

การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายด้วยวิธีการปรับระดับความแรงของกำลังส่ง

กีรติษ สายพัทลุง อธิธิพัทธ์ ลาวัง เพชร นันทวิวัฒนา และ ปรีชา กอเจริญ

กลุ่มศึกษาและวิจัยเชิงประยุกต์ไมโครคอนโทรลเลอร์ อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม (SARGMET)

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

61 ถ.พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์: 0-2579-1111 ต่อ 2285

E-mail: keeradit.sai@hotmail.com, aik_wow@hotmail.com, petch.na@spu.ac.th, preecha.ko@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายด้วยวิธีการปรับระดับความแรงของกำลังส่งความแรงกำลังส่งของเซ็นเซอร์โหนดอ้างอิงในระดับสูงจะทำให้พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณมีมาก แต่จะส่งผลให้เกิดผลจากมัลติพาทเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองการสื่อสารข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โหนดอ้างอิง และเซ็นเซอร์โหนดที่ต้องการระบุตำแหน่งภายในอาคาร ที่ความแรงของกำลังส่งในระดับต่างๆ เพื่อยืนยันผลกระทบเนื่องจากมัลติพาทที่เกิดจากความแรงของกำลังส่งที่มีความแรงสูง ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการออกแบบและวางแผนเครือข่าย เพื่อการออกแบบการครอบคลุมพื้นที่และเพื่อกำหนดกำลังส่งและตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์โหนดอ้างอิง โดยหากเลือกกระดับของความแรงของกำลังส่งได้เหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ที่ใช้งาน และประมวลผลร่วมกับตัวแปรของระดับความแรงสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารในแต่ละพื้นที่ ที่นำระบบการระบุตำแหน่งวัตถุไปใช้งาน จะสามารถเพิ่มความถูกต้องในการวัดระยะทางและการระบุตำแหน่งวัตถุในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้

Abstract

This paper presents a performance improvement by adjusting the transmitted power level of an indoor wireless sensor networks object-locating system. Transmitting high power level of the reference sensor nodes not only result in more coverage areas but also increase an effect from multi-path signals. In order to understand multi-path effect due to

transmitting high power level, this research try out on the signal communication between the reference sensor nodes and the sensor nodes that want to be located within the building at different transmitted power levels. The results from the experimental can be applied with the available network planning software to design the location and the power level that the reference sensor nodes could cover an interested area. If the transmitted power level of the reference sensor nodes have been adjusting to the appropriate level, and also cooperate with the specific area constant, then the accuracy of the object-locating system should be increased.

คำสำคัญ : การระบุตำแหน่งวัตถุ, เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย, สัญญาณมัลติพาท

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่มีความสำคัญมากกับดำเนินชีวิตอีกอย่างหนึ่งคือ เทคโนโลยีทางด้านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) โดยเทคโนโลยีทางด้านนี้ มีการนำมาใช้ในการวัดและการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงต่างๆ โดยมีการนำเทคโนโลยีทางด้านนี้มาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่ง ระยะทาง เช่นการตรวจระบุตำแหน่งเครื่องมือทางการแพทย์ที่มีราคาค่อนข้างสูง ระบบติดตามเด็กพลัดหลงในศูนย์การค้า หรือนิทรรศการต่างๆ ที่มีผู้เข้าร่วมงานจำนวนมาก

และยังมีการวิจัยในด้านการระบุตำแหน่งของวัตถุบุคคล โดยการใช้การวัดหาค่าความแรงของสัญญาณ มาคำนวณหา ระยะทางและการระบุตำแหน่ง ก่อนหน้านี้แล้วโดยคณะผู้วิจัย บางส่วนดังต่อไปนี้ 1) วิริยาพร และวรรณรัชได้ทำการหา ระยะทางในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยใช้ค่า RSSI ด้วยการพิตเส้นตรงความเข้มของสัญญาณ [1], 2) ภาคย์ และชัชชัย ได้ทำการวิจัยระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร โดยใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ด้วยการพิตเส้นโค้งความเข้มของสัญญาณร่วมกับการจับคู่ความเข้มของสัญญาณใน ฐานข้อมูลอ้างอิง [2], 3) เจษฎา และอมรเทพ ได้ทำการศึกษา ผลของการวางตำแหน่ง AP ในการประมาณตำแหน่งลูกข่าย ภายในโครงข่าย WLAN ซึ่งได้ทำการประมาณตำแหน่งลูกข่าย โดยโครงข่ายประสาทเทียม [3].

