

## คำนำ

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง การเพิ่มสมรรถนะของ  
ช่องสัญญาณสื่อสารสายกำลัง ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิจัย  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๖ ผู้วิจัยหวังเป็น  
อย่างยิ่งว่าองค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย  
ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร และนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดทางการ  
วิจัยหรือนวัตกรรมต่อไป

วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| คำนำ                                   | 1    |
| สารบัญ                                 | 2    |
| สารบัญภาพ                              | 3    |
| บทคัดย่อ                               | 4    |
| Abstract                               | 5    |
| บทที่ 1 บทนำ                           | 6    |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 9    |
| บทที่ 3 วิธีวิจัยและผลการวิจัย         | 12   |
| บทที่ 4 บทสรุป                         | 37   |
| บรรณานุกรม                             | 39   |
| ภาคผนวก การเผยแพร่ผลการวิจัย           | 42   |

# สารบัญภาพ

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 1 โคร่งข่ายในโลคัลลูป  | 9    |
| 2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในอาคารผ่านสายไฟฟ้า  | 10   |
| 3 เครื่องส่งโอเอฟดีเอ็ม  | 13   |
| 4 เครื่องรับโอเอฟดีเอ็ม  | 13   |
| 5 เปรียบเทียบสมรรถนะของการจัดสรรปริมาณข้อมูลทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การจัดสรรปริมาณ ข้อมูลแบบเหมาะที่สุด การจัดสรรปริมาณ ข้อมูลแบบเปิด-ปิด และการจัดสรรปริมาณ ข้อมูลแบบเท่ากัน โดย มีการพิจารณาเปรียบเทียบกรณีที่มีสัญญาณรบกวนพื้นหลัง และ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ | 30   |
| 6 สมรรถนะของการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะที่สุดเปรียบเทียบกับ การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดและแบบเท่ากันใน ระยะเวลาส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน   | 31   |
| 7 สมรรถนะของการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะที่สุดในอัตราบิตที่ แตกต่างกัน  | 32   |
| 8 เปรียบเทียบร้อยละของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่ได้รับการจัดสรร ปริมาณข้อมูลด้วยวิธีการที่แตกต่างกันในช่วงอัตราบิตระหว่าง 0 ถึง 500 เมกะบิตต่อวินาที   | 33   |
| 9 แสดงพลังงานทั้งหมดต่อแบนด์วิทด์ ที่ -92 ดีบีเอ็มต่อเฮิร์ตซ์ แบนด์ วิทด์รวมของระบบหรือ $W$ เท่ากับ 19.5 เมกะเฮิร์ตซ์และค่าความ แปรปรวนหรือ $\sigma_s^2$ เท่ากับ 1   | 34   |

- 10 ค่าเหมาะที่สุดของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานกับปริมาณ  
ข้อมูลที่ต่างกัน 35
- 11 พลังงานรวมต่อแบนด์วิดท์ของระบบกับจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่  
เปิดใช้งานเมื่อหาคำตอบด้วยวิธีเขียนโปรแกรมจำลองและวิเคราะห์  
ทฤษฎี 36

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการส่งสัญญาณด้วยวิธีโอเอฟดีเอ็มสำหรับช่องสัญญาณสายไฟฟ้าจำนวนสองวิธี วิธีแรกเป็นการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะที่สุดสำหรับช่องสัญญาณที่สถานะช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือช่องสัญญาณตายตัว โดยปริมาณข้อมูลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะขึ้นอยู่กับ อัตราขยายของช่องสัญญาณ อัตราการส่งสัญญาณ และ ระยะเวลาของการส่งสัญญาณ วิธีการที่สองปริมาณข้อมูลที่เท่าๆกันจะถูกแบ่งให้แต่ละช่องสัญญาณย่อยสำหรับช่องสัญญาณย่อยที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนกับกำลังสองของอัตราขยายของช่องสัญญาณน้อยกว่าค่าขีดแบ่ง โดยวิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบที่สองได้มีการวิเคราะห์สำหรับช่องสัญญาณแบบสุ่มซึ่งพลังงานที่ระบบใช้ทั้งหมดสามารถหาได้โดยใช้รูปแบบเฉพาะในระบบที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น ตัวอย่างจากวิธีการเชิงตัวเลขได้แสดงให้เห็นว่าการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะที่สุดสามารถลดพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลลง 83% โดยเมื่อเทียบกับวิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเท่ากัน ในขณะที่การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด สามารถให้สมรรถนะที่ใกล้เคียงกับวิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะที่สุดเมื่อกำหนดให้เวลาในการส่งข้อมูลเป็นช่วงสั้นๆ

# Abstract

This work proposes two bit allocations for a powerline OFDM channel to minimize a total transmission energy. The first is the optimal bit allocation derived for a deterministic channel model. The optimal number of bits allotted for each subchannel depends on channel gains, required data rate and transmission duration. For the second allocation, an equal number of bits is transmitted on a subchannel whose ratio between a noise power and squared channel gain is less than certain threshold. This on-off threshold-based bit allocation is also analyzed for a random channel model for which the closed-form expression for the total energy consumption is obtained in a large system limit. Numerical examples show that the optimal bit allocation could results in 83\% reduction in transmission energy, compared to a uniform bit allocation and that the on-off allocation performs close to the optimum when a transmission time is short.

# บทที่ 1 บทนำ

## ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

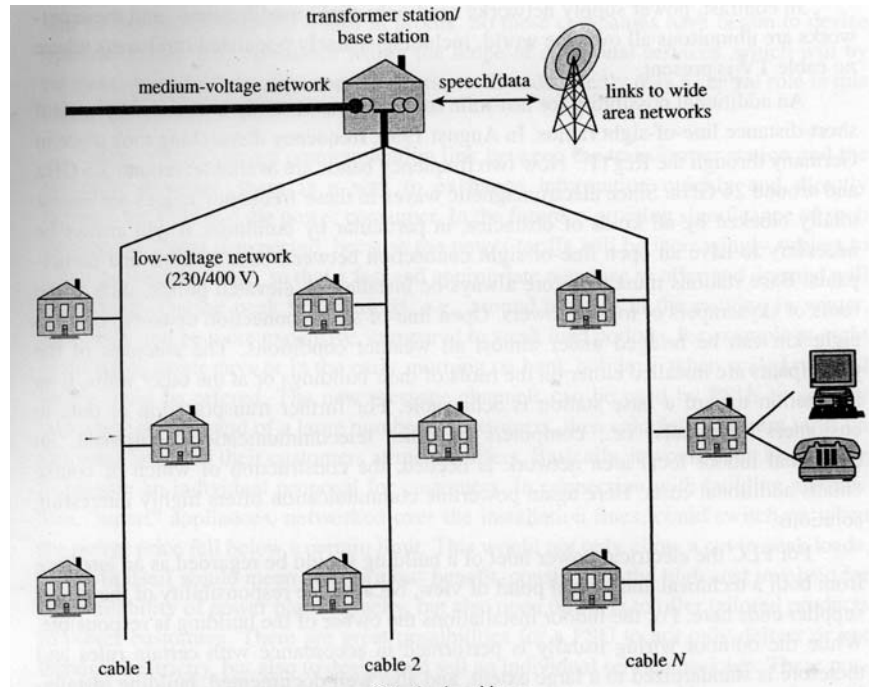
การสื่อสารผ่านสายกำลังหรือสายไฟฟ้า (power line communications: PLC) ไม่ได้เป็นแนวคิดใหม่ เนื่องจากในหลายประเทศบริษัทผลิตและจำหน่ายกระแสไฟฟ้าได้ใช้การสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าสำหรับการควบคุมและเชื่อมต่อกับมาตรวัดไฟที่ติดตั้งที่บ้านของผู้ใช้บริการอยู่แล้ว แต่ในปัจจุบันการสื่อสารผ่านสายกำลังได้กลับมาเป็นที่สนใจในหมู่นักวิจัยอีกครั้ง เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สายกำลังเป็นตัวกลางสำหรับการสื่อสารความเร็วสูง (high-speed or broadband communications) โดยตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน เช่น อีเทอร์เน็ตแลนผ่านสายกำลังในบ้านหรือสำนักงาน กริดอัจฉริยะ ได้แก่ การมอนิเตอร์ การวัดการใช้งานไฟฟ้า การควบคุม ที่ต้องมีการเชื่อมต่อด้วยอัตราบิตสูง งานจราจร ได้แก่ การควบคุมสัญญาณจราจร การควบคุมไฟส่องสว่าง กล้องวงจรปิด เป็นต้น ในบางกรณีได้มีผลิตภัณฑ์วางจำหน่ายในท้องตลาดเรียบร้อยแล้ว องค์กรมาตรฐานต่าง ๆ เช่น IEEE และ ETSI และสมาคมผู้ผลิต เช่น HomePlug Alliance, Universal Powerline Association (UPA), Consumer Electronics Powerline Communication Alliance (CEPCA) เป็นต้น อยู่ระหว่างการสร้างและปรับปรุงมาตรฐานสำหรับเทคโนโลยี PLC

การสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมต่อโครงข่ายสื่อสารของผู้ให้บริการโทรคมนาคมกับที่อยู่อาศัยหรือสำนักงานของผู้เช่าใช้บริการ หรือที่เรียกว่าการเชื่อมต่อไมล์สุดท้าย

