปรโตคอล 16C3I DSDV ในงานวิจัยนี้ขนาดของฟิลด์ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลถูกกำหนดไว้ที่ 4 ไบต์ ความแตกต่างของกลุ่มข้อมูลข่าวสารเส้นทางระหว่างโปรโตคอล DSDV และโปรโตคอล 16C3I DSDV แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 ถ้าจำนวนของข้อมูลโหนดปลายทาง (Route entries) ในกลุ่มข้อมูลข่าวสารเส้นทางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 6 โหนด ขนาดของกลุ่มข้อมูลข่าวสารเส้นทางจะเท่ากับ  $16 \times 6 = 96$  ไบต์ ก่อนรวมส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลจากชั้นเครือข่ายอีก 20 ไบต์ ซึ่งจะน้อยกว่าปริมาณข้อมูลสูงสุดที่สามารถบรรจุได้ใน 1 กลุ่มข้อมูลของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งเท่ากับ 120 ไบต์ ก่อนที่จะมีการเพิ่มส่วนหัวของข้อมูล อย่างไรก็ตามถ้าจำนวนของข้อมูลโหนดปลายทางมากกว่า 6 โหนด กลุ่มข้อมูลข่าวสารเส้นทางจะถูกแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มข้อมูล

Destination Address (4 bytes)	Hop count (4 bytes)	Sequence number (4 bytes)
----------------------------------	------------------------	------------------------------

ก. โปรโตคอล DSDV

Destination Address (4 bytes)	Receive Channel (4 bytes)	Hop count (4 bytes)	Sequence number (4 bytes)
----------------------------------	------------------------------	------------------------	------------------------------

ข. โปรโตคอล 16C3I DSDV

ภาพประกอบที่ 4-1 ความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลข่าวสารเส้นทางของโปรโตคอล DSDV และโปรโตคอล 16C3I DSDV

#### 4.1.3 เทคนิคการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล (Receive channel balancing: RCB)

เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นภายในช่องสัญญาณ เทคนิคการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล (Receive channel balancing: RCB) [8] จึงถูกนำมาใช้ในงานนี้ เทคนิค RCB จะใช้วิธีการกระจายโหนดที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการรับข้อมูลออกเท่ากันทั่วทั้งเครือข่าย ซึ่งแต่ละโหนดจะพิจารณาเลือกช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลจากช่องสัญญาณที่มีโหนดเลือกใช้สำหรับรับข้อมูลน้อยที่สุดภายในระยะทาง 2 ทอด และถ้าเป็นไปได้โหนดจะหลีกเลี่ยงการเลือกช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่มีโหนดภายในระยะทาง 1 ทอดเลือกใช้สำหรับรับข้อมูลอยู่ เนื่องจากช่องสัญญาณเหล่านั้นอาจกำลังถูกใช้โดย  $If_T$  ดังนั้น 2 Data interfaces ( $If_T$  และ  $If_R$ ) จะใช้งานช่องสัญญาณเดียวกัน สิ่งนี้ส่งผลให้ 2 Data interfaces ครอบคลุมซึ่งกันและกัน สามารถแสดงอัลกอริทึมสำหรับการพิจารณาช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลได้ดังอัลกอริทึมที่ 4-1 จากอัลกอริทึมเห็นได้ว่า  $S_2$  ถูกใช้ในการหลีกเลี่ยงไม่ให้สองโหนดที่อยู่ติดกันใช้ช่องสัญญาณเดียวกันสำหรับรับข้อมูล นอกจากนี้ยังได้ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นมาช่วยไม่ให้ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลถูกเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ

**อัลกอริทึมที่ 4-1** เทคนิค RCB [8] พิจารณาเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดก่อนการกระจายตารางเส้นทาง ตัวแปร  $N_k$  หมายถึงจำนวนของโหนดภายในระยะทาง 2 ทอดของโหนด  $i$  ที่ใช้ช่องสัญญาณ  $Ch_k$  เป็นช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล โดย  $Ch_k \neq Ch_0$  ตัวแปร  $N_{avg}$  หมายถึงจำนวนเฉลี่ยของโหนดต่อ 1 ช่องสัญญาณ ตัวแปร  $p$  หมายถึงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนช่องสัญญาณ โดย  $p = (N_k - N_{avg}) / N_k$  ตัวแปร  $S_1$  หมายถึงกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีการใช้งานน้อยกว่า  $N_{avg}$  และ  $S_2$  หมายถึงกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีการใช้งานน้อยกว่า  $N_{avg}$  แต่ไม่รวมกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีโหนดภายในระยะทาง 1 ทอดของโหนด  $i$  ใช้สำหรับรับข้อมูล

- 
- 1:   **if** ( $N_k \geq N_{avg}$ ) **then**
  - 2:       **if** ( $S_2 \neq \text{NULL}$ ) **then**
  - 3:           switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_2$  with  $p$
  - 4:       **Else**
  - 5:           switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_1$  with  $p$
  - 6:       **end if**
  - 7:   **end if**
-

#### 4.1.4 วัตถุประสงค์การทดลอง

การศึกษาสมรรถนะของการส่งวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายไร้สายแบบหลายทอด โดยใช้โพรโทคอล 16C3I DSDV และมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งได้ทำการศึกษาสมรรถนะบนสถานะเครือข่ายที่แตกต่างกัน ได้ทำการศึกษาทั้งทางด้านสมรรถนะของเครือข่าย และสมรรถนะทางด้านคุณภาพวิดีโอ

#### 4.1.5 การออกแบบการทดลอง

โปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 เวอร์ชัน 2.34 ด้วยการขยายให้รองรับการทำงานแบบ MCMI [37] ถูกใช้ในการทดลอง แผนการ 16C3I DSDV ที่นำเสนอถูกใช้ในการทดลอง EvalVid ถูกใช้ในการประเมินและวิเคราะห์คุณภาพของวิดีโอที่ทำการจำลองการส่งบน NS-2 แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4-2 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองของแต่ละตัววัดได้มาจากการทดลองซ้ำ 50 ครั้ง ยิ่งกว่านั้นแต่ละผลการทดลองเฉลี่ยถูกแสดงด้วย 95% c.i.

วิดีโอที่ใช้ในการทดลองนี้มีชื่อว่า Foreman [38] ก่อนเข้ากระบวนการบีบอัดวิดีโอวิดีโอ Foreman อยู่ในรูปแบบ YUV ประกอบด้วยเฟรมทั้งหมด 400 เฟรม แต่ละเฟรมมีความละเอียด 176x144 จุดภาพ วิดีโอนี้มีอัตราการแสดงเฟรมอยู่ที่ 25 เฟรมต่อวินาที วิดีโอ Foreman YUV นี้ได้รับการบีบอัดวิดีโอเป็นรูปแบบ MPEG4 ที่อัตราบิต 64000 บิตต่อวินาที ด้วยโปรแกรม X264 [38] กำหนดให้ MPEG4 ที่เข้ารหัสอยู่ในรูปแบบเฟรม IPBBPBBPBBPB และมี GOP เท่ากับ 12 [38] แต่ละเฟรมของ MPEG4 จะถูกแบ่งออกเป็น 92 ไบต์ ต่อกลุ่มข้อมูล ก่อนการเพิ่ม Overhead ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ดังนั้นวิดีโอ Foreman MPEG4 จะถูกแบ่งออกเป็น 1095 กลุ่มข้อมูล ก่อนการส่งบนเครือข่าย IEEE 802.15.4 ยิ่งกว่านั้น Foreman MPEG4 จะถูกส่งติดต่อกัน 5 ครั้งในแต่ละแหล่งข้อมูล การจำลองการทำงานจะถูกหยุดเมื่อทุกกลุ่มข้อมูลวิดีโอถูกส่งเสร็จสิ้น กำหนดให้ขนาดของ Buffer ในแต่ละโหนดใหญ่มาก

ในการทดลองนี้ประกอบด้วยโหนดทั้งหมด 50 โหนด วางอยู่ในพื้นที่ขนาด 120x120 ตารางเมตร ( $m^2$ ) ทุกโหนดมีระยะของสัญญาณวิทยุ (radio range) 40 เมตร การทดลองนี้ใช้โมเดลสัญญาณวิทยุแบบ Two-ray ground แต่ละโหนดจะมีการกระจายตารางเส้นทางของตนเองทุก 15 วินาที นอกจากนี้เราใช้รายละเอียดอัตราการใช้พลังงานของอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณวิทยุ CC2420 สำหรับการประเมินผลด้านการใช้พลังงาน อัตราการใช้พลังงานคือ 33.46 31.32 และ 0.767 mW สำหรับโหมดรับ โหมดส่ง และโหมดนิ่งเฉย ตามลำดับ [39] พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-1



ในการทดลองนี้เราทำการทดสอบสมรรถนะของแผนการที่นำเสนอใน 3 สถานะเครือข่ายที่แตกต่างกัน คือ Fixed location Random location และ Many-to-one scenario

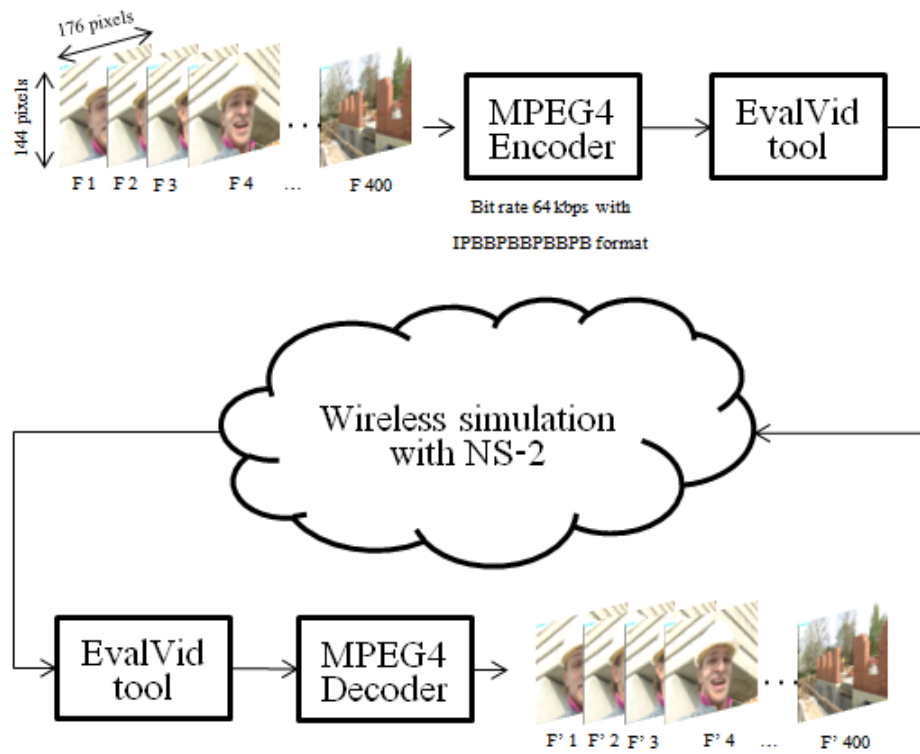
สถานะเครือข่ายแบบ Fixed location จำนวนของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเพิ่มจาก 1 ถึง 5 โหนด กำหนดให้พิกัด  $(x, y)$  หมายถึงตำแหน่งของแต่ละโหนดบนพื้นที่การทดลอง โดย  $x$  และ  $y$  มีหน่วยเป็นเมตร ตำแหน่งของคู่โหนดต้นทาง-โหนดปลายทางคู่แรกคือ  $[(60, 10), (60, 110)]$  พิกัด  $(60, 10)$  คือตำแหน่งของโหนดต้นทาง และพิกัด  $(60, 110)$  คือตำแหน่งของโหนดปลายทาง ตำแหน่งของคู่โหนดต้นทาง-โหนดปลายทางคู่ที่ 2 ถึง 5 คือ  $[(10, 10), (10, 110)]$ ;  $[(110, 10), (110, 110)]$ ;  $[(35, 10), (35, 110)]$  และ  $[(85, 10), (85, 110)]$  ตามลำดับ โหนดที่เหลือจำนวน 40 โหนดจะถูกสุ่มการวางบนพื้นที่การทดลองด้วย Uniformly distributed ตัวอย่างสถานะเครือข่ายแบบ Fixed location แสดงดังภาพประกอบที่ 4-3

สถานะเครือข่ายแบบ Random location จำนวนของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเพิ่มจาก 1 ถึง 5 โหนด ทั้ง 50 โหนดจะถูกสุ่มการวางบนพื้นที่การทดลองด้วย Uniformly distributed ตัวอย่างสถานะเครือข่ายแบบ Random location แสดงดังภาพประกอบที่ 4-4

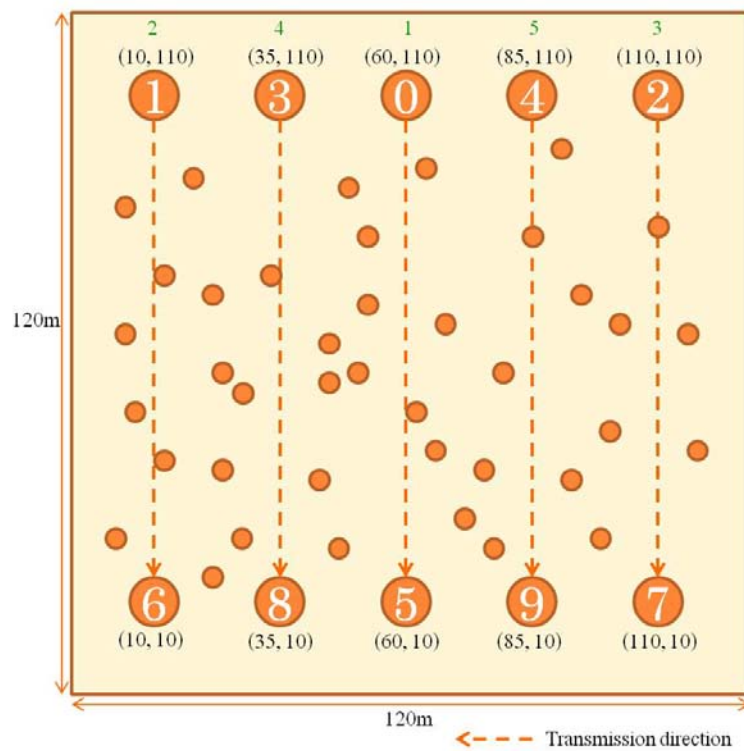
สถานะเครือข่ายแบบ Many-to-one มีเพียงหนึ่งโหนดปลายทางเท่านั้นที่ถูกใช้ในการศึกษา ในขณะที่จำนวนของโหนดต้นทางเพิ่มจาก 1 ถึง 5 โหนด ตำแหน่งของโหนดทั้ง 50 โหนดถูกสุ่มการวางบนพื้นที่การทดลองด้วย Uniformly distributed ตัวอย่างสถานะเครือข่ายแบบ Many-to-one แสดงดังภาพประกอบที่ 4-5

ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

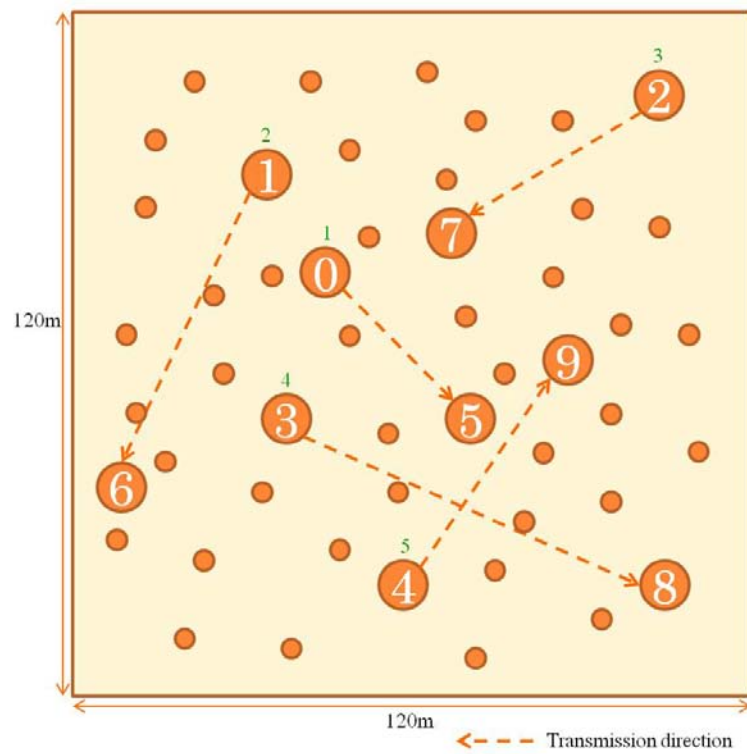
Parameter	Value
Area	120 m by 120 m
No. of nodes	50 nodes
No. of connections	1 to 5 pairs
Radio range	40 m
DSDV update interval	15s
Power consumption	Receive: 35.46 mW Transmit: 31.32 mW Idle: 0.767 mW
Scenario	Fixed location, Random location, Many-to-one



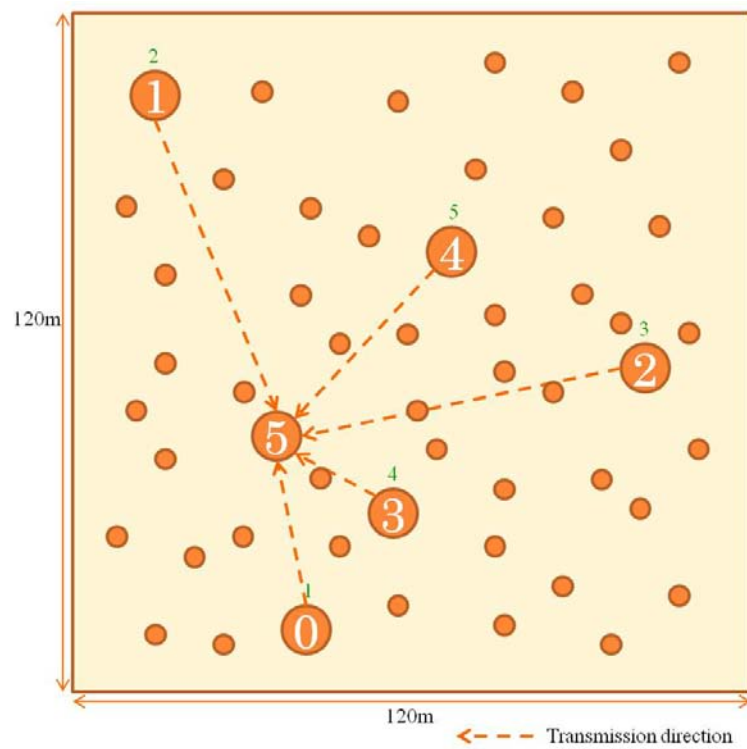
ภาพประกอบที่ 4-2 โครงสร้างระบบที่ใช้ในการทดลอง



ภาพประกอบที่ 4-3 ตัวอย่างสถานะเครือข่ายแบบ Fixed location



ภาพประกอบที่ 4-4 ตัวอย่างสภาวะเครือข่ายแบบ Random location



ภาพประกอบที่ 4-5 ตัวอย่างสภาวะเครือข่ายแบบ Many-to-one

#### 4.1.6 ตัววัดสมรรถนะ

ในการประเมินผลการทดลอง 7 ตัวชี้วัดสมรรถนะถูกใช้ในการทดลองนี้คือ ระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง (Average number of hops between sources and sinks) เวลาที่ใช้ในการขนส่งข้อมูลวิดีโอจากต้นทางไปยังปลายทาง (Average delivery time for all video packets) ปริมาณกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกทิ้งในเครือข่าย (Average number of dropped video packets) สัดส่วนของปริมาณข้อมูลวิดีโอที่ปลายทางรับได้สำเร็จต่อปริมาณข้อมูลที่ส่งจากต้นทาง (PDR) ตัววัดคุณภาพของวิดีโอ PSNR การหน่วงเวลาของเฟรมวิดีโอตลอดเส้นทาง (Average frame end-to-end delay) และการบริโภคพลังงานของเครือข่าย (Average total energy consumption) ผลการบริโภคพลังงานของเครือข่ายจากการทำกิจกรรมการติดต่อสื่อสารต่างๆ ถูกพิจารณาในการทดลองนี้ด้วย โดยการบริโภคพลังงานของเครือข่ายสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มย่อยตามกิจกรรมการติดต่อสื่อสาร คือ การส่ง-รับข้อมูลวิดีโอ การส่ง-รับข้อมูลข่าวสารเส้นทาง การนั่งเฉยของโหนดเพื่อรอการทำกิจกรรม และการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณ (Clear channel assessment: CCA)

#### 4.1.7 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

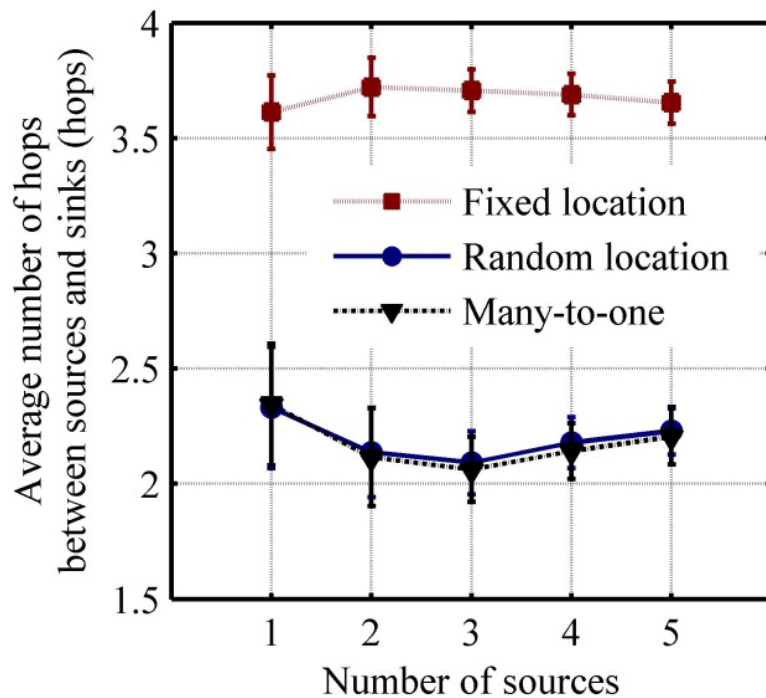
ภาพประกอบที่ 4-6 แสดงให้เห็นว่าสถานะเครือข่ายแบบ Fixed location มีระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางสูงกว่าในกรณี Random location และ Many-to-one ประมาณ 1.5 ทอด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในสถานะเครือข่ายแบบ Fixed location ตำแหน่งของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางอยู่ที่ขอบของเครือข่าย ซึ่งตำแหน่งของโหนดต้นทางอยู่คนละด้านกับตำแหน่งของโหนดปลายทาง ในขณะที่สถานะเครือข่ายแบบ Random location และ Many-to-one ตำแหน่งของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางถูกวางแบบสุ่ม ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่ตำแหน่งของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางจะอยู่ใกล้กัน ผลการทดลองระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางจะมีความสัมพันธ์กับผลการทดลองอื่น ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

ภาพประกอบที่ 4-7 แสดงเวลาที่ใช้ในการขนส่งข้อมูลวิดีโอจากต้นทางไปยังปลายทางของทุกกลุ่มข้อมูลวิดีโอ เวลาที่ใช้ในการขนส่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มขึ้นตามจำนวนของแหล่งข้อมูล จำนวนของโหนดต้นทางที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ข้อมูลในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ความสามารถของเครือข่ายมีจำกัด สิ่งนี้ส่งผลให้เกิดการชนกันของข้อมูลในเครือข่ายสูง ภาพประกอบที่ 4-8 แสดงจำนวนการละทิ้งของกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่สูงขึ้นเมื่อจำนวนของแหล่งข้อมูลวิดีโอมีมากขึ้น ผลการทดลองเวลาที่ใช้ในการขนส่งข้อมูลวิดีโอจากต้นทางไปยังปลายทางและปริมาณกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกทิ้งในเครือข่ายของกรณี Fixed location สูงกว่าในกรณี Random

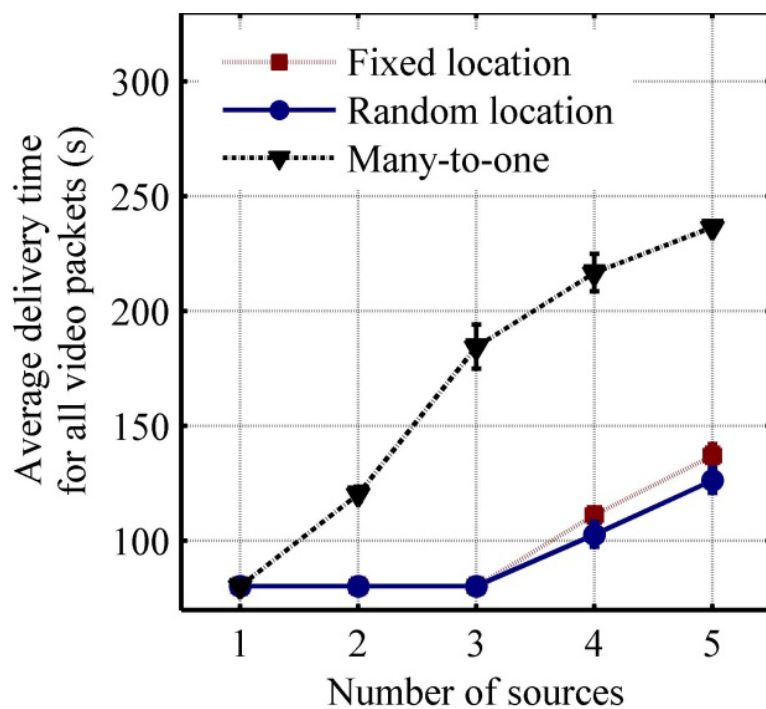
location เพียงเล็กน้อย เพราะว่าจำนวนฮอปที่มากกว่าดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-6 ยิ่งกว่านั้น ภาพประกอบที่ 4-7 และภาพประกอบที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่ากรณี Many-to-one ใช้เวลาในการขนส่งข้อมูลวิดีโอจากต้นทางไปยังปลายทางและมีปริมาณกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกละทิ้งในเครือข่ายสูงที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากทุกกลุ่มข้อมูลวิดีโอซึ่งมาจากทุกโหนดต้นทางจะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเดียวกัน ผลการทดลองสัดส่วนของปริมาณข้อมูลวิดีโอที่ปลายทางรับได้สำเร็จต่อปริมาณข้อมูลที่ส่งจากต้นทางในภาพประกอบที่ 4-9 ช่วยยืนยันผลการทดลองที่เกิดขึ้นในภาพประกอบที่ 4-7 และภาพประกอบที่ 4-8

ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงการลดลงของ PSNR เมื่อจำนวนของโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น จำนวนของโหนดต้นทางที่สูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของปริมาณข้อมูลวิดีโอที่ปลายทางรับได้สำเร็จต่อปริมาณข้อมูลที่ส่งจากต้นทางลดลงดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-9 ผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4-9 และภาพประกอบที่ 4-10 มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของโหนดต้นทางทำให้โอกาสของการรับกลุ่มข้อมูลวิดีโอได้สำเร็จต่ำลง สิ่งนี้ส่งผลให้คุณภาพของวิดีโอลดลง PSNR ของกรณีที่มีการสื่อสารแบบหลายโหนดต้นทางและหลายโหนดปลายทางซึ่งคือกรณี Fixed location และ Random location มีค่าสูงกว่า 25 dB ในทางตรงกันข้ามสมรรถนะของ PSNR ในกรณี Many-to-one จะต่ำกว่า 25 dB เมื่อในเครือข่ายมีมากกว่า 2 โหนดต้นทาง ภาพประกอบที่ 4-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหน่วงเวลาของเฟรมวิดีโอตลอดเส้นทางกับจำนวนของคู่การสื่อสาร จำนวนของโหนดต้นทางที่เพิ่มมากขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดการแข่งขันกันเข้าใช้ช่องสัญญาณกันมากขึ้นดังได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ ซึ่งสิ่งนี้จะส่งผลให้การหน่วงเวลาของเฟรมวิดีโอตลอดเส้นทางเพิ่มขึ้นตามจำนวนของโหนดต้นทาง กรณี Many-to-one จะเกิดการแข่งขันกันเข้าใช้ช่องสัญญาณสูงสุด ดังนั้นการหน่วงเวลาของเฟรมวิดีโอตลอดเส้นทางในกรณีนี้จึงสูงที่สุด จากทุกผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเป็นสิ่งที่ยากมากที่จะจัดการกับจำนวนของช่องสัญญาณและจำนวนของ Interface ที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงคุณภาพของวิดีโอที่ต่ำลงในกรณี Many-to-one ถ้าจำนวนของโหนดต้นทางยังคงเพิ่มมากขึ้น

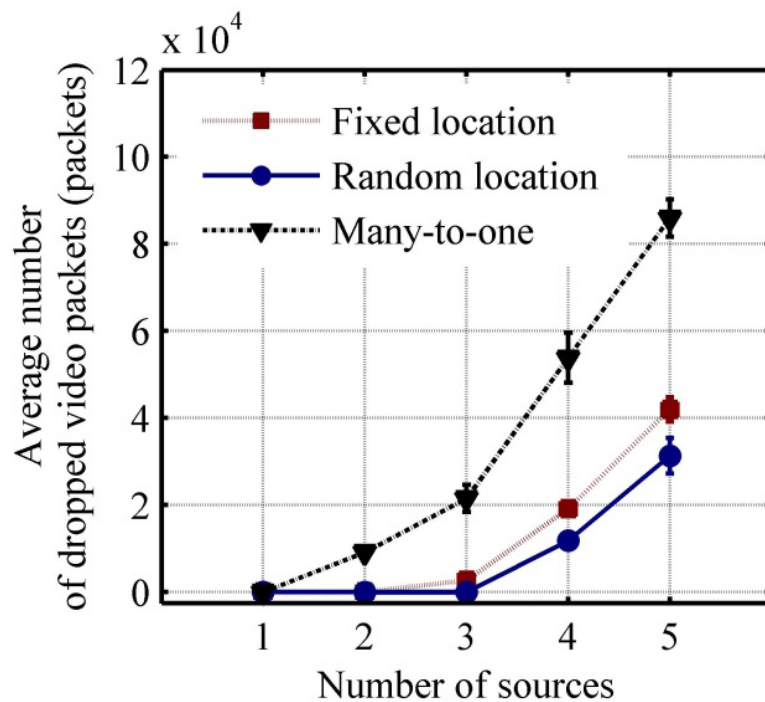
ภาพประกอบที่ 4-12 แสดงการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่เครือข่ายต้องใช้งานเมื่อจำนวนของโหนดต้นทางเพิ่มมากขึ้น จำนวนของโหนดต้นทางที่มากขึ้นเป็นสาเหตุจำนวนข้อมูลวิดีโอทั้งหมดในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น และยังทำให้กิจกรรมการติดต่อสื่อสารเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นพลังงานจึงถูกใช้มากขึ้น ระดับพลังงานที่แตกต่างกันของแต่ละสถานะของเครือข่ายสอดคล้องกับผลการทดลองสมรรถนะของเครือข่ายดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-6 ถึงภาพประกอบที่ 4-9 ภาพประกอบที่ 4-13 ถึงภาพประกอบที่ 4-15 แสดงระดับพลังงานของกิจกรรมการติดต่อสื่อสารที่แตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ว่ากิจกรรมหลักที่ใช้พลังงานสูงที่สุดในทุกกรณีคือการขนส่งข้อมูลวิดีโอ



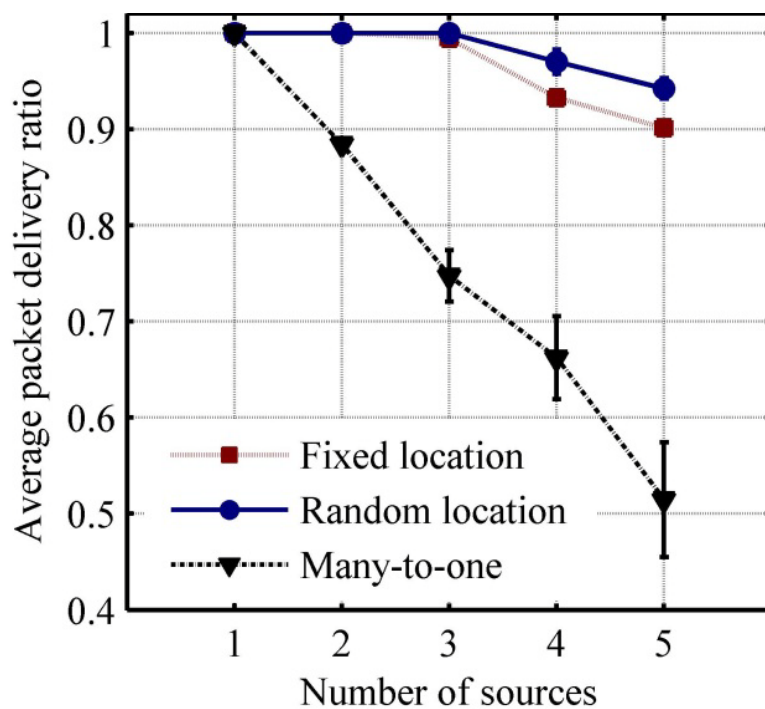
ภาพประกอบที่ 4-6 ระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง



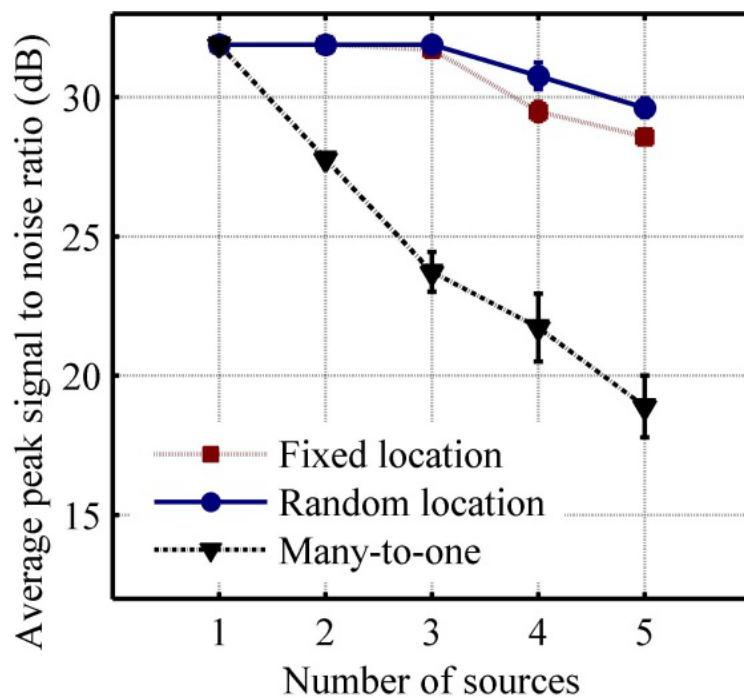
ภาพประกอบที่ 4-7 เวลาที่ใช้ในการขนส่งข้อมูลวิดีโอจากต้นทางไปยังปลายทาง



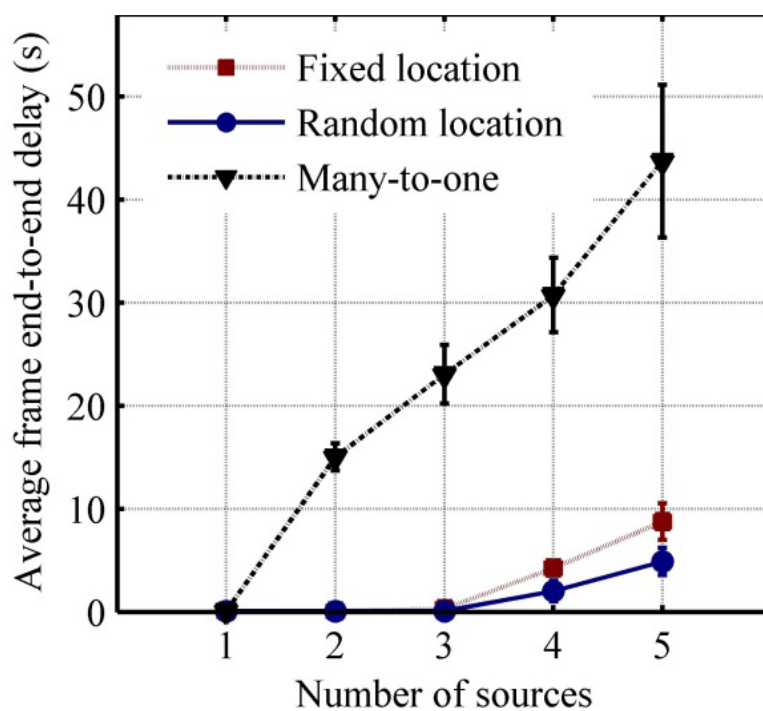
ภาพประกอบที่ 4-8 ปริมาณกลุ่มข้อมูลวิดีโอที่ถูกละทิ้งในเครือข่าย