วิธีการในการทดลองดังกล่าว จะกำหนดความแรงกำลังส่งของเซ็นเซอร์อ้างอิงในระดับสูง เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุม สัญญาณมาก แต่การกำหนดความแรงกำลังส่งที่มากจะส่งผลให้เกิดผลจากมัลติพาทเพิ่มมากขึ้น (multi-path effect) ดังนั้น เพื่อลดผลจากมัลติพาท งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการ ปรับปรุงประสิทธิภาพระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารใน ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายด้วยวิธีการปรับระดับความแรงของกำลังส่ง และการทดลองจะทำอยู่บนพื้นฐานของการ ประมาณระยะทางโดยใช้ค่า RSSI ด้วยการพิตเส้นตรงความเข้มของสัญญาณ [1] เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน มีการ ประมวลผลน้อย และไม่จำเป็นต้องมีการวัดค่าความแรง สัญญาณในแต่ละจุดเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล ผลที่ได้จากการ ทดลองจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมสำเร็จรูป สำหรับการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวไฟ เพื่อการ ออกแบบการครอบคลุมพื้นที่ของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย [9] เพื่อทำการกำหนดกำลังส่งของเซ็นเซอร์อ้างอิง ให้เหมาะสมกับ ขนาดของพื้นที่ได้ต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ค่าความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับในเชิงพลังงาน (RSSI)

Received Signal Strength Indication (RSSI) เป็น วิธีการวัดความแรงของสัญญาณในการส่งสัญญาณวิทยุ ตาม ความเป็นจริงของสัญญาณโดยทั่วไป เมื่อระยะทางไกลออกไป สัญญาณก็จะอ่อนลง ดังนั้นค่า RSSI นั้นก็จำเป็นต่อการส่ง สัญญาณเช่นกัน เพราะจะสามารถรับรู้ได้ว่าเครื่องรับสัญญาณที่ ใช้งานอยู่นั้นจะมีประสิทธิภาพที่ระยะทางเท่าใด หรือกำลังใน การส่งเท่าใดจึงจะเหมาะสม โดยค่า RSSI มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm)

สำหรับการวัดความแรงของสัญญาณ ที่แปลงค่าความ แรงมาเป็นแรงดันไฟฟ้าานั้น มักไม่ใช้ในงานที่ต้องการความ แม่นยำสูง เนื่องจากมีความแปรปรวนของสัญญาณตาม สภาพแวดล้อมสูงเพราะแต่ละสภาพแวดล้อมมีความแตกต่าง กัน การที่จะทำให้ความแรงของสัญญาณมีความน่าเชื่อถือคือ จะต้องเก็บข้อมูลไว้หลายๆ ครั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์ภายหลังจะ ทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยลง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น อาจจะมีสาเหตุมาจากต่าง ๆ ดังนี้

1. การสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรงทำให้การวัดมุมใน ระยะทางที่ไกลจะก่อให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้
2. เกิดจากเครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูงกว่าส่งสัญญาณไป ครอบคลุมเครื่องส่งที่มีกำลังส่งต่ำกว่า
3. คลื่นที่การแพร่ถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอก เช่น และค่าความชื้นในอากาศ ปัจจัยเหล่านี้จะทำให้เกิดความ คลาดเคลื่อนสูงเมื่อระยะ ทางเพิ่มมากขึ้น

สำหรับค่าความแรงของสัญญาณมากที่สุดที่อุปกรณ์ XBeE PRO สามารถแสดงผลได้ (RSSI Offset) มีค่าเท่ากับ -40 dBm และความแรงสัญญาณกำลังส่งในระดับต่างๆ แสดง ดังตารางที่ 1 [5]

ตารางที่ 1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง Power Level กับความแรงของสัญญาณ

