

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภะตะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา เสนอแนะ และความช่วยเหลือหลายสิ่ง ทำให้ทุกอย่างสำเร็จได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ อาจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ และ อาจารย์ ดร.วรพล พงษ์เพ็ชร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้ให้ข้อเสนอแนะ ให้ข้อคิดเห็น รวมทั้งแนวทางการปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด และขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาช่วยตรวจทานการเขียนวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดนี้ประโยชน์และความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเสริมสร้างกำลังใจ กำลังใจให้ จนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ชนะเดช เข้มกล้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	๘
กิตติกรรมประกาศ.....	๑
สารบัญตาราง.....	๗
สารบัญภาพ.....	๗
ประมวลศัพท์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครือข่ายไร้สาย.....	4
2.2 การประยุกต์ใช้งาน WSN.....	6
2.3 คุณลักษณะของ WSN.....	7
2.4 มาตรฐานและคุณสมบัติของ WSN.....	8
2.5 โครงสร้างเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ZigBee.....	9
2.6 โครงสร้าง LR-WPAN	11
2.7 พลังงานที่ใช้ใน WSN.....	12
2.8 กระบวนการเข้าถึงช่องสัญญาณสื่อสารใน WSN.....	13
2.9 MAC ใน WSN.....	15
2.10 ยานความถี่ที่ใช้งานใน IEEE802.15.4.....	17
2.11 โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางใน WSN.....	19
2.12 โพรโทคอล AODV.....	21
2.13 โปรแกรมจำลองการทำงานของเครือข่าย NS2.....	26
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	37
3.1 แนวทางการวิจัยและพัฒนา.....	37
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	39
4. การทดลองและผลการทดลอง.....	70
4.1 หาค่าพลังงานของเกตเวย์สำรองที่ใช้ไปและเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนเกตเวย์....	70
4.2 หาประสิทธิภาพของเครือข่าย WSN แบบ 2 เกตเวย์เทียบกับ 1 เกตเวย์.....	80
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	94
บรรณานุกรม.....	96
ภาคผนวก.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าการตั้งค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม NS2.....	31
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	38
3.2 การตั้งค่าต่างๆ บน Topology แบบ 1 Coordinator/Gateway.....	41
3.3 การตั้งค่าต่างๆ บน Topology แบบ 2 Coordinator/Gateway.....	42
3.4 ชื่อและค่าตัวแปรที่กำหนด.....	45
3.5 ค่าปริมาณความหนาแน่นของข้อมูลต่อเวลา.....	55
3.6 ค่าที่ใช้ในการกำหนดค่า Packet Interval.....	55
3.7 ผลการทดลองเบื้องต้นใน WSN แบบ 1 เกตเวย์.....	60
3.8 ผลการทดลองเบื้องต้นใน WSN แบบ 2 เกตเวย์.....	61
3.9 จำนวน packets ที่ใช้ในการทดลอง.....	63
4.1 จำนวน packets ที่ใช้ในการทดลอง.....	70
4.2 ผลการทดลองเมื่อเกตเวย์ 1 ไม่สามารถติดต่อได้.....	76
4.3 ผลการทดลองเมื่อเกตเวย์ 1 เคลื่อนที่ออกจากเครือข่าย.....	79
4.4 เปรียบเทียบค่าเวลาการตอบสนอง Error ของเครือข่าย WSN แบบ 2 เกตเวย์....	80
4.5 ค่าการหน่วงเวลา packets delay ของแบบเกตเวย์ 1 เคลื่อนที่ออกนอกเครือข่าย	81
4.6 ค่าการหน่วงเวลา packets delay ของแบบเกตเวย์ 1 เสียหาย.....	82
4.7 ค่าความสำเร็จในการส่งข้อมูล %PDR ของเครือข่าย WSN แบบ 2 เกตเวย์ โดย ที่มีเกตเวย์ 1 เกิดการเสียหาย.....	83
4.8 ค่าความสำเร็จในการส่งข้อมูล %PDR ของเครือข่าย WSN แบบ 2 เกตเวย์ โดย ที่มีเกตเวย์ 1 เคลื่อนที่ออกนอกเครือข่าย.....	84
4.9 ค่าปริมาณข้อมูลที่สูญเสียในเครือข่าย (% Packets drop) ของเครือข่าย WSN แบบ 2 เกตเวย์ โดยที่มีเกตเวย์ 1 เสียหาย.....	86
4.10 ค่าปริมาณข้อมูลที่สูญเสียในเครือข่าย (% Packets drop) ของเครือข่าย WSN แบบ 2 เกตเวย์ โดยที่มีเกตเวย์ 1 เคลื่อนที่ออกนอกเครือข่าย.....	87
4.11 ปริมาณ Throughput (kbps) กรณีเกตเวย์ 1 เสียหาย.....	89
4.12 ปริมาณ Throughput (kbps) กรณีเกตเวย์ 1 เคลื่อนที่ออกนอกเครือข่าย.....	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ปริมาณข้อมูลของเครือข่ายแบบ 2 เกตเวย์ ที่รับได้เทียบกับเวลา (Throughput kbps) โดยเปรียบเทียบกรณีเกตเวย์ 1 เสียหาย และกรณีเกตเวย์ 1 เคลื่อนที่ออกนอกเครือข่าย.....	92