ภาพประกอบที่ 4-9 สัดส่วนของปริมาณข้อมูลวิดีโอที่ปลายทางรับได้สำเร็จต่อปริมาณข้อมูลที่ส่งจากต้นทาง

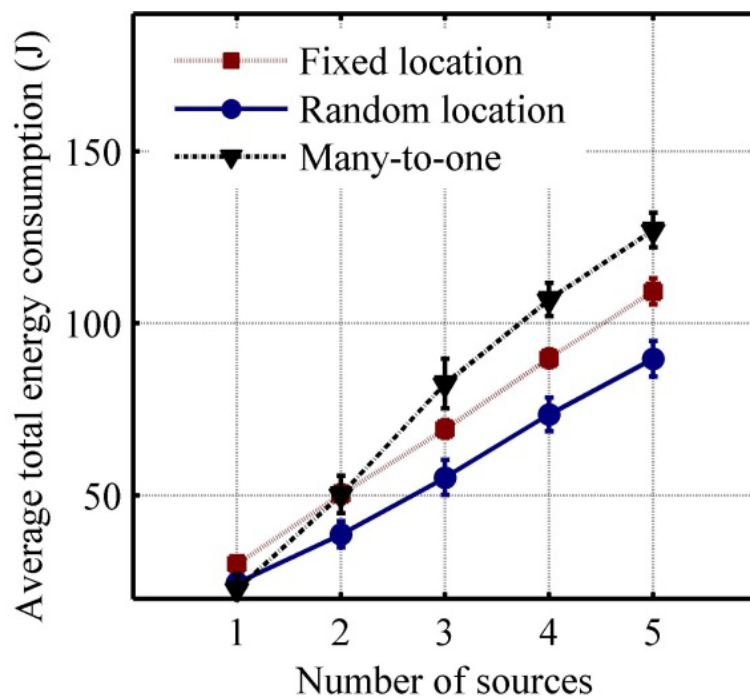


ภาพประกอบที่ 4-10 ตัววัดคุณภาพของวิดีโอ Peak signal to noise ratio

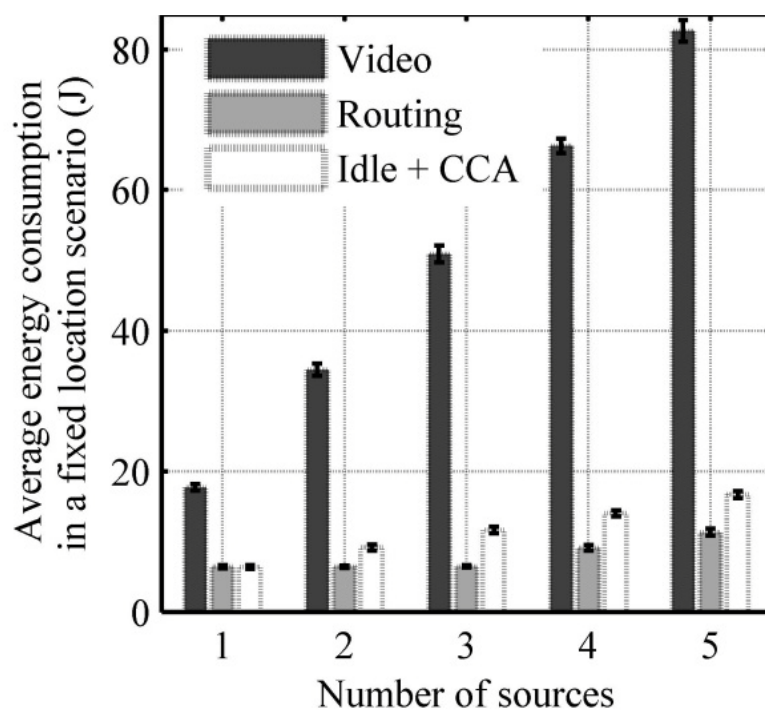


ภาพประกอบที่ 4-11 การหน่วงเวลาของเฟรมวิดีโอตลอดเส้นทาง

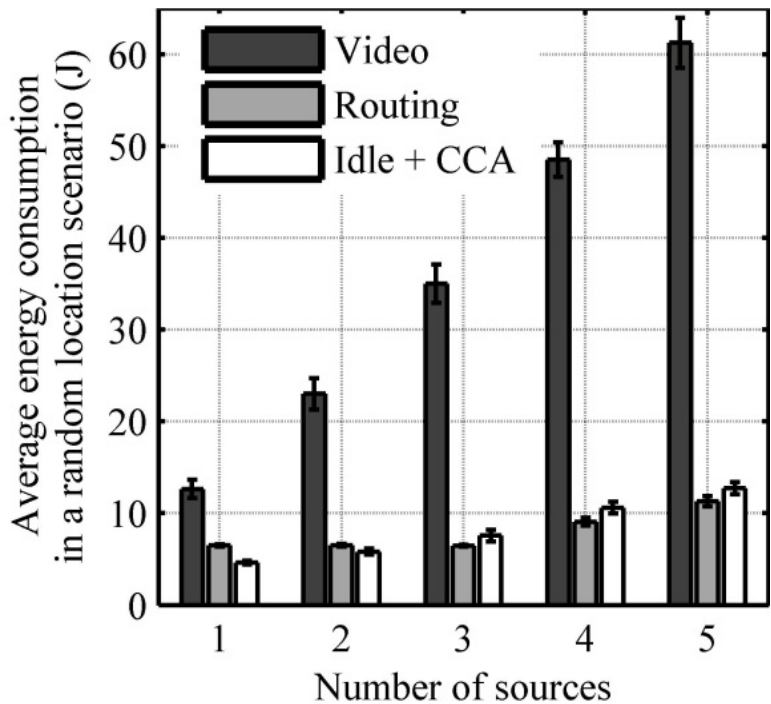




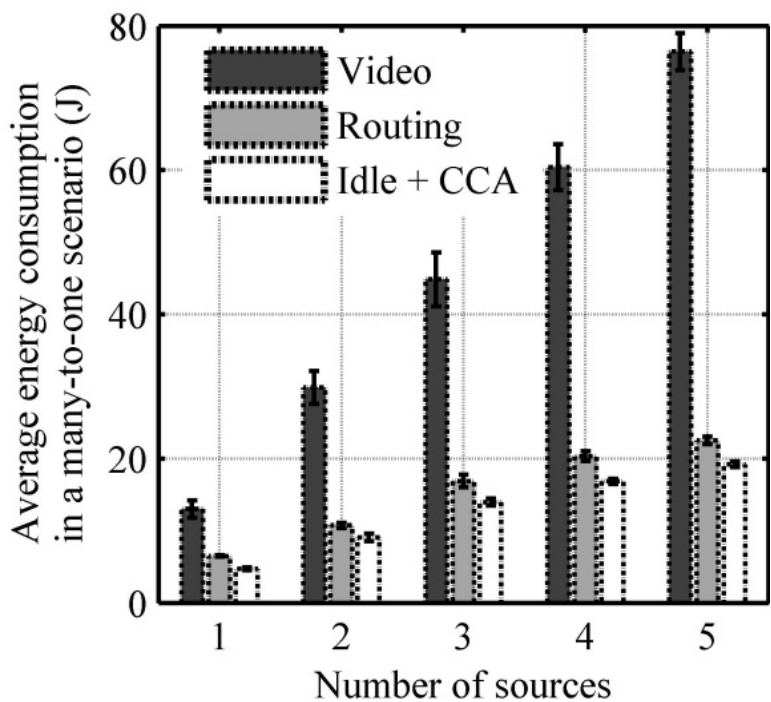
ภาพประกอบที่ 4-12 การบริโภคพลังงานของเครือข่าย



ภาพประกอบที่ 4-13 รายละเอียดการบริโภคพลังงานของเครือข่ายในกรณี Fixed location



ภาพประกอบที่ 4-14 รายละเอียดการบริโภคพลังงานของเครือข่ายในกรณี Random location



ภาพประกอบที่ 4-15 รายละเอียดการบริโภคพลังงานของเครือข่ายในกรณี Many-to-one

#### 4.1.8 สรุปผลการทดลอง

แผนการ 16C3I DSDV ที่ได้นำเสนอสามารถเพิ่มความสามารถของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้เพียงพอต่อการส่งข้อมูลวิดีโอแล้วยังสามารถรักษาระดับของคุณภาพของวิดีโอให้อยู่ในระดับที่น่าพอใจได้ ผลการจำลองเครือข่ายแสดงให้เห็นว่าแผนการที่นำเสนอสามารถให้ระดับ PSNR ที่น่าพอใจในกรณีที่เครือข่ายมีหลายโหนดต้นทางและหลายโหนดปลายทาง อย่างไรก็ตามด้วยจำนวนของช่องสัญญาณและจำนวนของ Interface ที่มีอยู่อย่างจำกัดทำให้ไม่สามารถให้ระดับคุณภาพของวิดีโอในระดับที่น่าพอใจได้สำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอแบบเครือข่ายแบบ Many-to-one เมื่อจำนวนของโหนดต้นทางมากกว่า 2 โหนด ผลการทดลองด้านการใช้พลังงานสามารถสะท้อนกิจกรรมการติดต่อสื่อสารที่เกิดขึ้น เพราะว่ากิจกรรมการติดต่อสื่อสารโดยมากคือการขนส่งข้อมูลวิดีโอ ดังนั้นพลังงานที่ใช้โดยส่วนใหญ่เป็นการใช้เพื่อขนส่งข้อมูลวิดีโอ

#### 4.2 การศึกษาสมรรถนะของเทคนิคการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเทคนิค Improved receive channel balancing (IRCB) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิค RCB ดั้งเดิม เมื่อทั้งสองเทคนิคถูกพัฒนาให้นำมาใช้งานร่วมกับโพรโทคอล 16C3I DSDV

##### 4.2.1 สัญญาณแทรกสอด (Interference)

แนวคิดการวิเคราะห์สัญญาณแทรกสอดในบทความ [40] ถูกปรับปรุงให้เหมาะสมกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งมีระยะรับรู้สัญญาณ (Carrier sensing range) ไกลเป็นสองเท่าของระยะการส่งข้อมูล (Transmission range) [41] ระยะรับรู้สัญญาณและระยะการส่งข้อมูลแทนด้วยตัวแปร  $C$  และ  $T$  ในสมการที่ (1) ของบทความ [40] ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะรับรู้สัญญาณและระยะห่างระหว่างจำนวนทอดการติดต่อสื่อสารในกรณีที่เส้นทางการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางเป็นเส้นตรงแสดงได้ดังสมการที่ (4-1) โดยการแทนค่า  $T$  ในสมการที่ (1) ของบทความ [40] ด้วย  $C/2$

$$d \leq C/2 < 2*d$$

$$2*d \leq C < 4*d$$

$$2 \leq C/d < 4$$

(4-1)

โดย  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างทอดการติดต่อสื่อสาร ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร

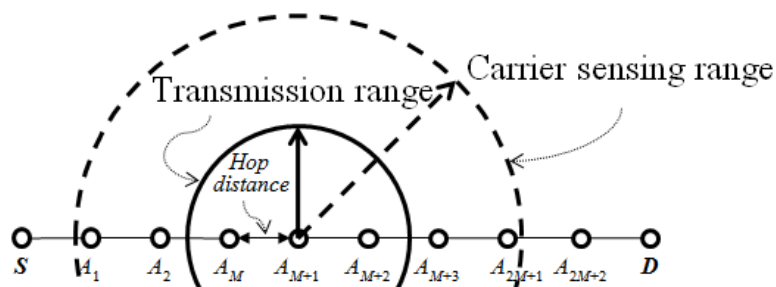
จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างทอดการติดต่อสื่อสารและระยะรับรู้สัญญาณสามารถคำนวณหาระยะสัญญาณแทรกสอด (Interference range) ได้ดังสมการที่ (4-2)

$$M \leq C/d < M+1 \tag{4-2}$$

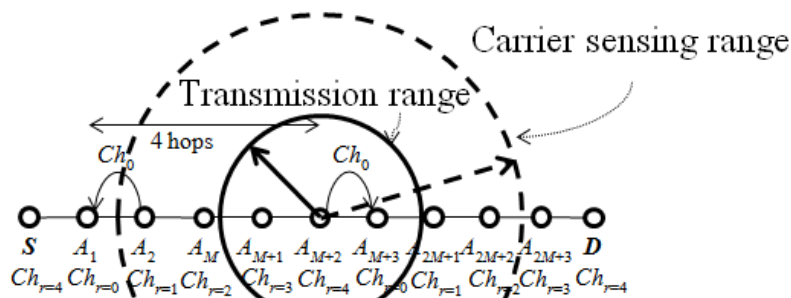
โดย  $M$  คือ ระยะสัญญาณแทรกสอด ซึ่งมีหน่วยเป็นทอด

จากสมการที่ (4-1) และ (4-2) ระยะสัญญาณแทรกสอดที่ไกลที่สุดจะเท่ากับ  $M_{max} = \max\{2, 4-1\} = \max\{2, 3\} = 3$  ทอด ซึ่งสามารถแสดงระยะสัญญาณแทรกสอดนี้ได้ดังภาพประกอบที่ 4-16

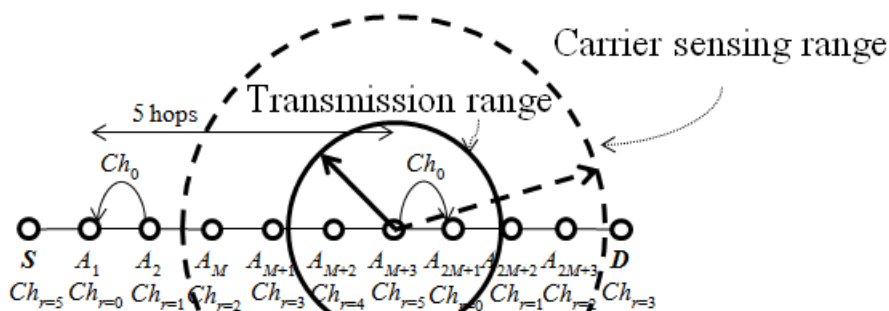
การหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดต้องใช้ช่องสัญญาณจำนวน  $M_{max}+2 = 3+2 = 5$  ช่องสัญญาณ [40] นั้นหมายความว่าบนเครือข่ายที่ใช้วิธีการจัดสรรช่องสัญญาณแบบ RCA แต่ละโหนดจะต้องหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณที่โหนดภายในระยะทาง 4 ทอดใช้ในการรับข้อมูล ซึ่งการหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลเพียงแค่นี้ไม่เพียงพอ เมื่อมีโหนดในเครือข่ายส่งข้อมูลในทิศทางย้อนกลับดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-17 การส่งข้อมูลจากโหนด  $A_2$  ไปยัง  $A_1$  สามารถรบกวนการส่งข้อมูลจากโหนด  $A_{M+2}$  ไปยัง  $A_{M+3}$  ได้ เพื่อให้แน่ใจได้ว่าการสื่อสารจะไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน แต่ละโหนดจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการใช้ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณเดียวกันกับโหนดภายในระยะ 5 ทอดดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-18



ภาพประกอบที่ 4-16 ระยะการรบกวนของสัญญาณวิทยุบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4



ภาพประกอบที่ 4-17 การรบกวนของสัญญาณวิทยุในวิธีการ RCA เมื่อแต่ละโหนดหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดภายในระยะทาง 4 ทอด



ภาพประกอบที่ 4-18 การกำหนดช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล โดยการหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณที่ โหนดภายในระยะ 5 ทอด ใช้ในการรับข้อมูล

#### 4.2.2 การปรับปรุงเทคนิค RCB

เทคนิค RCB ในบทความ [8] จะหลีกเลี่ยงการใช้งานช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่มีโหนดภายในระยะทาง 2 ทอดเลือกใช้งานอยู่ เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นภายในช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตามในหัวข้อ 4.2.1 แสดงให้เห็นว่าการหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดต้องไม่ใช้ช่องสัญญาณที่โหนดภายในระยะทาง 5 ทอดใช้ในการรับข้อมูล ดังนั้นเทคนิคการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลจะถูกปรับปรุงให้พิจารณาหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่มีโหนดภายในระยะทาง 5 ทอดใช้ในการรับข้อมูล นอกจากนี้อัลกอริทึม RCB ซึ่งแสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-1 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลอาจจะมีการสลับบ่อยๆ ถึงแม้ว่าจะมีเพียงโหนดเดียวใช้ช่องสัญญาณในการรับข้อมูลอยู่ ดังแสดงด้วย 2 กรณี คือ กรณีที่โหนดไม่มีข้อมูลช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดข้างเคียง และกรณีที่โหนดมีโหนดภายในระยะทาง 5 ทอดน้อยกว่าจำนวนของช่องสัญญาณที่สามารถใช้ในการขนส่งข้อมูล พิจารณาในกรณีที่โหนดยังไม่มีข้อมูลช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดข้างเคียง ซึ่งโหนดจะมีเพียงข้อมูลช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของตนเอง แผนการ RCB จะมีการพิจารณาเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล เช่น พิจารณาที่โหนด  $A$  ซึ่งใช้ช่องสัญญาณหมายเลข 1 ในการรับข้อมูล จากอัลกอริทึมที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ของโหนด  $A$  จะมีค่าดังนี้ คือ  $N_k = N_l = 1$  และ  $N_{avg} = 1/15 = 0.07$  เนื่องจาก  $N_k > N_{avg}$  (จากอัลกอริทึมที่ 4-1 ในบรรทัดที่ 1) ดังนั้นโหนดมีโอกาสเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณด้วยความน่าจะเป็น  $p = (N_l - N_{avg})/N_l = (1 - 0.07)/1 = 0.93$  โดยพิจารณาใช้ช่องสัญญาณในกลุ่ม  $S_2$  เนื่องจากในกรณีที่  $S_1$  จะเท่ากับกลุ่มว่าง พิจารณาในกรณีที่โหนดภายในระยะทาง 5 ทอดน้อยกว่าจำนวนของช่องสัญญาณที่สามารถใช้ในการขนส่งข้อมูล เช่น ในกรณีที่โหนด  $A$  ซึ่งใช้ช่องสัญญาณหมายเลข 1 ในการรับข้อมูล มีโหนดภายในระยะทาง 5 ทอดจำนวน 5 โหนด จากอัลกอริทึมที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ของโหนด  $A$  จะมีค่าดังนี้ คือ  $N_k = N_l = 1$  และ  $N_{avg} = 5/15 = 0.33$  เนื่องจาก  $N_k > N_{avg}$

(จากอัลกอริทึมที่ 4-1 ในบรรทัดที่ 1) ดังนั้นโหนดมีโอกาสเปลี่ยนช่องสัญญาณด้วยความน่าจะเป็น  $p = (N_k - N_{avg})/N_k = (1 - 0.33)/1 = 0.67$  โดยพิจารณาใช้ช่องสัญญาณในกลุ่ม  $S_1$  หรือ  $S_2$  เพื่อแก้ปัญหาการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลโดยไม่จำเป็น โหนดจะไม่สลับช่องสัญญาณ ถ้าช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของตนเองถูกใช้โดยโหนดเดียวในเครือข่าย แสดงอัลกอริทึมการปรับปรุงเทคนิค RCB (Improved receive channel balancing: IRCB) ได้ดังอัลกอริทึมที่ 4-2 โดยอัลกอริทึมจะหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลที่โหนดภายในระยะทาง 5 ทอดใช้ในการรับข้อมูล และลดการสลับช่องสัญญาณโดยไม่จำเป็น

**อัลกอริทึมที่ 4-2** เทคนิค IRCB พิจารณาเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดก่อนการกระจายตารางเส้นทาง ตัวแปร  $N_k$  หมายถึงจำนวนของโหนดภายในระยะทาง 5 ทอดของโหนด  $i$  ที่ใช้ช่องสัญญาณ  $Ch_k$  เป็นช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล โดย  $Ch_k \neq Ch_0$  ตัวแปร  $N_{avg}$  หมายถึงจำนวนเฉลี่ยของโหนดต่อ 1 ช่องสัญญาณ ตัวแปร  $p$  หมายถึงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนช่องสัญญาณ โดย  $p = (N_k - N_{avg})/N_k$  ตัวแปร  $S_1$  หมายถึงกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีการใช้งานน้อยกว่า  $N_{avg}$  และ  $S_2$  หมายถึงกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีการใช้งานน้อยกว่า  $N_{avg}$  แต่ไม่รวมกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีโหนดภายในระยะทาง 1 ทอดของโหนด  $i$  ใช้งานเป็นช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล

---

```

1:  if ( $N_k \geq N_{avg}$ ) and ( $N_k \neq 1$ ) then
2:      if ( $S_2 \neq \text{NULL}$ ) then
3:          switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_2$  with  $p$ 
4:      else
5:          switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_1$  with  $p$ 
6:      end if
7:  end if

```

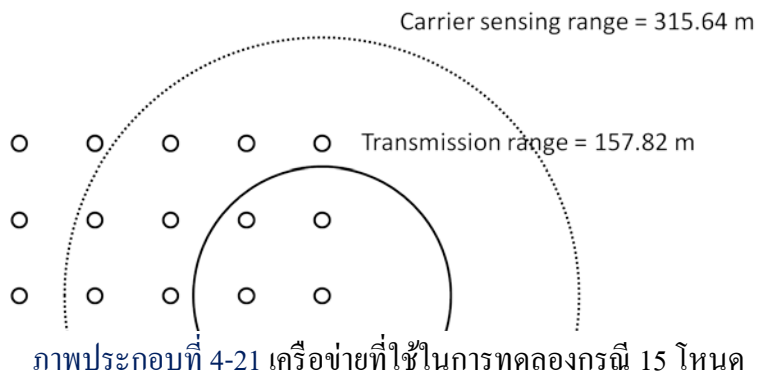
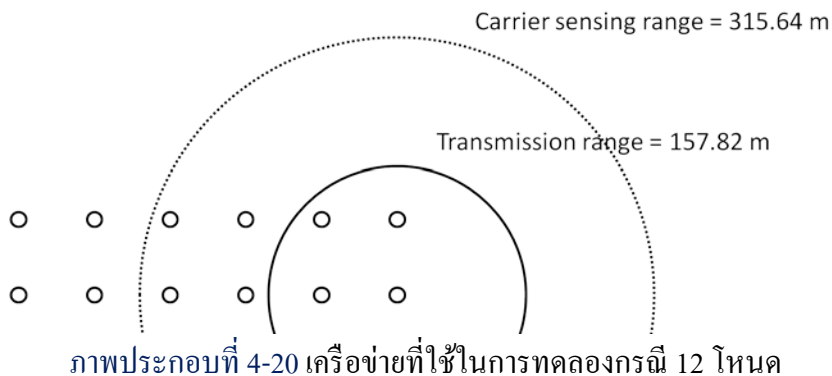
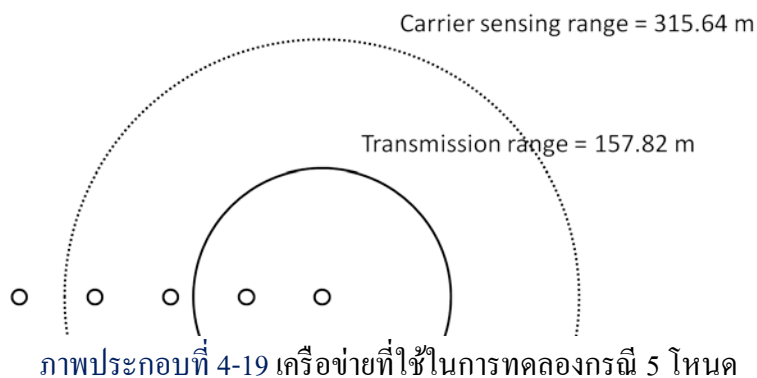
---

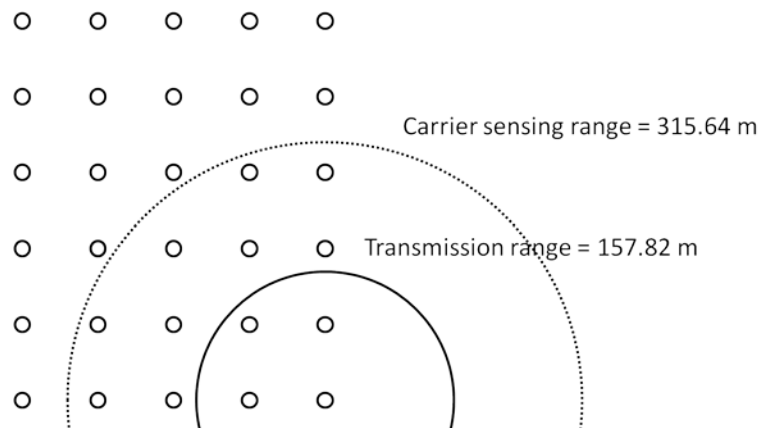
### 4.2.3 วัตถุประสงค์การทดลอง

ศึกษาการกระจายการใช้งานช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของเทคนิค IRCB และ RCB บนโพรโทคอล 16C3I DSDV

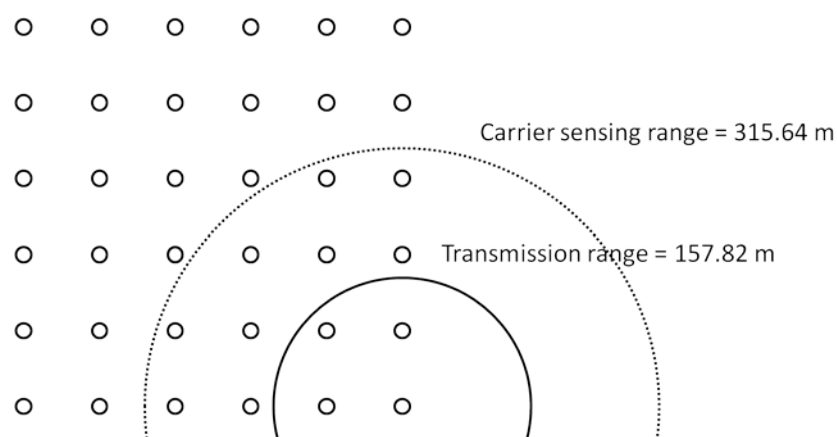
**4.2.4 การออกแบบการทดลอง**

การทดสอบสมรรถนะแบ่งออกเป็น 5 กรณี คือ กรณีที่ในเครือข่ายมี 5 12 15 30 และ 36 โหนด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-19 - ภาพประกอบที่ 4-23 ตามลำดับ ซึ่งทุกโหนดในแต่ละการทดลองจะอยู่ในระยะ 5 ฮอปของกันและกัน แต่แต่ละการทดลองมี 15 ช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานสำหรับการส่งและรับข้อมูล แต่แต่ละการทดลองจะถูกทำซ้ำ 10 ครั้ง ผลการทดลองถูกแสดงด้วยความน่าเชื่อถือ 95% c.i. แต่ละโหนดจะมีการส่งข้อมูลตารางเส้นทางทุก 15 วินาที





ภาพประกอบที่ 4-22 เครื่องข่ายที่ใช้ในการทดลองกรณี 30 โหนด



ภาพประกอบที่ 4-23 เครื่องข่ายที่ใช้ในการทดลองกรณี 36 โหนด

#### 4.2.5 ตัววัดสมรรถนะ

ในการประเมินผลการทดลอง 2 ตัวชี้วัดสมรรถนะถูกใช้ในการทดลองนี้ คือ ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล (Average number of switching  $Ch_r$ ) และจำนวนโหนดที่ใช้งานในแต่ละช่องสัญญาณ (Number of nodes on each channel)

#### 4.2.6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

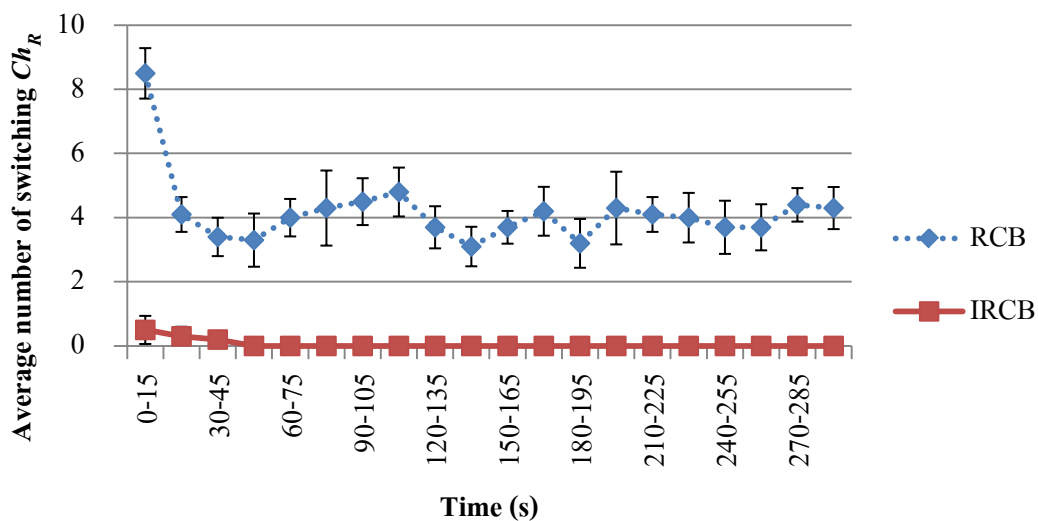
ผลความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในทุก 15 วินาทีในเครือข่ายที่ใช้โหนดในการทดลอง 5 12 15 30 และ 36 โหนด แสดงดังภาพประกอบที่ 4-24 ถึงภาพประกอบที่ 4-28 สำหรับแผนการ RCB ช่วง 15 วินาทีแรกของการทดลอง ทุกโหนดในเครือข่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณสูง เนื่องจากโหนดใช้ข้อมูลของตนเองเท่านั้นในการพิจารณาเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณ ดังนั้น โอกาสในการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณสูง สำหรับแผนการ IRCB



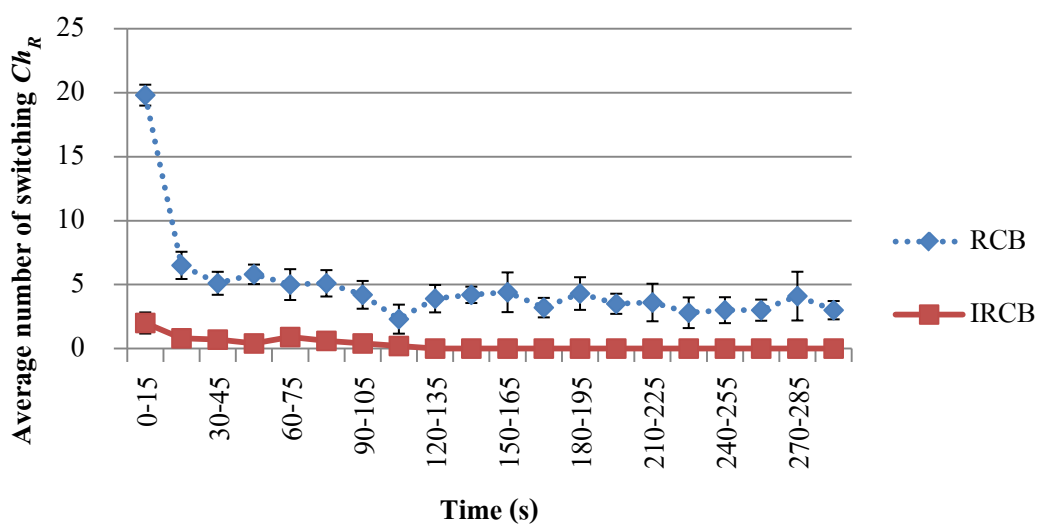
ในช่วง 15 วินาทีของทุกการทดลอง จำนวนการสลับช่องสัญญาณจะลดลงเมื่อเทียบกับแผนการ RCB เนื่องจากเทคนิค IRCB จะไม่มีการสลับช่องสัญญาณในครั้งแรกของการกระจายตารางเส้นทาง เพราะจำนวนโหนดที่ใช้งานช่องสัญญาณที่กำลังพิจารณาในการรับข้อมูลเท่ากับหนึ่งทั้งในแผนการ RCB และ IRCB เมื่อเครือข่ายที่ใช้โหนดในการทดลองเท่ากับ 15 และ 30 โหนด หลังจากเวลาผ่านไป 165 วินาที การสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลแทบจะไม่เกิดขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าแต่ละช่องสัญญาณถูกใช้งานด้วยโหนดจำนวนเท่ากัน สำหรับแผนการ RCB เมื่อเครือข่ายที่ใช้โหนดในการทดลองประกอบด้วย 5 12 และ 36 โหนด ตั้งแต่เวลา 30 วินาที ซึ่งแต่ละโหนดจะมีข้อมูลของโหนดข้างเคียงในตารางเส้นทาง การสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลจะเกิดขึ้นแบบคงที่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนโหนดที่จะใช้งานในแต่ละช่องสัญญาณไม่พอดีกัน ดังนั้นโหนดที่พบว่าตนเองใช้ช่องสัญญาณหมายเลขที่ถูกใช้งานมากกว่าค่าเฉลี่ยจะมีการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณ สำหรับแผนการ IRCB จากการทดลองพบว่าในกรณีจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถใช้ในการขนส่งข้อมูลได้มีมากกว่าจำนวนของโหนดในเครือข่าย ดังการทดลองในกรณีเครือข่ายมี 5 และ 12 โหนดและมีช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานในการขนส่งข้อมูลได้ 15 ช่องสัญญาณ เทคนิค IRCB แสดงให้เห็นว่าโหนดจะไม่ทำการสลับช่องสัญญาณหลังจากแต่ละโหนดใช้ 1 ช่องสัญญาณที่ไม่ซ้ำกันไปแล้ว

กราฟแจกแจงความถี่จากบางการทดลองของจำนวนโหนดที่ใช้งานในแต่ละช่องสัญญาณในเครือข่ายที่ใช้โหนดในการทดลอง 5 12 15 30 และ 36 โหนด แสดงดังภาพประกอบที่ 4-29 ถึงภาพประกอบที่ 4-38 ในแผนการ RCB และ IRCB เมื่อเครือข่ายที่ใช้โหนดในการทดลองประกอบด้วย 15 และ 30 โหนด เมื่อเวลาผ่านไป 165 วินาที แต่ละช่องสัญญาณจะถูกใช้ด้วยโหนดจำนวนเท่ากับค่าเฉลี่ย นั่นคือ 1 โหนดต่อช่องสัญญาณในกรณีที่โหนดในเครือข่ายประกอบด้วย 15 โหนด และ 2 โหนดต่อช่องสัญญาณในกรณีที่เครือข่ายประกอบด้วย 30 โหนด ดังนั้นโหนดจึงไม่มีการสลับช่องสัญญาณดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-33 และภาพประกอบที่ 4-34 สำหรับกรณี 15 โหนด และภาพประกอบที่ 4-35 และภาพประกอบที่ 4-36 สำหรับกรณี 30 โหนด ในแผนการ RCB ในกรณีที่โหนดในเครือข่ายประกอบด้วย 5 และ 12 โหนด แต่ละช่องสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ใช้งานตลอดเวลา เนื่องจากโหนดมีการสลับช่องสัญญาณตลอดเวลา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-29 และภาพประกอบที่ 4-31 ในแผนการ IRCB แสดงให้เห็นว่าเมื่อแต่ละโหนดใช้ 1 ช่องสัญญาณที่ไม่ซ้ำกับโหนดอื่น โหนดจะไม่มีการสลับช่องสัญญาณอีก ดังนั้นทั้งเครือข่ายในกรณี 5 และ 12 โหนดจะไม่มีการสลับช่องสัญญาณอีกดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-30 และภาพประกอบที่ 4-32 ในกรณีที่เครือข่ายประกอบด้วย 36 โหนด ทั้งสอง

