



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง แนวทางการออกแบบระบบสื่อสารซิกบีสำหรับโครงข่ายปลายทางของการไฟฟ้า
ส่วนภูมิภาค

ZigBee Design Guideline for Provincial Electricity Authority Last Mile Network

นามผู้วิจัย นางอรดี มุสิกานนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

แนวทางการออกแบบระบบสื่อสารซิกบีสำหรับโครงข่ายปลายทางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ZigBee Design Guideline for Provincial Electricity Authority Last Mile Network

โดย

นางอรดี มุสิกานนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อรดี มูลิกานนท์ 2555: แนวทางการออกแบบระบบสื่อสารซิกบีสำหรับโครงข่าย
ปลายทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D. 70 หน้า

งานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของซิกบีในพื้นที่ให้บริการของการไฟฟ้าส่วน
ภูมิภาค (กฟภ.) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นระบบสื่อสารเชื่อมต่อระหว่างสมาร์ทมิเตอร์กับโครงข่าย
สื่อสารหลักในระบบสมาร์ทกริดของ กฟภ. โดยการกำหนดสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันและ
ใกล้เคียงสภาพแวดล้อมการติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์ของ กฟภ. แล้วทดลองการรับส่งสัญญาณผ่านซิกบี
ที่ระยะต่างๆ รวบรวมค่ากำลังสัญญาณรับที่ได้แล้ววิเคราะห์หาค่าครุชนิการสูญเสียเส้นทาง ค่า
เบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าลดทอนของแต่ละสภาพแวดล้อม ใช้วิธีการไควสแควร์ในการวิเคราะห์
การกระจายข้อมูล จากนั้นทดลองกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลในหมู่บ้านขนาดใหญ่ ใน
พื้นที่ให้บริการของ กฟภ. โดยการจำลองตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและสมาร์ทมิเตอร์
วิเคราะห์สัญญาณและนำเสนอวิธีการออกแบบเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลที่
เหมาะสมโดยการหาค่าการสูญเสียเส้นทางสูงสุดที่ยอมรับได้จากกำลังส่งและความไวของเครื่องรับ
แล้วนำค่าการสูญเสียเส้นทางนั้นมาคำนวณหาระยะทางตามลักษณะทางสิ่งแวดล้อม ใช้แบบจำลอง
ในคู่มือการแพร่กระจายข้อมูลและเครื่องมือในการทำนายสำหรับวางแผนระบบสื่อสารวิทยุระยะ
สั้นและเครือข่ายภายในย่านความถี่ 300MHz-100GHz ของสหภาพโทรคมนาคม ในการออกแบบ
ได้ระบุระดับความน่าจะเป็นของการรับสัญญาณ เพื่อเป็นตัวแปรในการหาพื้นที่ควบคุม พร้อมทั้ง
วิเคราะห์สัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณร่วมกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพ
ของการรับส่งข้อมูลในเครือข่ายซิกบี ผลของงานวิจัยนี้จะใช้เป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือการ
ติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์ของ กฟภ. ในอนาคต

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Oradee Musikanon 2012: ZigBee Design Guideline for Provincial Electricity Authority Last Mile Network. Master of Engineering (Electrical Engineering),
Major Field: Electrical Engineering , Department of Electrical Engineering.
Thesis Advisor: Assistant Professor Wachira Chongburee, Ph.D. 70 pages.

This study is to analyze the ZigBee outdoor propagation parameters when used as a communication module link between smart meter and the control center in PEA smart grid. This study collects the received signal strength data for three difference scenarios of meter installation and analyses the path loss exponents, the variance. Then, the distribution of the received signal is verified by using Chi-square method. Then presents a method to design the installation position of data concentrator unit (DCU) inside a large village in PEA service area. The designing method determines the maximum path loss from the transmit power and the sensitivity of the receivers. Then, the allowed loss is used to find the usable range by using model in the ITU Recommendations for propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. In this research, DCU positioning design and analysis are implemented on a large-sized community located the service area of PEA. In the design, the probability of signal receiving, a parameter in determination of the coverage, is clearly specified. Additionally, this work includes the signal to co-channel interference ratio, which plays important role in ZigBee link. The outcomes of this work will be used as a smart meter installation guide for PEA.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชิระ จงบุรี อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือ และแก้ไขปัญหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มี
ความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบ
ความรู้อันเป็นประโยชน์เพื่อไปใช้ในอนาคต และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุก
ท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่จัดตั้ง โครงการความร่วมมือทางวิชาการและ
พัฒนาผู้เชี่ยวชาญ ระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อพัฒนาเป็น
คณะทำงานตาม โครงการ Smart Grid และสนับสนุนทุกการศึกษาตลอดหลักสูตร และขอบคุณกอง
ออกแบบและบริการ ฝ่ายสื่อสารและโทรคมนาคม ที่เปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาในโครงการ

ขอขอบพระคุณ บริษัท สอลดีอิเล็กทรอนิกส์ กรุ๊ป ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งาน
อุปกรณ์ซิงโครไนซ์รวมถึงให้ยืมอุปกรณ์ใช้ในการทดลองหาระยะทาง พร้อมนำศึกษา
กระบวนการประกอบชิ้นส่วนมิเตอร์ และสาธิตการใช้งานสมาร์ตมิเตอร์ ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี

ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การช่วยเหลือกำลังกายและกำลังใจด้วยดีเสมอมา

อรดี มุสิกานนท์

ตุลาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	36
ผล	36
วิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	58
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	60
ภาคผนวก	62
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	70

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติหลักของอุปกรณ์ซิกบี ผลิตภัณฑ์ รุ่น CC2431 ผลิตภัณฑ์ Texas Instrument (TI) 128 KB flash memory	27
2	การหาค่าไควสแควร์จากสภาพแวดล้อมแบบที่ 1 (ระยะทาง 1 เมตร)	40
3	ค่าความน่าจะเป็น ไค์สแควร์	41
4	ระยะทางระหว่างอุปกรณ์รวมข้อมูลและสมาร์ทมิเตอร์ เมื่อติดตั้งในแนวดน ไม่มีสิ่งกีดขวาง และไม่ใช้แนวดนที่ความน่าจะเป็นพื้นที่ครอบคลุมต่างๆ	45
5	การสูญเสียเส้นทางเมื่อมิเตอร์รับสัญญาณจากอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล	52
ตารางผนวกที่		
1	ค่า RSSI ที่วัดได้เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ ถูก ติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวดนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน โดยสมมติ ว่าโมดูลของซิกบีถูกฝังอยู่ในสมาร์ทมิเตอร์ และทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับ โมดูลซิกบีตัวอื่นๆ ซึ่งติดตั้งเป็นตัวรับข้อมูล ติดตั้งอยู่ในระยะระดับสายตา โดยส่วนมากอยู่ที่มุมถนน	64
2	ค่าการสูญเสียเส้นทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1 สมาร์ทมิ เตอร์ ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนว ถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือ หมู่บ้าน โดยสมมติว่าโมดูลของซิกบีถูกฝังอยู่ในสมาร์ทมิเตอร์ และทำหน้าที่ ติดต่อสื่อสารกับโมดูลซิกบีตัวอื่นๆ ซึ่งติดตั้งเป็นตัวรับข้อมูล ติดตั้งอยู่ใน ระยะระดับสายตา โดยส่วนมากอยู่ที่มุมถนน	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3	ค่า RSSI ที่วัดได้เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบแรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ตมิเตอร์จะอยู่กลางแจ้ง ไม่อาคาร สิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรับส่งสัญญาณ	66
4	ค่าการสูญเสียเส้นทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อม แบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบแรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ตมิเตอร์จะอยู่กลางแจ้ง ไม่อาคาร สิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรับส่งสัญญาณ	67
5	ค่า RSSI ที่วัดได้เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้ เป็นการจำลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ตมิเตอร์ ไปยังโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ.	68
6	ค่าการสูญเสียเส้นทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้ เป็นการจำลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ตมิเตอร์ ไปยังโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ.	69

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างการออกแบบโครงข่ายปลายทางโดยใช้ซิกบีเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (DCU) กับสมาร์ตมิเตอร์ในโครงข่ายปลายทางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	6
2	การกำหนดความถี่ตามมาตรฐาน IEEE802.15.4	8
3	โครงสร้างทางกายภาพของซิกบี ZigBee Stack ตามแบบจำลอง OSI	8
4	การแบ่งอุปกรณ์ซิกบี ตามหน้าที่การทำงานแบ่งได้ 3 คือ อุปกรณ์ประสานซิกบี (ZigBee Coordinator, ZC) อุปกรณ์จัดเส้นทาง (ZigBee Router ,ZR) และ อุปกรณ์ปลายทาง (ZigBee End Device , ZED)	10
5	ช่องสัญญาณความถี่ย่าน 2.4GHz ที่ซ้อนทับระหว่าง IEEE 802.11 และ IEEE 802.15.4	12
6	การวางแผนนำความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่ เซลล์ซึ่งมีตัวอักษรเดียวกัน ถูกกำหนดให้ใช้กลุ่มของช่องสัญญาณเดียวกัน เส้นทึบแสดงขอบเขตของแต่ละคลัสเตอร์	13
7	ระยะทางระหว่างเซลล์เมื่อมีการนำความถี่เดิมกลับมาใช้งานในพื้นที่ใกล้เคียงกัน	17
8	การนิยามระยะสายตา และไม่ใช้ระยะสายตา (ก) B1 –R2 และ B2-R4 อยู่ในระยะสายตา B1-R1 และ B2-R3 ไม่ใช้ระยะสายตา (ข) ตัวอย่างเมื่อเทอร์มินัลระหว่างภาคส่งและภาครับ ไม่ใช้ระยะสายตาในพื้นที่ชุมชนหนาแน่น (ITU-R ,2012)	22
9	การกำหนดการทดลอง โดยให้ความสูงของภาคส่ง (h_t) = 1.8 เมตร และความสูงของภาครับ (h_r) = 1.2 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับตามที่กำหนด	29
10	บอร์ดทดลอง Smart RF04EB development kit ผลิตภัณฑ์ Chipcon ประกอบด้วย CC2431DK (SOC) ZigBee®/IEEE 802.15.4 , CC2420 RF transceiver และ AN040 whip antenna	29
11	การเริ่มใช้งานโปรแกรม SmartRF Studio7 เมื่อต่อสาย USB Port เชื่อมระหว่างบอร์ดซิกบีและคอมพิวเตอร์ โปรแกรมจะตรวจจับสัญญาณจากบอร์ดทดลองได้อัตโนมัติ	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	การกำหนดค่าในโปรแกรม SmartRF Studio7 (ก) ภาคส่ง (Tx) กำหนดให้ส่ง 100แพ็คเก็ต ช่องสัญญาณ 0B ความถี่ 2405MHz กำลังส่ง -0.1dBm (ข) ภาครับ (Rx) แสดงกำลังสัญญาณรับ RSSI ที่รับได้ และค่าแพ็คเกจที่สูญเสีย	30
13	แผนภูมิการไหลของขั้นตอนการกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวมข้อมูลในหมู่บ้านขนาดใหญ่	33
14	สภาพแวดล้อมแบบที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน	37
15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเส้นทางและระยะทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบ ที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน	37
16	สภาพแวดล้อมแบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบแรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ตมิเตอร์จะอยู่กลางแจ้ง ไม่มีอาคารสิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรับส่งสัญญาณ	38
17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเส้นทางและระยะทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้านหรือชุมชน	38
18	สภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตร จากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้ เป็นการจำลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ตมิเตอร์ ไปยังโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ.	39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเส้นทางและระยะทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบ ที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกเขตชุมชน	39
20	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ในหน่วย dB กับค่าระยะทางในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1-3	41
21	กราฟเปรียบเทียบการสูญเสียเส้นทาง ระหว่างการทดลองสมรรถนะของซิกบีในพื้นที่ กฟภ. กับแบบจำลอง ITU	43
22	แบบจำลองพื้นที่หมู่บ้านและตำแหน่งมิเตอร์ทั้งหมดโดยสมมติให้สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งในแนวถนนเดียวกัน หมู่บ้านกฤษดานคร อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ขนาดพื้นที่โดยประมาณ 500 เมตร) \times 1000 เมตร มิเตอร์จำนวน 800 ชุด	44
23	กราฟการสูญเสียเส้นทางต่อระยะทาง เมื่อกำหนดสภาพแวดล้อมระหว่างเทอร์มินัลภาคส่งและภาครับเป็น 2 กรณี (ก) ภาคส่งและภาครับอยู่ในระยะสายตา (LoS) (ข) ภาคส่งและภาครับไม่อยู่ในระยะสายตา (NLos)	45
24	พื้นที่ครอบคลุมสมาร์ทมิเตอร์ เมื่ออุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและสมาร์ทมิเตอร์อยู่ในระยะสายตาระยะทางสูงสุด 303.59 เมตร(วงรี 2 แนวตั้งและแนวนอน) และเมื่ออุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและสมาร์ทมิเตอร์ไม่ใช้ระยะสายตาระยะทาง 20.05 เมตร (วงกลมเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.05เมตร)	47
25	การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลติดตั้งในแนวถนนเดียวกันและสมาร์ทมิเตอร์ถูกถ่าย (ก) ตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล แสดงบนแผนที่ทางภูมิศาสตร์ (ข) ตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล	48
26	การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลติดตั้งแบบสลับพื้นปลาและสมาร์ทมิเตอร์ถูกถ่าย	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
27	<p>สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1</p>	49
28	<p>สมาร์ทมิเตอร์ และ DCU 1 ติดตั้งในระยะสายตา สมาร์ทมิเตอร์และ DCU 2 มีสิ่งกีดขวาง DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1</p>	50
29	<p>สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1</p>	50
30	<p>สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา แต่ไม่อยู่ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 เท่ากันระยะทางไปยัง DCU2</p>	51
31	<p>สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา แต่ไม่อยู่ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 น้อยกว่าระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU2</p>	52
32	<p>การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ให้อยู่ในแนวเดียวกัน บริเวณที่อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลอยู่ใกล้กันระยะประมาณ 46 เมตรอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วม เท่ากับ 19.69 dB</p>	52
33	<p>การติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแบบสลับพื้นปลา เมื่อมิเตอร์ M1 รับสัญญาณจากอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล D0 แต่อยู่ในระยะสายตาของ DCU D1 อาจถูกรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณร่วม ของ DCU D1 ได้</p>	54
34	<p>การติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแบบสลับพื้นปลา โดยอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแต่ละตัวไม่อยู่ในระยะสายตาของมิเตอร์ที่ไม่ใช่ลูกข่าย</p>	55

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AMI	: Advance Metering Infrastructure
AMR	: Automatic Meter Reading การอ่านหน่วยมิเตอร์แบบอัตโนมัติและระบบโครงสร้างพื้นฐาน
DCU	: Data Concentrator Unit อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล
DMS	: Distribution Management System
ERP	: Enterprise Resource Planning ระบบซอฟต์แวร์สำเร็จรูป
FTTH	: Fiber to the home
GIS	: Geographic Information System ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
GPRS	: General Packet Radio Service
Last Mile Network	: โครงข่ายปลายทาง
LoS	: Line of sight ระยะสายตา
Main server	: เซิร์ฟเวอร์หลัก
NLoS	: Non line of sight ไม่ใช่ระยะสายตา
PON	: Passive Optical Network
Propagation	: การแพร่กระจาย
Road Map	: แผนที่นำทาง
RSSI	: Receive Sensitivity signaling Indicator ตัวบ่งชี้ความไวของสัญญาณ
Rx	: Receiver ภาครับ
SCADA	: Supervisory Control And Data Acquisition
Smart Grid	: สมาร์ทกริด
Smart Hospital	: โรงพยาบาลอัจฉริยะ
Tx	: Transceiver ภาคส่ง
WiFi	: Wireless-Fidelity
ZigBee	: ซิกบี

แนวทางการออกแบบระบบสื่อสารซิกบีสำหรับโครงข่ายปลายทาง ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ZigBee Design Guideline for Provincial Electricity Authority Last Mile Network

คำนำ

สมาร์ตกริดหรือโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะที่ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและสื่อสารในการบริหารจัดการ ควบคุมการผลิต การส่ง และจ่ายพลังงานไฟฟ้า เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือก รวมถึงระบบบริหารการใช้สินทรัพย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อให้มีประสิทธิภาพ มั่นคง ยืดหยุ่น มีศักยภาพ ในทุกๆ ด้าน เช่น การรวมพลังงานทดแทนเข้ามาในระบบ จัดหาข้อมูลการใช้ไฟฟ้าแบบเสมือนจริง ตอบสนองความต้องการของลูกค้าทั้งแบบอุตสาหกรรมและครัวเรือน ระบบการอ่านหน่วยมิเตอร์อัตโนมัติและมิเตอร์อัจฉริยะ ระบบบริหารจัดการ ระบบรถยนต์ไฟฟ้า ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือ ความมั่นคงปลอดภัย สร้างทางเลือกให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตอบสนองความต้องการของลูกค้า ให้ลูกค้ามีส่วนร่วมในการบริหาร จัดการการใช้พลังงานด้วยตัวเองเพื่อเป็นการควบคุมค่าใช้จ่าย รวมถึงจากการที่หน่วยงานทางด้านผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าต้องเผชิญกับปัญหาความต้องการการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ต้นทุนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น กฎเกณฑ์และการผลักดันทางด้านพลังงานสะอาดเพื่อลดการทำลายบรรยากาศของโลก และลดภาวะโลกร้อน ตลอดจนโครงสร้างพื้นฐานทั้งในส่วนระบบจ่ายไฟและระบบสื่อสารที่มีการใช้มานานและต้องการการปรับปรุง ทำให้หน่วยงานต่างๆ ทั่วโลกให้ความสำคัญและหันมาพิจารณาวางแผนดำเนินการด้านสมาร์ตกริด

ในการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายของสมาร์ตกริด จำเป็นต้องอาศัยการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลที่เสมือนจริง การขยายขนาดของโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารเพื่อให้รองรับการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสาร เป็นปัจจัยสำคัญของสมาร์ตกริด เป็นเครื่องมือที่จำเป็นอย่างยิ่งในการเฝ้าดูหรือควบคุมสั่งการการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ ประสิทธิภาพของพลังงาน การแลกเปลี่ยนข้อมูล เป็นต้น หน่วยงานด้านพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ในประเทศไทย ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ต่างให้ความสำคัญกับการวางแผน วางกรอบนโยบายต่างๆ เพื่อก้าวสู่

สมาร์ทกริดอย่างสมบูรณ์แต่ละหน่วยงานมีโครงข่ายสื่อสารที่เป็นโครงข่ายสื่อสารหลักเพื่อใช้งานในอยู่แล้ว แต่ในส่วนของโครงข่ายระบบสื่อสารที่จะเชื่อมต่อไปยังมิเตอร์ผู้ใช้ปลายทางหรือที่เรียกว่า โครงข่ายปลายทาง ไมล์สุดท้าย หรือ กิโลเมตรสุดท้าย นั้น ส่วนใหญ่ยังไม่ครอบคลุม และยังไม่แล้วเสร็จสมบูรณ์

กฟภ. เป็นหน่วยงานที่มีโครงข่ายส่วนตัว (Private Network) ขนาดใหญ่ครอบคลุมทั่วประเทศ มีโครงข่ายใยแก้วนำแสงเป็นโครงข่ายสื่อสารหลัก (Back Bone Network) สนับสนุนระบบบริหารจัดการระบบไฟฟ้า และระบบงานภายในของ กฟภ. และมีการใช้เทคโนโลยีไร้สาย (Radio, GPRS) และ Power Line Carrier (PLC) เชื่อมต่อไปยังลูกค้าปลายทางในบางส่วนแล้ว กฟภ. อยู่ระหว่างการดำเนินการวางแผน โครงข่ายสื่อสารที่จะต้องเตรียมรองรับสมาร์ทกริดในอนาคตนั้น ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการทำงานที่มั่นคงปลอดภัยและเชื่อถือได้ของโครงสร้างการทำงานจากระบบไฟฟ้า และถือเป็น โครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อประเทศ โครงข่ายสื่อสารดังกล่าวนี้จะต้องพร้อมที่จะรองรับการประยุกต์ใช้งาน และการใช้งานที่ครอบคลุมหลากหลาย เช่น ระบบป้องกันรีเลย์ , ระบบการควบคุมการจ่ายไฟ, สนับสนุนระบบงานในระบบปฏิบัติการทั้งเสียง ข้อมูลและภาพให้กับเจ้าหน้าที่ที่ออกปฏิบัติการ และระบบความปลอดภัยต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำโครงข่ายดังกล่าวไปใช้งานเป็นระบบสื่อสาร เสียง ข้อมูล ภาพ ให้กับองค์กรได้อีกด้วย

เทคโนโลยีสื่อสารที่เหมาะสมสำหรับเชื่อมต่อกับสมาร์ทมิเตอร์และรองรับสมาร์ทกริดเพื่อใช้ในโครงข่ายปลายทางนั้น มีตัวเลือกหลากหลายทั้งแบบมีสาย และไร้สาย แต่จากสภาพพื้นที่ที่บริการ ของ กฟภ. มีหลากหลายแตกต่างกัน การออกแบบระบบสื่อสารหรือเลือกเทคโนโลยีให้เหมาะสม ได้ประโยชน์สูงสุด คุ่มค่ากับการลงทุนจึงต้องศึกษาอย่างละเอียดรอบคอบ สอดคล้องกับแต่ละสภาพพื้นที่ และความต้องการใช้งาน ซิกบี (ZigBee) เป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายอีกประเภทหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับเชื่อมต่อกับสมาร์ทมิเตอร์เนื่องจากเน้นการสื่อสารแบบประหยัดพลังงาน ราคาถูก มีผู้ผลิตอุปกรณ์ในท้องตลาดและใช้งานอยู่แล้วในหลายประเทศ มีข้อจำกัดน้อยกว่าระบบสื่อสารพีแอลซี (PLC) และมีราคาถูกกว่าระบบสื่อสารเอฟทีทีเอส (FTTH)

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่น และการสูญเสียเส้นทางของเทคโนโลยีซิกบี ย่านความถี่ 2.4GHz โดยทำการทดลองในพื้นที่กลางแจ้งที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการของ กฟภ. มีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับสถานที่ติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์จริง ใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์และกำหนดเป็น โมเดลการแพร่กระจายคลื่นสำหรับแต่ละพื้นที่ จากนั้นเลือก