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนผังแสดงมาตรฐาน IEEE802.....	4
2.2 โครงสร้างเครือข่ายของ ZigBee	10
2.3 กลไกการทำงาน CSMA/CA.....	11
2.4 โครงสร้างของ LR-WPAN.....	12
2.5 การเข้าถึงช่องสัญญาณของ CSMA/CA.....	12
2.6 โครงสร้างเฟรมของ TDMA.....	14
2.7 การทำงานของ S-MAC.....	16
2.8 การเปรียบเทียบการทำงานของ S-MAC และ T-MAC.....	17
2.9 ค่าย่านความถี่ที่ใช้ใน IEEE802.15.4-2006.....	17
2.10 ค่าความถี่มูลฐานของแต่ละช่องสัญญาณ.....	18
2.11 ค่าความถี่ 2.4GHz ที่ทับซ้อนกันของ IEEE802.15.4 กับ IEEE802.11.....	18
2.12 โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่ใช้ในเครือข่ายเฉพาะกิจ.....	20
2.13 กระบวนการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง (RREQ)	23
2.14 การตอบข้อความกลับ (RREP) ไปยังโหนดต้นทาง.....	24
2.15 การทำงานของผู้ใช้งานผ่านโปรแกรม NS2.....	27
2.16 โครงสร้างของ Multiple Gateway System.....	27
2.17 โครงสร้างของ Terminal Gateway.....	28
2.18 (a) Circular Topology	
(b) An example of the multipath routing in subnet ZigBee cluster-tree.....	30
2.19 (a) Packet delivery fraction	
(b) Number of intra-path and inter-path interference in the different routing strategies.....	32
2.20 (a) Number of collisions at the sink	
(b) Number of intra-path collisions in the different routing strategies.....	33
2.21 (a) Average end to end delay in the different routing at time: 0.05s to 1s	
(b) at time: 0.005s to 2s.....	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.22 (a) Network lifetime	
(b) Throughput in the different routing strategies.....	35
2.23 การทำงานของ IEEE802.15.4 MAC super frame.....	36
3.1 โครงสร้างของเครือข่ายที่จะใช้ในการจำลอง แบบมี 1 Gateway.....	40
3.2 โครงสร้างของเครือข่ายที่จะใช้ในการจำลอง แบบมี 2 Gateways	42
3.3 คำสั่งการใช้โปรแกรม Network Simulator 2.35 เพื่อสั่งงาน Otcl Script.....	43
3.4 แผนผังการกำหนดค่าในโปรแกรมภาษา Otcl Script สำหรับโมเดลจำลอง.....	44
3.5 โครงสร้าง WSN และระยะห่างระหว่างโหนดต้นทาง กับโหนดปลายทาง.....	46
3.6 การส่งข้อมูลระหว่างโหนด Source กับโหนด Destination ใน NS2.....	47
3.7 ช่วงเวลาในส่ง CBR Packet กรณีที่มี 1 Gateway.....	47
3.8 ลำดับขั้นตอนการส่งข้อมูลของตัวโพรโทคอล AODV.....	49
3.9 โปรแกรม Network Animation จำลองการทำงานของ WSN 1 Gateway.....	50
3.10 โปรแกรม Network Animation จำลองการทำงานของ WSN 2 Gateways.....	50
3.11 โครงสร้างของ Trace ไฟล์ ที่สร้างขึ้น.....	51
3.12 ข้อมูลใน trace file หลังจากแบ่งข้อมูลแต่ละ column แล้ว.....	53
3.13 กราฟของค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาแบบจุดต่อจุด.....	54
3.14 ตัวอย่างการกำหนดค่าของ CBR Packet.....	55
3.15 รหัสเทียม (Pseudo Code) การหาจำนวน CBR Packet ที่โหนดต้นทาง.....	56
3.16 รหัสเทียม (Pseudo Code) การหาจำนวน CBR Packet ที่โหนดปลายทาง.....	56
3.17 รหัสเทียม (Pseudo Code) การหาค่าเฉลี่ย CBR Packet ต่อเวลา ที่โหนดต้น ทาง.....	57
3.18 รหัสเทียม (Pseudo Code) การหาค่าเฉลี่ย CBR Packet ต่อเวลา ที่โหนด ปลายทาง.....	57
3.19 รหัสเทียม (Pseudo Code) การหาค่าค่าสัดส่วนของค่าเฉลี่ย CBR Packet ต่อ เวลาระหว่างโหนดต้นทาง กับโหนดปลายทาง.....	58
3.20 ช่วงเวลาในส่ง CBR Packet กรณีที่มี 2 Gateways.....	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.21 การปรับปรุงโปรแกรมกรณีที่มี 2 Gateways.....	59
3.22 ค่าเปรียบเทียบ Throughput ระหว่าง WSN แบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์.....	61
3.23 ค่า PDR ระหว่าง WSN แบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์.....	62
3.24 เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย แบบ 2 เกตเวย์ ที่ใช้ในการทดลอง.....	63
3.25 เครือข่ายที่ใช้ทดลองแบบเกตเวย์ 1 ไม่สามารถติดต่อได้ เนื่องจากรับความเสียหาย.....	64
3.26 เครือข่ายที่ใช้ทดลองแบบเกตเวย์ 1 ไม่สามารถติดต่อได้ เนื่องจากเคลื่อนที่ออกจากเครือข่าย.....	64