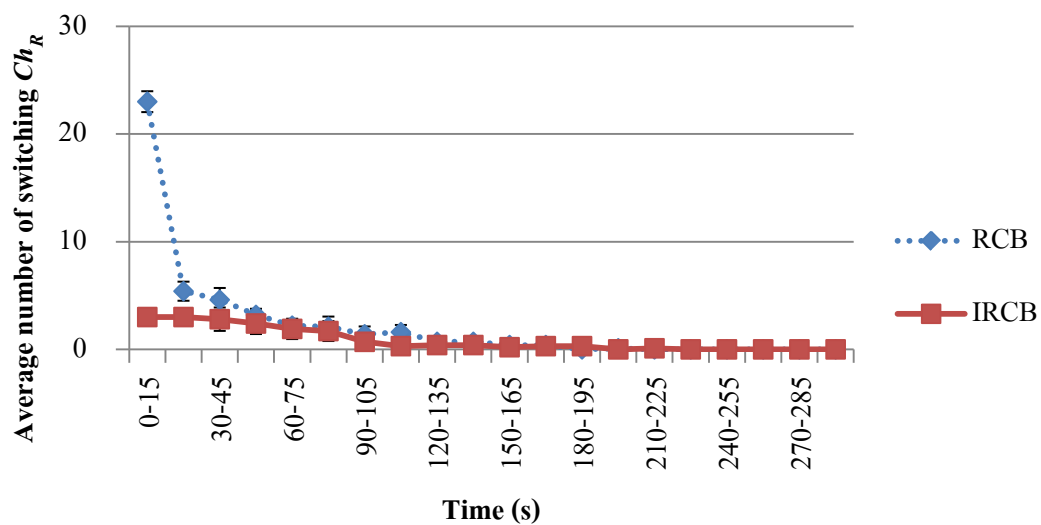
แผนการจะมีการสลับช่องสัญญาณตลอดเวลาดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-37 และภาพประกอบที่ 4-38



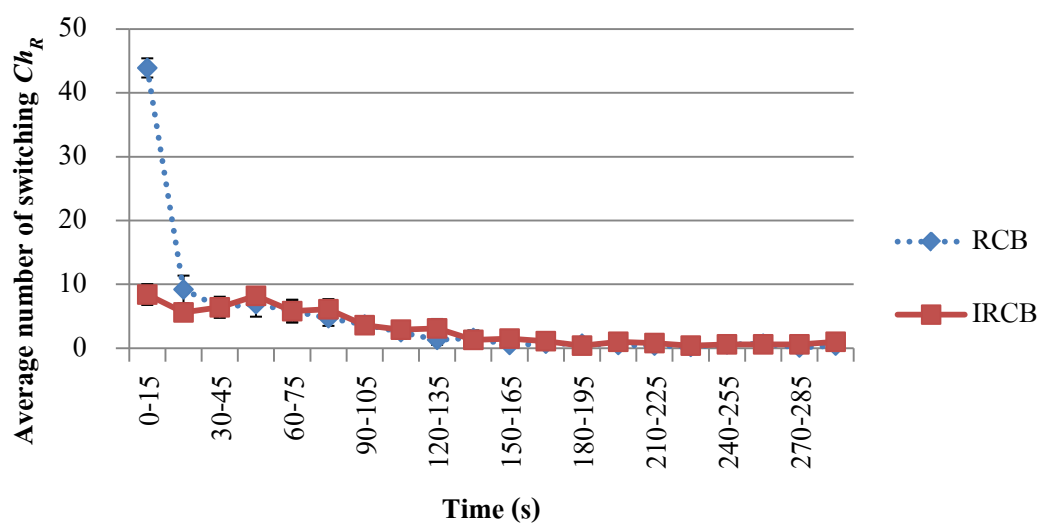
ภาพประกอบที่ 4-24 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 5 โหนด



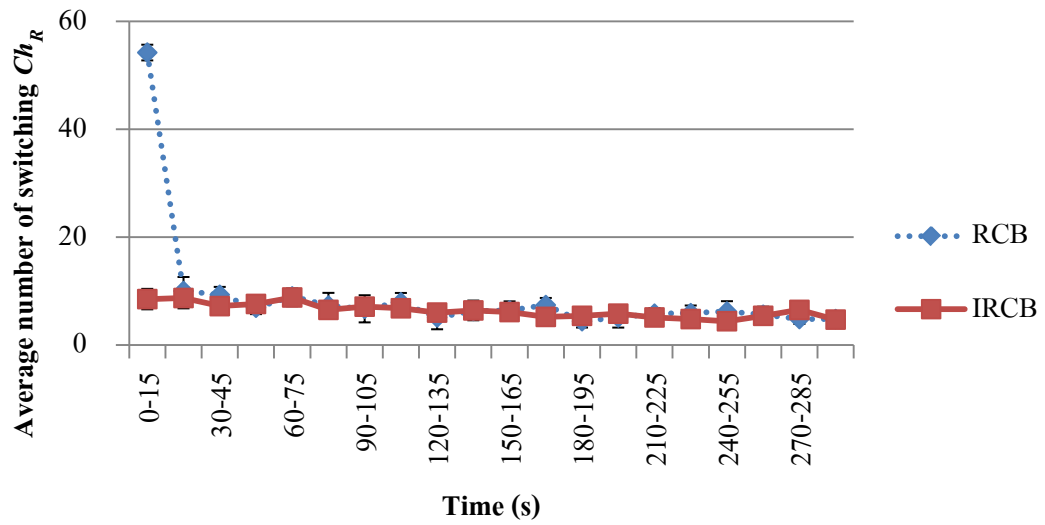
ภาพประกอบที่ 4-25 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 12 โหนด



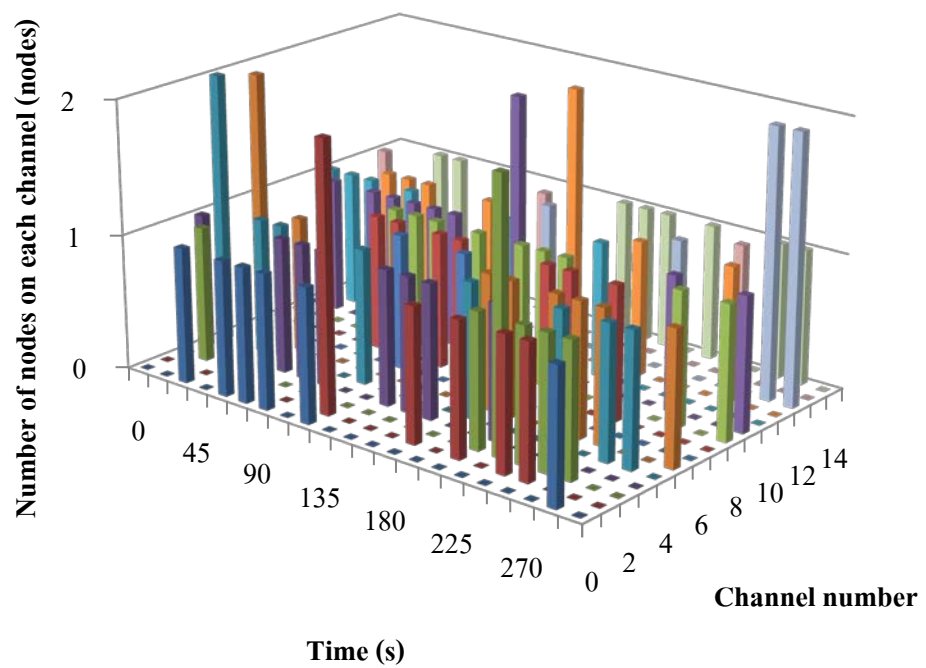
ภาพประกอบที่ 4-26 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 15 โหนด



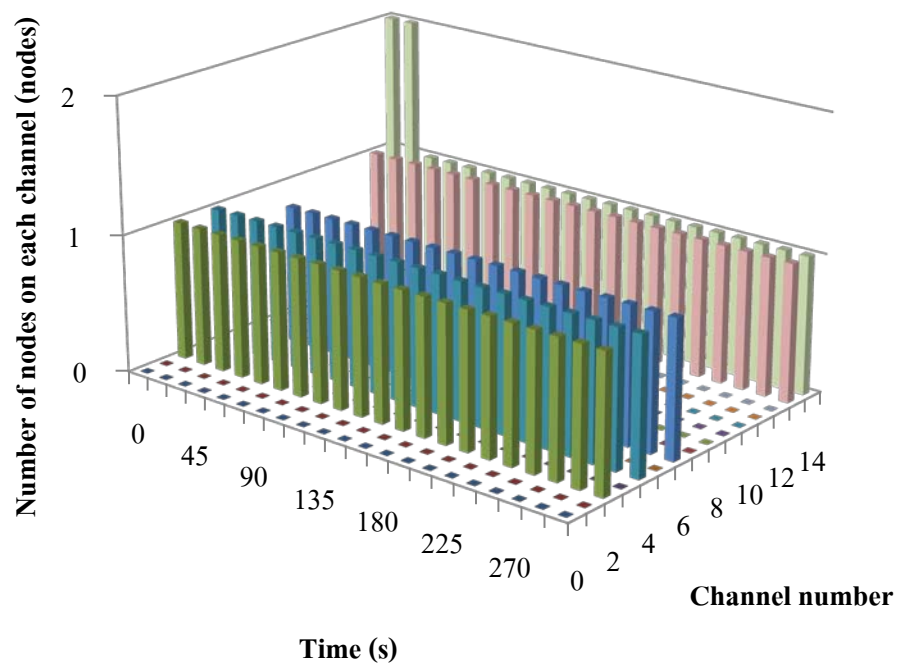
ภาพประกอบที่ 4-27 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 30 โหนด



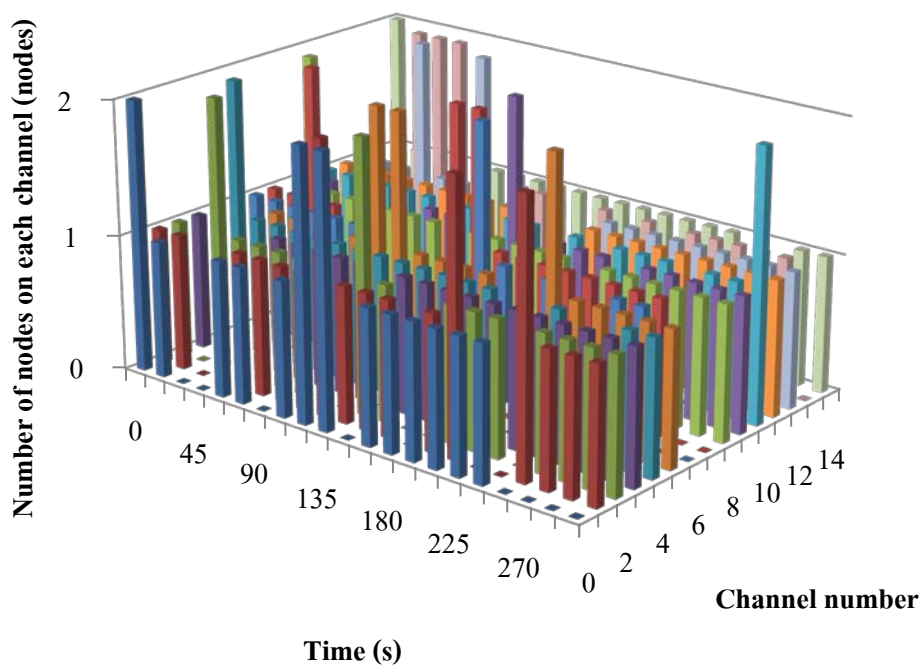
ภาพประกอบที่ 4-28 ความถี่ในการสลับช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลในกรณี 36 โหนด



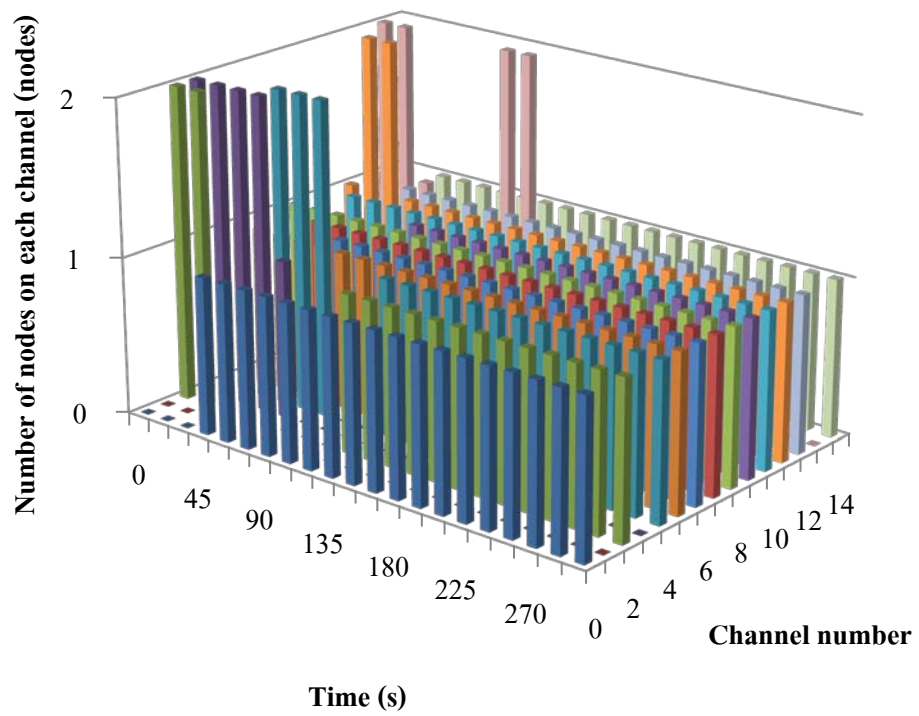
ภาพประกอบที่ 4-29 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 5 โหนด



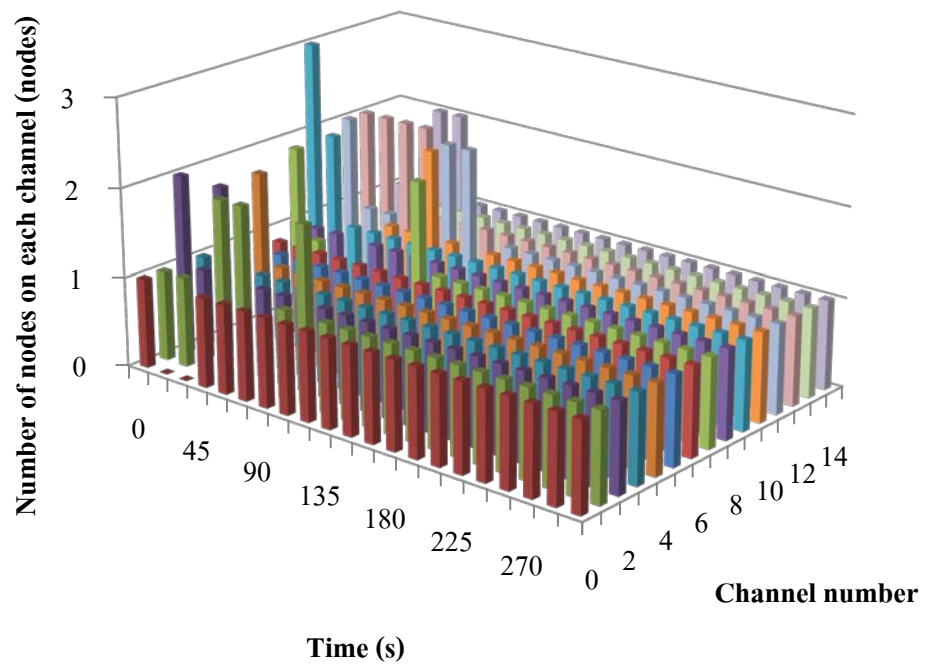
ภาพประกอบที่ 4-30 จำนวน โหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 5 โหนด



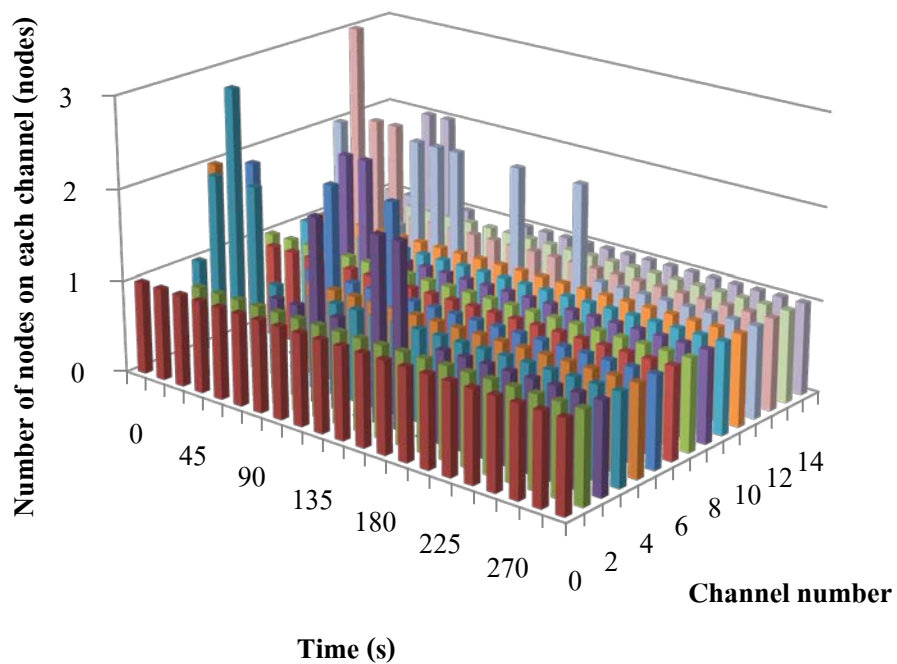
ภาพประกอบที่ 4-31 จำนวน โหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 12 โหนด



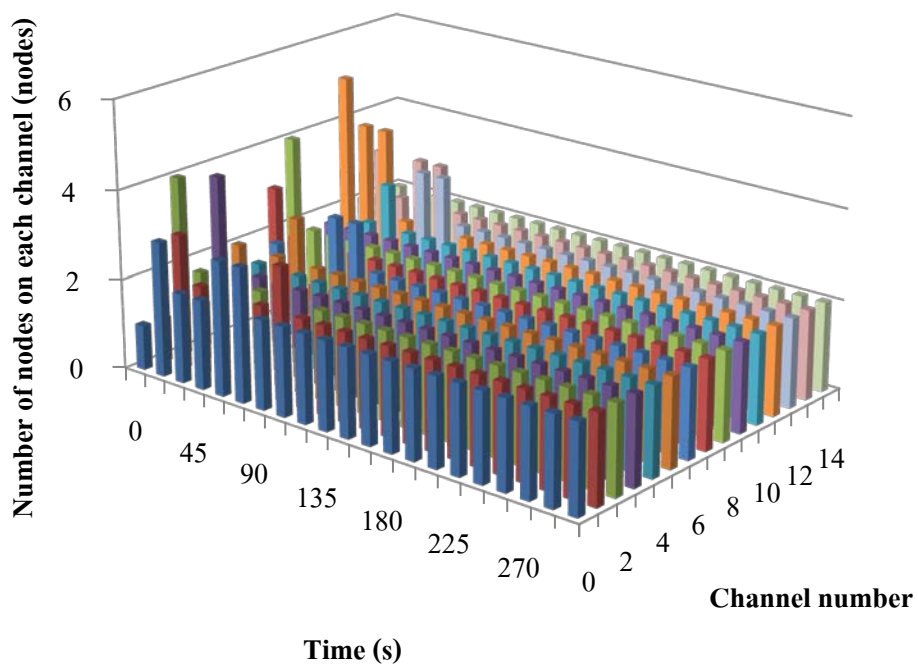
ภาพประกอบที่ 4-32 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กริดมี 12 โหนด



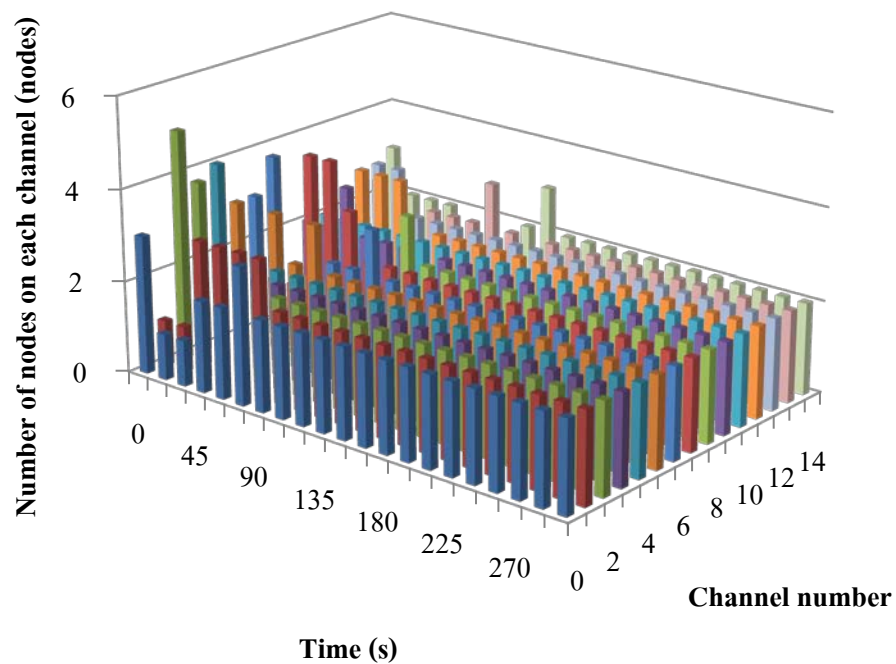
ภาพประกอบที่ 4-33 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กริดมี 15 โหนด



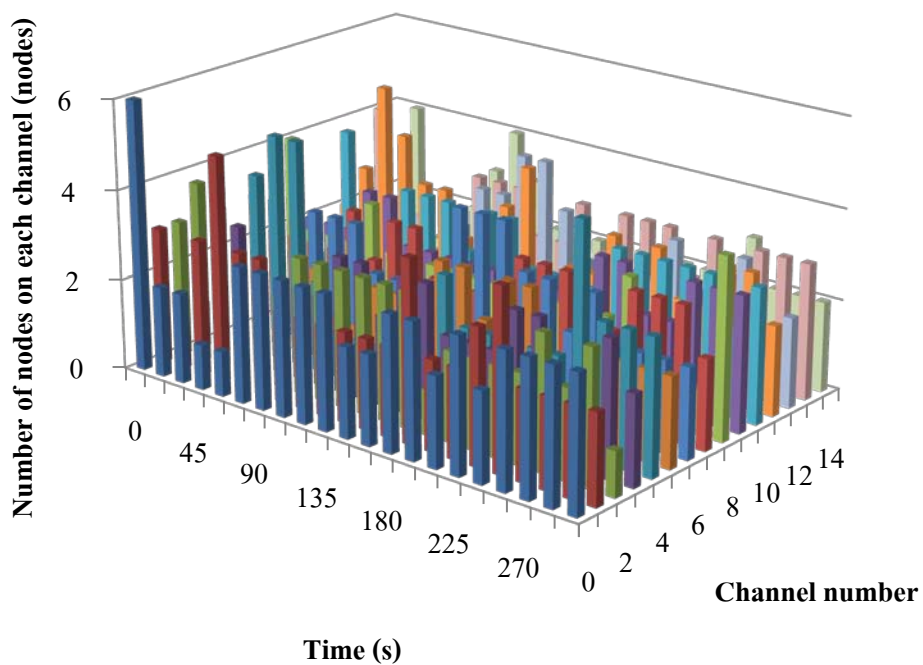
ภาพประกอบที่ 4-34 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 15 โหนด



ภาพประกอบที่ 4-35 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 30 โหนด

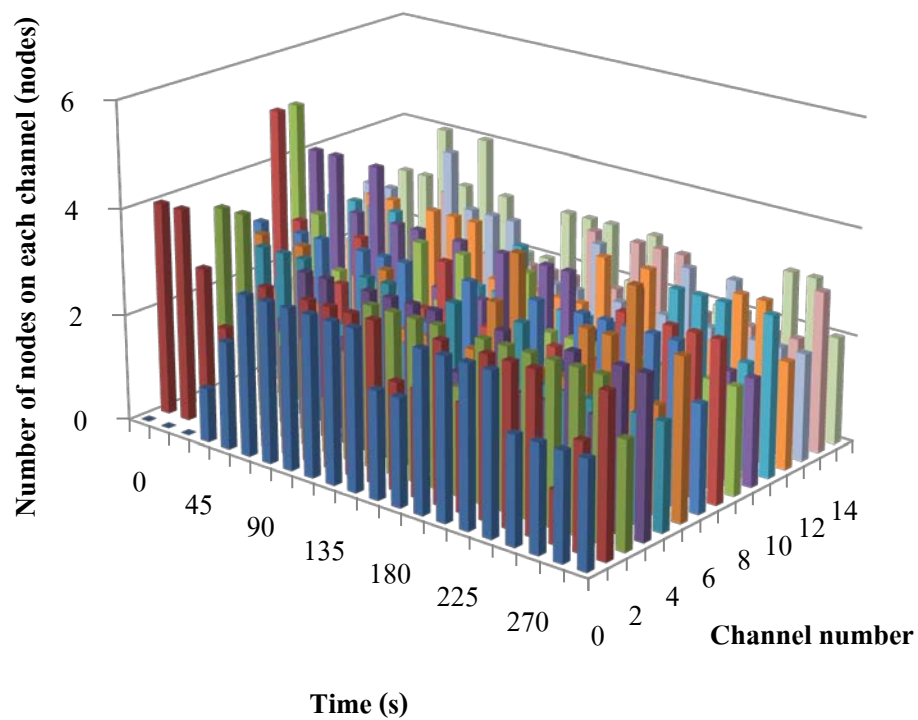


ภาพประกอบที่ 4-36 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 30 โหนด



ภาพประกอบที่ 4-37 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ RCB กรณี 36 โหนด





ภาพประกอบที่ 4-38 จำนวนโหนดในแต่ละช่องสัญญาณของแผนการ IRCB กรณี 36 โหนด

#### 4.2.7 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเทคนิค IRCB เปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิค RCB ดั้งเดิม โดยทั้งสองเทคนิคถูกพัฒนาให้ทำงานร่วมกับโปรโตคอล DSDV ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งการใช้งานเทคนิค IRCB และ RCB จะทำให้การสลับช่องสัญญาณคู่เข้าหาค่าเฉลี่ยเสมอ นอกจากนี้เทคนิค IRCB สามารถลดการสลับช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นในแผนการ RCB ได้ เมื่อจำนวนของโหนดในเครือข่ายมีน้อยกว่าจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้

## บทที่ 5

### การศึกษาการจัดการสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางด้วยโพรโทคอล 16C3I DSDV

บทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาโพรโทคอล 16C3I DSDV ที่ใช้แผนการลดสัญญาณแทรกสอด IRCB ในบทที่ 4 ให้สามารถจัดการสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง เพื่อรองรับการส่งวิดีโอแบบ MDC ซึ่งได้แนวคิดในการจัดการสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทางมาจากบทความ [15] ผู้วิจัยได้พัฒนากระบวนการในการจัดการสรรเส้นทางแบบหลายเส้นทาง และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอล 16C3I DSDV

#### 5.1 แนวคิดการหาหลายเส้นทางที่ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดร่วมกัน (Link-disjoint)

แนวคิดการหาหลายเส้นทางที่ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดร่วมกัน (Link-disjoint) นำมาจากบทความ [15] ซึ่งมีหลักการดังนี้ คือ “ถ้าสองเส้นทางจากโหนดต้นทางไปโหนดปลายทางเป็นเส้นทางแบบ *Link-disjoint* ทุกโหนดบนเส้นทางต้องรับประกันว่าเส้นทางทั้งสองมีโหนด *Next hop* ที่แตกต่างกันและมีโหนด *Last hop* ที่แตกต่างกัน” โดยโหนด *Last hop* หมายถึงโหนดบนเส้นทางที่อยู่ก่อนจะถึงโหนดปลายทางและสามารถติดต่อกับโหนดปลายทางได้โดยตรง อัลกอริทึมการพิจารณาเลือกหลายเส้นทางแบบ *Link-disjoint* แสดงได้ดัง Fig. 9 ในบทความ [15] ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกนำมาใช้ในการเลือกเก็บหลายเส้นทางของโพรโทคอล 16C3I DSDV นอกจากนี้ อัลกอริทึมนี้ยังสามารถรับประกันได้อีกว่าจะไม่เกิดการวนซ้ำในการส่งข้อมูล

#### 5.2 การพัฒนาการเตรียมหลายเส้นทางด้วยโพรโทคอล 16C3I DSDV

โพรโทคอล 16C3I DSDV หลังการพัฒนาให้รองรับการทำงานแบบหลายเส้นทาง จะถูกเรียกว่า 16C3I Multi-path DSDV (16C3I MDSDV) เพื่อให้โพรโทคอล 16C3I MDSDV สามารถหาได้หลายเส้นทางตามแนวคิดที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 5.1 ได้แบ่งการพัฒนาโพรโทคอลออกเป็น 3 ส่วน คือ 5.2.1 การพัฒนาตารางเส้นทางให้รองรับการหาหลายเส้นทาง 5.2.2 การพัฒนากระบวนการทำงานของโพรโทคอล 16C3I MDSDV และ 5.2.3 วิธีการใช้งานโพรโทคอล 16C3I MDSDV ส่งข้อมูล

### 5.2.1 การพัฒนาตารางเส้นทางด้วยการเพิ่มข้อมูล Last hop

เพื่อให้โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง 16C3I DSDV สามารถเตรียมหลายเส้นทางแบบ Link-disjoint ได้ ฟิวด์ Last hop จะถูกเพิ่มเข้าไปในตารางเส้นทางของโพรโทคอล 16C3I DSDV ดังนั้นฟิวด์ทั้งหมดในตารางเส้นทางและกลุ่มข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล 16C3I MDSDV แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 5-1 ก. และ ภาพประกอบที่ 5-1 ข. ตามลำดับ ตัวอย่างการเก็บข้อมูลในตารางเส้นทางแสดงดังภาพประกอบที่ 5-2 โหนด S เก็บตารางเส้นทางเพื่อไปยังโหนดอื่นในเครือข่าย โหนด S จะมีเส้นทางเพื่อไปยังโหนด A และ B เพียง 1 เส้นทาง และไปยังโหนด D จำนวน 2 เส้นทาง ตามอัลกอริทึมการเลือกเส้นทางดัง Fig. 9 ในบทความ [15]

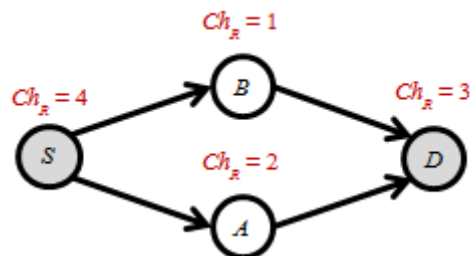
Destination Address	Receive channel	Next hop	Last hop	Hop count	Sequence number	Time
---------------------	-----------------	----------	----------	-----------	-----------------	------

ก. ตารางเส้นทาง

Destination Address (4 bytes)	Receive Channel (1 bytes)	Last hop (4 bytes)	Hop count (4 bytes)	Sequence number (4 bytes)
----------------------------------	------------------------------	-----------------------	------------------------	------------------------------

ข. กลุ่มข้อมูลเส้นทาง

ภาพประกอบที่ 5-1 ฟิวด์ในตารางเส้นทางของโพรโทคอล 16C3I MDSDV และกลุ่มข้อมูลเส้นทาง



ก. เครือข่าย

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number	Time
A	2	A	S	1	20	160
B	1	B	S	1	20	162
D	3	A	A	2	22	160
D	3	B	B	2	22	160
S	4	S	S	0	24	170

ข. ตารางเส้นทาง

ภาพประกอบที่ 5-2 ตัวอย่างตารางเส้นทางของโหนด S

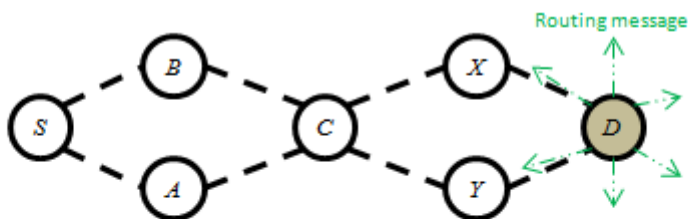
## 5.2.2 กระบวนการทำงานของโพรโทคอล 16C3I MDSDV

โพรโทคอล 16C3I MDSDV จะมีการส่งตารางเส้นทางของตนเองให้โหนดข้างเคียงทราบเป็นประจำทุก 15 วินาที เช่นเดียวกับโพรโทคอล DSDV ดั้งเดิม เพื่อให้โหนดข้างเคียงใช้ในการปรับปรุงตารางเส้นทาง อย่างไรก็ตามโพรโทคอล 16C3I MDSDV มีการเตรียมหลายเส้นทางสำหรับแต่ละโหนดปลายทาง ในหัวข้อ 5.2.2.1 จะอธิบายกระบวนการในการหาหลายเส้นทางเหล่านั้น พร้อมทั้งอธิบายการแก้ไขปัญหาเมื่อเส้นทางขาดการเชื่อมต่อในหัวข้อ 5.2.2.2

### 5.2.2.1 กระบวนการหาหลายเส้นทาง

ขั้นตอนการหาหลายเส้นทาง เราจะตอบ 3 คำถามเหล่านี้ คือ คำถามแรกเมื่อมีโหนดใหม่เข้าร่วมเครือข่าย ทุกโหนดในเครือข่ายสามารถทราบหลายเส้นทางเพื่อไปยังโหนดใหม่ได้อย่างไร คำถามที่สองโหนดใหม่ในเครือข่ายจะได้รับเส้นทางสำหรับแต่ละโหนดปลายทางในเครือข่ายได้อย่างไร และคำถามสุดท้ายแต่ละโหนดในเครือข่ายสามารถทราบเส้นทางใหม่ที่ส่งผ่านโหนดใหม่ในเครือข่ายได้อย่างไร กระบวนการในภาพประกอบที่ 5-3 ก. ถึงภาพประกอบที่ 5-3 จ. (แสดงตัวอย่างโดยละเอียด Install time ของตารางเส้นทาง) แสดงให้เห็นว่าแต่ละโหนดในเครือข่ายสามารถทราบหลายเส้นทางเพื่อไปยังโหนดใหม่ในปลายทางได้อย่างไร กระบวนการในภาพประกอบที่ 5-3 ฉ. แสดงให้เห็นว่าโหนดใหม่ที่เข้าร่วมเครือข่ายได้รับเส้นทางสำหรับแต่ละโหนดปลายทางในเครือข่ายได้อย่างไร และกระบวนการในภาพประกอบที่ 5-3 ช. แสดงให้เห็นว่าโหนดในเครือข่ายจะได้รับเส้นทางที่ผ่านทางโหนดใหม่เพื่อไปยังโหนดอื่นในเครือข่ายได้อย่างไร โดยแต่ละกระบวนการในภาพประกอบที่ 5-3 มีรายละเอียดดังนี้ กำหนดให้ # หมายถึงเส้นทางที่ถูกเลือกให้กระจายออกสู่เครือข่าย แฉวที่แรเงาด้วยสีเทาแสดงถึงเส้นทางที่มีการปรับปรุง ภาพประกอบที่ 5-3 ก. สมมติให้โหนด  $D$  เป็นโหนดใหม่ที่ต้องการเข้าร่วมเครือข่าย ซึ่งในเครือข่ายประกอบด้วยโหนด  $S A B C X$  และ  $Y$  โหนด  $D$  จะกำหนดค่าเริ่มต้นในตารางเส้นทาง แล้วกระจายตารางเส้นทางให้กับโหนดข้างเคียง ภาพประกอบที่ 5-3 ข. โหนด  $X$  และ  $Y$  รับตารางเส้นทางจากโหนด  $D$  และปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเอง พร้อมทั้งกระจายตารางเส้นทางหลังการปรับปรุง ภาพประกอบที่ 5-3 ค. โหนด  $C$  รับตารางเส้นทางสำหรับโหนดปลายทาง  $D$  จากโหนด  $X$  และ  $Y$  แล้วปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเองด้วยการเก็บทั้งสองเส้นทางไว้ในตารางเส้นทาง เนื่องจากทั้งสองเส้นทางมีข้อมูล Next hop และข้อมูล Last hop ที่แตกต่างกัน จากนั้นโหนด  $C$  จะเลือก 1 เส้นทางสำหรับการกระจายเส้นทางต่อ ในที่นี้สมมติให้เส้นทางที่กระจายต่อคือ  $X-D$  ภาพประกอบที่ 5-3 ง. โหนด  $A$  และ  $B$  เพิ่มเส้นทางสำหรับการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง  $D$  ที่ได้รับมาจาก

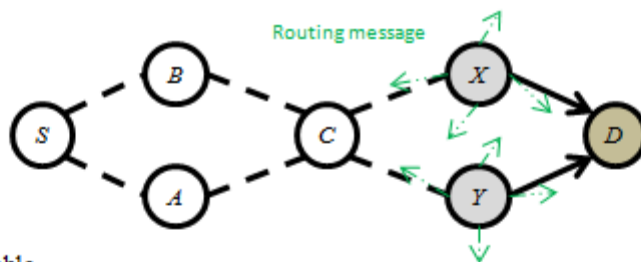
โหนด C ลงในตารางเส้นทาง แล้วกระจายตารางเส้นทางต่อ ภาพประกอบที่ 5-3 จ. โหนด S เลือกเส้นทาง A-C-X-D สำหรับการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง D เนื่องจากเส้นทาง B-C-F-D ซึ่งไม่ได้เลือก มีการส่งข้อมูลผ่านทางโหนด Last hop F เหมือนกัน แต่เส้นทางนี้มาถึงโหนด S ซ้ำกว่าเส้นทางแรก ภาพประกอบที่ 5-3 ฉ. โหนด D จะได้รับเส้นทางของโหนดในเครือข่ายก็ต่อเมื่อโหนด X และ Y กระจายตารางเส้นทางของตนเอง และ ภาพประกอบที่ 5-3 ช. โหนดในเครือข่ายจะได้รับเส้นทางที่ผ่านทางโหนดใหม่เพื่อไปยังโหนดอื่นๆ ในเครือข่ายเมื่อโหนดใหม่ทำการกระจายตารางเส้นทางครั้งถัดไป โดยสังเกตได้ว่าโหนด D จะมีการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณที่ตนเองใช้ในการรับข้อมูลด้วย เนื่องจากเดิมมีการใช้ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณเดียวกันกับโหนด B



Node D routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>D</u>	<u>D</u>	<u>0</u>	<u>2</u>

ก.