พื้นที่ติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์จากฐานข้อมูลทางภูมิศาสตร์สารสนเทศของ กฟภ. คำนำผลการสูญเสียเส้นทางสูงสุด โดยใช้สมการที่ได้จากการ ทดลอง วิเคราะห์และเปรียบเทียบกับแบบจำลองของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีอยู่แล้ว การทดลองออกแบบและวิเคราะห์การหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลในหมู่บ้านขนาดใหญ่ ที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการของ กฟภ. ในการออกแบบได้ระดับความน่าจะเป็นของรับสัญญาณได้ เพื่อเป็นตัวแปรในการหาพื้นที่ควบคุม พร้อมทั้งวิเคราะห์สัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณร่วมกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลในเครือข่ายซิกบี ผลของงานวิจัยนี้จะใช้เป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือการติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์ของการ กฟภ. ในอนาคต



วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบสื่อสารซิกบีสำหรับการสื่อสารปลายทาง ระหว่างสมาร์ตมิเตอร์ กับเครือข่ายสื่อสารหลัก ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยทำการทดลองส่งข้อมูลระหว่างซิกบี เก็บรวบรวมข้อมูล RSSI วิเคราะห์ค่าครรชณีการสูญเสียเส้นทางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยกำหนดสภาพแวดล้อมที่สอดคล้องกับสภาพพื้นที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จำนวน 3 แบบ คือถนนในหมู่บ้าน ถนนทางเข้าหมู่บ้าน และถนนหลักขนาด 8 ช่องจราจร
- (2) เพื่อตรวจสอบผลทดสอบภาคสนาม ตามสภาพพื้นที่ใช้งาน กับแบบจำลองเครือข่ายสื่อสารมาตรฐานที่มีใช้งานอยู่แล้ว ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง ITU ความถี่ย่าน 2.4GHz ซึ่งไม่ครอบคลุมสัญญาณรบกวนภายนอกที่อาจมีผลต่อการรับส่งสัญญาณ
- (3) เพื่อกำหนดแนวทางในการออกแบบการเชื่อมต่อสมาร์ตมิเตอร์มายังเครือข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ. โดยทำการวิเคราะห์ ออกแบบโครงข่ายปลายทางผ่านระบบสื่อสารซิกบีในหมู่บ้านขนาดใหญ่ ทหาระยะทางและอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วมกัน เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบระบบสื่อสารซิกบีเบื้องต้นให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ต่อไป

การตรวจเอกสาร

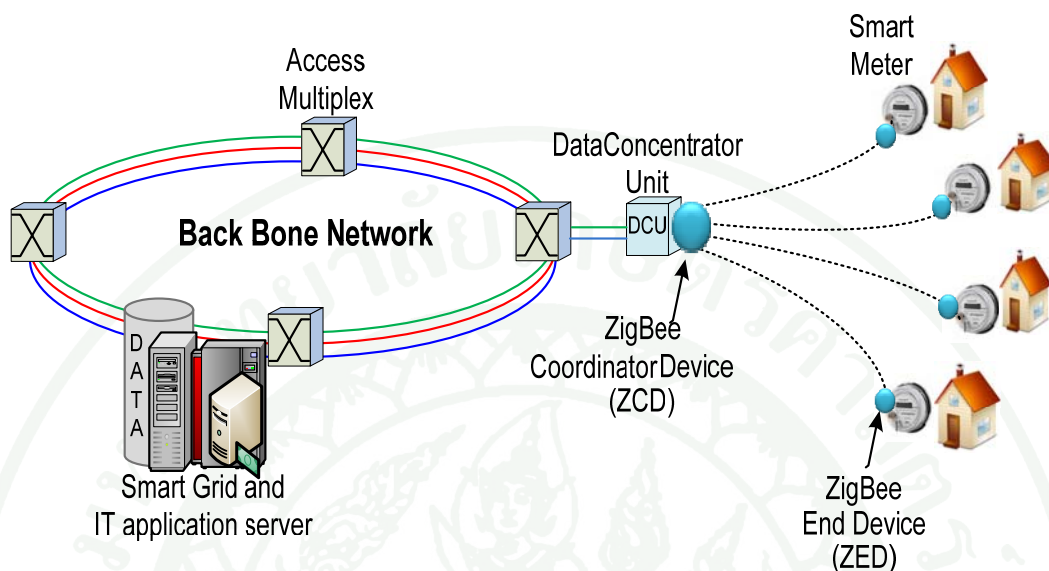
การตรวจเอกสารแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 ส่วนคือ ข้อมูลและข้อจำกัดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ข้อกำหนดทางเทคนิคของซิกบี การออกแบบความถี่ แบบจำลองการสูญเสียเส้นทาง สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง การแพร่กระจายคลื่น และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลและข้อจำกัดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ สังกัดกระทรวงมหาดไทย มีหน้าที่ดำเนินการจัดหาและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้า และธุรกิจที่เกี่ยวข้อง กฟภ. รับผิดชอบให้บริการส่งและจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วประเทศยกเว้นในกรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ มีพื้นที่ให้บริการประมาณ 510,000 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 99 ของพื้นที่ประเทศไทยทั้งหมด มีจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณ 15 ล้านราย (กฟภ., 2553) กฟภ. รับซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) และบางส่วนจากผู้ผลิตรายย่อย จากนั้นจะส่งต่อไปยังสถานีไฟฟ้าเพื่อปรับระดับแรงดันของระบบจำหน่ายโดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันลงมาระดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าใช้งาน คือ 220/380V, 22 kV, 33 kV และ 115 kV แล้วจึงส่งต่อไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ ซึ่งติดตั้งบนเสาไฟฟ้าที่ระดับความสูง 1.5-3 เมตร จากระดับพื้นดิน บริเวณใกล้ที่พักอาศัยของผู้ใช้ไฟ

ปัจจุบัน กฟภ. ดำเนินการหลายโครงการเพื่อพัฒนา ปรับปรุงการบริการในด้านต่างๆ รวมถึงสนับสนุนการก้าวเข้าสู่สมาร์ทกริดในอนาคต เช่น โครงการติดตั้งระบบศูนย์สั่งการจ่ายไฟ สำหรับการควบคุมและสั่งการระบบจำหน่าย โครงการระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อสนับสนุนระบบศูนย์สั่งการจ่ายไฟ โครงการระบบซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับธุรกิจหลัก สำหรับการบริการผู้ใช้ไฟฟ้าและการบริหารจัดการองค์กร โครงการการอ่านหน่วยมิเตอร์แบบอัตโนมัติและระบบโครงสร้างพื้นฐาน และอื่นๆ กฟภ. มีโครงข่ายระบบสื่อสารที่สามารถสนับสนุนงานโครงการต่างๆ โดยติดตั้งสายใยแก้วนำแสงเชื่อมโยงระหว่างหน่วยงาน กฟภ. สถานีไฟฟ้า และมีศูนย์เฝ้าดูและควบคุมอยู่ที่สำนักงานใหญ่ในกรุงเทพมหานคร แต่ยังคงขาดระบบสื่อสารที่เชื่อมโยงไปยังผู้ใช้ปลายทางซึ่งมีเป็นจำนวนมาก ประมาณ 15 ล้านราย (สมาร์ตมิเตอร์ 1 ชุดต่อลูกค้า 1 ราย) การ

พิจารณานำเทคโนโลยีมาใช้ในการเชื่อมต่อจึงต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่บริการ คุ่มค่า เหมาะสม และเกิดประโยชน์สูงสุด



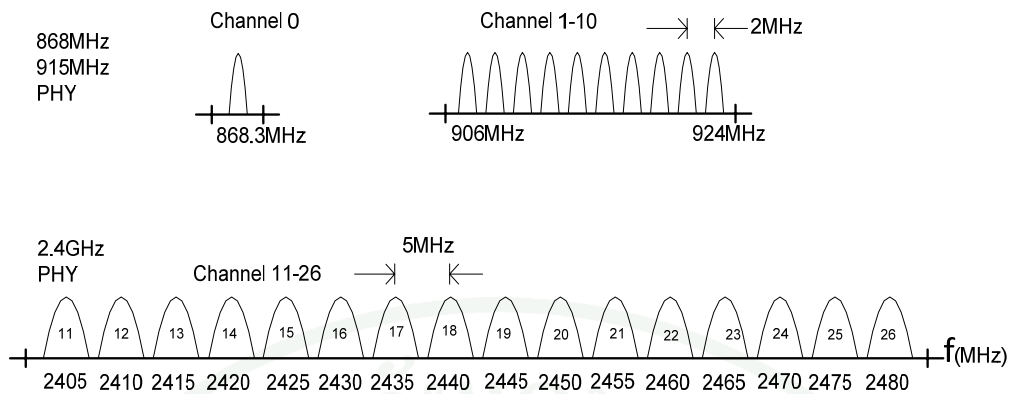
ภาพที่ 1 ตัวอย่างการออกแบบโครงข่ายปลายทางโดยใช้ซิกบีเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (DCU) กับสมาร์ทมิเตอร์ในโครงข่ายปลายทางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

กฟภ. ได้จ้างจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นที่ปรึกษาจัดทำแผนที่นำทางและศึกษาความเหมาะสมโครงการ PEA Smart Grids และ AMI (จุฬาลงกรณ์, 2554) ในการออกแบบโครงข่ายระบบสื่อสารเพื่อเชื่อมต่อสมาร์ทมิเตอร์ ตัวอย่างการออกแบบโครงข่ายปลายทางโดยใช้ซิกบีเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลระหว่างสมาร์ทมิเตอร์กับอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลโครงข่ายสมาร์ทกริดของ กฟภ. แสดงตามภาพที่ 1 อุปกรณ์ซิกบีปลายทาง (ZED) จะเชื่อมต่อกับสมาร์ทมิเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลการใช้ไฟฟ้าแล้วส่งต่อมายังอุปกรณ์ประสานซิกบี (ZCD) ในขณะที่อุปกรณ์ประสานจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (DCU) ซึ่งทำหน้าที่เก็บรวบรวมข้อมูลและส่งต่อไปประมวลผลยังศูนย์ประมวลผลกลาง ส่วนระบบสื่อสารที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์หลักนั้นอาจเลือกใช้ PON WiFi GPRS และอื่นๆ

เทคโนโลยีที่นำมาใช้กับโครงข่ายปลายทาง

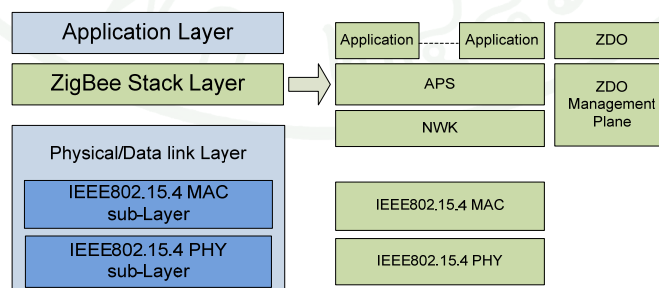
ผู้ใช้งานปลายทางหรือโครงข่ายปลายทาง สำหรับ กฟภ. หมายถึง มิเตอร์ผู้ใช้ไฟ อุปกรณ์ภาคสนามต่างๆ ซึ่งติดตั้งกระจายในบริเวณกว้าง และมีเป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงโครงข่ายปลายทางที่เป็นสมาร์ทมิเตอร์มิเตอร์ เท่านั้น ซึ่งอาจหมายถึง มิเตอร์อัจฉริยะ (AMI) หรือ มิเตอร์อัตโนมัติ (AMR) การเชื่อมต่ออุปกรณ์เหล่านี้เข้ามาในโครงข่ายสื่อสารหลัก จะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อแนวทางการดำเนินการสมาร์ตกริด ปัจจุบัน กฟภ. ยังไม่มีโครงข่ายปลายทางเป็นของตนเอง แต่ที่มีใช้งานบางส่วนเป็นการเช่าใช้จากผู้ให้บริการโทรคมนาคมทั้งแบบวงจรเช่าและระบบ GPRS เทคโนโลยีสำหรับโครงข่ายปลายทาง ที่มีการใช้งานกันแพร่หลายได้แก่ xDSL, FTTx, PON, PLC, WiFi Mesh, ZigBee, WiMAX และเครือข่ายวิทยุภายใน เป็นต้น แต่ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในโครงข่ายสมาร์ตกริดอย่างแพร่หลาย คือ ระบบพีแอลซี (PLC) และ ซิกบี (ZigBee)

ซิกบีเป็นมาตรฐานสากลของเครือข่ายไร้สายถูกพัฒนาขึ้นมาโดยการรวมตัวกันของกลุ่มบริษัทในนามกลุ่มพันธมิตรซิกบี (ZigBee Alliance, 2012) ซิกบีมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ อาทิ ใช้งานความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต ใช้พลังงานน้อย แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และเป็นระบบการติดต่อสื่อสารแบบสองทิศทาง ถูกพัฒนามาใช้งานครั้งแรกในเครือข่ายควบคุมและเฝ้าดูที่ไม่ต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่ไม่สูงมากนัก อุปกรณ์ซิกบีจะถูกฝังอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบอัตโนมัติในบ้าน หรือในโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์ต่อพ่วงคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ตรวจจับในทางการแพทย์ ของเล่น และเกมส์ เป็นต้น ความถี่ที่ใช้งานของซิกบีอยู่ในย่านความถี่อุตสาหกรรม หรือความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต ในประเทศแถบยุโรปใช้ย่านความถี่ 868 MHz ประกอบด้วย 1 ช่องสัญญาณ กำหนดให้เป็นช่องสัญญาณที่ 0 อัตราเร็วข้อมูล 20 kbps ในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศออสเตรเลียใช้ย่านความถี่ 915 MHz ประกอบด้วย 10 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณที่ 1-10) อัตราเร็วของข้อมูล 40 kbps ส่วนย่านความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านที่มีการใช้งานแพร่หลายทั่วโลก ประกอบด้วย 16 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณที่ 11-26) ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณมีขนาดความกว้างแบนวิธด์ 5 MHz อัตราเร็วข้อมูล 250 kbps รายละเอียดการกำหนดความถี่ตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 แสดงตามภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การกำหนดความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

ซิกบีถูกพัฒนาบนชั้นเครือข่าย (NWK) ของมาตรฐาน IEEE802.15.4 ตามภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของซิกบี ซึ่งสามารถวัดคุณภาพการเชื่อมต่อระหว่างโหนดภายในเครือข่ายได้ และสนับสนุนการสร้างทอพอโลยีแบบดาว ต้นไม้ และแบบตาข่าย ในทอพอโลยีแบบดาว เครือข่ายจะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ตัวหลักเรียกว่าอุปกรณ์ประสานซิกบี (ZigBee Coordinator) อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่เริ่มต้นและบำรุงรักษาอุปกรณ์ในเครือข่าย อุปกรณ์ตัวอื่นๆ ทั้งหมดเรียกอุปกรณ์ปลายทาง ติดต่อสื่อสาร โดยตรงกับอุปกรณ์ประสานซิกบี ทอพอโลยีแบบตาข่ายอุปกรณ์ประสานรับผิดชอบในการตอบสนองสำหรับการเริ่มใช้งานเครือข่ายและสำหรับการเลือกตัวแปรของเครือข่าย แต่เครือข่ายอาจจะแสดงการใช้งานผ่านอุปกรณ์จัดเส้นทาง (ZigBee Routers) ในทอพอโลยีแบบต้นไม้ อุปกรณ์จัดเส้นทางจะเคลื่อนย้ายข้อมูลและควบคุมข่าวสารผ่านเครือข่ายโดยใช้กลยุทธ์การจัดเส้นทางแบบลำดับขั้น เครือข่ายแบบต้นไม้อาจจะใช้การสื่อสารแบบบีคอนเพื่ออนุญาตให้มีการติดต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer to Peer)



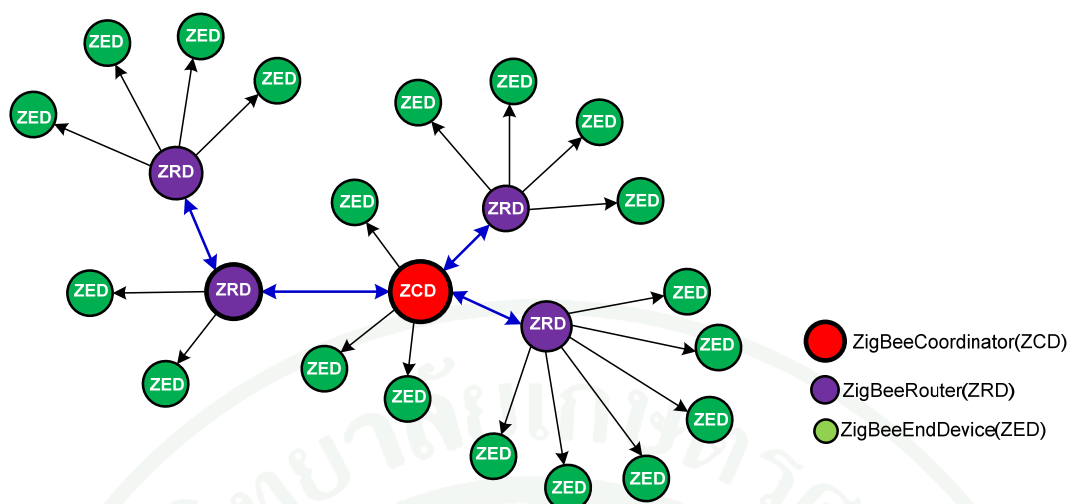
ภาพที่ 3 โครงสร้างทางกายภาพของซิกบี ZigBee Stack ตามแบบจำลอง OSI

อุปกรณ์ของซิกบีนิยามตามหน้าที่การทำงานเป็น 2 ประเภทคือ RFD (Reduced Functionality Device) และ FFD (Full Functionality Device) อุปกรณ์ RFD ถูกลดหน้าที่การทำงานให้ต่ำลงทำให้ใช้หน่วยความจำน้อยกว่า FFD การประมวลผลน้อยกว่า ใช้พลังงานต่ำกว่า อุปกรณ์ RFD สามารถติดต่อกับ FFD ได้เพียงตัวเดียวเท่านั้นในเครือข่ายและไม่สามารถติดต่อกับ RFD ได้ ส่วนอุปกรณ์ FFD ต้องการทรัพยากรต่าง ๆ เช่น หน่วยความจำ พลังงาน ความสามารถประมวลผลมากกว่า RFD สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ไม่จำกัดจำนวน กำหนดหน้าที่ให้เป็นได้ทั้งอุปกรณ์ประสานหรืออุปกรณ์ปลายทางของเครือข่าย หากแบ่งตามชนิดของอุปกรณ์ แบ่งเป็น 3 ชนิดแสดงตามภาพที่ 4 มีรายละเอียดการทำงานดังนี้

(1) อุปกรณ์ประสานซิกบี (ZigBee Coordinator Device, ZCD) อุปกรณ์นี้มีความสามารถมากที่สุด ทำหน้าที่เริ่มต้นและบำรุงรักษาอุปกรณ์ในเครือข่าย อุปกรณ์ตัวอื่นๆ ทั้งหมด ในเครือข่าย มักจะมีอุปกรณ์ประสานซิกบีแค่เพียงหนึ่งตัวเนื่องจากทำหน้าที่เริ่มการใช้งานและเก็บรวบรวมข้อมูลการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่าย รวมถึงควบคุมความปลอดภัยในเครือข่ายด้วย

(2) อุปกรณ์จัดเส้นทาง (ZigBee Router Device, ZRD) มีหน้าที่จัดเส้นทางในเครือข่าย และสามารถส่งผ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ปลายทางไปยังอุปกรณ์ประสานต้นทางหรือไปยังเครือข่ายอื่นได้ด้วยในทอพอโลยีแบบต้นไม้ อุปกรณ์จัดเส้นทางจะเคลื่อนย้ายข้อมูลและควบคุมข่าวสารผ่านเครือข่ายโดยการใช้กลยุทธ์การจัดเส้นทางแบบลำดับขั้น เครือข่ายแบบต้นไม้อาจจะใช้การสื่อสารแบบบิกอนเพื่ออนุญาตให้มีการติดต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ (peer to peer)

(3) อุปกรณ์ปลายทาง (ZigBee End Device, ZED) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกลดหน้าที่การทำงานลง (RFD) มีหน้าที่ติดต่อกับอุปกรณ์แม่ข่ายหรืออุปกรณ์ประสาน หรืออุปกรณ์จัดเส้นทาง และเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ปลายทาง เช่น สมาร์ทมิเตอร์ในโครงข่ายสมาร์ทกริดความสัมพันธ์แบบนี้จะอนุญาตให้โหนดสามารถตั้งเป็นโหมดหลับเมื่อมีการรับส่งข้อมูล และ โหมดทำงานเมื่อมีการร้องขอให้รับส่งข้อมูล ทำให้ประหยัดพลังงาน และแบตเตอรี่อายุการใช้งานที่ยาวนาน มีราคาถูกกว่าอุปกรณ์ประสานหรืออุปกรณ์จัดเส้นทาง แบบอื่นๆ



ภาพที่ 4 การแบ่งอุปกรณ์ซิกบีตามหน้าที่การทำงานแบ่งได้ 3 คือ อุปกรณ์ประสานซิกบี (ZigBee Coordinator, ZC) อุปกรณ์จัดเส้นทาง (ZigBee Router, ZR) และ อุปกรณ์ปลายทาง (ZigBee End Device, ZED)

การศึกษาประสิทธิภาพของซิกบีเพื่อนำมาเป็นระบบสื่อสาร มิงงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพของซิกบีทั้งการทดลองและการสร้างแบบจำลอง อาทิ R.M.Pellegrini (Pellegrini R.,2010) ทำการวิจัยและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของซิกบีเพื่อประยุกต์ใช้ในสถานพยาบาล โดยไม่ได้ควบคุมตัวแปรที่อาจส่งผลต่อการรับสัญญาณ ทั้งตัวแปรภายนอก (การแพร่กระจายของคลื่น การจางหาย) และตัวแปรภายใน(อุปกรณ์รับส่ง สายอากาศ) เพื่อนำผลศึกษาที่ได้วางแผนออกแบบระบบโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับโครงการ โรงพยาบาลอัจฉริยะ (Smart Hospital) งานวิจัยด้านการศึกษาคณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของซิกบี (Suciu,2010 ; Tadeusz and Zepernick,2000) ได้ทำการทดลองวัดค่ากำลังของสัญญาณรับภายในอาคาร และภายนอกอาคาร วิเคราะห์หาระยะทางที่ดีที่สุดที่สามารถรับส่งสัญญาณได้ทั่วถึง และพื้นที่ครอบคลุมของซิกบี การกำหนดสภาพแวดล้อมในงานวิจัยต่างๆ ดังกล่าว นิยมนำซิกบีมาใช้กับอุปกรณ์ภายในอาคาร เช่น ระบบควบคุม ระบบการมอนิเตอร์ และการกำหนดสภาพแวดล้อมที่ทำการวิจัยจึงเป็นแบบภายในอาคาร ส่วนการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร หรือสภาพแวดล้อมแบบกลางแจ้ง นั้น สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ ภาคการสื่อสารวิทยุ (ITU-R, 2012) ได้สรุปข้อมูลการแพร่กระจายคลื่นและวิธีการทำนาย สำหรับใช้ในการวางแผนระบบวิทยุสื่อสารระยะสั้นและวิทยุสื่อสารในเครือข่ายท้องถิ่น ย่านความถี่ 300 MHz - 100 GHz โดยแบบจำลองที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมในการติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์ของ กฟภ.คือ การแพร่กระจายคลื่นระหว่างเทอร์มินอลที่