Power Level	ความแรงของสัญญาณ
0	10 dBm
1	12 dBm
2	14 dBm
3	16 dBm
4	18 dBm

2.2 การวัดค่าความแรงของสัญญาณ

การวัดค่าความแรงของสัญญาณ เป็นวิธีการวัดค่าความแรงของสัญญาณวิทยุระหว่างเซ็นเซอร์ไร้สายตัวหนึ่งกับเซ็นเซอร์ไร้สายอีกตัวหนึ่งโดยมีความสัมพันธ์กันตามสมการ (1) [2]

$$RSSI = -(10\log_{10} d + A) \quad (1)$$

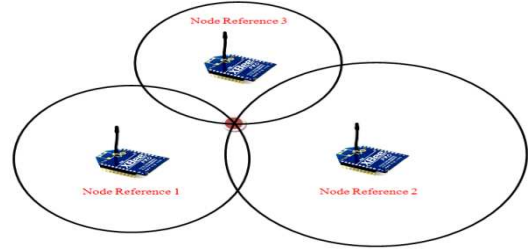
- เมื่อ *RSSI* คือค่าความแรงของสัญญาณวิทยุ มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm)
- n* คือค่าคงที่ของกระจายสัญญาณของสถานที่นั้นๆ
 - d* คือระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ไร้สาย
 - A* คือค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร

จาก (1) เราจะเห็นได้ว่า ถ้าค่าระยะทาง (*d*) เพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่า *RSSI* ลดลง ซึ่งงานวิจัย [1], [2] นำค่าการวัดความแรงของสัญญาณนี้ไปใช้เพื่อหาระยะทาง และประมาณตำแหน่งวัตถุ

2.3 การวิเคราะห์หาตำแหน่งโดยใช้ค่า *RSSI* [2], [3]

การวิเคราะห์หาตำแหน่ง การนำมาใช้งานอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ในเรื่องของตรีโกณมิติ เมื่อเราต้องการวิเคราะห์หาตำแหน่งของเซ็นเซอร์โหนดตัวรับที่เราต้องการทราบ จะทำการวัดการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากเซ็นเซอร์โหนดอ้างอิง ซึ่งจะเป็นค่าที่เรานำมาคำนวณหา

ตำแหน่ง สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกับการวิเคราะห์หาตำแหน่งได้ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกับการวิเคราะห์ตำแหน่ง

ในการคำนวณหาตำแหน่งของเซ็นเซอร์โหนดตัวรับ ทำได้โดยการกำหนดจุดของเซ็นเซอร์โหนดตัวรับที่เราต้องการทราบขึ้นมาจากนั้นใช้ สมการการหาตำแหน่ง (Distance formula) เพื่อหาระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์โหนดอ้างอิงทั้ง 3 โหนดกับตำแหน่งของโหนดเซ็นเซอร์ตัวรับ แล้วจะได้สมการเชิงเส้นมาจำนวน 3 สมการคือ [2]

$$(N_1x - Rx)^2 + (N_1y - Ry)^2 = d_1^2 \quad (2)$$

$$(N_2x - Rx)^2 + (N_2y - Ry)^2 = d_2^2 \quad (3)$$

$$(N_3x - Rx)^2 + (N_3y - Ry)^2 = d_3^2 \quad (4)$$

ทำการแปลงสมการโดยนำสมการที่ (2) - (3) และสมการที่ (3) - (4) จะได้สมการใหม่เป็น [2].

$$\begin{bmatrix} a * Rx + b * Ry = e \\ c * Rx + d * Ry = f \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากนั้นจึงใช้ Cramer's Rule เพื่อแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะได้คำตอบออกมาเป็นตำแหน่งซึ่งการหาคำตอบสามารถได้ดัง (5) และ (6).

$$Rx = \frac{\text{Det} \begin{vmatrix} e & b \\ f & d \end{vmatrix}}{\text{Det} \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}} \quad (7)$$

$$Ry = \frac{\text{Det} \begin{vmatrix} a & e \\ c & f \end{vmatrix}}{\text{Det} \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}} \quad (8)$$

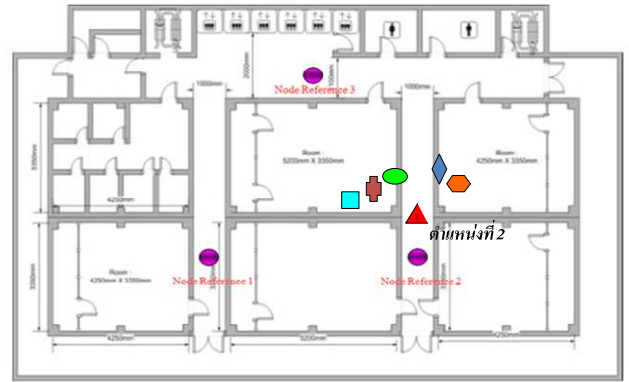
จากการแก้สมการข้างต้นเราจึงสามารถคำนวณหาตำแหน่งในทางแกน x และแกน y ได้