3.27 ส่วนที่ปรับปรุงเพิ่มเติมใน AODV.CC.....	65
3.28 ส่วนที่ปรับปรุงเพิ่มเติมใน AODV.CC เพื่อเชื่อมโยงข้อมูล.....	66
3.29 ส่วนที่ปรับปรุงเพิ่มเติมใน AODV.CC.....	66
3.30 ส่วนที่ปรับปรุงเพิ่มเติมใน AODV.CC เพื่อเชื่อมโยงข้อมูล.....	67
3.31 ส่วนของโปรแกรมที่พัฒนาโดยภาษา TCL เพื่อสร้าง packets CBR.....	67
3.32 ส่วนของโปรแกรมที่พัฒนาโดยภาษา TCL เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการเปลี่ยนเกตเวย์.....	68
3.33 การส่ง Message RERR ออกไป เมื่อเกตเวย์หลักไม่สามารถทำงานได้.....	68
3.34 การส่ง Message RERR ออกไป เมื่อเกตเวย์หลักไม่สามารถทำงานได้.....	69
3.35 ขั้นตอนการรอ Message RERR เพื่อเปลี่ยนเกตเวย์.....	69
4.1 ค่าพลังงานของเกตเวย์สำรองที่ใช้ในขณะรอทำงาน.....	71
4.2 เวลาที่ใช้ในทดสอบ WSN กรณีเกตเวย์หลักหยุดทำงานแบบทันที ทันใด.....	72
4.3 เวลาที่ใช้ในทดสอบ WSN กรณีเกตเวย์หลักเคลื่อนที่ออกนอกเครือข่าย.....	72
4.4 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเสียหาย จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 3000.....	73
4.5 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเสียหาย จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 4000.....	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเสียหาย จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 5000.....	74
4.7 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเสียหาย จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 6000.....	74
4.8 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเสียหาย จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 7000.....	75
4.9 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเสียหาย จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 8000.....	75
4.10 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเคลื่อนที่ออก จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 3000.....	76
4.11 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเคลื่อนที่ออก จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 4000.....	77
4.12 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเคลื่อนที่ออก จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 5000.....	77
4.13 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเคลื่อนที่ออก จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 6000.....	78
4.14 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเคลื่อนที่ออก จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 7000.....	78
4.15 เวลาที่โหนดต้นทางได้รับ Message RERR เมื่อโหนดปลายทางเคลื่อนที่ออก จำนวน Packets ที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 8000.....	79
4.16 เปรียบเทียบ Packets delay (ms) ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่ เกตเวย์ 1 เคลื่อนที่.....	81
4.17 เปรียบเทียบ Packets delay (ms) ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่ เกตเวย์ 1 เสียหาย.....	82
4.18 เปรียบเทียบ % PDR ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่เกตเวย์ 1 เสียหาย.....	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.19 เปรียบเทียบ % PDR ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่เกตเวย์ 1 เคลื่อนที่.....	85
4.20 เปรียบเทียบ % Packets Drop ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่ เกตเวย์ 1 เสียหาย.....	87
4.21 เปรียบเทียบ % Packets Drop ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่ เกตเวย์ 1 มีการเคลื่อนที่.....	88
4.22 เปรียบเทียบ Throughput (kbps) ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่ เกตเวย์ 1 เสียหาย.....	90
4.23 เปรียบเทียบ Throughput (kbps) ของระบบ 1 เกตเวย์ กับ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่ เกตเวย์ 1 เคลื่อนที่.....	91
4.24 เปรียบเทียบ Throughput (kbps) ของระบบ 2 เกตเวย์ ในกรณีที่เกตเวย์ 1 เสียหาย กับ เกตเวย์ 1 เคลื่อนที่.....	92