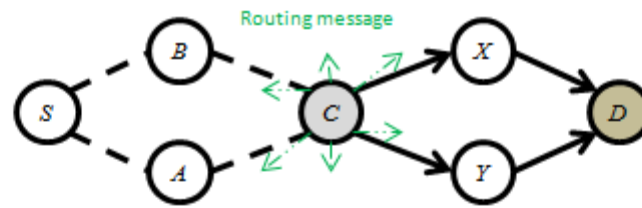


Node X routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>D</u>	<u>X</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>0</u>	<u>14</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>C</u>	<u>B</u>	<u>3</u>	<u>8</u>

Node Y routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>D</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>14</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>0</u>	<u>10</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>C</u>	<u>B</u>	<u>3</u>	<u>8</u>

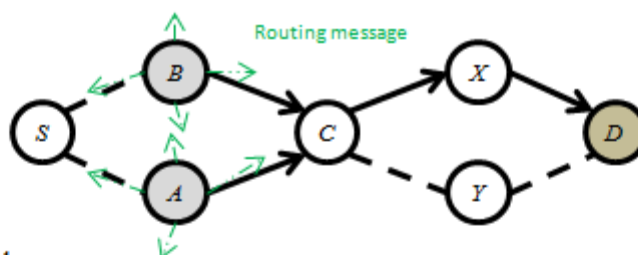


Node C routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>2</u>	<u>2</u>
D	1	Y	Y	2	2
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>X</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>14</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
S	5	A	A	2	8
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>B</u>	<u>B</u>	<u>2</u>	<u>8</u>

Node Y routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>D</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>14</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>0</u>	<u>10</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>C</u>	<u>B</u>	<u>3</u>	<u>8</u>



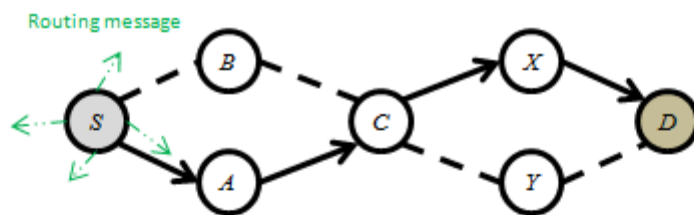
Node A routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>A</u>	<u>A</u>	<u>0</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
B	1	S	S	2	10
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u>3</u>	<u>2</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>14</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>S</u>	<u>A</u>	<u>1</u>	<u>8</u>

Node B routing table

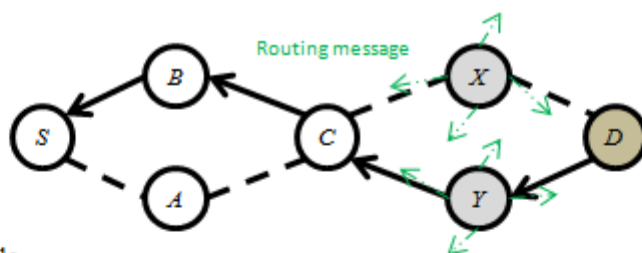
Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
A	2	S	S	2	10
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>B</u>	<u>B</u>	<u>0</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>B</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u>3</u>	<u>2</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>14</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>S</u>	<u>B</u>	<u>1</u>	<u>8</u>



Node *S* routing table

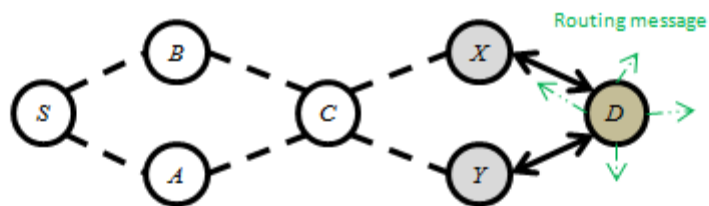
Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>A</u>	<u>S</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>B</u>	<u>S</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>A</u>	<u>A</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
C	3	B	B	2	12
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>A</u>	<u>X</u>	<u>4</u>	<u>2</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>3</u>	<u>14</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>3</u>	<u>10</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>0</u>	<u>8</u>

0.

Node *D* routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>X</u>	<u>C</u>	<u>3</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>3</u>	<u>10</u>
C	3	X	X	2	12
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>1</u>	<u>D</u>	<u>D</u>	<u>0</u>	<u>2</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>X</u>	<u>D</u>	<u>1</u>	<u>16</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>Y</u>	<u>D</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>Y</u>	<u>B</u>	<u>4</u>	<u>8</u>

n.



Node X routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>6</u>	<u>D</u>	<u>X</u>	<u>1</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>0</u>	<u>16</u>
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
Y	5	D	D	2	12
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>3</u>	<u>8</u>

Node Y routing table

Destination	Receive channel	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>2</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>1</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>C</u>	<u>3</u>	<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>6</u>	<u>D</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>4</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>16</u>
X	4	D	D	2	16
<u>Y</u>	<u>5</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>7</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>3</u>	<u>8</u>

ข.

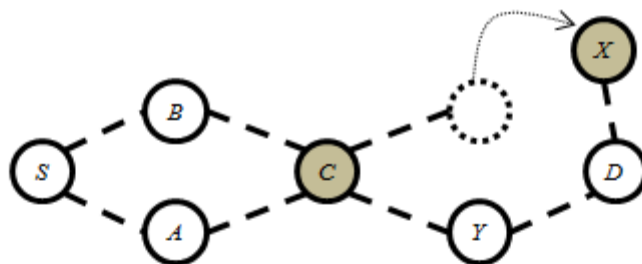
ภาพประกอบที่ 5-3 กระบวนการหาเส้นทางของโปรโตคอล MPMCM DSDV

### 5.2.2.2 กระบวนการซ่อมบำรุงเส้นทาง

เราจะใช้ประโยชน์จากการมีอยู่หลายเส้นทางในโพรโทคอล 3P16C3I DSDV เพื่อซ่อมบำรุงเส้นทางที่เกิดความเสียหาย เมื่อโหนดไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางได้ (Link failure) ไม่ว่าจะจากการหมดอายุของเส้นทาง (Time out) หรือจากการตรวจพบของชั้นควบคุมการใช้คือ โหนดที่ตรวจพบ Link failure จะลบเส้นทางที่ใช้โหนดที่ไม่สามารถส่งข้อมูลผ่านได้เป็นทอดแรกในการส่งข้อมูลออกจากตารางเส้นทาง และกระจายข้อมูลเส้นทางซึ่งประกอบด้วยเส้นทางที่ล้มเหลวออกไปให้กับโหนดข้างเคียง โหนดที่ได้รับข้อมูลเส้นทางจะตรวจสอบตารางเส้นทางของตนเองและลบข้อมูลเส้นทางที่มีข้อมูล Last hop เดียวกัน และกระจายข้อมูลเส้นทางหลังการปรับปรุงออกไปในเครือข่าย โดยวิธีการนี้ ทุกโหนดจะลบเส้นทางที่ผ่านทางโหนดที่พบว่าเกิด Link failure เพื่อไปยังโหนดปลายทาง สามารถแสดงตัวอย่างกระบวนการปรับปรุงเส้นทางเมื่อเส้นทางเชื่อมต่อเกิดความเสียหายดังภาพประกอบที่ 5-4 (แสดงตัวอย่างโดยละฟิลด์ Receive channel และ Install time ของตารางเส้นทาง) สมมติให้โหนด  $X$  เคลื่อนที่ออกจากโหนด  $C$  จนโหนด  $X$  และโหนด  $C$  อยู่นอกระยะสัญญาณวิทยุของกันและกัน ภาพประกอบที่ 5-4 ก. โหนด  $X$  และ  $C$  จะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเอง โดยโหนด  $X$  จะลบเส้นทางของโหนดปลายทางที่ใช้โหนด  $C$  เป็น Next hop ด้วยการกำหนดให้ Metric เป็น  $\infty$  (แสดงเส้นทางที่ถูกลบด้วยการตรวจสอบของโหนด  $X$  ด้วยแถวที่แรเงาด้วยสีจาง) ในทำนองเดียวกันโหนด  $C$  ก็จะลบเส้นทางของโหนดปลายทางที่ใช้โหนด  $X$  เป็น Next hop (แสดงเส้นทางที่ถูกลบด้วยการตรวจสอบของโหนด  $C$  ด้วยแถวที่แรเงาด้วยสีเข้ม) ภาพประกอบที่ 5-4 ข. โหนด  $X$  กระจายข้อมูลเส้นทางซึ่งประกอบด้วยข้อมูลเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ โหนด  $D$  ได้รับตารางเส้นทาง และปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเอง ด้วยการลบข้อมูลเส้นทางในตารางเส้นทางที่ตรงกับข้อมูลเส้นทางในกลุ่มข้อมูลเส้นทางที่รับได้ ภาพประกอบที่ 5-4 ค. โหนด  $C$  กระจายข้อมูลเส้นทางซึ่งประกอบด้วยข้อมูลเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ โหนดข้างเคียง  $A$ ,  $B$  และ  $Y$  ได้รับข้อมูลเส้นทาง แล้วปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเอง ด้วยการลบข้อมูลเส้นทางในตารางเส้นทางที่ตรงกับข้อมูลเส้นทางในกลุ่มข้อมูลเส้นทางที่รับได้ ภาพประกอบที่ 5-4 ง. โหนด  $D$  ซึ่งได้ปรับปรุงตารางเส้นทางด้วยการลบเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ จะกระจายตารางเส้นทางหลังการปรับปรุงเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ โหนดข้างเคียง  $Y$  ได้รับข้อมูลเส้นทาง และปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเอง ด้วยการลบข้อมูลเส้นทางในตารางเส้นทางที่ตรงกับข้อมูลเส้นทางในกลุ่มข้อมูลเส้นทางที่รับได้ ภาพประกอบที่ 5-4 จ. ในทำนองเดียวกันโหนด  $Y$  ซึ่งได้ปรับปรุงตารางเส้นทางด้วยการลบเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ ก็จะกระจายตารางเส้นทางหลังการปรับปรุงตารางเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ โหนดข้างเคียง  $D$  และ  $X$  ได้รับข้อมูลตารางเส้นทาง และพบว่าเส้นทางเหล่านั้นได้ถูกลบและปรับปรุงตารางเส้นทางไปแล้ว โหนด  $D$  และ  $X$  ก็จะละทิ้ง

ข้อมูลที่ได้รับ ภาพประกอบที่ 5-4 จ. โหนด  $A$  และ  $B$  ซึ่งได้ปรับปรุงตารางเส้นทางด้วยการลบเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ ก็จะกระจายตารางเส้นทางหลังการปรับปรุงเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ โหนดข้างเคียง  $S$  ได้รับข้อมูลเส้นทาง และปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเอง ด้วยการลบข้อมูลเส้นทางในตารางเส้นทางที่ตรงกับข้อมูลเส้นทางในกลุ่มข้อมูลเส้นทางที่รับได้ อัลกอริธึมการลบเส้นทาง เมื่อเส้นทางขาดการเชื่อมต่อแสดงได้ดังอัลกอริธึมที่ 5-1

เพื่อเพิ่มความอดทนต่อความผิดพลาดในการส่งข้อมูล ถ้าโหนดใช้เส้นทางที่เกิดปัญหาเพื่อส่งข้อมูล โหนดที่ค้นพบจุดเชื่อมต่อที่ล้มเหลวจะใช้เส้นทางสำรองที่ได้เตรียมไว้เพื่อส่งข้อมูล ตัวอย่างการปรับปรุงเส้นทางเมื่อการเชื่อมต่อของเส้นทางขาดด้วยการแจ้ง Link failure จากชั้นควบคุมการใช้สื่อแสดงดังภาพประกอบที่ 5-5 (แสดงตัวอย่างโดยละฟิลด์ Receive channel และ Install time ของตารางเส้นทาง) สมมติว่าปกติโหนด  $S$  จะส่งข้อมูลไปยังโหนด  $D$  ผ่านเส้นทาง  $S-A-C-X-D$  ภาพประกอบที่ 5-5 ก. โหนด  $X$  เคลื่อนที่ออกห่างจากโหนด  $C$  จนโหนด  $X$  และโหนด  $C$  อยู่บนระยะสัญญาณวิทยุของกันและกัน โหนด  $C$  จะลบเส้นทางที่มีโหนด  $X$  เป็น Next hop ออกจากรายการเส้นทาง ซึ่งรวมถึงเส้นทางเพื่อไปยังโหนด  $D$  ที่ผ่านทางโหนด  $X$  เพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนด  $D$  โหนด  $C$  จะใช้เส้นทางที่มีโหนด  $Y$  เป็น Next hop ในการส่งข้อมูล ภาพประกอบที่ 5-5 ข. พร้อมกันนี้ โหนด  $C$  จะกระจายข้อมูลเส้นทางที่ขาดออกให้กับโหนดข้างเคียงทราบ ภาพประกอบที่ 5-5 ค. โหนดข้างเคียงที่ได้รับข้อมูลตารางเส้นทางที่ขาดก็จะกระจายต่อไปทั่วทั้งเครือข่าย สามารถแสดงอัลกอริธึมการสลับเส้นทาง เมื่อเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่เกิดปัญหาได้ดังอัลกอริธึมที่ 5-2



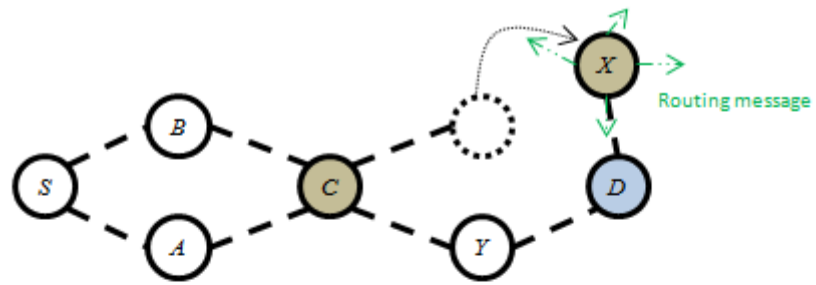
Node C routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>∞</u>	<u>5</u>
D	Y	Y	2	4
<u>X</u>	<u>X</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>17</u>
<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
S	A	A	2	8
<u>S</u>	<u>B</u>	<u>B</u>	<u>2</u>	<u>8</u>

Node X routing table

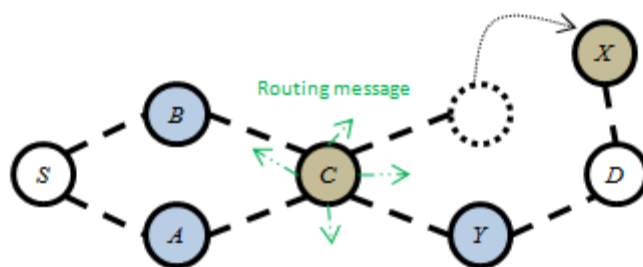
Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>11</u>
<u>B</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>13</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u>∞</u>	<u>13</u>
<u>D</u>	<u>D</u>	<u>X</u>	<u>1</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>0</u>	<u>16</u>
<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>13</u>
Y	D	D	2	12
<u>S</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>∞</u>	<u>8</u>

n.

Node *D* routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>X</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>11</u>
<u>B</u>	<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>3</u>	<u>12</u>
<i>C</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	∞	13
<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>D</u>	<u>D</u>	<u>0</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>X</u>	<u>D</u>	<u>1</u>	<u>16</u>
<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>D</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>Y</u>	<u>B</u>	<u>4</u>	<u>8</u>

U.

Node *A* routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	0	10
<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	2	12
<i>B</i>	<i>S</i>	<i>S</i>	2	10
<i>C</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	1	12
<i>D</i>	<i>C</i>	<i>X</i>	3	4
<i>X</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	$\infty$	17
<i>Y</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	2	12
<i>S</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	1	8

Node *B* routing table

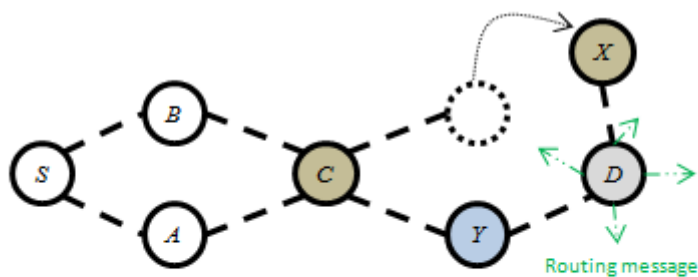
Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<i>A</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	2	10
<i>A</i>	<i>S</i>	<i>S</i>	2	10
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	0	12
<i>C</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	1	12
<i>D</i>	<i>C</i>	<i>X</i>	3	4
<i>X</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	$\infty$	17
<i>Y</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	2	12
<i>S</i>	<i>S</i>	<i>B</i>	1	8



Node Y routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>D</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>250</u>	<u>17</u>
X	D	D	2	16
<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>3</u>	<u>8</u>

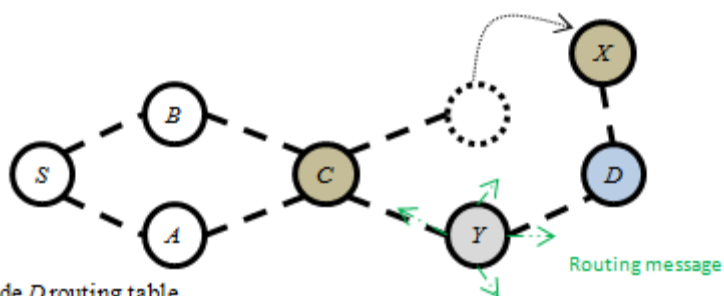
ก.



Node Y routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>D</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>17</u>
X	D	D	2	16
<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>3</u>	<u>8</u>

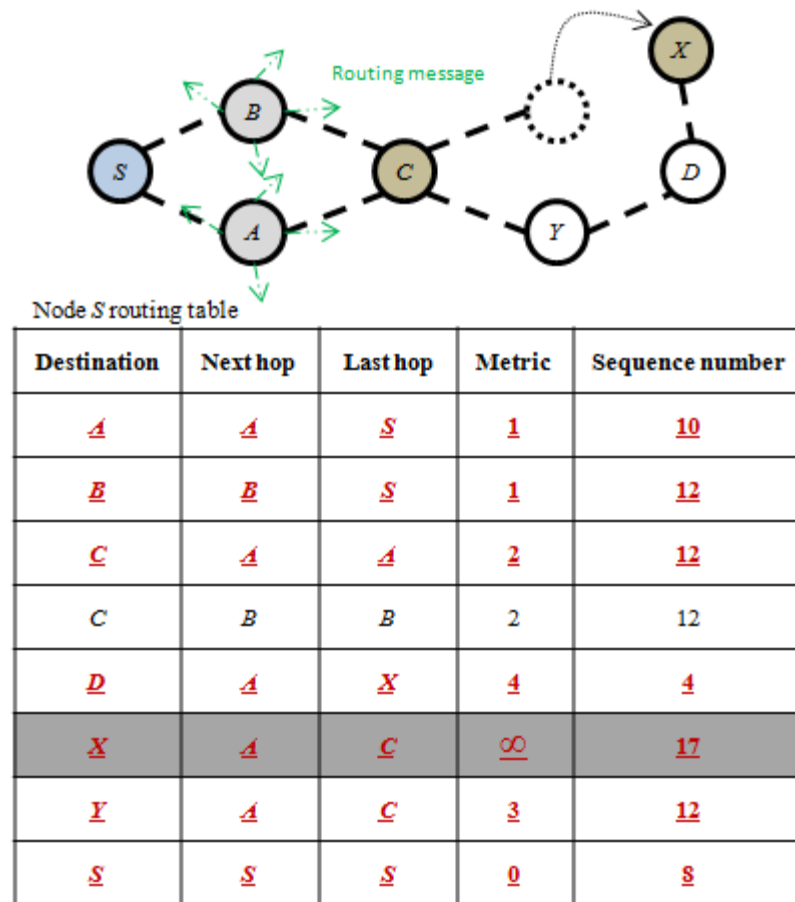
ข.

Node *D* routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>X</u>	<u>C</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>11</u>
<u>B</u>	<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>3</u>	<u>12</u>
<i>C</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	$\infty$	13
<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>D</u>	<u>D</u>	<u>0</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>X</u>	<u>D</u>	<u>1</u>	<u>16</u>
<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>D</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>Y</u>	<u>B</u>	<u>4</u>	<u>8</u>

Node *X* routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>11</u>
<u>B</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>13</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>13</u>
<u>D</u>	<u>D</u>	<u>X</u>	<u>1</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>0</u>	<u>16</u>
<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>13</u>
<i>Y</i>	<i>D</i>	<i>D</i>	2	12
<u>S</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>8</u>

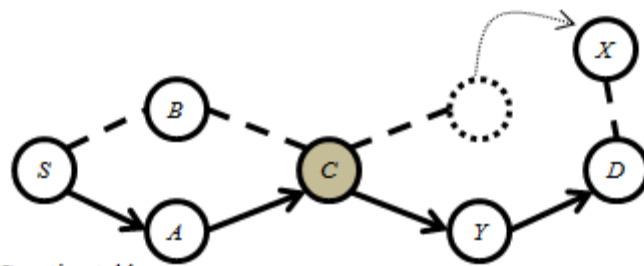


น.

ภาพประกอบที่ 5-4 การปรับปรุงเส้นทางเมื่อเส้นทางขาดการเชื่อมต่อ

อัลกอริทึมที่ 5-1 การลบเส้นทางเมื่อพบเส้นทางขาดการเชื่อมต่อ กำหนดให้  $next\_hop_{link\_fail}$  คือข้อมูล Next hop ตัวแปร  $path\_lost$  คือเส้นทางที่ขาดการเชื่อมต่อ และ  $other\_path$  คือเส้นทางสำรอง

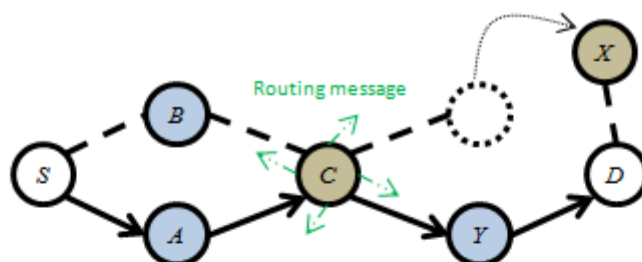
- 
- 1: **if** ( $link\_fail$ ) **then** { /\* Route time out \*/ }
  - 2:      $path\_lost := get\_path(next\_hop_{link\_fail})$ ;
  - 3:     delete  $path\_lost$ ;
  - 4:      $other\_path := get\_path(destination_{link\_fail})$ ;
  - 5:     **if** ( $other\_path$  is not available) **then** { /\* Don't have other path \*/ }
  - 6:          $path\_advertise := get\_path\_advertise(next\_hop_{link\_fail})$ ;
  - 7:         advertise  $path\_advertise$ ;
  - 8:     **end if**
  - 9: **end if**
-



Node C routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>∞</u>	<u>5</u>
D	Y	Y	2	4
<u>X</u>	<u>X</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>17</u>
<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
S	A	A	2	8
<u>S</u>	<u>B</u>	<u>B</u>	<u>2</u>	<u>8</u>

n.



Node A routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>A</u>	<u>A</u>	<u>0</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
B	S	S	2	10
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>17</u>
<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>S</u>	<u>A</u>	<u>1</u>	<u>8</u>

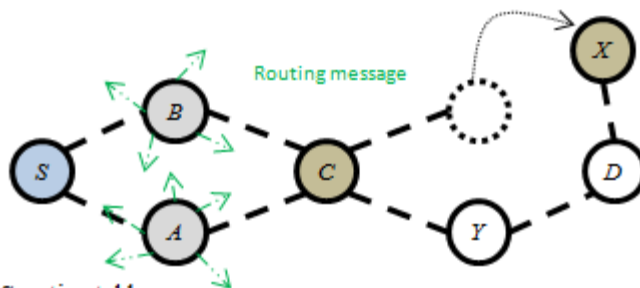
Node B routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
A	S	S	2	10
<u>B</u>	<u>B</u>	<u>B</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>B</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>C</u>	<u>X</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u><math>\infty</math></u>	<u>17</u>
<u>Y</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>S</u>	<u>S</u>	<u>B</u>	<u>1</u>	<u>8</u>

Node Y routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
<u>C</u>	<u>C</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>D</u>	<u>D</u>	<u>Y</u>	<u>1</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>17</u>
X	D	D	2	16
<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>Y</u>	<u>0</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>3</u>	<u>8</u>

ป.



Node S routing table

Destination	Next hop	Last hop	Metric	Sequence number
<u>A</u>	<u>A</u>	<u>S</u>	<u>1</u>	<u>10</u>
<u>B</u>	<u>B</u>	<u>S</u>	<u>1</u>	<u>12</u>
<u>C</u>	<u>A</u>	<u>A</u>	<u>2</u>	<u>12</u>
C	B	B	2	12
<u>D</u>	<u>A</u>	<u>X</u>	<u>4</u>	<u>4</u>
<u>X</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>∞</u>	<u>17</u>
<u>Y</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>3</u>	<u>12</u>
<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>0</u>	<u>8</u>

ค.

ภาพประกอบที่ 5-5 การปรับปรุงเส้นทางเมื่อการเชื่อมต่อของเส้นทางขาดด้วยการแจ้ง Link failure จากชั้นควบคุมการใช้สื่อ

อัลกอริทึมที่ 5-2 การสลับไปใช้เส้นทางอื่น เมื่อเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่เกิดปัญหา โดยกำหนดให้  $d$  หมายถึงโหนดปลายทาง  $last\_hop_{data_k}$  และ  $data_k\_mac\_callback_{data_k}$  หมายถึงข้อมูล Last hop และการแจ้งเตือนของชั้นควบคุมการใช้สื่อ สำหรับ  $data_k$   $path\_lost$  หมายถึงเส้นทางที่เกิดปัญหา  $other\_path$  หมายถึงเส้นทางสำรองสำหรับการส่งข้อมูล

---

```

1:  if ( $mac\_callback_{data\_link\_fail}$ ) then {/* MAC layer cannot sent data successfully */}
2:     $path\_lost := get\_path(next\_hop_{data\_link\_fail});$ 
3:    if ( $path\_lost_{receive\_channel} \neq data_{link\_fail}_{receive\_channel}$ ) then {/* Wrong receive channel */}
4:      send  $data_{link\_fail}$  to  $path\_lost$  with true receive channel
5:    Else
6:      delete  $path\_lost$ ;
7:       $other\_path := get\_path(destination_{link\_fail});$ 
8:      if ( $other\_path$  is not available) then {/* Don't have other path */}
9:         $path\_advertise := get\_path\_advertise(next\_hop_{link\_fail});$ 
10:       advertise  $path\_advertise$ ;
11:      end if
12:     if ( $mac\_callback_{data\_link\_fail}$ ) then {/* MAC layer cannot sent data successfully */}
13:       if ( $other\_path$  is available) then {/* Have other path */}
14:         send  $data_{link\_fail}$  to  $other\_path$ ;
15:       Else
16:         drop  $data_{link\_fail}$ ;
17:       end if
18:     end if
19:   end if
20: end if

```

---

### 5.2.3 วิธีการส่งข้อมูลด้วยโพรโทคอล 16C3I MDSDV

เมื่อเครือข่ายต้องการส่งข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค MDC ด้วยโพรโทคอล 16C3I MDSDV โหนดต้นทางจะใช้ทั้ง 2 Data interfaces ในการขนส่งข้อมูล ในขณะที่เดียวกันโหนดปลายทางก็จะใช้ทั้ง 2 Data interfaces ในการรับข้อมูล นอกจากนี้โหนดปลายทางจะใช้ 2

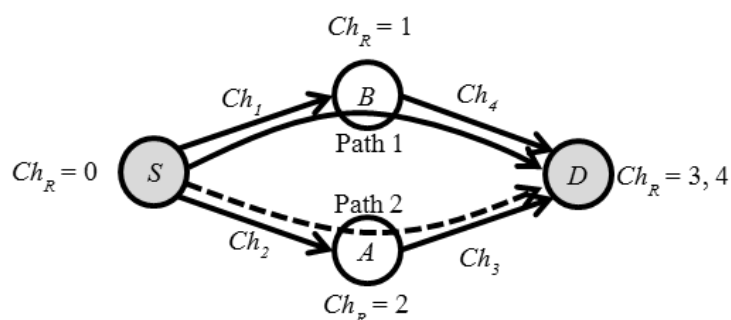
ช่องสัญญาณซึ่งไม่ซ้ำกันบน 2 Data interface สำหรับรับข้อมูลในแต่ละเส้นทาง ดังนั้น โหนดปลายทางจะมี 2 ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล ในการส่งข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค MDC ที่มีการแยกวิดีโอออกเป็น 2 ส่วนย่อย โหนดต้นทางจะส่งข้อมูลแต่ละส่วนผ่านเส้นทางและ Interface ที่แตกต่างกันไปยังโหนดปลายทาง ถ้าโหนดต้นทางมีเพียงเส้นทางเดียวเพื่อไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะส่งข้อมูลทั้งสองส่วนผ่านทางเส้นทางเดียวกัน ข้อมูล Last hop ขนาด 4 ไบต์และหมายเลขระบุเส้นทาง (Path identifier: Path ID) ขนาด 1 ไบต์ จะถูกเพิ่มลงในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูล (Packet header) ข้อมูล Last hop จะถูกใช้โดยโหนดระหว่างทางเพื่อเลือกเส้นทางในการส่งต่อข้อมูล เมื่อโหนดระหว่างทางที่สามารถติดต่อกับโหนดปลายทางได้โดยตรงได้รับข้อมูล โหนดจะตรวจสอบ Path ID เพื่อเลือกช่องสัญญาณที่จะใช้ในการส่งข้อมูล โดยถ้า Path ID เท่ากับ 1 โหนดจะใช้ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณที่ 2 ของโหนดปลายทางในการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง สิ่งนี้จะช่วยหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลในกรณีที่โหนดต้นทางมีเพียงเส้นทางเดียวเพื่อส่งข้อมูลมายังโหนดปลายทาง ซึ่งโหนดปลายทางนั้นกำลังทำหน้าที่เป็นโหนดส่งต่อข้อมูลด้วย ในกรณีที่ Path ID เท่ากับ 2 โหนดจะใช้ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณที่ 1 ของโหนดปลายทางในการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง แสดงตัวอย่างการส่งข้อมูลผ่าน 2 เส้นทางพร้อมกันดังภาพประกอบที่ 5-6 ก. เมื่อโหนด  $S$  ส่งข้อมูลหาโหนด  $D$  ผ่าน 2 เส้นทางพร้อมกัน คือ  $S-A-D$  และ  $S-B-D$  โหนด  $S$  จะระบุในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลของเส้นทางที่ 1 ให้มี Last hop คือ  $A$  และ Path ID คือ 1 และระบุในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลของเส้นทางที่ 2 ให้มี Last hop คือ  $B$  และ Path ID คือ 2 แล้วส่งข้อมูลในเส้นทางแรกผ่านทางช่องสัญญาณ  $Ch_2$  ให้กับโหนด  $A$  ซึ่ง  $Ch_2$  เป็นช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนด  $A$  และเส้นทางที่สองด้วยช่องสัญญาณ  $Ch_1$  ไปให้กับโหนด  $B$  โหนด  $A$  จะส่งข้อมูลต่อไปยังโหนดปลายทาง  $D$  ผ่านทางช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของปลายทาง  $D$  นั่นคือ  $Ch_4$  (ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณที่ 2 ของโหนดปลายทาง  $D$ ) ส่วนโหนด  $B$  จะส่งข้อมูลต่อไปยังโหนดปลายทาง  $D$  ผ่านทางช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณที่ 1 ของโหนดปลายทาง  $D$  ซึ่งคือ  $Ch_3$

สำหรับโหนดต้นทางจะมีการใช้งานช่องสัญญาณควบคุมสำหรับการรับข้อมูล เนื่องจากในการส่งข้อมูลเรากำหนดให้โหนดต้นทางใช้งานทั้ง 2 Data interface สำหรับการส่งข้อมูล ดังนั้นเมื่อมีโหนดต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดต้นทาง โหนดต้นทางจะไม่สามารถรับข้อมูลผ่าน  $If_r$  ได้ โพรโทคอล 16C3I MDSDV จึงกำหนดให้โหนดต้นทางสามารถรับข้อมูลผ่านทางช่องสัญญาณควบคุม สำหรับโหนดปลายทางจะมีการใช้ช่องสัญญาณควบคุมสำหรับการส่งข้อมูล เนื่องจากในการรับข้อมูลโพรโทคอล 16C3I MDSDV กำหนดให้โหนดปลายทางใช้งานทั้ง 2 Data interface สำหรับการรับข้อมูล ดังนั้นเมื่อโหนดปลายทางต้องทำหน้าที่ในการส่งต่อข้อมูลไปยัง

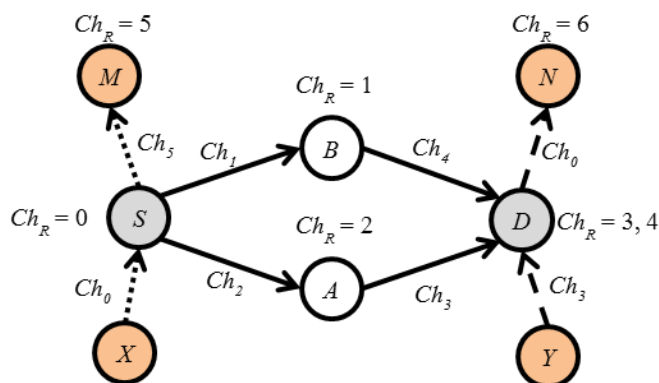


โหนดอื่น โหนดปลายทางจะไม่สามารถใช้  $H_T$  ในการส่งข้อมูลได้ โพรโทคอล 16C3I MDSDV จึงกำหนดให้โหนดปลายทางสามารถส่งข้อมูลผ่านทางช่องสัญญาณควบคุม พิจารณากรณีที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางทำหน้าที่เป็นโหนดส่งต่อข้อมูลดังภาพประกอบที่ 5-6 ข. กรณีที่โหนดต้นทาง  $S$  ต้องทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล โดยโหนด  $X$  จะส่งข้อมูลหาโหนด  $S$  และโหนด  $S$  จะส่งข้อมูลต่อให้โหนด  $M$  โหนด  $X$  จะใช้ช่องสัญญาณควบคุมในการส่งข้อมูลไปหาโหนด  $S$  โหนด  $S$  จะส่งข้อมูลต่อไปให้โหนด  $M$  โดยใช้ช่องสัญญาณรับข้อมูลของโหนด  $M$  นั่นคือ  $Ch_5$  และกรณีที่โหนดปลายทาง  $D$  ต้องทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล โดยโหนด  $Y$  ส่งข้อมูลหาโหนด  $D$  และโหนด  $D$  จะส่งต่อข้อมูลให้โหนด  $N$  โหนด  $Y$  จะส่งข้อมูลไปให้โหนด  $D$  โดยใช้ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนด  $D$  นั่นคือ  $Ch_3$  (ช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณแรก) โหนด  $D$  จะใช้ช่องสัญญาณควบคุมในการส่งข้อมูลต่อไปยังโหนด  $N$  แสดงอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลได้ดังอัลกอริทึมที่ 5-3 และอัลกอริทึมที่ 5-4 แสดงการเลือก Interface สำหรับการส่งข้อมูล อัลกอริทึมที่ 5-5 แสดงการปรับปรุงเทคนิค IRCB สำหรับการส่งข้อมูลแบบ MDC สำหรับโหนดต้นทางจะไม่มี การพิจารณาเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล เนื่องจากโหนดต้นทางใช้ช่องสัญญาณควบคุม ( $Ch_p$ ) ในการรับข้อมูล และโหนดข้างเคียงโหนดต้นทางก็จะไม่นำช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนดต้นทางมาพิจารณาในการเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลเช่นกัน สำหรับโหนดปลายทางจะมีการพิจารณาเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลทั้ง 2 Interfaces และทั้ง 2 Interfaces ต้องใช้ช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน

นอกจากการใช้งานโพรโทคอล 16C3I MDSDV สำหรับการขนส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC แล้ว หลายเส้นทางของโพรโทคอลนี้ยังสามารถใช้เป็นเส้นทางสำรองเมื่อเส้นทางหลักเกิดความเสียหายได้อีกด้วย ซึ่งในกรณีนี้โหนดต้นทางและโหนดปลายทางไม่จำเป็นต้องใช้ทั้ง 2 Data interfaces ในการขนส่งข้อมูล นอกจากนี้ในการขนส่งข้อมูลระบุเพียงแค่ข้อมูล Last hop ก็เพียงพอสำหรับการขนส่งข้อมูลแล้ว



ก. การเลือกใช้ช่องสัญญาณเมื่อโหนดต้นทางส่งข้อมูลผ่านสองเส้นทางพร้อมกัน



ข. การเลือกใช้ช่องสัญญาณกรณีที่มีโหนดต้นทางและโหนดปลายทางต้องทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล  
ภาพประกอบที่ 5-6 การส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย

อัลกอริทึมที่ 5-3 การเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลที่โหนด  $i$  ตัวแปร  $s$  คือโหนดต้นทาง  $d$  คือโหนดปลายทาง  $path_1$  คือเส้นทางที่สั้นและเร็วที่สุดสำหรับโหนดปลายทาง  $d$   $path_2$  คือเส้นทางที่ดีที่สุดอันดับที่สองสำหรับโหนดปลายทาง  $d$   $path\_id_{data_k}$  และ  $last\_hop_{data_k}$  คือ Path id และ Last hop ที่ระบุมาใน  $data_k$  ตามลำดับ

---

```

1:  if ( $i = s$ ) then {/* current node is the source */}
2:     $path_1 :=$  get_path1( $d$ );
3:     $Path_2 :=$  get_path2( $d$ );
4:    if ( $path\_id_{data_k} = 1$ ) then {/* neighbor is the destination */}
5:      send  $data_k$  to  $path_1$ ;
6:    Else
7:      if ( $path_1 = path_2$ ) then {/* source has only one path */}
8:        send  $data_k$  to  $path_1$ ;
9:      else {/* source has more paths */}
10:        send  $data_k$  to  $path_2$ ;
11:      end if
12:    end if
13:  else {/* current node is relay node */}
14:     $path_r :=$  get_path( $d, last\_hop_{data_k}$ );
15:    send  $data_k$  to  $path_r$ ;
16:  end if

```

---

**อัลกอริทึมที่ 5-4** การเลือก Interface สำหรับการส่งข้อมูลที่โหนด  $i$  กำหนดให้  $path\_id_{data_k}$  และ  $last\_hop_{data_k}$  หมายถึง Path id และ Last hop ที่ระบุมาใน  $data_k$  ตามลำดับ ตัวแปร  $s$  หมายถึงโหนดต้นทาง ตัวแปร  $d$  หมายถึงโหนดปลายทาง  $Ch_{r_1}^{next\_hop}$  และ  $Ch_{r_2}^{next\_hop}$  หมายถึงช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ของโหนดถัดไปตามลำดับ  $Ch_0$  หมายถึงช่องสัญญาณควบคุม  $If_0$   $If_R$  และ  $If_T$  หมายถึง Interface สำหรับส่งรับข้อมูลเส้นทาง รับข้อมูล และส่งข้อมูลตามลำดับ

---

```

1:  if ( $Ch_{r_1}^{next\_hop} = Ch_0$ ) then {/* next hop is the source */}
2:    use  $If_0$  with  $Ch_0$  to send  $data_k$ ;
3:  else if ( $i = d$ ) then {/* current node is the destination */}
4:    use  $If_0$  with  $Ch_0$  to send  $data_k$ ;
5:  else if ( $i = s$ ) then {/* current node is the source */}
6:    if ( $path\_id_{data_k} = 1$ ) then {/* path1 */}
7:      if ( $Ch_{r_1}^{next\_hop} = Ch_{If_R}^s$ ) then {/* next hop uses the same channel as some data in  $If_R$  */}
8:        use  $If_R$  with  $Ch_{r_2}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;
9:      Else
10:        use  $If_T$  with  $Ch_{r_2}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;
11:      end if
12:    else if ( $path\_id_{data_k} = 2$ ) then {/* path2 */}
13:      if ( $Ch_{r_1}^{next\_hop} = Ch_{If_T}^s$ ) then {/* next hop uses the same channel as some data in  $If_T$  */}
14:        use  $If_T$  with  $Ch_{r_2}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;
15:      Else
16:        use  $If_R$  with  $Ch_{r_2}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;
17:      end if
18:    end if
19:  else if ( $next\_hop_{data_k} = d$ ) and ( $path\_id_{data_k} = 2$ ) then {/* next hop is the destination and path
    id is 2 */}
20:    if ( $Ch_{r_2}^{next\_hop} = Ch_{r_1}^s$ ) then {/* next hop use same receive channel */}
21:      use  $If_R$  with  $Ch_{r_2}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;

```

---

---

```

22:   Else
23:     use  $If_T$  with  $Ch_{r_2}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;
24:   end if
25:   else if ( $Ch_{r_1}^{next\_hop} = Ch_{r_1}^s$ ) then {/* next hop use same receive channel */}
26:     use  $If_R$  with  $Ch_{r_1}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;
27:   Else
28:     use  $If_T$  with  $Ch_{r_1}^{next\_hop}$  to send  $data_k$ ;
29:   end if

```

---

**อัลกอริทึมที่ 5-5** การพิจารณาเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลของโหนด  $i$  ก่อนการกระจายตารางเส้นทาง ตัวแปร  $s$  หมายถึงโหนดต้นทาง (Source) ตัวแปร  $d$  หมายถึงโหนดปลายทาง (Destination) ตัวแปร  $N_k$  หมายถึงจำนวนของโหนดภายในระยะทาง 5 ฮอปของโหนด  $i$  ที่ใช้ช่องสัญญาณ  $Ch_k$  เป็นช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล โดย  $Ch_k \neq Ch_0$  ตัวแปร  $N_{avg}$  หมายถึงจำนวนเฉลี่ยของโหนดต่อ 1 ช่องสัญญาณ ตัวแปร  $p$  หมายถึงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนช่องสัญญาณ โดย  $p = (N_k - N_{avg}) / N_k$  ตัวแปร  $S_1$  หมายถึงกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีการใช้งานน้อยกว่า  $N_{avg}$  และ  $S_2$  หมายถึงกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีการใช้งานน้อยกว่า  $N_{avg}$  แต่ไม่รวมกลุ่มของช่องสัญญาณที่มีโหนดภายในระยะทาง 1 ฮอปของโหนด  $i$  ใช้งานเป็นช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล

---

```

1:   if ( $i \neq s$ ) then
2:     if ( $N_k \geq N_{avg}$ ) and ( $N_k \neq 1$ ) then
3:       if ( $S_2 \neq \text{NULL}$ ) then
4:         if ( $i \neq d$ ) then
5:           switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_2$  with  $p$ 
6:         else
7:           switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_2$  with  $p$  by the switched channel does not use
           on other interface
8:         end if
9:       else
10:        if ( $i \neq d$ ) then
11:          switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_1$  with  $p$ 

```

---

---

```

12:      else
13:          switch  $Ch_R$  to a random channel in  $S_I$  with  $p$  by the switched channel does not use
              on other interface
14:      end if
15:  end if
16: end if
17: end if

```

---

### 5.3 วัตถุประสงค์การทดลอง

การศึกษาศมรรถนะของการส่งวิดีโอ MPEG4 โดยการใช้และไม่ใช้เทคนิค MDC บนเครือข่ายไร้สายแบบหลายทอด ด้วยโพรโทคอล 16C3I DSDV และ 16C3I MDSDV ซึ่งได้ทำการศึกษาทั้งทางด้านสมรรถนะของเครือข่าย และสมรรถนะทางด้านคุณภาพวิดีโอ

### 5.4 การออกแบบการทดลอง

โปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 เวอร์ชัน 2.34 ด้วยการขยายให้รองรับการทำงานแบบ MCMI [37] ถูกใช้ในการทดลอง แผนการ 16C3I MDSDV ที่นำเสนอถูกใช้ในการทดลอง EvalVid ถูกใช้ในการประเมินและวิเคราะห์คุณภาพของวิดีโอที่ทำการจำลองการส่งบน NS-2 แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 5-7 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองของแต่ละตัววัดได้มาจากการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ยิ่งกว่านั้นแต่ละผลการทดลองเฉลี่ยถูกแสดงด้วย 95% c.i.

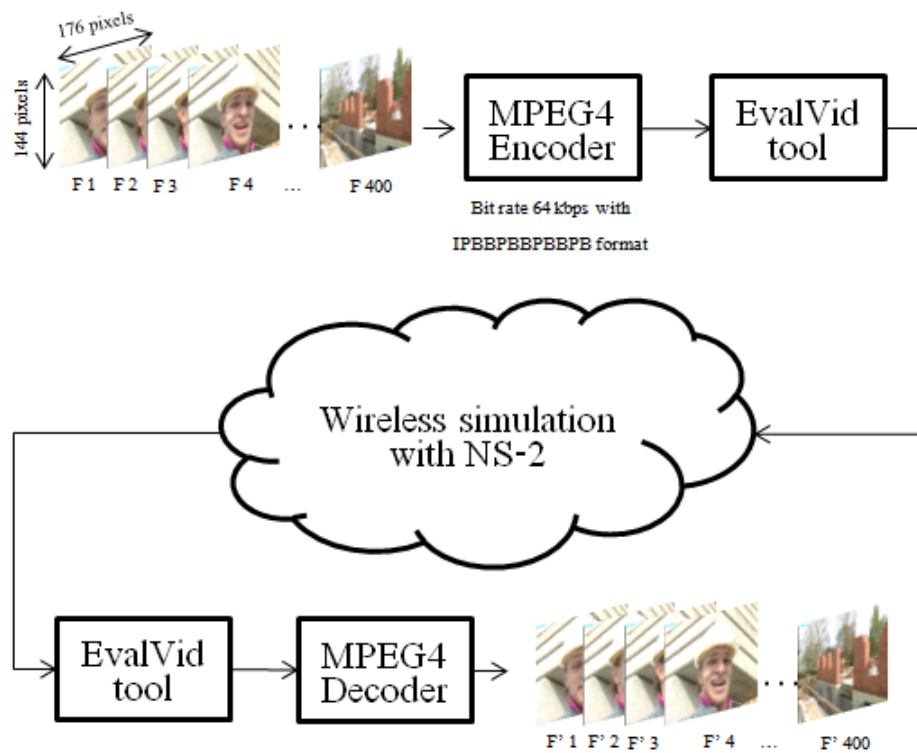
วิดีโอที่ใช้ในการทดลองนี้มีชื่อว่า Foreman [38] ก่อนเข้ากระบวนการบีบอัดวิดีโอ วิดีโอ Foreman อยู่ในรูปแบบ YUV ประกอบด้วยเฟรมทั้งหมด 400 เฟรม แต่ละเฟรมมีความละเอียด 176x144 จุดภาพ วิดีโอนี้มีอัตราการแสดงผลเฟรมอยู่ที่ 25 เฟรมต่อวินาที ในกรณีการส่งข้อมูลแบบ SDC วิดีโอ Foreman YUV นี้ได้รับการบีบอัดวิดีโอเป็นรูปแบบ MPEG4 ที่อัตรา 64000 บิตต่อวินาที ด้วยโปรแกรม X264 [38] กำหนดให้ MPEG4 ที่เข้ารหัสอยู่ในรูปแบบเฟรม IPBBPBBPBBPB และมี GOP เท่ากับ 12 [38] กรณีที่ทำการส่งวิดีโอ MPEG4 นั้นบนโพรโทคอล 16C3I DSDV แต่ละเฟรมของ MPEG4 จะถูกแบ่งออกเป็น 92 ไบต์ต่อกลุ่มข้อมูล ก่อนการเพิ่มส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในขณะที่การส่งบน 16C3I MDSDV แต่ละเฟรมของ MPEG4 จะถูกแบ่งออกเป็น 88 ไบต์ต่อกลุ่มข้อมูล ก่อนการเพิ่มส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดย 4 ไบต์ที่แตกต่างกันระหว่างกรณีที่ทำการส่งวิดีโอแบบ SDC บน

16C3I DSDV และ 16C3I MDSDV ถูกใช้ในการเก็บข้อมูล Last hop วิดีโอ Foreman MPEG4 ที่ทำการส่งในกรณี SDC และ MDC จะถูกแบ่งออกเป็น 1095 และ 1988 กลุ่มข้อมูลก่อนการส่งบนเครือข่าย IEEE 802.15.4 ตามลำดับ ในกรณีการส่งข้อมูลแบบ MDC วิดีโอ Foreman YUV จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลำดับเฟรมคู่และเฟรมคี่ จากนั้นแต่ละส่วนจะถูกบีบอัดวิดีโอเป็นรูปแบบ MPEG4 ที่อัตราบิต 32000 บิตต่อวินาที และอัตราการแสดงเฟรม 12.5 เฟรมต่อวินาที ด้วยโปรแกรม X264 [38] กำหนดให้ MPEG4 ที่เข้ารหัสอยู่ในรูปแบบเฟรม IPBBPBBPBBPB และมี GOP เท่ากับ 12 [38] แต่ละเฟรมของ MPEG4 จะถูกแบ่งออกเป็น 87 ไบต์ต่อกลุ่มข้อมูล ก่อนการเพิ่มส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ดังนั้นวิดีโอ Foreman MPEG4 จะถูกแบ่งออกเป็น 1956 กลุ่มข้อมูลก่อนการส่งบนเครือข่าย IEEE 802.15.4 เพื่อให้อัตราบิตของวิดีโอแบบ MDC และ SDC สัมพันธ์กัน ในงานวิจัยนี้กำหนดให้อัตราบิตของวิดีโอแบบ MDC ในแต่ละส่วนย่อยน้อยกว่าอัตราบิตของวิดีโอแบบ SDC สองเท่า [13] ยิ่งกว่านั้นโหนดต้นทางแต่ละตัวจะส่งกลุ่มข้อมูลวิดีโอของ Foreman MPEG4 ติดต่อกัน 5 ครั้ง การจำลองการทำงานจะถูกหยุดเมื่อทุกกลุ่มข้อมูลวิดีโอถูกส่งเสร็จสิ้น สังเกตได้ว่าจะไม่มีการล้นของกลุ่มข้อมูลในการจำลองการทำงาน เนื่องจากเรากำหนดให้ขนาดของที่พักข้อมูล (Buffer) ในแต่ละโหนดมีขนาดใหญ่มาก

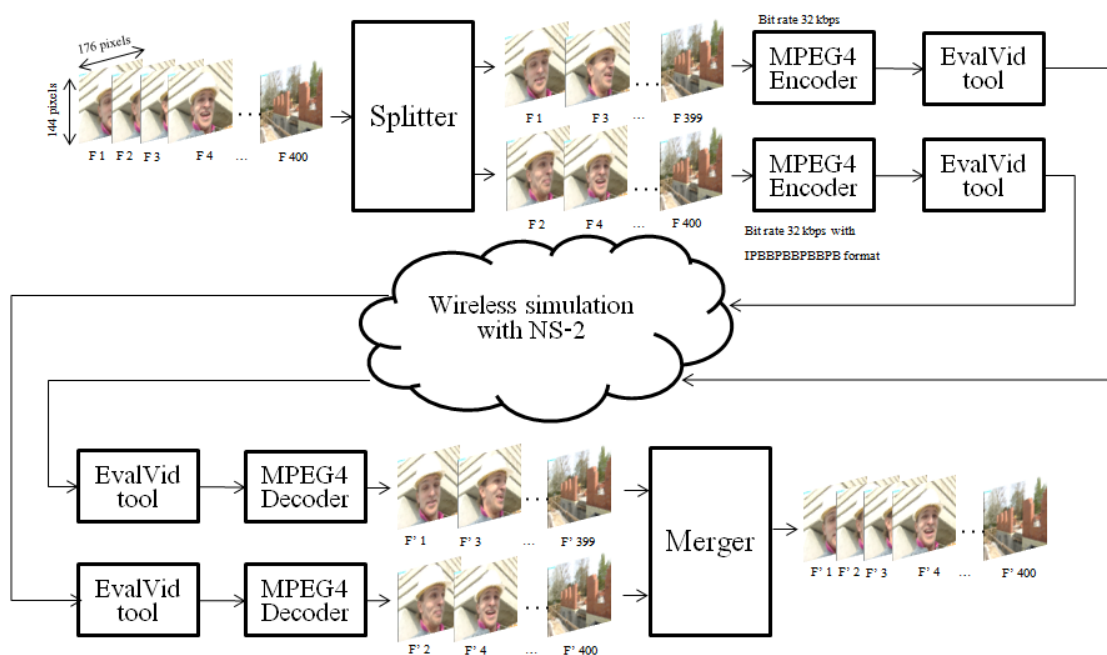
ในการทดลองนี้ประกอบด้วยโหนดทั้งหมด 15 โหนดแสดงดังภาพประกอบที่ 5-8 ซึ่งโหนดจะถูกวางแบบตาราง (Grid) ขนาด 5x3 โหนด แต่ละโหนดวางห่างกันในแนวแกน x และแนวแกน y เป็นระยะ 90 เมตร 2 ใน 15 โหนดเป็นโหนดต้นทางและโหนดปลายทางตามลำดับ ทุกโหนดมีระยะการรับรู้สัญญาณวิทยุ และระยะการส่งสัญญาณวิทยุเท่ากับ 315.64 เมตร และ 157.82 เมตร ตามลำดับ การทดลองนี้ใช้โมเดลสัญญาณวิทยุแบบ Two-ray ground แต่ละโหนดจะมีการกระจายตารางเส้นทางของตนเองทุก 15 วินาที นอกจากนี้เราใช้รายละเอียดอัตราการใช้พลังงานของอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณวิทยุ CC2420 สำหรับการประเมินผลด้านการใช้พลังงาน อัตราการใช้พลังงานคือ 33.46 31.32 และ 0.767 mW สำหรับโหนดรับ โหนดส่ง และโหนดนิ่งเลย ตามลำดับ [39]

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 5-1 จำนวนเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลและจำนวนเส้นทางที่ค้นหาในโพรโทคอล 16C3I DSDV มีเพียงเส้นทางเดียว ขณะที่โพรโทคอล 16C3I MDSDV สามารถทำการส่งข้อมูลและค้นหาเส้นทางได้หลายเส้นทาง กรณีที่ใช้โพรโทคอล 16C3I MDSDV ในการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ SDC จะมีการเตรียมเส้นทางไว้ทั้งหมด 3 เส้นทาง โดยหนึ่งในนั้นใช้เพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทาง สำหรับเส้นทางที่เหลือใช้เป็นเส้นทางสำรองในการส่งข้อมูล การส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC ด้วยโพรโทคอล 16C3I MDSDV ในกรณีไม่มีการแก้ปัญหาเมื่อเส้นทางขาดจะทำการค้นหาเส้นทางจำนวน 2 เส้นทาง และใช้ทั้งสองเส้นทางนั้นใน

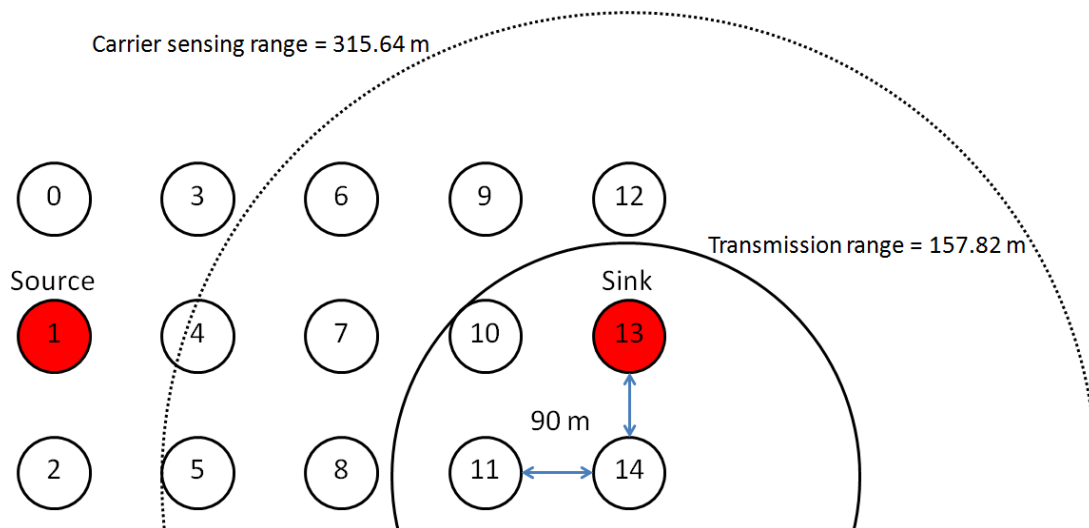
การส่งข้อมูล กรณีที่มีการแก้ปัญหาเมื่อเส้นทางขาดจะทำการเตรียมเส้นทางไว้ 3 เส้นทาง โดยสองในสามจะถูกใช้ในการส่งข้อมูล ส่วนเส้นทางที่เหลือเป็นเส้นทางสำรอง PSNR ของวิดีโอหลังการเข้ารหัสแต่ยังไม่มีการส่งผ่านเครือข่ายของวิดีโอแบบ SDC จะสูงกว่าของวิดีโอแบบ MDC เนื่องจากความต่อเนื่องของเฟรมที่ใช้ในการบีบอัดข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 ที่สูงกว่า [42]



ก. กรณีทำการส่งข้อมูลแบบ SDC



ข. กรณีทำการส่งข้อมูลแบบ MDC  
ภาพประกอบที่ 5-7 โครงสร้างระบบที่ใช้ในการทดลอง



ภาพประกอบที่ 5-8 เครื่องข่ายที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ 5-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปแบบการส่ง ข้อมูลวิดีโอ	พารามิเตอร์			
	SDC		MDC	
โพรโทคอล จัดสรรเส้นทาง	16C3I DSDV		16C3I MDSDV	
การแก้ปัญหาเมื่อ เส้นทางขาด	มี	ไม่มี	มี	ไม่มี
อัตราการเข้ารหัส	64 kbps		32 kbps ต่อส่วนแยก	
PSNR ก่อน ส่งผ่านเครือข่าย	31.89 dB		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 28.22 dB สำหรับส่วนแยกเฟรมคี่</li> <li>● 22.17 dB สำหรับส่วนแยกเฟรมคู่</li> <li>● 30.31 dB หลังรวมส่วนแยกของเฟรมคี่และเฟรมคู่เข้าด้วยกัน</li> </ul>	
จำนวนเส้นทาง หลักที่ใช้ในการ ส่งข้อมูล	1		2	
จำนวนเส้นทางที่ ค้นหา	1	3	2	3
Data payload	92	88	87	
กลุ่มข้อมูลที่ต้อง ทำการส่งทั้งหมด	9525	9780	9940	9780

### 5.5 ตัววัดสมรรถนะ

การทดลองนี้ทำการประเมินผลการทดลองผ่าน 5 ตัวชี้วัดสมรรถนะ คือ ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ LQI (Number of LQI dropped packet) ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ CBK (Number of CBK dropped packet) เวลาหน่วงในคิวของกลุ่มข้อมูล (Packet queuing delay) ซึ่งตัววัดคุณภาพเหล่านี้บ่งบอกถึงสมรรถนะของเครือข่าย สมรรถนะของวิดีโอถูกวัดด้วย PSNR เวลาหน่วงของเฟรมจากต้นทางถึงปลายทาง (Frame end-to-end delay) และสุดท้ายเป็นตัววัดสมรรถนะด้านการบริโภคพลังงานของเครือข่าย (Energy consumption)

กรณีการบริโภคพลังงานของเครือข่ายสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงก่อน (Before sending video) และหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ (After sending video) ในแต่ละช่วงจะมีการแบ่งการบริโภคพลังงานตามกิจกรรมการติดต่อสื่อสาร คือ การส่ง-รับข้อมูลวิดีโอ (Transmitting video และ Receiving video) การส่ง-รับ ACK (Transmitting ACK และ Receiving ACK) การส่ง-รับข้อมูลข่าวสารเส้นทาง (Transmitting DSDV และ Receiving DSDV) การนิ่งเฉยของโหนดเพื่อรอการทำกิจกรรม (Idle energy consumption) การตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ (CCA energy consumption for video) และการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณก่อนการส่งข้อมูลเส้นทาง (CCA energy consumption for DSDV)

## 5.6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองเครือข่ายประกอบด้วย 15 โหนด และสามารถใช้ช่องสัญญาณในการรับข้อมูลได้ 15 ช่องสัญญาณ ดังนั้นแต่ละช่องสัญญาณจะถูกใช้โดยแต่ละโหนด สิ่งนี้ส่งผลให้การส่งข้อมูลปกติในเครือข่ายจะไม่เกิดการชนกันของข้อมูล เนื่องจากการกระบวนกร IRCB ใดๆก็ตามเนื่องจากการปรับปรุง Destination sequence number (Seq.) ของโพรโทคอล 16C3I DSDV และ 16C3I MDSDV อาจทำให้เส้นทางที่ทำการส่งข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลง สิ่งนี้ส่งผลให้เกิดปัญหาการแย่งชิงกันเข้าใช้ช่องสัญญาณ

ตัวอย่างเหตุการณ์การแย่งชิงกันเข้าใช้ช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากการปรับปรุง Seq. ในกรณีของการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ SDC กำหนดให้โหนดต้นทางคือโหนดหมายเลข 1 โหนดปลายทางคือโหนดหมายเลข 13 แสดงดังภาพประกอบที่ 5-8 สมมติให้การส่งข้อมูลผ่าน Seq. 130 แสดงดังภาพประกอบที่ 5-9 โหนดหมายเลข 1 ส่งข้อมูลไปหาโหนดหมายเลข 13 ผ่านทางโหนดหมายเลข 3 6 และ 9 ตามลำดับ ระหว่างการส่งข้อมูลโหนดปลายทางหมายเลข 13 มีการปรับรูปร่างเส้นทางของตนเองด้วย Seq. 132 ที่เวลา 207.975201941 โหนดหมายเลข 1 ได้ส่งข้อมูล Packet ID (Pi) 1 ไปยังโหนดหมายเลข 3 (1) ดังแสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-10 ขณะที่โหนดหมายเลข 9 กระจายข้อมูลเส้นทางสำหรับโหนดหมายเลข 13 ด้วย Seq. 132 ออกไปในเครือข่าย ซึ่งโหนดหมายเลข 6 และ 7 ได้รับข้อมูลเส้นทางนั้น ก่อนที่โหนดหมายเลข 6 และ 7 จะกระจายข้อมูลเส้นทางของโหนดหมายเลข 13 ด้วย Seq. 132 ที่เวลา 207.980866790 วินาที โหนดหมายเลข 1 ส่งข้อมูล Pi 2 ไปยังโหนดหมายเลข 13 ผ่านโหนดหมายเลข 3 ด้วยเส้นทางที่มี Seq. 130 (2) และที่เวลา 207.983891620 วินาที โหนดหมายเลข 3 ส่งข้อมูล Pi 1 ไปยังโหนดหมายเลข 13 ผ่านโหนดหมายเลข 6 ด้วยเส้นทางที่มี Seq. 130 (3) ก่อนที่โหนดหมายเลข 1 จะส่งข้อมูลไปหาโหนดหมายเลข 3 เสร็จสิ้นในเวลา 207.986332214 วินาที โหนดหมายเลข 7 ได้กระจายข้อมูลเส้นทาง

สำหรับโหนดหมายเลข 13 ด้วย Seq. 132 ออกมาในเครือข่ายที่เวลา 207.981586535 วินาที (4) ดังแสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-11 จากนั้นในภาพประกอบที่ 5-12 โหนดหมายเลข 3 จะปรับปรุงเส้นทางสำหรับโหนดหมายเลข 13 โดยเปลี่ยนไปใช้เส้นทางที่มี Seq. 132 ซึ่งจะส่งข้อมูลผ่านโหนดหมายเลข 7 แทนโหนดหมายเลข 6 ดังนั้นโหนดหมายเลข 3 จะส่งข้อมูล Pi 2 ไปยังโหนดหมายเลข 13 ผ่านโหนดหมายเลข 7 (5) โดยทำการส่งที่เวลา 207.991156220 วินาที จากนั้นที่เวลา 207.994500926 วินาที โหนดหมายเลข 6 ส่งข้อมูล Pi 1 ไปยังโหนดหมายเลข 9 (6) และก่อนที่การส่งของโหนดหมายเลข 6 จะเสร็จสิ้น โหนดหมายเลข 7 จะส่งต่อข้อมูล Pi 2 ไปยังโหนดหมายเลข 9 (7) ที่เวลา 207.998886644 วินาที เหตุการณ์นี้ทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลที่โหนดหมายเลข 9

นอกจากนี้กรณีการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ SDC บน โพรโทคอล 16C3I MDSDV การระบุเส้นทางโดยใช้ข้อมูล Last hop จะเพิ่มโอกาสในการชนกันของข้อมูลวิดีโอ จากเส้นทางการส่งข้อมูลด้วย Seq. 130 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-13 โหนดหมายเลข 1 ส่งข้อมูลไปหาโหนดหมายเลข 13 ผ่านทางโหนดหมายเลข 5 7 และ 10 ตามลำดับ ระหว่างการส่งข้อมูลโหนดปลายทางหมายเลข 13 มีการปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเองด้วย Seq. 132 ขณะที่โหนดหมายเลข 9 กระจายข้อมูลเส้นทางสำหรับโหนดหมายเลข 13 ด้วย Seq. 132 ออกไปในเครือข่าย ซึ่งโหนดหมายเลข 7 ได้รับข้อมูลเส้นทางนั้น ด้วยอัลกอริทึมการปรับปรุงตารางเส้นทางดัง Fig. 9 ในบทความ [15] โหนดหมายเลข 7 จะมีเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังโหนดหมายเลข 13 ผ่านทางโหนดหมายเลข 9 เพียงเส้นทางเดียว ดังแสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-14 ดังนั้นข้อมูลวิดีโอซึ่งเดิมข้อมูลในฟิลด์ Last hop ในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูล คือโหนดหมายเลข 10 จะถูกเปลี่ยนเป็นโหนดหมายเลข 9 และถูกส่งผ่านโหนดหมายเลข 9 ระหว่างที่มีการส่งข้อมูล Pi 1 ไปหาโหนดหมายเลข 9 โหนดหมายเลข 7 ปรับปรุงตารางเส้นทาง โดยการเพิ่มเส้นทางผ่านทางโหนดหมายเลข 10 เพื่อไปยังโหนดหมายเลข 13 ดังแสดงภาพประกอบที่ 5-15 ซึ่งเส้นทางนี้มีข้อมูล Last hop ตรงกับฟิลด์ Last hop ในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูล ดังนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่านเส้นทางซึ่งมี Last hop คือโหนดหมายเลข 10 ภาพประกอบที่ 5-16 แสดงการชนกันของข้อมูล Pi 2 ซึ่งส่งผ่านเส้นทางที่มี Last hop เป็นโหนดหมายเลข 10 และข้อมูล Pi 1 ซึ่งส่งผ่านเส้นทางที่มี Last hop เป็นโหนดหมายเลข 9

ตัวอย่างเหตุการณ์การแย่งชิงกันเข้าใช้ช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากการปรับปรุง Seq. ในกรณีของการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC กำหนดให้โหนดต้นทางคือโหนดหมายเลข 1 โหนดปลายทางคือโหนดหมายเลข 13 แสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-8 สมมติให้การส่งข้อมูลผ่าน Seq. 130 แสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-17 โหนดหมายเลข 1 ส่งข้อมูลไปหาโหนดหมายเลข 13 ผ่าน 2 เส้นทาง ในเส้นทางแรกผ่านโหนดหมายเลข 3 6 และ 10 ตามลำดับ ในเส้นทางที่สองผ่านทางโหนดหมายเลข 5 7 และ 9 ตามลำดับ ระหว่างการส่งข้อมูลโหนดปลายทางหมายเลข 13 มีการ

ปรับปรุงตารางเส้นทางของตนเองด้วย Seq. 132 ที่เวลา 208.964823 วินาที โหนดหมายเลข 10 กระจายข้อมูลเส้นทางสำหรับโหนดหมายเลข 13 ด้วย Seq. 132 ออกไปในเครือข่ายที่เวลา 209.074301 วินาที ซึ่งโหนดหมายเลข 6 และ 7 ได้รับข้อมูลเส้นทางนั้น ด้วยอัลกอริทึมการปรับปรุงเส้นทางดัง Fig. 9 ในบทความ [15] ทำให้โหนดหมายเลข 6 และ 7 มีเพียงเส้นทางเดียวเพื่อไปยังโหนดหมายเลข 13 ดังนั้นโหนดหมายเลข 6 และ 7 จะส่งข้อมูลไปยังโหนดหมายเลข 10 สิ่งนี้จะส่งผลให้เกิดการชนกันของข้อมูลดังแสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-18

กรณีที่ไม่มีกรซ่อมบำรุงเส้นทาง ข้อมูลจะเกิดการละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ CBK จำนวน 5 ครั้ง เนื่องจากเมื่อถึงเวลา 209.424754 วินาที โหนดหมายเลข 7 จะได้เส้นทางผ่านโหนดหมายเลข 9 เพื่อไปยังโหนดหมายเลข 13 ซึ่งเป็นเส้นทางที่ตรงกับข้อมูล Last hop ที่ระบุในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูล ดังแสดงอัลกอริทึมการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลดังอัลกอริทึมที่ 5-3

กรณีที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทาง เมื่อชั้นควบคุมการใช้สื่อ แข็งกลับมายังชั้นเครือข่ายว่าไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้สำเร็จ ดังแสดงด้วยอัลกอริทึมที่ 5-1 โหนดจะทำการลบเส้นทางนั้นออกจากตารางเส้นทาง ถ้าโหนดพบว่ามีเส้นทางอื่นที่สามารถใช้ส่งข้อมูลได้ โหนดจะสลับไปใช้เส้นทางอื่นในการส่งข้อมูลแสดงดังอัลกอริทึมที่ 5-2

กรณีที่มีการการซ่อมบำรุงเส้นทางแล้วโหนดไม่มีเส้นทางสำรองแสดงดังภาพประกอบที่ 5-19 หลังเกิดการชนกันของข้อมูลระหว่างโหนดหมายเลข 6 และ 7 อันเนื่องมาจากการปรับปรุง Seq. 132 สำหรับโหนดปลายทางหมายเลข 13 โหนดหมายเลข 7 จะลบเส้นทางเพื่อไปยังโหนดหมายเลข 13 ออกจากตารางเส้นทาง โดยการกำหนด Seq. 133 และเปลี่ยน metric เป็น  $\infty$  และเนื่องจากโหนดหมายเลข 7 ไม่มีเส้นทางสำรอง โหนดนี้ก็จะทำการส่งข้อมูลเส้นทางสำหรับโหนดปลายทางหมายเลข 13 ด้วย Seq. 133 ออกไปในเครือข่าย ซึ่งโหนดระหว่างทางหมายเลข 5 จะได้รับข้อมูลเส้นทางนี้และปรับปรุงตารางเส้นทางด้วยข้อมูลเส้นทางที่ได้รับ ถ้าหากโหนดระหว่างทางหมายเลข 5 ไม่มีเส้นทางสำรองก็จะทำการกระจายข้อมูลเส้นทางสำหรับโหนดหมายเลข 13 ด้วย Seq. 133 ต่อ และเมื่อข้อมูลเส้นทางมาถึงโหนดต้นทางหมายเลข 1 โหนดต้นทางจะหยุดส่งข้อมูลผ่านทางเส้นทางที่เกิดการชนกันของข้อมูลนี้

กรณีที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทางแล้วโหนดมีเส้นทางสำรองแสดงดังภาพประกอบที่ 5-20 หลังเกิดการชนกันของข้อมูลระหว่างโหนดหมายเลข 6 และ 7 อันเนื่องมาจากการปรับปรุง Seq. 132 สำหรับโหนดปลายทางหมายเลข 13 โหนดหมายเลข 7 จะลบเส้นทางเพื่อไปยังโหนดหมายเลข 13 ออกจากตารางเส้นทาง โดยการกำหนด Seq. 133 และเปลี่ยน Metric เป็น  $\infty$  เนื่องจากโหนดหมายเลข 7 มีเส้นทางสำรอง โหนดนี้ก็จะทำการส่งข้อมูลต่อผ่านทางเส้นทางสำรองซึ่งจะทำการส่งข้อมูลผ่านทางโหนดหมายเลข 11

