

ระบบวิทยุรู้คิดที่ใช้การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการจัดการทรัพยากรคลื่นวิทยุแบบเข้าถึงหลายทาง



2705313941

CU Thesais 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

นายมนุสส์ เพ็ญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.



5671435021\_2705313941

Cognitive Radio System Using Machine Learning for Multi-Access Radio Resource  
Management

Mr. Manus Pengnoo

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University



2705313941

CU Theses 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบวิทยุรู้คิดที่ใช้การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการจัดการทรัพยากรคลื่นวิทยุแบบเข้าถึงหลายทาง
โดย	นายมนุสส์ เฟ็งนู
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.พิสิฐ วณิชชานันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.พิสิฐ วณิชชานันท์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ)

มนุสส์ เฟิ่งนู : ระบบวิทยุรู้คิดที่ใช้การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการจัดการทรัพยากร  
คลื่นวิทยุแบบเข้าถึงหลายทาง. ( Cognitive Radio System Using Machine  
Learning for Multi-Access Radio Resource Management) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.  
ดร.ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร.พิสิฐ วณิชชานันท์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบการสื่อสารไร้สายโดยมุ่งเน้นที่ย่านความถี่เทระเฮิรตซ์ซึ่งเป็นย่านที่ได้รับความนิยมอย่างสูงสำหรับการสื่อสารในอนาคตและมีอุปสรรคสำคัญของการแพร่สัญญาณคือการถูกบดบังโดยสิ่งกีดขวาง โดยใช้หลักการเรียนรู้ของเครื่องและปัญญาประดิษฐ์มาช่วยพัฒนาการรู้คิดและความสามารถในการตัดสินใจของอุปกรณ์ในระบบสื่อสาร ในวิทยานิพนธ์นำหลักการสะท้อนของสัญญาณบนผิวตัวสะท้อนในรูปแบบเชิงกลและวิธีการไบแอสกระแสปower นำเสนอหลักการสนามศักร์ประดิษฐ์ และปัญญาประดิษฐ์มาพัฒนาร่วมกันเพื่อปรับปรุงการสื่อสารไร้สายภายใต้สภาวะที่มีสิ่งกีดขวางบดบัง ผลการศึกษาและการจำลองพบว่าสนามศักร์ประดิษฐ์ช่วยให้ระบบสื่อสารสามารถรู้รูปแบบการกีดขวางในพื้นที่ที่พิจารณาและทำการตัดสินใจเลือกส่งสัญญาณในทิศทางที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานของสถานีฐานมากกว่าการส่งสัญญาณโดยไม่มีข้อมูลของสนามศักร์ประดิษฐ์มาก และการใช้ปัญญาประดิษฐ์ทางด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์มาพัฒนาในระบบช่วยให้การสร้างสนามศักร์ประดิษฐ์นั้นสามารถทำได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วมากขึ้น ประกอบกับการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องคือการเรียนรู้แบบจงใจพัฒนาเข้ากับตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณช่วยให้ตัวรับและตัวส่งสัญญาณเรียนรู้การวางตำแหน่งซึ่งสามารถทำให้สถานการณ์ที่มีสิ่งกีดขวางนั้นระบบสื่อสารสามารถมีการสื่อสารได้อย่างต่อเนื่องและประหยัดพลังงานมากที่สุด และช่วยให้การวางโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณมีความครอบคลุมสูงสุดซึ่งเปรียบเทียบได้จากผลการวางแผนโครงข่ายแบบค้นหาทุกกรณี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....



2705313941

CU-Thesis 5671435021 dissertation / rev: 30072562 14:11:05 / seq: 8

# # 5671435021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD:

Manus Pengnoo : Cognitive Radio System Using Machine Learning for Multi-Access Radio Resource Management. Advisor: Assoc. Prof. Dr. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ Co-advisor: Dr. Pisit Vanichchanunt

This thesis proposes a wireless communication system with a focus on the frequency of the terahertz frequency, which receives high attention for future communications and the major problem of signal transmission is blocked by obstacles. We used machine learning principles and artificial intelligence to develop the cognitive and decision-making capabilities of communication devices. In the thesis, we use reflective mirrors, both mechanical and electric current bias. We present the principle of the artificial potential field (APF) and artificial intelligence developed together to improve wireless communication under obstructed conditions. The results of the study and simulation show that the APF allows the communication system to know the pattern of obstructions in the area and decides to send signals in an effective and energy-saving direction of the base station rather than transmitting without data of the APF. The author presents the use of computer vision to simulate the potential field to be more accurate and faster, together with the application of reinforcement learning in order to develop the receiver and transmitter to learn positioning that enables the system to communicate continuously and the best energy saving in an environment where signals are obstructed. As well as locating the network of the transmitter to have the highest coverage, which can be compared from the results of the exhaustive search algorithm.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความสนับสนุนด้วยดีจาก ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒมงคลการ ที่ชี้แนะแนวทางและสนับสนุนผู้เขียนด้วยดีตลอดมาใน เวลาหลายปี คอยเอาใจใส่ติดตามช่วยเหลือผู้เขียนเสมอมาทั้งในเรื่องงานวิชาการด้านต่าง ๆ รวมถึงเรื่อง ชีวิตส่วนตัว

ขอบพระคุณ รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสิริพิบูลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาที่สอนวิชาความรู้ด้านวิชาการ อบรมสั่งสอนการใช้โปรแกรมต่าง ๆ รวมถึงกิจกรรมทางวิชาการที่มอบประสบการณ์ที่มีค่าให้ผู้เขียน มากมาย และทุ่มเทการทำงานด้านวิชาการเพื่อผู้เขียนอย่างเต็มที่ รวมทั้งอาจารย์ ดร.พิสิฐ วณิชชานันท์ ที่เปรียบเป็นทั้งรุ่นพี่และอาจารย์ที่ช่วยเหลือแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมาและให้มุมมองใหม่ ๆ ในการทำงานและการใช้ชีวิตแก่ผู้เขียน

ขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการทุกท่านที่ล้วนแล้วแต่เคยประสาทความรู้ให้กับผู้เขียน ซึ่ง ผู้เขียนให้ความเคารพอย่างสูงเป็นการส่วนตัวทุกท่าน ทั้งในมุมมองทางด้านวิชาความรู้และโดยส่วนตัว

ที่ลืมไม่ได้คือผู้วิจัยจาก TSSG Lab ที่ Waterford Institute of Technology (WIT), Ireland คือ Dr. Sasitharan Balasubramaniam, Dr. Michael Barros รวมทั้งสมาชิกอื่น ๆ ในแล็บที่ ช่วยเหลือและมุ่งมั่นวิจัยทางด้านเทอร์เออร์ทรีร่วมกับผู้เขียนรวมถึงดูแลผู้เขียนเป็นอย่างดีในขณะพำนัก อยู่ประเทศไอร์แลนด์เพื่อทำงานวิจัย และมอบประสบการณ์วิธีการเขียนบทความในระดับนานาชาติที่ ช่วยพัฒนางานเขียนของผู้เขียนได้เป็นอย่างดี

และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่น้องในห้องปฏิบัติการ TSRL วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยที่มอบบรรยากาศการทำงานวิจัยที่ยืดเยื้อและสนุกสนานในการทำงานเป็นอย่างมาก รวมทั้งบุคคลอีกมากมายที่ไม่ได้ระบุชื่อในที่นี้ที่ผู้เขียนระลึกถึงเสมอ ที่มีส่วนช่วยผลักดันให้ตลอดเส้นทางการศึกษาของผู้เขียนมีความก้าวหน้าและประสบความสำเร็จได้ ซึ่งผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่าง จริงใจมาในโอกาสนี้

มนุสส์ เฝิงนู

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	6
1.2 วัตถุประสงค์.....	11
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	11
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ.....	12
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องของคลื่นเทระเฮิรตซ์และการเรียนรู้ของเครื่อง.....	14
2.1 ความรู้พื้นฐานคลื่นสัญญาณในย่านเทระเฮิรตซ์.....	14
1) การแผ่อกของสัญญาณ (Spreading).....	14
2) การดูดซับพลังงานจากโมเลกุล (Molecular absorption).....	15
3) การสะท้อน (Reflection).....	15
4) การกระเจิง (Scattering).....	16
5) การเลี้ยวเบน (Diffraction).....	17

6)   แบบจำลอง Signal – Noise Ratio .....	18
2.2 การเรียนรู้ของเครื่องและปัญญาประดิษฐ์.....	19
1)   การเรียนรู้แบบจูงใจ (Reinforcement Learning).....	20
2)   การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning).....	21
บทที่ 3 การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณเทระเฮิรตซ์โดยใช้ตัวสะท้อน .....	26
3.1 โปรแกรมจำลองการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์.....	26
3.2 การจำลองพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณเทระเฮิรตซ์โดยใช้การเรียนรู้เชิงสถิติของกระจก สะท้อน.....	35
1)   ผลการจำลองสำหรับสิ่งกีดขวางในรูปแบบห้องนั่งเล่น.....	37
2)   ผลการจำลองสำหรับสิ่งกีดขวางในรูปแบบสุ่ม .....	42
3)   เปรียบเทียบผลการช่วยเหลือผู้ใช้งานในแต่ละวิธี.....	46
4)   วิเคราะห์ผลของระบบการเรียนรู้ด้วยตนเองในการเพิ่มปริมาณความครอบคลุมของ สัญญาณ.....	47
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้กระจกสะท้อนสัญญาณร่วมกับการใช้สนามศักย์ประดิษฐ์สำหรับการสื่อสาร ย่านเทระเฮิรตซ์.....	49
4.1 ตัวสะท้อนสัญญาณร่วมด้วยการใช้งานสนามศักย์ประดิษฐ์.....	50
1)   สนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field, APF) .....	51
2)   สนามศักย์ดึงดูด (Attractive potential).....	51
3)   สนามศักย์แรงผลัก (Repulsive potential) .....	51
4)   ฟังก์ชันสนามศักย์รวม (Total potential function).....	52
5)   การเลือกสัญญาณสำหรับบริเวณส่วนบุคคลด้วยการใช้ APF .....	52
4.2 การจำลองผลโดยการทำ Simulation .....	54
1)   การจำลองสถานการณ์ .....	54
2)   ผลของสนามศักย์ประดิษฐ์ต่อแนวเส้นทางของคลื่นสัญญาณ .....	56
3)   การพิจารณาค่า SNR ของสัญญาณเทระเฮิรตซ์ในบริเวณส่วนบุคคล .....	58



4.3 สรุปและอภิปรายผล ..... 61

บทที่ 5 การปรับบีม การไบแอส การสะท้อน และคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับระบบสื่อสารย่านเทระ  
เฮิร์ตซ์ ..... 62

5.1 แบบจำลองการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ร่วมกับระบบสื่อสารเทระเฮิร์ตซ์ ..... 62

5.2 แบบจำลองระบบควบคุมการสื่อสารเทระเฮิร์ตซ์ ..... 62

5.3 รูปแบบการส่งสัญญาณเทระเฮิร์ตซ์จากสายอากาศ ..... 65

5.4 การบังคับทิศการสะท้อนของบีมสัญญาณด้วยการไบแอสกระแสไฟฟ้า ..... 66

5.5 การใช้ Deep Learning สำหรับคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการเรียนรู้และจำแนกชนิดพื้นผิวสิ่งกีด  
ขวาง..... 68

5.6 ผลการจำลอง..... 71

5.7 สรุปและอภิปรายผล ..... 74

บทที่ 6 การพัฒนาระบบอัจฉริยะและการวางแผนโครงข่ายเทระเฮิร์ตซ์ด้วยปัญญาประดิษฐ์..... 76

6.1 แบบจำลองการพัฒนาการเรียนรู้แบบแรงจูงใจของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ ..... 76

1) การจำลองระบบ ..... 78

2) ผลการจำลอง ..... 79

6.2 การวางแผนโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณ ..... 81

1) การจำลองระบบ ..... 83

2) ผลการจำลอง ..... 84

6.3 การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการวางแผนโครงข่ายด้วยการเรียนรู้ของตัวส่งสัญญาณ..... 86

6.4 สรุปและอภิปรายผล ..... 90

บทที่ 7 ..... 92

บทสรุปและข้อเสนอแนะ ..... 92

บรรณานุกรม..... 94

ประวัติผู้เขียน..... 98



2705313941



2705313941

CU Theses 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1-1 พยากรณ์ปริมาณอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อโครงข่ายการสื่อสารในอนาคต.....	6
รูปที่ 1-2 พยากรณ์ปริมาณข้อมูลของการสื่อสารไร้สายในระบบ 2G, 3G, 4G และ 5G โดย Ericsson mobility report 2019 .....	7
รูปที่ 2-1 แผนภาพของ Reinforcement Learning.....	20
รูปที่ 2-2 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทของ Deep Learning.....	22
รูปที่ 2-3 ตัวอย่างการใช้ตัวกรองสร้างแผนที่ลักษณะเด่นด้วยค่าการเลื่อน (stride) ที่ละ 1 และ 2 ตำแหน่ง .....	23
รูปที่ 2-4 ตัวอย่างการเติมค่าขอบ (padding) ให้อินพุตในการกรองเพื่อสร้างแผนที่ลักษณะเด่น.....	23
รูปที่ 2-5 ฟังก์ชัน ReLU.....	24
รูปที่ 2-6 รูปแบบการทำ max pooling.....	24
รูปที่ 2-7 ตัวอย่างการย่อขนาดข้อมูลจากการทำ max pooling.....	25
รูปที่ 3-1 ผลการจำลองการสร้างห้องขนาด 5 x 5 เมตร .....	27
รูปที่ 3-2 ผลการจำลองการสร้างสิ่งกีดขวาง 3 ชั้น .....	28
รูปที่ 3-3 ผลการจำลองการติดตั้งตัวส่งสัญญาณพร้อมคำนวณทิศทางการแพร่สัญญาณ .....	29
รูปที่ 3-4 ผลการจำลองการติดตั้งกระจะสะท้อน .....	30
รูปที่ 3-5 การจำลองคลื่นสะท้อนจากกระจก.....	31
รูปที่ 3-6 ผลการจำลองการคิดคำนวณพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของกระจกสะท้อน .....	31
รูปที่ 3-7 ตัวอย่างการปรับมุมของกระจก เป็น (a) 15 องศา และ (b) -30 องศา.....	32
รูปที่ 3-8 ตัวอย่างการติดตั้งกระจกที่ตำแหน่งและขนาดต่าง ๆ กัน .....	33
รูปที่ 3-9 ตัวอย่างการติดตั้งกระจกแบบโค้ง .....	34
รูปที่ 3-10 ตัวอย่างการติดตั้งกระจกแบบโค้งที่รัศมีความโค้ง 30 cm.....	34

รูปที่ 3-11 ระบบควบคุมตัวสะท้อนในการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์ภายในอาคาร .....	35
รูปที่ 3-12 แบบจำลองระบบเทระเฮิรตซ์ภายในห้องร่วมกับกระจก 4 ตัว .....	36
รูปที่ 3-13 การจัดวางสิ่งกีดขวางในรูปแบบห้องนั่งเล่น .....	37
รูปที่ 3-14 ผลการจำลองสิ่งกีดขวางในรูปแบบห้องนั่งเล่น และแสดงพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่เกิดขึ้น .....	37
รูปที่ 3-15 การสุ่มตัวอย่างตำแหน่งผู้ใช้งานจำนวน 1000 ตัวอย่าง .....	38
รูปที่ 3-16 ผลการจำลองใช้กระจกหมุนสะท้อนสัญญาณช่วยในจุดอับสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	39
รูปที่ 3-17 สถิติการรองรับผู้ใช้งานที่จุดอับสัญญาณ โดยแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละมุมของกระจก แต่แต่ละตัวสามารถช่วยสะท้อนสัญญาณไปถึง.....	40
รูปที่ 3-18 หน่วยพื้นที่การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณจากการกำหนดการตั้งค่ามุมกระจกในทุกกรณี.....	41
รูปที่ 3-19 การติดตั้งกระจกโดยตั้งค่าจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบ .....	41
รูปที่ 3-20 ค่ามุมที่มีค่าการช่วยเหลือผู้ใช้งานสะสมสูงสุดของกระจกแต่ละตัว .....	42
รูปที่ 3-21 การจำลองสิ่งกีดขวางแบบสุ่มจำนวน 5 ชั้น .....	43
รูปที่ 3-22 ผลการจำลองกระจกหมุนสะท้อนสัญญาณช่วยในจุดอับสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม.....	43
รูปที่ 3-23 สถิติการรองรับผู้ใช้งานที่จุดอับสัญญาณ โดยแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละมุมของกระจก แต่แต่ละตัวสามารถช่วยสะท้อนสัญญาณไปถึง ในกรณีสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม.....	44
รูปที่ 3-24 หน่วยพื้นที่การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณจากการกำหนดการตั้งค่ามุมกระจกในทุกกรณี ในการวางสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม.....	45
รูปที่ 3-25 การติดตั้งกระจกโดยตั้งค่าจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบในกรณีสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม..	45
รูปที่ 3-26 ค่ามุมที่มีค่าการช่วยเหลือผู้ใช้งานสะสมสูงสุดของกระจกแต่ละตัวในกรณีสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม.....	46
รูปที่ 3-27 ผลเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานและการช่วยเหลือจากตัวสะท้อนวิธีต่าง ๆ.....	47
รูปที่ 4-1 THz Software Defined System Block Diagram .....	49



รูปที่ 4-2 สถาปัตยกรรมระบบควบคุมการสื่อสารเทอร์เรสเตอร์ภายในอาคารโดยผู้ใช้งานอยู่ในบริเวณ ขอบเขตส่วนบุคคล (Personal Zone).....	50
รูปที่ 4-3 ขอบเขตส่วนบุคคลต้องการสัญญาณเทอร์เรสเตอร์หลายสัญญาณเพื่อความครอบคลุมพื้นที่ โดยรอบผู้ใช้งานเพื่อรับประกันว่าจะไม่สูญเสียการเชื่อมต่อสัญญาณในกรณี micro movement...	53
รูปที่ 4-4 แบบจำลองการติดตั้งกระจกสะท้อนสัญญาณเทอร์เรสเตอร์ภายในอาคาร แบบติดตั้งกระจก 3 ตัว (สีน้ำเงิน) และ 6 ตัว (สีแดง).....	55
รูปที่ 4-5 สนามศักยภาพประดิษฐ์ (APF) ของแบบจำลองในรูปที่ 4-4.....	56
รูปที่ 4-6 APF ของสัญญาณจากตัวส่งไปยังผู้ใช้งานที่มีการสะท้อนจากกระจกตัวที่ 1 .....	57
รูปที่ 4-7 APF ของสัญญาณจากตัวส่งไปยังผู้ใช้งานที่ที่มีการสะท้อนจากกระจกตัวที่ 2.....	57
รูปที่ 4-8 APF ของสัญญาณจากตัวส่งไปยังผู้ใช้งานที่ที่มีการสะท้อนจากกระจกตัวที่ 3.....	58
รูปที่ 4-9 ค่า SNR สูงสุดที่ผู้ใช้งานรับได้จากกระจกแต่ละตัว จำนวน 3 ตัวด้วยจำนวนสิ่งกีดขวางต่าง ๆ กัน และค่าของจำนวนแถบสายอากาศที่ถูกเปิดในกรณีที่ไม่มีการคำนวณค่า APF (เส้นประ) และมี การคำนวณค่า APF (เส้นทึบ).....	59
รูปที่ 4-10 ค่า SNR สูงสุดที่ผู้ใช้งานรับได้จากกระจกแต่ละตัว จำนวน 6 ตัวด้วยจำนวนสิ่งกีดขวาง ต่าง ๆ กัน และค่าของจำนวนแถบสายอากาศที่ถูกเปิดในกรณีที่ไม่มีการคำนวณค่า APF (เส้นประ) และมีการคำนวณค่า APF (เส้นทึบ).....	59
รูปที่ 4-11 จำนวนสัญญาณที่ผู้ใช้งานสามารถรับได้ในกรณีเกิดการกีดขวางตัวรับสัญญาณ ภายในระยะ 50 ซม.....	60
รูปที่ 4-12 จำนวนสัญญาณที่ผู้ใช้งานสามารถรับได้ในกรณีเกิดการกีดขวางตัวรับสัญญาณ ภายในระยะ 100 ซม. ....	60
รูปที่ 5-1 แบบจำลองระบบสื่อสารเทอร์เรสเตอร์ร่วมกับการตรวจจับวัตถุด้วย Computer Visions ..	62
รูปที่ 5-2 แบบจำลองระบบควบคุมการสื่อสาร.....	63
รูปที่ 5-3 มุมมองจากด้านบนของการส่งสัญญาณ.....	64
รูปที่ 5-4 การส่งสัญญาณที่เกิดการกระเจิงและการสะท้อนเนื่องจากการตกกระทบพื้นผิว .....	69
รูปที่ 5-5 ระดับสัญญาณที่ส่งตรงไปยังผู้ใช้งาน (สีน้ำเงิน) และสัญญาณที่มีการกระทบสิ่งกีดขวาง (สี แดง) ซึ่งเกิดการกระเจิงและการสะท้อนออกของสัญญาณ.....	70

รูปที่ 5-6 ตัวอย่างส่วนของกลุ่มพื้นผิววัสดุที่ทำการเทรนในระบบ Deep Learning คือคอนกรีต โลหะ และไม้.....	71
รูปที่ 5-7 การใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ผ่านระบบคลาวด์ในการช่วยจำลองรูปแบบสิ่งกีดขวาง .....	71
รูปที่ 5-8 ระดับ SNR ตามการปรับค่าความกว้างของบีมสัญญาณในค่าต่าง ๆ.....	72
รูปที่ 5-9 ค่ามุมสะท้อนที่เกิดจากค่าเฟสกราเดียนต์และความถี่ต่าง ๆ.....	72
รูปที่ 5-10 ตัวอย่างผลการตรวจจับผู้ใช้งานในระบบในเวลาต่อเนื่องกัน โดยเริ่มจากมีผู้ใช้งานคนเดียว (a) ผู้ใช้งานสองคน (b) ผู้ใช้งานสองคนที่เปลี่ยนตำแหน่งไป (c) ผู้ใช้งานสามคน (d) และผู้ใช้งานสามคนที่เปลี่ยนตำแหน่งไป (d).....	73
รูปที่ 5-11 สนามศักร์ทะเลเรียดซ์จากการคำนวณผลการตรวจจับจากรูป xx โดยพิจารณามุมมองของผู้ใช้งานคนแรก ผู้ใช้งานอื่น ๆ จะถูกนับเป็นสิ่งกีดขวาง .....	73
รูปที่ 5-12 จำนวนการเชื่อมต่อสำเร็จและไม่สำเร็จของผู้ใช้งานตามจำนวนผู้ใช้งานที่มีในระบบ .....	74
รูปที่ 5-13 อัตราการเชื่อมต่อของผู้ใช้งานเมื่อมีผู้ใช้งานในระบบเป็นจำนวนต่าง ๆ.....	74
รูปที่ 6-1 แบบจำลองระบบการเรียนรู้แบบจูงใจในอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ .....	77
รูปที่ 6-2 ไดอะแกรม Reinforcement Learning ของแบบจำลอง .....	77
รูปที่ 6-3 อัลกอริทึมส่วนการเรียนรู้ของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ.....	78
รูปที่ 6-4 การจำลองสภาพสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดตำแหน่งสิ่งกีดขวางและคำนวณแนวสายตา (a) และการวิเคราะห์สิ่งกีดขวางในระบบ (b).....	78
รูปที่ 6-5 ผลการเรียนรู้ของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ .....	79
รูปที่ 6-6 เส้นทางเดินของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติเมื่อผ่านการเรียนรู้เป็นจำนวน 1000 รอบ (a) 2000 รอบ (b) 3000 รอบ (c) และ 4000 รอบ (d).....	80
รูปที่ 6-7 แบบจำลองสิ่งแวดล้อมภายนอกอาคารขนาด 10x10 เมตรที่มีสิ่งกีดขวาง .....	81
รูปที่ 6-8 ความครอบคลุมสัญญาณของตัวส่งส แสดงขอบเขตของค่าระดับสัญญาณต่ำสุดที่ทำการสื่อสารได้ (SNR threshold distance) และการบดบังของสิ่งกีดขวาง.....	82
รูปที่ 6-9 โปรแกรมทำการจำลองสิ่งแวดล้อม และระบุตำแหน่งที่สามารถวางตัวส่งสัญญาณได้ .....	83
รูปที่ 6-10 พื้นที่ครอบคลุมสูงที่สุดจากการวางตำแหน่งที่คำนวณได้ของตัวส่งสัญญาณ 1 – 12 ตัว. 84	



2705313941

รูปที่ 6-11 การวางตำแหน่งที่ได้พื้นที่ครอบคลุมมากที่สุดโดยใช้ตัวส่งสัญญาณ 1-6 ตัวดังแสดงในรูป (a)-(f) ตามลำดับ .....	85
รูปที่ 6-12 เปรียบเทียบพื้นที่ครอบคลุมของการวางตำแหน่งตัวส่งสัญญาณที่ค่า SNR Threshold ต่าง ๆ.....	85
รูปที่ 6-13 ค่าพื้นที่ครอบคลุมและพื้นที่ซ้อนทับของตัวส่งสัญญาณ 2 ตัว .....	86
รูปที่ 6-14 การเรียนรู้ของตัวส่งสัญญาณจำนวน 1-4 ตัวตามภาพที่ (a) – (d) ตามลำดับ .....	87
รูปที่ 6-15 ค่าการซ้อนทับของสัญญาณจากตัวส่งจำนวน 1-4 ตัวตามภาพที่ (a) – (d) ตามลำดับ ...	88
รูปที่ 6-16 เปรียบเทียบการเรียนรู้ของตัวส่งสัญญาณในระบบที่มีตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว.....	89
รูปที่ 6-17 เปรียบเทียบตำแหน่งการวางเสาตัวส่งสัญญาณจากการคำนวณแบบ Exhaustive Search (a) และแบบให้ตัวส่งสัญญาณทำการเรียนรู้ด้วย Reinforcement Learning (b).....	90