ประมวลศัพท์และคำย่อ

ABR	Associativity Based Routing
AODV	Ad-Hoc Distance Vector
ARPAM	Aeronautical Mobile Ad hoc Networks
BEMS	Building Energy Management System
B-MAC	Beamformed MAC
CBR	Constant Bit Rate
CLH	Cluster Head
CLI	Cluster Identifier
C-MAC	Cluster Based MAC
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Request to Send
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
D-MAC	Directional MAC
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
FFD	Full-function device
FIFO	First In First Out
GHz	Giga Hertz
GSR	Global State Routing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
ISI	Information Sciences Institute
Kbps	Kilobit per second
LLC	Logical Link Control
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Networks
MAC	Media Access Control

ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

MANET	Mobile Ad Hoc Network
Mbps	Megabit per second
MHz	Mega Hertz
NAM	Network Animation
NS2.35	Network Simulation 2.35
OLSR	Optimized Link State Routing
OORP	Order One MANET Routing Protocol
OSI model	Open Systems Interconnection model
PAN	Personal Area Network
PAN ID	Personal Area Network Identification
PDR	Packet Delivery Ratio
PCS-MAC	Physical Carrier Sense MAC
PHY	Physical
P-MAC	Parallel MAC
PPS	Packets Per Second
RERR	Route Error
RF	Radio Frequencies
RFC3561	Request for Comments 3561
RFD	Reduced-function device
RREP	Route Reply
RREP-ACK	Route Reply Acknowledgment
RREQ	Route Request
RTP	Real-time Transport Protocol
RTS	Clear to Send
S-MAC	Sensor Media Access Control
SPOF	Single Point of Failure
SRM	Scalable Reliable Multicast
SSCS	Service-specific Convergence Sub layer

ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

TA	Adaptive Timeout
TBRPF	Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
T-MAC	Timeout Media Access Control
TTL	Time to live
UDP	User Datagram Protocol
U-MAC	Universal Media Access Control
Wise-MAC	Wireless Sensor MAC
WRP	Wireless Routing Protocol
WSN	Wireless Sensor Network
Z-MHTR	ZigBee Multi-Path Hierarchical Tree Routing
ZRP	Zone Routing Protocol