(last-mile connection) ภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อของ  
ชุมสายหรือสถานีฐาน (base station) กับบ้านผู้เช่าใช้บริการผ่าน  
สายไฟฟ้า โดยสถานีหม้อแปลง (transformer station) ทำหน้าที่เป็น  
ชุมสายที่เชื่อมต่อไปยังโครงข่ายสื่อสารที่สูงขึ้นไป นอกจากนี้การ  
เชื่อมต่อผ่านสายไฟฟ้าถูกใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์  
ต่าง ๆ ภายในบ้านหรืออาคาร ภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างของการเชื่อม  
อุปกรณ์ในบ้านผ่านสายไฟฟ้าในบ้านมายังโมเด็มที่อาจเชื่อมต่อกับ  
โครงข่ายสื่อสารนอกบ้าน ทั้งสองตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งาน  
ต้องการการเชื่อมต่อด้วยอัตราบิตสูงเพื่อสนองความต้องการของ  
ผู้ใช้งานและแอปพลิเคชันในปัจจุบันและอนาคต

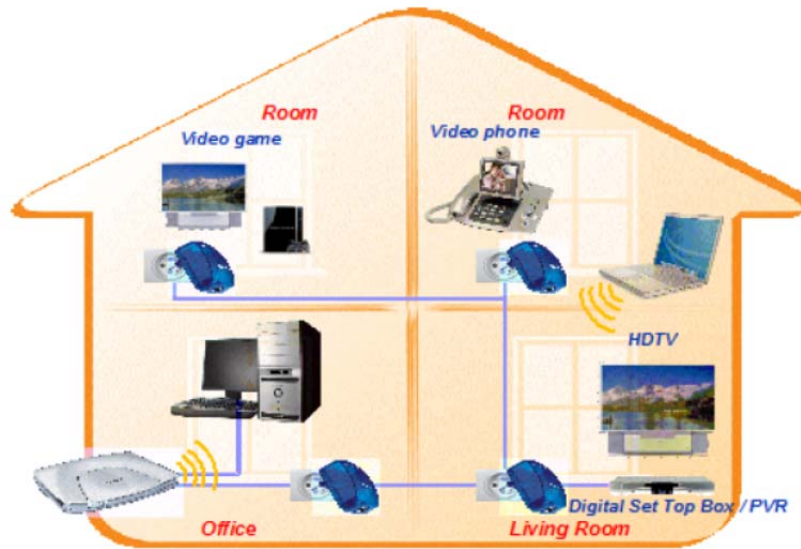
ข้อดีของการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าคือการสื่อสารผ่าน  
โครงข่ายจำหน่ายไฟฟ้าที่มีอยู่แล้ว ไม่ต้องมีการลงทุนเพิ่มเติมเพื่อสร้าง  
โครงข่ายขึ้นใหม่ ในบ้านของทุกคนก็มีโครงข่ายสายไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่  
ในทุกห้องอยู่แล้วถ้าสามารถใช้โครงข่ายดังกล่าวเพื่อการสื่อสาร  
โทรคมนาคมด้วยจะดีมาก ข้อดีของการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าก็มีมาก  
เช่นกัน ช่องสัญญาณในสายไฟฟ้ามีสัญญาณรบกวนมาก ทั้งจาก  
กระแสไฟฟ้าที่ไม่นิ่ง การเปิดปิดอุปกรณ์ไฟฟ้า การรบกวนจากสัญญาณ  
วิทยุในกรณีที่สายไฟฟ้าไม่มีฉนวนที่ดี โดยการหาต้นแบบของ  
ช่องสัญญาณสำหรับสายกำลังทำได้ยาก เนื่องจากช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับ  
กับการเดินสายไฟฟ้าในแต่ละบ้าน ชนิดและจำนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่  
เชื่อมต่อ ซึ่งแตกต่างจากช่องสัญญาณสื่อสารอื่น ๆ เช่น ช่องสัญญาณ  
ไร้สาย หรือช่องสัญญาณโทรศัพท์ ที่มีต้นแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์  
สมรรถนะและวิธีการสื่อสารได้ โดยรวมเราอาจกล่าวได้ว่าช่องสัญญาณ  
สายกำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying) มีการจางหายเลือกความถี่  
(frequency-selective fading) และถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนที่มี

สเปกตรัมไม่คงที่ (colored background noise) และสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ (impulsive noise)



ภาพที่ 1 โครงข่ายในโลคัลลูป (ภาพจาก [1])

เนื่องจากช่องสัญญาณสายกำลังมีการรบกวนจากหลายสัญญาณรบกวนจึงเป็นช่องสัญญาณที่ค่อนข้างแย่ต่อการส่งสัญญาณสาร จึงเป็นความท้าทายต่อนักวิจัยในการออกแบบวิธีการกล้ำและถอดการกล้ำสัญญาณ (modulation/demodulation: modem) ที่เหมาะสมที่สุด การเข้ารหัสช่องสัญญาณ เป็นต้น การวิจัยนี้ศึกษาวิธีการส่งสัญญาณในชั้นฟิสิกส์ (physical layer) เพื่อเพิ่มสมรรถนะของช่องสัญญาณโดยมีความจุของช่องสัญญาณเป็นดรรชนีชี้วัด โดยพิจารณาจัดสรรกำลัง การกล้ำสัญญาณด้วยวิธีโอเอฟดีเอ็ม (OFDM: orthogonal frequency-division multiplexing) ให้เหมาะกับช่องสัญญาณสายกำลัง



ภาพที่ 2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในอาคารผ่านสายไฟฟ้า (ภาพจาก [2])

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาวิจัยและวิเคราะห์การกล้าสัญญาณด้วยวิธีโอเอฟดีเอ็มในช่องสัญญาณสายกำลังเพื่อเพิ่มสมรรถนะของช่องสัญญาณให้สูงที่สุด

### ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. นำเสนอวิธีการปรับการกล้าสัญญาณโอเอฟดีเอ็มเพื่อเพิ่มความจุของช่องสัญญาณสายกำลัง
2. จำลองสมรรถนะของระบบสื่อสารสายกำลังที่ใช้วิธีการกล้าสัญญาณที่นำเสนอด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบกับระบบที่ใช้วิธีการกล้าที่มีอยู่แล้ว
3. วิเคราะห์สมรรถนะของระบบสื่อสารที่ใช้วิธีการกล้าสัญญาณที่นำเสนอด้วยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์และความน่าจะเป็น

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

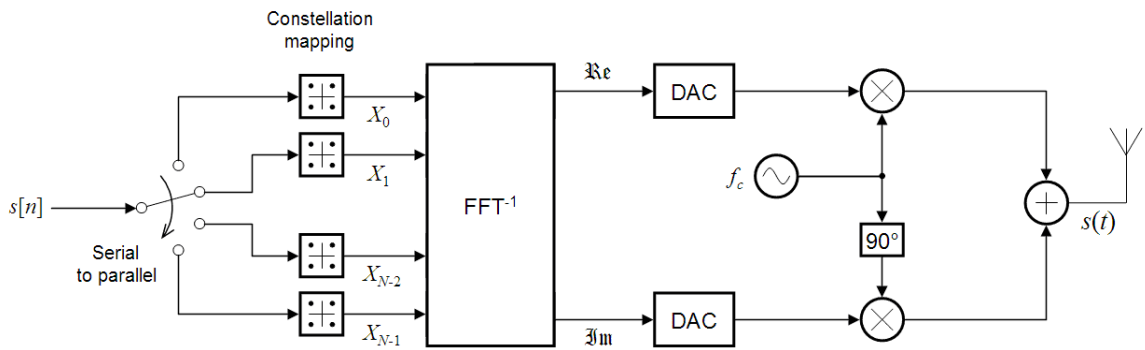
ผลการวิจัยนี้แสดงถึงวิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลที่มี  
ประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า โดยใช้พลังงานใน  
การส่งข้อมูลน้อยที่สุด

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี สมมติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

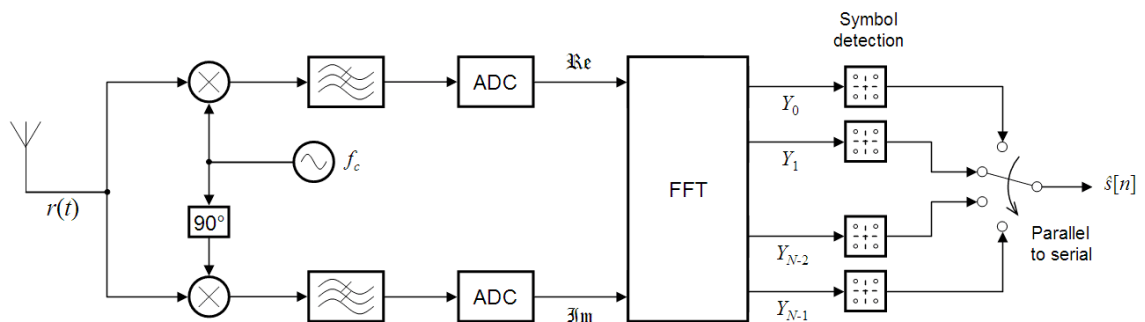
วิธีการกล้ำสัญญาณที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณจางหายเลือกความถี่ เช่น ช่องสัญญาณสายกำลัง นั่นคือโอเอฟดีเอ็ม (OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing) โดยสัญลักษณ์ส่ง เช่น สัญลักษณ์ QAM หรือ PSK ถูกจัดแบ่งเป็นบล็อก สัญลักษณ์ในบล็อกถูกส่งด้วยช่องสัญญาณย่อย (subchannel) ที่ตั้งฉากกัน เนื่องจากแบนด์วิดท์ของแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีขนาดแคบ มีผลให้สเปกตรัมของแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีค่าค่อนข้างคงที่คล้ายช่องสัญญาณจางหายเรียบ (flat fading) หรือไม่เลือกความถี่ (frequency non-selective) ทำให้ปัญหาการสอดแทรกระหว่างสัญญาณสัญลักษณ์ส่ง (inter-symbol interference) หายไป ภาครับจึงไม่ต้องมี equalizer และลดความซับซ้อนลง เรากล่าวได้ว่าการกล้ำแบบโอเอฟดีเอ็มทำให้ช่องสัญญาณเลือกความถี่กลายเป็นช่องสัญญาณย่อยเรียบจำนวนมาก นอกจากนี้สัญญาณที่ถูกกล้ำด้วยวิธีโอเอฟดีเอ็มยังทนทานต่อสัญญาณสอดแทรกแบบแคบ (narrow-band interference) และสัญญาณรบกวนกำลังสูง (high noise level) การกล้ำโอเอฟดีเอ็มถูกประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีสื่อสารสมัยใหม่ เช่น IEEE802.11n วิทยุฟลาย, โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 4 (4G), ADSL เป็นต้น

นักพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารนำหลักการโอเอฟดีเอ็มไปใช้ด้วยการแปลงฟูเรียร์เร็ว (Fast Fourier transform: FFT) ภาพที่ 3 และ 4 แสดงภาคส่งและรับของการสื่อสารวิธีโอเอฟดีเอ็ม



ภาพที่ 3 เครื่องส่งโอเอฟดีเอ็ม (ภาพโดย Oli Filth:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiplexing](http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency_division_multiplexing))



ภาพที่ 4 เครื่องรับโอเอฟดีเอ็ม (ภาพโดย Oli Filth:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiplexing](http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing))

ดังนั้นโอเอฟดีเอ็มจึงเป็นวิธีกล้ำสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามโอเอฟดีเอ็มก็มีข้อด้อยเช่นกัน โดยแต่ละบล็อกของสัญลักษณ์ส่งต้องมีการเติมส่วนสัญลักษณ์ cyclic prefix ซึ่งความยาวของ cyclic prefix ขึ้นอยู่กับจำนวนแท็บของช่องสัญญาณ สำหรับช่องสัญญาณสายกำลังมีจำนวนแท็บช่องสัญญาณมากทำให้ cyclic prefix ของแต่ละบล็อกมีความยาวสูง เนื่องจาก cyclic prefix

ไม่ได้ลำเลียงสารใหม่ จึงทำให้ประสิทธิภาพ (efficiency) ของการสื่อสารลดลง

ลักษณะเฉพาะของช่องสัญญาณสายกำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลา และอาจจะเปลี่ยนแปลงทุกครั้งที่มิโหลตในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ในการเพิ่มสมรรถนะของการสื่อสารวิธีการส่งต้องปรับพารามิเตอร์การกล้ำสัญญาณให้เหมาะกับช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไป การปรับการส่งอาจทำได้โดยการปรับกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อย (transmission power) อัตราสัญลักษณ์ส่ง (symbol transmission rate) ขนาดคอนสเทลเลชัน (constellation size) หรือ อัตรารหัส (code rate) โดยมีการวัดประมาณช่องสัญญาณจากสัญญาณนำร่อง (pilot signal) ในช่องสัญญาณย่อยหรือสล็อตเวลาที่กำหนด การวิจัยนี้นำเสนอวิธีการปรับการส่งดังนี้

1. การปรับระดับกำลังส่ง โดยปรับให้เหมาะกับสถานะช่องสัญญาณ แต่วิธีนี้จะทำให้กำลังสูงสุดเพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะมีปัญหาถ้ากำลังสูงสุดสูงเกิดขีดจำกัด

2. การปรับขนาดของคอนสเทลเลชันหรือการปรับสัญลักษณ์กล้ำ ในช่วงที่ช่องสัญญาณดีอาจใช้คอนสเทลเลชันขนาดใหญ่ขึ้นหรือการกล้ำที่มีสัญลักษณ์แตกต่างกันมากขึ้น เช่น จาก 16-QAM เป็น 32-QAM เป็นต้น มีผลให้อัตราส่งบิตสูงขึ้นแต่อัตราผิดพลาดบิตไม่เพิ่มขึ้น ในช่วงช่องสัญญาณแย่อาจปรับขนาดคอนสเทลเลชันให้ลดลง

3. การปรับอัตรารหัสในการเข้ารหัสช่องสัญญาณให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ ซึ่งการปรับแต่ละพารามิเตอร์หรือการปรับทั้งสามพารามิเตอร์ร่วมกันเพื่อเพิ่มความจุของช่องสัญญาณสายกำลังและลดความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของการส่งข้อมูล

## การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยสำหรับการสื่อสารสายกำลังได้เน้นที่การกล้าด้วยวิธี โอเอฟดีเอ็มและซีดีเอ็มเอ (cdma : code division multiple access) [3]-[6] หลายงานวิจัยมุ่งเน้นที่การกล้าและถอดการกล้าชนิด multicarrier ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการ [7] Sugimoto และคณะได้ใช้การแก้ปัญหาในการกล้าโอเอฟดีเอ็มด้วยการปรับบิตโหลด (bit loading) แต่การปรับนี้ตัวส่งต้องทราบสถานะช่องสัญญาณในขณะนั้น ในงานวิจัย [8] นักวิจัยแสดงว่าการเลือกใช้ออฟดีเอ็มด้วยช่องสัญญาณย่อยจำนวน 512 มีความเหมาะสมทั้งอัตราบิตส่งและความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ของทั้งภาคส่งและภาครับ ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการ [7] Del Re และคณะได้เปรียบเทียบการส่งด้วยวิธี ซีดีเอ็มเอและโอเอฟดีเอ็มด้วยการจำลองสมรรถนะ และพบว่าโอเอฟดีเอ็มมีสมรรถนะดีกว่าซีดีเอ็มเอโดยมีเงื่อนไขว่าต้องมีการใช้บิตโหลด (bit loading) งานวิจัย [10] ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับบิตโหลดและการจัดสรรทรัพยากรที่ภาคส่งเพื่อเพิ่มอัตราบิตส่งให้สูงขึ้น ในงาน [9] นักวิจัยนำเสนอวิธีส่งสัญญาณที่ผสมผสานโอเอฟดีเอ็มด้วย frequency hopping

ในการปรับตัวส่งในช่องสัญญาณสายกำลัง ตัวส่งจำเป็นต้องทราบสถานะของช่องสัญญาณ นั่นคือภาคส่งและ/หรือภาครับต้องสามารถประมาณสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณและติดตามการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณในโดเมนเวลาได้ ถ้าช่องสัญญาณมีฟังก์ชันการเปลี่ยน (transfer function) ที่สมมาตรทั้งจากภาคส่งและภาครับ ทั้งภาคส่งและรับสามารถใช้สัญญาณนำร่องในการประมาณช่องสัญญาณได้ [11] งานวิจัย [12] (และเอกสารอ้างอิง) นำเสนอการประมาณช่องสัญญาณ

โดยไม่ต้องใช้สัญญาณนำร่อง เพื่อประหยัดการใช้สัญญาณนำร่อง  
ในช่วงเทรนนิง เราอาจใช้เทคนิคการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง  
ทันทีทันใด (abrupt change) จากหนังสือ [13] ซึ่งการเปลี่ยน  
ช่องสัญญาณอาจเกิดจากเปิดหรือปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

## บทที่ 3 วิธีวิจัยและผลการวิจัย

### ช่องสัญญาณสายไฟฟ้า

การสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าหรือ Power Line

Communications (PLC) ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรับส่งข้อมูล โดยเฉพาะ เมื่อนำสายไฟฟ้ามาใช้เป็นสื่อในการส่งข้อมูลจึงเกิดปัญหา การสะท้อนของสัญญาณ การสะท้อนของสัญญาณในช่องสัญญาณ สายไฟฟ้ามักจะเกิดขึ้นเนื่องจากการไม่แมตซ์กันของอิมพีแดนซ์ (Mismatch impedance) ในเครือข่ายไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงสามารถ พิจารณาช่องสัญญาณสายไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับช่องสัญญาณไร้ สายได้ เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับไม่ได้มีเฉพาะ วิธีที่ปราศจากสิ่งกีดขวางเท่านั้น (Line of sight) แต่ยังมีวิธีที่เกิดจาก การสะท้อนที่ต้องนำมาพิจารณารวมอีกด้วย

จากแบบจำลองช่องสัญญาณของ Zimmermann and Dostert ที่มีการพิจารณาสัญญาณเดินทางหลายวิธีและมีการจางหาย และมีผลตอบสนองความถี่ของการเดินทางของสัญญาณ  $M$  วิธีที่ได้ตั้ง สมการต่อไปนี้

$$H(f) = \sum_{i=1}^M g_i e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

โดย  $f$  แทนความถี่  $g_i$  คือตัวประกอบน้ำหนักของวิธีที่  $i$   $a_0$  และ  $a_1$  คือตัว ประกอบการลดทอน,  $k$  คือเลขชี้กำลังของตัวประกอบการลดทอน  $d_i$  คือ ความยาวของแต่ละวิธี และ  $\tau_i$  คือความล่าช้าของวิธีที่  $i$  มีหน่วยเป็น ไมโครวินาที สามารถคำนวณ  $\tau_i$  ได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c} = \frac{d_i}{v_p} \quad (2)$$

โดย  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของวัสดุ  $c_0$  คือความเร็วแสงและ  $v_p$  คือความเร็วเฟสซึ่งมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