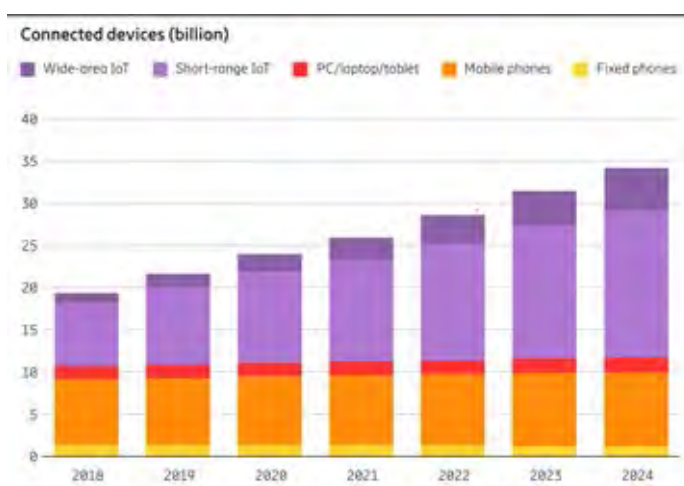


2705313941

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

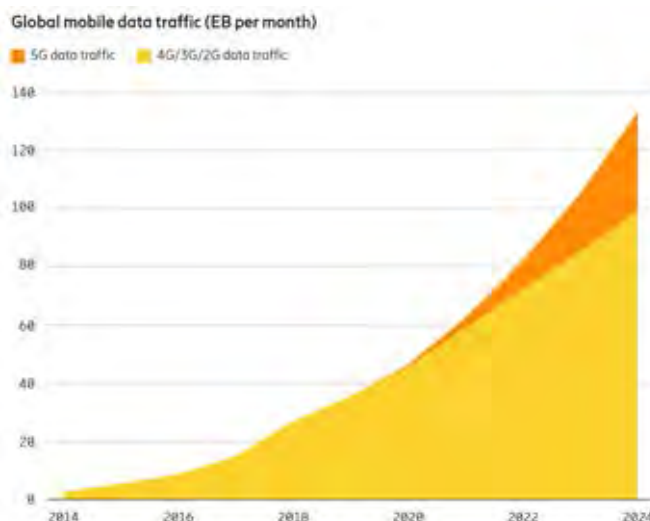
เทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายสมัยใหม่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มนุษย์สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารระหว่างกันด้วยความเร็วสูงและมีประสิทธิภาพกว่าในอดีตมาก นอกจากนี้ การเติบโตของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things (IoT))[1] ได้เปลี่ยนรูปแบบการใช้งานการสื่อสารไปอย่างชัดเจนและมีนัยสำคัญ เกิดมีอุปกรณ์การสื่อสารรูปแบบใหม่ ๆ มากมายที่สามารถเชื่อมต่อระหว่างกันแบบไร้สาย ทำให้การประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ในแทบทุกมิติ ตั้งแต่ การประยุกต์ใช้งานด้านการดูแลสุขภาพ การเฝ้าระวังสิ่งแวดล้อม เกษตรกรรมสมัยใหม่ รถยนต์ขับเคลื่อนเองอัตโนมัติ ระบบขนส่งที่ปลอดภัยและการจราจรที่สะดวก รวดเร็ว ในขณะที่การเชื่อมต่อสื่อสารต่าง ๆ ได้ขยายวงกว้างมากขึ้น ก่อให้เกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ มนุษย์กับสรรพสิ่งหรือแม้กระทั่งสรรพสิ่งกับสรรพสิ่ง [2] ในรูปแบบใหม่ ๆ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มาพร้อมกับความคาดหวังในเรื่องการเพิ่มขึ้นของการรองรับปริมาณการสื่อสารข้อมูลของระบบการสื่อสารไร้สายในอนาคต ความคาดหวังนี้มิได้ถูกจำกัดอยู่แค่กับผู้ใช้งานที่จะต้องเตรียมรับการใช้งานเทคโนโลยีและการบริการใหม่ ๆ ที่ใช้ปริมาณข้อมูลสูง ๆ เท่านั้น แต่ยังรวมถึงการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์และเครื่องจักรต่าง ๆ ด้วย [3]



รูปที่ 1-1 พยากรณ์ปริมาณอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อโครงข่ายการสื่อสารในอนาคต

โดยรูปที่ 1-1 แสดงการพยากรณ์ปริมาณอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อโครงข่ายการสื่อสารในอนาคต และรูปที่ 1-2 เป็นการคาดการณ์ปริมาณข้อมูลของการสื่อสารไร้สายในระบบ 2G, 3G, 4G และ 5G ในช่วงปี 2018 – 2024





รูปที่ 1-2 พยากรณ์ปริมาณข้อมูลของการสื่อสารไร้สายในระบบ 2G, 3G, 4G และ 5G โดย Ericsson mobility report 2019

วิสัยทัศน์ของการสื่อสารไร้สายในยุคถัดไปโดยเฉพาะในยุคสูงกว่า 5G (Beyond 5G) นั้นคาดว่าจะต้องสามารถรองรับการสื่อสารด้วยความเร็วสูงยิ่ง (ultra-high-speed data communications) ที่สูงถึงระดับเทระบิตต่อวินาที (Tbps) อย่างน้อยก็ภายในพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณขนาดเล็ก ๆ ในระยะ 10 เมตร ในการที่จะบรรลุเป้าหมายการสื่อสารความเร็วสูงในอัตราที่ต้องการนี้นั้น บรรดานักวิจัยได้ทำการศึกษาวินิจฉัยยานสเปกตรัมใหม่ในคลื่นความถี่ที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายไปจนถึงระดับคลื่นมิลลิเมตร (mm-wave) [4] ที่ 60 GHz หรือแม้แต่วัดระดับต่ำกว่าหนึ่งเทระเฮิรตซ์จนถึงหลักสิบเทระเฮิรตซ์ (0.3-10 THz) [5] การก้าวสู่คลื่นความถี่ที่สูงถึงระดับนี้สามารถทำให้เกิดมีการบริการใหม่ ๆ ถ้าสมมุติขึ้นตามมา ตัวอย่างเช่นสถานีฐานที่รองรับบริการมัลติมีเดียความเร็วสูงที่สามารถดาวน์โหลดคอนเทนต์ได้ในระยะเวลาอันสั้น การเชื่อมโยงกันของอุปกรณ์ขนาดจิ๋วจำนวนมหาศาลเข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ตหรือที่เรียกกันว่าอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งระดับนาโน (Internet of Nano Things, IoNT) [6] อย่างไรก็ตามในการใช้งานย่านความถี่ระดับเทระเฮิรตซ์นั้นก็จะมีพบกับอุปสรรคหลายประการที่ไม่พบในย่านความถี่ที่ต่ำกว่านัก อันดับแรกคือปัญหาเกี่ยวกับความต้องการการสื่อสารในแนวสายตา (Line of Sight, LoS) ระหว่างอุปกรณ์ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ โดยคลื่นความถี่ในย่านนี้จะสูญเสียพลังงานรวมทั้งมีการกระเจิงออกไปได้สูงมากจากการกระทบพื้นผิววัตถุที่มีความหยาบ อีกประการหนึ่งคือความยาวคลื่นที่มีขนาดสั้นมากนี้จะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Shift) ได้สูงตามไปด้วย อันดับต่อมาคือการลดทอนของสัญญาณ



ที่มีค่าสูงอันเนื่องมาจากการสูญเสียตามระยะทางที่มีค่าสูงตามค่าความถี่ที่สูงขึ้น และสุดท้ายคือผลของการดูดซับสัญญาณจากโมเลกุล (Molecular Absorption) ที่สามารถส่งผลกระทบต่อ การส่งสัญญาณได้เช่นกัน ซึ่งการศึกษาผลกระทบจากความถี่ต่าง ๆ ของโมเลกุลนั้นสามารถใช้ข้อมูล จากฐานข้อมูล HITRAN (High-resolution transmission molecular absorption database) [7]

จากปัญหาข้างต้นพบว่าในปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากได้พยายามพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อให้การสื่อสารในย่านความถี่เทระเฮิรตซ์สามารถเป็นไปได้ในทางปฏิบัติอย่างมีประสิทธิภาพ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นหนึ่งในงานที่พยายามศึกษาวิจัยพัฒนาระบบและทฤษฎีเพื่อให้การสื่อสารไร้ สายในย่านเทระเฮิรตซ์สามารถแก้ปัญหาของอุปสรรคในการสื่อสารเพื่อให้การสื่อสารสามารถขยาย ขอบเขตการให้บริการภายในอาคารได้ครอบคลุมมากขึ้นและมีคุณภาพในการสื่อสารสูงขึ้น โดย งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการใช้ตัวสะท้อน (Reflector) หรือกระจกมาช่วยในการ สะท้อนสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณเพื่อแก้ปัญหาการถูกบดบังสัญญาณโดยสิ่งกีดขวาง โดยตัว สะท้อนนั้นสามารถถูกควบคุมให้สะท้อนสัญญาณไปในทิศทางที่ต้องการได้ ซึ่งชนิดของการสะท้อน และการบังคับทิศทางในตัวสะท้อนนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบเชิงกลคือการควบคุมตัวสะท้อนด้วย มอเตอร์ ซึ่งงานวิจัยใน [8] ได้วิจัยและจำลองการใช้กระจกติดตั้งตามผนังภายในห้องเพื่อสะท้อน สัญญาณเทระเฮิรตซ์ซึ่งสามารถช่วยให้ระดับกำลังของสัญญาณที่ตำแหน่งของผู้ใช้งานนั้นมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่งานวิจัยใน [9] ใช้วิธีสะท้อนแบบการไปแอสด้วยกระแสไฟฟ้าสำหรับวัสดุชนิดพิเศษคือกรา ฟีน (Graphene) ซึ่งเป็นวัสดุสำคัญที่เป็นอนาคตของเทคโนโลยีการสื่อสารและอุปกรณ์ไฟฟ้าใน อนาคต [10] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวคิดสายอากาศแบบหลายแถบ โดยศึกษาจากงานวิจัยใน [11] ซึ่งแสดงถึงแนวทางและความเป็นไปได้ที่สายอากาศของตัวส่งสัญญาณหรือสถานีฐานสามารถมี แถบสายอากาศ (Antenna Strip) เล็ก ๆ บรรจุอยู่โดยรอบเพื่อควบคุมการส่งสัญญาณออกจากแถบ สายอากาศแต่ละตัวแบบเจาะจงได้ ในการวิเคราะห์สมรรถนะของการครอบคลุมสัญญาณได้เสนอ หลักการและแนววิธีการคำนวณการส่งสัญญาณด้วยหลักการเรย์เทรซซิง (Ray Tracing) โดยมี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือ [12] ซึ่งความรู้จากงานวิจัยดังกล่าวมาสามารถใช้กับการสื่อสารในย่านเทระ เฮิรตซ์ได้เป็นอย่างดีและมีประสิทธิภาพเนื่องจากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มีความต้องการที่จะ วิเคราะห์และจำลองระดับสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อุปกรณ์สามารถรับได้จริงโดยวิเคราะห์จาก สิ่งกีดขวางอย่างเป็นรูปธรรมโดยงานวิจัยโดยทั่วไปใช้หลักการของความน่าจะเป็นของการมีเส้นแนว สายตา (LoS Probability) [8, 13] ซึ่งยังไม่สามารถคำนวณการได้รับสัญญาณในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ได้อย่างแม่นยำ และจากเป้าหมายที่ต้องการวิเคราะห์ข้อมูลจากสิ่งกีดขวางอย่างละเอียดนั้นทางผู้วิจัย ได้ผนวกงานวิจัยอีกสาขาหนึ่งคืองานวิจัยทางด้านกรนำทางของหุ่นยนต์ซึ่งได้มีการนำเสนอแนวคิด ของสนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field) [14] ขึ้นโดยทำการสร้างสนามจำลองของสิ่งกีด ขวางและเป้าหมายของการนำทางหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้และมุ่งหน้าสู่



2705313941

CD :Thesis 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

เป้าหมายได้ในเส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งทางผู้เขียนได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์กับการจำลองสิ่งกีดขวางในการสื่อสารไร้สายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สำหรับการพัฒนาทางด้านซอฟต์แวร์นั้นเทคโนโลยีทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เป็นวิทยาการสำคัญของพัฒนาการทางคอมพิวเตอร์ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การทำให้คอมพิวเตอร์หรือสมองกลมีความสามารถคิดและมีกระบวนการคิดและการตัดสินใจที่ดีและสามารถตัดสินใจเองโดยอัตโนมัติ (Autonomous) ได้ใกล้เคียงกับกระบวนการคิดของมนุษย์มากที่สุด [15] ซึ่งองค์ความรู้สำคัญของความก้าวหน้าทางปัญญาประดิษฐ์นั้นคือการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการประยุกต์ใช้ความรู้ทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและตัดสินใจ โดยในทางวิศวกรรมนั้นเครื่องมือที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ให้ระบบมีการเรียนรู้เพื่อวิเคราะห์และตัดสินใจคือเครื่องมือ “Machine Learning” [16] หรือ “การเรียนรู้ของเครื่อง” ที่มีวิธีการหลากหลายและเป็นที่ยอมรับเช่น Genetic Algorithm (GA) ที่จำลองข้อมูลโดยเปรียบเทียบกับหน่วยทางพันธุกรรม หรือ Artificial Neuron Network (ANN) หรือโครงข่ายประสาทเทียมที่จำลองกระบวนการสื่อสารประสาทของมนุษย์ เป็นต้น [17, 18], โดยแต่เดิมวิธีการเรียนรู้ใน Machine Learning นั้นแม้จะไม่มีแบ่งประเภทที่ชัดเจนแต่สามารถแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ ตามประเภทของการเรียนรู้ คือ Supervised Learning คือการเรียนรู้แบบมีการชี้แนะว่าผลที่ได้นั้นถูกต้องหรือไม่หรือสามารถจำแนกประเภทได้ว่าผลที่ได้ออกมาควรจะเป็นอะไร และ Unsupervised Learning คือให้ระบบมีการเรียนรู้ด้วยตนเองจากข้อมูลข่าวสารที่ได้รับมาและสามารถแยกแยะข่าวสารที่ได้รับมาได้จากการเรียนรู้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งความสามารถสร้างกระบวนการเรียนรู้ของเครื่องเหล่านี้ได้ถูกริเริ่มนำเสนอให้มาใช้มีส่วนช่วยในการควบคุมและจัดการคลื่นวิทยุของ SDR ในการนำเสนอวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกของ Joseph Mitola III [19] โดยเรียกอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่สามารถเรียนรู้จากระบบภายนอกและตัดสินใจได้ว่า “Cognitive Radio” หรือวิทยุรู้คิด และในเวลาต่อมาไม่นานการค้นคว้าวิจัยในหัวข้อเกี่ยวกับ Cognitive Radio ก็ได้รับความสนใจจากนักวิจัยในวงการโทรคมนาคมทั่วโลกและเริ่มมีการนำเสนอแนวทางการใช้ SDR (Software Defined Radio) และ cognitive capability ของ Cognitive Radio สำหรับเป้าหมายอื่น ๆ นอกจากการเข้าร่วมใช้งานสเปกตรัมเพียงอย่างเดียว เช่น การปรับโหมดการทำงานและสื่อสารร่วมกันระหว่างอุปกรณ์กันเอง ดังเช่นการบริหารจัดการทรัพยากรการใช้ความถี่ในงานวิจัยใน [20] หรือการวางโครงข่ายสำหรับภัยพิบัติโดยสร้างระบบเครือข่ายตอบสนองต่อภัยธรรมชาติด้วยวิทยุรู้คิดในงานวิจัย [21] หรือการนำไปใช้กับ smart grid [22], รวมถึงระบบอัจฉริยะอื่น ๆ เป็นต้น และในระยะเวลาไม่นานที่ผ่านมาการพัฒนาความรู้ทางด้านปัญญาประดิษฐ์ได้มีความเจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว การนำศาสตร์ด้านวิธีการเรียนรู้เช่นการเรียนรู้จากแรงจูงใจ (Reinforcement Learning) [23] ที่เรียนรู้จากการลองผิดลองถูก และโดยเฉพาะการเรียนรู้เชิงลึก



2705313941

CD :Thesis 5671435021 dissertation / rev: 30072562 14:11:05 / seq: 8

(Deep Learning) [24] ได้ถูกวิจัยและพัฒนาเพื่อพัฒนาศักยภาพและนวัตกรรมใหม่ ๆ ในเชิงเทคโนโลยีมากมายทั้งทางด้านการแพทย์ การขนส่ง แอปพลิเคชัน และระบบการสื่อสารโทรคมนาคม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้สำหรับการรองรับการใช้งานการสื่อสารไร้สายที่ต้องการอัตราข้อมูลสูงโดยเน้นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์เป็นหลักเนื่องจากเป็นคลื่นความถี่ที่มีแบนด์วิดท์สูงโดยทิศทางการวิจัยมุ่งแก้ปัญหาหลักทางฟิสิกส์ของคลื่นความถี่ย่านดังกล่าวคือการแก้ปัญหาการหลุดจากแนวสายตา (Non Line of Sight, NLoS) ของอุปกรณ์รับและตัวสถานีส่งสัญญาณนอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้พัฒนาและนำเสนอหลักการใหม่ที่เรียกว่าสนามศักย์เทระเฮิรตซ์ (Terahertz Potential Field) ซึ่งได้พัฒนามาจากแนวคิดของสนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field) ที่จำลองสนามศักย์ที่มีระดับสูงต่ำจากการมีอยู่ของสิ่งกีดขวางและเส้นทางการเดินทางของคลื่น อีกทั้งยังนำความรู้ทางด้าน machine learning และปัญญาประดิษฐ์มาประกอบงานวิจัยเพื่อสร้างความรู้คิดหรือรู้จำ (cognitive) ให้แก่ระบบโดยผู้วิจัยพัฒนาโปรแกรมเพื่อจำลองสนามศักย์แบบเรียลไทม์จากการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Visions) [25, 26] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาเพื่อตรวจและจำแนกจับวัตถุหรือบุคคลที่เคลื่อนที่ภายในบริเวณที่สนใจ เพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลเพื่อสร้างสนามศักย์เทระเฮิรตซ์และวิเคราะห์หารูปแบบการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพเพื่อรองรับการใช้งานของผู้ใช้งานได้ดีที่สุด การใช้การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) สำหรับเรียนรู้พื้นผิววัสดุหรือสิ่งกีดขวางที่ต่างชนิดกันอันมีผลกระทบทางกายภาพเช่นการกระเจิง, การสะท้อนต่อคลื่นแตกต่างกัน การใช้ความรู้ด้าน Reinforcement Learning มาประยุกต์ให้กับอุปกรณ์ในกรณีต้องการจำลองการเรียนรู้และสร้างความสามารถในการตัดสินใจให้กับอุปกรณ์ในสถานการณ์ที่กำหนด ตลอดจนการบริหารจัดการทรัพยากรทางด้านอุปกรณ์และพลังงานโดยพัฒนาอัลกอริทึมในการวางโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณเทระเฮิรตซ์ให้มีความครอบคลุมสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรและอุปสรรคจากสิ่งกีดขวางสัญญาณอีกด้วย

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ได้ผ่านการทำวิจัยและเรียบเรียงเพื่อให้ครอบคลุมประเด็นต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น โดยบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นของคลื่นสัญญาณย่านเทระเฮิรตซ์และระบบ Machine Learning ที่ใช้ในงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ บทที่ 3 แนะนำการใช้งานโปรแกรมจำลองที่ผู้เขียนพัฒนาขึ้นและแสดงการคำนวณพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณผ่านวิธีการทำเรย์เทรซซึ่งรวมถึงการปรับมุมสะท้อนของกระจกสะท้อนเพื่อรองรับผู้ใช้งานที่ถูกสิ่งกีดขวางบดบัง บทที่ 4 นำหลักการของฟิสิกส์ในคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์มาคำนวณร่วมกับเสนอแนวคิดสนามศักย์ประดิษฐ์เพื่อวิเคราะห์ระดับสิ่งกีดขวางและเส้นทางของสัญญาณ บทที่ 5 เป็นการต่อยอดโดยนำเสนอแนวคิดการปรับขนาดบีมสัญญาณ แนวคิดทางการไปแอสเกรสเสไฟฟ้าเพื่อการสะท้อนคลื่น และการวิเคราะห์สิ่งกีดขวางด้วยการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์พร้อมตัวอย่างการเรียนรู้ผิววัสดุเพื่อสามารถวิเคราะห์การสะท้อนได้ดีขึ้นต่อไปได้ บทที่ 6 แสดงวิธีการสร้างอัลกอริทึมให้อุปกรณ์เรียนรู้และตัดสินใจได้ทั้งใน



2705313941

CD :Thesis 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

เชิงการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์หรือการจัดการทรัพยากรของโครงข่ายตัวส่งสัญญาณ โดยผู้เขียนแสดงแนวคิดการจำลองและผลการจำลองต่าง ๆ แยกในแต่ละบทเพื่อให้เข้าใจผลที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์ตามประเด็นของแต่ละบท และบทที่ 7 เป็นการสรุปภาพรวม

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาคุณลักษณะของคลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์รวมทั้งเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ในระบบการสื่อสารไร้สาย
- 2) พัฒนาโปรแกรมจำลองการส่งผ่านคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์ภายในอาคารโดยใช้เทคนิคเรย์เทรซซิงเพื่อศึกษาการครอบคลุมของสัญญาณและพัฒนาเทคนิคการขยายการครอบคลุมพื้นที่ให้มากขึ้นโดยใช้กระจกสะท้อนแบบต่าง ๆ
- 3) สร้างแบบจำลองของระบบการสื่อสารไร้สายสำหรับคลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งทำการจำลองผลการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้งานระบบสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ
- 4) ประยุกต์ใช้หลักการของการเรียนรู้ของเครื่องและปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานร่วมกับระบบควบคุมการสื่อสารไร้สายสำหรับคลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสื่อสารไร้สายการใช้ทรัพยากรคลื่นความถี่รวมถึงพลังงานอย่างคุ้มค่า และรองรับการเข้าถึงของผู้ใช้งานได้อย่างเหมาะสมที่สุด

## 1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พัฒนาเทคนิคการแก้ปัญหาการบดบังสัญญาณในย่านความถี่เทระเฮิรตซ์ และช่วยขยายการครอบคลุมพื้นที่ของสัญญาณให้มากขึ้นโดยใช้ตัวสะท้อนแบบต่าง ๆ โดยพิจารณาการขนาดของกระจกสะท้อน จัดวางตำแหน่ง และองศาการหมุนได้ของกระจกสะท้อน
- 2) พัฒนาโปรแกรมจำลองการสื่อสารในย่านเทระเฮิรตซ์ จำลองสภาพแวดล้อมแบบสองมิติเป็นพื้นที่ขนาด 5 x 5 เมตร และ 10 x 10 เมตร โดยใช้เทคนิคเรย์เทรซซิงเพื่อใช้วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณภายในอาคารเมื่อมีการใช้กระจกสะท้อนในเชิงเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีกระจกสะท้อน
- 3) นำเสนอหลักการสนามศัณยศาสตร์เทระเฮิรตซ์เพื่อจำลองสภาพระดับของสิ่งกีดขวาง อุปกรณ์รับของผู้ใช้งาน เพื่อสามารถนำไปใช้คำนวณรูปแบบการช่วยเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณ หรือแนวทางการติดต่อระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณได้

- 4) พัฒนาความรู้คิด, รู้จำ ของอุปกรณ์การสื่อสารในย่านความถี่เทระเฮิรตซ์ โดยใช้หลักการทางด้านปัญญาประดิษฐ์มาร่วมพัฒนาระบบ โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกสำหรับเรียนรู้และจดจำวัตถุ การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจจับวัตถุ และการเรียนรู้จากแรงจูงใจเพื่อจำลองสถานการณ์การเรียนรู้และการตัดสินใจได้ด้วยตนเองของอุปกรณ์ โดยมุ่งเน้นสิ่งแวดล้อมที่มีการบดบังสัญญาณจากสิ่งกีดขวางอันเป็นปัญหาหลักของย่านเทระเฮิรตซ์
- 5) นำเสนอวิธีการวางแผนโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณเทระเฮิรตซ์ในบริเวณที่มีสิ่งกีดขวาง โดยการจำลองแบบค้นหาเปรียบเทียบ และประยุกต์ใช้การเรียนรู้กับตัวส่งสัญญาณให้สามารถตัดสินใจวางตำแหน่งของตนเองเพื่อให้ได้ความครอบคลุมสูงสุด

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

- 1) ศึกษาความรู้พื้นฐานทางด้านการสื่อสารไร้สายในย่านเทระเฮิรตซ์รวมถึงย่านต่ำกว่าเทระเฮิรตซ์ที่ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน
- 2) ศึกษาและพัฒนากernel โปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองการสื่อสาร การคำนวณ และการแสดงผล
- 3) ร่วมวิจัยและศึกษาแนวทางปฏิบัติ แนวโน้มในอนาคต และตัวอย่างการใช้งานจริงร่วมกับผู้เชี่ยวชาญทั้งในประเทศและต่างประเทศ
- 4) ศึกษาและพัฒนากernel ใช้งาน machine learning และปัญญาประดิษฐ์แบบต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบการสื่อสารที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
- 5) เขียนบทความวิชาการและตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ
- 6) จัดทำวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์สามารถนำไปใช้พัฒนาเพื่อการเพิ่มความสามารถในการสื่อสารไร้สายในย่านความถี่สูงระดับเทระเฮิรตซ์ โดยเฉพาะการแก้ปัญหาสิ่งกีดขวางของสัญญาณ
- 2) การพัฒนาโปรแกรมจำลองสามารถนำไปใช้วิเคราะห์และหาค่าที่เหมาะสมของการปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบสื่อสารได้จริง และสามารถใช้ร่วมกับแพลตฟอร์มรวมถึงนวัตกรรมใหม่ ๆ ได้เช่นการรับข้อมูลจากระบบคลาวด์ ผ่าน API
- 3) อัลกอริทึมในการจัดวางตำแหน่งตัวส่งสัญญาณที่เหมาะสมสามารถช่วยบริหารจัดการทรัพยากรของระบบสื่อสารที่ต้องการได้
- 4) ประโยชน์จากการนำความรู้ด้านปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์การสื่อสารไร้สายสามารถทำให้เห็นแนวทางและต่อยอดไปสู่ระบบสื่อสารแบบอัจฉริยะหรืออัตโนมัติอื่น ๆ ได้



2705313841

## 1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท ดังนี้

- 1) บทนำ
- 2) ความรู้พื้นฐาน นำเสนอเนื้อหาในส่วนการนำเทคนิคเรย์เทรซซิงมาใช้สำหรับการจำลองเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณเทระเฮิรตซ์ภายในอาคาร คุณลักษณะของคลื่นสัญญาณในย่านเทระเฮิรตซ์ ความรู้พื้นฐานปัญญาประดิษฐ์สำหรับระบบรู้คิด (Cognitive System) โดยมุ่งเน้นที่การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน คอมพิวเตอร์วิทัศน์ และการเรียนรู้แบบงูใจซึ่งจะเป็นส่วนหลักในการพัฒนาระบบรู้คิดให้แก่การสื่อสารไร้สายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
- 3) การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณเทระเฮิรตซ์โดยใช้ตัวสะท้อน
- 4) การประยุกต์ใช้กระจกสะท้อนสัญญาณร่วมกับการใช้สนามศักย์ประดิษฐ์สำหรับการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์
- 5) การปรับปี่ม, การไบแอสการสะท้อนและคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับระบบเทระเฮิรตซ์
- 6) การพัฒนาระบบอัจฉริยะและการวางแผนโครงข่ายเทระเฮิรตซ์ด้วยปัญญาประดิษฐ์
- 7) บทสรุปและข้อเสนอแนะ