เนื่องจากการใช้โหนดระหว่างทางร่วมกันระหว่างสองเส้นทาง เมื่อมีการปรับปรุง Seq. ดังนั้นการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC จะเกิดการละทิ้งของกลุ่มข้อมูลด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ CBK สูงกว่าการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ SDC ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-21 และภาพประกอบที่ 5-22 ตามลำดับ

ภาพประกอบที่ 5-21 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ LQI เกิดขึ้นสูงสุดในกรณีการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC ด้วยโพรโทคอล 16C3I MDSDV ที่ไม่มีการซ่อมบำรุงเส้นทาง เนื่องจากเมื่อเกิดการชนกันของข้อมูล โพรโทคอล 16C3I MDSDV ที่ไม่มีการซ่อมบำรุงเส้นทางจะยังใช้เส้นทางเดิมในการส่งข้อมูลถึงนี้จะส่งผลให้การชนกันของข้อมูลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การชนกันของข้อมูลโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงที่มีการปรับปรุง Seq. ซึ่งโหนดจะมีเพียงเส้นทางเดียวเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ดังนั้นโหนดที่ใช้โพรโทคอล 16C3I MDSDV ที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทางจะทำการลบข้อมูลออกจากคิวของอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุด้วยการบ่งชี้ข้อมูลเหล่านั้นด้วย CBK สิ่งนี้ส่งผลให้ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ CBK เกิดขึ้นสูงสุดในกรณีการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC ด้วยโพรโทคอล 16C3I MDSDV ที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทางแสดงดังภาพประกอบที่ 5-22

ภาพประกอบที่ 5-23 แสดงให้เห็นว่าเวลาหน่วงในคิวของกลุ่มข้อมูลในกรณีส่งข้อมูลวิดีโอด้วยโพรโทคอลที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทางจะสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีการซ่อมบำรุงเส้นทาง เนื่องจากโพรโทคอลที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทางจะมีการลบเส้นทางที่เสียหายออกจากตารางเส้นทาง ดังแสดงด้วยอัลกอริทึมที่ 5-1 ด้วยการเพิ่ม Seq. การลบเส้นทางโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงที่ได้รับ Seq. ใหม่ ดังนั้นหลังลบเส้นทางโหนดจะไม่มีเส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ข้อมูลที่โหนดได้รับจะถูกเก็บไว้ในคิวของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง และรอจนกว่าโหนดจะได้เส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทาง จากนั้นข้อมูลที่ถูกรับไว้ในคิวของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางทั้งหมดจะถูกส่งลงมายังคิวของอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ สิ่งนี้ส่งผลให้เวลาหน่วงในคิวของกลุ่มข้อมูลในกรณีส่งข้อมูลวิดีโอด้วยโพรโทคอลที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทางสูง นอกจากนี้ภาพประกอบที่ 5-23 แสดงให้เห็นอีกว่าการส่งวิดีโอด้วยเทคนิค MDC มีการหน่วงเวลาในคิวสูงกว่าการส่งวิดีโอแบบ SDC เนื่องจากช่วงแรกของการรับ Seq. ใหม่โหนดต้นทางจะมีเพียงเส้นทางเดียวเพื่อไปยังโหนดปลายทาง สิ่งนี้ส่งผลให้ข้อมูลจากทั้งสองส่วนย่อยถูกส่งร่วมกันบนเส้นทางเดียว

ภาพประกอบที่ 5-24 และภาพประกอบที่ 5-25 แสดงคุณภาพของการส่งวิดีโอผ่านเครือข่ายไร้สาย ภาพประกอบที่ 5-24 แสดง PSNR ของวิดีโอ เนื่องจากการละทิ้งของกลุ่มข้อมูลในกรณีการส่งวิดีโอด้วยเทคนิค MDC สูงดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-21 และภาพประกอบที่ 5-22

ส่งผลให้ PSNR ในกรณีการส่งข้อมูลวิดีโอด้วยเทคนิค MDC ต่ำลงกว่า PSNR ก่อนการส่งผ่านเครือข่าย ในขณะที่กรณีการส่งวิดีโอแบบ SDC มี PSNR เท่ากับ PSNR ก่อนการส่งผ่านเครือข่าย เนื่องจากการละทิ้งข้อมูลเพียงเล็กน้อย ภาพประกอบที่ 5-25 แสดงเวลาหน่วงของเฟรมจากต้นทางถึงปลายทาง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาหน่วงในคิวของกลุ่มข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-23 การหน่วงเวลาในคิวสูงเวลาหน่วงของเฟรมจากต้นทางถึงปลายทางก็สูงตาม

พลังงานที่ในการส่งและรับข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล 16C3I MDSDV สูงกว่าในโพรโทคอล 16C3I DSDV ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-28 ภาพประกอบที่ 5-29 ภาพประกอบที่ 5-33 และภาพประกอบที่ 5-34 เนื่องจากกระบวนการรักษาหลายๆ เส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ด้วยเหตุเดียวกันนี้ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล 16C3I MDSDV สูงกว่าในโพรโทคอล 16C3I DSDV ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-30 และภาพประกอบที่ 5-35

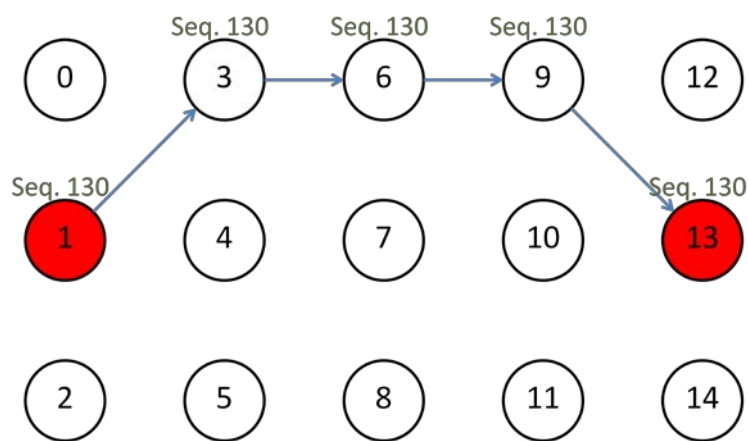
ภาพประกอบที่ 5-36 แสดงให้เห็นว่าปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอสูงที่สุดในกรณีการส่งวิดีโอแบบ MDC บนโพรโทคอล 16C3I MDSDV ที่ไม่มีการซ่อมบำรุงเส้นทาง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปัญหาการแย่งกันเข้าใช้ช่องสัญญาณที่สูงดังอธิบายในภาพประกอบที่ 5-21 ซึ่งทำให้เกิดการชนกันของข้อมูล ดังนั้นส่งผลให้โหนดต้องส่งข้อมูลวิดีโอมากขึ้น นอกจากนี้ปัญหาการแย่งกันเข้าใช้ช่องสัญญาณที่สูงนี้ยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลวิดีโอ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-38 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการรับข้อมูลวิดีโอในแต่ละการทดลองแทบจะไม่มี ความแตกต่างกันดังแสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-37

ภาพประกอบที่ 5-39 แสดงให้เห็นว่าปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการส่ง ACK สูงที่สุด เมื่อเครือข่ายมีการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ SDC ด้วยโพรโทคอล 16C3I MDSDV ที่มีการซ่อมบำรุงเส้นทาง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในการทดลองนี้มีการส่งข้อมูลวิดีโอมากกว่าการทดลองอื่นดังแสดงในตารางที่ 5-1 ในขณะที่เดียวกันข้อมูลวิดีโอจำนวนมากเหล่านี้ก็ได้ถูกส่งมาถึงยังปลายทาง ซึ่งให้ผลการทดลอง PSNR ที่แทบจะไม่แตกต่างจากก่อนการส่งผ่านเครือข่ายดังแสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-24 ภาพประกอบที่ 5-40 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการรับ ACK ที่เท่ากับในแต่ละการทดลอง

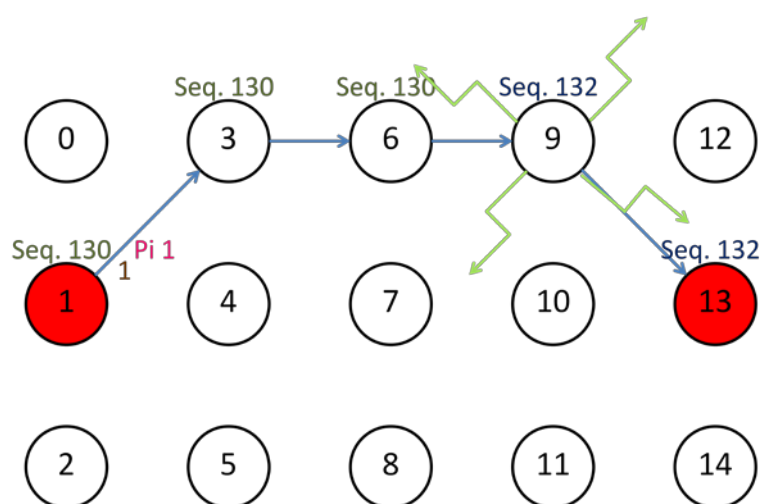
ภาพประกอบที่ 5-31 และภาพประกอบที่ 5-41 แสดงปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้เมื่อโหนดไม่มีการทำกิจกรรมการติดต่อสื่อสารก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอและระหว่างที่มีการส่งข้อมูลวิดีโอ ภาพประกอบที่ 5-31 แสดงให้เห็นว่าก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ โหนดที่ใช้โพรโทคอล 16C3I DSDV ในการทำงานจะมีเวลาว่างจากการทำกิจกรรมการติดต่อสื่อสารที่เยอะกว่า เนื่องจาก

แต่ละมีการรักษาเส้นทางเพียงเส้นทางเดียวเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ในขณะที่โพรโทคอล 16C3I MDSDV จำเป็นต้องมีการรักษาเส้นทางมากกว่า 1 เส้นทาง อย่างไรก็ตามระหว่างที่มีการส่งข้อมูล วิดีโอแต่ละการทดลองทำกิจกรรมการติดต่อสื่อสารที่ใกล้เคียงกันดังแสดงด้วยภาพประกอบที่ 5-41

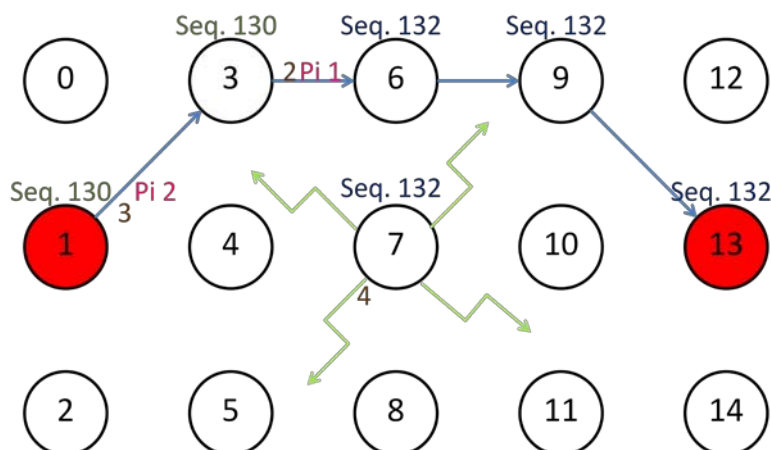
ภาพประกอบที่ 5-26 แสดงให้เห็นว่าระดับพลังงานทั้งหมดที่เครือข่ายใช้ในการทำงานของโพรโทคอล 16C3I DSDV ต่ำกว่าของโพรโทคอล 16C3I MDSDV ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานในการขนส่งข้อมูลเส้นทางที่มากกว่าทั้งในช่วงก่อนและระหว่างการส่งข้อมูลวิดีโอ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-27 และภาพประกอบที่ 5-32



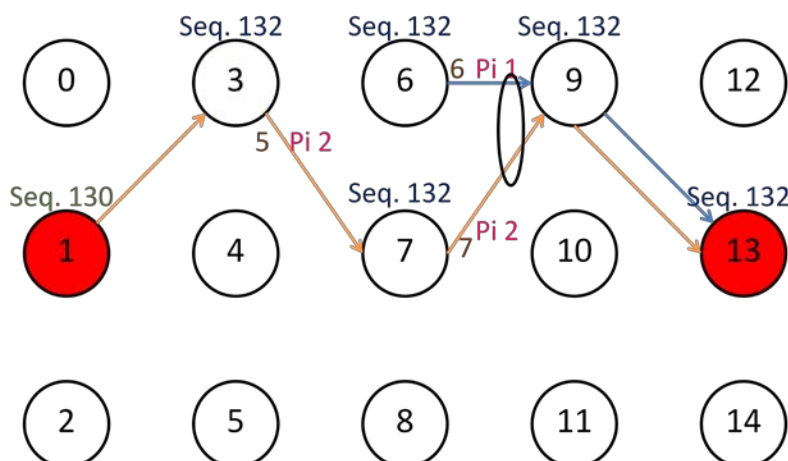
ภาพประกอบที่ 5-9 เส้นทางการส่งข้อมูลก่อนการปรับปรุง Seq.



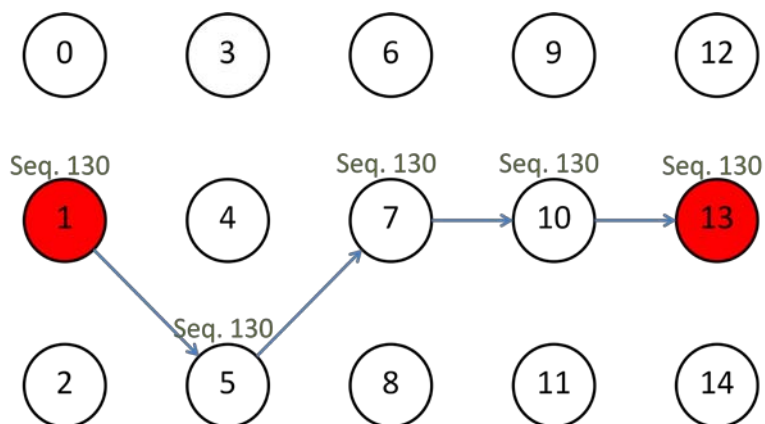
ภาพประกอบที่ 5-10 การส่งข้อมูลก่อนเกิดการแข่งชิงช่องสัญญาณ



ภาพประกอบที่ 5-11 การอัปเดต Seq. 132 ของโหนดหมายเลข 13 โดยโหนดหมายเลข 7

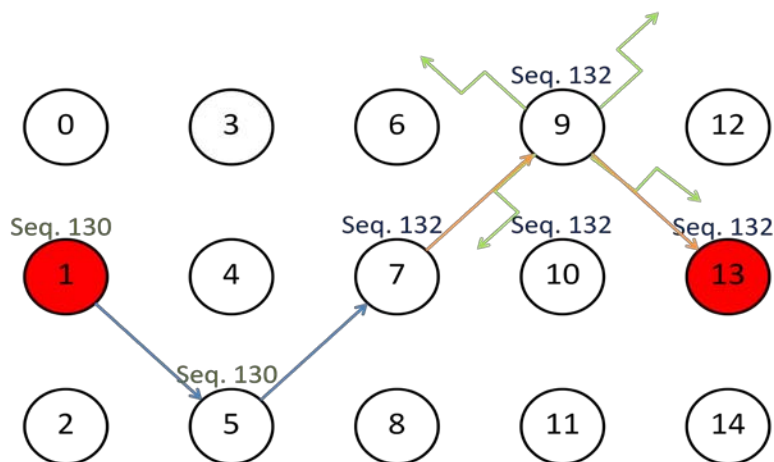


ภาพประกอบที่ 5-12 การเกิดการชนกันของข้อมูลที่โหนดหมายเลข 9 จากการใช้เส้นทางที่มี Seq. 132 ในการส่งข้อมูล

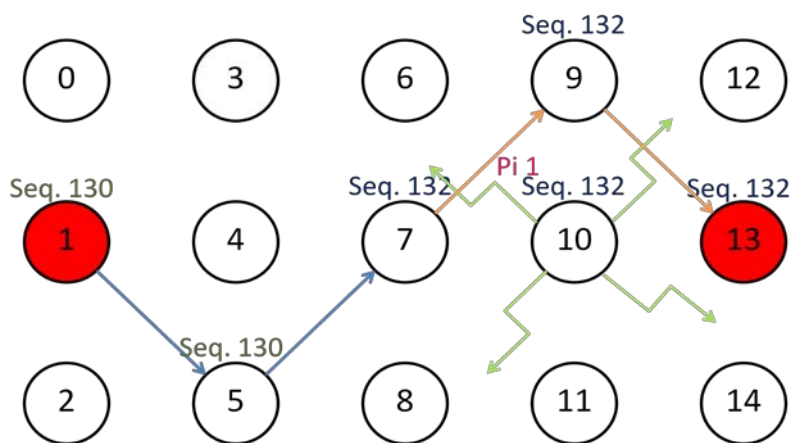


ภาพประกอบที่ 5-13 เส้นทาง การส่งข้อมูลก่อนการปรับปรุงเส้นทาง

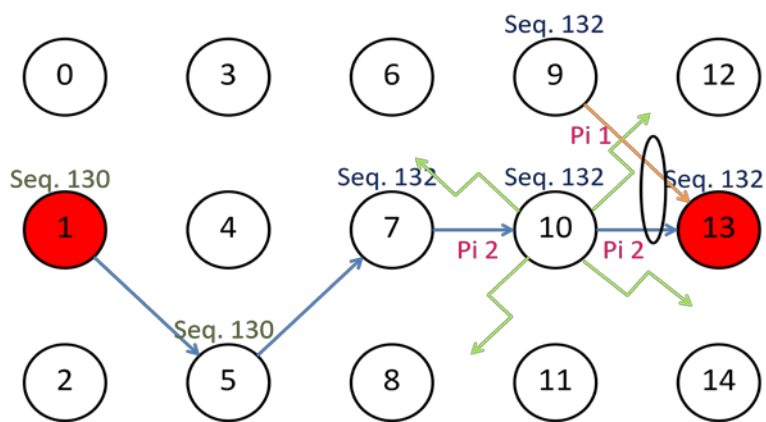




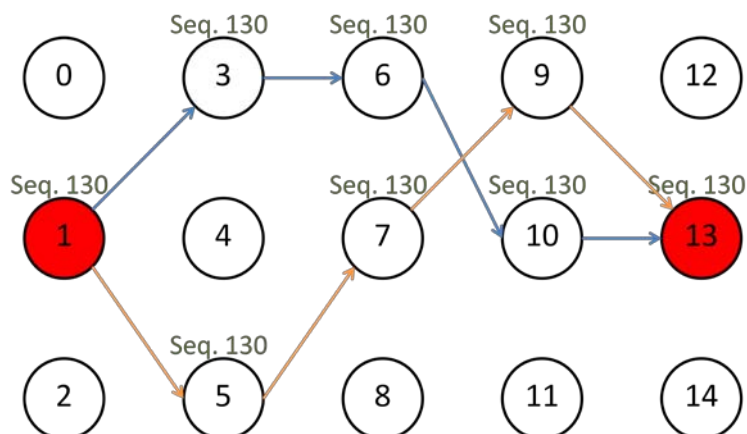
ภาพประกอบที่ 5-14 เส้นทางการส่งข้อมูลหลังได้รับข้อมูลเส้นทางด้วย Seq. ใหม่



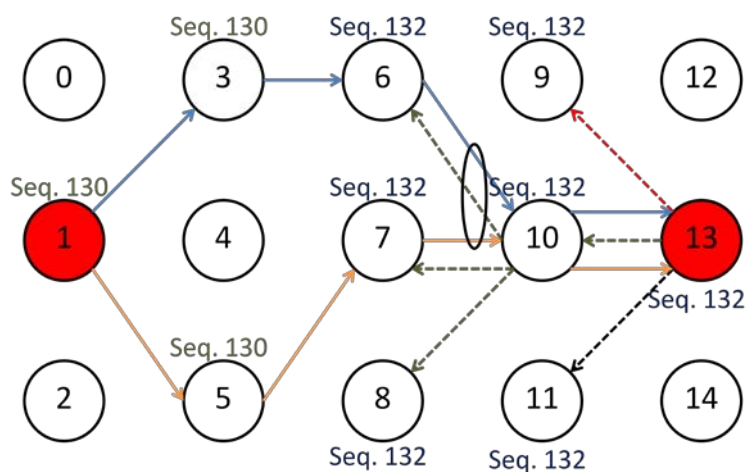
ภาพประกอบที่ 5-15 เส้นทางที่มีข้อมูล Last hop ตรงกับส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลที่ทำการกระจายข้อมูลเส้นทาง



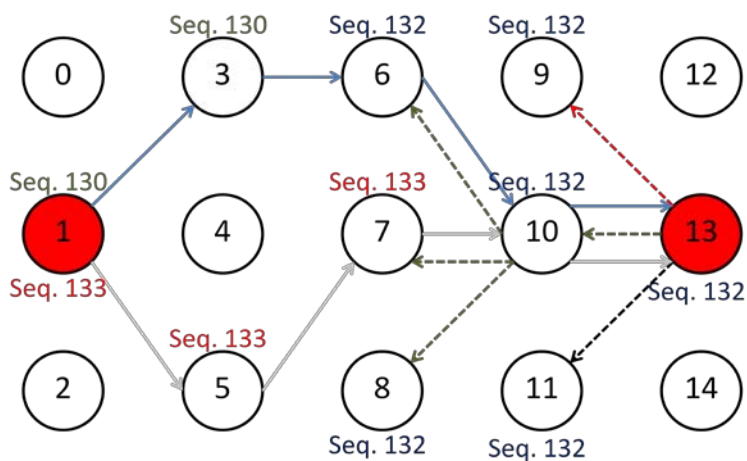
ภาพประกอบที่ 5-16 การชนกันของข้อมูลที่โหนดหมายเลข 13 จากการใช้เส้นทางที่ตรงและไม่ตรงกับฟิลด์ Last hop ในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูล



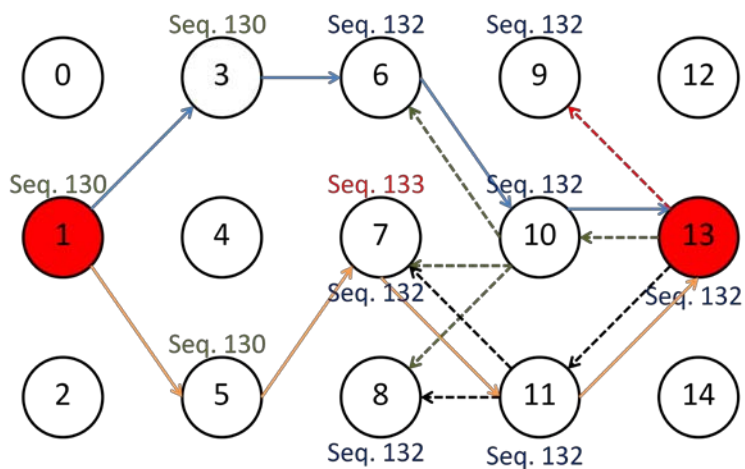
ภาพประกอบที่ 5-17 เส้นทางการส่งข้อมูลก่อนเกิดการแย่งชิงช่องสัญญาณ



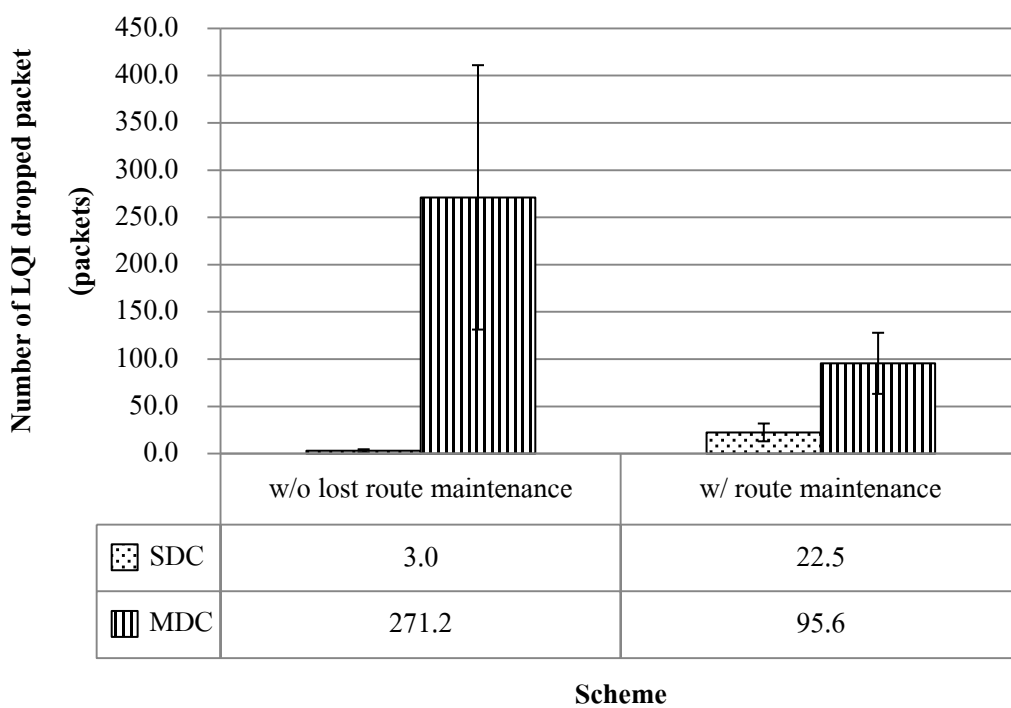
ภาพประกอบที่ 5-18 การเกิดการชนกันของข้อมูลที่โหนดหมายเลข 10 จากการใช้เส้นทางที่มี Seq. 132 ในการส่งข้อมูล



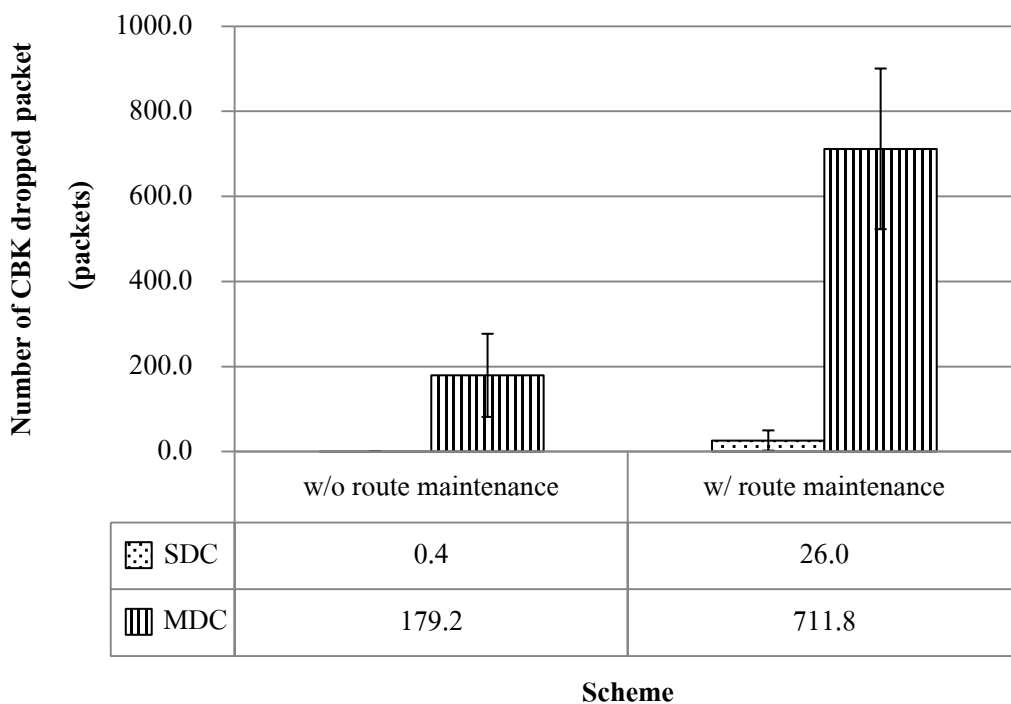
ภาพประกอบที่ 5-19 กรณีโหนดหมายเลข 7 ไม่มีเส้นทางสำรอง



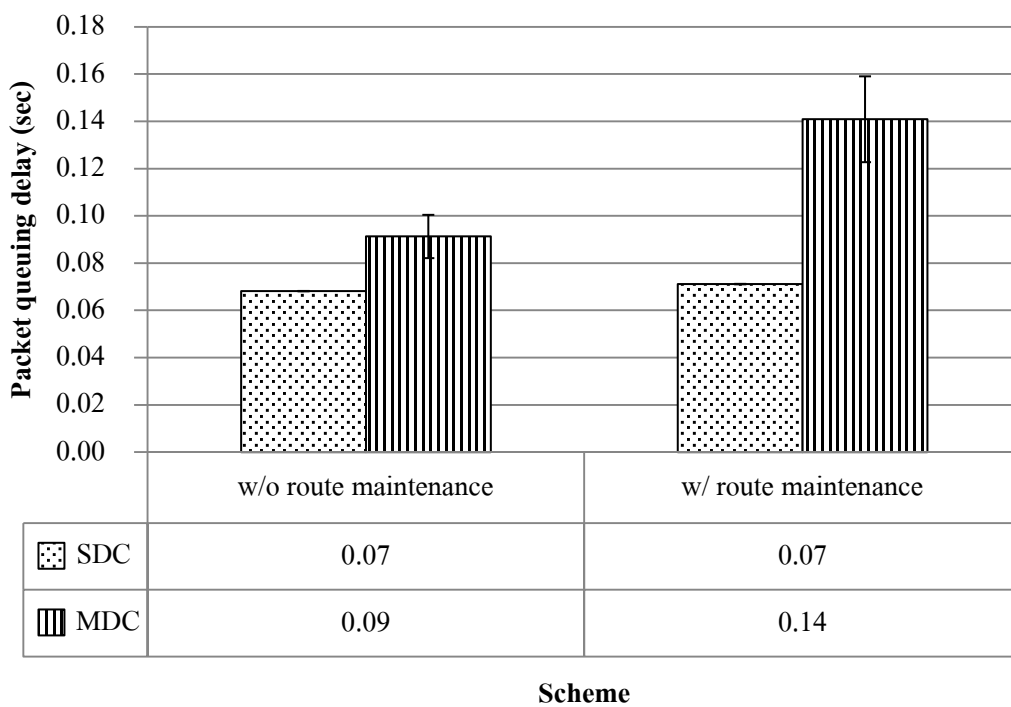
ภาพประกอบที่ 5-20 กรณีโหนดหมายเลข 7 มีเส้นทางสำรอง



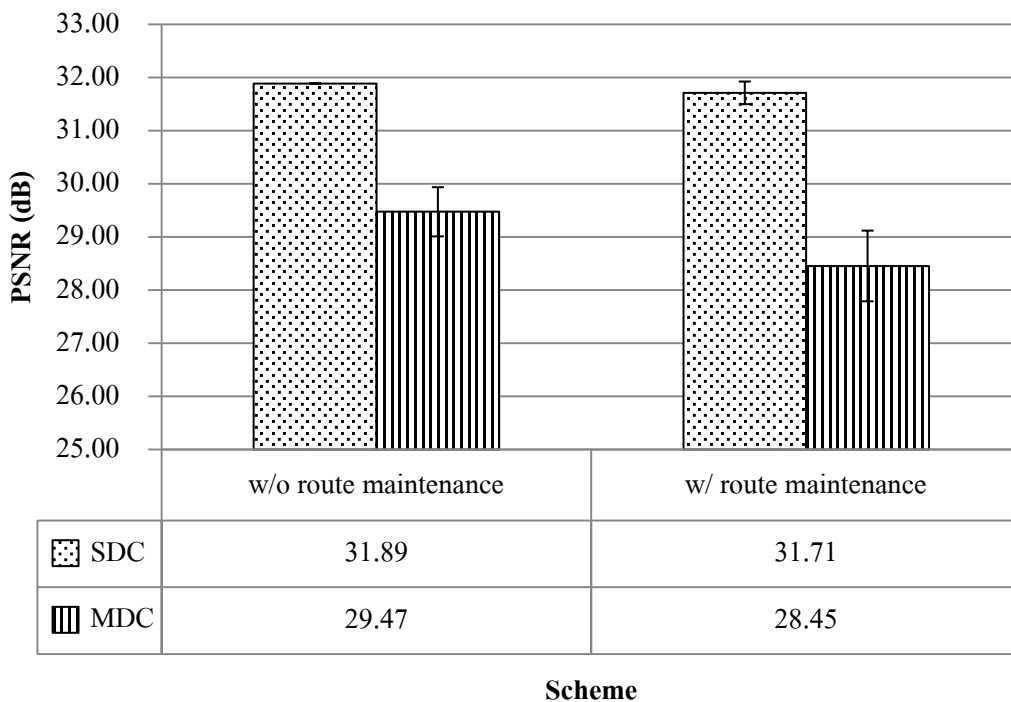
ภาพประกอบที่ 5-21 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ LQI



ภาพประกอบที่ 5-22 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งด้วยตัวบ่งชี้ CBK