[8] เมื่อกำหนดให้ข้อมูลถูกส่งผ่านช่องสัญญาณย่อยทั้งหมด  $N$  ช่องด้วยระบบโอเอฟดีเอ็มสัญญาณที่ตัวรับได้รับสำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณแบบจุดต่อจุดที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาของแต่ละช่องสัญญาณย่อยคือ

$$r_n = \sqrt{P_n} H_n x_n + w_n \quad (3)$$

เมื่อตัวแปร  $x_n$  คือสัญญาณที่ถูกส่งซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ  $1$ ,  $H_n$  คือผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณย่อยที่  $n$  ซึ่งมีความถี่เท่ากับ  $f_n$ ,  $P_n$  คือกำลังที่ใช้ในการส่งของช่องสัญญาณย่อยลำดับที่  $n$  และสัญญาณรบกวนไวต์เกาส์เซียนแบบบวกซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ  $B\eta_n$  ในขณะที่  $B$  คือความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณย่อย (Subchannel spacing) และ  $\eta_n$  คือความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนพื้นหลังของช่องสัญญาณย่อยลำดับที่  $n$  (Noise spectral density) ค่าความจุของแต่ละช่องสัญญาณย่อยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_n = \log_2 \left( 1 + \frac{J_n |H_n|^2}{BT\eta_n} \right) \quad (4)$$

เมื่อระยะเวลาในการส่งข้อมูลแทนด้วยตัวแปร  $T$  และพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของแต่ละช่องสัญญาณย่อยแทนด้วยตัวแปร  $J_n$  หรือมีค่าเท่ากับ  $P_n \cdot T$  ค่าความจุที่แสดงดังสมการ (4) คืออัตราข้อมูลสูงสุดที่ระบบ

สามารถส่งได้ ดังนั้นจำนวนบิตสูงสุดที่สามารถส่งผ่านไปในแต่ละช่องสัญญาณย่อยที่  $n$  ซึ่งมีระยะห่างของช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ  $B$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_n = C_n BT \quad (5)$$

และเมื่อแทนค่าสมการ (5) ลงในสมการ (4) จะสามารถหาค่าพลังงานที่ใช้ส่งข้อมูล  $Q_n$  บิตได้ดังนี้

$$J_n = \left( 2^{\frac{Q_n}{TB}} - 1 \right) \frac{BT \eta_n}{|H_n|^2} \quad (6)$$

เพราะฉะนั้นค่าพลังงานรวมที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลผ่านทุกช่องสัญญาณย่อยจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$J = \sum_{n=1}^N \left( 2^{\frac{Q_n}{TB}} - 1 \right) \frac{BT \eta_n}{|H_n|^2} \quad (7)$$

จุดประสงค์ของวิธีการนี้ไม่ได้เพื่อที่จะได้ค่าความจุของแต่ละช่องสัญญาณย่อยสูงสุด แต่จุดประสงค์ของวิธีการนี้คือต้องการลดพลังงานที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมด  $Q$  บิต จากจุดประสงค์และข้อจำกัดที่ได้กล่าวมานั้นสามารถสร้างเป็นปัญหาค่าต่ำสุดเหมาะสมแบบมีข้อจำกัด (Minimization problem with constraint) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{minimize}_{\{Q_n\}} J &= \sum_{n=1}^N J_n \\ \text{subject to} \quad &\sum_{n=1}^N Q_n \geq Q, \\ &Q_n \geq 0 \text{ for } 1 \leq n \leq N \end{aligned} \quad (8)$$

**การจัดสรรปริมาณข้อมูลในการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าผ่านช่องสัญญาณแบบตายตัว**

**การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุด**

การหาเซตคำตอบของปัญหานี้เพื่อให้ได้ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันแบบมีข้อจำกัด ในสมการ(8) สามารถทำได้โดยใช้วิธีการดัดแปลงลากรานจ์ (Modified Lagrangian) [11] สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปตัวคูณลากรานจ์ได้ดังนี้

$$\mathcal{L} = \sum_{n=1}^N (2^{\frac{Q_n}{TB}} - 1) \frac{BT\eta_n}{|H_n|^2} + \lambda (\sum_{n=1}^N Q_n - Q) \quad (9)$$

โดยตัวคูณลากรานจ์หรือ  $\lambda$  สามารถสร้างเป็นเงื่อนไขของ Kuhn-Tucker ได้ดังนี้ [11]

$$Q_n \cdot (2^{\frac{Q_n}{TB}} \frac{(\ln 2)\eta_n}{|H_n|^2} - \lambda) = 0, \quad \forall n \quad (10)$$

$$(2^{\frac{Q_n}{TB}} \frac{(\ln 2)\eta_n}{|H_n|^2}) - \lambda \leq 0, \quad \forall n \quad (11)$$

$$\lambda \cdot (\sum_{n=1}^N Q_n - Q) = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^N Q_n - Q \geq 0 \quad (13)$$

$$Q_n \geq 0, \quad \forall n \quad (14)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (15)$$

จากเงื่อนไขด้านบนสามารถหาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยการใช้ อัลกอริทึม 1 เพื่อหา

$G_{(n)}$  คือเซต  $G$  ที่เรียงลำดับสมาชิกในเซตจากค่ามากไปน้อยสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า  $G_{(1)} \geq G_{(2)} \geq \dots \geq G_{(N-1)} \geq G_{(N)}$  ดังนั้น  $G_{(1)} = \max_n \left( \frac{\eta_n}{|H_n|^2} \right)$

$$\text{และ } G_{(N)} = \min_n \left( \frac{\eta_n}{|H_n|^2} \right)$$

ผลลัพธ์ที่ได้คือ  $\{Q_{(n)}\}$  หรือเซตของปริมาณข้อมูลที่จัดสรรให้ช่องสัญญาณย่อยแต่ละช่อง โดยใช้พลังงานในการส่งข้อมูลน้อยที่สุด โดย

ช่องสัญญาณย่อยที่มีอัตราส่วนของ  $\frac{\eta_n}{|H_n|^2}$  มากกว่าค่าขีดแบ่งจะไม่ถูกใช้ในการส่งข้อมูล โดยช่องสัญญาณที่ถูกใช้ในการส่งข้อมูลจะมีการจัดสรรข้อมูลเป็นอัตราส่วนของ  $TB \log_2 \left( \frac{G_{(1)}}{G_{(n)}} \right)$

- 1: Input:  $Q, T, B, N_0, \{G_{(n)}\}$
- 2: Initial parameters:  $N_{\text{on}}$  and  $Q_{(n)} = 0, \forall n$
- 3: repeat
- 4:      $J = 0$
- 5:     for  $m = 1: N_{\text{on}}$  do
- 6:          $Q_{(m)} = Q_{(1)} - TB \log_2 \left( \frac{G_{(m)}}{G_{(1)}} \right)$
- 7:          $J \leftarrow J + \left( 2^{\frac{Q_{(m)}}{TB}} - 1 \right) \frac{TB N_0}{G_{(m)}}$
- 8:     end for
- 9:      $N_{\text{on}} \leftarrow N_{\text{on}} + 1$
- 10:      $S = \sum_{n=1}^{N_{\text{on}}} TB \log_2 \left( \frac{G_{(n)}}{G_{(1)}} \right)$
- 11:      $Q_{(1)} = \frac{Q - S}{N_{\text{on}}}$
- 12: until  $TB \log_2 \left( \frac{G_{(N_{\text{on}})}}{G_{(1)}} \right) > Q_{(1)}$
- 13:  $N_{\text{on}} \leftarrow N_{\text{on}} - 1$
- 14: return  $\{Q_{(n)}\}$  and  $J$

อัลกอริทึม 1: วิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุด

## การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด

วิธีการนี้ถึงจะไม่สามารถให้ชุดคำตอบที่มีค่าเหมาะที่สุด แต่มีความซับซ้อนน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพเทียบเท่า หรือ ใกล้เคียงกับวิธีการที่มีค่าเหมาะสมที่สุด โดยการหาค่าขีดแบ่งที่เหมาะสม จากนั้นช่องสัญญาณย่อยที่มีค่าอัตราส่วนของ  $\frac{\eta_n}{|H_n|^2}$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าขีดแบ่งแล้วช่องสัญญาณย่อยช่องนั้นจะได้รับการจัดสรรให้ส่งข้อมูลในปริมาณที่เท่ากันกับช่องสัญญาณย่อยช่องอื่นๆที่ผ่านการตรวจสอบจากเงื่อนไขนี้หรืออาจเรียกว่าช่องสัญญาณย่อยช่องนั้นถูกเปิดใช้งาน ในทางตรงกันข้ามช่องสัญญาณย่อยลำดับที่  $n$  จะไม่ได้รับการจัดสรรปริมาณข้อมูลเพื่อใช้ส่งหรืออาจเรียกว่าช่องสัญญาณย่อยช่องนั้นถูกปิดใช้งาน โดยใช้อัลกอริทึมที่ 2 ในการจัดสรรปริมาณข้อมูลดังนี้

- 1: Input:  $Q, T, B, N_0, \{G_{(n)}\}$
- 2: Initial parameters:  $N_{on} = 1$  and  $Q_{(n)} = 0, \forall n$
- 3:  $J = (2^{\frac{Q}{TB}} - 1) \frac{TB N_0}{G_{(1)}}$
- 4: repeat
- 5:  $J_{old} \leftarrow J$
- 6:  $N_{on} \leftarrow N_{on} + 1$
- 7:  $J = \sum_{n=1}^{N_{on}} (2^{\frac{Q}{TB N_{on}}} - 1) \frac{TB N_0}{G_{(n)}}$
- 8: until  $J > J_{old}$
- 9:  $N_{on} \leftarrow N_{on} - 1$
- 10:  $J \leftarrow J_{old}$
- 11: return  $\{Q_{(n)}\}$  and  $J$