2705313941

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องของคลื่นเทระเฮิรตซ์และการเรียนรู้ของเครื่อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานทางฟิสิกส์ของคลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ซึ่งเป็นย่านความถี่หลักของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในการนำมาใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคมแบบไร้สาย โดยรวมถึงหลักการทางปัญญาประดิษฐ์และ machine learning ที่เกี่ยวข้องในการนำมาพัฒนาความสามารถในการรู้คิดรู้จำ (Cognitive Capability) ของอุปกรณ์และระบบที่ใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นเทระเฮิรตซ์ดังกล่าว โดยเน้นที่การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ที่มีความสามารถในการจดจำและจำแนกชนิดของวัตถุจากการเรียนรู้ด้วยรูปภาพปริมาณมาก ๆ [25] เพื่อใช้ในการช่วยจำแนกพื้นผิววัตถุ การประยุกต์ใช้งานคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Visions) ผ่านระบบคลาวด์สำหรับตรวจจับและจำแนกชนิดและวัสดุพื้นผิวของวัตถุหรือสิ่งกีดขวางอันมีผลต่อการส่งผ่านสัญญาณของคลื่น และการเรียนรู้แบบจูงใจ (Reinforcement Learning) สำหรับการพัฒนาให้อุปกรณ์สามารถเรียนรู้และตัดสินใจด้วยตนเองโดยอัตโนมัติในข้อกำหนดของสิ่งแวดล้อมแต่ละรูปแบบได้

### 2.1 ความรู้พื้นฐานคลื่นสัญญาณในย่านเทระเฮิรตซ์

คลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ (THF: Terahertz bands) หรือ T-Band ถูกกำหนดให้อยู่ในช่วงความถี่ 100 GHz – 10 THz [5] ซึ่งการศึกษาวิจัยสำหรับการสื่อสารไร้สายจะอยู่ในช่วง 300 GHz – 10 THz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สามารถให้แบนด์วิดท์ในอัตราสูงมากและความเร็วของการส่งผ่านข้อมูลสามารถสูงได้ถึงระบบเทระบิตต่อวินาที (Tbps)

การส่งผ่านสัญญาณในย่านความถี่เทระเฮิรตซ์มีคุณลักษณะสำคัญดังนี้ [5, 8]

#### 1) การแผ่อกของสัญญาณ (Spreading)

เป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นจะมีการแผ่หน้าคลื่นออกไปตามระยะทางของการเดินทางของคลื่น ทำให้พลังงานมีการกระจายตัวออกอันมีผลทำให้กำลังของสัญญาณลดต่ำลง สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Psi(f, d) = \left( \frac{c}{4\pi fd} \right)^2 \quad (2.1)$$

โดยที่	$c$	คือความเร็วแสงในสุญญากาศ (299,792,458 m/s)
	$f$	คือความถี่ (Hz)
	$d$	คือระยะทางในการเดินทางของคลื่น (m)



## 2) การดูดซับพลังงานจากโมเลกุล (Molecular absorption)

ค่าการดูดซับพลังงานของก๊าซในอากาศ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของก๊าซแต่ละชนิดที่มีผลกับความถี่ในช่วงต่าง ๆ ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับได้ดังสมการ

$$k(f) = \sum_g \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \sigma^g(f) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $p$  คือความดันของระบบ (Pa)

$p_0$  คือความดันอ้างอิง (Pa)

$T_0$  คืออุณหภูมิมาตรฐาน (K)

$T$  คืออุณหภูมิของระบบ (K)

$\sigma^g(f)$  คือภาคตัดขวาง (cross-section) ของการดูดซับ

เมื่อใช้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) เราสามารถแสดงค่าการสูญเสียจากการดูดซับจากโมเลกุลได้ดังนี้

$$\beta(f, d) = e^{-\frac{1}{2}k(f)d} \quad (2.3)$$

## 3) การสะท้อน (Reflection)

ทฤษฎีของเคิร์ชฮอฟ (Kirchhoff Theory) ใช้ในการคำนวณค่าการสูญเสียจากการสะท้อนในคลื่นเทระเฮิรตซ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสนัล (Fresnel reflection coefficient) และค่าองค์ประกอบของความหยาบของเรเลย์ (Rayleigh roughness factor) ได้ถูกนำมาพิจารณาในสมการ โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสนัลเป็นดังสมการ

$$R(f) = \frac{\cos(\theta_i) - n_t \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_t} \sin(\theta_i)\right)^2}}{\cos(\theta_i) + n_t \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_t} \sin(\theta_i)\right)^2}} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\theta_i$  คือมุมตกกระทบ

$n_t$  คือดัชนีหักเหของตัวกลาง

และค่าองค์ประกอบของความหยาบของเรเลย์สามารถกำหนดดังสมการ

$$\rho(f) = e^{-\frac{G(f)d}{2}} \quad (2.5)$$

โดยที่

$$G(f) = \left( \frac{4\pi\omega \cos(\theta_i)}{\lambda} \right)^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\omega$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหยาบพื้นผิว

$\lambda$  คือความยาวคลื่นในพื้นที่ว่าง (m)

การสูญเสียจากการสะท้อนสามารถแสดงได้ดังในสมการ

$$\Gamma(f, d) = \sum_s \Psi(f, d) \cdot \beta(f, d) \cdot R(f, d) \cdot \rho(f, d) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $s$  คือจำนวนของรังสีสัญญาณ

#### 4) การกระเจิง (Scattering)

การกระเจิงของสัญญาณเทระเฮิรตซ์นั้นขึ้นอยู่กับระดับความหยาบของพื้นผิวที่สัญญาณนั้นตกกระทบ คุณลักษณะนี้มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของการสื่อสาร เราใช้ทฤษฎีของเบ็คแมน-เคอร์ชอฟฟ์ (Beckmann – Kirchhoff Theory) มาช่วยในการคำนวณการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการกระเจิง (Scattering coefficient) ดังแสดงในสมการ

$$S(f) = -e^{-\frac{2\cos(\theta_1)}{\sqrt{n_r^2-1}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1+g+\frac{g^2}{2}+\frac{g^3}{6}}} \cdot \sqrt{p_0 + \frac{\pi\cos(\theta_1)}{100} g e^{v_s} + \frac{g^2}{4} e^{-\frac{v_s}{2}}} \quad (2.8)$$

โดยที่ค่าของตัวแปร  $p_0$ ,  $g$ ,  $v_s$  และ  $\theta_1$  สามารถหาได้จาก [27] จากนั้นค่าการสูญเสียจากการกระเจิงจะหาได้จากการพิจารณาค่าการแผ่ออกของสัญญาณ การดูดซับของโมเลกุล ปัจจัยความหยาบของโรเลย์ และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของรังสี  $s$  ตัว ซึ่งสามารถแสดงดังสมการ

$$\xi(f, r) = \sum_s \Psi(f, r) \cdot \beta(f, r) \cdot R(f) \cdot S(f) \quad (2.9)$$

### 5) การเลี้ยวเบน (Diffraction)

ในย่านความถี่เทระเฮิรตซ์นั้นการเลี้ยวเบน (Diffraction) ส่วนใหญ่แล้วสามารถตัดทิ้งหรือไม่ต้องนำมาพิจารณาได้โดยเฉพาะในพื้นที่ภายในอาคาร หากจะพิจารณาก็จะเป็นกรณีที่ตัวรับสัญญาณถูกบดบังสัญญาณอยู่บริเวณที่ติดกับขอบของสิ่งกีดขวางพอดีโดยเป็นกรณีที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (Non Line of Sight, NLoS) ในการคำนวณนั้นแม้ว่าค่าการเลี้ยวเบนสามารถคำนวณได้ค่อนข้างแม่นยำโดยใช้หลักการทางทฤษฎีเรขาคณิตของการเลี้ยวเบนแบบยูนิฟอร์ม (Uniform geometrical Theory of Diffraction, UTD) แต่การคำนวณมีความซับซ้อนสูงมาก ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จึงมีการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนแบบคมมีดของเฟรสเนล (Fresnel Knife Edge Diffraction, KED) ในการหาค่าโดยประมาณของคุณลักษณะการเลี้ยวเบน โดยแบบจำลองที่ทำการคำนวณนี้จะพิจารณาการเลี้ยวเบนกับวัตถุที่มีรูปร่างบางมาก ๆ และจะไม่พิจารณาพารามิเตอร์บางตัวเช่นค่าโพลาไรเซชัน ค่าความเหนียวนำ และความหยาบของพื้นผิว เนื่องจากค่าเหล่านี้จะทำให้การคำนวณมีความแม่นยำลดลง ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับความถี่ คือ  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  ถูกนำมาใช้ในการช่วยหาค่าแบบจำลอง Fresnel KED ในการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์ สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบน  $L(f)$  นำมาหาคุณลักษณะการสูญเสียที่จะถูกสร้างขึ้นมาพร้อมกับการสูญเสียตามระยะทางในแนวสายตา เมื่อรวมค่าการสูญเสียจากการเลี้ยวเบนแล้วนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของการเลี้ยวเบนในช่องสัญญาณ  $\chi$  หาได้จาก

$$\chi(f) = \left( \frac{c}{4\pi f(d_1 + d_2)} \right) e^{-j2\pi f \tau_{Dif} - \frac{1}{2}k(f)(d_1 + d_2)} \cdot L(f) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $d_1$  คือระยะจากตัวส่งสัญญาณไปยังจุดเลี้ยวเบน (m)

$d_2$  คือระยะจากจุดเลี้ยวเบนไปยังตัวรับสัญญาณ (m)

และ

$\tau_{Dif} = \tau_{LoS} + \Delta d / c$  คือเวลาที่คลื่นเลี้ยวเบนมาถึง (s)



2705313941

ในทางเรขาคณิตของการเลี้ยวเบนโดยทั่วไปนั้น เมื่อ  $h_d$  มีค่าน้อย ๆ เมื่อเทียบกับ  $d_1$  และ  $d_2$  การเดินทางของสัญญาณจะมีระยะทางเพิ่มขึ้นจากเส้นทาง LoS ได้โดยประมาณเป็นดังสมการ

$$\Delta d = \frac{h_d^2(d_1 + d_2)}{2d_1d_2} \quad (2.11)$$

นอกจากนี้มุมในการเลี้ยวเบน  $\theta(d)$  จากขอบของบริเวณที่ถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางไปยังตัวรับสัญญาณนั้นคำนวณได้จาก

$$\theta(d) = 180^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{h_d}{d_1}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{h_d}{d_2}\right) \quad (2.12)$$

ถ้าเรากำหนดให้  $v(f) = \sqrt{\frac{2f\Delta d}{c}}$  ค่าสัมประสิทธิ์ของการเลี้ยวเบน  $L(f)$  สามารถหาได้จากการประมาณค่าอินทิกรัลของเฟรสเนล ดังนี้

$$L(f) = \begin{cases} \mu_1(f) \cdot (0.5e^{-0.95v(f)}); & 0 < v \leq 1 \\ \mu_2(f) \cdot (0.4 - \sqrt{0.12 - (0.38 - 0.1v(f))^2}); & 1 < v \leq 2.4 \\ \mu_3(f) \cdot (0.225 / v(f)); & v > 2.4 \end{cases} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  คือสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับความถี่

#### 6) แบบจำลอง Signal – Noise Ratio

การวิเคราะห์หึ่งบประมาณลิงก์ได้ถูกใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน (Signal – Noise Ratio) ในย่านความถี่เทระเฮิรตซ์สำหรับการสื่อสารในระบ 5G สืบเนื่องมาจากการศึกษาสำหรับใช้ในคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าคือในระดับย่านคลื่นความถี่ มิลลิเมตร โดยการคำนวณค่า SNR (dB) นั้นจะหาได้ดังสูตร

$$SNR = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - \alpha(f, d) - \gamma - N \quad (2.14)$$



เมื่อ	$P_{tx}$	คือกำลังส่ง (dB)
	$G_{tx}$	คืออัตราขยายของสายอากาศในตัวส่ง (dBi)
	$G_{rx}$	คืออัตราขยายของสายอากาศในตัวรับ (dBi)
	$N$	คือสัญญาณรบกวน (dB)
	$\gamma$	คือการสูญเสียจากการผ่านจุดอับ (dB)

โดยที่  $\alpha(f, d)$  คือค่าสูญเสียตามระยะทางซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป ค่าพารามิเตอร์จาก [8] เป็นตัวอย่างหนึ่งที่ถูกอ้างอิงในการศึกษานี้ โดยค่าที่นำมาพิจารณาคือ  $P_{tx} = 1$  dBm ด้วยค่าสูญเสียจากการแปลงคือ 7.4 dB  $G_{tx}$  และ  $G_{rx}$  มีค่าเท่ากันที่ 30 dBi ทั้งนี้ที่ตัวรับมีค่าอัตราขยายจากการแปลงที่ 8 dB โดยมีค่า  $N = 7.5$  dB และ  $\gamma = -74$  dBm ซึ่งในที่สุดจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$SNR = 127.7 - \alpha(f, d) \quad (2.15)$$

ซึ่งในงานวิจัยสามารถปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับปัญหาที่ต้องการพิจารณาค่าคงที่จึงถูกคำนวณเป็นค่าใหม่ได้เพื่อมาพิจารณาร่วมกับค่า  $\alpha(f, d)$  สำหรับการสูญเสียตามระยะทางนั้นสามารถหาได้จากการรวมการสูญเสียในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการแพร่สัญญาณคือค่าการแผ่อกของสัญญาณ ( $\Psi$ ) การดูดซับของโมเลกุล ( $\beta$ ) การสะท้อน ( $\Gamma$ ) การกระเจิง ( $\xi$ ) และการเลี้ยวเบน ( $\chi$ ) ในหน่วยเดซิเบล (dB) ซึ่งผลรวมของค่าการสูญเสียดังกล่าวเป็นดังสมการ

$$\alpha(f, d) = 10\log_{10}(\Psi(f, d)) + 10\log_{10}(\beta(f, d)) + 10\log_{10}(\Gamma(f, d)) + 10\log_{10}(\xi(f, d)) + 10\log_{10}(\chi(f, d)) \quad (2.15)$$

## 2.2 การเรียนรู้ของเครื่องและปัญญาประดิษฐ์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอในส่วนหนึ่งของงานวิจัย โดยมีเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) เพื่อการประยุกต์ใช้ประกอบกับคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Visions) สำหรับใช้ตรวจจับและจำแนกชนิดและวัสดุพื้นผิวของวัตถุหรือสิ่งกีดขวาง ซึ่งจะมีผลต่อรูปแบบและค่าต่าง ๆ ของการส่งผ่านสัญญาณของคลื่น และการเรียนรู้แบบจูงใจ (Reinforcement Learning) สำหรับใช้ในการพัฒนาให้อุปกรณ์สามารถเรียนรู้และตัดสินใจด้วยตนเองโดยอัตโนมัติ

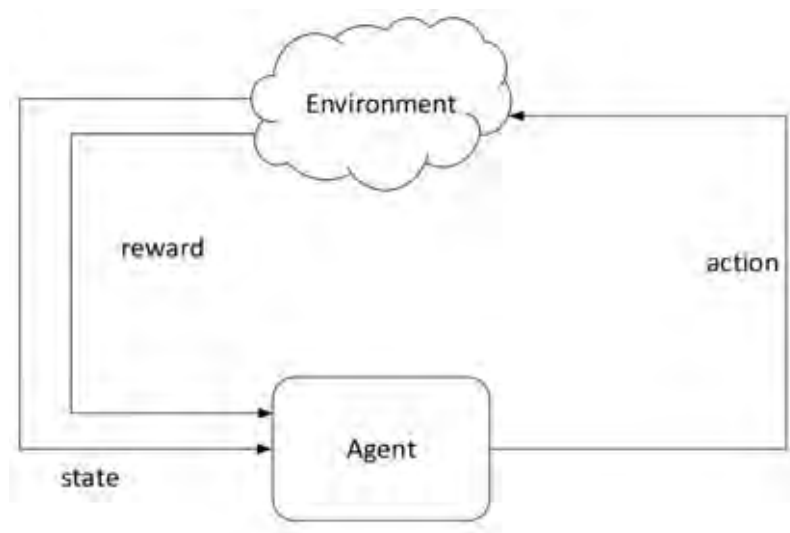


2705313841

ในการเลือกการกระทำต่าง ๆ พร้อมกับปฏิสัมพันธ์ (interaction) กับสิ่งแวดล้อมในรูปแบบที่กำหนด

### 1) การเรียนรู้แบบจูงใจ (Reinforcement Learning)

การเรียนรู้แบบจูงใจ [23] หรือแบบการเสริมแรงนั้นเป็นการเรียนรู้ที่เกิดขึ้นในตัว agent (ผู้กระทำ) ที่ถูกกำหนดให้ทำการเรียนรู้โดยมีการกระทำสิ่งต่าง ๆ โต้ตอบกับสิ่งแวดล้อมโดยสิ่งที่จะได้รับจะเป็นตัวเลขในลักษณะการให้รางวัล (reward) เพื่อกำหนดการกระทำ (action) ของตัวผู้กระทำในสถานะ (state) ต่อไป ซึ่งจุดเด่นของการเรียนรู้ประเภทนี้คือการเรียนรู้ผ่านสภาพสิ่งแวดล้อมที่ไม่แน่นอน โดยการลองผิดลองถูกไปเรื่อย ๆ และจดจำแนวทางการตัดสินใจที่ดีที่สุด โดยโอะแกรมของการเรียนรู้แบบจูงใจเป็นดังรูป 2-1



รูปที่ 2-1 แผนภาพของ Reinforcement Learning

หลักพื้นฐานของการเรียนรู้แบบจูงใจคือกระบวนการตัดสินใจของมาร์คอฟ (Markov Decision Process, MDP) เป็นกระบวนการ Stochastic แบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีกรอบ (framework) ทางคณิตศาสตร์เพื่อทำแบบจำลองปัญหาการตัดสินใจที่ตัวแทนต้องเผชิญเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มันเป็นกรอบทางคณิตศาสตร์สำหรับการสร้างแบบจำลองปัญหาการตัดสินใจตามลำดับภายใต้ความไม่แน่นอนเช่นเดียวกับปัญหาการเรียนรู้เสริม เป้าหมายของการแก้ไข MDP คือการปรับกลยุทธ์ที่ดีที่สุดสำหรับตัวแทนที่พิจารณา MDP เป็นพารามิเตอร์ห้าตัวคือ  $\langle S, A, P, R, \gamma \rangle$  โดยที่

- $S$  คือเซตของสถานะ (states)
- $A$  คือเซตของการกระทำ (actions)

- $P$  คือความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ  $P_a(s, s') = \Pr(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a)$
- $R$  คือฟังก์ชันของค่ารางวัล โดยแตกต่างกันตามการกระทำแต่ละรูปแบบ คือค่ารางวัลของการกระทำ  $a$  ในการเปลี่ยนสถานะ  $s$  ไปสู่สถานะ  $s'$
- $\gamma$  คือค่าแฟคเตอร์ส่วนลดหรือปัจจัยลดของค่ารางวัลการเรียนรู้  $\gamma \in [0,1]$

Q-learning เป็นรูปแบบวิธีหนึ่งของการเรียนรู้แบบจูงใจ สามารถใช้เพื่อค้นหาการเลือกการกระทำที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการตัดสินใจของ Markov ที่มีขอบเขตจำกัด วิธีนี้ถูกนำเสนอโดย Watkins (1989) [28] อัลกอริทึม Q-learning เป็นวิธีที่ง่ายสำหรับผู้กระทำในการเรียนรู้วิธีการทำอย่างดีที่สุดโดยการเรียนรู้ซ้ำ ๆ และปรับปรุงด้วยการประเมินคุณภาพของการกระทำที่แตกต่างกันในทุก ๆ สถานะ สามารถกำหนดโดยสมการ

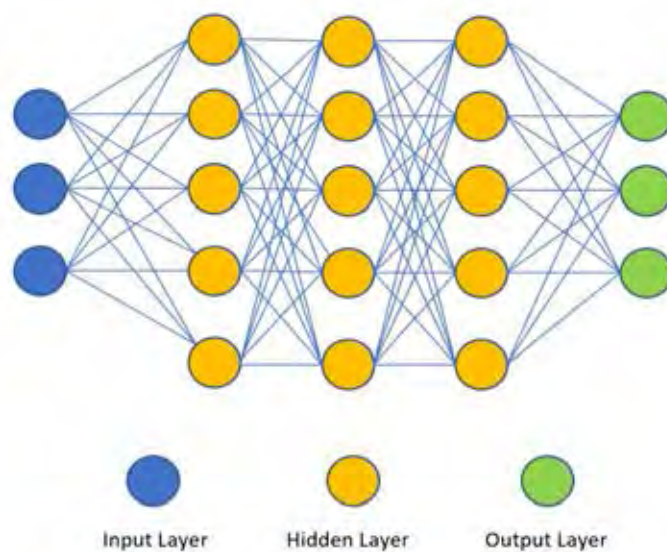
$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \cdot [R_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (2.16)$$

อัลกอริทึมจะทำการเพิ่มประสิทธิภาพ  $Q(s_t, a_t)$  ผ่านการทำซ้ำ ๆ  $R$  เป็นรางวัลแบบได้ทันที (immediate reward) ของแต่ละการกระทำที่มีอยู่  $\gamma$  เป็นปัจจัยลดและ  $\alpha$  คืออัตราการเรียนรู้ (learning rate)

## 2) การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning)

การเรียนรู้เชิงลึกใช้การพัฒนาความรู้ทางด้านโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) แต่ทำการทำให้โครงข่ายมีชั้นกระบวนการมากขึ้น สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้หลักการของการเรียนรู้เชิงลึกสองแบบด้วยกันคือ แบบแรกคือโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network, CNN) [29, 30] ที่จะทำการเรียนรู้ประเภทของสิ่งต่าง ๆ จากรูปภาพเพื่อใช้ในการเรียนรู้และจำแนกพื้นผิวของวัตถุ และระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Visions) ผ่านระบบคลาวด์ที่มีพลังประมวลผลสูงเพื่อระบุชนิดของวัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ภายในเฟรมของรูปภาพพร้อมทั้งขอบเขตของตำแหน่ง เพื่อนำมาใช้ในการระบุการวางตำแหน่งของสิ่งกีดขวางหรือตำแหน่งผู้ใช้งานในระบบ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทในการเรียนรู้เชิงลึกแสดงดังรูปที่ 2-2

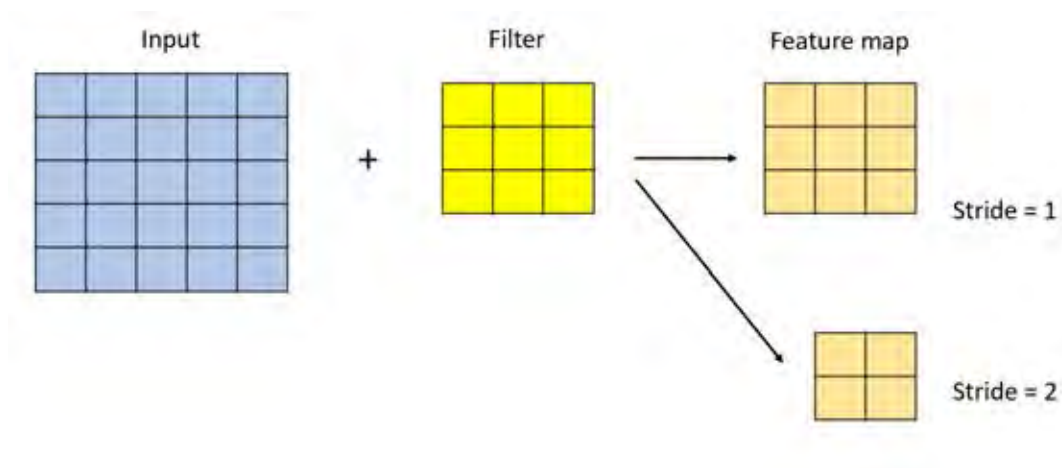




รูปที่ 2-2 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทของ Deep Learning

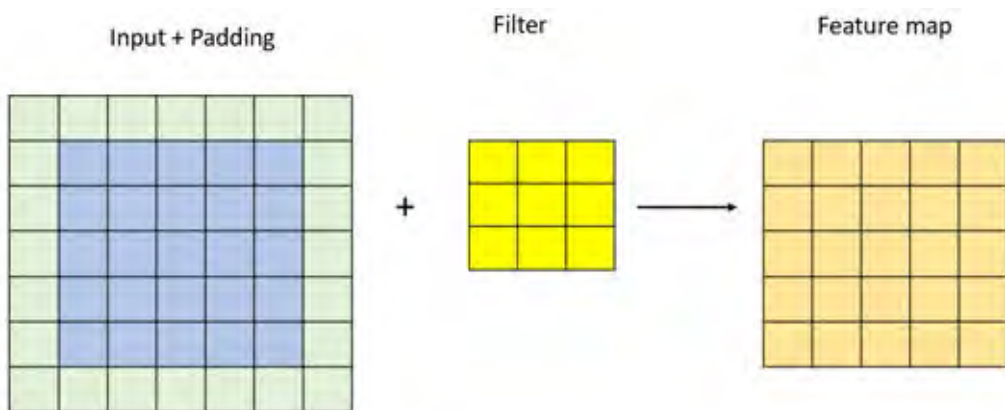
โดยโครงข่ายแสดงลักษณะการเชื่อมต่อของโนดต่าง ๆ ในแต่ละชั้น ซึ่งชั้นที่ซ่อนอยู่จะเป็นตัวทำการดำเนินการหาลักษณะเด่นของข้อมูลเพื่อให้คำตอบเป็นค่า output ที่เราต้องการทราบ โดยหลักการทำงานของ CNN นั้นมีขั้นตอนที่สำคัญคือการทำคอนโวลูชัน (Convolution) โดยมีการสกัดลักษณะเด่น (feature extraction) ของภาพอินพุต โดยใช้ตัวกรอง (filter) หรือเรียกอีกอย่างว่า เคอร์เนล (kernel) มาช่วยสกัดลักษณะเด่นของรูปภาพเพื่อให้ระบบทำการเรียนรู้โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแผนที่ลักษณะเด่น (feature map) ซึ่งตามปกติการเรียนรู้ด้วย CNN จะใช้ตัวกรองหลายชนิดร่วมกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบต่าง ๆ หลายแบบ โดยสามารถกำหนดความละเอียดของการเลื่อน (stride) ตัวกรองได้ว่าจะเลื่อนไปที่ละกี่ตำแหน่งเพื่อสร้างแผนที่ลักษณะเด่นที่ได้ความละเอียดต่างกัน





รูปที่ 2-3 ตัวอย่างการใช้ตัวกรองสร้างแผนที่ลักษณะเด่นด้วยค่าการเลื่อน (stride) ที่ละ 1 และ 2 ตำแหน่ง