3. การทดสอบเพื่อหาตำแหน่งวัตถุในระยะทางต่าง ๆ

การทดสอบเพื่อหาความแรงสัญญาณในตำแหน่งต่างๆ ได้มีการทดสอบจากผู้วิจัยหลายคนเช่น [7], [8] ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อสัญญาณมีความแรงสูง ผลของมัลติพาทจะเกิดขึ้นมากในระยะทางใกล้ และจะน้อยลงเมื่อระยะทางไกลออกไป ดังนั้นเพื่อลดผลที่จะเกิดจากมัลติพาท การปรับลดกำลังส่งให้เหมาะสมกับพื้นที่จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อให้การระบุตำแหน่งวัตถุมีความแม่นยำมากขึ้น ในการทดลองนี้ ใช้โมดูล XBee-PRO [5] เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ชนิดอั้งอิง และเซ็นเซอร์ชนิดที่ใช้ระบุตำแหน่งวัตถุ

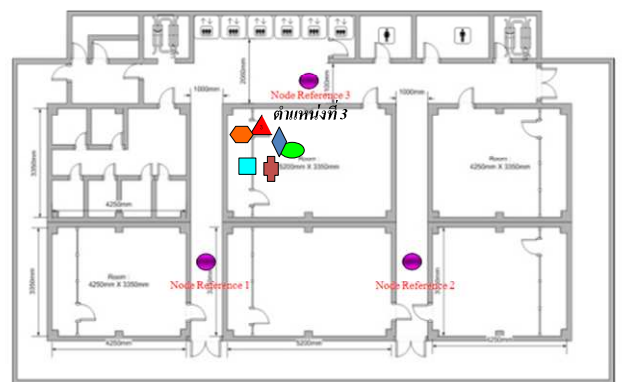
3.1 การวัดหาตำแหน่งที่ระดับความแรงของสัญญาณต่าง ๆ

การวัดหาตำแหน่งที่ระดับความแรงของสัญญาณต่างๆ การทดลองที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2 - 5 เป็นการวัดค่าความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่ทำการทดลองที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ชนิดอั้งอิงทั้ง 3 โหนด จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาตำแหน่งด้วยสมการ (2), (3) และ (4) ทำการทดลองโดยเปลี่ยนระดับความแรงของสัญญาณจากระดับ PL = 4 ถึง PL = 0 ตามลำดับ ค่าที่วัดได้มีผลการทดลองดังตารางที่ 2 ภาพแสดงความคลาดเคลื่อนของการวัดรวมทั้ง 4 ตำแหน่งแสดงดังภาพที่ 6



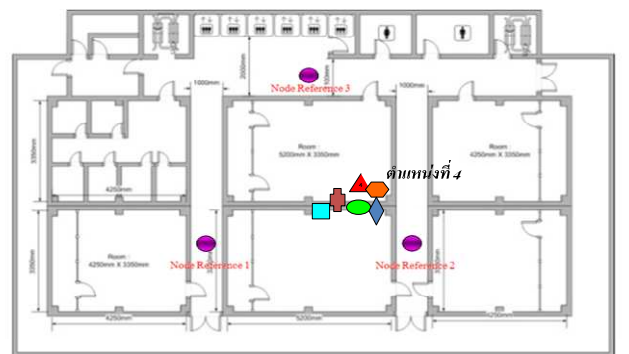
▲ ตำแหน่งจริง □ Level 4 ⊕ Level 3 ● Level 2 ◆ Level 1 ⬡ Level 0

ภาพที่ 3 แสดงการวัดหาตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับความแรงของกำลังส่งต่างๆ



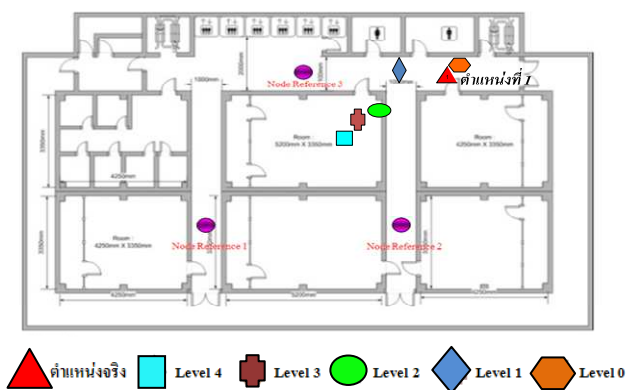
▲ ตำแหน่งจริง □ Level 4 ⊕ Level 3 ● Level 2 ◆ Level 1 ⬡ Level 0