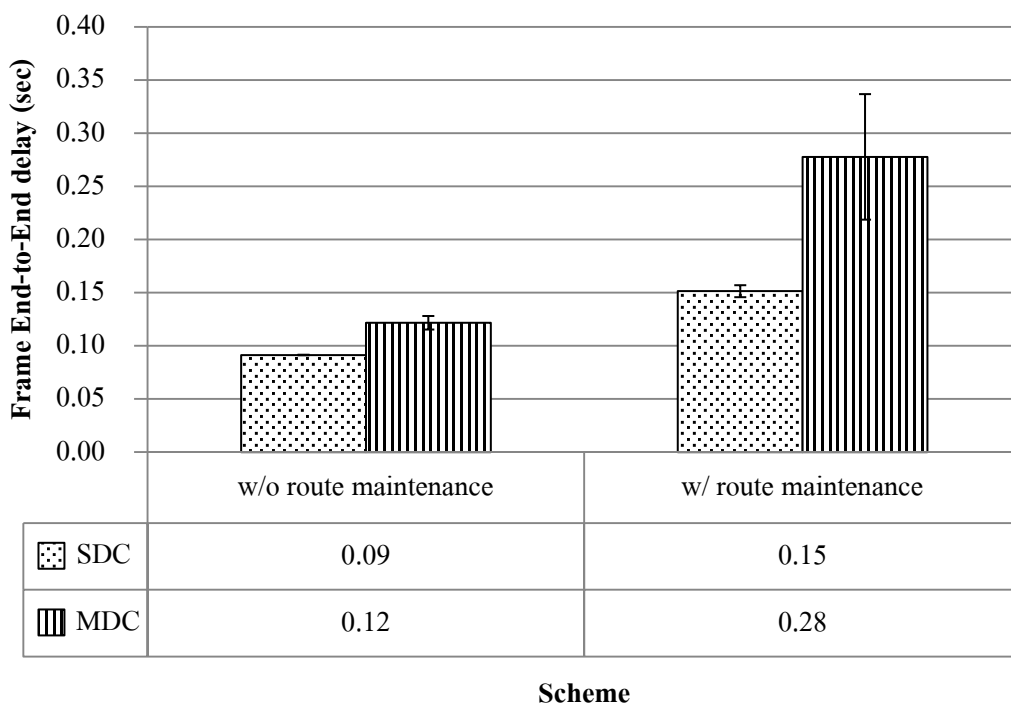


ภาพประกอบที่ 5-23 เวลาหน่วงในคิวของกลุ่มข้อมูล



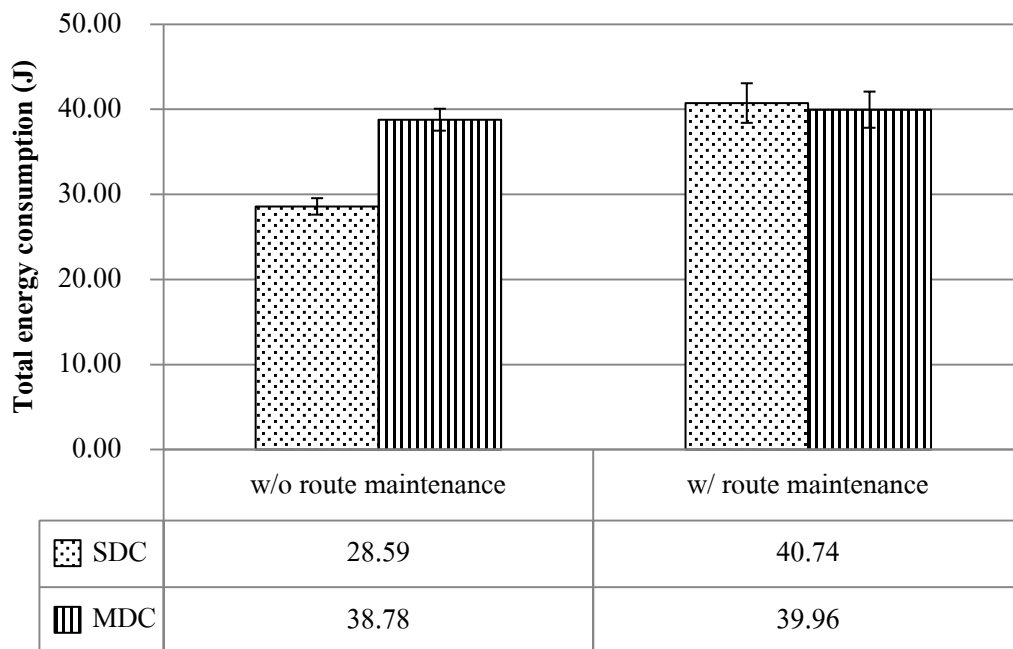
Scheme

ภาพประกอบที่ 5-24 PSNR



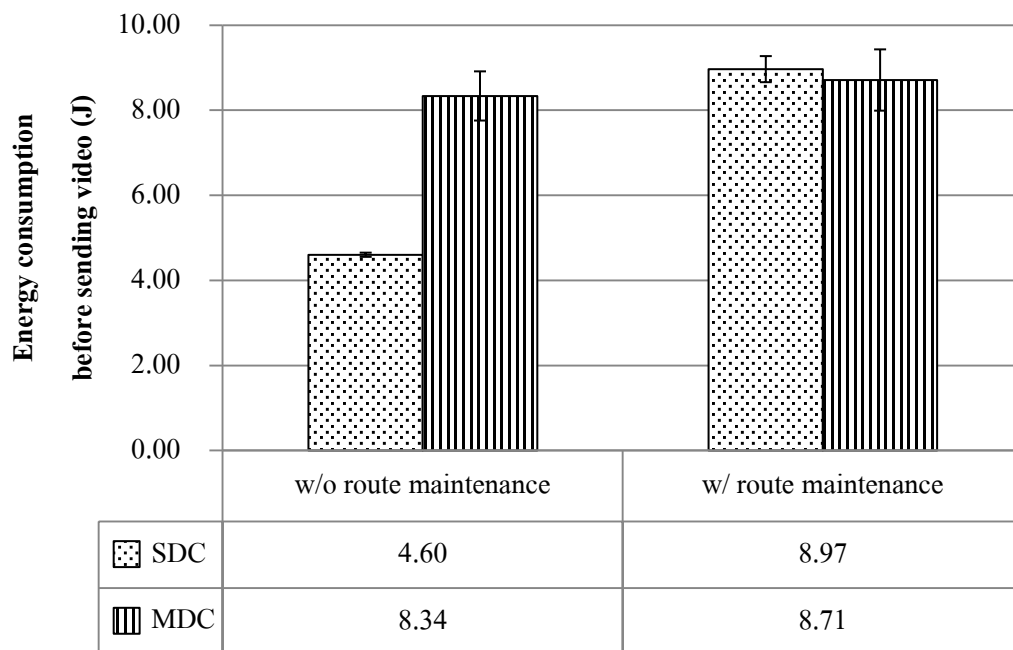
Scheme

ภาพประกอบที่ 5-25 เวลาหน่วงของเฟรมจากต้นทางถึงปลายทาง



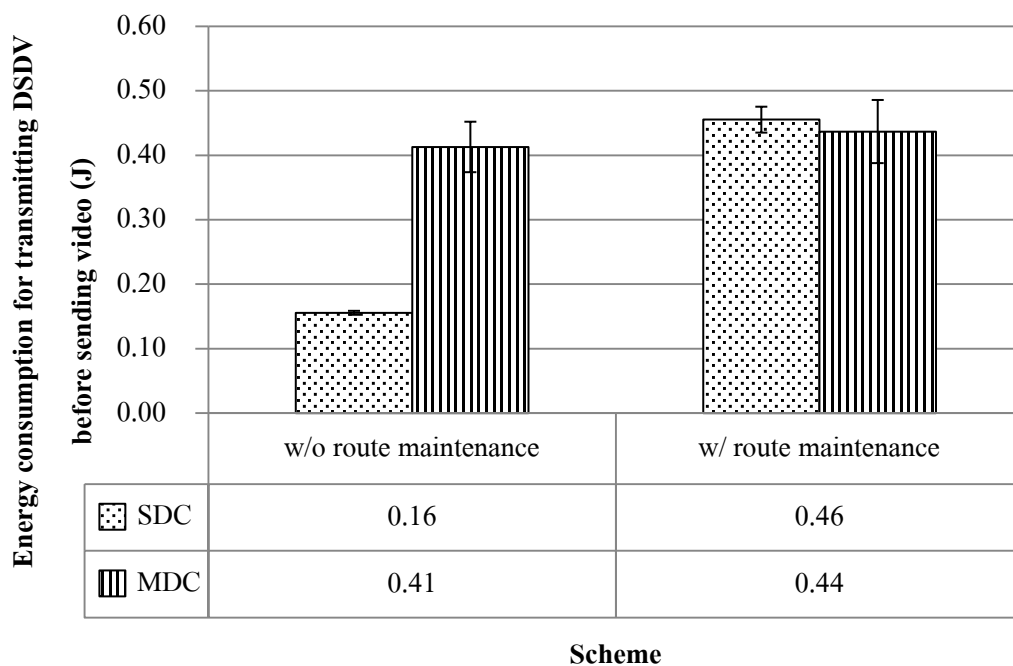
Scheme

ภาพประกอบที่ 5-26 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้ในการทำงาน

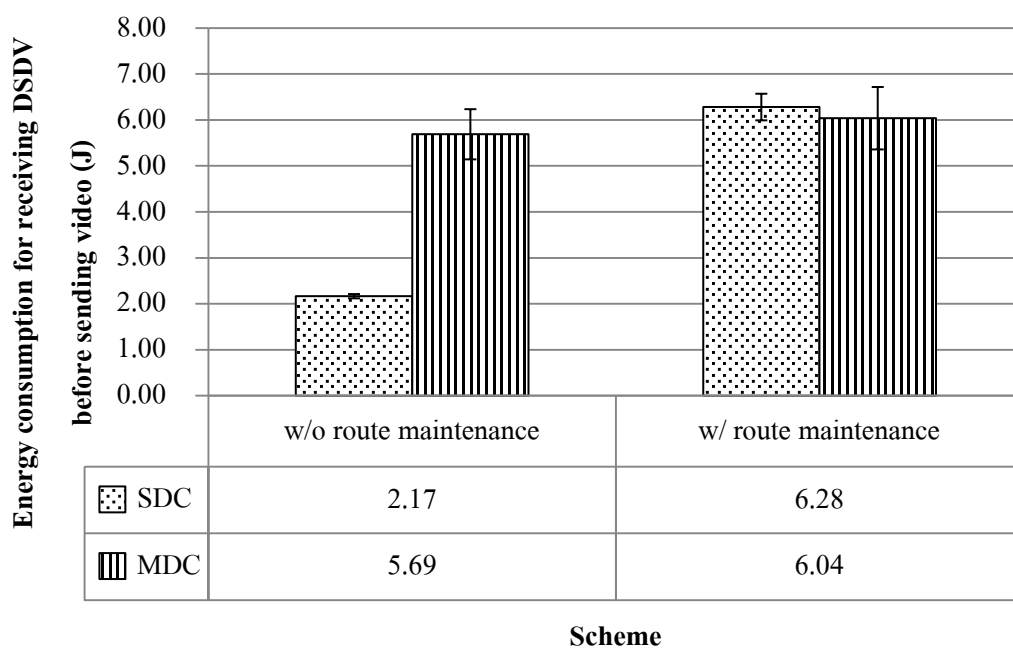


Scheme

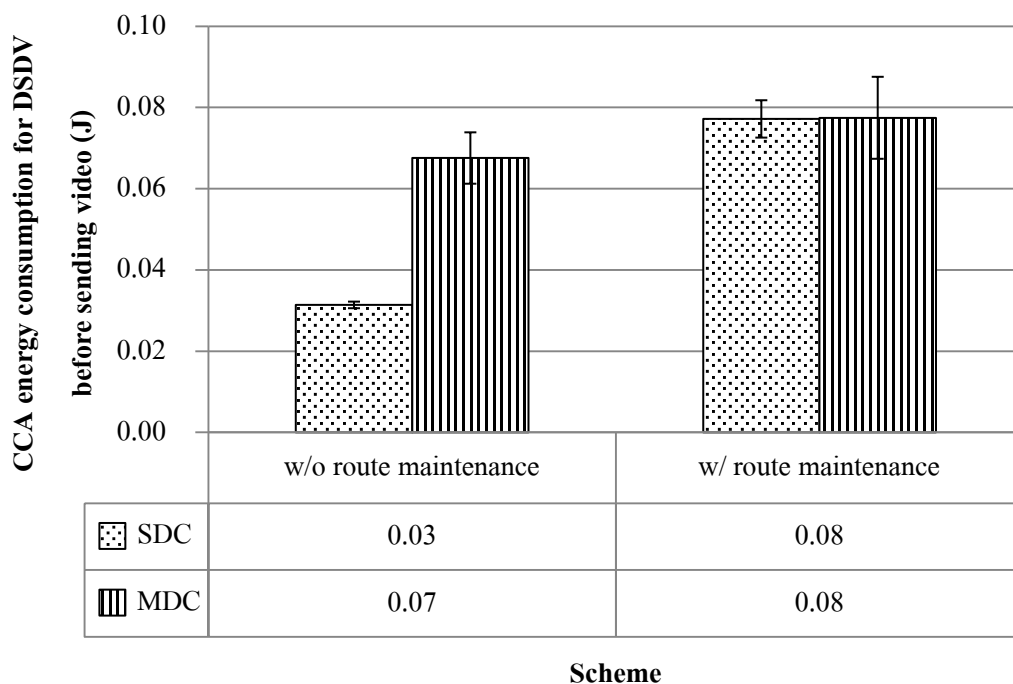
ภาพประกอบที่ 5-27 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้ก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ



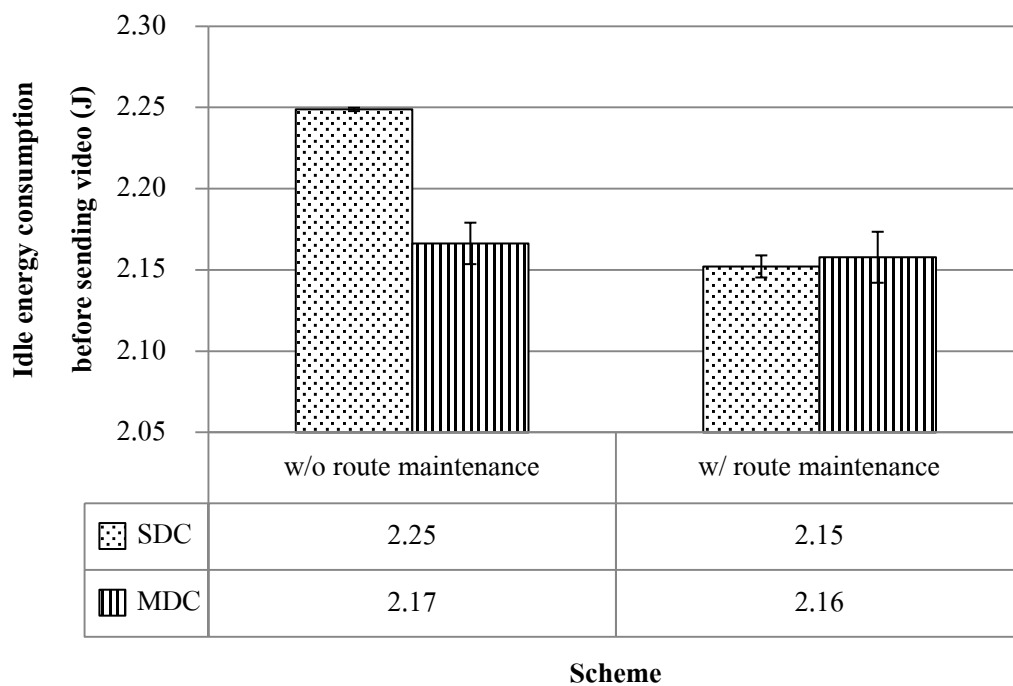
ภาพประกอบที่ 5-28 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการส่งข้อมูลเส้นทางก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ



ภาพประกอบที่ 5-29 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการรับข้อมูลเส้นทางก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ

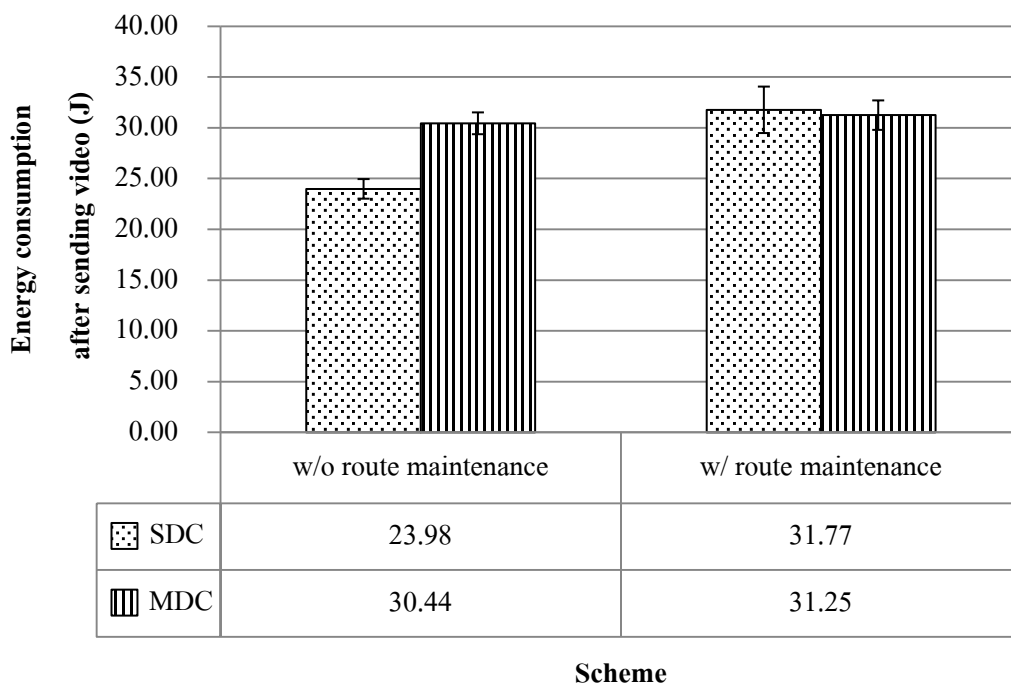


ภาพประกอบที่ 5-30 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณ เพื่อส่งข้อมูลเส้นทางก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ

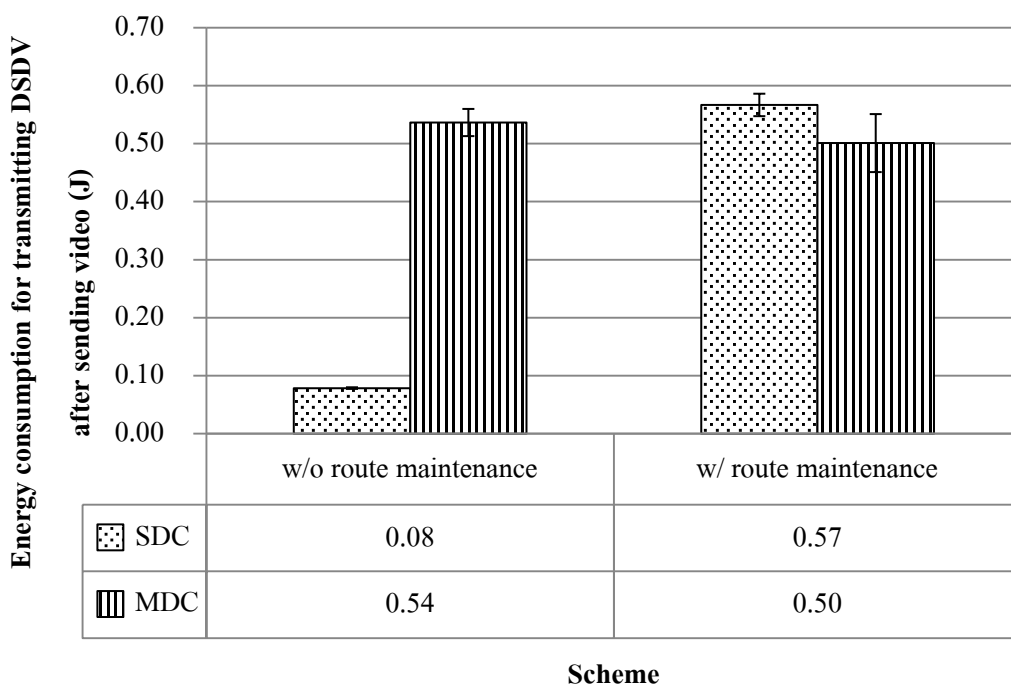


ภาพประกอบที่ 5-31 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้เมื่อไม่มีการทำงานก่อนการส่งข้อมูลวิดีโอ

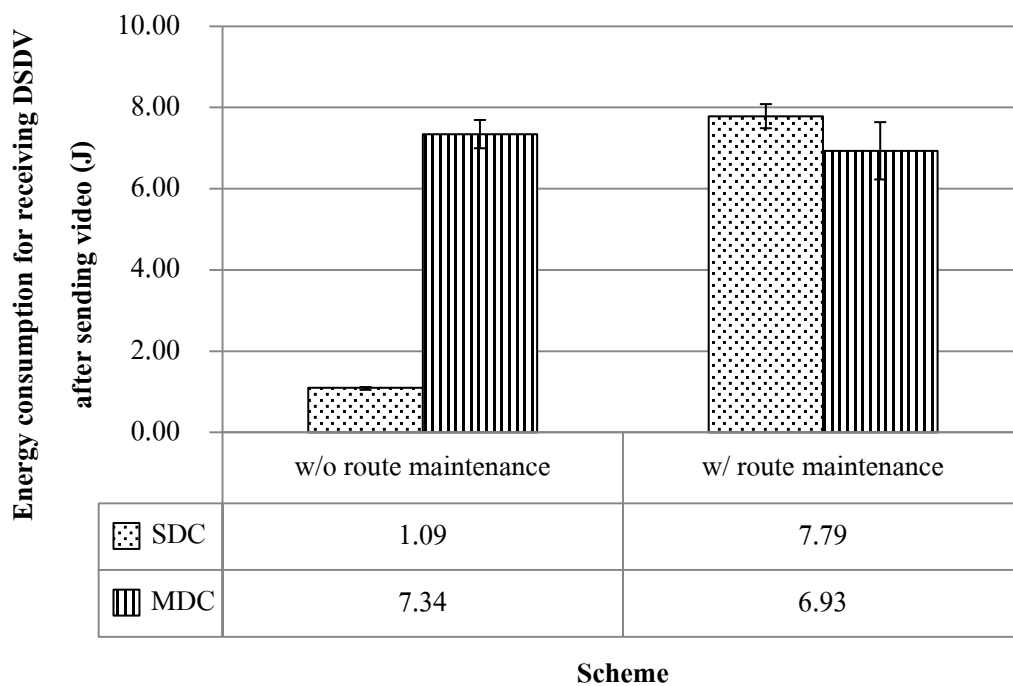




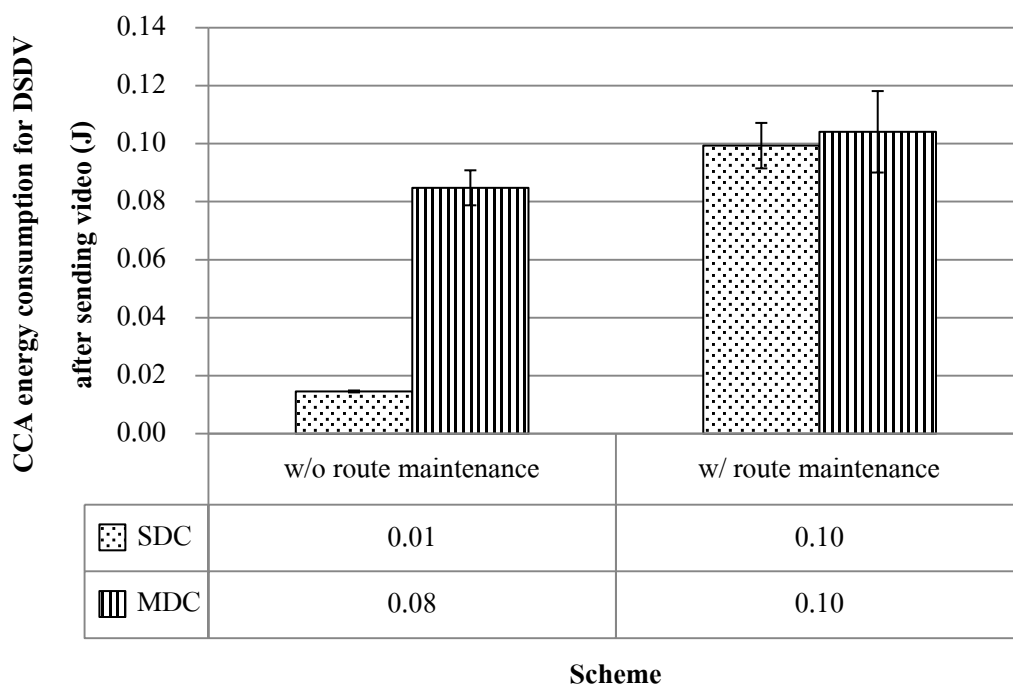
ภาพประกอบที่ 5-32 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้หลังการส่งข้อมูลวิดีโอ



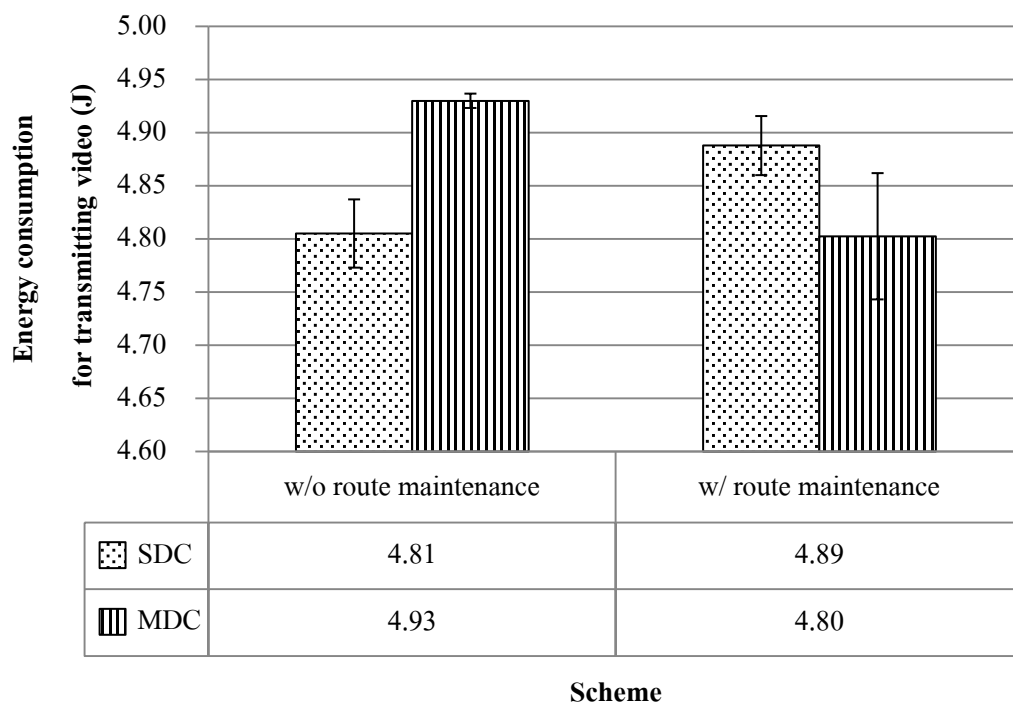
ภาพประกอบที่ 5-33 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการส่งข้อมูลเส้นทางหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ



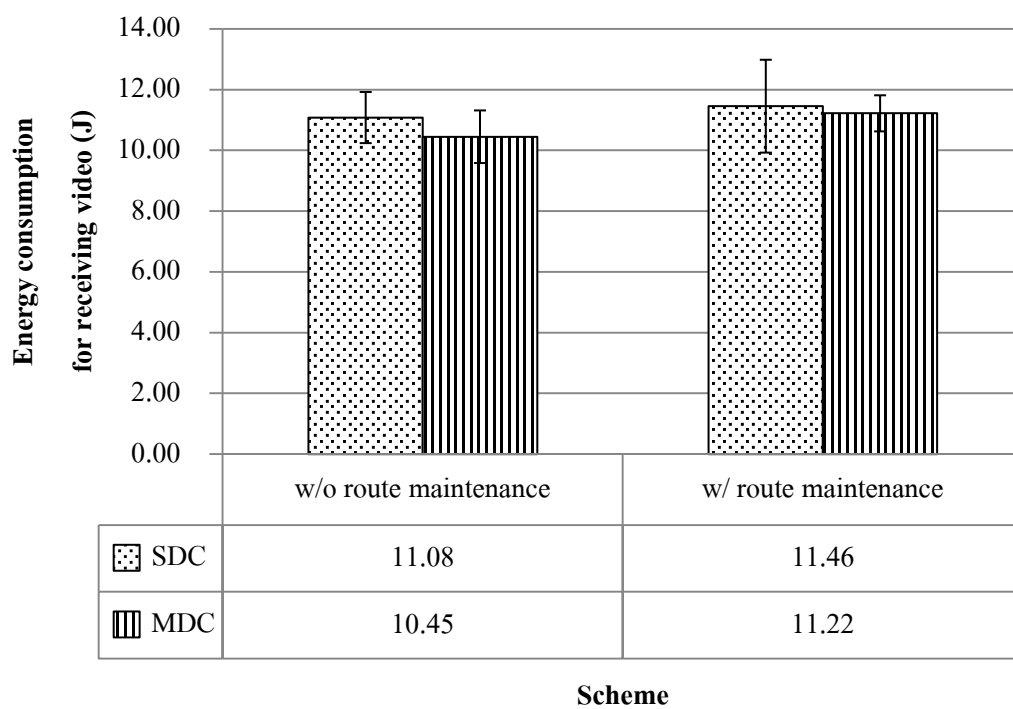
ภาพประกอบที่ 5-34 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับรับข้อมูลเส้นทางหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ



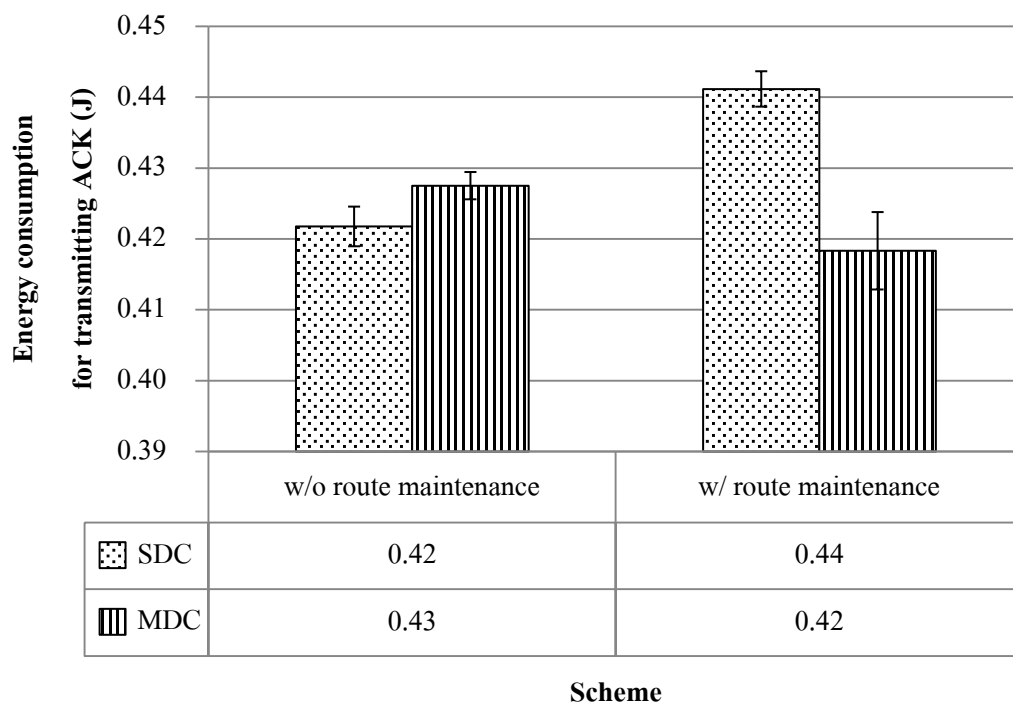
ภาพประกอบที่ 5-35 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลเส้นทางหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ



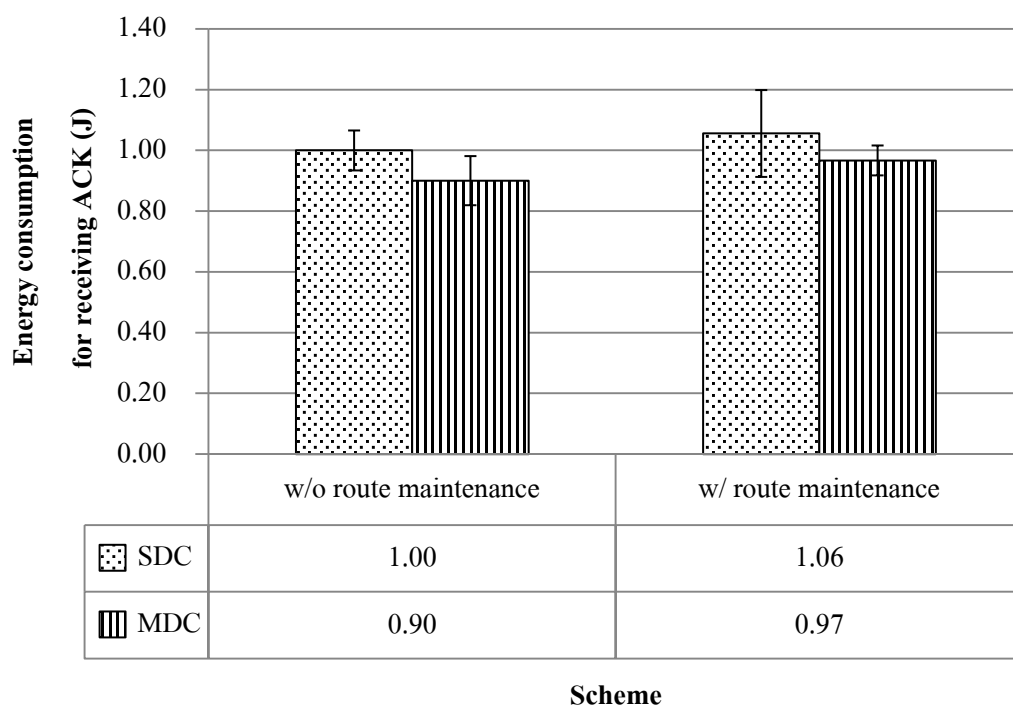
ภาพประกอบที่ 5-36 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอ



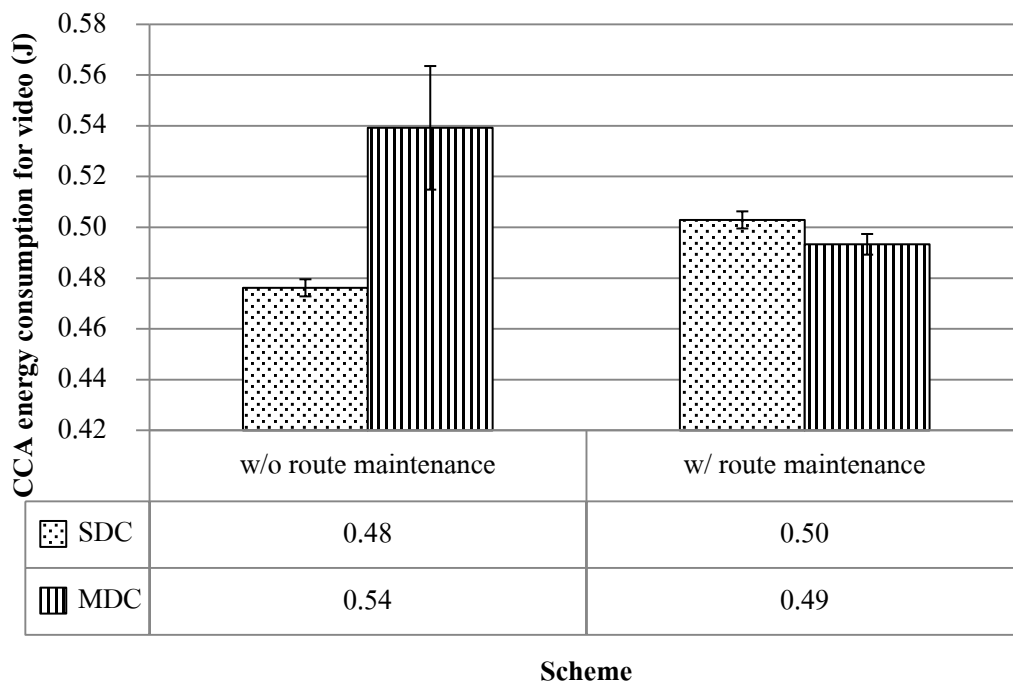
ภาพประกอบที่ 5-37 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการรับข้อมูลวิดีโอ



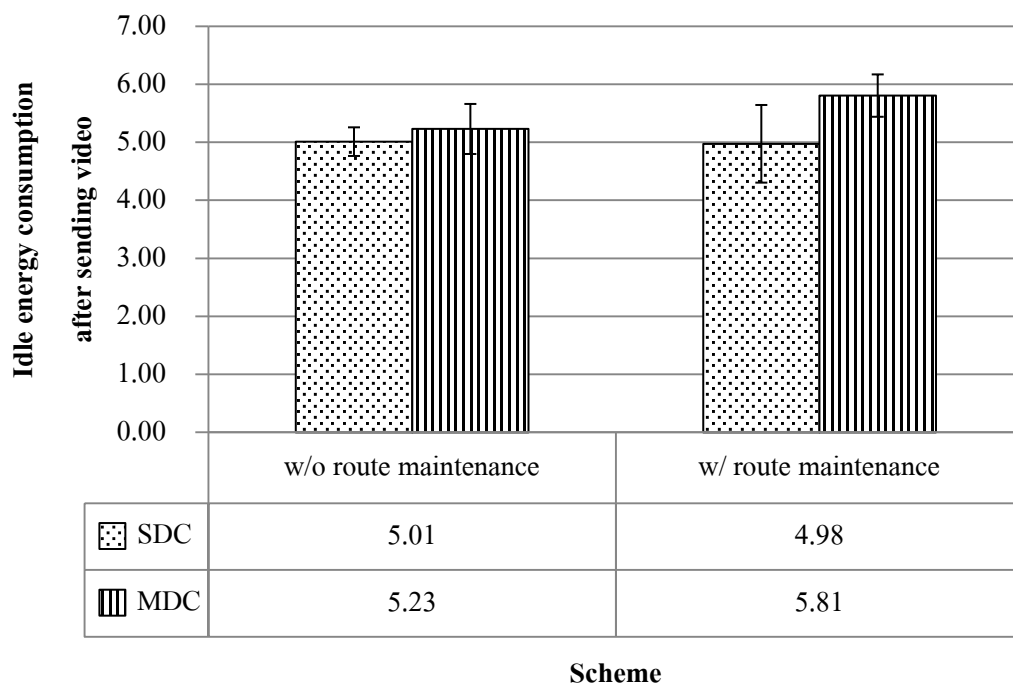
ภาพประกอบที่ 5-38 ปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการส่ง ACK



ภาพประกอบที่ 5-39 ปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการรับ ACK



ภาพประกอบที่ 5-40 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้สำหรับการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลวิดีโอ



ภาพประกอบที่ 5-41 ปริมาณพลังงานที่เครือข่ายใช้เมื่อไม่มีการทำงานหลังการส่งข้อมูลวิดีโอ

## 5.7 สรุปผลการทดลอง

แผนการ 16C3I MDSDV ที่ได้นำเสนอสามารถถูกใช้เป็นเส้นทางสำรองเมื่อเส้นทางหลักที่ทำการส่งข้อมูลวิดีโอเกิดความเสียหาย หรือถูกใช้เพื่อการส่งข้อมูลวิดีโอที่มีการใช้งานเทคนิค MDC บน 2 เส้นทางพร้อมกัน ในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอล 16C3I MDSDV ด้วย 16C3I DSDV ผลการจำลองเครือข่ายแสดงให้เห็นว่าแผนการ 16C3I DSDV ให้ผลการทดลองที่ดีกว่า 16C3I MDSDV ในทุกตัวชี้วัดสมรรถนะ เมื่อสภาวะปกติของเครือข่ายจะไม่เกิดการชนกันของข้อมูล