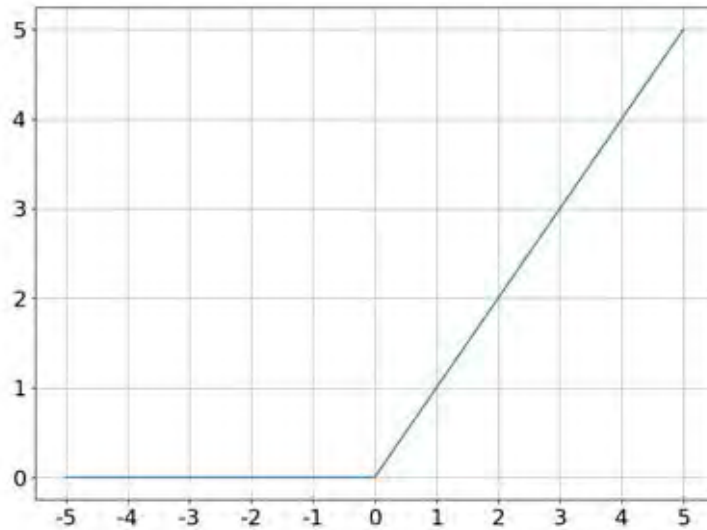
ทั้งนี้เทคนิคที่นำมาช่วยเสริมในกระบวนการดังกล่าวคือการเติมขอบ (padding) ให้กับอินพุต เพื่อให้ค่าบริเวณขอบถูกคำนวณไปยังแผนที่ลักษณะเด่นด้วยโดยไม่สูญหายไป เนื่องจากอาจเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญเช่นกัน ตัวอย่างดังรูปที่ 2-4 เป็นการเติมขอบและทำการกรองด้วยขนาดตัวกรอง  $3 \times 3$  และค่า stride เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้ในการทำงาน CNN



รูปที่ 2-4 ตัวอย่างการเติมค่าขอบ (padding) ให้อินพุตในการกรองเพื่อสร้างแผนที่ลักษณะเด่น

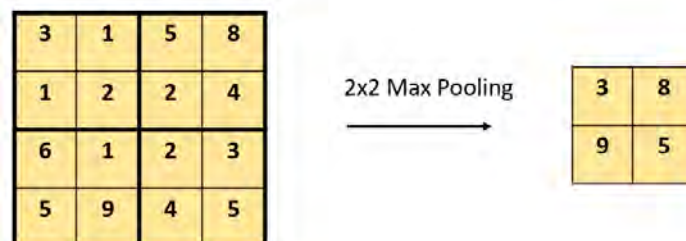
โดยค่าที่นำมาใส่บริเวณที่ทำการ padding มานั้นมักเป็นค่า 0 หรือเรียกว่าการทำ zero padding เมื่อได้ผลลัพธ์เป็น feature map ที่ต้องการแล้วขั้นตอนต่อไปคือการตรวจจับ (detection) โดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) มาช่วยในการตรวจจับและทำให้ข้อมูลที่รับมานั้นเป็นลักษณะไม่เชิงเส้น (nonlinear) โดยฟังก์ชันที่เป็นที่นิยมและให้ผลลัพธ์ดีคือ ReLU (Rectifier Linear Unit)

คือ  $f(x) = \max(0, x)$  ที่จะทำการขจัดค่าที่เป็นลบออกไป ลักษณะฟังก์ชัน ReLU สามารถทำการพล็อตออกมาได้ดังรูปที่ 2-5



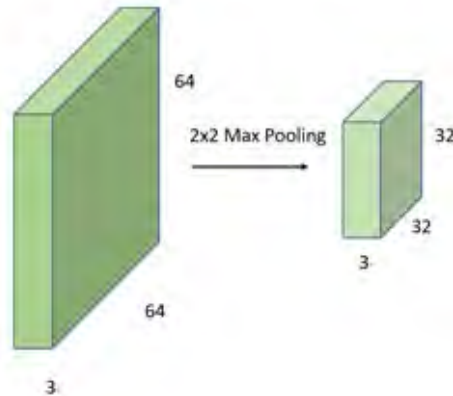
รูปที่ 2-5 ฟังก์ชัน ReLU

ขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งคือการทำ pooling เพื่อลดขนาดของข้อมูลลง เพื่อให้สามารถประมวลผลได้เร็วขึ้นรวมถึงการช่วยแก้ปัญหา overfitting และเป็นการจัดการกับรูปภาพที่มีการปรับสเกลที่แตกต่างกัน วิธีการทำ pooling สามารถทำได้ทั้งวิธี max pooling ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก โดยจะดึงค่าที่สูงที่สุดจากบริเวณที่พิจารณาออกมา หรือการทำ mean pooling ที่เป็นค่าเฉลี่ยของบริเวณที่พิจารณา ตัวอย่างการทำ max pooling เป็นดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 รูปแบบการทำ max pooling

ซึ่งขนาดของข้อมูลอินพุตที่ถูกย่อขนาดลงนั้น ขนาดกว้าง x ยาวสามารถลดลงไปเหลือเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ของขนาดความกว้าง x ความยาวเดิม ส่วนค่าความลึก (depth) นั้นจะคงเดิมเนื่องจากการทำ max pooling นั้นชั้นข้อมูลแต่ละชั้นจะทำโดยเป็นอิสระจากกัน ตัวอย่างการลดขนาดข้อมูลอินพุตแสดงดังในรูปที่ 2-7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลขนาด  $64 \times 64 \times 3$  จะลดลงไปเหลือ  $32 \times 32 \times 3$  จากการทำให้ max pooling



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างการย่อขนาดข้อมูลจากการทำให้ max pooling

และขั้นตอนรายละเอียดในการออกแบบการเชื่อมต่อโครงข่ายจะเป็นการเชื่อมต่อแบบเชื่อมโยงถึงกันหมดดังลักษณะตามรูปที่ 2-2 ทั้งนี้การกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับโจทย์ที่ต้องการรวมทั้งขนาดของข้อมูลที่จะนำมาใช้ด้วยเช่นกัน

### บทที่ 3 การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณเทระเฮิรตซ์โดยใช้ตัวสะท้อน

#### 3.1 โปรแกรมจำลองการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมจำลองการสื่อสารไร้สายในย่านเทระเฮิรตซ์ขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาไพทอน (Python) เพื่อมุ่งเน้นการจำลองการสื่อสารในสิ่งแวดล้อมภายในอาคารที่มีสิ่งกีดขวางตั้งอยู่ โดยพื้นฐานหลักของโปรแกรมจำลองดังกล่าวมีฟังก์ชันดังนี้

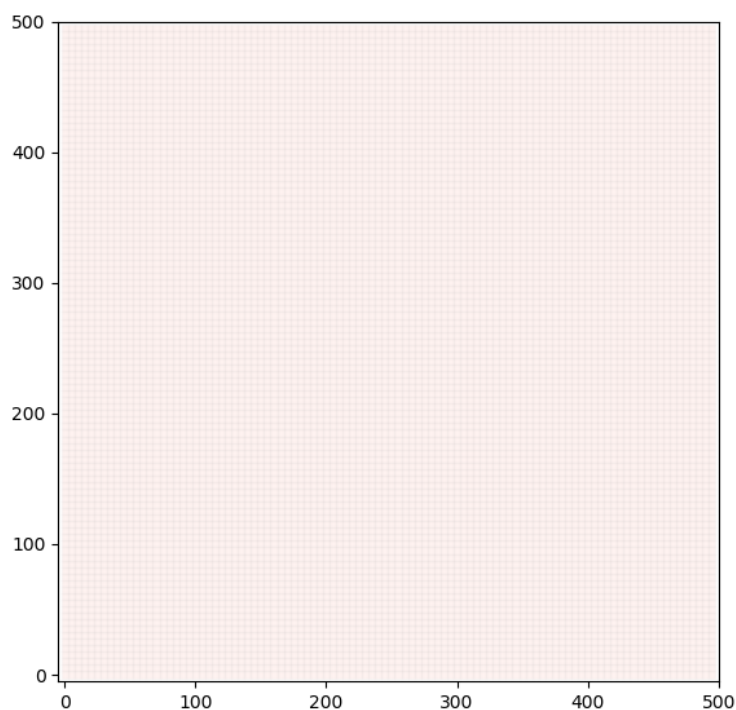
- 1) จำลองพื้นที่สิ่งแวดล้อม โดยสามารถกำหนดขนาดความกว้างและความยาวของห้องในรูปแบบสองมิติ
- 2) สร้างสิ่งกีดขวาง โดยสามารถสร้างรูปร่างสิ่งกีดขวางที่ต้องการได้จากการระบุจุดต่าง ๆ เป็นแบบพอลีกอน และกำหนดตำแหน่งที่สิ่งกีดขวางนั้น ๆ วางอยู่ หรืออีกวิธีหนึ่งคือสร้างแบบอัตโนมัติโดยระบุขนาดและจำนวนของสิ่งกีดขวาง ระบบจะสร้างและจัดวางสิ่งกีดขวางกระจายกันโดยเฉลี่ยที่บริเวณกลางห้อง
- 3) สร้างตัวส่งสัญญาณ (transmitter)
- 4) สร้างกระจกสะท้อน (reflector) แบบราบ (flat) โดยกำหนดขนาดความยาว ตำแหน่งที่ติดตั้ง มุมที่ติดตั้ง หรือแบบโค้ง (curve) โดยกำหนดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง ตำแหน่งที่ติดตั้ง และรัศมีความโค้งของกระจกสะท้อน ทั้งนี้การใช้งานกระจกแบบโค้งยังไม่ได้มีการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
- 5) คำนวณการส่งสัญญาณรวมถึงการสะท้อนด้วยการคำนวณแบบเรย์เทรซซิง (ray tracing)
- 6) คำนวณค่าพื้นที่ความครอบคลุมของสัญญาณ
- 7) กำหนดค่าทางฟิสิกส์ของคลื่นเทระเฮิรตซ์ที่ตัวส่งสัญญาณ การอ่านค่าการดูดซับของโมเลกุลและคำนวณค่าการส่งผ่านสัญญาณไปยังบริเวณต่าง ๆ
- 8) ฟังก์ชันอื่น ๆ ตัวอย่างเช่นการคำนวณสนามศักย์ (potential field), การแสดงผลกราฟแบบต่าง ๆ, การตรวจจับวัตถุในรูปภาพด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision) เพื่อจำลองสิ่งกีดขวาง, การเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) เช่นการเรียนรู้แบบจูงใจ (reinforcement learning) สำหรับจำลองการรู้คิดของอุปกรณ์เคลื่อนที่หรือตัวส่งสัญญาณ และการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) สำหรับการจดจำชนิดพื้นผิว เป็นต้น สำหรับบทนี้เป็นการนำเสนอการคำนวณความครอบคลุมของสัญญาณซึ่งทางผู้วิจัยขอแสดงตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมจำลองในเบื้องต้น ดังนี้



- การสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร

Parameter	Value
Room Width	500 cm
Room Height	500 cm
Grid Size	5 cm

ผลที่ได้คือสร้างแบบจำลองห้องขนาด 5 x 5 เมตร โดยมีความละเอียดที่ขนาดของ grid หรือ พิกเซลที่ 10 เซ็นติเมตร ดังรูป



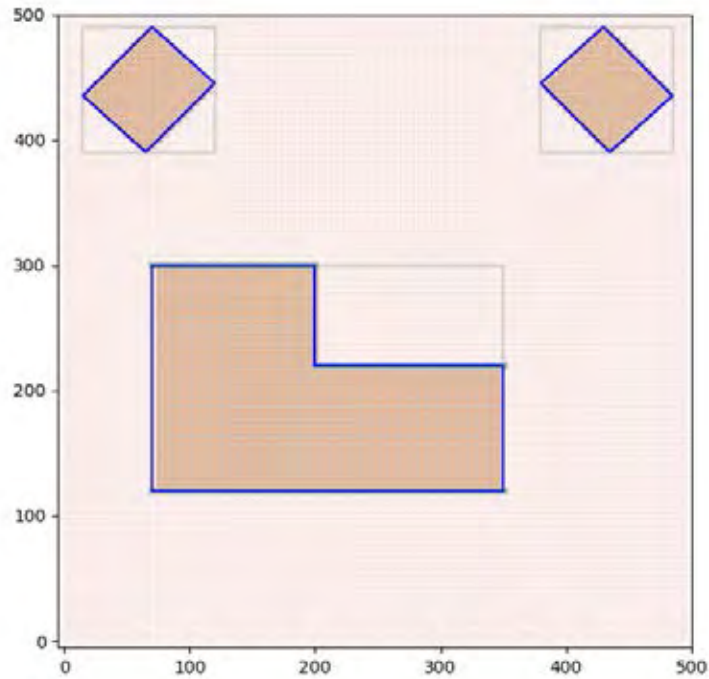
รูปที่ 3-1 ผลการจำลองการสร้างห้องขนาด 5 x 5 เมตร

- การสร้างสิ่งกีดขวาง

จำลองการสร้างสิ่งกีดขวาง 3 ชั้น โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

Parameter	Value
Obs_vertex #1	[(70,120),(70,300),(200,300),(200,220),(350,220),(350,120)]
Obs_vertex #2	[(15,435),(70,490),(120,445),(65,390)]
Obs_vertex #3	[(485,435),(430,490),(380,445),(435,390)]

โปรแกรมจะทำการจำลองสิ่งกีดขวางตามค่าจุดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในสิ่งกีดขวางแต่ละชั้น  
ดังนี้



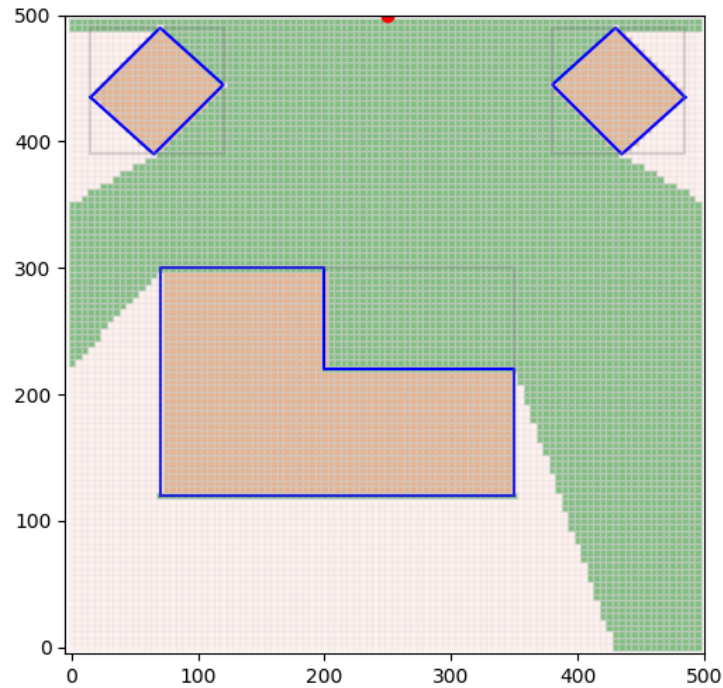
รูปที่ 3-2 ผลการจำลองการสร้างสิ่งกีดขวาง 3 ชั้น

- การสร้างตัวส่งสัญญาณ (transmitter)

กำหนดตำแหน่งของ transmitter โดยมีค่าเท่ากับ

Parameter	Value
Tx_Location	[250,500]

ตัว transmitter จะถูกจำลองให้วางที่ตำแหน่งที่กำหนดและจำลองทิศทางการส่งคลื่น ดังรูป



รูปที่ 3-3 ผลการจำลองการติดตั้งตัวส่งสัญญาณพร้อมคำนวณทิศทางการแพร่สัญญาณ

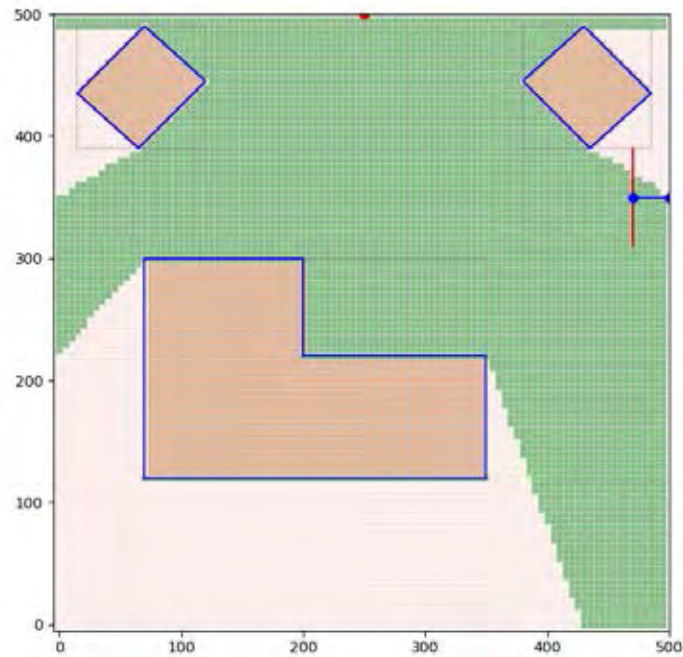
โดยแต่ละพื้นที่จะถูกคำนวณความครอบคลุมของสัญญาณโดยใช้หลักการเรย์เทรซซิง แสดง  
 ด้งพื้นที่สีเขียว หากแนวของสัญญาณมีการตัดผ่านจุดใด ๆ ของสิ่งกีดขวาง สัญญาณหลัง  
 จากนั้นจะถือว่าถูกบดบังและไม่มีสัญญาณดังจะเห็นเป็นพื้นที่อับสัญญาณ

- การจำลองการติดตั้งกระจกสะท้อน

ตัวอย่างการติดตั้งกระจกสะท้อน โดยกำหนดพารามิเตอร์

Parameter	Value
Size	80 cm
Distance from wall	30 cm
Side	Right
Position	350 cm
Angle	0 degree

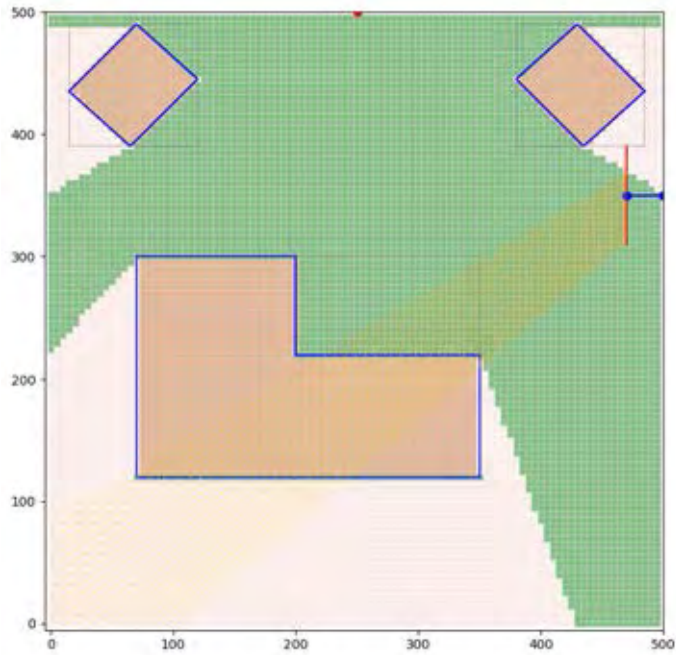
โปรแกรมจำลองจะสร้างกระจกสะท้อนความยาว 80 ซม. โดยมีระยะห่างจากกำแพง 30 ซม. ที่กำแพงด้านขวามือ โดยมีตำแหน่งที่ระยะ 350 ซม. และมีการปรับมุม 0 องศา (แนวระนาบ โดยไม่มีการหมุน) ดังรูป 3-4



รูปที่ 3-4 ผลการจำลองการติดตั้งกระจกสะท้อน

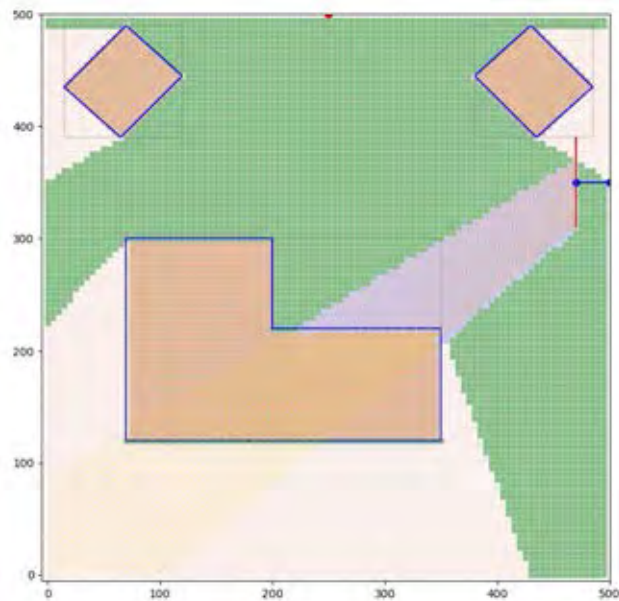
- การคำนวณคลื่นสะท้อนจากกระจก  
หลังจากติดตั้งกระจกสะท้อน โปรแกรมจำลองสามารถคำนวณทิศทางการตกกระทบและการสะท้อนของคลื่นสัญญาณโดยใช้หลักการเรย์เทรซซิง ซึ่งคลื่นสะท้อนจากกระจกนั้นโปรแกรมจะตรวจจับสัญญาณที่สามารถส่งผ่านไปถึงกระจกและสะท้อนออกจากบริเวณที่ได้รับสัญญาณเท่านั้น ดังรูป 3-5





รูปที่ 3-5 การจำลองเคลื่อนที่รถจากจุดเริ่มต้น

- การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของรถจากจุดเริ่มต้น
- โปรแกรมจำลองทำการคำนวณพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณจากจุดเริ่มต้นโดยคิดตามเส้นทางที่สัญญาณเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้นโดยหากมีการถูกสิ่งกีดขวางบดบังก็จะถือเป็นจุดปลายทางของรัศมีสัญญาณนั้น ๆ ดังรูป 3-6

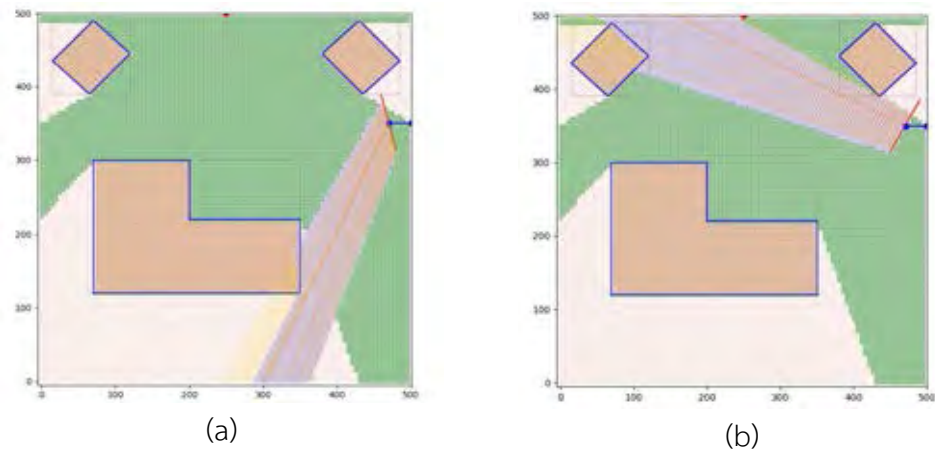


รูปที่ 3-6 ผลการจำลองการคิดคำนวณพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของรถจากจุดเริ่มต้น



2705313941

พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณจะเป็นพื้นที่ที่แสดงเป็นสีฟ้าดังในรูป  
ตัวอย่างการปรับมุมต่าง ๆ โดยในที่นี้แสดงตัวอย่างการปรับมุมค่า 15 องศา และ -30 องศา  
ผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูป 3-7

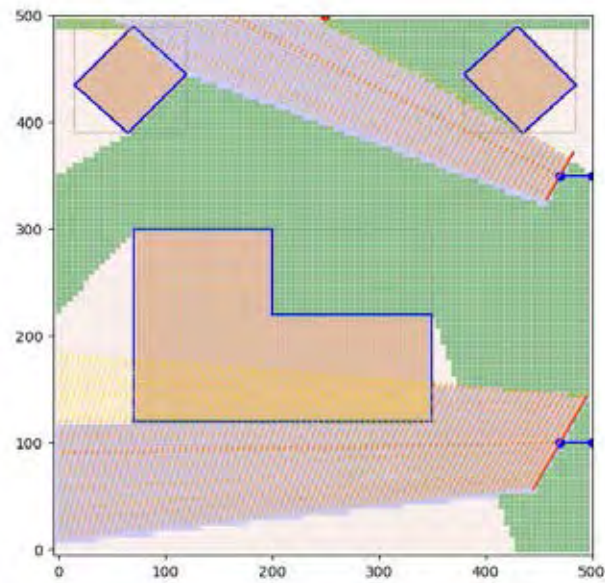


รูปที่ 3-7 ตัวอย่างการปรับมุมของกระจก เป็น (a) 15 องศา และ (b) -30 องศา

ตัวอย่างการปรับตำแหน่งที่ติดตั้งกระจก และการปรับขนาดของกระจกตามพารามิเตอร์ดังนี้

Parameter	Value
Size	50 cm / 100 cm
Distance from wall	30 cm
Side	Right
Position	350 cm / 100 cm
Angle	-30 degree

ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงได้ดังรูป 3-8



รูปที่ 3-8 ตัวอย่างการติดตั้งกระจกที่ตำแหน่งและขนาดต่าง ๆ กัน

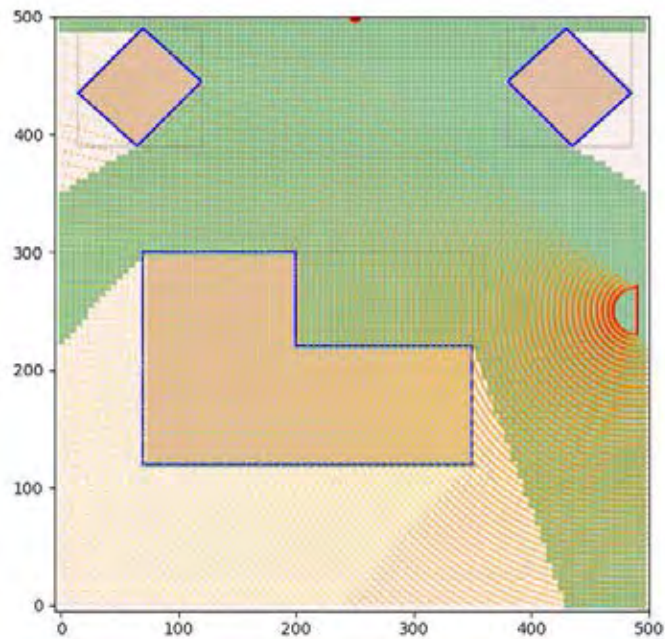
ทั้งนี้ทางผู้วิจัยยังได้พัฒนากระจกสะท้อนในรูปแบบโค้ง (curved mirror) ขึ้นด้วยเช่นกัน โดยการคำนวณการสะท้อนนั้นจะคำนวณจากการตกกระทบบนเส้นสัมผัส (tangent line) ของจุดต่าง ๆ บนผิวตัวสะท้อน โดยตัวอย่างการตั้งค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้เช่น