ภาพที่ 4 แสดงการวัดหาตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับความแรงของกำลังส่งต่างๆ



▲ ตำแหน่งจริง □ Level 4 ⊕ Level 3 ● Level 2 ◆ Level 1 ⬡ Level 0

ภาพที่ 5 แสดงการวัดหาตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับความแรงของกำลังส่งต่างๆ



▲ ตำแหน่งจริง □ Level 4 ⊕ Level 3 ● Level 2 ◆ Level 1 ⬡ Level 0

ภาพที่ 2 แสดงการวัดหาตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับความแรงของกำลังส่งต่างๆ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบรวมการวัดทั้ง 4 ตำแหน่ง

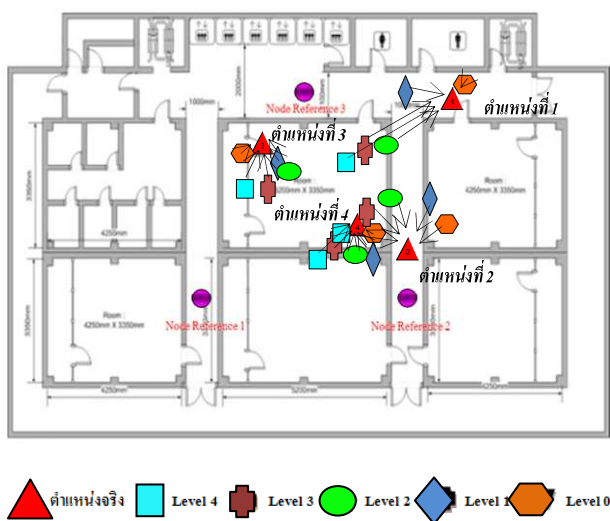
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งจริง	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Rx	23.31	14.861	18.088	19.975	20.9723	23.475
Ry	17.32	10.447	12.83	14.734	17.388	18.274
ΔRx		8.449	5.222	3.335	2.3377	-0.165
ΔRy		6.873	4.49	2.586	-0.068	-0.954
ΔR		10.89145	6.88	4.22	2.3386	0.968
ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งจริง	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Rx	20	13.328	15.522	18.952	22.21	23.345
Ry	4.35	5.3434	6.4154	7.4374	7.908	6.96
ΔRx		6.672	4.478	1.048	-2.21	-3.345
ΔRy		-0.9934	-2.0654	-3.0874	-3.558	-2.61
ΔR		6.7455	4.9313	3.260	4.1885	4.243
ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งจริง	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Rx	5.42	5.031	7.1635	7.0296	6.725	4.146
Ry	13.65	10.93	10.312	13.0378	13.2965	13.37
ΔRx		0.389	-1.7435	-1.6096	-1.305	1.274
ΔRy		2.72	3.338	0.6122	0.35	0.28
ΔR		2.7476	3.7659	1.7221	1.3511	1.3044
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งจริง	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Rx	17.56	12.885	15.1825	17.893	17.657	17.6375
Ry	5.75	4.557	5.503	4.099	3.828	4.095
ΔRx		4.675	2.3775	-0.3333	-0.097	-0.077
ΔRy		1.193	0.247	1.651	1.922	1.655
ΔR		4.825	2.390	1.6842	1.92444	1.6568

Rx คือ ระยะตามแนวแกน X Ry คือ ระยะตามแนวแกน y

ΔRx คือ ระยะขจัดตามแนวแกน X

ΔRy คือ ระยะขจัดตามแนวแกน y

ΔR คือ ระยะขจัดรวม



ภาพที่ 6 ภาพแสดงความคลาดเคลื่อนของการวัดรวมทั้ง 4 ตำแหน่ง

4. วิจัยรณผลการทดสอบ

จากการทดลองพบว่า การกำหนดความแรงกำลังส่งในระดับสูงจะทำให้การครอบคลุมพื้นที่ในบริเวณกว้างได้ แต่จะส่งผลให้ระบุตำแหน่งผิดพลาดสูง เนื่องจากผลกระทบของมัลติพาท เมื่อทำการปรับลดกำลังส่งลงจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากมัลติพาทลดลงได้ ทำให้สามารถระบุตำแหน่งวัตถุได้แม่นยำมากขึ้น โดยการระบุตำแหน่งยังคงมีความผิดพลาดอยู่ อันเนื่องมาจากการทดลองนี้ใช้วิธีการประมาณระยะทางอย่างง่ายโดยการการพิตเส้นตรงความเข้มของสัญญาณ