## อัลกอริทึม 2: วิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด

## วิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดสำหรับช่องสัญญาณสุ่ม

ในหัวข้อนี้ช่องสัญญาณสุ่มถูกแทนด้วยแบบจำลองช่องสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแบบจุดต่อจุดที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยตั้งสมมติฐานว่าสัญญาณรับเดินทางมาจากหลายเส้นทางเนื่องจากเกิดการสะท้อนระหว่างส่งสัญญาณ ดังนั้นจึงสามารถจำลองวิถีของสัญญาณเป็นตัวแปรสุ่มเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma_g^2$  เมื่อกำหนดให้ มี Power-delay profile เป็นแบบยูนิฟอร์ม นอกจากนั้นยังกำหนดว่าทุกวิถีมีความยาวใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นจึงสามารถละทิ้งเทอมการลดทอนของสัญญาณได้ และพิจารณาในกรณีสัญญาณรบกวนพื้นหลัง  $N_0$  มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมทางกำลังสูงสุดเป็นค่าคงที่โดยต้องการวิเคราะห์พลังงานรวมทั้งหมดจากวิธีการจัดสรรข้อมูลแบบเปิด-ปิด กำหนดให้  $\{A_{(n)}\}$  คือเซตของค่าอัตราขยายของช่องสัญญาณยกกำลังสองโดยเรียงจากมากไปหาน้อย จากนั้นใช้ค่าขีดแบ่งเป็นตัวกำหนดจำนวนช่องสัญญาณที่เปิดใช้งานคือ  $N_{on}$  ซึ่งเป็นค่าสุ่ม และ  $A_{(N_{on})} \geq \mu \geq A_{(N_{on}+1)}$  นอกจากนั้นกำหนดค่าแบนด์วิดท์ดังนี้  $W \triangleq NB$  ค่าคาดหวังของพลังงานรวมต่อแบนด์วิดท์ของการจัดปริมาณข้อมูลเท่ากับ

$$E[\bar{J}] = E\left[\frac{J}{W}\right] = E\left[(2^{\frac{Q}{TBN_{on}}} - 1)TN_0 \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_{on}} \frac{1}{A_{(n)}}\right] \quad (16)$$

เนื่องจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นร่วม (Joint pdf) ของ  $\{A_{(n)}\}$  มีความซับซ้อน การประเมินค่าสมการ (16) สำหรับระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณย่อยทั้งหมดมีค่าจำกัดนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้ว  $N$  จะมีค่ามาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิเคราะห์สมรรถนะของระบบขนาดใหญ่จำกัดซึ่ง  $N$  มีค่าเข้าใกล้อนันต์ สมมติให้จำนวนช่องสัญญาณที่เปิดใช้งานหรือตัวแปร  $N_{on}$  ถูกลดขนาดแบบเชิงเส้นด้วยตัวแปร  $N$  จะได้ว่า  $\bar{N}_{on} \triangleq N_{on}/N$  และเมื่อกำหนดให้แบนด์วิดท์รวมของระบบเป็นค่าคงที่แล้วจำนวนช่องสัญญาณย่อยทั้งหมดมีค่าเข้าใกล้อนันต์ แบนด์วิดท์ของ

ช่องสัญญาณย่อยจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในระบบขนาดใหญ่ที่ได้กล่าวถึงนั้น ค่าพลังงานรวมที่ใช้ส่งข้อมูลต่อแบนด์วิธของระบบจะลู่เข้าสู่ค่าในสมการ

$$\bar{J}^\infty = \lim_{\substack{N, \bar{N}_{\text{on}} \rightarrow \infty \\ B \rightarrow 0}} E \left[ \frac{J}{W} \right] \quad (17)$$

$$= (2^{\frac{\rho}{TW\bar{N}_{\text{on}}}} - 1) TN_0 \int_{\mu}^{\infty} \frac{1}{x} f_A^\infty(x) dx. \quad (18)$$

เมื่อ  $f_A^\infty(\cdot)$  คือฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของขนาดของช่องสัญญาณย่อยยกกำลังสองหรือ  $A_{(n)}$  สำหรับทุกช่องสัญญาณย่อยในระบบขนาดใหญ่จำกัด เมื่อทราบค่าขีดแบ่ง ( $\mu$ ) สามารถคำนวณค่า  $\bar{N}_{\text{on}}$  ได้จาก

$$\bar{N}_{\text{on}} = \int_{\mu}^{\infty} f_A^\infty(x) dx \quad (19)$$

โดยกำหนดให้  $F_A^\infty(\cdot)$  คือฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของ  $A_{(n)}$  ดังนั้นค่าขีดแบ่งมีค่าเท่ากับฟังก์ชันผกผันของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมดังนี้

$$\mu = (F_A^\infty)^{-1}(1 - \bar{N}_{\text{on}}). \quad (20)$$

จากสมมติฐานของแบบจำลองช่องสัญญาณที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ขนาดของอัตราขยายช่องสัญญาณย่อยยกกำลังสองเป็นตัวแปรสุ่มเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นเท่ากับ

$$f_A^\infty(x) = \frac{1}{\sigma_g^2} \exp\left(\frac{-x}{\sigma_g^2}\right) \quad (21)$$

และฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเท่ากับ

$$F_A^\infty(x) = 1 - \exp\left(\frac{-x}{\sigma_g^2}\right) \quad (22)$$

โดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (20) จะได้ค่าขีดแบ่งดังนี้

$$\mu = -\sigma_g^2 \ln \bar{N}_{on} \quad (23)$$

จากนั้นนำค่าขีดแบ่งจากสมการ (23) และฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจากสมการ (21) แทนลงในสมการ (18) จะได้ว่า

$$\bar{J}^\infty = (2^{\frac{Q}{TWN_{on}}} - 1)TN_0 \int_{-\sigma_g^2 \ln \bar{N}_{on}}^{\infty} \frac{1}{x\sigma_g^2} \exp\left(\frac{-x}{\sigma_g^2}\right) dx \quad (24)$$

$$= (2^{\frac{Q}{TWN_{on}}} - 1) \frac{TN_0}{\sigma_g^2} E_1(-\ln \bar{N}_{on}) \quad (25)$$

เมื่อนิยามปริพันธ์เอกซ์โพเนนเชียล (Exponential integral) ว่า

$$E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{t} e^{-t} dt$$

โดย  $\bar{N}_{on}$  คือจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานเพื่อส่งข้อมูลในปริมาณเท่ากันแล้วทำให้พลังงานรวมที่ใช้ส่งข้อมูลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุดหรือ

$$\bar{N}_{on}^* = \arg \min_{0 < \bar{N}_{on} \leq 1} \bar{J}^\infty \quad (26)$$

ปัญหานี้ไม่สามารถแก้ปัญหาคlosed-form) ได้เนื่องจากติดอยู่ในรูปของปริพันธ์เอกซ์โพเนนเชียล อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถแก้ได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

## ผลการวิจัย

จากภาพที่ 5 พิจารณาการสื่อสารผ่านสายกำลังหรือสายไฟฟ้า (power line communications: PLC) โดยมีจำนวนช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 1024 ช่อง แบนด์วิดท์ของแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีค่าเท่ากับ 19.043 กิโลเฮิร์ตซ์ อัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 100 เมกะบิตต่อวินาที สัญญาณส่งถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนพื้นหลังซึ่งค่าความหนาแน่นสเปกตรัมทางกำลังเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ และการเดินทางของสัญญาณ 15 วิถี โดยใช้อัลกอริทึม 1 สำหรับการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุด และใช้อัลกอริทึม 2 สำหรับการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด จากนั้นทำการเปรียบเทียบทั้งสองวิธีกับการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเท่ากัน

ผลแสดงให้เห็นว่าการจัดสรรปริมาณข้อมูลทั้งสามวิธีจะใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณข้อมูลที่ส่งเพิ่มขึ้น และสังเกตได้ว่าการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุด และการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด จะใช้พลังงานน้อยกว่าการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเท่ากันประมาณ 80% และ 70% ตามลำดับ

นอกจากสัญญาณรบกวนพื้นหลัง สัญญาณที่ส่งในสื่อสารผ่านสายกำลังหรือสายไฟฟ้าจะถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ โดยสามารถจำลองสัญญาณรบกวนชนิดนี้โดยใช้ แบบจำลองเกาส์ผสมสองพจน์ (Two-term Gaussian mixture) และพิจารณาถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ว่ามีผลต่อค่าพลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลอย่างไร โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมทางกำลังของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ (Impulsive noise PSD) มีค่าเท่ากับ  $-84$  เดซิเบลโวลต์<sup>2</sup> ต่อเฮิร์ตซ์ซึ่งเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ [6] ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาของอิม

พัลส์ (Impulse duration) และช่วงเวลาที่ยิมพัลส์มาถึง (Inter-arrival time) มีค่าเท่ากับ 4.7 ไมโครวินาทีและ 10.1 มิลลิวินาทีตามลำดับ ผลลัพธ์คือค่าพลังงานรวมของสัญญาณส่งที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์รวมกับสัญญาณรบกวนแบบพื้นหลังมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบพื้นหลังเพียงอย่างเดียว

จากภาพสังเกตเห็นว่าการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุดมีสมรรถนะดีที่สุดซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อเทียบกับการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดได้ประมาณร้อยละ 35 และลดลงประมาณร้อยละ 83 เมื่อเทียบกับการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเท่ากันและสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ทำให้พลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย

ภาพที่ 6 แสดงถึงพลังงานทั้งหมดที่ใช้ส่งข้อมูลของทั้งสามวิธีที่ค่าระยะเวลาในการส่งข้อมูลค่าต่างๆ โดยเป็นตามที่คาด คือพลังงานทั้งหมดที่ใช้ส่งข้อมูลจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการส่งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำหนดปริมาณข้อมูลเป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามอัตราการส่งข้อมูลจะลดลงเมื่อระยะเวลาที่ใช้ส่งข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น จะสังเกตเห็นความต่างได้อย่างชัดเจนที่  $T = 10$  วินาที และ  $R = 10$  เมกะบิตต่อวินาที นอกจากนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลใกล้เคียงกับการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุดเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการส่งมีค่าน้อยๆ