Parameter	Value
Size	40 cm
Distance from wall	10 cm
Side	Right
Position	250 cm
Radius of curvature	20 cm

ผลการจำลองที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 3-9

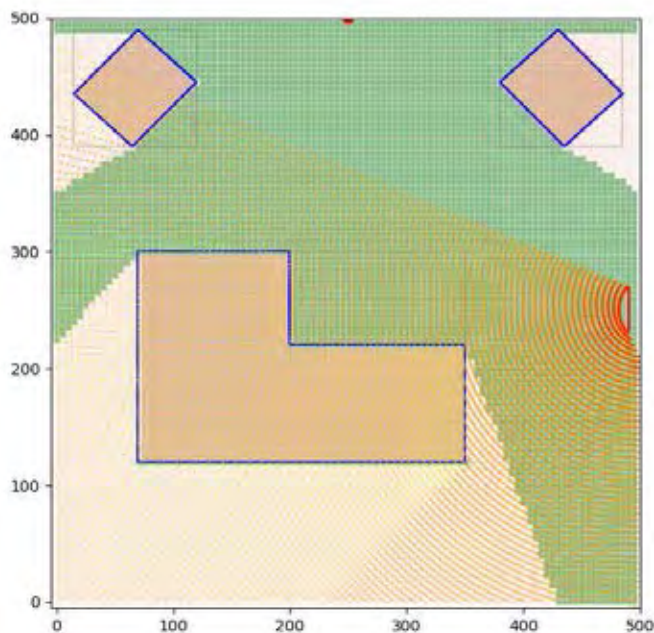


2705313941



รูปที่ 3-9 ตัวอย่างการติดตั้งกระจกแบบโค้ง

โดยหากทดลองปรับรัศมีความโค้ง (Radius of curvature) จาก 20 cm เป็น 30 cm ผลการสะท้อนจะเป็นดังรูป 3-10



รูปที่ 3-10 ตัวอย่างการติดตั้งกระจกแบบโค้งที่รัศมีความโค้ง 30 cm

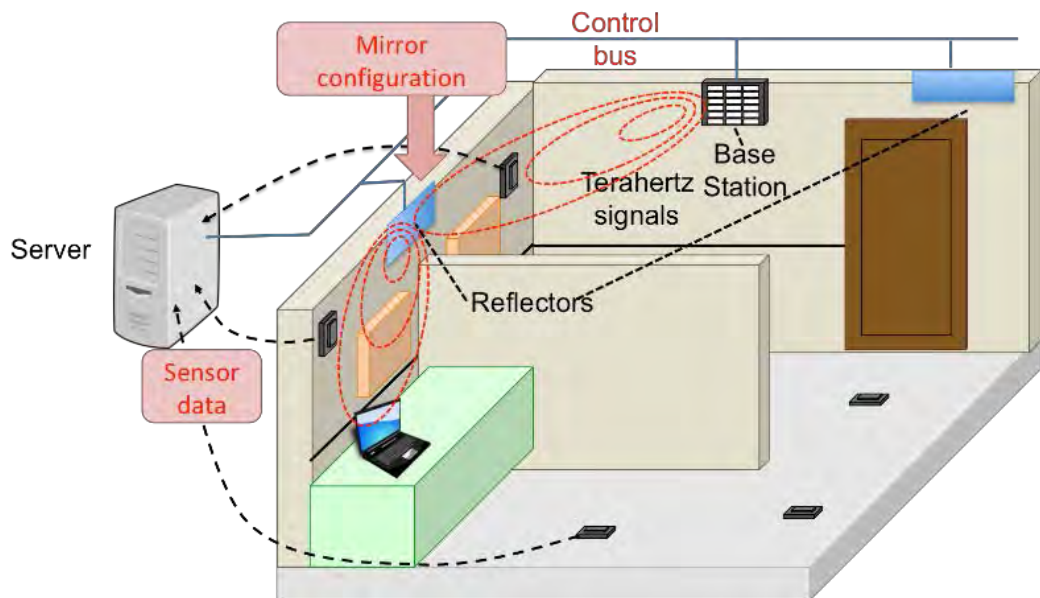
ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมจำลองที่กล่าวมาเป็นส่วนโครงสร้างหลักอันเป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การคำนวณคลื่นสัญญาณ, อัลกอริทึมแบบต่าง ๆ, การแสดงผลและกราฟ, รวมทั้งการทำงาน

ร่วมกับ API และโปรแกรมภายนอก ซึ่งการใช้งานต่าง ๆ นั้นจะมีการจำลองและแสดงผลในหัวข้อและบทต่อ ๆ ไปของวิทยานิพนธ์

หัวข้อต่อไปในบทนี้เป็นงานวิจัยโดยการจำลองผลของการหาพื้นที่ครอบคลุมด้วยการเรียนรู้เชิงสถิติของกระจกสะท้อนแต่ละตัว

### 3.2 การจำลองพื้นที่ที่ครอบคลุมของสัญญาณเทระเฮิรตซ์โดยใช้การเรียนรู้เชิงสถิติของกระจกสะท้อน

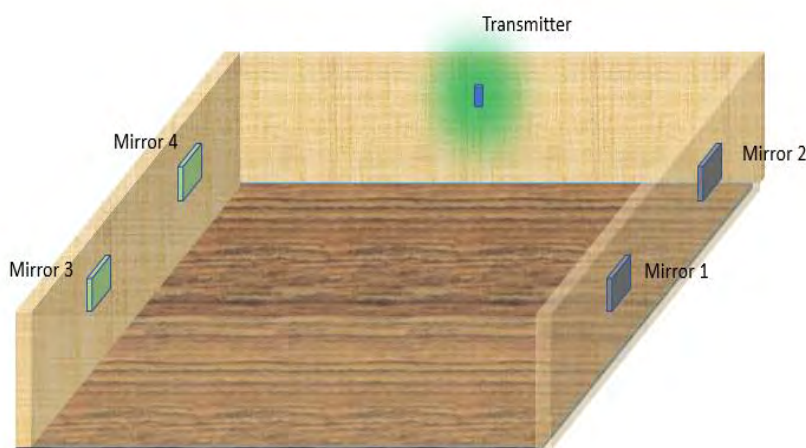
ในที่นี้เป็นการศึกษาและทำการจำลองความครอบคลุมของสัญญาณคลื่นความถี่เทระเฮิรตซ์ภายในห้องขนาดเล็ก (5 x 5 เมตร) ที่มีสิ่งกีดขวางตั้งอยู่ภายใน โดยมีกระจก (Mirrors) เป็นตัวช่วยสะท้อนสัญญาณไปยังพื้นที่อับสัญญาณ (Shadowed areas) ของการสุ่มตำแหน่งต่าง ๆ ของผู้ใช้งานในห้อง โดยแสดงผลค่าการช่วยเหลือของกระจกแต่ละตัวว่าสามารถช่วยส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานในมุมอับสัญญาณแต่ละจุดได้หรือไม่ ด้วยมุมมองใด, สามารถปรับมุมตั้งต้นที่เหมาะสมจากการเรียนรู้ทางสถิติได้เป็นอย่างไร และค่ามุมตั้งต้นจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบ (Full search) เพื่อให้มีการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมสูงสุดนั้นควรเป็นค่าเท่าไร โดยการออกแบบระบบควบคุมตัวสะท้อนในอาคารสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์ภายในอาคารสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-11 ระบบควบคุมตัวสะท้อนในการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์ภายในอาคาร

จากรูปที่ 3-11 แสดงระบบควบคุมตัวสะท้อนในการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์ภายในอาคารโดยใช้การสั่งงานโดยซอฟต์แวร์ [31] โดยมีเครื่อง server ทำการเก็บข้อมูลและสั่งการ

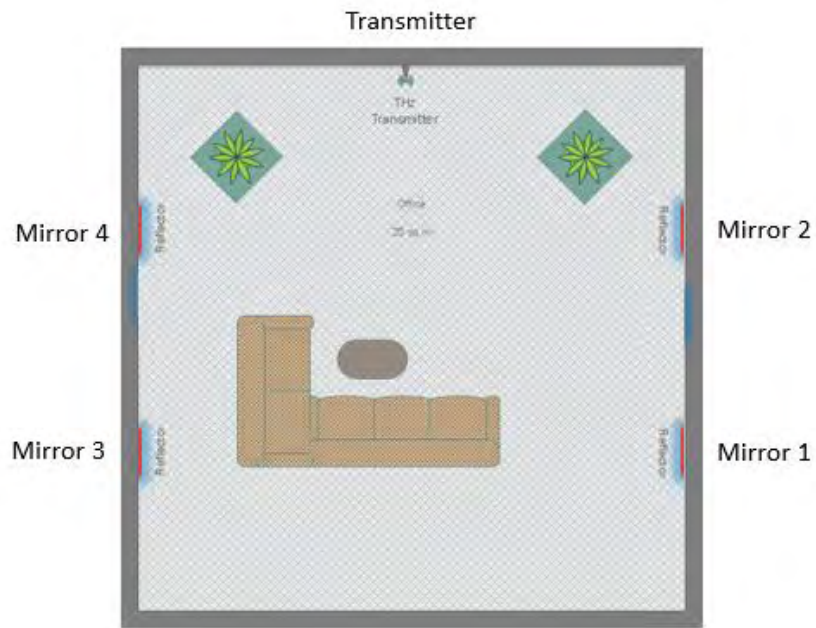
ไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ จากการจำลองผลใน [31]เห็นว่าในห้องขนาดเล็กที่มีจำนวนสิ่งกีดขวางไม่มากนัก การติดตั้งกระจกที่ผนังด้านข้าง ด้านละ 2 ตัว โดยที่กระจกแต่ละตัวสามารถหมุนไปในทิศทางซ้ายหรือขวาได้สูงสุดข้างละ 45 องศา พื้นที่เกือบทั้งหมดสามารถได้รับสัญญาณได้ไม่ว่าจากตัวส่งสัญญาณโดยตรงหรือจากการสะท้อนของกระจกก็ตาม ดังนั้นการกำหนดค่าสิ่งแวดล้อมของระบบที่บทความฉบับนี้นำเสนอนั้นจะเป็นการสื่อสารภายในอาคาร (Indoor) โดยอยู่ภายในห้องขนาด (5 x 5 เมตร) ที่มีตัวส่งสัญญาณอยู่ที่ผนังกลาง และมีกระจกอยู่ฝั่งซ้ายและขวาด้านละสองตัว ตามรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12 แบบจำลองระบบเทระเฮิรตซ์ภายในห้องร่วมกับกระจก 4 ตัว

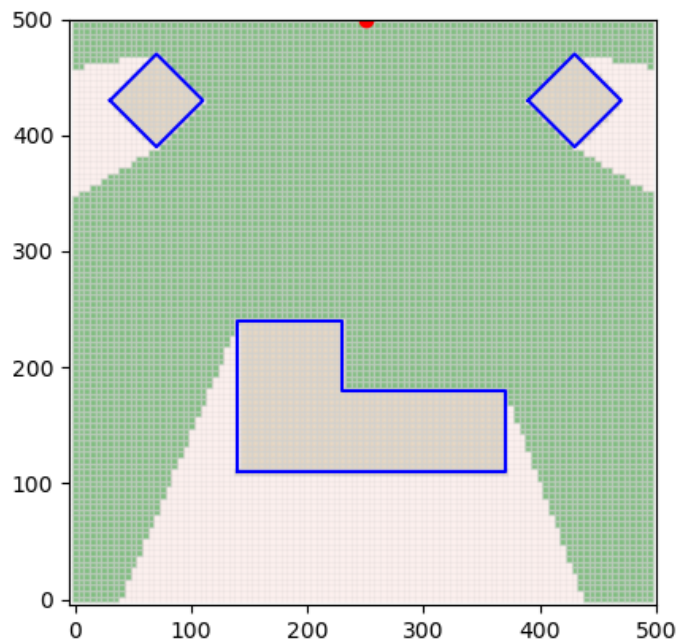
การกำหนดสิ่งกีดขวางสำหรับการทำการจำลองผลนั้น ทางทีมวิจัยได้ทำการศึกษาทั้งการใช้รูปแบบการจัดวางผังของห้องนั่งเล่น (Living room) ตามมาตรฐานทั่วไป ดังรูปที่ 3-13 และการสุ่มสิ่งกีดขวางจำนวนหนึ่งด้วยโปรแกรม Simulator ให้มีการวางวัตถุตามพื้นที่ต่างๆภายในห้องเพื่อศึกษาผลที่ได้





รูปที่ 3-13 การจัดวางสิ่งกีดขวางในรูปแบบห้องนั่งเล่น

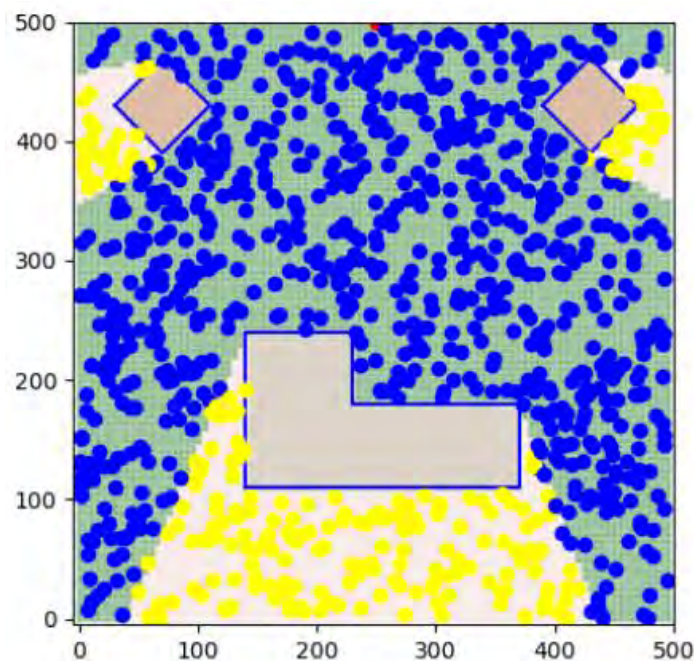
1) ผลการจำลองสำหรับสิ่งกีดขวางในรูปแบบห้องนั่งเล่น



รูปที่ 3-14 ผลการจำลองสิ่งกีดขวางในรูปแบบห้องนั่งเล่น และแสดงพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่เกิดขึ้น

เมื่อกำหนดรูปแบบของการวางสิ่งกีดขวางตามที่กำหนด โปรแกรม จำลองระบบจะแสดงผลในเบื้องต้นได้ดังรูปที่ 3-14 โดยพื้นที่สีเขียวแสดงถึงการครอบคลุมสัญญาณจากตัวส่งหรือทรานสมิตเตอร์ และส่วนที่ว่างคือพื้นที่อับสัญญาณจากการถูกบัง (Shadowed areas)

อันดับต่อมาคือการสุ่มตำแหน่งที่ผู้ใช้งาน (User) จะสามารถอยู่ได้ในตำแหน่งต่าง ๆ ของห้อง โดยการใช้การสุ่มตัวอย่างจำนวน 1000 ตัวอย่าง ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 3-15

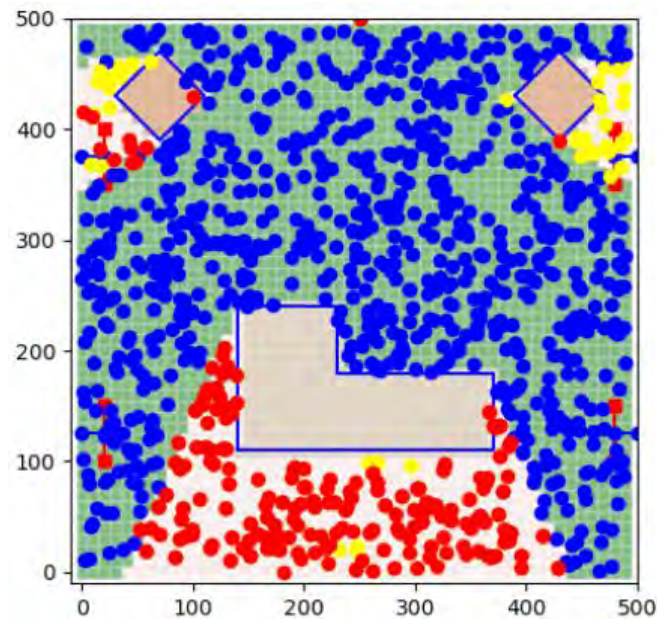


รูปที่ 3-15 การสุ่มตัวอย่างตำแหน่งผู้ใช้งานจำนวน 1000 ตัวอย่าง

โดยจุดสีน้ำเงินแทนตำแหน่งที่ผู้ใช้งาน ได้รับสัญญาณจากตัวส่งโดยตรง หรือมี Line of sight (LOS) ส่วนจุดสีเหลืองแทนตำแหน่งที่ผู้ใช้งานถูกบดบังสัญญาณ

การจำลองผลการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณด้วยการใช้ตัวสะท้อนคือกระจกติดตั้งที่ 4 ตำแหน่งตามแบบจำลองในรูปที่ 3-11 นั้น จะกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้คือ 1) ขนาดกระจก 50 ซม. 2) มุมสูงสุดที่หมุนได้คือข้างละ 45 องศา 3) สเต็ปการหมุนครั้งละ 10 องศา โดยทำการสุ่มตำแหน่งผู้ใช้งานทีละตำแหน่ง หากตำแหน่งที่ได้ไปอยู่ในพื้นที่อับสัญญาณระบบจะสั่งให้กระจกทำงานทีละตัวโดยจะหมุนเพื่อหาว่าสามารถสะท้อนสัญญาณไปยัง user ที่ตำแหน่งนั้นๆ ได้หรือไม่ และได้ด้วยมุมใดบ้าง และบันทึกสถิติไว้ โดยผลที่ได้จากการจำลองจะมีลักษณะดังรูปที่ 3-16

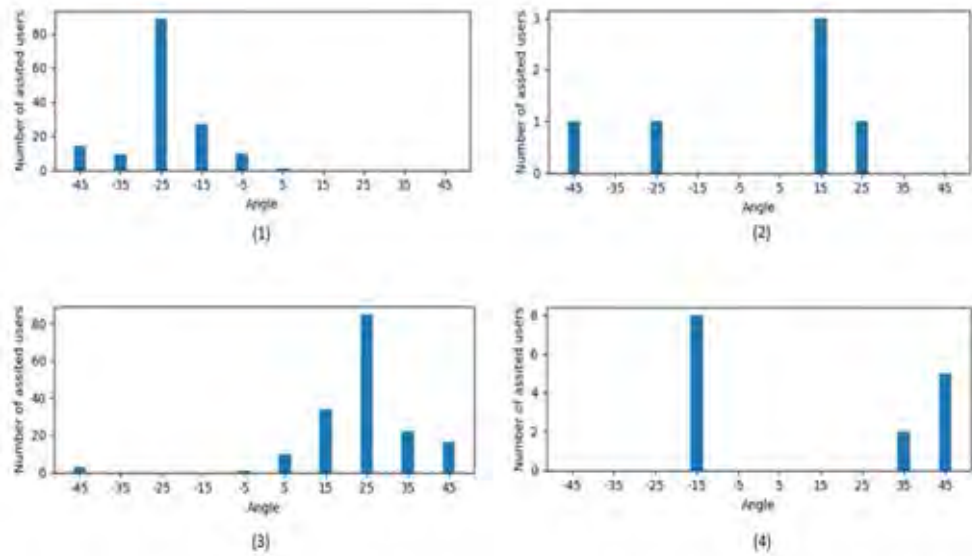




รูปที่ 3-16 ผลการจำลองใช้กระจกหมุนสะท้อนสัญญาณช่วยในจุดอับสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 3-16 จุดวงกลมสีแดงแสดงถึงตำแหน่งที่มีกระจกอย่างน้อย 1 ตัวสามารถสะท้อนสัญญาณมายังตัวรับที่ตำแหน่งนี้ได้ ส่วนจุดสีเหลืองคือตำแหน่งที่กระจกที่ติดตั้งไว้ไม่สามารถช่วยเหลือในการสื่อสารได้ และจุดสีน้ำเงินคือจุด LOS ที่สามารถสื่อสารกับตัวส่งสัญญาณได้โดยตรง.

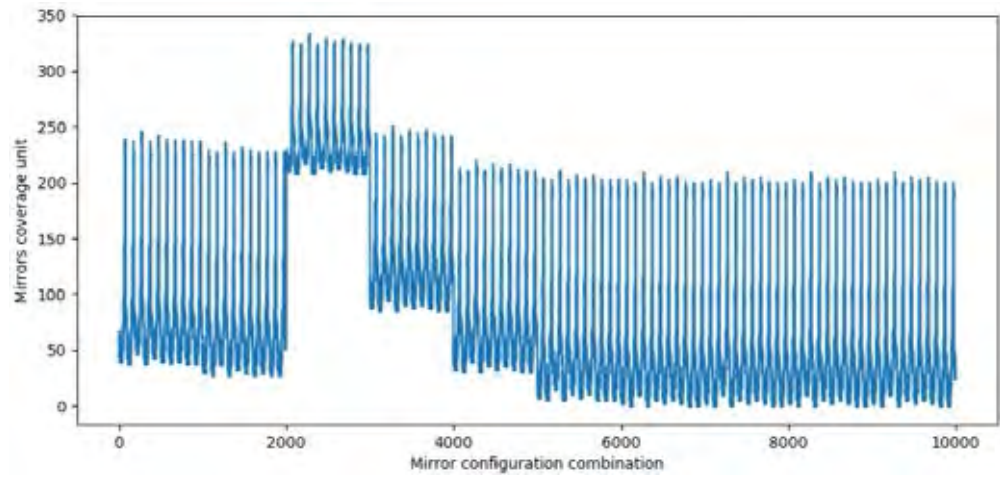
สถิติการช่วยสะท้อนสัญญาณเทระเฮิรตซ์ไปยังผู้รับ ณ จุดอับสัญญาณโดยค่ามุมต่าง ๆ ของกระจกแต่ละตัวนั้นแสดงได้ดังรูป 3-17



รูปที่ 3-17 สถิติการรองรับผู้ใช้งานที่จุดอับสัญญาณ โดยแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละมุมของกระจก แต่ละตัวสามารถช่วยสะท้อนสัญญาณไปถึง

การทำการค้นหาเต็มรูปแบบ (Full search) คือการคำนวณหาค่าการตั้งมุมของกระจกแต่ละตัว ว่าค่าใดจะสามารถตั้งให้กระจกทุกตัวรองรับการสะท้อนสัญญาณไปสู่พื้นที่อับสัญญาณได้สูงที่สุดในเวลาใดๆ โดยพิจารณาตามสิ่งกีดขวางที่ปรากฏอยู่ในขณะนั้น โดยไม่นำตำแหน่งของผู้ใช้งานมาคิด เพื่อที่จะหาค่าตอบเบื้องต้นว่าในสถานการณ์ที่มีสิ่งกีดขวางรูปแบบใด ๆ อยู่ นั้น ค่าตั้งต้นของมุมของกระจกทุกตัวควรตั้งไว้เท่าไร โดยจำนวนการคำนวณนั้นมีค่าเท่ากับมุมที่กระจกแต่ละตัวสามารถหมุนไปได้ คือ 10 มุม คิดทุกกรณีร่วมกันด้วยกระจก 4 บาน ดังนั้นจะมีกรณีทั้งหมดจำนวน  $10^4$  กรณี หรือการคำนวณในการ search เป็นจำนวน 10,000 รอบ

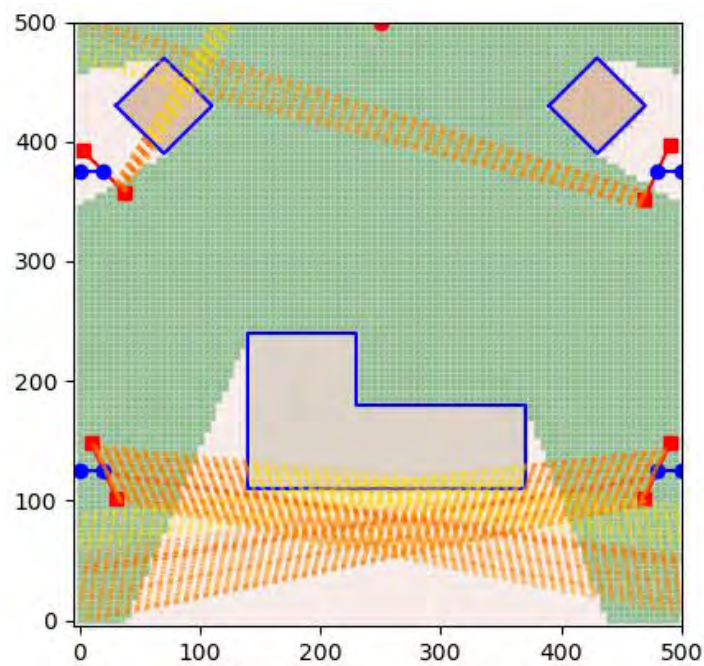
ผลการคำนวณหน่วยพื้นที่การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณ (Improved coverage area) ในทุกกรณีเป็นดังรูปที่ 3-18 โดยเป็นการแสดงขนาดพื้นที่ที่กระจกเพิ่มการครอบคลุม (Mirror coverage unit) ในการตั้งค่ากระจกแต่ละ combination



รูปที่ 3-18 หน่วยพื้นที่การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณจากการกำหนดการตั้งค่ามุมกระจกในทุกกรณี

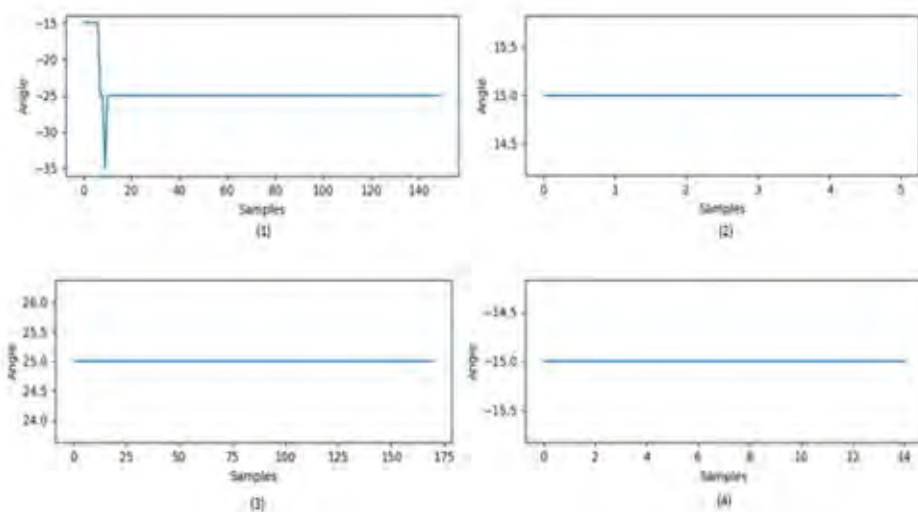
การจำลองการติดตั้งกระจกจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบสามารถแสดงได้ตรามรูปที่