ติดตั้งได้หลังคา ความถี่ใช้งาน 300-3000 MHz ความสูงสายอากาศระหว่าง 1.9 - 3.0 เมตร จากระดับพื้นดิน และระยะห่างระหว่างภาคส่งกับภาครับประมาณ 3000 เมตร

สัญญาอนุญาตทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz

ย่านความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่อุตสาหกรรม หรือย่านความถี่ที่ไม่ต้องควบคุมและไม่ต้องมีใบอนุญาตใช้งาน ดังนั้นจึงมีเทคโนโลยีและอุปกรณ์หลากหลายที่มีการประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่นี้ เช่น เครื่องโทรศัพท์ไร้สาย อุปกรณ์เดือนกัยในรถยนต์ เต้าอบไมโครเวฟ อุปกรณ์บลูทูธ เครื่องถ่ายไวไฟ และซิกบี ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติและลักษณะการทำงานโดยสังเขปดังนี้

(1) อุปกรณ์บลูทูธ ใช้งานความถี่ช่วง 2.4-2.4835 GHz โดยแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 79 ช่องสัญญาณ ความกว้างช่องละ 1 MHz และเปลี่ยนช่องถึง 1600 ครั้งต่อวินาที บลูทูธเวอร์ชันใหม่ๆ จะมีคุณสมบัติการเปลี่ยนความถี่แบบกระโดด เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ความถี่ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ความถี่ย่านเดียวกัน โดยการตรวจหาสัญญาณที่กำลังใช้งานในย่านความถี่ 2.4GHz เช่นเดียวกัน เช่น สัญญาณจากเครื่องถ่ายไวไฟ เป็นต้น

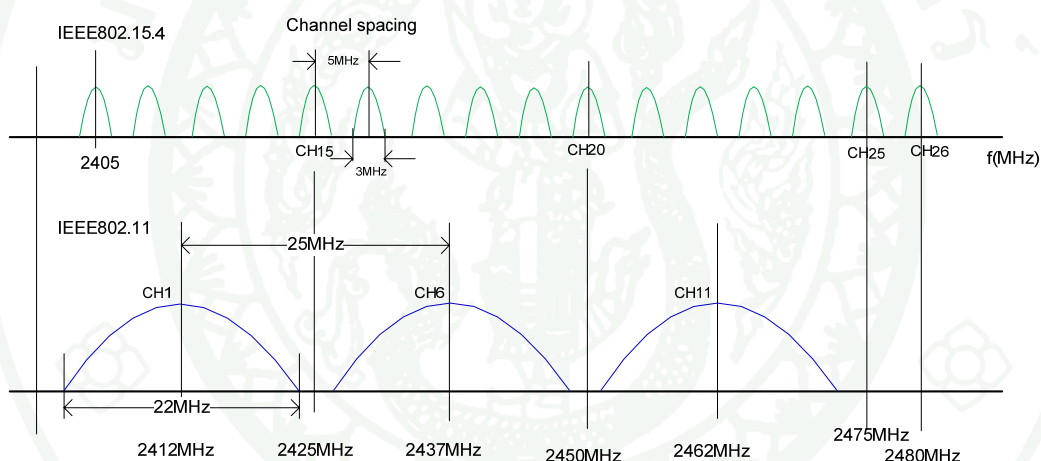
(2) อุปกรณ์เดือนกัยในรถยนต์ สำหรับสัญญาณเดือนกัยรถยนต์ใช้เซนเซอร์ตรวจการเคลื่อนไหวภายใน กำลังส่ง 500 mW ความถี่ 2.45GHz ซึ่งเป็นช่วงที่เกยกันกับช่องที่ 6-11 ของเครื่องถ่ายไวไฟ อาจเกิดการรบกวนกันได้ง่าย เนื่องจากสัญญาณมีการส่งเป็นเสี้ยวอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลานาน จึงเป็นปัญหาที่สำคัญกับเครื่องถ่ายไวไฟ และระบบอื่นๆ

(3) เต้าอบไมโครเวฟ ใช้งานด้วยสัญญาณความแรงสูงมากในย่าน 2.4GHz อุปกรณ์รุ่นเก่าๆ ที่การป้องกันยังไม่ดีพอ มักจะปล่อยสัญญาณที่มีความแรง ซึ่งทำให้เกิดการรบกวนต่อการใช้งานเครื่องถ่ายไวไฟโดยง่าย แต่กลุ่มพันธมิตรไวไฟ ได้หาทางป้องกันและแก้ปัญหานี้ โดยเต้าอบไมโครเวฟรุ่นใหม่ จะมีท่อนำคลื่นความถี่ ทำให้ไม่มีสัญญาณรบกวนหลุดรอดออกมาภายนอกเต้าอบ หรือออกมาน้อยที่สุด

(4) วัสดุไอเซนเซอร์ โดยทั่วไปในการทำงานของระบบวัสดุไอเซนเซอร์คลื่นวิทยุจะเป็นตัวกลางในการพาสัญญาณวิทยุจากห้องหนึ่งไปยังห้องอื่นๆ เช่น ทีวีดาวเทียม หรือ ทีวีวงจรปิด การใช้งานระบบเป็นแบบต่อเนื่อง มีกำลังส่งต่ำ (10mW) จึงไม่ค่อยมีปัญหาสัญญาณรบกวน แต่ก็

มีอุปกรณ์บางอย่างในระบบ เช่น กล้องไร้สาย ใช้งานที่ระดับกำลังสูงและมีอัตราขยายสายอากาศสูงด้วย อาจมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณผ่านกล้องวิดีโอมักจะกำหนดความถี่ที่แน่นอนและพบว่ากล้องหลายรุ่น ที่มีความไว สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เอง โดยการย้ายการเชื่อมต่อหรือคิวิตที่ภายในกล้อง อุปกรณ์เหล่านี้จึงมีแนวโน้มที่จะก่อสัญญาณรบกวน อุปกรณ์อื่นๆ ในย่าน 2.4GHz ยิ่งถ้าเป็นระบบอนาล็อก จะยิ่งก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนได้โดยง่าย

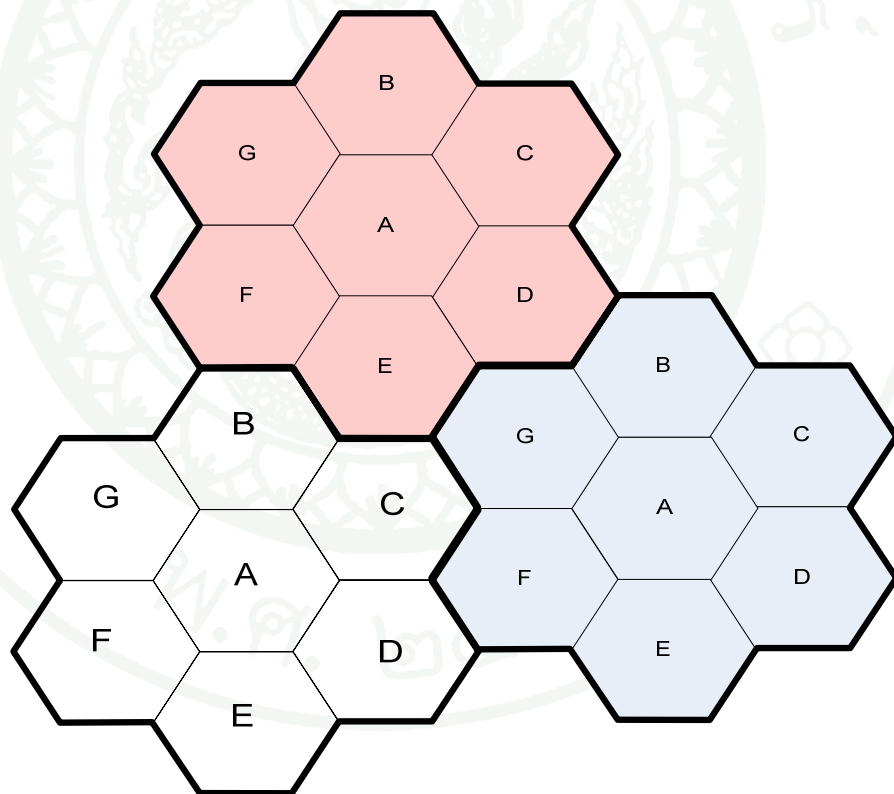
เครือข่ายซิกบีใช้งานช่วง 2.405-2.4835 GHz มีแนวโน้มที่จะถูกรบกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ ที่เริ่มใช้งานในย่านเดียวกัน โดยเฉพาะเครือข่ายไวไฟ (ตามภาพที่ 5) เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนความถี่ที่ใช้งานย่านความถี่เดียวกัน สามารถกำหนดให้ซิกบีใช้งานแชนเนล 15 20 25 และ 26 เพื่อหลีกเลี่ยงความถี่ถูกใช้งานร่วมกับ IEEE802.11 ช่อง 1 6 และ 11



ภาพที่ 5 ช่องสัญญาณความถี่ย่าน 2.4GHz ที่ซ้อนทับระหว่าง IEEE802.11 และ IEEE 802.15.4

การใช้งานความถี่เดิมซ้ำ

ข้อจำกัดที่สำคัญในระบบสื่อสารไร้สายคือความถี่ที่ใช้งานมีจำนวนจำกัด จึงประสบปัญหาความถี่ไม่เพียงพอกับจำนวนผู้ใช้งาน แนวคิดการออกแบบความถี่ หรือการนำความถี่เดิมกลับมาใช้ซ้ำใหม่ (Frequency Reuse) (Rappaport. T.S.,1996) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมเพื่อให้ใช้งานความถี่ได้ครอบคลุม นั่นคือสถานีแม่ข่ายแต่ละแห่งถูกกำหนดให้ใช้งานช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน สายอากาศของสถานีแม่ข่ายจะถูกออกแบบเพื่อให้ครอบคลุมเฉพาะภายในเซลล์ของตน โดยการระบุขอบเขตของแต่ละเซลล์ กลุ่มของช่องสัญญาณเดียวกันอาจถูกนำกลับมาใช้ในเซลล์อื่นๆ ซึ่งถูกแยกออกจากเซลล์เดิม ด้วยระยะทางที่มากพอ เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวน ภายในระยะพอประมาณ ซึ่งการออกแบบความถี่ ขั้นตอนของการเลือกและกำหนดกลุ่มของช่องสัญญาณสำหรับทุกสถานีแม่ข่ายภายในระบบเรียก การนำความถี่เดิมกลับมาใช้ หรือการออกแบบความถี่



ภาพที่ 6 การวางแผนนำความถี่เดิมกลับมาใช้ซ้ำใหม่ เซลล์ซึ่งมีตัวอักษรเดียวกัน ถูกกำหนดให้ใช้กลุ่มของช่องสัญญาณเดียวกัน เส้นทึบแสดงขอบเขตของแต่ละเซลล์

การวางแผนนำความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่นั้นเซลล์ซึ่งมีตัวอักษรเดียวกัน จะกำหนดให้ใช้กลุ่มของช่องสัญญาณเดียวกัน เส้นทึบแสดงขอบเขตของแต่ละคลัสเตอร์ แสดงตามภาพที่ 6 รูปหกเหลี่ยมที่แสดงในภาพเป็นแนวคิดและแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณวิทยุของแต่ละแม่ข่าย ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่เป็นสากล เมื่อพิจารณารูปร่างเลขาคณิตเพื่อแทนสัญลักษณ์การครอบคลุมพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ โดยไม่มีพื้นที่ซ้อนทับและแต่ละเซลล์มีพื้นที่เท่ากัน มีรูปทรงเลขาคณิต 3 ตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้แทนสัญลักษณ์คือ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยมด้านเท่า และหกเหลี่ยม ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วรูปวงกลมจะสื่อความหมายพื้นที่ครอบคลุมได้มากกว่าแต่การลากวงกลมลงบนแผนที่ ไม่สามารถลดช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือ การสร้างพื้นที่ซ้อนทับกันเมื่อวางทับบนแผนที่ได้ เซลล์ต้องถูกออกแบบเพื่อให้รองรับลูกข่ายทั้งหมดในพื้นที่พุดพรีนธ์ และมีการติดตั้งที่ขอบของเซลล์ สำหรับการกำหนดระยะทางระหว่างศูนย์กลางไปยังจุดที่ไกลที่สุด รูปหกเหลี่ยมมีพื้นที่กว้างที่สุด ดังนั้นการใช้หกเหลี่ยมจึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะครอบคลุมพื้นที่ และรูปหกเหลี่ยมใกล้เคียงกับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศแบบรอบทิศทางการแพร่กระจายในที่โล่งมากที่สุด เมื่อใช้รูปหกเหลี่ยม เป็นแบบจำลองพื้นที่ครอบคลุม จะกำหนดให้สถานีแม่ข่ายอยู่ศูนย์กลาง โดยทั่วไปสายอากาศแบบรอบทิศทางถูกใช้เป็นศูนย์กลางเซลล์ ส่วนสายอากาศทิศทางการกำหนดไว้ที่มุมของเซลล์ การออกแบบระบบส่วนใหญ่ยอมให้ตำแหน่งแม่ข่ายอยู่ห่างถึงหนึ่งในสี่ของรัศมีเซลล์จากตำแหน่งในอุดมคติ หลักการนำความถี่เดิมกลับมาใช้ให้พิจารณาระบบซึ่งมีทั้งหมด S ช่องสัญญาณและถูกแบ่งเป็นจำนวน N เซลล์ แต่ละเซลล์มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ k ช่องสัญญาณ โดยที่ $k < S$ ดังนั้น ช่องสัญญาณทั้งหมดที่มี แสดงโดย

$$S = kN \quad (1)$$

ขนาดของเซลล์จะขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของผู้ใช้บริการต่อพื้นที่ คือ ถ้าเป็นบริเวณเมืองที่มีประชากรหนาแน่น ความต้องการใช้งานสูง ก็จำเป็นต้องใช้เซลล์ที่มีขนาดเล็กหลายๆ เซลล์เพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้กับระบบ ในขณะที่บริเวณนอกเมืองหรือต่างจังหวัดอาจมีผู้ใช้บริการน้อยการกำหนดขนาดของเซลล์ให้มีขนาดใหญ่จะคุ้มในการลงทุนมากกว่า (เซลล์ขนาดเล็กนั้นมีความหนาแน่นมากกว่าเซลล์ขนาดใหญ่เมื่อพื้นที่การให้บริการเท่ากัน) ซึ่งรวบรวมใช้เขตของความถี่ที่มี ถ้าคลัสเตอร์จำลอง M ครั้งภายในระบบ จำนวนช่องสัญญาณ C สามารถนำมาหาความจุด้วยสมการ

$$C = MkN \quad (2)$$

จากสมการ (2) ความจุของระบบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนครั้งของคลัสเตอร์ที่ถูกแทนในพื้นที่บริการที่กำหนดแน่นอน ขนาดคลัสเตอร์ และมักจะมีย่านขนาด 4 7 หรือ 12 ถ้า N ถูกลดลงในขณะที่ขนาดเซลล์คงที่ คลัสเตอร์ต้องการเพิ่มขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ และดังนั้นความจุช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น คลัสเตอร์ขนาดใหญ่แทนด้วยอัตราส่วนระหว่างรัศมีของเซลล์และระยะทางระหว่างเซลล์ที่ใช้ช่องสัญญาณรวมมากขึ้น ในทางตรงข้ามคลัสเตอร์ขนาดเล็ก แสดงว่าช่องสัญญาณรวมถูกวางไว้ใกล้กัน ค่าของ N เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนลูกข่ายหรือแม่ข่ายมากเท่าไร ในขณะที่ยังคงมีคุณภาพการสื่อสารเพียงพอ

การรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม (Co channel Interference)

การรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม เกิดขึ้นเนื่องจากการนำความถี่เดิมกลับมาใช้ ซึ่งเป็นแนวคิดในการออกแบบให้ครอบคลุมพื้นที่บริการ การแบ่งพื้นที่เป็นหลายเซลล์เพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ เซลล์เหล่านี้เรียกเซลล์ช่องสัญญาณร่วม (Co Channel cell) และสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณจากเซลล์เหล่านี้เรียกสัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม ไม่เหมือนสัญญาณรบกวนเนื่องจากความร้อน ซึ่งสามารถกำจัดโดยการเพิ่มอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise ; SNR) สัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม ไม่สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มกำลังส่ง เนื่องจากการเพิ่มกำลังส่งจะยิ่งไปเพิ่มสัญญาณรบกวนให้กับเซลล์ข้างเคียง ดังนั้นเพื่อลดสัญญาณรบกวนเนื่องช่องสัญญาณร่วมนี้ เซลล์ช่องสัญญาณร่วมต้องติดตั้งที่ระยะห่างเพียงพอเพื่อแยกการแพร่กระจายสัญญาณของแต่ละแม่ข่าย เมื่อขนาดของแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน และกำลังส่งของสถานีแม่ข่ายเท่ากัน อัตราส่วนสัญญาณรบกวนช่องสัญญาณร่วมจะเป็นอิสระต่อกำลังส่งและกลายเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของเซลล์และระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของเซลล์ช่องสัญญาณร่วมที่ใกล้ที่สุด โดยการเพิ่มอัตราส่วนระยะทางต่อรัศมี (D/R) ระยะทางระหว่างเซลล์ช่องสัญญาณร่วม ต่อระยะทางครอบคลุมของเซลล์จะเพิ่มขึ้น ให้ Q แทนอัตราส่วนช่องสัญญาณร่วม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของคลัสเตอร์ ค่า Q ได้ตามสมการ

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (3)$$

ให้ I_0 เป็นจำนวนเซลล์ช่องสัญญาณร่วมดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/I หรือ SIR) สำหรับภาครับ แทนด้วย

$$SIR = \frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^L L_i} \quad (4)$$

เมื่อ S เป็นกำลังส่งของสัญญาณที่พิจารณา จากสถานีแม่ข่าย และเป็นสัญญาณรบกวนสาเหตุมาจากสัญญาณรบกวนช่องสัญญาณร่วมแม่ข่ายที่ i

การวัดการแพร่กระจายในช่องสัญญาณแสดงให้เห็นค่ากำลังรับเฉลี่ย ที่จุดใดๆ แสดงด้วยกฎของกำลังของระยะทางระหว่างภาคส่งกับภาครับ กำลังรับเฉลี่ย ที่ระยะทาง d จากภาคส่งมีค่าโดยประมาณ

$$P_r(d) = P_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-n} \quad (5)$$

หรือแปลงให้อยู่ในหน่วย dB จะได้

$$P_r(dB) = P_0(dBm) - 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (6)$$

เมื่อ P_0 เป็นกำลังสัญญาณรับที่ระยะอ้างอิงที่ระยะ d_0 จากภาคส่ง และ n เป็นค่าดัชนีการสูญเสียเส้นทาง ดังนั้นการหาค่าสัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณร่วม เมื่อกำลังส่งเท่ากัน (Rappaport. T.S.,1996) ค่า SIR ตามสมการ

$$SIR = \frac{S}{I} = \frac{PL_s^{-1}}{\sum_{i=1}^L PL_i^{-1}} \quad (7)$$

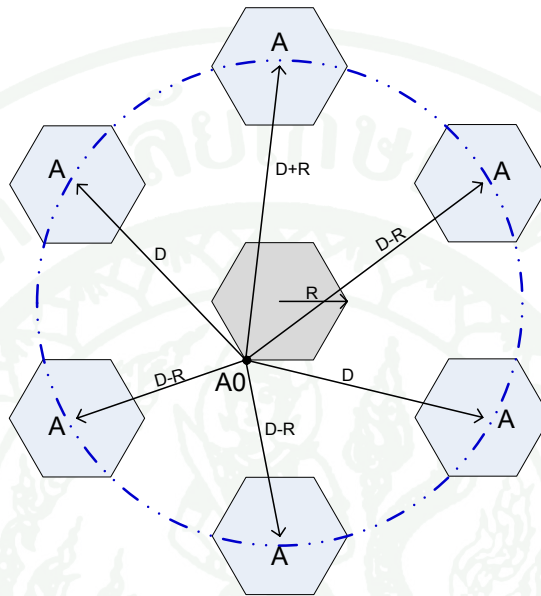
เมื่อ $PL(dB)$ คือค่าการสูญเสียเส้นทาง โดยที่

$$PL(dB) = P_t - P_r \quad (8)$$

P_t และ P_r คือกำลังส่งและกำลังสัญญาณรับ ตามลำดับ

สัญญาณรบกวนเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสารไร้สาย แหล่งสัญญาณรบกวนประกอบด้วยเครื่องลูกข่ายในเซลล์เดียวกัน ขั้นตอนการเรียกในเซลล์ข้างเคียง แม่ข่ายอื่นที่ใช้งานในย่านความถี่เดียวกัน หรือระบบอื่นๆ ซึ่ง มีกำลังงานรั่วไหลออกมา

โดยไม่ตั้งใจ สัญญาณรบกวนในช่องเสียงที่ทำให้เกิดการพูดคุยข้าม ที่ผู้ใช้ได้ยินสัญญาณรบกวนในพื้นที่หลังที่ไม่พึงประสงค์เนื่องจากการส่งผ่าน ในช่องสัญญาณควบคุม สัญญาณรบกวนเป็นผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการส่งสัญญาณ หากมีการใช้ความถี่สูง จำนวนสถานีแม่ข่ายมากจะยิ่งเพิ่มสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนจึงเป็นคอขวดสำหรับการเพิ่มสมรรถภาพในระบบ