ภาพที่ 7 แสดงผลของการทดลองในรูปแบบกราฟ โดยวาดกราฟพลังงานรวมที่ใช้ส่งข้อมูลในหน่วยจูลกับปริมาณข้อมูลในหน่วยกิกะบิต สามารถยกตัวอย่างจากภาพได้ว่า เมื่อต้องการส่งข้อมูลจำนวน 100 ล้านบิตด้วยอัตราบิต 100 150 และ 200 เมกะบิตต่อวินาที

จะต้องใช้พลังงานรวมในการส่งข้อมูลประมาณ 0.2 0.8 และ 3.5 จูล ตามลำดับ สังเกตว่าแนวโน้มของพลังงานรวมที่ใช้ส่งข้อมูลจะเพิ่มขึ้นตามอัตราบิตที่ใช้ส่งข้อมูล

ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งาน  $N_{on}$  กับปริมาณข้อมูลทั้งหมด  $Q$  กำหนดให้ปริมาณข้อมูลทั้งหมดมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 กิกะบิต โดยกำหนดให้ระยะเวลาสำหรับการส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมดแตกต่างกัน โดยการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเท่ากันจะใช้ช่องสัญญาณย่อยเต็ม 100% สำหรับทุกค่าของอัตราการส่งข้อมูล ขณะที่การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุด และการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด จะใช้ช่องสัญญาณย่อยน้อยกว่ากรณีที่อัตราการส่งข้อมูลมีค่าไม่สูงมาก เช่นที่  $R = 50$  เมกะบิตต่อวินาที การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุดจะใช้ช่องสัญญาณย่อยประมาณ 80% และการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดจะใช้ช่องสัญญาณย่อยประมาณ 70% และเมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงถึงค่าๆหนึ่งทั้งสามวิธีการใช้ช่องสัญญาณย่อยทั้งหมด

พิจารณาช่องสัญญาณที่มีลักษณะสุ่มโดยกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการทดลองได้แก่ จำนวนช่องสัญญาณย่อยหรือ  $N$  เท่ากับ 1024 สมมติฐานโดยพิจารณาในกรณีสัญญาณรบกวนพื้นหลังมีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมทางกำลังสูงสุดเท่ากับ -92 ดีบีเอ็มต่อเฮิรตซ์แบนด์วิดท์รวมของระบบหรือ  $w$  เท่ากับ 19.5 เมกะเฮิรตซ์และค่าความแปรปรวนหรือ  $\sigma_g^2$  เท่ากับ 1 ในภาพที่ 4 กราฟแสดงถึงพลังงานต่อแบนด์วิดท์  $\bar{J}^\infty$  กับ  $\bar{N}_{on}$  จากสมการที่ (25) สำหรับจำนวนข้อมูล และระยะเวลาในการส่งค่าต่างๆ จะสังเกตได้ว่าจะมีค่าพลังงานที่น้อยที่สุด และ  $\bar{N}_{on}$  ที่เหมาะสมที่สุด เช่นกรณีที่จำนวนข้อมูลเท่ากับ 150 เมกะบิต และระยะเวลาที่ใช้ในการส่งเท่ากับ 1 วินาที  $\bar{N}_{on}$  ที่เหมาะสมคือประมาณ 92% และที่อัตราส่งมีค่าเท่ากับ 150 เมกะบิตต่อวินาที  $\bar{N}_{on}$  มี

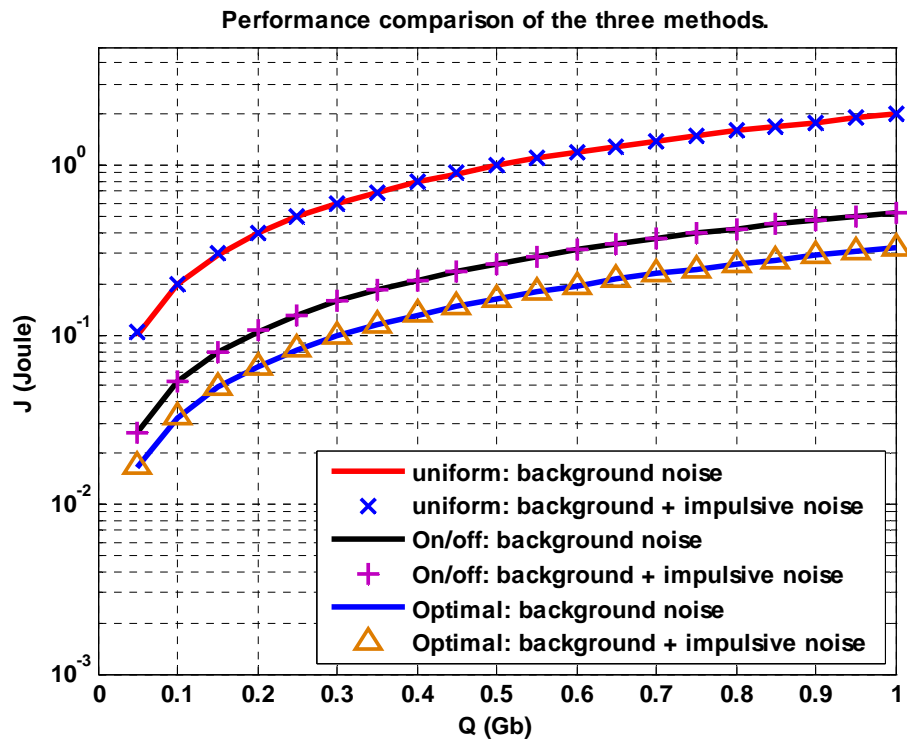
ค่าประมาณ 0.87 หรือเท่ากับช่องสัญญาณย่อยที่เปิดเท่ากับ 890 ช่อง

ภาพที่ 9 แสดง  $\bar{N}_{on}$  ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลน้อยที่สุดที่ประมาณข้อมูลค่าต่างๆ โดยจะสังเกตได้ว่าจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนข้อมูลเพิ่มขึ้น หรือระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ค่าลดลง

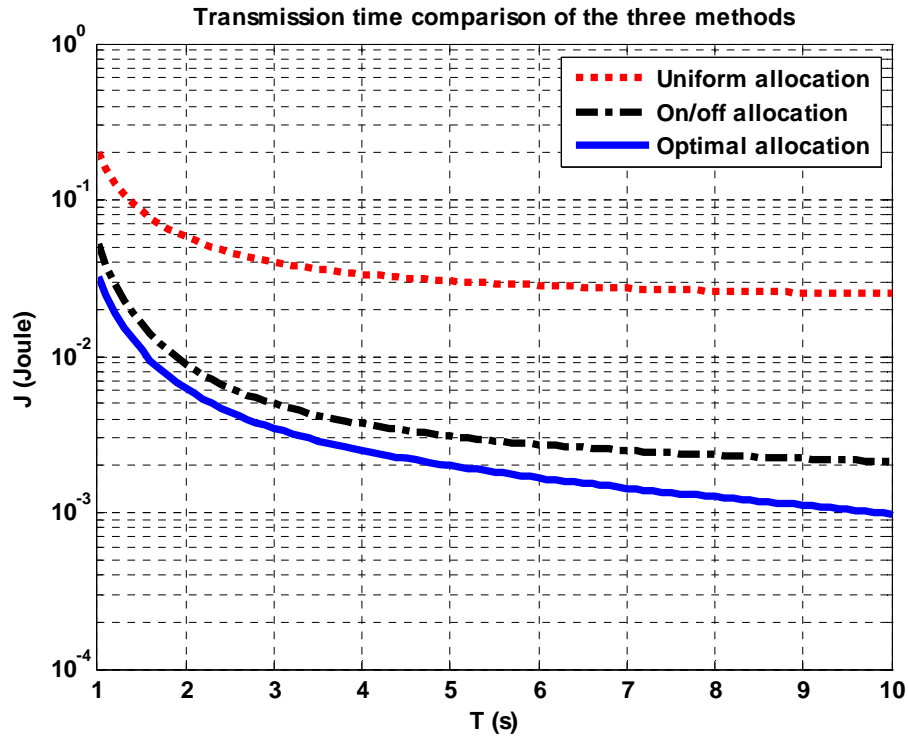
ภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหมาะสมที่สุดของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานกับปริมาณข้อมูลเมื่อใช้เวลาในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.5 1 และ 2 วินาทีตามลำดับ สังเกตว่าค่า  $\bar{N}_{on}^*$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้ส่งข้อมูลลดลงและปริมาณข้อมูลที่ต้องการส่งมีจำนวนมากขึ้น สามารถยกตัวอย่างจากภาพได้ว่า ถ้าต้องการส่งข้อมูล 100 ล้านบิตโดยเวลาในการส่ง 2 วินาที จะต้องจัดสรรปริมาณข้อมูลในปริมาณที่เท่ากันให้ช่องสัญญาณย่อยประมาณร้อยละ 73 ของจำนวนช่องสัญญาณย่อยทั้งหมด แต่ถ้าผู้ใช้ต้องการส่งข้อมูลจำนวนนี้ด้วยเวลาที่ลดลงเหลือ 0.5 วินาทีจะต้องเปิดใช้งานช่องสัญญาณย่อยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 94 ของจำนวนช่องสัญญาณย่อยทั้งหมด