3-19



รูปที่ 3-19 การติดตั้งกระจกโดยตั้งค่าจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบ

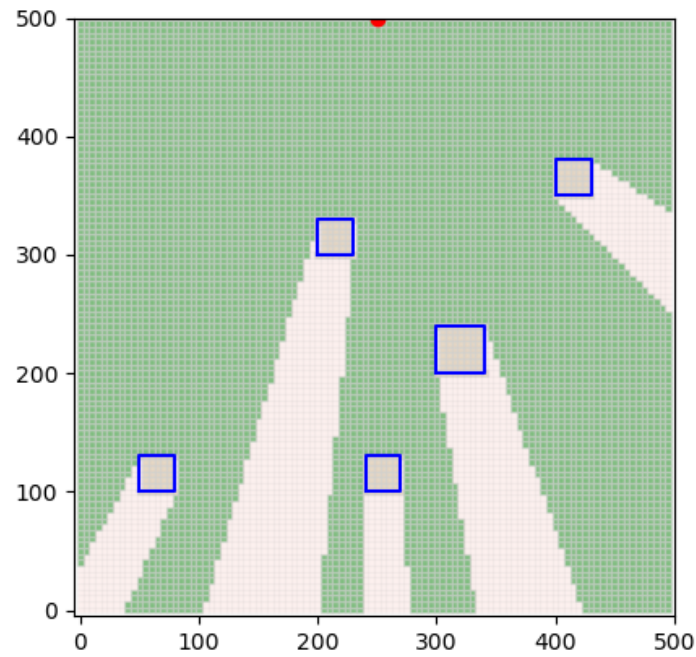
สำหรับการเรียนรู้ด้วยตนเอง (Self learning) ของกระจกแต่ละตัวว่าควรมีการตั้งค่ามุมพื้นฐานเป็นเท่าไรในสิ่งแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางรูปแบบต่าง ๆ นั้น ใช้หลักการเก็บสถิติค่าจำนวนผู้ใช้งานของแต่ละมุมที่ตนเองทำการช่วยเหลือผู้ใช้งานในตำแหน่งที่สัญญาณไปไม่ถึง และพิจารณาเลือกค่ามุมที่สะสมจำนวนผู้ใช้งานได้มากที่สุด โดยเป้าหมายที่ต้องการคือเมื่อเก็บค่าตัวอย่างได้จำนวนหนึ่งแล้ว มุมที่รองรับผู้ใช้งานสะสมสูงที่สุดนั้นจะถูกรู้ค่าใดค่าหนึ่ง ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 3-20



รูปที่ 3-20 ค่ามุมที่มีค่าการช่วยเหลือผู้ใช้งานสะสมสูงสุดของกระจกแต่ละตัว

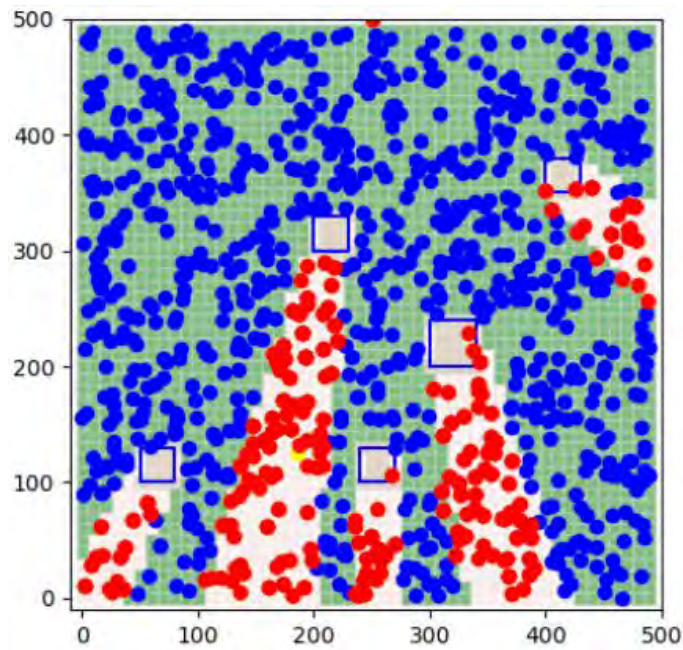
## 2) ผลการจำลองสำหรับสิ่งกีดขวางในรูปแบบสุ่ม

การจำลองรูปแบบสิ่งกีดขวางแบบสุ่มจะเป็นการศึกษารูปแบบการตั้งค่าที่เหมาะสมของกระจกแต่ละตัว โดยการสุ่มสิ่งกีดขวางขนาดเล็กให้กระจายอยู่บริเวณกลางพื้นที่ห้องเพื่อวัดผลเทียบกับกรณีแรก การจำลองในที่นี้ทำการจำลองด้วยสิ่งกีดขวางจำนวน 5 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3-21



รูปที่ 3-21 การจำลองสิ่งกีดขวางแบบสุ่มจำนวน 5 ชั้น

เมื่อทำการสุ่มตำแหน่งผู้ใช้งานจำนวน 1000 ตัวอย่าง และทำการหมุนกระจกเพื่อสะท้อนสัญญาณไปยังผู้ใช้งานที่ต้องการความช่วยเหลือ ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 3-22



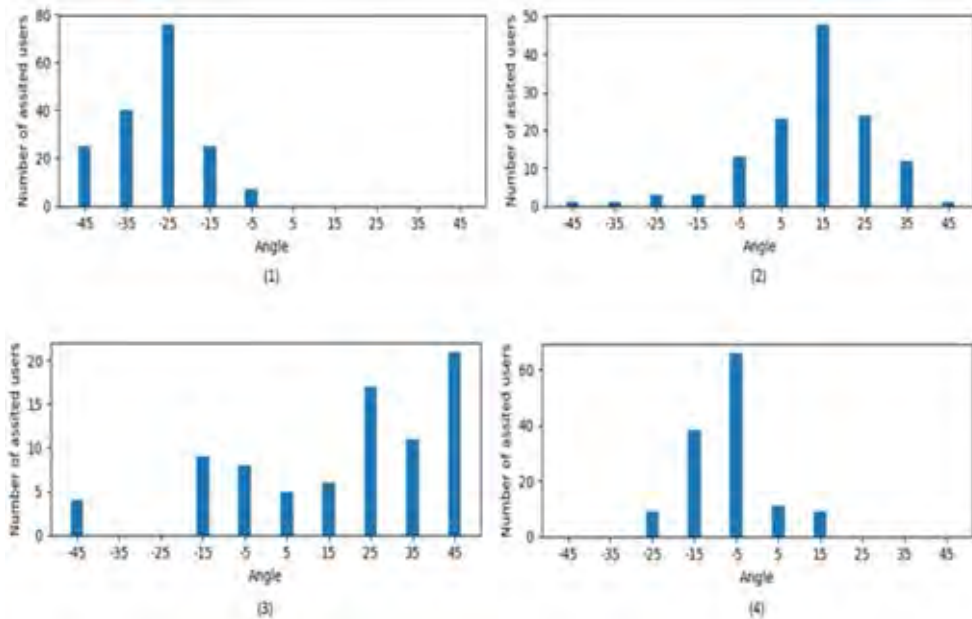
รูปที่ 3-22 ผลการจำลองกระจกหมุนสะท้อนสัญญาณช่วยในจุดอับสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม



2705313941

โดยสังเกตได้ว่ากรณีนี้ และผลการสุ่มที่ได้ ผู้ใช้งานที่ถูกบังคับสัญญาณสามารถได้รับการช่วยเหลือจากกระจกได้ทั้งหมด ดังจุดวงกลมสีแดงในรูปที่ 3-22

และสถิติการช่วยสะท้อนสัญญาณเทอร์เรลิตซ์ไปยังผู้รับ ณ จุดอับสัญญาณโดยค่ามุมต่าง ๆ ของกระจกแต่ละตัวนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3-23

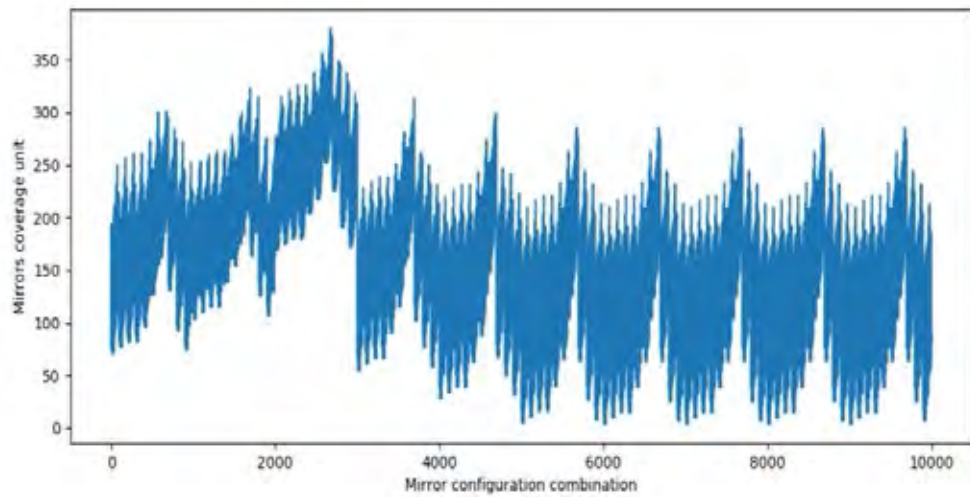


รูปที่ 3-23 สถิติการรองรับผู้ใช้งานที่จุดอับสัญญาณ โดยแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละมุมของกระจกแต่ละตัวสามารถช่วยสะท้อนสัญญาณไปถึง ในกรณีสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม

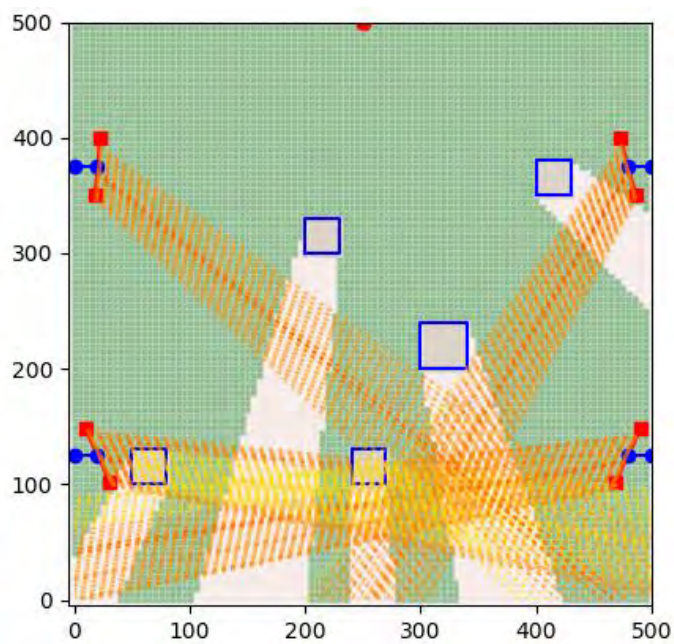
ผลการคำนวณหน่วยพื้นที่การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณ (Improved coverage area) ด้วยวิธีการแบบการค้นหาเต็มรูปแบบในทุกกรณีเป็นดังรูปที่ 3-24 และจากการคำนวณ ค่าการติดตั้งกระจกจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบสามารถแสดงผลการจำลองได้ตามรูปที่ 3-25



2705313941



รูปที่ 3-24 หน่วยพื้นที่การเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณจากการกำหนดการตั้งค่ามุมกระจกในทุกกรณี ในการวางสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม

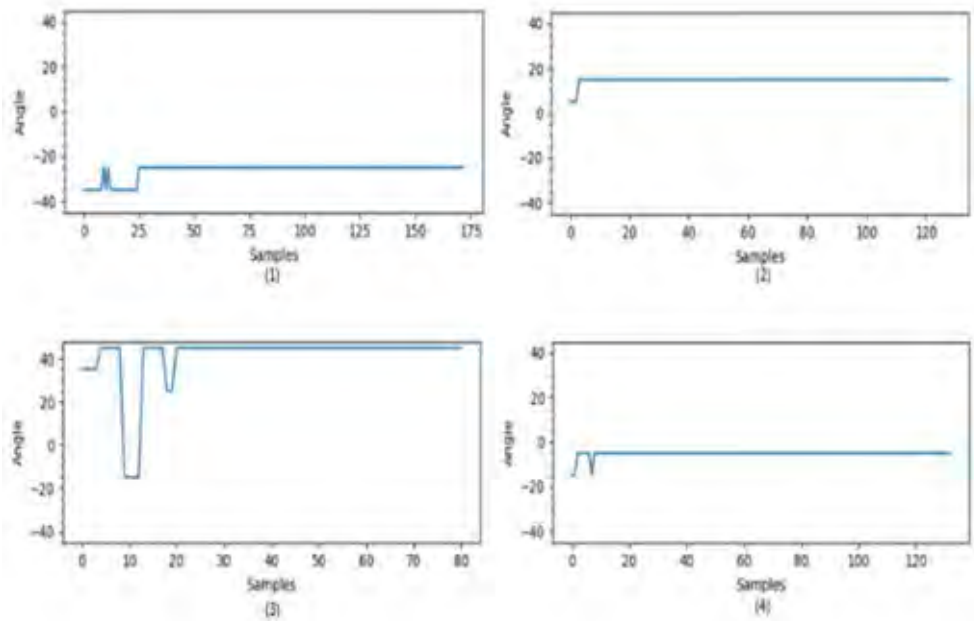


รูปที่ 3-25 การติดตั้งกระจกโดยตั้งค่าจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบในกรณีสิ่งกีดขวางแบบสุ่ม

สำหรับค่ามุมที่สะสมการช่วยเหลือผู้ใช้งานสูงสุดของกระจกแต่ละตัว แสดงในรูปที่ 3-26



2705313941



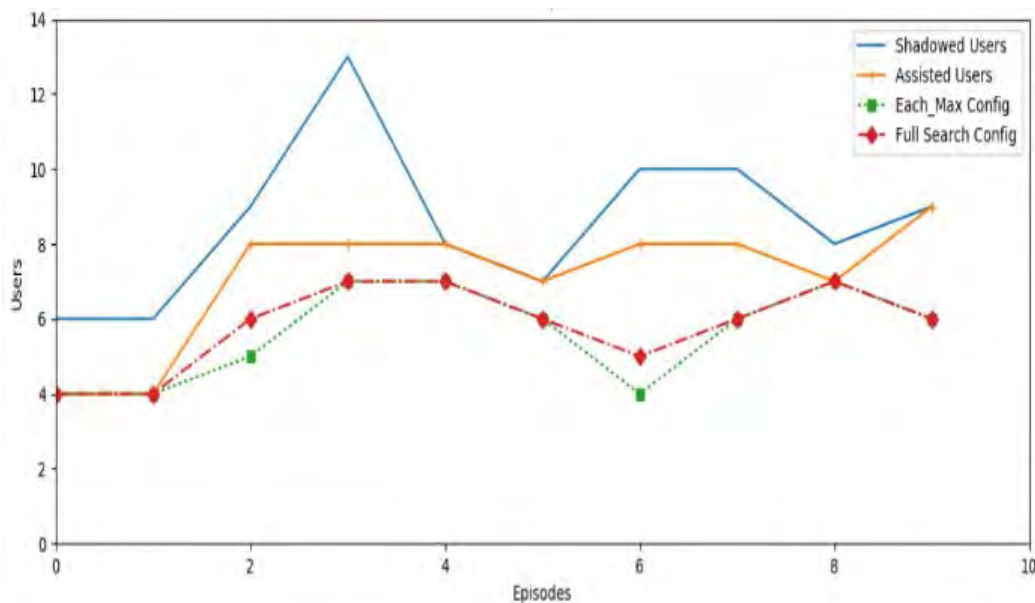
รูปที่ 3-26 ค่ามุมที่มีค่าการช่วยเหลือผู้ใช้งานสะสมสูงสุดของกระจกแต่ละตัวในกรณีสิ่งกีดขวางแบบ  
 สุ่ม

### 3) เปรียบเทียบผลการช่วยเหลือผู้ใช้งานในแต่ละวิธี

การเปรียบเทียบใช้วิธีทำโดยการสุ่มจำนวนผู้ใช้งานจำนวน 20 คนให้อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งจะมีผู้ใช้งานจำนวนหนึ่งถูกบดบังสัญญาณ ระบบทำการจำลองการใช้ตัวสะท้อนสัญญาณช่วยเหลือ

โดยจะพิจารณาวิธีการนำค่ามุมที่ดีที่สุดของตัวสะท้อนแต่ละตัวนำมาทำการเปรียบเทียบกับการค้นหาทุกกรณี ได้ผลดังกราฟในรูปที่ 3-27





รูปที่ 3-27 ผลเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานและการช่วยเหลือจากตัวสะท้อนวิธีต่าง ๆ

รูปที่ 3-27 แสดงจำนวนผลการจำลอง 20 รอบ โดยแสดงค่าจำนวนผู้ใช้งานที่ถูกบดบังสัญญาณ (Shadowed users) จำนวนผู้ใช้งานที่อยู่ในตำแหน่งที่ตัวสะท้อนมีโอกาสช่วยได้ (Assisted users) จำนวนผู้ใช้งานที่ระบบช่วยเหลือได้จากการทำการค้นหาทุกกรณี (Full search) และจำนวนผู้ใช้งานที่ระบบช่วยเหลือได้จากการตั้งค่ามุมตัวสะท้อนที่มีสถิติการช่วยเหลือมากที่สุด (Each max) จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในภาวะที่มีผู้ใช้งานที่ถูกบดบังสัญญาณและอยู่ในตำแหน่งที่ตัวสะท้อนมีโอกาสช่วยได้เป็นจำนวนใด ๆ ดังแสดงในกราฟเส้นสีส้ม (Assisted users) การใช้วิธีการหาแบบ Full search จะได้ค่าจำนวนผู้ใช้งานที่มากที่สุดจากการตั้งค่ามุมกระจกแต่ละตัวตามผลการรวมลูป combination ส่วนค่าการเก็บสถิติของกระจกแต่ละตัวจะเป็นการหาค่ามุมที่ดีที่สุดแต่ละตัวรับรู้จำนวนผู้ใช้งานที่ช่วยเหลือได้มากที่สุด (Each max) ซึ่งจากกราฟพบว่ามีความต่ำกว่าการหาแบบ Full search เพียงเล็กน้อย แต่ใช้การคำนวณของโปรแกรมน้อยกว่ามาก

4) วิเคราะห์ผลของระบบการเรียนรู้ด้วยตนเองในการเพิ่มปริมาณความครอบคลุมของสัญญาณ ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการจำลองสภาพสิ่งแวดล้อม สิ่งกีดขวางในรูปแบบที่แตกต่างกัน และค่าความครอบคลุมของสัญญาณในย่านความถี่เทระเฮิรตซ์โดยใช้ตัวสะท้อนคือกระจกมาช่วยในการสะท้อนสัญญาณไปสู่พื้นที่อับสัญญาณซึ่งเป็นพื้นที่นอกแนวสายตา (Non Line of Sight) จากตัวส่งสัญญาณ เพื่อศึกษารูปแบบของสิ่งกีดขวางที่มีผลต่ออัตราการเกิดความขาดหายของสัญญาณ ตำแหน่งและมุมของตัวสะท้อนที่ก่อเกิดประโยชน์ในการช่วยสะท้อนสัญญาณที่ให้ผลแตกต่างกันตามการตั้งค่า อีกทั้งยังได้ทำการคำนวณความครอบคลุมของสัญญาณแบบเต็มรูปแบบ (Full search) เพื่อหาค่าการตั้งค่าที่รองรับพื้นที่มากที่สุดภายใต้รูปแบบสิ่งกีดขวางแบบหนึ่ง ๆ รวมถึงการพิจารณา



แนวทางการเรียนรู้ด้วยตนเอง (Self-learning) ของกระจกแต่ละตัวว่ามุมใดให้ผลในการรองรับผู้ใช้งานที่ต้องการได้มากที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป

ผลที่ได้สามารถอภิปรายได้ว่า กระจกที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีคือได้รับสัญญาณจากตัวส่ง (Transmitter) เต็มที่ และมีระยะห่างจากสิ่งกีดขวางที่มากพอจะสามารถรองรับผู้ใช้งานได้มาก และการได้รับข้อมูลของผู้ใช้งานที่มากพอยังสามารถนำมาช่วยสร้างการเรียนรู้ด้วยตนเองเพื่อนำไปสู่การปรับมุมที่เหมาะสม เนื่องจากการเทียบค่ามุมกับค่าที่ได้รับจากการคำนวณแบบ full search นั้นจะได้ค่ามุมที่ตรงกัน แต่สำหรับกระจกที่เผชิญกับมุมอับเสียเองหรือไม่สามารถสะท้อนคลื่นไปยังพื้นที่อับสัญญาณได้มากพอจะไม่สามารถช่วยเหลือผู้ใช้งานได้มากนัก และการเรียนรู้ด้วยตนเองก็ไม่มีข้อมูลที่มากพอจะปรับมุมที่เหมาะสมได้

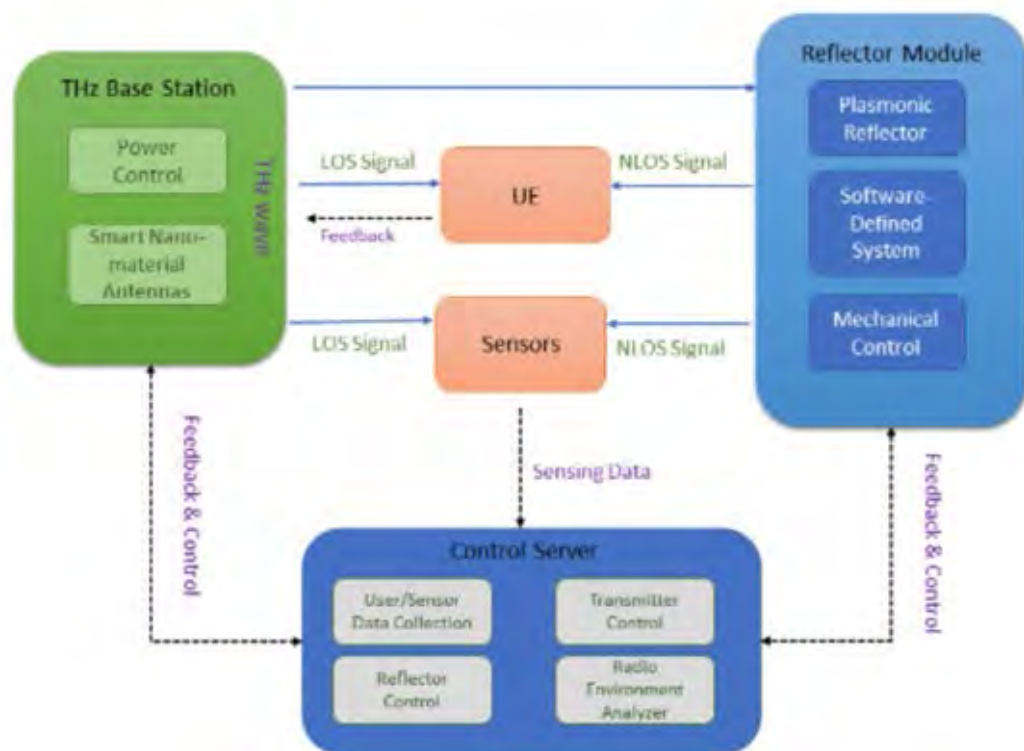
ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปช่วยในการออกแบบการทำการ configuration ค่ามุมที่เหมาะสมได้หากสภาพสิ่งกีดขวางไม่เปลี่ยนแปลงบ่อยนัก เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้นการทำการค้นหาเต็มรูปแบบนั้นทำได้ยากเพราะต้องการเซ็นเซอร์จำนวนมาก และการให้ตัวกระจกทำการหมุนสแกนหาผู้ใช้งานตลอดเวลาก็เป็นเรื่องที่ควรหลีกเลี่ยง ดังนั้นการเรียนรู้ค่าสถิติเพื่อทำการตั้งค่าที่เหมาะสมจึงเป็นประโยชน์ในการใช้งานจริง สถิติของการรองรับผู้ใช้งานได้น้อยนั้นสามารถช่วยในการพิจารณาการเคลื่อนย้ายตำแหน่งที่ติดตั้งกระจกออกจากตำแหน่งเดิมได้อีกด้วย



2705313941

## บทที่ 4 การประยุกต์ใช้กระจกสะท้อนสัญญาณร่วมกับการใช้สนามศักย์ประดิษฐ์ สำหรับการสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์

ในบทนี้ทางผู้จัดทำนำเสนอหลักการของระบบควบคุมสัญญาณเทระเฮิรตซ์ด้วยซอฟต์แวร์ (THz Software Defined System) ซึ่งเป็นการนำระบบควบคุมส่วนกลางมาช่วยในการควบคุมระบบสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์ โดยระบบควบคุมสามารถรับส่งข้อมูลกับเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องรวมถึงผู้ใช้งาน รับส่งข้อมูลและควบคุมการหมุนหรือการสะท้อนสัญญาณของกระจกแต่ละตัว และควบคุมสถานีส่งสัญญาณได้ โดยสามารถแสดงได้ดัง Block Diagram ดังรูปที่ 4-1 และเนื้อหาในบทจะกล่าวถึงสนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field) ที่ทางผู้เขียนนำเสนอในการนำมาช่วยวิเคราะห์ระดับการกีดขวางของสิ่งกีดขวางเพื่อวินำผลการเคราะห์มาช่วยในการกำหนดทิศทางของการส่งสัญญาณ และประมาณค่าสัญญาณที่จะมีระดับเปลี่ยนแปลงว่าจะมีลักษณะเป็นอย่างไรหากผู้ใช้งานมีการเคลื่อนไหวเล็กน้อยในบริเวณจำกัด (Micro Movement)