ภาพที่ 7 ระยะทางระหว่างเซลล์เมื่อมีการนำความถี่เดิมกลับมาใช้งานในพื้นที่ใกล้เคียงกัน

ที่มา: Rappaport (1996)

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางไปด้วยความเร็วเท่ากับแสง คลื่นวิทยุที่มีความถี่ไม่เท่ากันคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นจึงแตกต่างกัน ในพื้นที่ไกลออกไป สัญญาณที่เครื่องรับจะรับได้ก็อ่อนลงเรื่อย ๆ ระยะทางที่ส่งไปได้จะถูกลดทอนด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะภูมิประเทศ สิ่งกีดขวาง ลักษณะของพื้นผิวโลก ความขรุขระ ของพื้นผิว คุณสมบัติของสายอากาศ เมื่อคำนวณหาค่าสิ่งที่สามารถรับได้ในพื้นที่โล่งไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ ในทางอุดมคติ Friis ได้ศึกษาและคำนวณหาค่าสิ่งที่สามารถรับได้ตามสมการ (Rappaport,1996)

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \tag{9}$$

$P_T(d)$ เป็นกำลังสัญญาณรับซึ่งเป็นฟังก์ชันของกำลังงานส่ง P_T เป็นกำลังส่งในหน่วยวัตต์ (watts) G_T G_R อัตราขยายของสายอากาศส่งรับ ตามลำดับ และ d เป็นระยะห่างระหว่างภาคส่งและรับ L เป็นความสูญเสียของระบบ โดย $L \geq 1$ และ λ เป็นความยาวคลื่น มีค่าเท่ากับความเร็วแสงต่อความถี่ที่ใช้งานตามสมการ

$$\lambda = \frac{c}{f} = 2\pi/\omega \quad (10)$$

โดยทั่วไป ข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มาจากผู้ผลิตจะแสดงค่าตัวความไวของสัญญาณเครื่องรับ (Pellegrini, 2010) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าการสูญเสียเส้นทางได้ตามสมการ

$$PL = P_T - RSSI \quad (11)$$

P_T เป็นค่ากำลังส่งของอุปกรณ์ เมื่อระยะทางระหว่างภาคส่งภาครับมากขึ้น สัญญาณภาครับจะถูกลดทอนตามระยะทาง และลักษณะทางกายภาพของแต่ละภูมิภาค PL เป็นค่าการสูญเสียเส้นทางของการแพร่กระจายคลื่น

แบบจำลองการสูญเสียเส้นทางสำหรับการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง

เป้าหมายของการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นส่วนใหญ่ มักจะพิจารณาความน่าจะเป็น ประสิทธิภาพที่พึงพอใจ ขึ้นอยู่กับการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการวางแผนเครือข่ายระบบสื่อสาร ถ้าแบบจำลองไม่มีประสิทธิภาพ จะมีผลต่อค่าใช้จ่ายอาจเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการปรับแบบจำลองต้องเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน สำหรับการวางแผนระบบสื่อสาร แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น เพื่อทำนายความแรงของสัญญาณภาครับที่ปลายทาง เงื่อนไขให้สัญญาณภาครับมีความแรงเพียงพอ ซึ่งหากมีความบกพร่องที่ช่องสัญญาณเกิดขึ้น อาจทำให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อลดลง ความบกพร่องนั้นรวมถึงความล่าช้าเนื่องจากหลายเส้นทาง และการจางหายของสัญญาณอย่างรวดเร็ว ผลเหล่านี้ อาจเกิดจากความผิดพลาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ แต่ในการสร้างแบบจำลองจะสมมติให้อุปกรณ์และเครื่องมือออกแบบมาอย่างความสมบูรณ์ ตัวอย่างแบบจำลองการสูญเสียเส้นทางสำหรับการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง อาทิ

1) แบบจำลองของยัง

แบบจำลองของยัง (The Model of Young) ขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ภายใต้สภาพแวดล้อมกลางแจ้ง ย่านความถี่ จาก 150MHz-3.7GHz ประโยชน์ของแบบจำลองนี้สำหรับการแพร่กระจายของเครือข่ายไร้สายที่ไม่ปกติแต่คล้ายจะสามารถประยุกต์ได้เพราะย่านความถี่รวมทั้ง 2.4GHz ด้วย (Seybold,2005) รูปแบบของแบบจำลองคือ

$$PL(d) = \frac{d^4}{G_t G_r (h_t h_r)^2 \beta} \quad (12)$$

เมื่อ G คืออัตราขยายของสายอากาศ h คือความสูงของสายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับ β คือคอสเตอร์แฟคเตอร์ ได้มาจากการทดลอง สมมติให้อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและภาครับมีค่าเป็น 1 และความสูงของสายอากาศภาคส่งและภาครับเป็น 1 เมตร เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$PL(d) = \frac{d^4}{\beta^1} \quad (13)$$

เมื่อแปลงให้อยู่ในหน่วย dB จะได้

$$PL(d)[dB] = 40 \log(d) - 10 \log(\beta^1) \quad (14)$$

2) แบบจำลองระยะทางลอการิทึม

แบบจำลองระยะทางลอการิทึม (Log-Distance Model) เป็นแบบจำลองพื้นฐานที่มีการอ้างอิงมากที่สุดในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในเครือข่ายไร้สายเป็นแบบจำลองที่สมมติแทนความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นกับระยะทางการแพร่กระจายคลื่นจากภาคส่งไปยังภาครับจะแพร่กระจายไปทุกทิศทาง ในการแพร่กระจายคลื่นกลางแจ้ง กำลังสัญญาณรับ ที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมแต่แบบที่แตกต่างกัน เช่น ที่ราบ ภูเขา ทะเล แม่น้ำ สูงต่ำ ใต้มนของพื้นโลก ในเมือง หรือนอกเมือง ซึ่งแบบจำลองในสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งภายในอาคารและกลางแจ้ง จากการทดลองพบว่าการสูญเสียเส้นทางของการแพร่กระจายคลื่นแปรตามอัตราส่วนระหว่างระยะทางอ้างอิงกับระยะทาง ณ เวลาใดๆ ยกกำลัง n เมื่อ n คือเลขชี้กำลังของการสูญเสีย

เส้นทางหรือกรณีการสูญเสียเส้นทางมีความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียเส้นทางกับระยะห่างระหว่างภาคส่งกับภาครับตามสมการ

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (15)$$

เมื่อ d เป็นระยะทางระหว่างภาคส่งกับภาครับ d_0 เป็นระยะทางอ้างอิง ปกติใช้ที่ 1 เมตร และ n เป็นค่ากรณีการสูญเสียเส้นทาง เมื่อเขียนสมการ (15) ให้อยู่ในหน่วย dB ตามสมการ

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (16)$$

$PL(dB)$ เป็นค่าเฉลี่ยของการสูญเสียเส้นทางที่ระยะทางใดๆ (d) เมื่อเขียนบนสเกลลอการิทึม d_0 เป็นระยะทางใช้สำหรับอ้างอิง กราฟการสูญเสียเส้นทางจะเป็นเส้นตรง ค่าความชันเท่ากับ $10n$ ค่า n ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ ตัวอย่างในพื้นที่โล่ง n มีค่าเท่ากับ 2 หากอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ค่า n จะเพิ่มมากขึ้น ในทางปฏิบัติที่ค่ากรณีการสูญเสียเดียวกัน ระยะทางเท่ากัน แต่ค่าการสูญเสียเส้นทางอาจจะไม่เท่ากันเนื่องจากสภาพภูมิประเทศต่างๆ มีความแตกต่างกัน ซึ่งแบบจำลองตามสมการ (16) ไม่ได้พิจารณาสภาพแวดล้อมรอบในการคำนวณ นักวิจัยจึงนิยามการสูญเสียเส้นทางโดยเพิ่มค่าลดทอนของสัญญาณตามสภาพพื้นที่ต่างๆ ตามสมการ

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (17)$$

เมื่อ X_σ เป็นค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่มกระจายแบบเกาส์ (ในหน่วย dB) พร้อมด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หน่วยเป็น dB มีการกระจายตัวแบบลอการิทึม การเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายแบบเกาส์

3) แบบจำลองแบบหลายความชัน

แบบจำลองแบบหลายความชัน (The Multi-slope Model) เป็นการสร้างกราฟบนสเกลแบบลอการิทึมแทนเส้นตรงด้วยความชันต่างๆ กัน แล้วแบ่งเส้นกราฟเป็นหลายช่วงตามค่ากรณี (n) ที่แตกต่างกัน ค่าของ n จะบอกความชันของแต่ละส่วน กรณีพิเศษสำหรับแบบจำลองหลายความชันคือจะพิจารณาเฉพาะสองส่วน คือ แบบจำลองความชันคู่ (Goldsmith, 2005) มีรูปแบบคือ

$$PL(d)[dB] = \begin{cases} PL(d_0)[dB] - 10 \log n_1 \left(\frac{d}{d_0} \right) & \text{if } d_0 < d < d_{bp} \\ PL(d_0)[dB] - 10 \log n_2 \left(\frac{d_{bp}}{d_0} \right) + 10 n_2 \log \left(\frac{d}{d_{bp}} \right) & \text{if } d > d_{bp} \end{cases} \quad (18)$$

เมื่อ n_1 และ n_2 แทนด้วยความชันของส่วนที่ 1 และ 2 d_0 แทนระยะทางอ้างอิงและ d_{bp} แทนค่าของการแพร่กระจายที่ $n_1=2$ และ $n_2=4$

4) แบบจำลองสภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ

แบบจำลองของสภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (The ITU Model) แนะนำวิธีการทำนายการแพร่กระจายคลื่นสำหรับวางแผนระบบสื่อสารวิทยุระยะสั้น ภายนอกอาคารและวิทยุสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นในย่านความถี่ 300MHz ถึง 100GHz (ITU-R, 2012) ได้นิยามระยะทางระหว่างภาคส่งกับภาครับเป็น 2 แบบคือ ระยะสายตาและไม่ใช้ระยะสายตา

จากภาพที่ 8 ITU ได้นิยามระยะสายตา และไม่ใช้ระยะสายตา โดยให้ $B1, B2$ แทนสถานีฐาน $R1 - R4$ แทนสถานีลูกข่าย การส่งข้อมูลระหว่าง $B1 - R2$ และ $B2 - R4$ เป็นระยะสายตา และการส่งข้อมูลระหว่าง $B1 - R1$ และ $B2 - R3$ เป็นไม่ใช้ระยะสายตา ในการหาการสูญเสียเส้นทางเมื่อเทอร์มินัลอยู่ในระยะสายตา ตามแบบจำลองจะแบ่งการพิจารณาความชันของเส้นกราฟเป็น 2 ช่วง และมีจุดเบรก 1 จุด ขอบเขตล่างของค่าการสูญเสียเส้นทางหาได้จากสมการ

$$PL_{LOS,lower}(d) = PL_{bp} + \begin{cases} 20 \log \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{for } d \leq d_{bp} \\ 40 \log \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{for } d \geq d_{bp} \end{cases} \quad (19)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น d_{bp} เป็นจุดเบรกพ้อยท์ หาได้จากสมการ

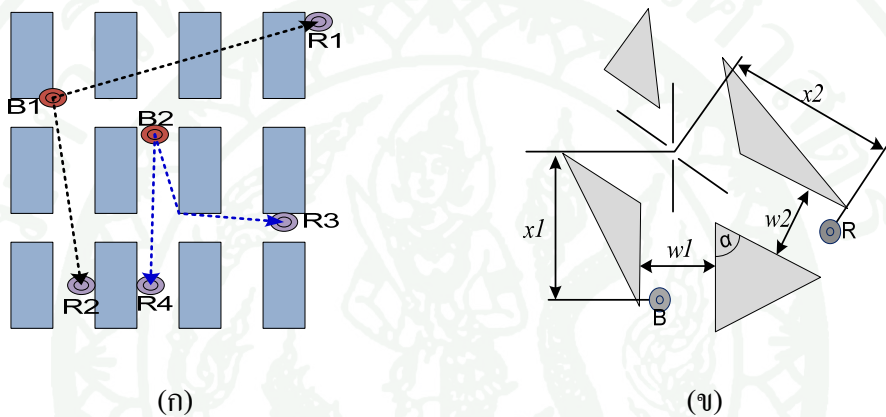
$$d_{bp} \cong \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (20)$$

และขอบเขตบนของค่าการสูญเสียเส้นทางได้จากสมการ

$$PL_{\text{Loss,upper}}(d) = PL_{\text{byp}} + 20 + \begin{cases} 20 \log\left(\frac{d}{R_{\text{byp}}}\right) & \text{for } d \leq d_{\text{byp}} \\ 40 \log\left(\frac{d}{R_{\text{byp}}}\right) & \text{for } d \geq d_{\text{byp}} \end{cases} \quad (21)$$

PL_{byp} เป็นค่าความสูญเสีย ณ จุดเบรกพ้อยท์ มีค่า

$$PL_{\text{byp}} = \left| 20 \log\left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_t h_r}\right) \right| \quad (22)$$



ภาพที่ 8 การนิยามระยะสายตา และไม่ใช่ระยะสายตา (ก) B1-R2 และ B2-R4 อยู่ในระยะสายตา B1-R1 และ B2-R3 ไม่ใช่ระยะสายตา (ข) ตัวอย่างเมื่อเทอร์มินัลระหว่างภาคส่งและภาครับ ไม่ใช่ระยะสายตาในพื้นที่ชุมชนหนาแน่น

แบบจำลองใช้ในการคำนวณค่าการสูญเสียในการส่งสัญญาณเบื้องต้นในสภาพแวดล้อมในเมือง สำหรับการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเทอร์มินัลที่ติดตั้งระดับต่ำกว่าหลังคา มีระดับความสูงของเทอร์มินัลรวมกับสายอากาศใกล้เคียงกับระดับถนน ระหว่าง 1.9 - 3.0 เมตรจากระดับพื้นที่ดินใช้งานย่านความถี่ 300-3000 MHz และระยะทางระหว่างภาครับภาคส่งได้ไกลถึง 3,000 เมตร

การติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับติดตั้งมีทั้งในระยะสายตาและไม่ใช่ระยะสายตา พร้อมทั้งได้กำหนดค่าของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการรับส่งสัญญาณในสภาพแวดล้อมที่กำหนดไว้แล้ว แบ่งวิธีการหาการสูญเสียเส้นทางเป็น 2 ขั้นตอนคือ

- (1) การหาการสูญเสียเส้นทางเมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและรับอยู่ในระยะระดับสายตา คำนวณจากสมการ

$$PL_{LoS}^{median}(d) = 32.45 + 20 \log f + 20 \log \left(\frac{d}{1000} \right) + \Delta PL \quad (23)$$

ΔPL เป็นค่าตัวแปรการแก้ไขสถานที่ (Location Variable Correction) เมื่อกำหนดความน่าจะเป็นของการครอบคลุมพื้นที่ p (%) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma = 7dB$ คำนวณได้จากสมการ

$$\Delta PL(p) = 1.56248 \left(\sqrt{-2 \ln \left(1 - \frac{p}{100} \right)} - 1.1744 \right) \quad (24)$$

(2) การหาการสูญเสียเส้นทางเมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและรับไม่อยู่ในระยะสายตา หรือ NLoS คำนวณจากสมการ

$$PL_{NLoS}^{median}(d) = 9.5 + 45 \log f + 40 \log \left(\frac{d}{1000} \right) + PL_{urban} + \Delta PL \quad (25)$$

เมื่อ PL_{urban} คือค่าการสูญเสียเส้นทางเนื่องจากสภาพพื้นที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของเมือง PL_{urban} สำหรับพื้นที่ชานเมืองมีค่าเท่ากับ $0 dB$ สำหรับพื้นที่ในเมืองมีค่าเท่ากับ $6.8 dB$ และสำหรับพื้นที่ในเมืองที่หนาแน่นเท่ากับ $3.2 dB$

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่น

ในการออกแบบติดตั้งเครือข่ายระบบสื่อสารแบบไร้สาย การศึกษาทิศทางและการแพร่กระจายคลื่นของระบบ และใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ของระบบ นับเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากทำให้ผู้ออกแบบสามารถทราบถึงประสิทธิภาพ ระยะทาง พื้นที่ให้บริการ ครอบคลุม เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ ประมาณการติดตั้ง ได้เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการเชิงตัวเลขมาใช้ในการวิเคราะห์คือวิธีการถดถอยทางตัวเลข (Linear regression) เพื่อหาค่าครรชนีการสูญเสียเส้นทางและค่าลดทอนของสภาพแวดล้อม และการทดสอบไคสแควร์ (Chi - Square Test) เพื่อทดสอบการกระจายของสัญญาณ

การถดถอยทางตัวเลข

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยตัวแปรอย่างน้อย 2 ตัว ซึ่งตัวแปรเหล่านั้นมีความสัมพันธ์กันอยู่ ความสัมพันธ์กันของตัวแปรจะมีลักษณะที่ตัวแปรหนึ่งขึ้นอยู่กับอีกตัวแปรหนึ่ง โดยมีตัวแปรตัวหนึ่งเป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวแปรตาม (Dependent variable) ความสัมพันธ์ของข้อมูล สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. ความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันแบบกราฟเส้นตรง (Linear) ซึ่งอยู่ในรูปสมการ $y = ax + b$ เมื่อ y คือตัวแปรตาม x คือตัวแปรอิสระ a คือความชันของเส้นตรง และ b คือ จุดตัดแกน y

2. ความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันแบบกราฟไม่เป็นเส้นตรง (Non linear) เส้นกราฟอาจมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลา หรือเอกซ์โพเนนเชียล หรือ ไฮเปอร์โบลา

ดังนั้นเมื่อได้ข้อมูลจากการทดลอง นำข้อมูลเหล่านั้นมาพล็อตกราฟ จะเห็นการกระจายของของข้อมูล อาจมองได้คร่าว ๆ ว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองของข้อมูลเป็นแบบใด เป็นเส้นตรง หรือพาราโบลา หรือแบบเอกซ์โพเนนเชียล หรือแบบอื่นๆ โดยจะใช้วิธีการสถิติ หาสมการที่เป็นตัวแทนของข้อมูลชุดนี้ สมการที่หามาได้นี้สามารถนำไปพยากรณ์ค่า y เมื่อ x มีค่าต่างไปจากที่วัดได้จากการทดลอง การวิเคราะห์โดยวิธีถดถอยทางตัวเลขสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นใช้ในการคำนวณหาค่าครรชนีการสูญเสียเส้นทาง (Path Loss Exponent , n) โดยการนำข้อมูลที่ี้ได้จากการทดลองมาวาดกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแบบลอการิทึม กับค่ากำลังรับของสัญญาณมีค่าเป็น dBm จากการสร้างกราฟ จะเห็นการกระจายของข้อมูล และแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกำลังรับของสัญญาณ กับ

ระยะห่างระหว่างภาคส่งกับภาครับ ว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง หรือพาราโบลา หรือแบบเอกซ์โพเนนเชียล หรือแบบอื่นๆ แล้วจึงใช้วิธีทางสถิติ หาสมการที่เป็นตัวแทนของข้อมูลชุดนี้ สมการที่หามาได้นี้ยังสามารถนำไปพยากรณ์ค่ากำลังรับ เมื่อระยะทางมีค่าต่างไปจากที่วัดได้จากการทดลองได้ด้วยจากความสัมพันธ์

$$p = ax + b \quad (26)$$

โดยที่ a เป็นความชันของกราฟ

การทดสอบไคสแควร์

การทดสอบไคสแควร์ (Chi-Square Test) เป็นวิธีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อยู่ในรูปของความถี่หรือในรูปของสัดส่วน ตัวอย่างเช่น การศึกษาเจตคติความคิดเห็น ความสนใจ หรือการยอมรับซึ่งไม่สามารถวัดค่าออกมาเป็นตัวเลขที่แน่นอนแต่สามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้ เช่น มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย น้อยที่สุด หรือ ดี ไม่ดี เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกิดจากการเก็บรวบรวมจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องแล้วจำแนกออกมาเป็นความถี่หรือสัดส่วนถ้าหากต้องการศึกษาว่าการแจกแจงความถี่ของข้อมูลที่ได้จากตัวแปรหนึ่ง เป็นไปลักษณะใด หรือถ้าหากต้องการเปรียบเทียบตัวแปร 2 กลุ่มหรือมากกว่า 2 กลุ่มว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่

การกระจายแบบไคสแควร์ เป็นวิธีการหนึ่งที่มีการใช้มากที่สุดในเชิงสถิติ และยังใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในระบบไร้สายด้วย ในระบบสื่อสาร เมื่อพารามิเตอร์ของการสูญเสียเส้นทาง (ธรรมชาติการสูญเสียเส้นทางและค่าการจางหาย) ถูกนำมาพิจารณา การทดสอบไคสแควร์ ถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบความเหมาะสมของข้อมูลและตัวแปรของแบบจำลอง วิธีการคำนวณไคสแควร์ ข้อมูลทั้งหมดถูกแบ่งเป็น k กลุ่ม จากนั้นหาค่าไคสแควร์ X^2 จากสมการ

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (27)$$

O_i เป็นความถี่สะสม ของกลุ่มที่ i และ E_i เป็นค่าคาดหวังที่คำนวณจากกลุ่มที่ i จำนวนค่าคาดหวัง E_i ตามสมการ

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \frac{1}{2 \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right]} \quad (28)$$

หรือ

$$Q(z) = 1 - Q(-z) \quad (29)$$

จากนั้นนำค่าไควสแควร์ X^2 ไปเปรียบเทียบกับในตารางค่าความน่าจะเป็นไควสแควร์ เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

- (1) โมดูลชิคปีตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ย่านความถี่ 2.4GHz รุ่น CC2431 ผลิตภัณท์ TEXAS Instrument (TI) 128 KB flash memory and 8 KB RAM
- (2) โมดูล RF Transceiver รุ่น CC2420 ผลิตภัณท์ Texas Instrument (TI)
- (3) สายอากาศรุ่น AN040 ผลิตภัณท์ Texas Instrument (TI)
- (4) โปรแกรมสำเร็จรูป SmartRF Studio 7 ผลิตภัณท์ Texas Instrument (TI)
- (5) คอมพิวเตอร์แบบพกพา ผลิตภัณท์ DELL รุ่น 32-bit window 7
- (6) ขาตั้งกล้องขนาดความสูง 1.2 เมตร และ 1.8 เมตร
- (7) เทปวัดระยะ

วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การทดสอบสมรรถนะของชิคปีในพื้นที่ กฟภ. และส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ ออกแบบ และกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลในหมู่บ้านขนาดใหญ่

ส่วนที่ 1 การทดสอบสมรรถนะของชิคปีในพื้นที่ กฟภ.