5. แนวทางในการพัฒนา

การทดลองในงานวิจัยนี้ทำอยู่บนพื้นฐานของการประมาณระยะทางโดยใช้ค่า RSSI ด้วยการพิตเส้นตรงความเข้มของสัญญาณ ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน มีการประมวลผลน้อย โดยจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวไฟ เพื่อการออกแบบการครอบคลุมพื้นที่ของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย [9] เพื่อทำการกำหนดกำลังส่งและตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ให้เหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ได้ต่อไป

6. สรุป

บทความนี้ได้แสดงให้เห็นว่า ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ระดับความแรงของสัญญาณต่างๆ ภายในอาคาร มีความแตกต่างกันเนื่องจากผลจากมัลติพาท หากเรากำหนดค่าความแรงของสัญญาณของเซ็นเซอร์ให้เหมาะสม โดยที่ไม่ให้ความสำคัญในเรื่องระดับความแรงของกำลังส่งให้เหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ จะส่งผลให้การคำนวณหาระยะทาง และการระบุตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นหากทำการหาตัวแปรของระดับความแรงสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารในแต่ละพื้นที่ ที่นำระบบการระบุตำแหน่งวัตถุไปใช้งาน

จะสามารถทำให้การหาระยะทาง และการระบุตำแหน่งวัตถุมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการสนับสนุนโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี IRPUS สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม เลขที่โครงการ I352A07017 “การประยุกต์ใช้โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ZigBee ในการติดตามเด็กพลัดหลง”

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] วิริยาพร ภัทรภากร และ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต, “การหาระยะทางในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยใช้ค่า RSSI”, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พค. 2551.
- [2] ภาคย์ สอนเสาวภาคย์ และ ชัชชัย คุณนบัว, “ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารโดยใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4”, ECTI-CARD 2009, โรงแรมอมารี ดอนเมือง แอร์พอร์ต, May 4-6, 2009.
- [3] A.M.Ladd, K.E.Bekris, G.Marceau, A.Rudys, L.E.Kavraki, D.S. Wallach. “Robotics-based location sensing using Wireless and Optical Communication.”, 2002.
- [4] Sathaporn Promwong, Jun-ichi Takada, Navarat Lertsirisopon, Pichaya Supanakoon and Prakrit Tangtisanon, “Multi-Rays UWB Channel Modeling Based on Friis’ Formula”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON-26), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 6-7 พย. 2546.

- [5] XBee/XBee-PRO OEM RF Modules, “Product Manual v1.xCx- 802.15.4 Protocol,” Digi International Inc., http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_A.pdf
- [6] ZigBee Alliance, “ZigBee Specification Document 053474r13”, 1 Dec. 2006.
- [7] กิรติช สายพัทลุง, อธิสิทธิ์ ลาวัง, เพชร นันทิวัฒนา, บุญญฤทธิ์ ลักษณะประณัย และ ปรีชา กอเจริญ, “สาเหตุของความคลาดเคลื่อน เนื่องจากความสูงของโหนดในการหาระยะทางระหว่างโหนด และการระบุตำแหน่งวัตถุในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ใช้วิธีการ ประมาณตำแหน่ง จากค่า RSSI”, International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT2010), Chiangmai, 5-7 January 2010.
- [8] Tor-Inge Kvakrsrud, “Range Measurements in an Open Field Environment”, Design Note DN018, Texas Instrument. <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/an/swra169a/swra169a.pdf>
- [9] อธิสิทธิ์ ลาวัง, กิรติช สายพัทลุง, เพชร นันทิวัฒนา, บุญญฤทธิ์ ลักษณะประณัย, และปรีชา กอเจริญ, “การประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวไฟ เพื่อการออกแบบการครอบคลุมพื้นที่ของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย”, International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT 2010), Chiangmai, 5-7 January 2010.