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

หลังจากได้ทำการศึกษาการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ด้วยโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV ในบทที่ 3 และพัฒนาโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV ให้รองรับการทำงานแบบหลายช่องสัญญาณ และสามารถจัดเตรียมเส้นทางได้หลายเส้นทาง ตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยดังรายละเอียดในบทที่ 4 และบทที่ 5 มาแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุป ปัญหาและอุปสรรคของงานวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะและการออกแบบโพรโทคอลเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาหรือพัฒนาการส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายไร้สายความเร็วต่ำ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่า การส่งข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายไร้สายความเร็วต่ำที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีการติดต่อสื่อสารแบบหลายทอดให้มีประสิทธิภาพเป็นประเด็นวิจัยที่มีความท้าทาย จากการศึกษา และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การเพิ่มจำนวนของ Interface และการจัดการกับช่องสัญญาณที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความสามารถของเครือข่าย

การทำวิจัยได้มีการศึกษาปัญหาและข้อจำกัดของการส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MPEG4 บนเครือข่ายแบบหลายทอดที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ด้วยโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง DSDV ดังแสดงในบทที่ 3 เนื่องจากในเครือข่ายปกติที่มีการใช้งานเพียงหนึ่งช่องสัญญาณบนอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุเพียงตัวเดียว การส่งข้อมูลวิดีโอจะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลสูง สิ่งนี้ส่งผลให้คุณภาพของวิดีโอที่ปลายทางอยู่ในระดับแย่ โพรโทคอล 2C2I DSDV ถูกนำเสนอเพื่อลดปัญหาการชนกันของข้อมูล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลนี้สามารถลดการชนกันของข้อมูลได้ ซึ่งนำไปสู่คุณภาพของวิดีโอที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามโพรโทคอลนี้รองรับแหล่งข้อมูลวิดีโอได้เพียงแหล่งข้อมูลเดียวเท่านั้น

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ความถี่ 2.4 GHz มีช่องสัญญาณที่ไม่เกิดการรบกวนกันให้ใช้งานจำนวน 16 ช่องสัญญาณ ดังนั้นในบทที่ 4 จึงนำเสนอโพรโทคอล 16C3I DSDV ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่มีการจัดการช่องสัญญาณจำนวน 16 ช่องสัญญาณ ผ่านทางโหนดที่ประกอบด้วย 3 Interfaces หนึ่งในสาม Interface ในแต่ละโหนดจะใช้ช่องสัญญาณเดียวกันทั้งเครือข่าย เพื่อขนส่ง

ข้อมูลเส้นทาง 2 Interfaces ที่เหลือถูกใช้เพื่อส่งข้อมูลจำนวน 1 ตัวและรับข้อมูลจำนวน 1 ตัว วิธีการจัดสรรช่องสัญญาณแบบ RCA ถูกนำมาใช้งานเพื่อให้แต่ละโหนดสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ แผนการกระจายช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูล RCB ถูกใช้เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดภายในช่องสัญญาณ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลนี้สามารถรองรับแหล่งข้อมูลวิดีโอได้ถึง 5 แหล่งข้อมูลวิดีโอ เมื่อเครือข่ายมีการส่งข้อมูลแบบ Many-to-many อย่างไรก็ตามโพรโทคอลนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการส่งวิดีโอบนเครือข่ายแบบ Many-to-one นอกจากนี้ยังได้ทำการพัฒนาแผนการ RCB เพื่อลดจำนวนครั้งในการสลับช่องสัญญาณ เมื่อในเครือข่ายมีจำนวนของโหนดน้อยกว่าจำนวนของช่องสัญญาณที่สามารถใช้ในการขนส่งข้อมูลได้

ในบทที่ 5 ได้ทำการพัฒนาโพรโทคอล 16C3I DSDV ในบทที่ 4 ให้รองรับการส่งข้อมูลวิดีโอที่มีการใช้เทคนิค MDC โดยเรียกโพรโทคอลใหม่นี้ว่า 16C3I MDSDV ผลการทดสอบสมรรถนะแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลนี้สามารถส่งข้อมูลวิดีโอแบบ MDC ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลนี้ด้วยโพรโทคอล 16C3I DSDV ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผนการ 16C3I DSDV ให้ผลของสมรรถนะที่ดีกว่าโพรโทคอลนี้ในทุกตัวชี้วัดสมรรถนะ

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

### 6.2.1 ปัญหา

งานนี้เป็นการปรับปรุงโพรโทคอล DSDV ให้รองรับการทำงานแบบหลายช่องสัญญาณ และสามารถจัดเตรียมเส้นทางได้หลายเส้นทาง การแก้ไขโค้ดไฟล์ C++ ในโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยค่อนข้างยุ่งยากในการทำความเข้าใจและพัฒนา

### 6.2.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาทำความเข้าใจการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++
- เนื่องจากการทดสอบแผนการ 16C3I MDSDV ได้ทำการทดสอบบนเครือข่ายแบบอยู่นิ่งเฉย (Static) เท่านั้น ยังไม่ได้ทำการทดสอบบนเครือข่ายแบบอื่น
- แผนการลดสัญญาณแทรกสอดที่ได้ออกแบบใช้สมมติฐานของระยะเวลาส่งสัญญาณวิทยุ และระยะรับรู้สัญญาณวิทยุแบบวงกลม โดยไม่ได้พิจารณาเรื่องการแกว่งของสัญญาณวิทยุ



- ข้อมูลวิดีโอที่ใช้ในการทดลองนี้มีเพียงวิดีโอ foreman เท่านั้น การใช้ข้อมูลวิดีโออื่นอาจทำให้ผลการทดลองเปลี่ยนไป
- การกำหนดพารามิเตอร์ในการเข้ารหัสวิดีโอที่แตกต่างกัน อาจจะทำให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน

### บรรณานุกรม

- [1] Y. Liu and S. K. Das, "Information-Intensive Wireless Sensor Networks: Potential and Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 11, pp. 142-147, Nov. 2006.
- [2] I. F. Akyildiz, T. Melodia and K. R. Chowdhury, "A Survey on Wireless Multimedia Sensor Networks," *Computer Networks*, vol. 51, no. 4, pp. 921-690, 2007.
- [3] I. T. Almalkawi, M. G. Zapata, J. N. Al-Karaki and J. Morillo-Pozo, "Wireless Multimedia Sensor Networks: Current Trends and Future Directions," *Sensors*, vol. 10, no. 7, pp. 6662-6717, Jul. 2010.
- [4] A.-J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, J. Garcia-Haro and F. Losilla, "A Cross-Layer Solution for Enabling Real-Time Video Transmission over IEEE 802.15.4 Networks," *Multimedia Tools and Applicat.*, vol. 51, no. 3, pp. 1069-1104, Feb. 2010.
- [5] A. Zainaldin, I. Lambadaris and B. Nandy, "Video over Wireless Zigbee Networks: Multi-channel Multi-radio Approach," in *Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf.*, Crete Island, Greece, Aug. 2008, pp. 882-887.
- [6] M. U. Chowdhury, D. Perera and T. Pham, "A Performance Comparison of Three Wireless Multi hop Ad-hoc Network Routing Protocols when Streaming MPEG-4 traffic," in *Proc. 8th Int. Multitopic Conf.*, Dec. 2004, pp. 516-521.
- [7] P. Kyasanur and N. H. Vaidya, "Routing and Link-layer Protocols for Multi-Channel Multi-Interface Ad Hoc Wireless Networks," *Mobile Computing and Communications Review*, vol. 10, no. 1, pp. 31-43, Jan. 2006.
- [8] T.-T. Luong, B.-S. Lee, C.-K. Yeo and A. Kessler, "Efficient channel assignment and routing protocol for multiple channels multiple interfaces wireless mesh network," in *IFIP Wireless Days*, Oct. 2010, pp. 1-5.
- [9] U. Lee and S. F. Midkiff, "Routing in Multi-Channel Wireless Ad-hoc Networks: OSPF-MCDS-MC," *Journal of Communications*, vol. 1, no. 2, pp. 57-68, May 2006.
- [10] Y. Qu, C.-H. Lung and A. Srinivasan, "Multi-channel OLSR with a Dedicated Control Interface," in *Proc. Int. Symp. Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, Aug. 2006, pp. 155-162.

- [11] V. C. Frias, G. D. Delgado and M. A. Igartua, "Multipath Routing for video-streaming services over IEEE 802.11e Ad hoc Networks," in *Int. Conf. Software in Telecommunications and Computer Networks*, Sept.-Oct. 2006, pp. 132-136.
- [12] I. Nikseresht, H. Yousefi, A. Movaghar and M. Khansari, "Interference-Aware Multipath Routing for Video Delivery in Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Int. Conf. Distributed Computing Systems Workshops*, June 2012, pp. 216-221.
- [13] Y. Liao and J. D. Gibson, "Routing-Aware Multiple Description Video Coding Over Mobile Ad-Hoc Networks," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 13, no. 1, pp. 132-142, Feb. 2011.
- [14] P. King, A. Etorban and I. Irahim, "A DSDV-based multipath routing protocol for mobile ad-hoc networks," in *Proc. 8th Annual PostGraduate Symp. Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting*, Jul. 2007, pp. 93-98.
- [15] M. K. Marina and S. R. Das, "Ad hoc on-demand multipath distance vector routing," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 6, no. 7, pp. 969-988, Nov. 2006.
- [16] L. Zhou, X. Wang, W. Ti, G.-M. Muntean and B. Geller, "Distributed Scheduling Scheme for Video Streaming over Multi-Channel Multi-Radio Multi-Hop Wireless Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 3, pp. 409-419, Apr. 2010.
- [17] S. Ling, X. Pengyu, W. Dan and X. Bai, "A Multi-interface Multi-channel Ad Hoc Routing Protocol For Real Time Video Transmission," in *Int. Conf. Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer*, Aug. 2011, pp. 2058-2063.
- [18] K.-M. Yang, M.-S. Wu, P.-H. Pan and J.-C. Chiu, "Dynamic Multi-channel Multi-path Routing Protocol for wireless mesh networks," in *Int. Computer Symp.*, Dec. 2010, pp. 865-868.
- [19] S. Songkhao and W. Teerapabkajorndet, "Performance analysis of MPEG4 transmission over IEEE 802.15.4 wireless ad hoc networks," in *Int. Conf. Networking, VLSI and Signal Processing*, Bangkok, Thailand, May 2011.
- [20] S. Songkhao and W. Teerapabkajorndet, "Network Bandwidth Enhancement on Multi-Hop Communications for Multiple Flows of Video over Multi-Channel IEEE 802.15.4 Networks," *J. Convergence Inform. Technology*, vol. 8, no. 11, pp. 239-247, Jun. 2013.

- [21] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [22] A. Zainaldin, I. Lambadaris and B. Nandy, "Adaptive Rate Control Low bit-rate Video Transmission over Wireless Zigbee Networks," in *IEEE Int. Conf. Communications*, Beijing, China, May 2008, pp. 52-58.
- [23] J. Park, J. Cho, J. Choi and T. Nam, "A Zigbee Network-based Multi-channel Heart Rate Monitoring System for Exercising Rehabilitation Patients," in *IEEE Region 10 Conf.*, Oct.-Nov. 2007, pp. 1-4.
- [24] M. S. Kang, J. W. Chong, H. Hyun, S. M. Kim, B. H. Jung and D. K. Sung, "Adaptive Interference-Aware Multi-Channel Clustering Algorithm in a IEEE 802.15.4 Network in the Presence of WLAN Interference," in *2nd Int. Symp. Wireless Pervasive Computing*, Feb. 2007.
- [25] S. Farahini, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, USA: Newnes, 2008.
- [26] T. T. Luong, B. S. Lee and C. K. Yeo, "Dual-Interface Multiple Channels DSDV Protocol," in *IEEE Int. Conf. Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, Oct. 2009, pp. 104-109.
- [27] C. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers," in *Proc. ACM SIGCOMM*, London, UK, Oct. 1994, pp. 234-244.
- [28] I. E. G. Richardson, *H.264 and MPEG-4 Video Compression*, The Atrium, Southern Gate, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [29] A. Lie and J. Klaue, "Evalvid-RA: trace driven simulator of rate adaptive MPEG-4 VBR video," *Multimedia System*, vol. 4, no. 1, pp. 33-50, Nov. 2008.
- [30] D. Geist and B. Melamed, "TESTool: An Environment for Visual Interactive Modeling of Autocorrelated Traffic," in *IEEE Int. Conf. Communications*, June 1992, pp. 1285-1289.
- [31] I. F. Akyildiz, T. Melodia and K. R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Networks*, vol. 51, no. 4, pp. 921-960, Mar. 2007.

- [32] J. Klaue, B. Rathke and A. Wolisz, "EvalVid - A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation," in *Proc. 13th Int. Conf. Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation*, Sept. 2003, pp. 255-272.
- [33] S. Misra, M. Reisslein and G. Xue, "A Survey of Multimedia Streaming in Wireless Sensor Networks," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 10, no. 4, pp. 18-39, 2008.
- [34] Z. N. Li and M. S. Drew, *Fundamentals of Multimedia*, Pearson Education, Inc., 2004.
- [35] C.-H. Ke, "myEvalSVC: an Integrated Simulation Framework for Evaluation of H.264/SVC Transmission," *KSII Trans. Internet & Inform. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 379-394, Jan. 2012.
- [36] B. Yan and H. Gharavi, "Multi-path Multi-Channel Routing Protocol," in *Proc. 5th IEEE Symp. Network Computing and Applications*, July 2006, pp. 27-31.
- [37] L. Paquereau and B. E. Helvik, "Simulation of Wireless Multi-\* Networks in NS-2," in *Proc. International Conf. Performance Evaluation Methodologies and Tools for Computer Performance Evaluation*, 2008.
- [38] K. R. Kumar, R. Mayank, K. Balakrishnan and D. Das, "WEBS: WiMAX Emulation Testbed to Benchmark Streaming Multimedia QoS," in *Proc. IEEE Int. Conf. Internet Multimedia Services Architecture and Applications*, 2009, pp.1-6.
- [39] Chipcon, "CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-Ready RF Transceiver Datasheet (Rev 1.2)," Chipcon AS, Oslo, Norway, 2004.
- [40] T.-T. Luong, B.-S. Lee and C.-K. Yeo, "Channel allocation for multiple channels multiple interfaces communication in wireless ad hoc networks," in *Proc. 7th int. IFIP-TC6 networking conf. Ad Hoc and sensor networks, wireless networks, next generation internet*, May 2008, pp. 87-98.
- [41] G. Anastasi, E. Borgia, M. Conti, E. Gregori and A. Passarella, "Understanding the real behavior of Mote and 802.11 ad hoc networks: An experimental approach," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 1, no. 2, pp. 237-256, 2005.
- [42] H. Karim, C. Hewage, A. Yu, S. Worrall, S. Dogan and A. Kondoz, "Scalable multiple description 3D video coding based on even and odd frame," in *Picture coding symp.*, Lisboa, Portugal, Nov. 2007.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การเตรียมข้อมูลวิดีโอเพื่อใช้บนโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2

ภาคผนวกนี้กล่าวถึงวิธีการเตรียมวิดีโอ MPEG4 เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานบนโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 ในงานวิจัยนี้ทำการติดตั้งโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 ผ่าน บนระบบปฏิบัติการ Windows โดยใช้โปรแกรม Cygwin ในการจำลองสภาพแวดล้อมระบบปฏิบัติการ Linux ในหัวข้อนี้เริ่มต้นด้วยการแนะนำวิดีโอในระบบสี YUV ที่จะใช้ในการบีบอัดเป็นวิดีโอ MPEG4 จากนั้นจะเป็นวิธีใช้เครื่องมือ x264 ในการบีบอัดวิดีโอให้เป็นวิดีโอ MPEG4 และสุดท้ายเป็นการเตรียมข้อมูลวิดีโอ MPEG4 ให้สามารถนำไปส่งบนโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 ได้

## ก.1 แนะนำวิดีโอ

วิดีโอ foreman\_qcif.yuv จะถูกนำมาบีบอัดเป็นวิดีโอ MPEG4 จากนั้นจะถูกนำไปสร้างเป็นไฟล์ Traffic trace เพื่อใช้สำหรับการส่งบนโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่าย NS-2 วิดีโอ foreman\_qcif.yuv ใช้รูปแบบสี YUV มีขนาดของภาพเท่ากับมาตรฐาน Quarter common intermediate format (QCIF) ซึ่งตามมาตรฐานนี้จะมีความละเอียดของภาพเท่ากับ 176x144 จุดภาพวิดีโอ foreman\_qcif.yuv มีอัตราการแสดงเฟรม 25 เฟรมต่อวินาที

## ก.2 วิธีการเข้ารหัสวิดีโอ

ก.2.1 เปิดโปรแกรม Cygwin ในโหมด Command line

ก.2.2 กรณีที่ต้องมีการแยกข้อมูลวิดีโอ foreman\_qcif.yuv ออกเป็นหลายๆ ส่วน ให้ทำการใช้คำสั่งดังนี้ที่ Command line

ก.2.2.1 `./splitter foreman_qcif qcif 400 2`

คำสั่ง splitter เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับการแยกข้อมูลวิดีโอในรูปแบบสี YUV ออกเป็นหลายๆ ส่วน โดยพารามิเตอร์แรกที่ต้องกำหนดเป็นไฟล์วิดีโอต้นฉบับในรูปแบบสี YUV ในที่นี้คือ foreman\_qcif ลำดับถัดมากำหนดพารามิเตอร์ขนาดของภาพวิดีโอในที่นี้คือ qcif พารามิเตอร์ถัดมาเป็นการกำหนดจำนวนของเฟรมวิดีโอที่ต้องการแบ่งในที่นี้คือจำนวน 400 เฟรม และสุดท้ายกำหนดจำนวนผลลัพธ์วิดีโอหลังการแบ่งซึ่งเท่ากับ 2 จากการใช้คำสั่งนี้จะได้วิดีโอผลลัพธ์จำนวน 2 ไฟล์ ในไฟล์แรกประกอบด้วยวิดีโอเฟรมในลำดับเฟรมคู่ของวิดีโอต้นฉบับรวมจำนวน 200 เฟรม และในไฟล์ที่สองประกอบด้วยวิดีโอเฟรมในลำดับเฟรมคี่ของวิดีโอต้นฉบับรวมจำนวน 200 เฟรม

ก.2.3 ทำการบีบอัดวิดีโอ foreman\_qcif.yuv เป็น MPEG4 โดยใช้คำสั่งดังนี้ที่ Command line

ก.2.3.1 `./x264 -I 12 --bframe 2 --b-adapt 0 -B 64 --fps 25 -o foreman_cif.264`

`foreman_qcif.yuv 176x144`



คำสั่ง x264 เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับการเข้ารหัสไฟล์ที่มีนามสกุล yuv ไปเป็น MPEG4 แบบ H.264 ในที่นี่จะทำการกำหนดวิดีโอ MPEG4 ให้มีรูปแบบของเฟรม IPBBPBBPBBPB ที่อัตราบิต 64 kbps โดยการกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้ พารามิเตอร์ -I ใช้ในการกำหนด GOP ของ MPEG4 ซึ่งในที่นี่กำหนดให้แต่ละกลุ่มประกอบด้วย 12 เฟรม ลำดับถัดมาพารามิเตอร์ --bframe เป็นการกำหนดจำนวนของเฟรม B ที่คั่นระหว่างเฟรม P ที่อยู่ติดกัน ซึ่งในที่นี่เท่ากับ 2 เฟรม ถัดมาพารามิเตอร์ -b-adapt 0 เป็นการกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเฟรม ลำดับถัดมาพารามิเตอร์ -B เป็นการกำหนดอัตราบิตที่ทำการเข้ารหัส ซึ่งในที่นี่เท่ากับ 64000 บิตต่อวินาที ต่อมาพารามิเตอร์ --fps เป็นการกำหนดอัตราการแสดงผลเฟรม ซึ่งในที่นี่เท่ากับ 25 เฟรมต่อวินาที ต่อมาพารามิเตอร์ -o เป็นการกำหนดไฟล์ผลลัพธ์ที่มีนามสกุล 264 ซึ่งในที่นี่ใช้ชื่อว่า foreman\_qcif.264 และพารามิเตอร์สุดท้าย foreman\_qcif.yuv 176x144 เป็นการกำหนดไฟล์ foreman\_qcif.yuv ซึ่งเป็นไฟล์ต้นฉบับ และมีความละเอียดของวิดีโอต้นฉบับที่นำมาทำการเข้ารหัส MPEG4 เท่ากับ 176x144 จุดภาพ

```
ก.2.3.2 ./MP4Box -hint -mtu 92 -fps 25 -add foreman_qcif.264
foreman_qcif.mp4
```

คำสั่ง MP4Box เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับการจัดการไฟล์ H.264 ไปเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล mp4 โดยพารามิเตอร์ -hint -mtu เป็นการกำหนดขนาดของเฟรมที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย ซึ่งในที่นี่กำหนดเท่ากับ 92 ไบต์ ต่อมาพารามิเตอร์ -fps เป็นการกำหนดอัตราการแสดงผลเฟรม ซึ่งในที่นี่เท่ากับ 25 เฟรมต่อวินาที ต่อมาพารามิเตอร์ -add เป็นการกำหนดไฟล์ต้นฉบับที่จะใช้สำหรับการแปลงเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล mp4 ซึ่งในที่นี่คือ foreman\_qcif.264 และสุดท้ายพารามิเตอร์ foreman\_qcif.mp4 เป็นการกำหนดไฟล์ผลลัพธ์ซึ่งมีนามสกุล mp4 ที่ต้องการ

### ก.3 การเตรียมข้อมูลวิดีโอเพื่อจำลองการทำงานด้วย NS2

ก.3.1 ทำการสร้างไฟล์ Traffic trace โดยใช้คำสั่งดังนี้ที่ Command line

```
ก.3.1.1 ./mp4trace -f -s 192.168.0.2 12345 foreman_qcif.mp4 > traffictrace
```

คำสั่ง mp4trace ใช้สำหรับการสร้างไฟล์ Traffic trace เพื่อใช้ในการส่งวิดีโอผ่านโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS2 โดยพารามิเตอร์ -f -s เป็นการสร้างเฟรมโดยทำการจำลองการส่งผ่านเครือข่ายที่มี IP Address 192.168.0.2 ที่ Port 12345 ต่อมาพารามิเตอร์ foreman\_qcif.mp4 เป็นการกำหนดไฟล์ที่มีนามสกุล mp4 ที่จะใช้ในการสร้างไฟล์ Traffic trace และสุดท้าย > เป็นการกำหนดผลลัพธ์ของไฟล์ Traffic trace ซึ่งในที่นี่คือ traffictrace

**ภาคผนวก ข การประเมินสมรรถนะการส่งวิดีโอด้วยเครื่องมือ EvalVid**

ภาคผนวกนี้กล่าวถึงวิธีการประเมินวิดีโอแบบ MPEG4 หลังการส่งผ่านโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2 ในหัวข้อนี้เริ่มต้นด้วยการประเมินผลสมรรถนะวิดีโอหลังการส่งผ่านเครือข่ายจำลอง จากนั้นเป็นการประเมินสมรรถนะ PSNR ของวิดีโอที่ปลายทางรับได้

## ข.1 การประเมินผลสมรรถนะวิดีโอด้านปลายทาง

ข.1.1 เปิดโปรแกรม Cygwin ในโหมด Command line

ข.1.2 ประเมินผลสมรรถนะวิดีโอที่ปลายทางได้รับ โดยใช้คำสั่ง `./etmp4 -f -0 sendertrace receivertrace traffictrace foreman_qcif.mp4 erroneous_foreman_qcif` ที่ Command line

คำสั่ง etmp4 ใช้สำหรับการเปลี่ยนข้อมูลไฟล์ Receiver trace หลังการส่งผ่านเครือข่ายให้กลับมาเป็นไฟล์ MPEG4 โดยกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้ พารามิเตอร์ -f เป็นการกำหนดการแสดงผลข้อมูลของไฟล์ผลลัพธ์ โดยให้แสดงผลข้อมูลผลลัพธ์ตามลำดับเฟรม พารามิเตอร์ -0 เป็นการแทนที่เฟรมที่หายไปด้วยเฟรมว่าง พารามิเตอร์ sendertrace เป็นไฟล์ Sender trace ลำดับต่อมาพารามิเตอร์ receivertrace เป็นไฟล์ Receiver trace ลำดับต่อมาพารามิเตอร์ traffictrace เป็นไฟล์ Traffic trace ลำดับต่อมาพารามิเตอร์ foreman\_qcif.mp4 เป็นไฟล์ mp4 ที่ใช้ในการสร้างไฟล์ Traffic trace ไฟล์ foreman\_qcif.mp4 นี้ใช้ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลหลังการส่งผ่านเครือข่ายเพื่อหาเวลาหน่วงของเฟรม (Frame delay) และสุดท้ายพารามิเตอร์ erroneous\_foreman\_qcif เป็นชื่อของไฟล์ผลลัพธ์

ข.1.3 ทำการเปลี่ยนไฟล์ erroneous\_foreman\_qcif.mp4 กลับไปเป็นไฟล์ในระบบสี YUV โดยใช้คำสั่ง `./ffmpeg -i erroneous_foreman_qcif.mp4 erroneous_foreman_qcif.yuv` ที่ Command line

คำสั่ง ffmpeg ใช้สำหรับการเปลี่ยนไฟล์ที่มีนามสกุล mp4 ไปเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล yuv เพื่อใช้ในการประเมินผล PSNR โดยพารามิเตอร์ -i ใช้เพื่อบอกไฟล์ที่ต้องการเปลี่ยนซึ่งในที่นี้คือ erroneous\_foreman\_qcif.mp4 โดยพารามิเตอร์ erroneous\_foreman\_qcif.yuv เป็นไฟล์ผลลัพธ์

## ข.2 การประเมินสมรรถนะ PSNR

ข.2.1 กรณีที่ต้องมีการแยกข้อมูลวิดีโอ foreman\_qcif.yuv ออกเป็นหลายๆ ส่วน ต้องมีการรวมข้อมูลวิดีโอแต่ละส่วนเหล่านั้นเป็นส่วนเดียวกันด้วยคำสั่งดังนี้ที่ Command line

ข.2.1.1 `./merger erroneous_foreman_qcif merger_erroneous_foreman_qcif 400 2 0 1`

คำสั่ง `merger` เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับรวมข้อมูลวิดีโอที่ถูกแยกออกเป็นหลายๆ ส่วนด้วยคำสั่ง `spliter` โดยพารามิเตอร์แรกที่ต้องกำหนดเป็นไฟล์วิดีโอหลังการประเมินผลด้านปลายทางในรูปแบบสี YUV ในที่นี้คือ `erroneous_foreman_qcif$х` พารามิเตอร์ถัดมาเป็นการกำหนดชื่อไฟล์วิดีโอหลังการนำแต่ละส่วนมารวมกัน ในที่นี้คือ `merger_erroneous_foreman_qcif` ลำดับถัดมากำหนดพารามิเตอร์ขนาดของภาพวิดีโอในที่นี้คือ `qcif` พารามิเตอร์ถัดมาเป็นการกำหนดจำนวนของเฟรมหลังการรวมแต่ละส่วนแยกในที่นี้คือจำนวน 400 เฟรม ถัดมากำหนดจำนวนของส่วนแยกวิดีโอที่ต้องการนำมารวมกันซึ่งเท่ากับ 2 พารามิเตอร์ 0 และ 1 คือตัวแปร `х` ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชื่อไฟล์วิดีโอ

ข.2.2 ที่หน้าต่าง `cygwin` ใช้คำสั่ง `./psnr 176 144 420 foreman_qcif.yuv erroneous_foreman_qcif.yuv > psnr_erroneous_foreman_qcif` ที่ Command line

คำสั่ง `psnr` ใช้สำหรับการประเมิน PSNR ของของไฟล์ `yuv` ที่ทำการ Decompression มาจากไฟล์ `mp4` หลังการส่งผ่านเครือข่าย นำมาเปรียบเทียบกับไฟล์ `yuv` ต้นฉบับ โดยพารามิเตอร์ 176 144 เป็นการกำหนดความละเอียดของภาพ ต่อมาพารามิเตอร์ 420 เป็นการกำหนดรูปแบบการสุ่มตัวอย่างจุดภาพในชั้นสี ลำดับต่อมาพารามิเตอร์ `foreman_qcif.yuv` เป็นไฟล์ `yuv` ต้นฉบับ ต่อมาพารามิเตอร์ `erroneous_foreman_qcif.yuv` เป็นไฟล์ `yuv` ที่ทำการ Decompression มาจากไฟล์ `mp4` หลังการส่งผ่านเครือข่าย และสุดท้ายพารามิเตอร์ `>` เป็นการกำหนดผลลัพธ์ของการประเมิน PSNR ซึ่งในที่นี้คือ `psnr_erroneous_foreman_qcif`

ภาคผนวก ค การใช้งานโปรโตคอล 16C3I MDSDV และเครื่องมือ EvalVid บน  
โปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2

ภาคผนวกนี้กล่าวถึงการกำหนดการทำงานของโปรโตคอล 16C3I MDSDV ที่ได้พัฒนาขึ้นและการกำหนดการทำงานของเครื่องมือ EvalVid บนโปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย NS-2 ในหัวข้อนี้เริ่มต้นด้วยการแนะนำโปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย NS-2 ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ถัดมาเป็นการใช้งานโปรโตคอล 16C3I MDSDV ที่ได้พัฒนาขึ้นบนโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2 และสุดท้ายเป็นการใช้งานเครื่องมือ EvalVid บนโปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย NS-2

### ค.1 โปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2

การพัฒนาระบบเครือข่ายด้วยการทดลองหรือทดสอบโดยใช้อุปกรณ์จริงอาจจะไม่คุ้มค่า เนื่องจากต้องใช้งบประมาณสูงและต้องอุทิศเวลาในการวางโครงสร้างเครือข่ายเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังเสี่ยงต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือระบบเครือข่าย อันเนื่องมาจากความผิดพลาดในการทดสอบ ดังนั้นการศึกษาการทำงานของระบบเครือข่ายในด้านต่างๆ ด้วยการจำลองการทำงานจากระบบเครือข่ายจึงเหมาะสมกว่าการทดสอบเครือข่ายด้วยอุปกรณ์หรือระบบเครือข่ายจริง การเลือกใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษา และยังสามารถพัฒนางานวิจัยทางด้านระบบเครือข่ายอีกด้วย

โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย NS-2 เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่ช่วยในการจำลองการทำงานของระบบเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพ โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย NS-2 เป็นโปรแกรมแบบ Open source ที่ได้รับความนิยมจากผู้ใช้และนักวิจัยในปัจจุบัน โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย NS-2 ถูกพัฒนาขึ้นโดย Information sciences institute (ISI) ให้สามารถใช้งานได้ผ่านหลายๆ ระบบปฏิบัติการอย่างเช่น Linux Solaris และ Windows เป็นต้น โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย NS-2 เป็นโปรแกรมจำลองการทำงานแบบ Discreet event สนับสนุนการจำลองการทำงานของ UDP Routing และ Wireless network เป็นต้น

การออกแบบการจำลองการทำงานของระบบเครือข่ายผ่านโปรแกรมจำลองการทำงาน NS-2 สามารถทำได้ผ่านทาง Otcl script ซึ่งการกำหนดพารามิเตอร์ให้กับโปรโตคอล 16C3I MDSDV และเครื่องมือ EvalVid ก็ต้องกำหนดผ่านทาง Otcl script เช่นกัน

### ค.2 การใช้งานโปรโตคอล 16C3I MDSDV บนโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย NS-2

ในงานนี้แต่ละโหนดประกอบด้วยหลาย Interface ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นในการจำลองการทำงานบนโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย NS-2 ต้องมีการกำหนดการทำงานของแต่ละ Interface ของโหนดบน Otcl script เพื่อให้โปรแกรมจำลองการทำงาน

ระบบเครือข่าย NS-2 นำค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไปใช้ในการจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย ดังแสดงในหัวข้อ ค.2.1 นอกจากนี้ในหัวข้อ ค.2.2 แสดงการใช้คำสั่งเพิ่มจำนวนของ Interface ให้กับแต่ละ โหนด

### ค.2.1 การกำหนดกำหนดการทำงานของแต่ละ Interface

กำหนดค่าให้กับแต่ละ Interface ของโหนด โดยกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้

```
$ns_ interface-config -phy $val(phy) \
                    -mac $val(mac) \
                    -ifq $val(ifq) \
                    -ifq-length $val(ifqlen) \
                    -ll $val(ll) \
                    -antenna $val(ant) \
                    -channel $channel(0) \
                    -propagation $prop
```

โดย	\$val(phy)	คือ	Physical layer
	\$val(mac)	คือ	MAC layer
	\$val(ifq)	คือ	รูปแบบของ Interface Queue
	\$val(ifqlen)	คือ	จำนวนกลุ่มข้อมูลสูงสุดที่เก็บใน Interface Queue
	\$val(ll)	คือ	รูปแบบของสายอากาศ
	\$channel(0)	คือ	ช่องสัญญาณที่ Interface ใช้งาน
	\$prop	คือ	แบบจำลองสัญญาณวิทยุที่ Interface ใช้งาน

### ค.2.2 การเพิ่ม Interface ให้กับโหนด

การเพิ่มจำนวน Interface ในแต่ละโหนดสามารถทำได้โดยการใช้ 3 คำสั่ง ดังนี้

ค.2.2.1 `$ns_ interface-config -channel $channel(0)` เป็นการกำหนดช่องสัญญาณที่จะใช้ใน Interface ใหม่

ค.2.2.2 `set node_1($i) [new NetworkLayerUnit $node_($i)]` เป็นการเลือก Network layer ของโหนดที่ต้องการเพิ่ม Interface ใหม่

ค.2.2.3 `set iface_(0) [$node_($i) add-interface Wireless $node_1($i)]` เป็นการเพิ่ม Interface ใหม่ลงไปใน Network layer ของโหนดที่เลือก

### ค.3 การใช้งานเครื่องมือ EvalVid บนโปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย NS-2

การจำลองการส่งวิดีโอแบบ MPEG4 ด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย NS-2 ร่วมกับเครื่องมือ EvalVid ต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้เครื่องมือ EvalVid สามารถนำข้อมูลหลังการจำลองการทำงานระบบเครือข่ายด้วยโปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย NS-2 ไปใช้ในการประเมินผลได้ ต้องมีการกำหนดไฟล์ Traffic trace Sender trace และ Receiver trace ด้วย 3 คำสั่งดังนี้

ค.3.1 `set original_file_name traffictrace` เป็นการกำหนดชื่อไฟล์ traffictrace ที่จะใช้ในการส่งผ่านเครือข่าย ในที่นี้ traffictrace เป็นชื่อไฟล์ที่ต้องการนำมาส่งผ่านเครือข่าย

ค.3.2 `$udp set_filename sendertrace` เป็นการกำหนด sendertrace ทางฝั่งส่งที่จะใช้ในการประเมินผลการส่งข้อมูลวิดีโอด้วยเครื่องมือ EvalVid ในที่นี้ sendertrace เป็นชื่อไฟล์ที่ต้องนำมาประเมินผลการส่งข้อมูลวิดีโอ

ค.3.3 `$null set_trace_filename receivertrace` เป็นการกำหนด receivertrace ทางฝั่งรับที่จะใช้ในการประเมินผลการส่งข้อมูลวิดีโอด้วยเครื่องมือ EvalVid ในที่นี้ receivertrace เป็นชื่อไฟล์ที่ต้องนำมาประเมินผลการส่งข้อมูลวิดีโอ



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อสกุล นายสิทธิศักดิ์ ส่งข่าว

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120122

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนผู้ช่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ผู้ช่วยวิจัยในโครงการวิจัยต่อไปนี้
  - a. “Radio Resource Management for Wireless Ad Hoc Sensor and Actuator Networks,” funding supported by NSTDA.
  - b. “Wireless Sensor Networks for Microclimate Monitoring in Plant Genetic Protection Area of RSPG, Rajjaprabha Dam,” funding supported by NRCT.
  - c. “Industrial Wireless Ad Hoc Sensor Networks,” funding supported by NRCT.

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- [1] S. Songkhao and W. Teerapabkajorndet, "Performance analysis of MPEG4 transmission over IEEE 802.15.4 wireless ad hoc networks," in Int. Conf. Networking, VLSI and Signal Processing, Bangkok, Thailand, May 2011.
- [2] S. Songkhao and W. Teerapabkajorndet, "Network Bandwidth Enhancement on Multi-Hop Communications for Multiple Flows of Video over Multi-Channel IEEE 802.15.4 Networks," J. Convergence Inform. Technology, vol. 8, no. 11, pp. 239-247, Jun. 2013.