เป็นการส่งข้อมูลผ่านแผงวงจรสำเร็จรูป ผลิตภัณท์ Chipcon จาก TI สำหรับทดลองชิคปี โดยการกำหนดสภาพแวดล้อมให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่ที่ติดตั้งมิเตอร์ของ กฟภ. แล้ววัดค่ากำลังสัญญาณรับ ที่ระยะต่างๆ วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง ITU รายละเอียดการทดลองดังนี้

การกำหนดสภาพแวดล้อมในการทดลอง

ในการทดลองสมรรถนะของระบบสื่อสารชิปปี ได้เลือกสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง เป็นพื้นที่ให้บริการ ของ กฟภ. ที่มีการติดตั้งมิเตอร์ในปัจจุบันที่มีการใช้งานจริง แบ่งเป็น 3 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูงประมาณ 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน โดยสมมติว่าโมดูลของชิปปีถูกฝังอยู่ในสมาร์ทมิเตอร์ และทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับ โมดูลชิปปีตัวอื่นๆ ซึ่งติดตั้งเป็นตัวรับข้อมูล ติดตั้งอยู่ในระยะระดับสายตา โดยส่วนมากอยู่ที่มุมถนน

แบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูงประมาณ 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้ง อุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบแรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ทมิเตอร์จะ อยู่กลางแจ้ง ไม่มีอาคาร สิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรั้วส่งสัญญาณ

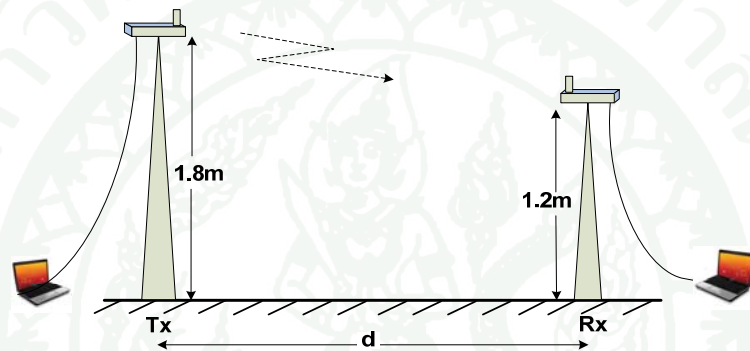
แบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูงประมาณ 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้ เป็นการจำลอง การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ ไปยังโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ.

ตารางที่ 1 คุณสมบัติหลักของอุปกรณ์ชิปปี ผลิตภัณฑ์ Chipcon รุ่น CC2431 จาก Texas Instrument (TI) 128 KB Flash Memory

Parameter	Symbol	Value
Modulation	DSSS /QPSK	2 bit/symbol
Operational Band	BW ISM	2.4GHz
Bit Rate	Rb	250 kbps
Transmitted Power	P_{TX}	-25 dBm to 0.6 dBm adjustable
Receiver Sensitivity	RSSI	-90 dBm

ขั้นตอนการทดลอง

(1) ติดตั้งบอร์ดทดลองผลิตภัณฑ์ Chipcon รุ่น CC2431 จาก Texas Instrument (TI) 128 KB Flash Memory คุณสมบัติตาม ตารางที่ 1 และภาพที่ 10 สำหรับภาคส่งและภาครับ ติดตั้งที่ขนาดความสูง 1.8 เมตร และ 1.2 เมตร ตามลำดับ ต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์ 2 ชุดผ่าน USB พอร์ต สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้บอร์ดทดลอง แสดงตามภาพที่ 9 ใช้โปรแกรม Smart RF Studio7 เพื่อกำเนิดสัญญาณ และแสดงค่าสัญญาณที่รับได้ เมื่อต่อสาย USB Port เชื่อมระหว่างบอร์ดชิคบีและคอมพิวเตอร์ โปรแกรมจะตรวจจับสัญญาณจากบอร์ดทดลองได้อัตโนมัติ ตามภาพที่ 11

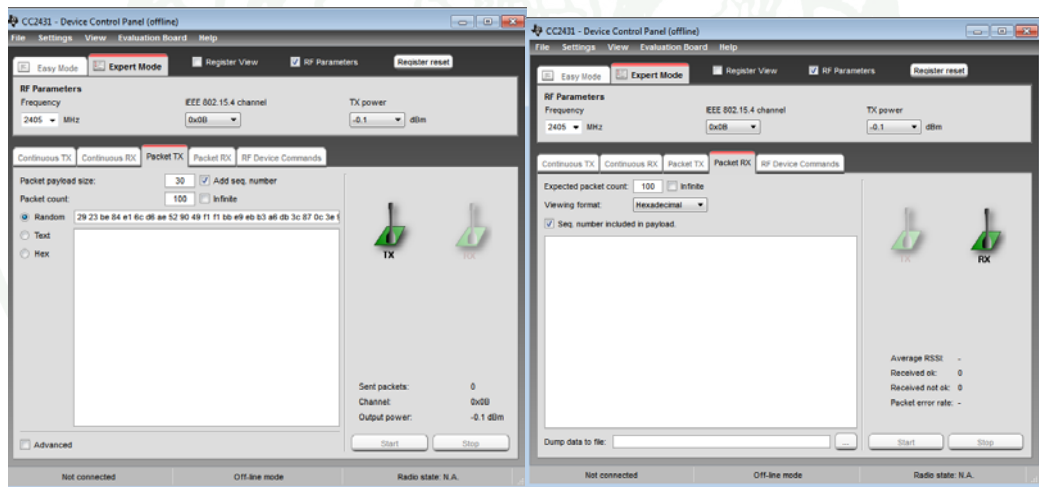


ภาพที่ 9 การกำหนดการทดลอง โดยให้ความสูงของภาคส่ง (h_t) = 1.8 เมตร และความสูงของภาครับ (h_r) = 1.2 เมตร ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ (d) ตามที่กำหนด

ภาพที่ 10 บอร์ดทดลอง Smart **RF04EB** development kit ผลิตภัณฑ์ Chipcon ประกอบด้วย CC2431DK (SOC) ZigBee®/IEEE 802.15.4 , CC2420 RF transceiver และ AN040 whip antenna



ภาพที่ 11 การเริ่มใช้งานโปรแกรม SmartRF Studio7 เมื่อต่อสาย USB Port เชื่อมระหว่างบอร์ดชิกปีและคอมพิวเตอร์ โปรแกรมจะตรวจจับสัญญาณจากบอร์ดทดลองได้อัตโนมัติ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 12 การกำหนดค่าในโปรแกรม SmartRF Studio7 (ก) ภาคลส่ง (Tx) กำหนดให้ส่ง 100 แพ็คเกต ช่องสัญญาณ 0B ความถี่ 2405MHz กำลังส่ง -0.1dBm (ข) ภาครับ (Rx) แสดงกำลังสัญญาณรับ RSSI ที่รับได้ และค่าแพคเกตที่สูญเสีย

(2) กำหนดค่าบอร์คซิกบี ในโปรแกรม SmartRFStudio 7 ภาคส่งและภาครับใช้ ช่องสัญญาณ OB ความถี่ส่ง 2405 MHz กำลังส่ง (P_t) เท่ากับ $-0.1dBm$ ตามภาพที่ 11-12

(3) กำหนดระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ 1 เมตร ส่งคาด้าแพคเกจ จำนวน 100 แพคเกจ วัดสัญญาณ RSSI ทำการส่งข้อมูล 20 ครั้ง บันทึกค่า RSSI ที่ได้

(4) เลื่อนอุปกรณ์ภาครับตามระยะทางที่กำหนดวัดสัญญาณ RSSI และบันทึกค่าที่ได้ ที่ระยะต่างๆ

(5) เปลี่ยนสถานที่ทดลองเป็นสภาพแวดล้อม แบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวนอนขนาด 4 ช่องจราจร ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1-4

(6) เปลี่ยนสถานที่ทดลองเป็นสภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวนอนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1-4

(7) คำนวณหาค่าการสูญเสียเส้นทางจากค่า RSSI ที่เก็บรวบรวมได้ จากสมการ (11) วาดกราฟการสูญเสียเส้นทางกับระยะทาง โดยกำหนดให้แกน X แทนระยะห่างระหว่างภาคส่งกับภาครับ บนสเกลลอการิทึม แกน Y แทนค่าการสูญเสียเส้นทาง

(8) ปรับกราฟให้เหมาะสมโดยวิธีดลยเชิงเส้น เพื่อวิเคราะห์หาค่าดัชนีการสูญเสียของสภาพแวดล้อมทั้ง 3 แบบ

(9) ใช้วิธีการไคสแคว์วิเคราะห์การกระจายของข้อมูล RSSI ที่ได้ว่ามีกระจายแบบปกติหรือไม่

(10) หาค่าลดทอนของแต่ละสภาพแวดล้อม โดยใช้ค่าดัชนีหักเหที่คำนวณได้จาก (8) หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละสภาพแวดล้อม

ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ ออกแบบ และกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ในหมู่บ้านขนาดใหญ่

การวิเคราะห์ ออกแบบ และกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลในหมู่บ้านขนาดใหญ่ ใช้แบบจำลองของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union; ITU) เรื่องวิธีการทำนายการแพร่กระจายคลื่นสำหรับวางแผนระบบสื่อสารวิทยุระยะสั้น ภายนอกอาคารและวิทยุสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นในย่านความถี่ 300MHz ถึง 100GHz ใช้ในการหา ระยะทางและพื้นที่ครอบคลุม หากการสูญเสียเส้นทาง ขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

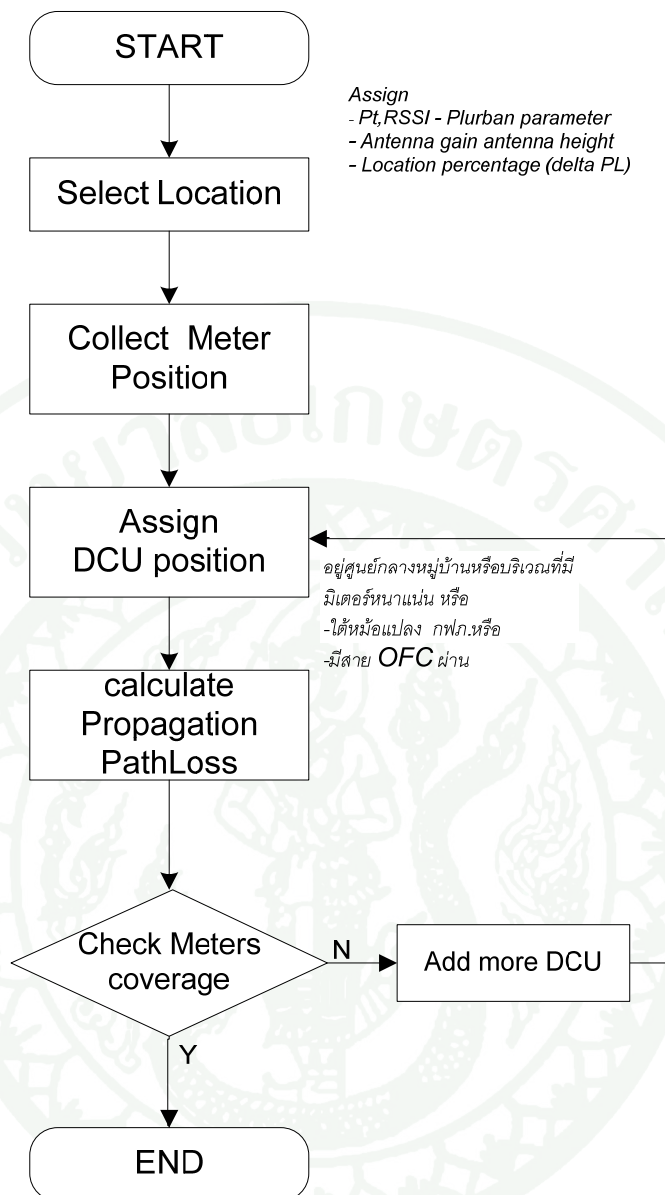
1) วิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลองส่วนที่ 1 การทดสอบสมรรถนะซิกบี นำผล *RSSI* ที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ITU โดยใช้สมการระยะสายตา สมการ (23) และ (24)

2) เลือกพื้นที่ทดลองเป็นหมู่บ้านขนาดใหญ่ ประมาณ 500-1500 หลังคาเรือน และแสดง ตำแหน่งมิเตอร์จากข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ของ กฟภ. ลงในผังหมู่บ้าน

3) กำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ตามลักษณะการใช้งานจริงของ กฟภ. อย่างน้อยต้องมีคุณสมบัติ ต่อไปนี้

- อยู่ได้ห้ม้อแปลงของ กฟภ. เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สามารถเชื่อมต่อกับมิเตอร์ได้มากที่สุด
- อยู่กึ่งกลางบริเวณที่มีการติดตั้งมิเตอร์หนาแน่นในรัศมีไม่เกิน 3000 เมตร
- อยู่มุมถนน ที่สามารถมองเห็นมิเตอร์ในระยะระดับสายตาได้ไกลที่สุด
- มีสายใยแก้วนำแสงของ กฟภ. พาดผ่าน เพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่ออุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังศูนย์ประมวลผลโดยผ่านสายใยแก้วนำแสงของ กฟภ.เอง

(4) กำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ลงในหมู่บ้าน และหาระยะทางสูงสุด (Max.Range) ของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ตัวที่หนึ่ง (DCU1) จำนวนการสูญเสียเส้นทางระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ไปยังสมาร์ทมิเตอร์แต่ละตัว โดยใช้แบบจำลอง ITU สำหรับการแพร่กระจายคลื่นระหว่างภาครับภาคส่งรวมความสูงสายอากาศติดตั้งระดับต่ำกว่าหลังคามีระดับความสูงใกล้เคียงกับระดับถนน ระหว่าง 1.9 - 3.0 เมตร จากระดับพื้นที่ดินใช้งานย่านความถี่ 300-3000MHz และระยะทางระหว่างภาครับภาคส่งได้ไกลถึง 3,000 เมตร ความถี่ที่ใช้ส่งขนาด 2400MHz กำลังส่งของสัญญาณ 20dBm ค่า *RSSI* เป็น -90dBm , ความน่าจะเป็นที่สามารถรับสัญญาณ ได้ $p = 99\%$ สภาพพื้นที่เป็นแบบในเมือง



ภาพที่ 13 แผนภูมิการไหลของขั้นตอนการกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวมข้อมูลในหมู่บ้านขนาดใหญ่

การหาการสูญเสียเส้นทางเมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและรับอยู่ในระยะระดับสายตา หรือ LoS

หาค่าการสูญเสียเส้นทางเมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ อยู่ในระยะสายตา โดยสมมติว่าอุปกรณ์สมาร์ทมิเตอร์ ติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูงไม่เกิน 3 เมตร ตามแนวนอนไม่มีสิ่งกีดขวางการแพร่กระจายคลื่นของเครื่องส่ง ตามสมการ

$$PL_{Los}^{median}(d) = 32.45 + 20 \log f + 20 \log \left(\frac{d}{1000} \right) + \Delta PL \quad (30)$$

เมื่อ $PL_{Los}^{median}(d)$ เป็นค่ากลางการสูญเสียเส้นทางในระยะสายตา ที่ระยะทางต่างๆ
 f คือความถี่ที่ใช้ในการทดลอง กำหนดเป็น 2400MHz

ΔPL เป็นค่าการแก้ไขสถานที่ (Location Variable Correction) เมื่อกำหนดความน่าจะเป็นของการครอบคลุมพื้นที่ p (%) กำหนดค่า $p = 1\%$, 10% , 50% , 90% และ 99% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma = 7dB$ จากสมการ

$$\Delta PL(p) = 1.56248 \left(\sqrt{-2 \ln \left(1 - \frac{p}{100} \right)} - 1.1744 \right) \quad (31)$$

การหาการสูญเสียเส้นทางเมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและรับไม่อยู่ในระยะสายตา หรือ $NLoS$

หาค่าการสูญเสียเส้นทางเมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ ไม่อยู่ในระยะสายตา โดยสมมติว่าอุปกรณ์สมาร์ตมิเตอร์ ติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูงไม่เกิน 3 เมตร ในทิศทางที่ไม่ใช่แนวถนน มีบ้านพักอาศัยกีดขวางการแพร่กระจายคลื่นของเครื่องส่ง ตามสมการ

$$PL_{NLoS}^{median}(d) = 9.5 + 45 \log f + 40 \log \left(\frac{d}{1000} \right) + PL_{urban} + \Delta PL \quad (32)$$

เมื่อ $PL_{NLoS}^{median}(d)$ เป็นค่ากลางการสูญเสียเส้นทางที่ไม่อยู่ในระยะสายตา ที่ระยะทางต่างๆ

PL_{urban} เป็นค่าการสูญเสียเส้นทางเนื่องจากสภาพพื้นที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของเมือง มีค่า $0dB$ สำหรับพื้นที่ชานเมือง $6.8dB$ สำหรับพื้นที่ในเมือง และ $3.2dB$ สำหรับพื้นที่ในเมืองที่หนาแน่น

(5) วิเคราะห์อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องความถี่เดิมร่วม ของมิเตอร์ลูกข่ายอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลตัวที่ 1

(6) กำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลทั้งหมดลงในผังหมู่บ้าน

(7) ตรวจสอบพื้นที่ที่ครอบคลุมมิเตอร์ โดยการวาดระยะทางที่คำนวณได้ โดยสมมุติว่า ระยะสายตา คือระยะตามแนวนอนที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ส่วนระยะไม่ใช่ระยะสายตาคือมิเตอร์ที่ไม่อยู่ในแนวเดียวกับจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

(8) วิเคราะห์สัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (Co Channel Interference)
ตามสมการ

$$\frac{S}{I} = \frac{PL_s^{-1}}{\sum_{i=1}^L PL_i^{-1}} \quad (33)$$

(9) ตรวจสอบจำนวนมิเตอร์ที่อยู่นอกเหนือจากพื้นที่ครอบคลุมที่ส่งข้อมูลได้ นับจำนวน และกำหนดจุดสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการทดลอง แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ผลการทดสอบสมรรถนะของซิกบีในพื้นที่ กฟภ. และ ส่วนที่ 2 ผลการวิเคราะห์ ออกแบบ และกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ใน หมู่บ้านขนาดใหญ่ มีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 ผลการทดสอบสมรรถนะของซิกบีในพื้นที่ กฟภ.

การกำหนดสภาพแวดล้อมต่างๆ ในการทดลอง และทำการวัดค่า RSSI ที่ระยะใดๆ กำหนดสภาพแวดล้อม เป็น 3 แบบ ดังนี้

สภาพแวดล้อมแบบที่ 1

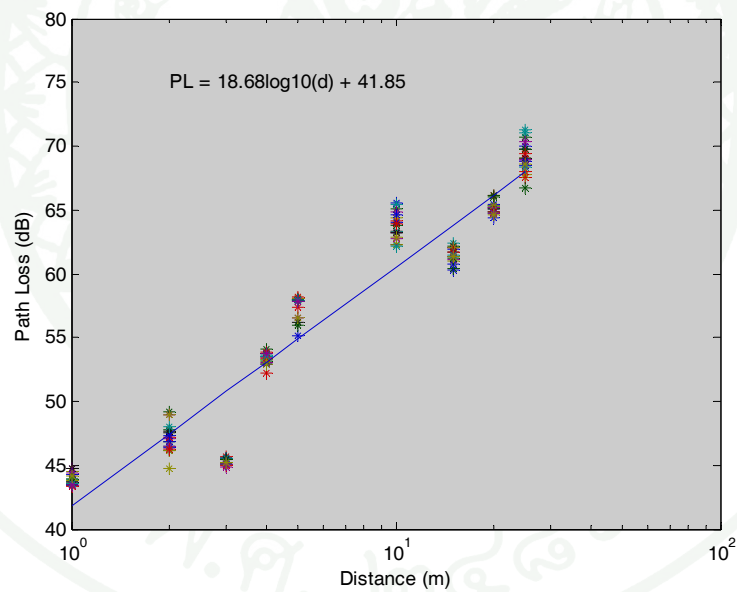
สมาร์ทมิเตอร์ ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนน ขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน ตามภาพที่ 14 ค่า RSSI ที่ วัดได้ ตามตารางผนวกที่ 1 (ภาคผนวก ก) และค่าการสูญเสียเส้นทางตามตารางผนวกที่ 2 (ภาคผนวก ก) นำค่าการสูญเสียเส้นทางมาวาดกราฟบนสเกลลอการิทึม และทำการปรับกราฟให้ เหมาะสม แสดงตามภาพที่ 15

สภาพแวดล้อมแบบที่ 2

สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนน ขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ตามภาพที่ 16 ค่า RSSI ที่วัดได้แสดงใน ตารางผนวกที่ 3 (ภาคผนวก ก) ค่าการสูญเสียเส้นทาง แสดงในตารางผนวกที่ 4 (ภาคผนวก ก) เมื่อนำค่าการสูญเสียเส้นทางมาวาดกราฟบนสเกลลอการิทึม และทำการปรับกราฟ แสดงตามภาพที่ 17



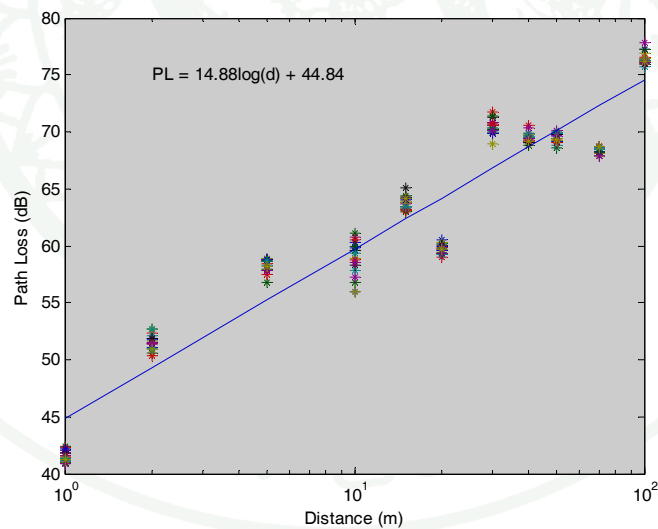
ภาพที่ 14 สภาพแวดล้อมแบบที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน



ภาพที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเส้นทางและระยะทาง เมื่อทดลองใน สภาพแวดล้อมแบบ ที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน



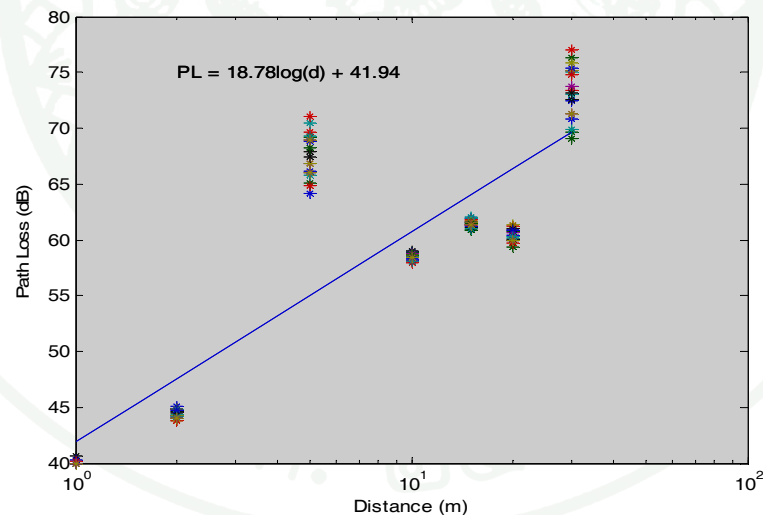
ภาพที่ 16 สภาพแวดล้อมแบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบแรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ตมิเตอร์จะอยู่กลางแจ้ง ไม่มีอาคาร สิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรับส่งสัญญาณ



ภาพที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเส้นทางและระยะทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน



ภาพที่ 18 สภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้เป็นการจำลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ ไปยัง โครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ.