ภาพที่ 11 เปรียบเทียบค่าเหมาะสมที่สุดของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานเมื่อหาค่าตอบด้วยวิธีเขียนโปรแกรมจำลองและวิเคราะห์ทฤษฎี พารามิเตอร์ที่ใช้ทำการทดลองในภาพนี้ ได้แก่ แบนด์วิดท์ของระบบหรือ  $W$  เท่ากับ 19.5 เมกะเฮิร์ตซ์ จำนวนวิธีหรือ  $M$  เท่ากับ 15 วิธี จำนวนช่องสัญญาณย่อยทั้งหมดหรือ  $N$  เท่ากับ 1024 ช่อง ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนหรือ  $N_0$  เท่ากับ -92 ดี

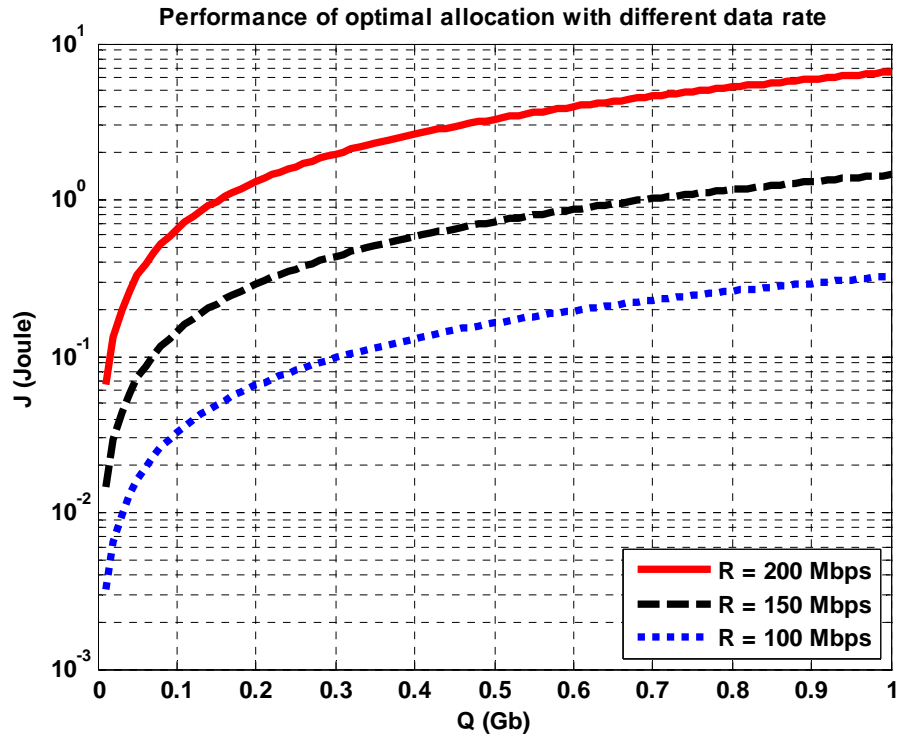
บีเอ็มต่อเฮิร์ตซ์ และค่าความแปรปรวนหรือ  $\sigma_s^2$  เท่ากับ 1 ส่งข้อมูลจำนวน 100 ล้านบิตในเวลา 1 วินาที



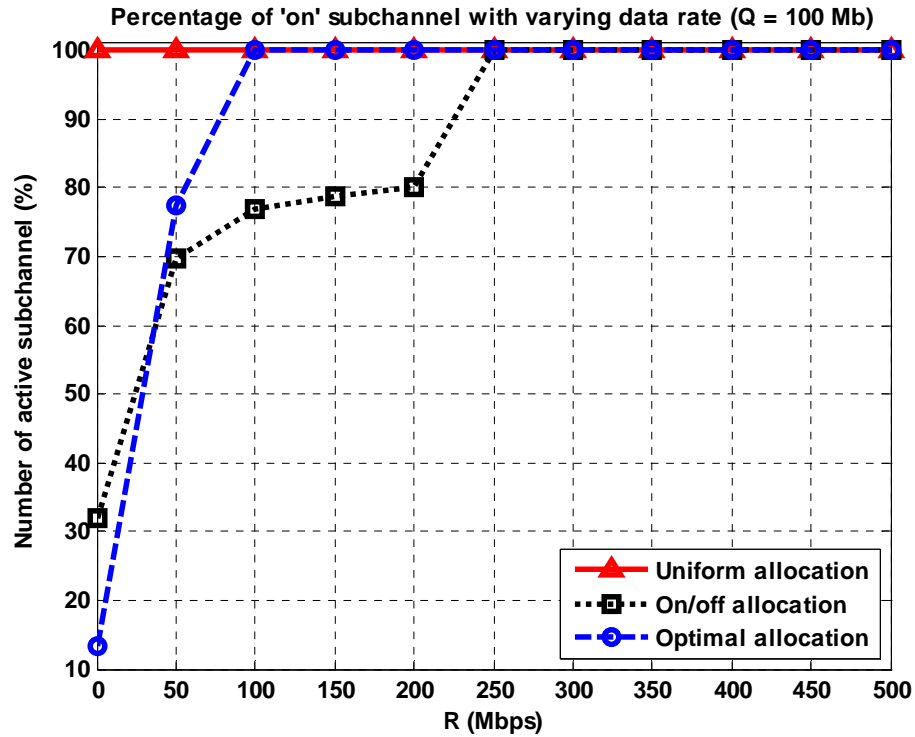
ภาพที่ 5 เปรียบเทียบสมรรถนะของการจัดสรรปริมาณข้อมูลทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การจัดสรรปริมาณ ข้อมูลแบบเหมาะที่สุด การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด และการจัดสรรปริมาณ ข้อมูลแบบเท่ากัน โดยมีการพิจารณาเปรียบเทียบกรณีที่มีสัญญาณรบกวนพื้นหลัง และกรณีที่มีสัญญาณรบกวนอิมพัลส์



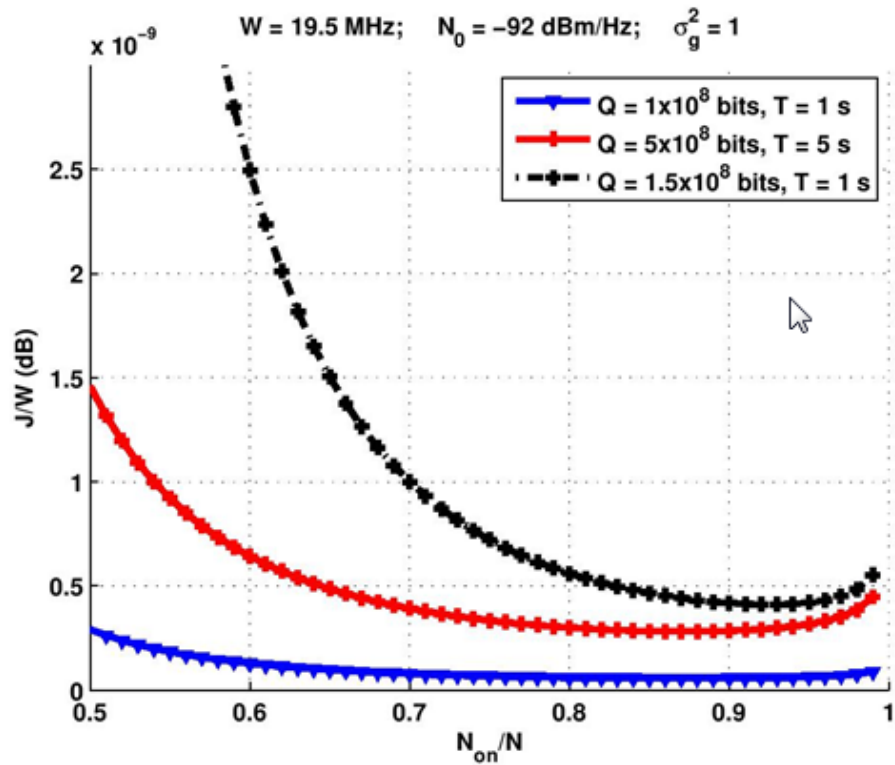
ภาพที่ 6 สมรรถนะของการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุด  
 เปรียบเทียบกับการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดและแบบเท่ากัน  
 ในระยะเวลาส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน



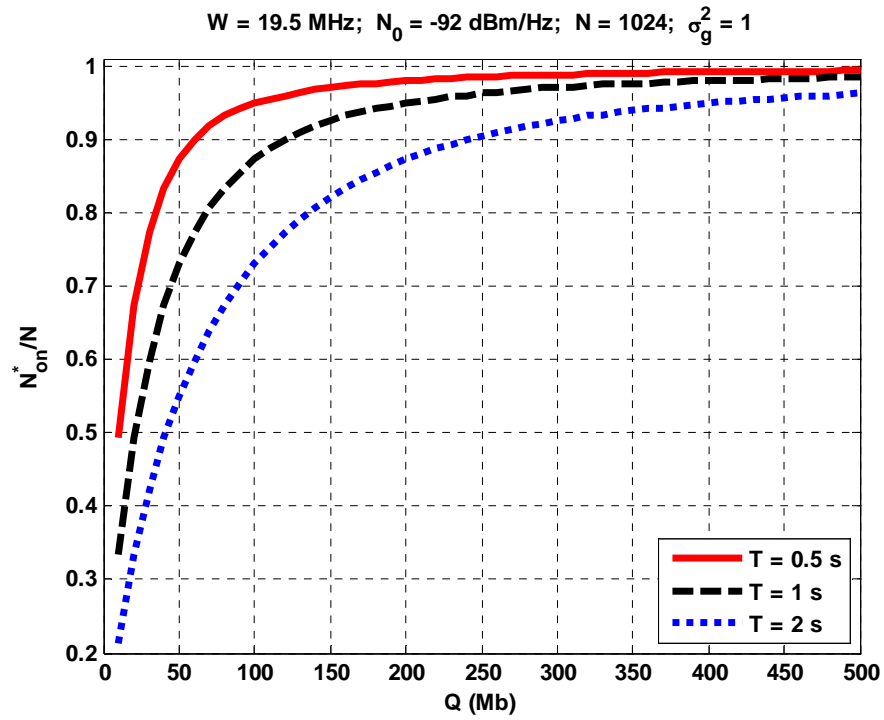
ภาพที่ 7 สมรรถนะของการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุดในอัตราบิตที่แตกต่างกัน