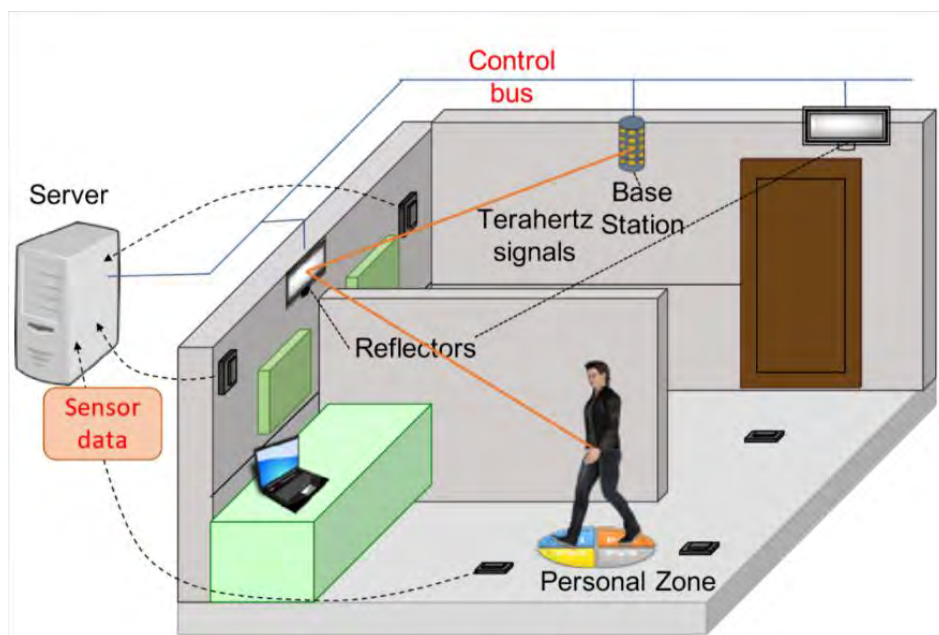


รูปที่ 4-1 THz Software Defined System Block Diagram

#### 4.1 ตัวสะท้อนสัญญาณร่วมด้วยการใช้งานสนามศักย์ประดิษฐ์

เนื่องจากการสื่อสารไร้สายที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก ๆ ดังที่ใช้กับคลื่นมิลลิเมตรหรือคลื่นต่ำกว่ามิลลิเมตรในย่านเทระเฮิร์ตซ์นั้นต้องการการสื่อสารในแนวสายตา ซึ่งระบบต้องการปัจจัยอื่น ๆ มาช่วยในการแนะนำสำหรับการกำหนดแถบสายอากาศที่เหมาะสมเพื่อทำการส่งสัญญาณสื่อสารที่สามารถหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางได้ดีที่สุด

ปัจจัยช่วยเหลือต่าง ๆ นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-2 โดยมีตัวเซ็นเซอร์วางอยู่ที่จุดต่าง ๆ ของห้องเพื่อทำการตรวจจับสิ่งกีดขวาง ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์เหล่านี้จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อสร้างสนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field, APF) ขึ้น ซึ่งสนามศักย์ประดิษฐ์นี้ได้ถูกนำเสนอโดย Vadakkepat et al. [14] สำหรับใช้ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์แบบเรียลไทม์และยังสามารถใช้เพื่อประโยชน์ในการบินเช่นกันดังที่มีการนำเสนอใน [32]



รูปที่ 4-2 สถาปัตยกรรมระบบควบคุมการสื่อสารเทระเฮิร์ตซ์ภายในอาคารโดยผู้ใช้งานอยู่ในบริเวณขอบเขตส่วนบุคคล (Personal Zone)

จากพื้นฐานความรู้ดังกล่าวได้เป็นแรงบันดาลใจสำหรับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในการใช้ APF สำหรับช่วยเหลือระบบสื่อสารในการตรวจวัดจำนวนและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางภายในห้องที่สารจะเป็นตัวกีดขวางการสื่อสารสัญญาณเทระเฮิร์ตซ์ภายในอาคารได้ เป้าหมายในการสร้าง APF สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นเพื่อหาค่าลักษณะความลาดชันของสนามศักย์จากตัวส่งสัญญาณไปยังกระจกและไปยังอุปกรณ์ผู้ใช้งาน ซึ่งลักษณะความลาดชันของสนามศักย์ที่ได้นี้จะนำไปช่วยในการ

พิจารณาแถบสายอากาศที่เหมาะสมที่สามารถส่งสัญญาณสื่อสารไปยังกระจกที่เหมาะสมที่สุดและได้ค่า SNR ที่ดีที่สุด

1) สนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field, APF)

สนามศักย์ประดิษฐ์คือแบบจำลองรูปแบบความลาดชันระหว่างจุดสองจุด ในที่นี้คือจุดส่งสัญญาณ (ตัวส่งสัญญาณ Tx และสัญญาณที่สะท้อนออกจากกระจก) และจุดที่รับสัญญาณ (อุปกรณ์รับสัญญาณ และกระจกที่รับสัญญาณตกกระทบจากตัวส่ง โดยลักษณะความลาดชันที่ได้นั้นจะมีความต่อเนื่องและความราบเรียบหากไม่มีสิ่งกีดขวาง แต่หากมีสิ่งกีดขวางจะพบลักษณะความลาดชันมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างกระทันหันซึ่งเป็นสัญญาณบ่งบอกว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ในเส้นทางดังกล่าว สนามศักย์ประดิษฐ์สามารถหาได้จากผลรวมของสนามศักย์ดึงดูด (Attractive potential) และสนามศักย์แรงผลัก (Repulsive potential)

2) สนามศักย์ดึงดูด (Attractive potential)

สนามศักย์ดึงดูด  $U_{att}(d)$  เป็นการแสดงค่าความลาดชันที่ระดับของสนามค่อยๆมีระดับลดลงจากตัวส่งสัญญาณมายังตัวรับสัญญาณที่อาจเป็นไปได้ทั้งอุปกรณ์สื่อสารไร้สายหรือกระจกสะท้อนก็ได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$U_{att}(d) = \begin{cases} \frac{1}{2} \xi d^2, d \leq d_{goal}^* \\ d_{goal}^* d - \frac{1}{2} (d_{goal}^*)^2, d > d_{goal}^* \end{cases} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $d$  คือระยะทางระหว่างต้นทางไปยังปลายทาง,  $d_{goal}^*$  คือตำแหน่งปลายทาง และ  $\xi$  คืออัตราขยายของการดึงดูด

3) สนามศักย์แรงผลัก (Repulsive potential)

สนามศักย์แรงผลัก  $U_{rep}(d)$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$U_{rep}(d) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{Q^*} \right)^2, d \leq Q^* \\ 0, d > Q^* \end{cases} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $Q^*$  คือค่าระดับกั้นของระยะห่างจากสิ่งกีดขวางเพื่อทำการสร้างสนามศักย์แรงผลัก โดยรอบสิ่งกีดขวางนั้น ๆ และ  $\eta$  คืออัตราขยายของการผลัก

4) ฟังก์ชันสนามศักย์รวม (Total potential function)

ฟังก์ชันสนามศักย์รวมคือผลรวมของสนามทั้งหมด โดยผลรวมของสนามศักย์ดึงดูดนั้นเป็นการรวมกันของสนามศักย์ดึงดูดของตัวสะท้อนทั้งหมดซึ่งมีค่าดังสมการ

$$U_{att} = \sum_{i=1}^M U_{att_i} \quad (4.3)$$

โดย  $M$  คือจำนวนของกระจกทั้งหมด

ส่วนสนามศักย์แรงผลักรวมนั้นเป็นผลรวมของสนามแรงผลักต่าง ๆ ที่ถูกจำลองขึ้นจากการตรวจจับสิ่งกีดขวางแต่ละตัวเป็นจำนวน  $N$  ตัว ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$U_{rep} = \sum_{i=1}^N U_{rep_i} \quad (4.4)$$

ดังนั้นฟังก์ชันสนามศักย์รวมที่เป็นผลรวมของสนามศักย์ดึงดูดและสนามศักย์แรงผลักนั้นสามารถเขียนได้ตามสมการ

$$U(d) = U_{att}(d) + U_{rep}(d) \quad (4.5)$$

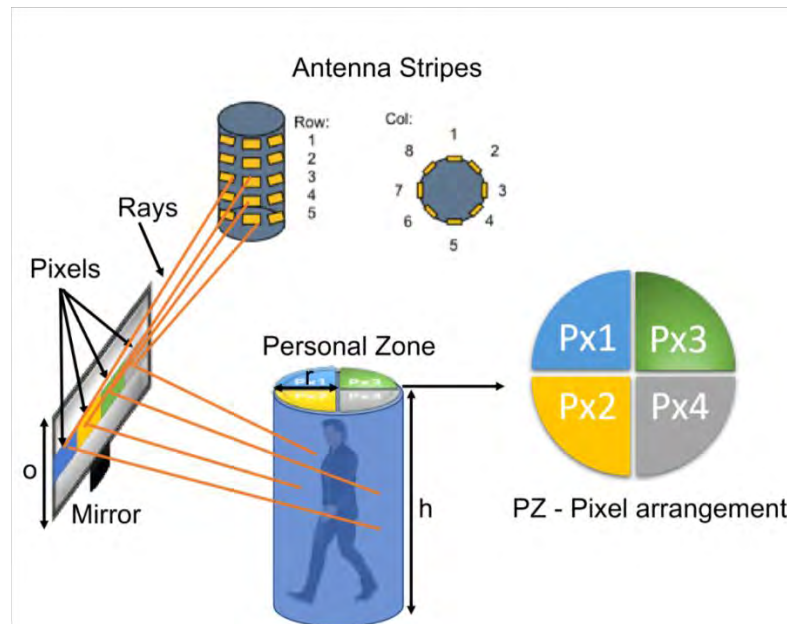
5) การเลือกสัญญาณสำหรับบริเวณส่วนบุคคลด้วยการใช้ APF

การนำค่า APF ที่คำนวณได้มาช่วยในการพิจารณาเส้นทางของสัญญาณจากทิศทางต่าง ๆ ที่ส่งมายังตัวรับนั้น ยังมีประเด็นที่ต้องทำการพิจารณาเพิ่มเติมด้วยเช่นกันคือการขยับเคลื่อนตัวของอุปกรณ์เป็นระยะทางสั้น ๆ ซึ่งที่วิจัยของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรียกว่า “Micro Movement” เช่นกรณีผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือมีการขยับร่างกายไปมาหรือมีการแกว่งแขน รวมทั้งการขยับเคลื่อนที่ในระยะทางสั้น ๆ ของผู้ใช้งานหรือโดยตัวอุปกรณ์เองก็ตาม ดังนั้นจุดประสงค์หนึ่งในงานวิจัยคือการพิจารณาทิศทางของกลุ่มสัญญาณที่ดีที่สุดจะเข้ามาทำการสื่อสารกับตัวอุปกรณ์เครื่องรับหากเกิดกรณีการขยับหรือเคลื่อนที่ดังกล่าวได้



2705313941

ในหัวข้อย่อๆนี้จะแสดงอัลกอริทึมในการเลือกเซตของสัญญาณเทอร์เรสเตอร์ซ์ที่มาจาก การสะท้อนจากกระจกในเส้นทางต่าง ๆ มายังบริเวณส่วนบุคคล



รูปที่ 4-3 ขอบเขตส่วนบุคคลต้องการสัญญาณเทอร์เรสเตอร์ซ์หลายสัญญาณเพื่อความครอบคลุมพื้นที่ โดยรอบผู้ใช้งานเพื่อรับประกันว่าจะไม่สูญเสียการเชื่อมต่อสัญญาณในกรณี micro movement

รูป 4-3 แสดงแบบจำลองของบริเวณส่วนบุคคลในระบบการสื่อสารย่านเทอร์เรสเตอร์ซ์ ภายในอาคารที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยตัวส่งสัญญาณ Tx ประกอบด้วยแถบ สายอากาศ (antenna stripe) จำนวนมาก, กระจกมีวัสดุสะท้อนคลื่นพื้นผิวราบเรียบที่สามารถสะท้อนสัญญาณเทอร์เรสเตอร์ซ์ และผู้ใช้งานที่มีอุปกรณ์สื่อสารไร้สายซึ่งถือเป็นตัวรับ สัญญาณนั้นอยู่ในบริเวณขอบเขตที่กำหนดให้เป็นบริเวณส่วนบุคคล เนื่องจากแถบ สายอากาศมีขนาดเล็กมาก และความกว้างของบีมสัญญาณมีขนาดเล็กเช่นกัน จึงสามารถ กำหนดสมมติฐานได้ว่าในแบบจำลองนี้บีมสัญญาณแต่ละบีมนั้นเป็นอิสระและไม่รบกวนซึ่ง กันและกัน ตัวบีมสามารถส่งสัญญาณไปยังส่วนย่อย ๆ ของกระจกได้ (หรือเป็นตัวอุปกรณ์รับ สัญญาณในกรณี LoS)

จากที่กล่าวมาเราสามารถแบ่งจุดรับสัญญาณบนกระจกแต่ละตัวได้เป็นส่วนย่อย ๆ หรือเป็นพิกเซลที่จะรองรับบีมสัญญาณที่ส่งมาจากตัวส่งและสะท้อนสัญญาณไปยังส่วนต่าง ๆ ภายในบริเวณส่วนบุคคลของผู้ใช้งาน เรากำหนดให้บริเวณส่วนบุคคลมีความสูงเท่ากับ ส่วนสูงของผู้ใช้งาน ( $h$ ) และรัศมี ( $r$ ) เท่ากับความยาวของแขนของผู้ใช้งาน โดยกระบวนการ การส่งคลื่นเทอร์เรสเตอร์ซ์นั้นสามารถแสดงได้ดังอัลกอริทึม 1 ที่ขณะเริ่มต้นระบบจะทำการ

วิเคราะห์หาเส้นทางที่ดีที่สุดในการส่งสัญญาณทั้งจากตัวส่งไปยังกระจกและจากกระจกไปยังผู้รับโดยใช้ค่าของ APF มาช่วยในการพิจารณา เมื่อคำนวณหาเส้นทางที่ดีที่สุดได้แล้วหลังจากนี้อัลกอริทึมจะทำการเลือกปีมสัญญาณที่ดีที่สุด 4 ปีมที่จะสะท้อนไปยังบริเวณส่วนบุคคลของผู้ใช้งานได้ครอบคลุมทั้ง 4 ส่วนย่อยที่ผู้ใช้งานสามารถทำการขยับตัวจนเกิด micro movement ได้ โดยอัลกอริทึมสำหรับการคัดเลือกสัญญาณสำหรับบริเวณส่วนบุคคลที่งานวิจัยนี้ใช้มีขั้นตอนดังนี้

---

**Algorithm 1** Ray scheduling algorithm for personal zone field

---

```

1: Define:  $R$  is the number of rays,  $P$  is the number of pixels
   in each mirror,  $T$  is a tuple of a ray  $\in R$  and a APF  $U$ ,
    $rank()$  is a function that selects the four rays with higher
    $U$ 
2: function SCHEDULING( $M, N, R, P$ )
3:    $T_x \leftarrow get\_D()$   $\triangleright d$ : euclidean distance function
4:    $R_x \leftarrow get\_D()$ 
5:    $d_0 \leftarrow 0$ 
6:    $U_{att} \leftarrow 0$ 
7:    $U_{rep} \leftarrow 0$ 
8:    $U \leftarrow 0$ 
9:   for  $i \leftarrow 1$  to  $R$  do
10:     $P_x \leftarrow get\_pixel(P, M)$ 
11:     $d_0 \leftarrow D(T_x, P_x) + D(P_x, R_x)$ 
12:    for  $j \leftarrow 1$  to  $M$  do
13:       $U_{att} += U_{att} + U_{att}(d_0)$ 
14:    end for
15:    for  $k \leftarrow 1$  to  $N$  do
16:       $U_{rep} += U_{rep} + U_{rep}(d_0)$ 
17:    end for
18:     $T_i \leftarrow i, U$ 
19:  end for
20:  return  $rank(T)$ 
21: end function

```

---

## 4.2 การจำลองผลโดยการทำ Simulation

### 1) การจำลองสถานการณ์

งานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยพัฒนาโปรแกรมจำลองระบบเรย์เทรซิงของการสื่อสารไร้สายย่านเทระเฮิรตซ์ ด้วยโปรแกรมภาษาไพทอนเป็นหลัก โดยทำการจำลองและวิเคราะห์ค่าต่างๆของสัญญาณตามเส้นทางของการสื่อสาร โดยในที่นี้กำหนดสิ่งแวดล้อมเป็นภายในอาคาร ให้ห้องมีขนาด 5 x 5 เมตร ภายในห้องมีสิ่งกีดขวาง 3 ชั้นโดยแต่ละชั้นมีขนาด 40 x 40 ซม. ความกว้างของกระจก

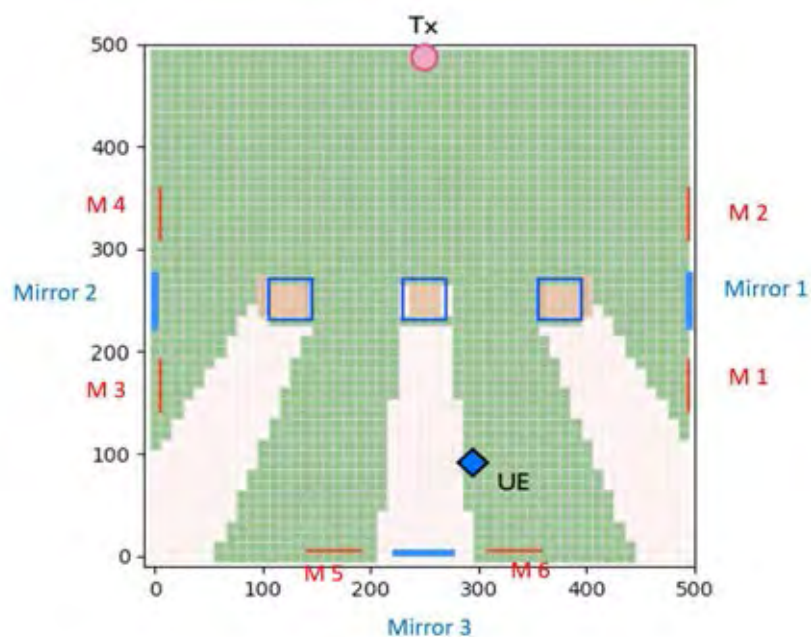


2705313941



50 ซม. ที่สถานีฐานตัวสายอากาศประกอบด้วยแถบสายอากาศจำนวน 40 แถบที่แต่ละแถบมีขนาด 1 ซม. โดยความถี่ของคลื่นอยู่ที่ 1 THz

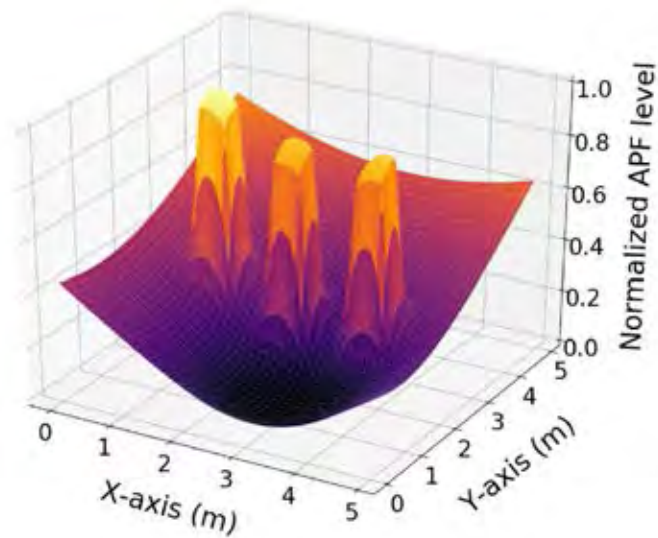
ในการจำลองกำหนดให้มีการติดตั้งกระจกเป็นสองรูปแบบคือ แบบแรกจะติดตั้งกระจกจำนวน 3 ตัว และแบบที่สองมีการติดตั้งกระจก 6 ตัว ดังรูปที่ 4-4 แสดงตำแหน่งของการติดตั้งกระจกทั้งสองแบบโดยกระจกสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกระจกที่มีการติดตั้ง 3 ตัว และสีแดงแสดงตำแหน่งของกระจกที่มีการติดตั้ง 6 ตัว โดย Tx ตัวส่งสัญญาณและ UE คืออุปกรณ์รับสัญญาณของผู้ใช้งาน



รูปที่ 4-4 แบบจำลองการติดตั้งกระจกสะท้อนสัญญาณเทระเฮิรตซ์ภายในอาคาร แบบติดตั้งกระจก 3 ตัว (สีน้ำเงิน) และ 6 ตัว (สีแดง)

เมื่อโปรแกรมจำลองสนามศักย์ประติษฐ์ (APF) จากข้อมูลของวัตถุต่าง ๆ ภายในห้อง จะได้ผลลัพธ์ของสนามศักย์รวมดังรูปที่ 4-5 ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าที่จุดปลายทางของสัญญาณหรือจุดที่เป็นตำแหน่งของผู้ใช้งานนั้นจะมีลักษณะเป็นจุดต่ำสุดจากการคำนวณการสร้างสนามศักย์ดึงดูด ส่วนสิ่งกีดขวางแต่ละชิ้นจะถูกคำนวณด้วยหลักการสนามศักย์แรงผลักทำให้มีลักษณะนูนสูงขึ้น





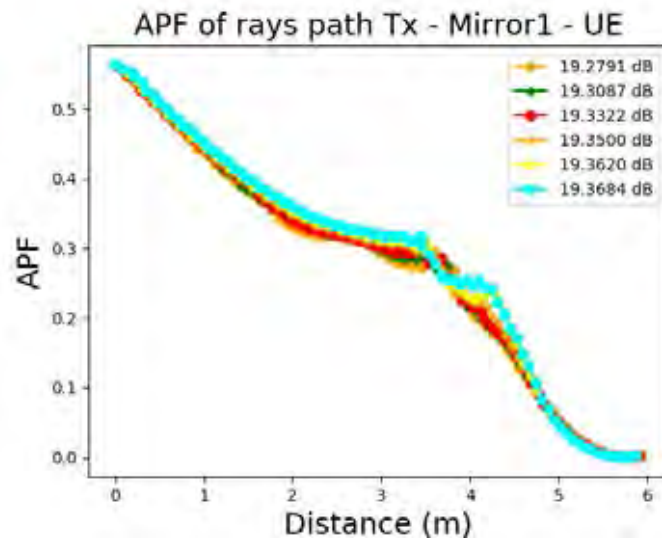
รูปที่ 4-5 สนามศักยภาพประดิษฐ์ (APF) ของแบบจำลองในรูปที่ 4-4

## 2) ผลของสนามศักยภาพประดิษฐ์ต่อแนวเส้นทางของคลื่นสัญญาณ

เมื่อระบบสามารถจำลองสนามศักยภาพประดิษฐ์ (APF) ได้แล้ว ค่าระดับการเปลี่ยนแปลงของ APF ในแต่ละจุดของพื้นที่ตลอดแนวการเดินทางของสัญญาณสามารถนำมาช่วยวิเคราะห์การถูกบดบังของแต่ละบีมสัญญาณได้ จากผลในรูปที่ 4-6 ซึ่งเป็นค่าระดับ APF ของบีมต่าง ๆ จากแถบสายอากาศที่ส่งไปยังกระจกตัวที่ 1 (ที่ผนังห้องด้านขวา) และสะท้อนไปยังผู้ใช้งาน โดยในแบบจำลองนี้ขนาดกระจกสามารถรองรับบีมสัญญาณได้ 6 จุดหรือนับเป็น 6 พิกเซล ดังนั้นจะมีบีมสัญญาณ 6 บีมจากแถบสายอากาศ 6 ตัว เห็นได้ว่า APF ของทุกสัญญาณมีความราบเรียบ (smoothness) สูง ซึ่งสามารถบอกได้ว่าไม่เกิดการกีดขวางสัญญาณตลอดเส้นทางนี้ และผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณได้จากทุกบีมโดยค่า SNR ของแต่ละบีมมีค่าดังที่ระบุไว้ในรูป

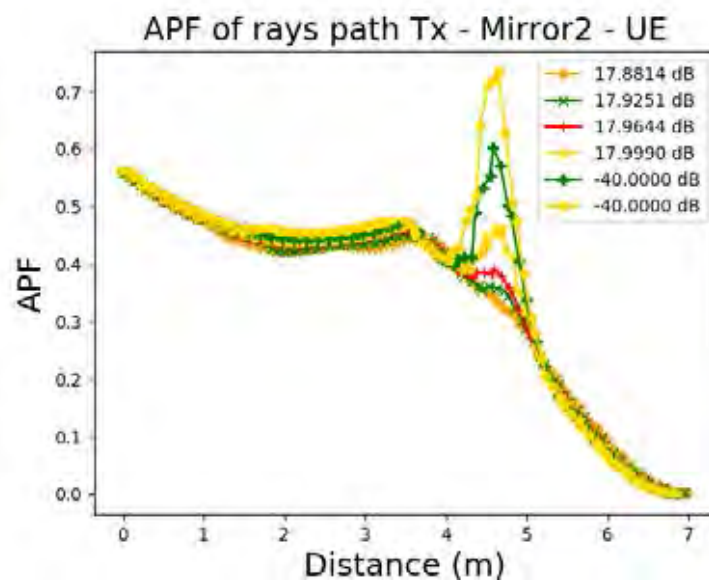


2705313941



รูปที่ 4-6 APF ของสัญญาณจากตัวส่งไปยังผู้ใช้งานที่มีการสะท้อนจากกระจกตัวที่ 1

รูปที่ 4-7 เป็นค่าระดับ APF ของบีมต่าง ๆ จากแถบสายอากาศที่ส่งไปยังกระจกตัวที่ 2 (ที่ผนังห้องด้านซ้าย) และสะท้อนไปยังผู้ใช้งาน จะเห็นได้ว่าค่าความราบเรียบของ APF ส่วนใหญ่มีค่าสูง แต่มีบางบีมที่มีค่าของ APF สูงขึ้นกะทันหันอันสามารถบอกได้ว่าการเกิดขวางสัญญาณในบีมดังกล่าวซึ่งระบบจะถือว่าสัญญาณส่วนนี้ถูกกีดขวางและไม่สามารถส่งไปยังผู้รับได้ ผลจากในรูปจะสรุปว่าสามารถทำการสื่อสารสำเร็จได้ 4 บีม และสัญญาณถูกกีดขวาง 2 บีม โดยในที่นี้กำหนดค่าของการไม่มีสัญญาณไว้ที่ -40 dB

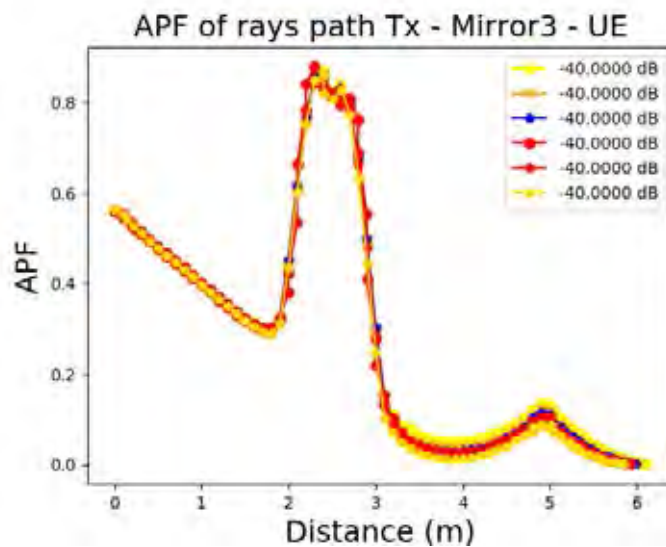


รูปที่ 4-7 APF ของสัญญาณจากตัวส่งไปยังผู้ใช้งานที่มีการสะท้อนจากกระจกตัวที่ 2



2705313941

ส่วนรูปที่ 4-8 คือระดับ APF ของบีมต่าง ๆ จากแถบสายอากาศที่ส่งไปยังกระจกตัวที่ 3 (ที่ผนังห้องด้านล่าง) จะเห็นได้ว่าสัญญาณจากตัวส่งถูกสิ่งกีดขวางบดบังทั้งหมดจนไม่สามารถทำการสื่อสารไปยังผู้ใช้งานได้ โดย APF มีความชันเพิ่มขึ้นอย่างมากและระดับ APF มีค่าสูงทุกบีมตามแนวเส้นทางนี้จึงไม่สามารถส่งไปยังปลายทางได้