ภาพที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเส้นทางและระยะทาง เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกเขตชุมชน

สภาพแวดล้อมแบบที่ 3

สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวนอนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจรรยาจรนอกชุมชน ตามภาพที่ 18 ค่า *RSSI* ที่วัดได้แสดงในตารางผนวกที่ 5 (ภาคผนวก ก) และการสูญเสียเส้นทาง ตามตารางผนวกที่ 6 (ภาคผนวก ก) เมื่อนำค่าการสูญเสียเส้นทางมาวาดกราฟบนสเกลลอการิทึม และปรับกราฟให้เหมาะสม แสดงตามภาพที่ 19

การหาค่าครรชนิการสูญเสีย

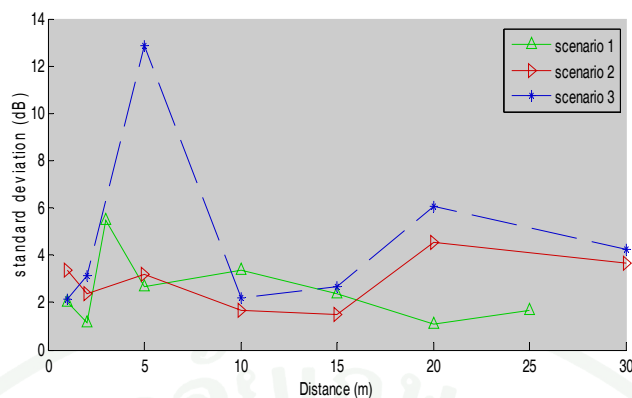
ในการวิเคราะห์ผลแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การหาค่าครรชนิการสูญเสีย (n) และค่าการลดทอน (X) ในแต่ละสภาพแวดล้อม และการวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลโดยใช้ไควสแควร์ ได้ผลดังนี้

ค่าครรชนิการสูญเสีย; n

ค่าครรชนิการสูญเสียในแต่ละสภาพแวดล้อม ได้จากการนำค่า *RSSI* ที่เก็บรวบรวมจากการทดลองจากสภาพแวดล้อม 3 แบบมาวาดกราฟ แล้วทำการปรับกราฟให้เหมาะสม โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ค่าครรชนิการสูญเสียที่ได้ในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1-3 คือ $n = 1.87, 1.49$ และ 1.88 ตามลำดับ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน; σ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในหน่วย *dB* ต่อระยะทาง สำหรับทั้ง 3 สภาพแวดล้อม แสดงตามภาพที่ 20 เป็นที่สังเกตว่าในสภาพแวดล้อมแบบที่ 3 เป็นสภาพแวดล้อมที่มีการเคลื่อนไหวของรถยนต์เป็นจำนวนมากข้อมูลที่เก็บรวบรวมมีการเปลี่ยนแปลงมากทำให้ผลที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง



ภาพที่ 20 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ในหน่วย dB กับค่าระยะทางในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1-3

ตารางที่ 2 การหาค่าไควสแควร์จากสภาพแวดล้อมแบบที่ 1 (ระยะทาง 1 เมตร)

BIN	Number of Observed Samples	Expected Probability	Chi-square value
-45.19 to -45.00	0	0.0178	0.00032
-44.99 to -44.80	2	0.0521	3.79431
-44.79 to -44.60	1	0.1237	0.76790
-44.59 to -44.40	2	0.2389	3.10147
-44.39 to -44.20	1	0.3749	0.39075
-44.19 to -44.00	2	0.4783	2.31557
-43.99 to -43.80	4	0.0521	15.58591
-43.79 to -43.60	4	0.4180	12.83072
-43.59 to -43.40	4	0.2864	13.79082
-43.39 to -43.20	0	0.1594	0.02541

การทดสอบไควสแควร์

ในระยะทางแต่ละระยะ การทดสอบไควสแควร์ เพื่อวิเคราะห์ว่ามีการกระจายแบบปกติหรือไม่ ตัวอย่างเช่นในตารางที่ 2 ค่าการทดสอบไควสแควร์ที่ระยะทาง 1 เมตร ในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1 แทนด้วย X^2 เป็น 52.603 ซึ่งมีค่า *degree of freedom; df* เป็น 19 เมื่อตรวจสอบในตารางที่ 3 ค่าความน่าจะเป็นไควสแควร์ X^2 ที่ 0.005 มีค่ามากกว่า 38.582 ซึ่งสอดคล้องกับความ

น่าจะเป็นที่ 0.005 นั่นคือกำลังสัญญาณที่รับได้ มีการกระจายแบบปกติ สำหรับระยะทางอื่นๆ ค่าการทดสอบไควสแคว์ก็มีการกระจายแบบลอการิทึมปกติเช่นกัน

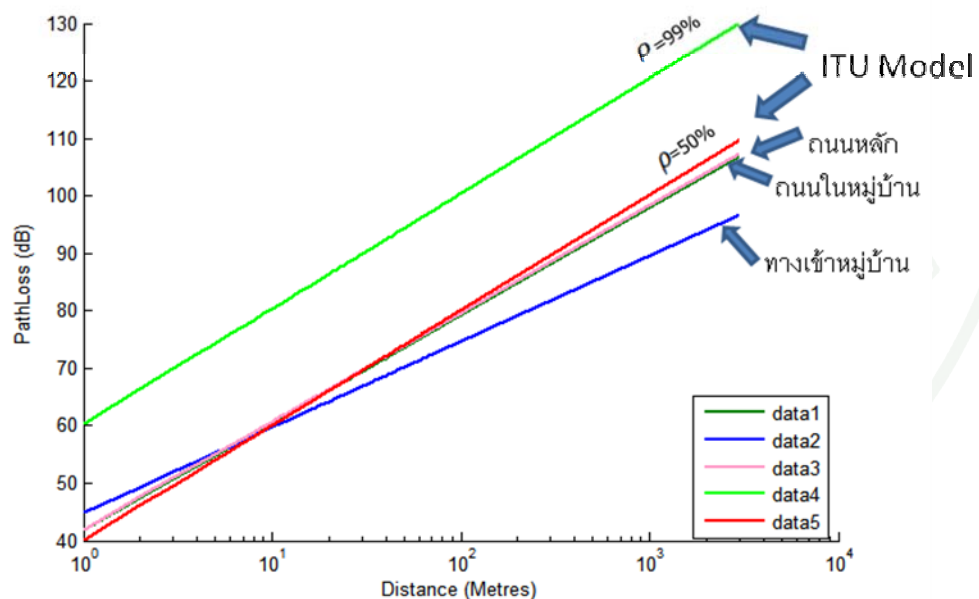
ตารางที่ 3 ค่าความน่าจะเป็นไควสแคว์

Df	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
1	---	---	0.001	0.004	0.016	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	4.605	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	6.251	7.815	9.348	11.345	12.838
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.779	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	9.236	11.070	12.833	15.086	16.750
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.204	10.645	12.592	14.449	16.812	18.548
7	0.989	1.239	1.690	2.167	2.833	12.017	14.067	16.013	18.475	20.278
8	1.344	1.646	2.180	2.733	3.490	13.362	15.507	17.535	20.090	21.955
9	1.735	2.088	2.700	3.325	4.168	14.684	16.919	19.023	21.666	23.589
10	2.156	2.558	3.247	3.940	4.865	15.987	18.307	20.483	23.209	25.188
11	2.603	3.053	3.816	4.575	5.578	17.275	19.675	21.920	24.725	26.757
12	3.074	3.571	4.404	5.226	6.304	18.549	21.026	23.337	26.217	28.300
13	3.565	4.107	5.009	5.892	7.042	19.812	22.362	24.736	27.688	29.819
14	4.075	4.660	5.629	6.571	7.790	21.064	23.685	26.119	29.141	31.319
15	4.601	5.229	6.262	7.261	8.547	22.307	24.996	27.488	30.578	32.801
16	5.142	5.812	6.908	7.962	9.312	23.542	26.296	28.845	32.000	34.267
17	5.697	6.408	7.564	8.672	10.085	24.769	27.587	30.191	33.409	35.718
18	6.265	7.015	8.231	9.390	10.865	25.989	28.869	31.526	34.805	37.156
19	6.844	7.633	8.907	10.117	11.651	27.204	30.144	32.852	36.191	38.582
20	7.434	8.260	9.591	10.851	12.443	28.412	31.410	34.170	37.566	39.997

ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ ออกแบบ และกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ในหมู่บ้านขนาดใหญ่

ผลการวิเคราะห์ ออกแบบ และกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ในหมู่บ้านขนาดใหญ่ แบ่งออกเป็น ผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะระบบสื่อสารซิกบีในพื้นที่ กฟภ. เปรียบเทียบกับแบบจำลอง ITU การเลือกพื้นที่หมู่บ้านจัดสรรและตำแหน่งมิเตอร์จากข้อมูลทางภูมิศาสตร์ การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและหาระยะทางสูงสุดที่สามารถรับส่งข้อมูลได้ การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากใช้ช่องความถี่เดิมร่วม (SIR) การกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลเพิ่มให้ครอบคลุมจำนวนมิเตอร์ทั้งหมด มีรายละเอียดดังนี้

(1) การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของซิกบีในพื้นที่ กฟภ. เปรียบเทียบกับแบบจำลอง ITU



ภาพที่ 21 กราฟเปรียบเทียบการสูญเสียเส้นทาง ระหว่างการทดสอบสมรรถนะของซิกบีในพื้นที่ กฟภ. กับแบบจำลอง ITU

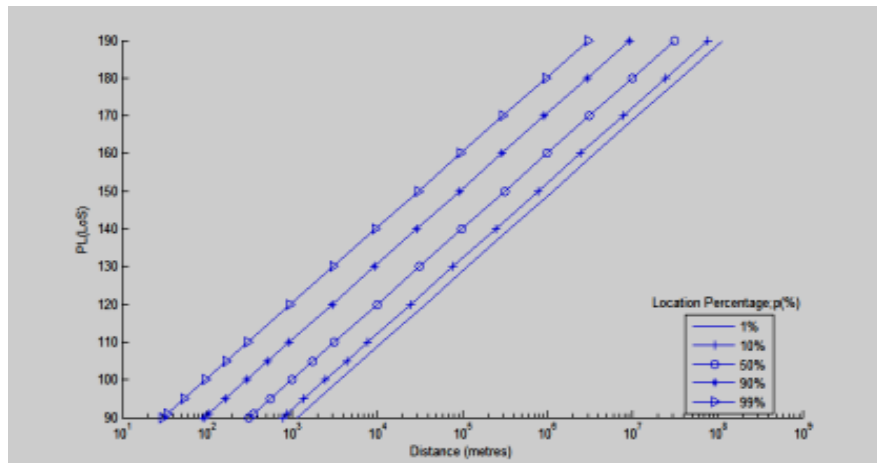
(2) การเลือกพื้นที่หมู่บ้านจัดสรร และตำแหน่งมิเตอร์จากข้อมูลทางภูมิศาสตร์

ผู้วิจัยได้เลือกหมู่บ้านกฤษดานนคร อำเภอคลองหลวง จ.ปทุมธานี ขนาดพื้นที่ประมาณ 500,000 ตารางเมตร (500เมตร x 1000 เมตร) ซึ่งมีการจัดวางผังบ้านพักอย่างเป็นระเบียบ มิเตอร์ไฟฟ้าติดตั้งในแนวเดียวกัน จำนวนสมาร์ตมิเตอร์ 800 ชุด ถนนกว้าง 8 เมตร เป็นพื้นที่จำลองในการออกแบบการจุดติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลในเครือข่ายซิกบีสร้างแบบจำลองพื้นที่หมู่บ้านดังกล่าวและกำหนดตำแหน่งมิเตอร์ทั้งหมดลงในพื้นที่จำลอง ตามภาพที่ 21

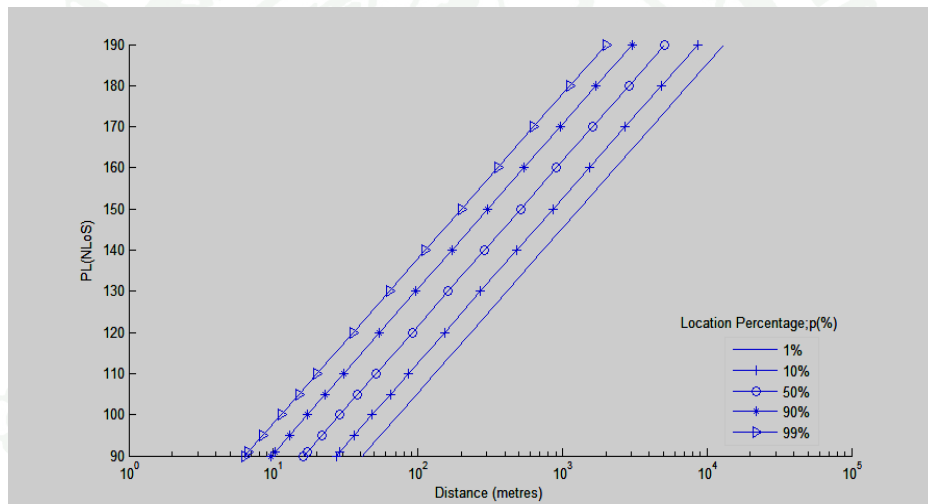


ภาพที่ 22 แบบจำลองพื้นที่หมู่บ้านและตำแหน่งมิเตอร์ทั้งหมด โดยสมมติให้สมาร์ตมิเตอร์ติดตั้งในแนวถนนเดียวกัน หมู่บ้านกฤษดานนคร อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ขนาดพื้นที่โดยประมาณ 500 เมตร) \times 1000 เมตร มิเตอร์จำนวน 800 ชุด

(3) การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลตัวที่ 1 (DCU1) และหาระยะทางสูงสุด (Max.Range) เมื่อกำหนดความถี่ $f = 2400\text{MHz}$ กำลังส่ง $P_t = 100\text{mW}$ กำลังสัญญาณรับ $RSSI = -90\text{dBm}$ ตัวแปรการแก้ไขสถานที่ $\Delta PL = 6.8$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 กราฟการสูญเสียเส้นทางต่อระยะทาง เมื่อกำหนดสภาพแวดล้อมระหว่างเทอร์มินัลภาคส่งและภาครับเป็น 2 กรณี (ก) ภาคส่งและภาครับอยู่ในระยะสายตา (LoS) (ข) ภาคส่งและภาครับไม่อยู่ในระยะสายตา ($NLoS$)

การคำนวณหาค่าการสูญเสียเส้นทางเพื่อหาระยะทาง และพื้นที่ครอบคลุม

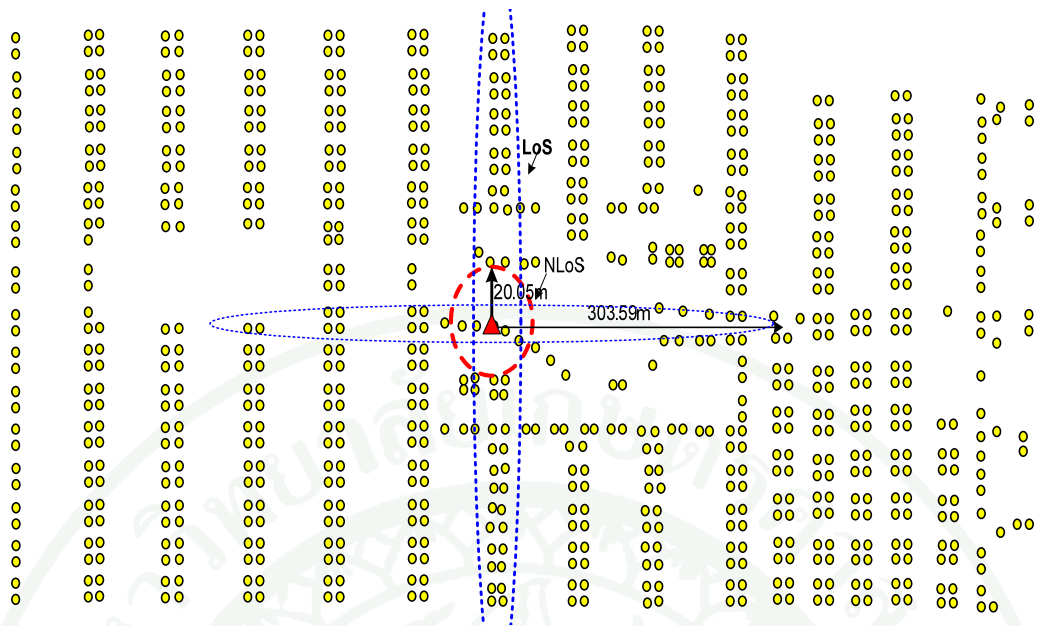
การหาระยะทางระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและมิเตอร์ เมื่อติดตั้งทั้งในระยะสายตา (LoS) และไม่ใช่ระยะสายตา (NLoS) กำหนดความน่าจะเป็นการครอบคลุมพื้นที่ระหว่างร้อยละ 1, 10, 50, 90 และ 99 กำลังส่งมีค่า 20dBm ความไวของเครื่องรับมีค่า -90dBm สภาพพื้นที่ในเมือง ค่าการสูญเสียของพื้นที่ในเมือง (PL_{urban}) = 6.8 dB เมื่อกำหนดความน่าจะเป็นของการรับสัญญาณได้ 99% ถ้าการส่งอยู่ในระยะสายตา ระยะทางสูงสุดที่ได้คือ 303.59 เมตร และถ้าไม่อยู่ในระยะสายตา ระยะทางสูงสุดที่วัดได้ 20.05 เมตร รายละเอียดระยะทางที่วัดได้ ได้เมื่อกำหนดความน่าจะเป็นค่าต่างๆ ตามตารางที่ 3 และเมื่อนำการสูญเสียเส้นทางต่อระยะทาง ที่ระยะต่างๆ มาวาดกราฟบนสเกลลอการิทึม ผลที่ได้แสดงตามภาพที่ 22 และตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระยะทางระหว่างอุปกรณ์รวมข้อมูลและสมาร์ตมิเตอร์ เมื่อติดตั้งในแนวนอนไม่มีสิ่งกีดขวาง และไม่ใช่แนวนอนที่ความน่าจะเป็นพื้นที่ครอบคลุมต่างๆ

ความน่าจะเป็นพื้นที่ครอบคลุม	ระยะทางในระยะสายตา (เมตร) d_{LoS}	ระยะทางไม่ใช่ระยะสายตา (เมตร)
1	11,542.24	88.57
10	7,8035.1	59.19
50	3,142.61	34.65
90	927.45	20.64
99	303.59	20.05

กำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลตัวที่ 1

จากภาพที่ 24 กำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลตัวที่ 1 ให้อยู่ตรงศูนย์กลางของหมู่บ้าน และเมื่อนำระยะสูงสุดทั้งในระยะสายตา และไม่ใช่ระยะสายตา ที่ความน่าจะเป็นการครอบคลุมพื้นที่ 99% จากตารางที่ 4 มาวาดลงในแบบจำลองจำนวนมิเตอร์ในหมู่บ้าน พบว่า ระยะทางในระยะสายตา ครอบคลุมจำนวนมิเตอร์ในแนวนอนได้ครอบคลุมเกือบตลอดแนวนอน ได้ระยะทาง 606 เมตร แต่ระยะทางไม่ใช่ระยะสายตา 40 เมตร ไม่สามารถครอบคลุมมิเตอร์ ที่อยู่ นอกเหนือจากแนวนอนเดียวกันได้ ตามภาพที่ 24



ภาพที่ 24 พื้นที่ครอบคลุมสมาร์ทมิเตอร์ เมื่ออุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและสมาร์ทมิเตอร์อยู่ในระยะสายตาระยะทางสูงสุด 303.59 เมตร (วงรี 2 แนวตั้งและแนวนอน) และเมื่ออุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและสมาร์ทมิเตอร์ไม่ใช่ระยะสายตาระยะทาง 20.05 เมตร (วงกลมเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.05 เมตร)

การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลให้ครอบคลุมมิเตอร์ทั้งหมด

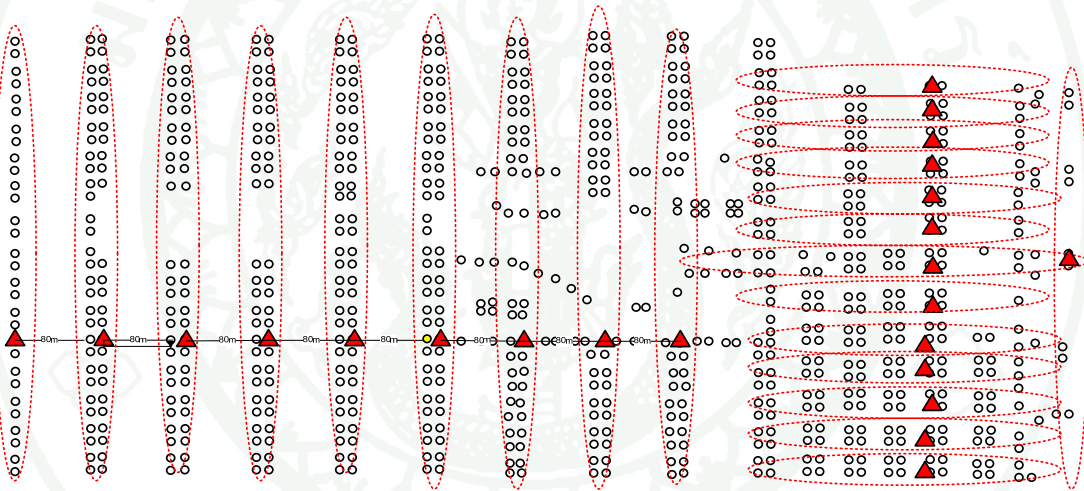
เมื่อได้ระยะทางสูงสุดที่อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลสามารถรับส่งได้แล้ว กำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลเพื่อให้ครอบคลุมมิเตอร์ที่เหลือ แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