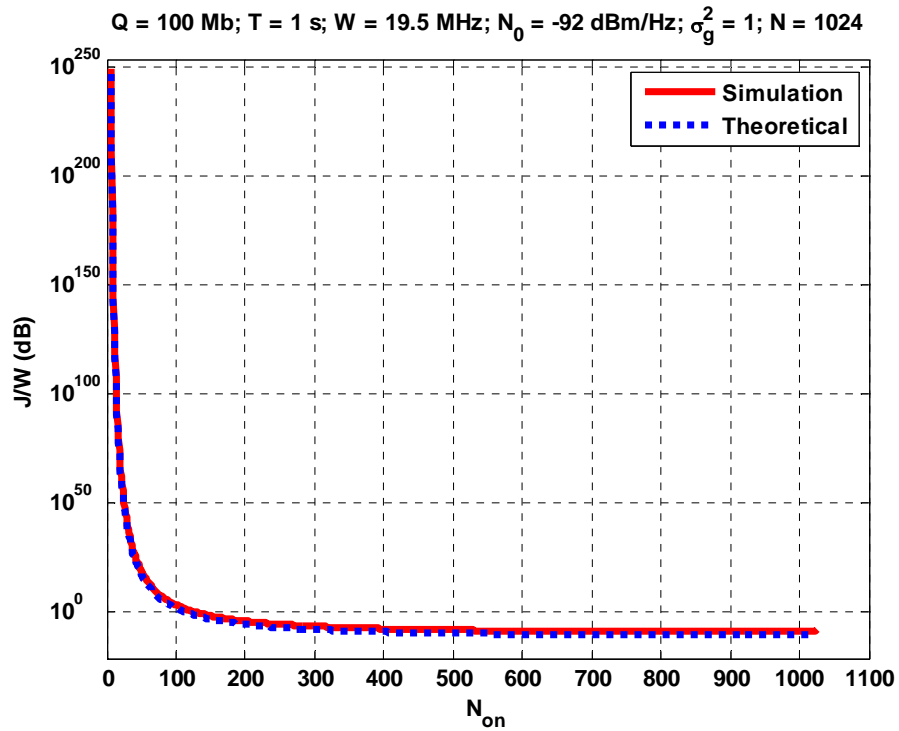
ภาพที่ 8 เปรียบเทียบร้อยละของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่ได้รับ การจัดสรรปริมาณข้อมูลด้วยวิธีการที่แตกต่างกันในช่วงอัตราบิต ระหว่าง 0 ถึง 500 เมกะบิตต่อวินาที



ภาพที่ 9 แสดงพลังงานทั้งหมดต่อแบนด์วิทด์ ที่ -92 ดีบีเอ็มต่อเฮิรตซ์ แบนด์วิทด์รวมของระบบหรือ  $W$  เท่ากับ 19.5 เมกะเฮิรตซ์และค่าความแปรปรวนหรือ  $\sigma_s^2$  เท่ากับ 1



ภาพที่ 10 ค่าเหมาะที่สุดของจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานกับปริมาณข้อมูลที่ต่างกัน



ภาพที่ 11      พลังงานรวมต่อแบนด์วิดท์ของระบบกับจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานเมื่อหาคำตอบด้วยวิธีเขียนโปรแกรมจำลองและวิเคราะห์ทฤษฎี

## บทที่ 4 บทสรุป

การนำเสนอวิธีการจัดสรรปริมาณข้อมูลที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการส่งสัญญาณด้วยวิธีโอเอฟดีเอ็มสำหรับช่องสัญญาณสายไฟฟ้าในงานวิจัยนี้มี 2 วิธี ได้แก่ การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดและการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุด ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับช่องสัญญาณตายตัว การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุดให้เซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปริมาณข้อมูลที่จัดสรรสำหรับช่องสัญญาณย่อย แต่การจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิดจะให้เซตคำตอบที่เหมาะสมรองลงมา ดังนั้นการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเหมาะสมที่สุดจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพทางพลังงานมากกว่าการจัดสรรปริมาณข้อมูลแบบเปิด-ปิด

2. สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ส่งผลกระทบต่อเล็กน้อยกับพลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมด เนื่องจากระยะเวลาที่อิมพัลส์เกิดขึ้นแต่ละรอบนั้นมีระยะเวลาสั้นและเมื่อเกิดขึ้นแล้วก็จะอยู่เป็นระยะเวลาสั้นในหน่วยของมิลลิวินาทีและไมโครวินาทีตามลำดับ ในขณะที่สัญญาณรบกวนอิมพัลส์เกิดขึ้นอัตราบิตจะลดลงทำให้ส่งปริมาณข้อมูลได้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไมโครรบกวน ระบบจึงต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเพื่อส่งปริมาณข้อมูลให้ครบ ทำให้พลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

3. พลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมดขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้ได้แก่ ปริมาณข้อมูลทั้งหมด ระยะเวลาที่ใช้ส่งข้อมูล ขนาดของอัตราขยายช่องสัญญาณย่อยแต่ละช่อง และความหนาแน่นสเปกตรัมทางกำลังของสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่เปลี่ยนไปตามความถี่ เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่นเป็นค่าคงที่แล้วจะได้ความสัมพันธ์

ว่า ปริมาณข้อมูลทั้งหมดและสัญญาณรบกวนพื้นหลังจะแปรผันตรงกับพลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมด ( $J \propto Q, \eta_n$ ) ระยะเวลาที่ใช้ส่งข้อมูลและขนาดของอัตราขยายช่องสัญญาณนั้นจะแปรผกผันกับพลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูล ( $J \propto \frac{1}{T}, \frac{1}{|H_n|^2}$ )

4. จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานหรือจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่ได้รับการจัดสรรปริมาณข้อมูลจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราบิต ( $R$ ) เมื่อต้องการส่งปริมาณข้อมูลด้วยอัตราบิตสูง จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่ใช้งานก็จะมากขึ้นตามไปด้วยเพื่อให้พลังงานรวมที่ใช้ส่งปริมาณข้อมูลทั้งหมดมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

5. สำหรับช่องสัญญาณสุ่ม ค่า  $\bar{N}_{on}^*$  หรือจำนวนที่เหมาะสมที่สุดของช่องสัญญาณย่อยที่เปิดใช้งานสามารถคำนวณได้จากสมการ (25) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกับผลลัพธ์ที่ได้จากการเขียนโปรแกรมจำลองและใช้เวลาคำนวณน้อยกว่า

## บรรณานุกรม

- [1] นิวัฒน์ เย็นกาย. 2547. การนำเสนอวิธีการตรวจจับสัญญาณแบบ ซิมโบโทมมิ่ง สำหรับสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ. 2552. สารานุกรมโทรคมนาคมไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และสารสนเทศ (อีซีทีไอ), กรุงเทพฯ.
- [3] สุพัตรา ศรีสุรมณี. 2547. การลดกำลังค่ายอดสำหรับการส่งแบบ OFDM ด้วยการขยายคอนสเทลเลชันสำหรับการมอดูเลตแบบ APSK. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [4] Anatory, J. and N. Theethayi. 2010. Broadband Power-line Communication Systems. WIT Press, UK.
- [5] Assimakopoulos, C. and F.N. Pavlidou. 2005. Multiuser power and bit allocation over power line Channels, pp. 255-259. In IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). Vancouver, Canada.
- [6] Bert, L.D., P. Caldera and D. Schwingshack and A.M. Tonello. 2011. On Noise Modeling for Power Line Communications, pp. 283–288. In IEEE International

Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). Udine, Italy.

[7] Dostert, K. 2001. Powerline Communication. Prentice Hall, New Jersey.

[8] Hamini, A., J.Y. Baudais and J.F. Hélar. 2011. Green resource allocation for powerline communications, pp. 393–398. In IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). Udine, Italy.

[9] Muhammad, F.S., J.Y. Baudais, J.F. Hélar and M. Crussiere. 2008. Coded Adaptive Linear Precoded Discrete Multitone Over PLC Channel, pp. 123–128. In IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). Jeju City, South Korea.

[10] Philipps, H., 1999. Modelling of powerline communication channels, pp. 14-21. In IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). Lancaster, UK.

[11] Sydsaeter, K. and P.J. Hammond. 1995. Mathematics for Economic Analysis. Prentice Hall, New Jersey.

[12] SYS2U.COM. 2011. HomePlug AV Extender. Available Source:

<http://www.sys2u.com/ProductSubGroup.php?ProductSubGroupID=0113&ProductBrandID=ALL>.

[13] Tse, D. and P. Viswanath. 2005. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press, UK.

[14] Wong, C.Y., R.S. Cheng, K.B. Letaief and R.D. Murch. 1999. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 10: 1747-1757.

[15] Zimmermann, M. and K. Dostert. 2002. A Multipath Model for the Powerline Channel. IEEE Transactions on Communications 50: 553-559.

## ภาคผนวก การเผยแพร่ผลการวิจัย

- P. Kas-udom and W. Santipach, "Minimum-Energy Bit Allocation Over Powerline OFDM Channels," in Proc. ECTI-CON, Krabi, Thailand, May 2013, pp. 1-5.