แบบที่ 1 กำหนดให้อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ติดตั้งในแนวถนนเดียวกัน ตามภาพที่ 25

แบบที่ 2 กำหนดให้อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลติดตั้งแบบสลับฟันปลา (ZigZag) ตามภาพที่ 26

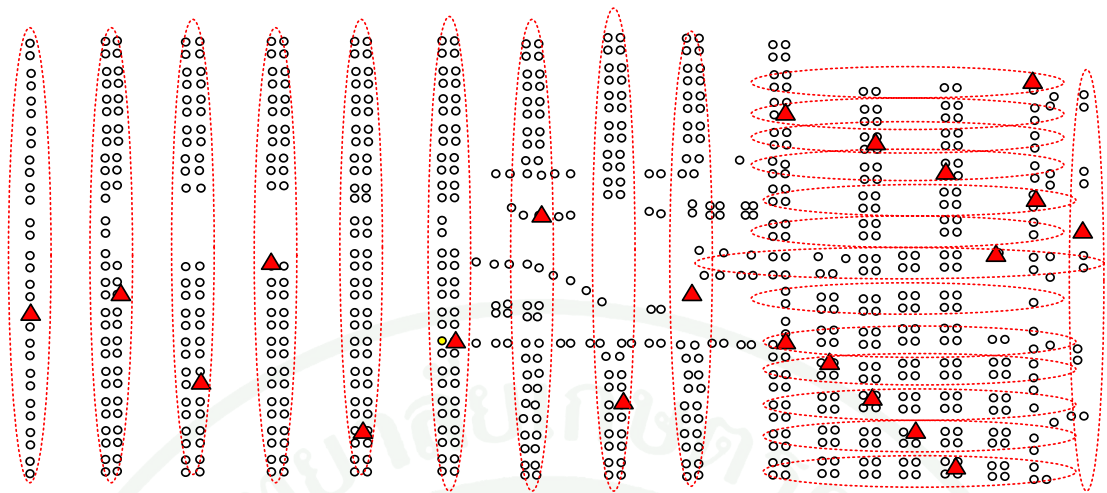


(ก)



(ข)

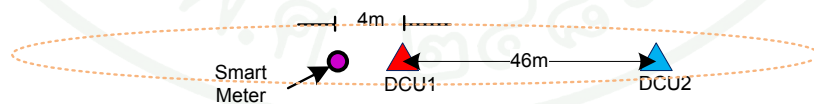
ภาพที่ 25 การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลติดตั้งในแนวนอนเดียวกันและสมาร์ทมิเตอร์ ลูกข่าย (ก) ตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล แสดงบนแผนที่ทางภูมิศาสตร์ (ข) ตำแหน่ง อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล



ภาพที่ 26 การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลติดตั้งแบบสลับฟันปลาและสมาร์ทมิเตอร์ ลูกข่าย

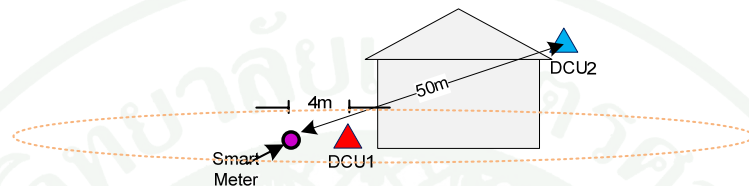
การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากใช้ช่องความถี่เดิมร่วม

การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วม ตามภาพที่ 27 เมื่ออุปกรณ์แม่ข่าย หรืออุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ใช้งานช่องความถี่เดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์ที่รับสัญญาณจากแม่ข่ายหลัก อาจถูกรบกวนจากการส่งสัญญาณของแม่ข่ายตัวอื่นๆ ที่ไม่ต้องการได้ ในงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์หาสัญญาณรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วม โดยวิเคราะห์การรับสัญญาณที่สมาร์ทมิเตอร์ กำหนดให้สมาร์ทมิเตอร์เป็นลูกข่ายของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล 1 (DCU1) ส่วนสัญญาณจากอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล 2 (DCU2) เป็นสัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณร่วม การวิเคราะห์แบ่งเป็น 5 กรณี ดังนี้



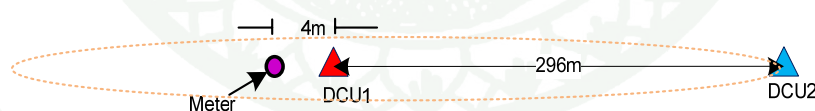
ภาพที่ 27 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1

กรณีที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา ในแนวถนนเดียวกัน ตามภาพที่ 27 DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU1 = 52.1dB การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU2 = 74.03dB ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณรวม (S/I) = 21.93



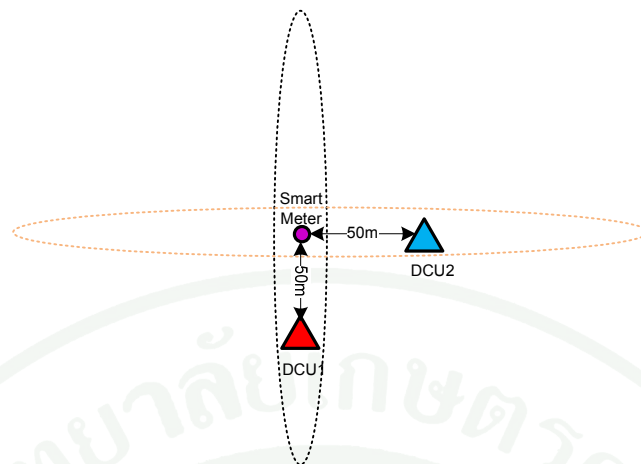
ภาพที่ 28 สมาร์ทมิเตอร์ และ DCU 1 ติดตั้งในระยะสายตา สมาร์ทมิเตอร์และ DCU 2 มีสิ่งกีดขวาง DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1

กรณีที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ และ DCU 1 ติดตั้งในระยะสายตา ส่วนสมาร์ทมิเตอร์กับ DCU 2 มีสิ่งกีดขวาง ตามภาพที่ 28 DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU1 = 52.1dB การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU2 = 116.37 dB ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณรวม (S/I) = 64.27



ภาพที่ 29 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1

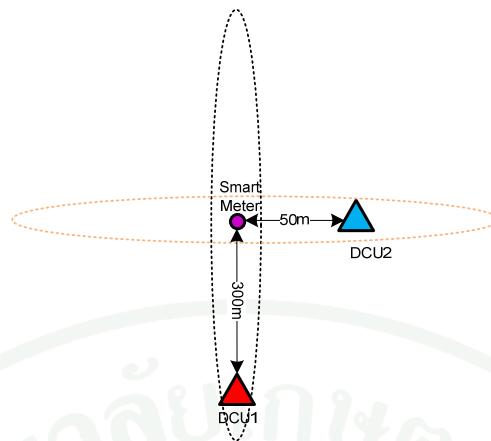
กรณีที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ตามภาพที่ 29 การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU1 = 52.1dB การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU2 = 89.48dB ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณรวม (S/I) = - 37.38



ภาพที่ 30 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา แต่ไม่อยู่ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 เท่ากับระยะทางไปยัง DCU2

กรณีที่ 4 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา แต่ไม่อยู่ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 เท่ากับระยะทางไปยัง DCU2 ตามภาพที่ 30 การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU1 = 74.03dB การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU2 = 74.03 dB ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณรวม (S/I) = 0 dB

กรณีที่ 5 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา แต่ไม่อยู่ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 น้อยกว่าระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU2 ตามภาพที่ 31 การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU1 = 89.48dB การสูญเสียเส้นทางระหว่าง สมาร์ทมิเตอร์กับ DCU2 = 52.1dB ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณรวม (S/I) = -37.38 dB



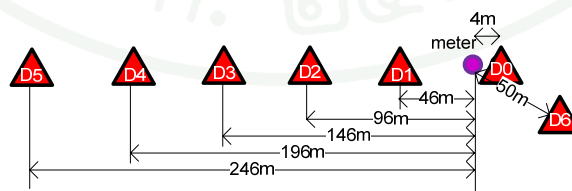
ภาพที่ 31 สมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา แต่ไม่อยู่ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 น้อยกว่าระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU2

วิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากใช้ช่องความถี่ร่วม

ตามภาพที่ 32 ออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลให้อยู่ในแนวเดียวกัน มิเตอร์รับสัญญาณจาก D0 อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วม แสดงตามตารางที่ 4 และเมื่อคิดอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วมของทุกแม่ข่ายที่อาจเกิดการรบกวนจากสมการ

$$\frac{S}{I} = \frac{PL_S^{-1}}{\sum_{i=1}^n PL_i^{-1}}$$

(33)



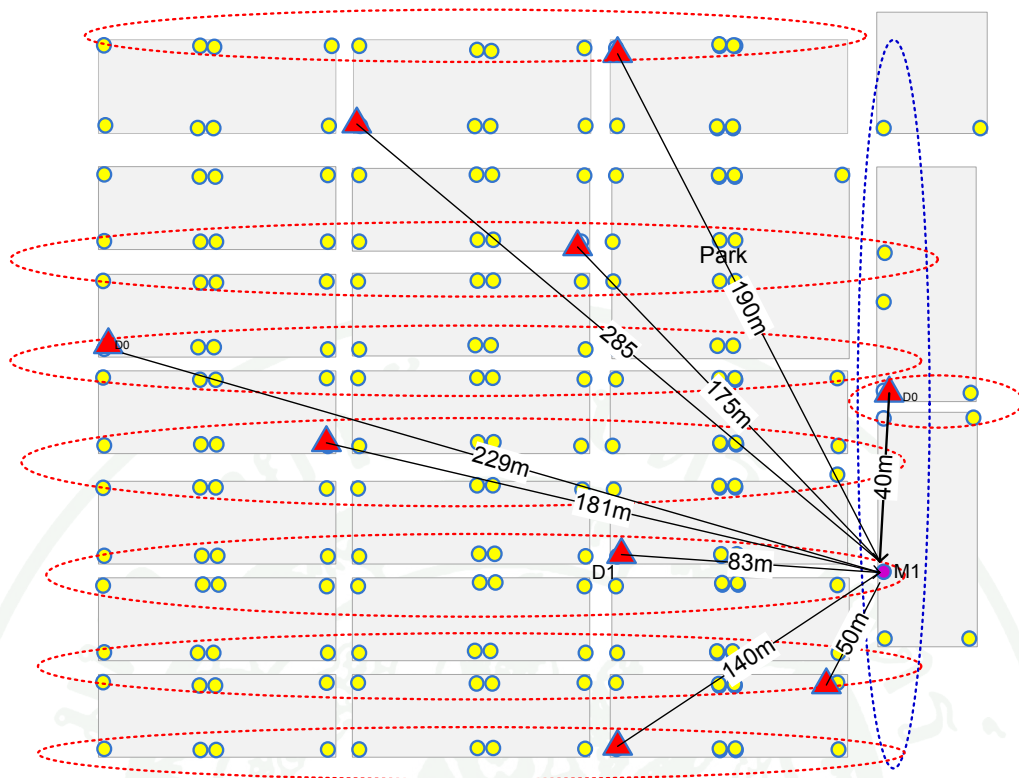
ภาพที่ 32 การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลให้อยู่ในแนวเดียวกัน บริเวณที่อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลอยู่ใกล้กันระยะประมาณ 46 เมตร อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วม เท่ากับ 19.69 dB

ตารางที่ 5 การสูญเสียเส้นทางเมื่อมิเตอร์รับสัญญาณจากอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

รายการ	การสูญเสียเส้นทางจาก มิเตอร์	SIR
PL(D0)	52.1 dB	-
PL(D1)	73.31 dB	21.1
PL(D2)	79.70 dB	27.6
PL(D3)	83.34 dB	31.24
PL(D4)	85.90 dB	33.80
PL(D5)	87.87 dB	35.77
PL(D6) NLoS	116.37dB	64.27

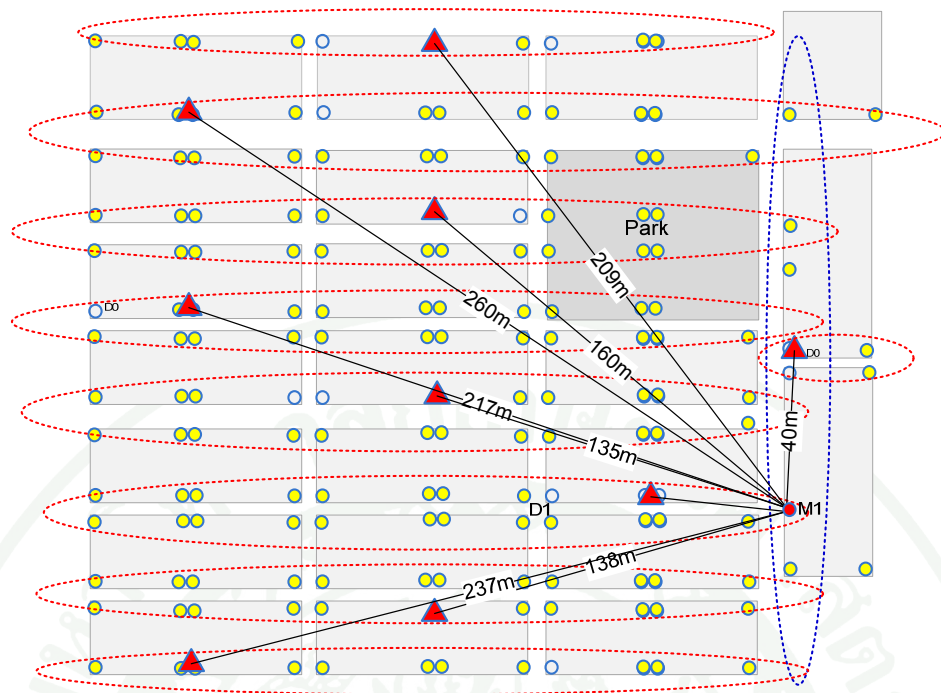
แบบที่ 2 กำหนดให้อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลติดตั้งแบบสลับพื้นปลา

การติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแบบสลับพื้นปลา เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ความถี่ร่วม นั้นเมื่อวิเคราะห์ตามภาพที่ 33 สมาร์ทมิเตอร์ M1 รับสัญญาณจากอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล D0 มิเตอร์ในแนวนอนนี้อาจถูกรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณร่วมจาก DCU ตัวอื่นที่ติดตั้งในแนวนอนที่ติดกัน ส่วน DCU ที่ไม่อยู่ในแนวเดียวกับมิเตอร์ จะถูกอาคารกั้นการรบกวนไปในตัว ค่า S/I ของสมาร์ทมิเตอร์ M1 = 52.54 dB



ภาพที่ 33 การติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแบบสลับพื้นปลา เมื่อมีเตอร์ M1 รับสัญญาณจาก อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล D0 แต่อยู่ในระยะสายตาของ DCU D1 อาจถูกรบกวนเนื่องจาก ใช้ช่องสัญญาณร่วม ของ DCU D1 ได้

เพื่อป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณเดิมร่วม กรณีสมาร์ทมิเตอร์ DCU 1 และ DCU 2 ติดตั้งในระยะสายตา แต่ไม่อยู่ในแนวถนนเดียวกัน DCU1 และ DCU2 ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 เท่ากันระยะทางไปยัง DCU2 (กรณีที่ 4) และ สมาร์ทมิเตอร์รับสัญญาณจาก DCU1 ระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU1 น้อยกว่าระยะทางระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ไปยัง DCU2 ตามการวิเคราะห์สัญญาณ จึงออกแบบตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแบบสลับพื้นปลาและไม่ให้อยู่ในระยะสายตาของสมาร์ทมิเตอร์ที่ไม่ใช่ลูกข่าย ตามภาพที่ 34 ค่า S/I ของ M1 = 58.58dB



ภาพที่ 34 การติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแบบสลับพื้นปลา โดยอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแต่ละตัว
ไม่อยู่ในระยะสายตาของมิเตอร์ที่ไม่ใช่ลูกข่าย

วิจารณ์

การกำหนดสภาพแวดล้อมในการทดสอบสมรรถนะของระบบสื่อสารซิกบีในพื้นที่ กฟภ. แบ่งเป็น 3 แบบคือแบบที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน โดยสมมติว่าโมดูลของซิกบีถูกฝังอยู่ในสมาร์ทมิเตอร์ และทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับโมดูลซิกบีตัวอื่นๆ ซึ่งติดตั้งเป็นตัวรับข้อมูล ติดตั้งอยู่ในระยะระดับสายตา โดยส่วนมากอยู่ที่มุมถนน แบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนนขนาด 4 ช่องทางจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบแรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ทมิเตอร์จะอยู่กลางแจ้ง ไม่มีอาคารสิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรับส่งสัญญาณ และแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องทางจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้ เป็นการจำลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ ไปยังโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ. ซึ่งในสภาพความเป็นจริง การติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าของ กฟภ. มีความแตกต่างกันหลากหลายแบบ ทั้งในเมืองและชนบท ชุมชนหนาแน่น เป็นต้น ระยะทางที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 30 เมตร พื้นที่โล่งไม่มีสิ่งกีดขวาง ข้อมูลจากการทดลองถูกเก็บรวบรวมจากระยะทาง 30 เมตร และนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าครรชนิการสูญเสียเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น และค่าลดทอนในสภาพแวดล้อมแต่ละแบบ พบว่าค่าครรชนิการสูญเสีย (n) น้อยกว่า 2 ซึ่งเป็นค่าครรชนิการสูญเสียมาตรฐานในพื้นที่กลางแจ้ง ในระยะสายตาไม่มีสิ่งกีดขวาง ระยะทางที่ทำการทดลอง 1-30 เมตร การรับส่งข้อมูลของซิกบีจึงสามารถรับส่งได้เป็นอย่างดี และจากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทดสอบการกระจายของข้อมูลด้วยวิธีไควสแควร์ ค่าสัญญาณรับเป็นการกระจายแบบลอการิทึมปกติ ด้วยค่าเบี่ยงเบนที่น้อยกว่า $5dB$ มีข้อที่น่าสังเกตว่าหากซิกบีติดตั้งในพื้นที่ที่มีการเคลื่อนไหวของยานพาหนะ ลักษณะคล้ายถนนแปดช่องจราจร ทั้งค่าการสูญเสียเส้นทางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การทดลองวัดสัญญาณที่ระยะ 30 เมตร และมีการเก็บข้อมูลน้อย และเมื่อทดลองในพื้นที่ข้างถนนขนาด 8 ช่องทางจราจร ซึ่งเปรียบเสมือนการเชื่อมต่อเครือข่ายซิกบี เข้ากับโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ. ค่าการสูญเสียเส้นทางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการรับสัญญาณของอุปกรณ์ในสภาพแวดล้อมที่คล้ายคลึงกับการทดลองต่อไป

การออกแบบกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลในหมู่บ้านจัดสรรขนาดใหญ่ จากการทดลองได้เลือกหมู่บ้านกฤษดานคร อำเภอคลองหลวง จ.ปทุมธานี ซึ่งเป็นหมู่บ้านจัดสรรขนาดใหญ่ มีผังการก่อสร้างบ้านพักอาศัย แบ่งพื้นที่เป็นสัดส่วน และการติดตั้งมีเตอร์อยู่ในแนวนอนเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ การกำหนดกำลังส่งในการทดลองขนาด 20 dBm หรือ 100 mW ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเป็นกำลังส่งสูงสุดและเป็นไปตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ซึ่งเป็นกำลังส่งรวมอัตราขยายของสายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับทั้งหมดแล้ว การรับส่งในระยะสายตาสมมุติให้ไม่มีสิ่งกีดขวางแนวทางการรับส่ง ซึ่งสามารถรับได้ไกล แต่เมื่อระยะระหว่างเทอร์มินัลภาคส่งและภาครับไม่ใช่ระยะสายตาสมมุติว่ามีสิ่งก่อสร้างขวางทางแนวทางการรับส่ง สามารถรับส่งสัญญาณได้ระยะน้อยมาก ค่าที่วัดได้ทั้งหมด เป็นค่ากลางจากการคำนวณจากสมการที่ได้จากทางสถิติ ความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้อาจมีผิดเพี้ยนจากความเป็นจริง แต่สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบ และประมาณการค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบได้ ดังนั้นซิกบีมี่ประสิทธิภาพเพียงพอในการติดตั้งร่วมกับมีเตอร์ ใช้งานในพื้นที่ให้บริการของ กฟภ.

กำลังส่งขนาด 20 dBm หรือ 100 mW ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเป็นไปตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ซึ่งเป็นกำลังส่งรวมทั้งหมด อัตราขยายของสายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับมีค่าเป็น 1 การรับส่งในระยะสายตาสมมุติให้ไม่มีสิ่งกีดขวางแนวทางการรับส่ง ซึ่งสามารถรับได้ไกล แต่เมื่อระยะระหว่างเทอร์มินัลภาคส่งและภาครับไม่ใช่ระยะสายตาสมมุติว่ามีสิ่งก่อสร้างขวางทางแนวทางการรับส่ง สามารถรับส่งสัญญาณได้ระยะน้อยมาก ค่าที่วัดได้ทั้งหมด เป็นค่ากลางจากการคำนวณ โดยใช้ค่าที่ได้จากทางสถิติ ในการคำนวณ ความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้อาจมีผิดเพี้ยนจากความเป็นจริง แต่สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบ และประมาณการค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

ซิกบีเป็นระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้ความถี่สาธารณะย่านเดียวกับระบบสื่อสารอื่น อาทิ ไวไฟ บลูทูธ แต่มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างคือ สามารถสร้างเป็นเครือข่ายส่วนตัว ใช้พลังงานน้อย แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และเป็นระบบการติดต่อสื่อสารแบบสองทิศทาง ในการรับส่งข้อมูล มีสมรรถนะและเหมาะสม สำหรับนำมาเชื่อมต่อระหว่างสมาร์ตมิเตอร์เข้ากับโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ. ได้ จากการทดสอบสมรรถนะในการส่งข้อมูลในพื้นที่ให้บริการของ กฟภ. โดยทำการทดลองในสภาพพื้นที่ที่มีการติดตั้งสมาร์ตมิเตอร์จริง ที่แตกต่างกันทั้งสามแบบ ซิกบี ให้ผลเป็นที่น่าพอใจโดยในสภาพแวดล้อมที่มีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะหนาแน่นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในสภาพแวดล้อมลักษณะเดียวกันนี้ ส่วนการออกแบบกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลในหมู่บ้านจัดสรรขนาดใหญ่ สามารถใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของอุปกรณ์แม่ข่าย และทราบจำนวนและประเภทของอุปกรณ์ซิกบีที่จะต้องติดตั้ง เป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือการติดตั้งซิกบีและใช้ในการจัดทำประมาณการราคาเบื้องต้น ในการออกแบบวางระบบสื่อสารสำหรับ กฟภ. ในอนาคตได้

สมการที่ใช้ในการหาการสูญเสียเส้นทางทั้งในระยะสายตาและไม่ใช้ระยะสายตา เป็นค่ากลางที่สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ รวบรวมและนำเสนอเผยแพร่ เพื่ออำนวยความสะดวกในการออกแบบระบบเครือข่ายไร้สาย ซึ่งโดยทั่วไปการส่งข้อมูลในระยะสายตาจะสามารถส่งได้ไกลกว่าการส่งข้อมูลเมื่อมีสิ่งกีดขวาง และในสภาพพื้นที่ติดตั้งมิเตอร์ของ กฟภ. มีสภาพแวดล้อมหลากหลาย ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานซิกบีมีประสิทธิภาพ ระยะทางการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้นรับส่งได้ครอบคลุมพื้นที่ได้มากขึ้นจึงมีข้อเสนอแนะในการออกแบบระบบดังนี้

(1) ยกระดับความสูงของสายอากาศภาคส่งขึ้นให้สูงกว่าระดับหลังคาที่พักอาศัย ซึ่งจะช่วยให้สามารถรับส่งข้อมูลกับมิเตอร์ได้มากยิ่งขึ้น แต่อาจมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโครงเหล็กเสาอากาศและค่าเช่าพื้นที่ติดตั้งเพิ่มขึ้น

(2) เพิ่มอุปกรณ์ทวนสัญญาณในทุกสี่แยก เพื่อทวนสัญญาณและเชื่อมต่อกับสมาร์ตมิเตอร์ที่อยู่ในระยะไม่ใช้ระยะสายตา กับอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล เนื่องจากตามหน้าที่การทำงานของซิกบี สามารถกำหนดให้ทำหน้าที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณได้ โดยไม่ต้องเพิ่มค่าใช้จ่าย ทั้งนี้ใน

การเขียนข้อกำหนดทางเทคนิค ต้องระบุให้สามารถทำหน้าที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณได้ด้วย แต่หากพิจารณาเพิ่มอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลจะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น

(3) เลือกสายอากาศสำหรับทั้งอุปกรณ์รวบรวมสัญญาณและอุปกรณ์ปลายทาง เป็นแบบที่สามารถบังคับทิศทางได้ เมื่อต้องการให้รับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(4) เพิ่มอัตราขยายสายอากาศภาคส่ง ทั้งนี้ต้องระวังไม่ให้เกินจากที่กฎหมายกำหนด

(5) ลดค่าความไวของเครื่องรับลงให้เป็นค่าต่ำๆ แต่ก็อาจมีข้อเสียคือโดนรบกวนจากสัญญาณอื่นๆ ได้ง่ายเช่นกัน

(6) อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลที่อยู่ใกล้กัน ควรกำหนดให้ใช้ช่องสัญญาณต่างกัน เพื่อป้องกันการรบกวนเนื่องจากใช้ความถี่ร่วม แต่ในกรณีที่ต้องใช้ความถี่ช่องสัญญาณเดียวกัน การติดตั้งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ควรติดตั้งแบบสลับฟันปลา และตำแหน่งในการติดตั้งไม่ควรอยู่ในแนวเดียวกับมิเตอร์ตัวที่ไม่ใช่ลูกข่าย

ซิกบีมีสมรรถนะเพียงพอในการประยุกต์ใช้เชื่อมต่อสมาร์ตมิเตอร์ ในโครงข่ายปลายทางของ กฟภ. ในระยะสั้น อาทิ ในหมู่บ้าน ชุมชนขนาดใหญ่ ที่มีการติดตั้งมิเตอร์อย่างเป็นระเบียบเหมาะสำหรับการรับส่งข้อมูลระยะใกล้ ไม่เกิน 3000 เมตร แต่ทั้งนี้เพื่อให้ซิกบีมีประสิทธิภาพ เพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบมากยิ่งขึ้น ในการออกแบบจึงจำเป็นต้องกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่ และความต้องการใช้งานของ กฟภ. การออกแบบจุดติดตั้งอุปกรณ์รวมข้อมูล ต้องพิจารณาทั้งจากการคำนวณ และสภาพพื้นที่ที่ประกอบ การออกแบบระบบเพื่อให้ครอบคลุมจำนวนมิเตอร์จึงอาจต้องเพิ่มจำนวนอุปกรณ์รวมข้อมูล หรืออุปกรณ์เร้าเตอร์เป็นจำนวนมาก เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนเนื่องจากใช้ช่องสัญญาณร่วมกันควรติดตั้งอุปกรณ์รวมสัญญาณไม่ให้อยู่ในแนวถนนเดียวกัน หรืออยู่ในระยะสายตา กับอุปกรณ์รวบรวมสัญญาณตัวอื่นๆ ข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นคำแนะนำสำหรับ กฟภ. ได้ต่อไป แต่เพื่อให้การใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กฟภ. ยังต้องจัดอุปกรณ์/ซอฟต์แวร์เพิ่มอีกหลายส่วน งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอความรู้ทั่วไปของเทคโนโลยีซิกบี และแนวทางการกำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์แม่ข่าย เพื่อเชื่อมต่อให้ครอบคลุมพื้นที่ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเชื่อมต่อมิเตอร์กับโครงข่ายสื่อสารของ กฟภ. ในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554. Last Mile Network Communication Technologies. รายงานฉบับที่ 3 งานจ้างที่ปรึกษาจัดทำแผนที่นำทาง (Roadmap) และศึกษาความเหมาะสมโครงการ PEA Smart Grids และ AMI. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

Akl, R. and D. Tummala. 2006. Indoor Propagation Modeling at 2.4GHz for IEEE802.11 Network. *In The 6th International multi-conference on wireless and optical communications wireless network and emerging technology*. 6th. Alberta Canada.

ITU. 2012. Recommendation ITU-R P.1411-6. **Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz**. Geneva, Switzerland.

Goldsmith, A. 2005. **Wireless Communication**. Cambridge University Press. United Kingdom.

Pellegrini, R. 2010. ZigBee Sensor Network propagation analysis for health-care application. *In Broadband and Biomedical Communications (IB2Com)*. Fifth International Conference. 5th. The University of Malaga, Spain.

Pellegrini, R. 2011. RF Propagation Analysis for ZigBee Sensor Network using RSSI Measurements. *In VITAE2011 2nd International Conference on*. 2nd. Chennai, India.

Pellegrini, R., S. Persia, D. Volpono, and G. Marcone. 2011. RF Propagation Analysis for ZigBee Sensor Network using RSSI Measurements. *In Wireless VITAE 2011 2nd International Conference*. 2nd, Chennai, India.

Rappaport, T. 1996. **Wireless Communications Principles and Practice**. Prentice Hall. New Jersey.

Suciu, D. 2010. A study of RF link and coverage in ZigBee. **Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Targu Mures**. 7: 5-10.

Seybold, J. S. 2005. **Introduction to RF Propagation**. Wiley Interscience. Hoboken, New Jersey.

Tadeusz, A. and H. Zepernick. 2000. PP 84. Characterization of the indoor radio propagation channel at 2.4 GHz. **Journal of Telecommunications and Information Technology**: 84-90.

Texas Instruments. 2012. **CC2431 System-on-Chip for 2.4 GHz ZigBee/IEEE 802.15.4 with Location Engine**. Chipcon Products from Texas Instruments. Available Source: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2431.pdf>. August 10, 2012.

Vehbi, C. 2011. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. 7: 529-539.

XU, C., X. CHEN, D. LI. and X. Zhong. 2008. Automatic Electric Meter Reading System Based on ZigBee. *In WICOM2008*. 4th. Dalian, China.

Yi, P., A. Iwayemi. and C. Zho. 2011. Developing ZigBee deployment guideline under WiFi Interference for Smart Grid Applications. **IEEE Transactions on Smart Grid**. 2: 110-120.



ภาคผนวก



ผลการทดลองส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ชิปในพื้นที่ กฟภ.

ตารางผนวกที่ 1 ค่า RSSI ที่วัดได้เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวนอน ขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน โดยสมมติว่าโมดูลของซิกบีถูกฝังอยู่ในสมาร์ทมิเตอร์ และทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับ โมดูลซิกบีตัวอื่นๆ ซึ่งติดตั้งเป็นตัวรับข้อมูล ติดตั้งอยู่ในระยะระดับสายตา โดยส่วนมากอยู่ที่มุมถนน

d(m)	ครั้งที่ทดลอง																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	-44.8	-44.8	-44.6	-44.5	-44.4	-44.2	-44.0	-44.0	-43.9	-43.8	-43.8	-43.8	-43.7	-43.7	-43.6	-43.6	-43.5	-43.5	-43.5	-43.4
2	-46.5	-47.0	-46.2	-46.2	-47.2	-46.2	-47.7	-47.0	-47.9	-47.3	-46.6	-46.6	-44.8	-47.8	-47.4	-49.3	-46.3	-48.1	-49.0	-49.0
3	-45.6	-45.2	-45.8	-45.3	-45.2	-45.5	-45.6	-45.5	-45.2	-45.3	-45.6	-45.0	-45.5	-45.5	-45.5	-45.5	-45.1	-45.2	-45.2	-45.3
4	-53.8	-53.3	-52.3	-53.4	-53.5	-53.6	-53.9	-53.6	-54.2	-54.0	-53.7	-53.1	-53.4	-53.0	-53.0	-53.9	-53.5	-53.6	-53.8	-53.0
5	-57.9	-58.0	-58.2	-57.9	-56.6	-58.2	-56.3	-55.3	-56.1	-58.3	-58.0	-58.0	-58.0	-58.0	-58.0	-58.0	-57.5	-58.1	-57.9	-56.6
10	-65.6	-65.2	-64.2	-65.5	-64.9	-64.5	-62.4	-64.7	-63.3	-63.4	-63.4	-63.3	-62.4	-63.3	-64.1	-63.9	-64.0	-62.3	-62.9	-63.0
15	-60.4	-60.5	-61.5	-62.5	-61.2	-61.1	-62.2	-62.0	-62.3	-62.1	-61.4	-62.1	-62.2	-61.8	-60.9	-61.3	-61.8	-61.6	-61.5	-61.5
20	-65.5	-66.1	-65.2	-65.0	-65.3	-65.3	-65.4	-65.2	-65.2	-66.2	-65.4	-65.3	-65.4	-64.9	-64.5	-66.2	-65.0	-64.8	-64.8	-64.7
25	-70.1	-70.8	-67.7	-71.4	-69.0	-67.9	-69.9	-68.6	-69.9	-68.1	-68.5	-68.9	-69.2	-69.2	-68.9	-66.8	-69.5	-71.1	-70.5	-68.7

ตารางผนวกที่ 2 ค่าการสูญเสียเส้นทาง เมื่อเมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 1 สมาร์ทมิเตอร์ ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตาม
 แนวถนนขนาด 2 ช่องทางจราจรบริเวณหน้าบ้านที่พักอาศัย ในชุมชน หรือหมู่บ้าน โดยสมมติว่าโมดูลของซิกบีถูกฝังอยู่ในสมาร์ทมิเตอร์ และ
 ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับโมดูลซิกบีตัวอื่นๆ ซึ่งติดตั้งเป็นตัวรับข้อมูล ติดตั้งอยู่ในระยะระดับสายตา โดยส่วนมากอยู่ที่มุมถนน

D	ครั้งที่ทดลอง																			
(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	44.7	44.7	44.5	44.4	44.3	44.1	43.9	43.9	43.8	43.7	43.7	43.7	43.6	43.6	43.5	43.5	43.4	43.4	43.4	43.3
2	46.4	46.9	46.1	46.1	47.1	46.1	47.6	46.9	47.8	47.2	46.5	46.5	44.7	47.7	47.3	49.2	46.2	48.0	48.9	48.9
3	45.5	45.1	45.7	45.2	45.1	45.4	45.5	45.4	45.1	45.2	45.5	44.9	45.4	45.4	45.4	45.4	45.0	45.1	45.1	45.2
4	53.7	53.2	52.2	53.3	53.4	53.5	53.8	53.5	54.1	53.9	53.6	53.0	53.3	52.9	52.9	53.8	53.4	53.5	53.7	52.9
5	57.8	57.9	58.1	57.8	56.5	58.1	56.2	55.2	56.0	58.2	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.4	58.0	57.8	56.5
10	65.5	65.1	64.1	65.4	64.8	64.4	62.3	64.6	63.2	63.3	63.3	63.2	62.3	63.2	64.0	63.8	63.9	62.2	62.8	62.9
15	60.3	60.4	61.4	62.4	61.1	61.0	62.1	61.9	62.2	62.0	61.3	62.0	62.1	61.7	60.8	61.2	61.7	61.5	61.4	61.4
20	65.4	66.0	65.1	64.9	65.2	65.2	65.3	65.1	65.1	66.1	65.3	65.2	65.3	64.8	64.4	66.1	64.9	64.7	64.7	64.6
25	70.0	70.7	67.6	71.3	68.9	67.8	69.8	68.5	69.8	68.0	68.4	68.8	69.1	69.1	68.8	66.7	69.4	71.0	70.4	68.6

ตารางผนวกที่ 3 ค่า RSSI ที่วัดได้เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตามแนวถนน ขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบแรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ตมิเตอร์จะอยู่กลางแจ้ง ไม่อาคาร สิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรับส่งสัญญาณ

D (m)	ครั้งที่ทดลอง																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	-42.2	-41.0	-41.9	-41.4	-41.9	-41.7	-41.9	-41.2	-42.5	-42.4	-41.2	-41.7	-41.3	-41.4	-42.3	-41.1	-41.6	-41.4	-41.0	-41.3
2	-51.8	-52.8	-52.4	-52.2	-52.0	-52.8	-51.5	-51.5	-51.1	-51.5	-52.8	-51.6	-51.7	-52.0	-51.1	-50.7	-50.5	-51.0	-51.5	-51.0
5	-57.9	-56.9	-58.9	-59.0	-58.8	-59.0	-58.9	-58.9	-58.0	-57.6	-58.4	-58.9	-58.7	-58.8	-58.9	-58.8	-58.5	-58.7	-57.9	-58.3
10	-56.1	-56.9	-59.7	-60.4	-60.9	-59.7	-59.7	-60.4	-61.2	-60.6	-57.9	-57.3	-59.0	-58.4	-59.9	-60.1	-58.9	-59.4	-58.6	-56.1
15	-63.9	-63.1	-63.2	-63.4	-63.8	-64.0	-65.2	-64.3	-63.3	-63.3	-63.6	-63.6	-63.9	-64.4	-64.1	-64.5	-63.5	-63.6	-64.2	-64.3
20	-60.6	-60.3	-59.8	-59.9	-59.7	-59.5	-59.4	-59.7	-59.3	-59.1	-59.3	-59.8	-60.4	-60.2	-60.1	-59.5	-59.9	-59.8	-59.5	-59.8
30	-70.9	-70.7	-71.8	-70.1	-70.7	-70.5	-71.4	-70.3	-71.5	-70.7	-70.5	-70.9	-70.0	-70.0	-70.0	-70.3	-70.8	-70.2	-70.2	-69.1

ตารางผนวกที่ 4 ค่าการสูญเสียเส้นทาง เมื่อเมื่อทดลองในสภาพแวดล้อม แบบที่ 2 สมาร์ทมิเตอร์ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า ระดับความสูง 1-2 เมตร จากพื้นดิน ตาม
 แนวถนนขนาด 4 ช่องจราจร บริเวณทางเข้าหมู่บ้าน หรือชุมชน ซึ่งการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองของแบบที่ 2 นี้ จะคล้ายๆ แบบ
 แรก แตกต่างกันที่ตำแหน่งสมาร์ทมิเตอร์จะอยู่กลางแจ้ง ไม่อาคาร สิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้แนวรับส่งสัญญาณ

D (m)	ครั้งที่ทดลอง																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	42.1	40.9	41.8	41.3	41.8	41.6	41.8	41.1	42.4	42.3	41.1	41.6	41.2	41.3	42.2	41.0	41.5	41.3	40.9	41.2
2	51.7	52.7	52.3	52.1	51.9	52.7	51.4	51.4	51.0	51.4	52.7	51.5	51.6	51.9	51.0	50.6	50.4	50.9	51.4	50.9
5	57.8	56.8	58.8	58.9	58.7	58.9	58.8	58.8	57.9	57.5	58.3	58.8	58.6	58.7	58.8	58.7	58.4	58.6	57.8	58.2
10	56.0	56.8	59.6	60.3	60.8	59.6	59.6	60.3	61.1	60.5	57.8	57.2	58.9	58.3	59.8	60.0	58.8	59.3	58.5	56.0
15	63.8	63.0	63.1	63.3	63.7	63.9	65.1	64.2	63.2	63.2	63.5	63.5	63.8	64.3	64.0	64.4	63.4	63.5	64.1	64.2
20	60.5	60.2	59.7	59.8	59.6	59.4	59.3	59.6	59.2	59.0	59.2	59.7	60.3	60.1	60.0	59.4	59.8	59.7	59.4	59.7
30	70.8	70.6	71.7	70.0	70.6	70.4	71.3	70.2	71.4	70.6	70.4	70.8	69.9	69.9	69.9	70.2	70.7	70.1	70.1	69.0

ตารางผนวกที่ 5 ค่า RSSI ที่วัดได้เมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตามแนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้ เป็นการจำลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ ไปยังโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ.

D (m)	ครั้งที่ทดลอง																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	-39.5	-39.6	-39.5	-39.8	-39.5	-39.5	-40.8	-40.4	-40.1	-40.1	-40.0	-39.8	-39.7	-39.9	-40.1	-39.8	-40.3	-39.9	-40.0	-40.0
2	-44.4	-45.0	-44.9	-44.5	-45.0	-44.4	-44.7	-45.2	-44.9	-45.0	-44.9	-44.3	-43.9	-44.6	-44.8	-44.1	-43.9	-44.2	-44.1	-44.1
5	-66.2	-69.3	-69.7	-70.6	-67.0	-67.0	-68.0	-64.2	-65.2	-65.0	-65.9	-66.1	-66.1	-67.5	-68.9	-68.4	-71.1	-69.4	-69.0	-69.0
10	-58.3	-58.8	-58.2	-58.8	-59.0	-58.7	-59.1	-59.0	-59.0	-58.6	-58.6	-58.9	-58.8	-58.5	-58.4	-58.8	-58.0	-58.2	-58.5	-58.5
15	-62.0	-61.0	-61.8	-62.0	-61.5	-61.8	-61.7	-61.7	-61.0	-61.9	-62.2	-61.5	-61.7	-61.2	-61.3	-61.6	-61.5	-61.1	-61.4	-61.4
20	-60.5	-59.5	-60.1	-60.1	-60.1	-60.0	-60.2	-61.0	-60.9	-61.3	-60.3	-60.7	-61.5	-61.1	-61.0	-60.1	-59.8	-60.4	-60.1	-60.1
30	-72.5	-69.7	-73.5	-75.1	-75.3	-75.2	-72.7	-75.5	-76.4	-77.1	-73.1	-73.9	-76.0	-73.3	-70.9	-69.2	-74.9	-70.0	-71.4	-71.4

ตารางผนวกที่ 6 ค่าการสูญเสียเส้นทาง เมื่อเมื่อทดลองในสภาพแวดล้อมแบบที่ 3 สมาร์ทมิเตอร์ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ความสูง 1-2 เมตรจากระดับพื้นดิน ตาม
 แนวถนนหลัก ขนาด 6-8 ช่องจราจรนอกชุมชน การกำหนดการติดตั้งแบบนี้ เป็นการจำลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ ไป
 ยังโครงข่ายสื่อสารหลักของ กฟภ.

D (m)	ครั้งที่ทดลอง																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	39.4	39.5	39.4	39.7	39.4	39.4	40.7	40.3	40.0	40.0	39.9	39.7	39.6	39.8	40.0	39.7	40.2	39.8	39.9	39.9
2	44.3	44.9	44.8	44.4	44.9	44.3	44.6	45.1	44.8	44.9	44.8	44.2	43.8	44.5	44.7	44.0	43.8	44.1	44.0	44.0
5	66.1	69.2	69.6	70.5	66.9	66.9	67.9	64.1	65.1	64.9	65.8	66.0	66.0	67.4	68.8	68.3	71.0	69.3	68.9	68.9
10	58.2	58.7	58.1	58.7	58.9	58.6	59.0	58.9	58.9	58.5	58.5	58.8	58.7	58.4	58.3	58.7	57.9	58.1	58.4	58.4
15	61.9	60.9	61.7	61.9	61.4	61.7	61.6	61.6	60.9	61.8	62.1	61.4	61.6	61.1	61.2	61.5	61.4	61.0	61.3	61.3
20	60.4	59.4	60.0	60.0	60.0	59.9	60.1	60.9	60.8	61.2	60.2	60.6	61.4	61.0	60.9	60.0	59.7	60.3	60.0	60.0
30	72.4	69.6	73.4	75.0	75.2	75.1	72.6	75.4	76.3	77.0	73.0	73.8	75.9	73.2	70.8	69.1	74.8	69.9	71.3	71.3

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นางอรดี มุสิกานนท์
เกิดวันที่	8 พฤษภาคม 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยภูมิ
ประวัติการศึกษา	วศบ. (โทรคมนาคม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 9
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กองออกแบบและบริการ ฝ่ายสื่อสารและโทรคมนาคม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนการศึกษาปริญญาโท โครงการความร่วมมือทางวิชาการเพื่อพัฒนาผู้เชี่ยวชาญระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์