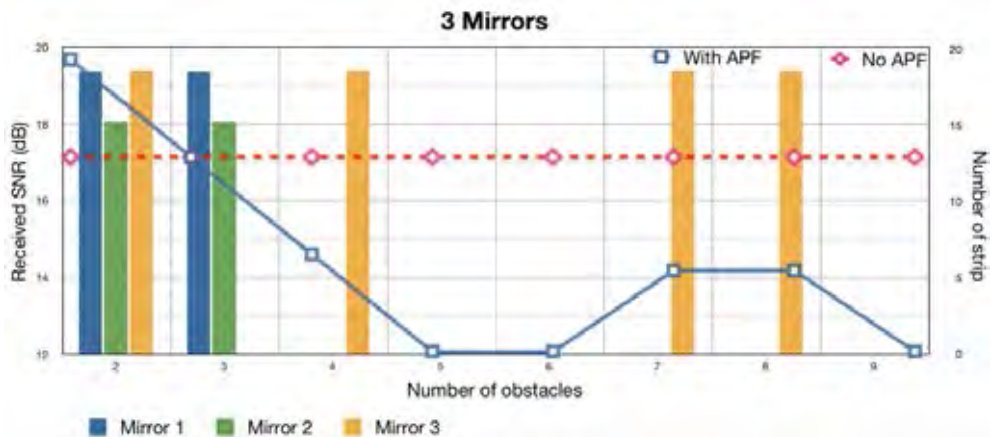
รูปที่ 4-8 APF ของสัญญาณจากตัวส่งไปยังผู้ใช้งานที่ทำการสะท้อนจากกระจกตัวที่ 3

### 3) การพิจารณาค่า SNR ของสัญญาณเทระเฮิรตซ์ในบริเวณส่วนบุคคล

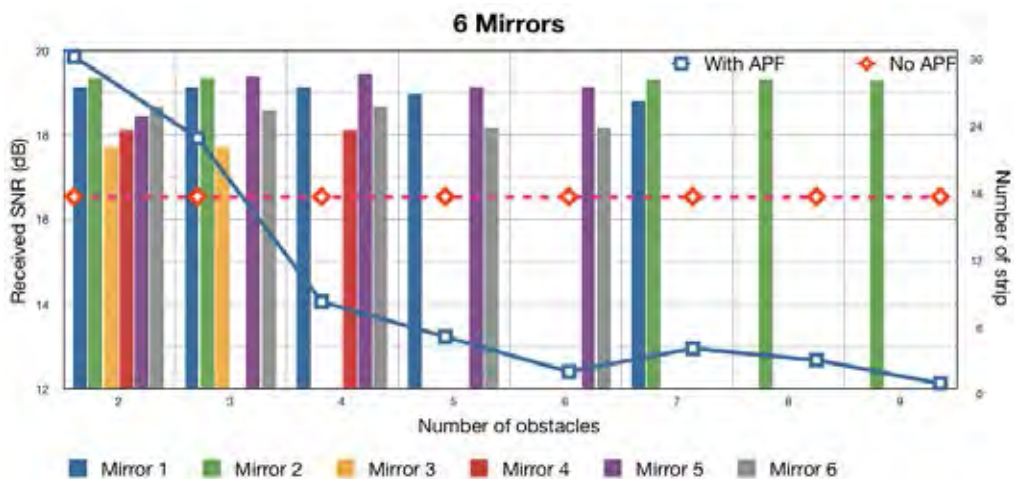
รูป 4-9 และ 4-10 แสดงค่าของค่า SNR สูงสุดที่ตัวรับได้รับสัญญาณจากกระจกแต่ละตัวภายใต้การมีอยู่ของจำนวนสิ่งกีดขวางจำนวนต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ในกราฟยังแสดงจำนวนของแถบสายอากาศที่จะมีการถูกเปิดใช้ในสองกรณีคือกรณีที่ไม่มีการคำนวณค่า APF และกรณีที่มีการคำนวณค่า APF โดยรูปที่ 4-9 เป็นกรณีติดตั้งกระจก 3 ตัว และรูปที่ 4-10 เป็นกรณีติดตั้งกระจก 6 ตัว



2705313941



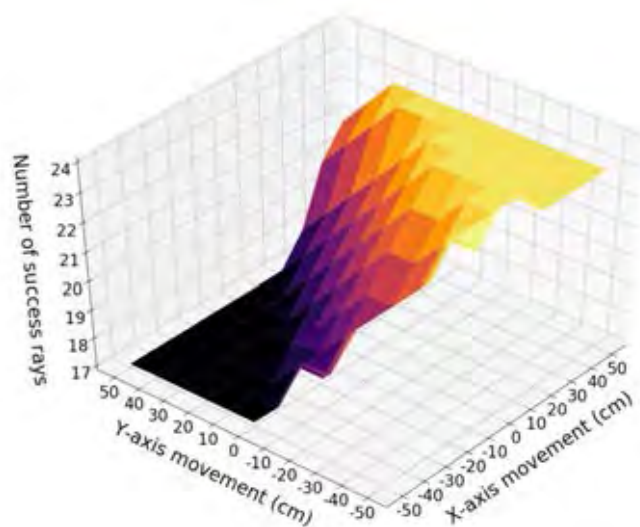
รูปที่ 4-9 ค่า SNR สูงสุดที่ผู้ใช้งานรับได้จากกระจกแต่ละตัว จำนวน 3 ตัวด้วยจำนวนสิ่งกีดขวางต่าง ๆ กัน และค่าของจำนวนแถบสายอากาศที่ถูกเปิดในกรณีที่ไม่มีการคำนวณค่า APF (เส้นประ) และมีการคำนวณค่า APF (เส้นทึบ)



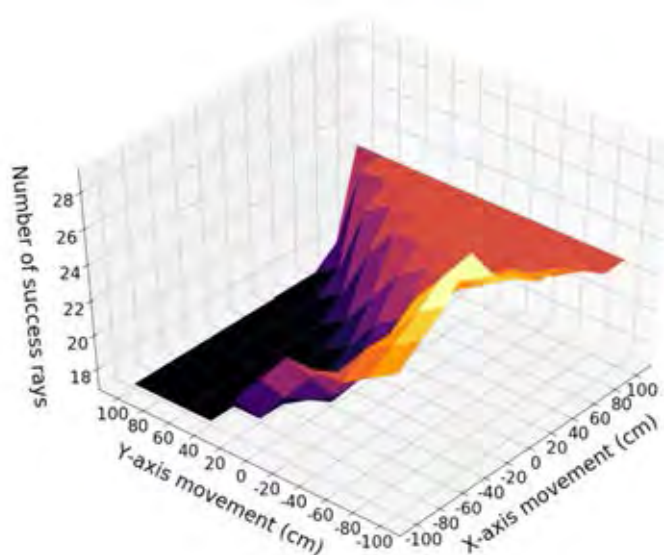
รูปที่ 4-10 ค่า SNR สูงสุดที่ผู้ใช้งานรับได้จากกระจกแต่ละตัว จำนวน 6 ตัวด้วยจำนวนสิ่งกีดขวางต่าง ๆ กัน และค่าของจำนวนแถบสายอากาศที่ถูกเปิดในกรณีที่ไม่มีการคำนวณค่า APF (เส้นประ) และมีการคำนวณค่า APF (เส้นทึบ)

เห็นได้ว่าหากไม่มีการคำนวณ APF ตัวส่งสัญญาณจะต้องเปิดแถบสายอากาศทั้งหมดที่สามารถส่งคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการได้เพื่อส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งาน แต่เมื่อมีการคำนวณ APF แล้วตัวส่งสามารถใช้ข้อมูล APF มาช่วยพิจารณาการเปิดหรือปิดแถบสายอากาศตามความเหมาะสมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่มีสิ่งกีดขวางอยู่มากจะเห็นว่าแถบสายอากาศที่ไม่จำเป็นนั้นจะถูกปิดการใช้งานซึ่งช่วยให้สามารถประหยัดการใช้พลังงานในตัวส่งลงได้มาก

รูป 4-11 และ 4-12 เป็นจำนวนสัญญาณทั้งหมดที่สามารถส่งเข้ามายังบริเวณส่วนบุคคลของผู้ใช้ในกรณีที่พิจารณา micro movement ในระยะ 50 ซม. และ 100 ซม. ตามลำดับ ในโดยตำแหน่งของผู้ใช้งานถูกระบุไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกราฟ (0,0) ในระนาบแกน (x,y) จากผลที่ได้ทำให้ทราบว่า การขยับของอุปกรณ์เคลื่อนที่ในระยะเล็กน้อยมีผลต่อความสามารถในการรับปีมสัญญาณเทระเฮิรตซ์จากทิศทางต่าง ๆ ได้



รูปที่ 4-11 จำนวนสัญญาณที่ผู้ใช้งานสามารถรับได้ในกรณีการเกิดการขยับอุปกรณ์ตัวรับสัญญาณภายในระยะ 50 ซม.



รูปที่ 4-12 จำนวนสัญญาณที่ผู้ใช้งานสามารถรับได้ในกรณีการเกิดการขยับอุปกรณ์ตัวรับสัญญาณภายในระยะ 100 ซม.



2705313941

พบว่าเมื่อนำค่า APF มาร่วมประกอบการคำนวณเส้นทางของสัญญาณต่าง ๆ ที่สามารถส่งไปยังพื้นที่ย่อยรอบตัวผู้ใช้งานจะสามารถทราบค่าปริมาณสัญญาณที่ตัวส่งจะส่งไปถึงยังแต่ละพื้นที่ได้และทราบได้ในเบื้องต้นว่าลักษณะการเคลื่อนที่แบบใดที่จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของจำนวนสัญญาณที่จะส่งถึงอุปกรณ์ตัวรับได้

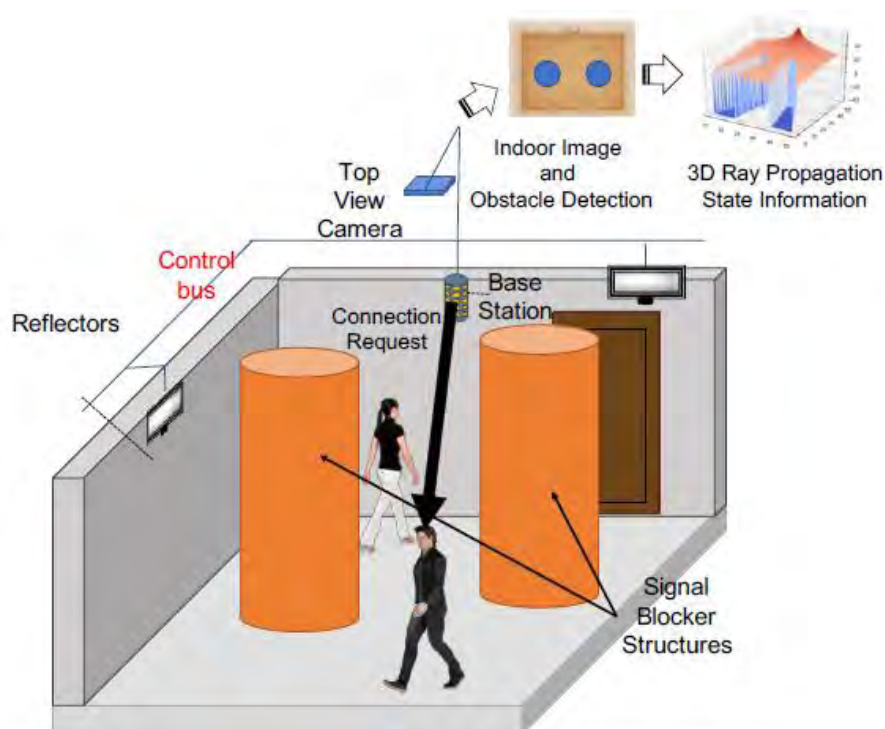
#### 4.3 สรุปและอภิปรายผล

จากการนำหลักการสนามศักย์ประติมาตร (APF) มาช่วยในการวิเคราะห์ระดับสิ่งกีดขวางร่วมกับระบบซอฟต์แวร์ควบคุมการสื่อสารเทระเฮิรตซ์ พบว่าสามารถช่วยให้คำนวณการถูกปิดกั้นสัญญาณของรังสีคลื่นที่ส่งออกจากตัวส่งได้ตลอดเส้นทางที่คลื่นส่งออกจากตัวส่งไปยังผู้ใช้งานที่ต้องการ จำนวนกระจกที่ใช้ในระบบก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้สามารถเพิ่มเส้นทางที่สัญญาณจะไปถึงผู้รับได้มากขึ้น อีกทั้งการนำ APF ร่วมวิเคราะห์การตัดสินใจเปิดใช้งานสายอากาศในส่วนของจำเป็นและปิดส่วนที่ไม่สามารถส่งถึงผู้ใช้งานได้ยังช่วยในการประหยัดพลังงานของระบบได้โดยเฉพาะในขณะที่มีสิ่งกีดขวางอยู่เป็นจำนวนมาก และการจำคำนวณผลการวิเคราะห์ระดับของสัญญาณภายในบริเวณส่วนบุคคลสามารถบอกได้ว่าในสภาวะปัจจุบันของผู้ใช้งานนั้นการขยับเคลื่อนที่อุปกรณ์เป็นระยะทางขนาดเล็ก ๆ (Micro Movement) รอบตัวมีผลต่อสัญญาณที่ได้รับว่าจะมากขึ้นหรือลดลงอย่างไร

## บทที่ 5 การปรับบีม การไปแอส การสะท้อน และคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับระบบสื่อสารย่านเทระเฮิรตซ์

### 5.1 แบบจำลองการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ร่วมกับระบบสื่อสารเทระเฮิรตซ์

วิทยานิพนธ์ในบทนี้นำเสนอแนวคิดนำหลักการของปัญญาประดิษฐ์ในเรื่องคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Visions) มาช่วยในการตรวจจับวัตถุหรือบุคคลที่มีการเคลื่อนที่ภายในอาคารที่เป็นพื้นที่การสื่อสารของระบบเทระเฮิรตซ์ที่ทำการพิจารณา ซึ่งการตรวจจับที่ได้จะถูกนำไปคำนวณและจำลองสนามศักย์ประติมาตรเพื่อควบคุมการส่งสัญญาณจากสถานีฐาน และตัวสะท้อนต่อไปแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูป 5-1

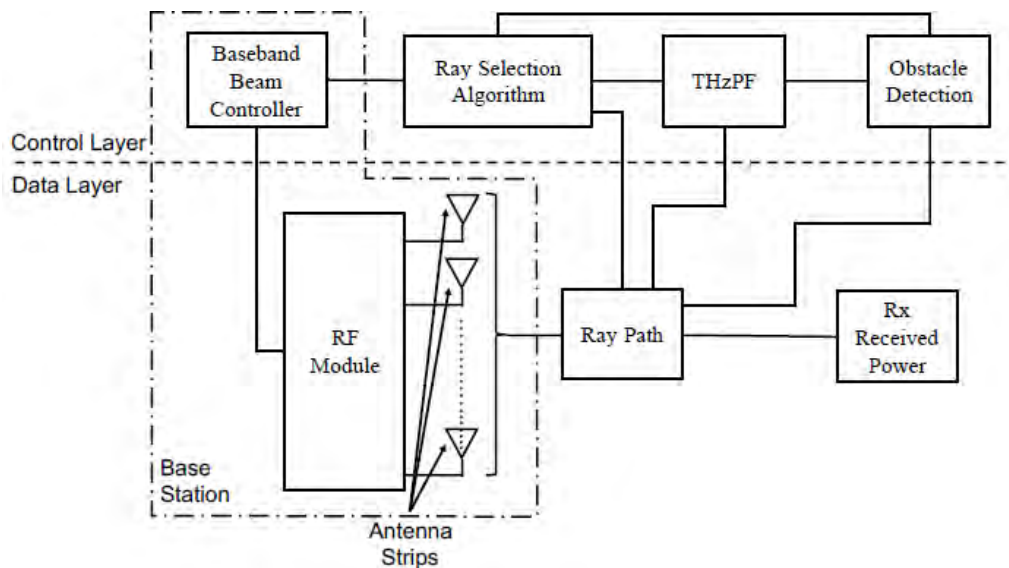


รูปที่ 5-1 แบบจำลองระบบสื่อสารเทระเฮิรตซ์ร่วมกับการตรวจจับวัตถุด้วย Computer Visions

### 5.2 แบบจำลองระบบควบคุมการสื่อสารเทระเฮิรตซ์

แบบจำลองของระบบที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 5-2





รูปที่ 5-2 แบบจำลองระบบควบคุมการสื่อสาร

โดยรายละเอียดของตัวส่งสัญญาณและการจกสะท้อนสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) แบบจำลองตัวส่งสัญญาณ

ในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนและการสูญเสียกำลังของคลื่นสัญญาณนั้นการใช้สายอากาศแบบเฟสอาร์เรย์มีความเหมาะสมเนื่องจากสามารถเพิ่มอัตราขยายได้มากที่สุด ดังสมการ

$$G_{kl}(\theta, \phi) = g_e \frac{\sin\left(M_a \frac{\pi f \xi}{c} [\sin(\theta) \cos(\phi - \bar{\phi}_{kl}) - \sin(\theta_{kl}) \cos(\phi_{kl} - \bar{\phi}_{kl})]\right)}{\sin\left(\frac{\pi f \xi}{c} [\sin(\theta) \cos(\phi - \bar{\phi}_{kl}) - \sin(\theta_{kl}) \cos(\phi_{kl} - \bar{\phi}_{kl})]\right)} \frac{\sin\left(N_a \frac{\pi f \xi}{c} [\sin(\theta) \sin(\phi - \bar{\phi}_{kl}) - \sin(\theta_{kl}) \sin(\phi_{kl} - \bar{\phi}_{kl})]\right)}{\sin\left(\frac{\pi f \xi}{c} [\sin(\theta) \sin(\phi - \bar{\phi}_{kl}) - \sin(\theta_{kl}) \sin(\phi_{kl} - \bar{\phi}_{kl})]\right)} \quad (5.1)$$

โดยที่  $g_e$  คืออัตราขยายสัญญาณขององค์ประกอบย่อยภายในสายอากาศ (antenna element gain)  $M_a \times N_a$  คือจำนวนขององค์ประกอบย่อยภายในสายอากาศทั้งหมดต่อเฟสอาร์เรย์  $\xi$  คือระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างองค์ประกอบย่อยต่าง ๆ ที่อยู่ติดกัน โดยมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น

$\lambda = \frac{c}{f}$ ,  $\theta_{kl}$  และ  $\phi_{kl}$  คือ มุมที่ถูกบังคับในทางแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับโดยขึ้นอยู่กับแต่ละ

แถบสายอากาศ  $(k, l)$  ส่วน  $\bar{\phi}_{kl}$  คือมุมอาซิมุทของเวกเตอร์ปกติ  $n_s$  ของแถบสายอากาศ  $(k, l)$  ทั้งนี้  $\theta_{kl}, \phi_{kl}$  อยู่ในระนาบการสแกนของเฟสอาร์เรย์

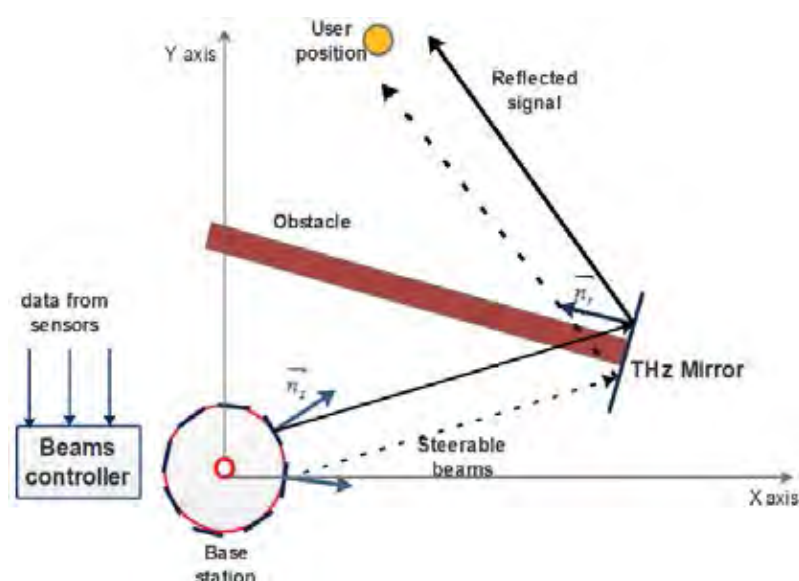
ให้  $n_r = [t_1, t_2, t_3]$  เป็นเวกเตอร์เชิงตั้งฉากปกติของผิวกระจก และ  $n_{kl}$  คือเวกเตอร์คลื่นตกกระทบที่ทำการนอร์มัลไลซ์จากแถบสายอากาศ  $(k, l)$  จะได้ว่า

$$\cos(\theta_{incident}) = -n_r n_{kl} \quad (5.2)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) = & -t_1 \sin(\theta_{kl}) \cos(\phi_{kl} - \bar{\phi}_{kl}) \\ & -t_2 \sin(\theta_{kl}) \sin(\phi_{kl} - \bar{\phi}_{kl}) - t_3 \cos(\theta_{kl}) \end{aligned} \quad (5.3)$$

โดยที่ค่าของ  $\cos(\theta_i)$  ขึ้นอยู่กับค่ามุมบังคับทิศทางและการจัดวางตำแหน่งของกระจก การเพิ่มจำนวนแถบสายอากาศที่มีการเอียงที่พื้นนั้นแม้จะสามารถเพิ่มอัตรา link budget ได้แต่การออกแบบต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวนด้วยเช่นกัน รูปที่ 5-3 แสดงมุมมองจากด้านบนของสายอากาศที่ใช้งานภายในอาคารโดยมีการติดตั้งเฟสอาร์เรย์และระบบการบังคับทิศทางของปีม ด้วยข้อมูลจากระบบตรวจจับวัตถุจะทำให้ระบบสามารถกำหนดให้สายอากาศสามารถส่งสัญญาณไปในทิศทางที่ต้องการได้ ทั้งการส่งไปยังผู้ใช้งานโดยตรงหรือส่งไปยังกระจกหากตรวจพบสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างสายอากาศตัวส่งและผู้ใช้งาน



รูปที่ 5-3 มุมมองจากด้านบนของการส่งสัญญาณ

### 5.3 รูปแบบการส่งสัญญาณเทระเฮิรตซ์จากสายอากาศ

#### 1) แบบจำลองรูปแบบโคน (Cone Model)

รูปแบบของสายอากาศประเภทโคนนี้ ค่า PSD ของคลื่นสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx}}{S_A} = \frac{P_{Tx}}{2\pi rh} \quad (5.4)$$

เมื่อ  $S_A$  คือพื้นที่ผิวของหน้าคลื่น โดยที่  $h = r[1 - \cos(\alpha/2)]$  ที่ค่า  $\alpha$  คือค่ามุมความมีทิศทาง (directivity) ของสายอากาศ ทั้งนี้เราสามารถนำแบบจำลองของการแพร่กระจายคลื่นในอากาศมารวมใช้ด้วยได้ดังสมการ

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx}}{S_A} = P_{Tx} \cdot \frac{G}{4\pi r^2} \quad (5.5)$$

ซึ่งหมายความว่าอัตราการขยาย (Gain) สำหรับลูกคลื่นหลัก (main lobe) จะได้เท่ากับ

$$G = \frac{2}{1 - \cos(\alpha/2)} \quad (5.6)$$

ซึ่งหากเป็นกรณีที่  $\alpha = 2\pi$  นั้นจะนับว่าเป็นการแพร่คลื่นออกไปรอบทิศ (omnidirectional) แบบอุดมคติ โดยที่ค่า gain  $G = 1$  และค่า  $S_A = 4\pi r^2$  ตามรูปแบบการแพร่คลื่นไปรอบทิศทาง

#### 2) แบบจำลองรูปแบบโคนบวกทรงกลม (Cone Plus Sphere Model)

แบบจำลองรูปแบบโคนบวกทรงกลมนี้นี้จะมีค่าอัตราการขยาย  $G_1$  และ  $G_2$  ที่เป็นผลจากสัดส่วนของพลังงานที่ส่งออกไปยังบีมหลัก (main lobe) และบีมด้านข้าง ๆ (side lobe) โดยให้เป็นค่า  $k_1$  และ  $k_2$  ตามลำดับ และจากเหตุผลเดียวกับสมการในแบบจำลองรูปแบบโคน จะได้ชุดของสมการเป็น

$$\begin{cases} P_{Rx1} 2\pi r^2 [1 - \cos(\alpha/2)] = k_1 P_{Tx} \\ P_{Rx2} 2\pi r^2 [1 + \cos(\alpha/2)] = k_2 P_{Tx} \\ k_1 + k_2 = 1 \end{cases} \quad (5.7)$$

โดยที่เมื่อนำไปคิดตามสมการการสูญเสียกำลังจากการแพร่กระจายคลื่นใน free space คือ

$$\begin{cases} P_{Rx1} = G_1 P_{Tx} / 4\pi r^2 \\ P_{Rx2} = G_2 P_{Tx} / 4\pi r^2 \end{cases} \quad (5.8)$$

จะได้ความสัมพันธ์ของค่าอัตราขยาย  $G_1$  และ  $G_2$  ดังสมการ

$$G_1[1 - \cos(\alpha / 2)] + G_2[1 + \cos(\alpha / 2)] = 2 \quad (5.9)$$

โดยการคำนวณการส่งผ่านคลื่นที่เกี่ยวข้องทั้งค่า  $G_1$  และ  $G_2$  นั้นสามารถทำได้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่นการตั้งค่า  $G_2 = 0$  เพื่อลดรูปของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไปเป็นรูปแบบโคเนเพียงอย่างเดียว และการคิดสัดส่วน  $k = \frac{k_1}{k_2}$  โดยที่  $k \in (0,1)$  เราจะเห็นได้ว่า  $G_2 = kG_1$  และ  $G_1, G_2$  สามารถหาได้จาก

$$\begin{cases} G_1 = 2[1 - \cos(\alpha / 2)] + k[1 + \cos(\alpha / 2)]^{-1} \\ G_2 = kG_1 \end{cases} \quad (5.10)$$

#### 5.4 การบังคับทิศการสะท้อนของบีมสัญญาณด้วยการไปแอสระแสไฟฟ้า

1) วัสดุพื้นผิวชนิดพิเศษสำหรับการสะท้อนคลื่นเทระเฮิรตซ์จากแนวปกติ การเลื่อนของเฟส (phase shift) ที่เกิดบนพื้นผิวสะท้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของพื้นผิวที่คลื่นสัญญาณตกกระทบและสะท้อนออกไป การใช้วัสดุพิเศษระดับอนุมูล (meta particles) ประกอบในพื้นผิวของตัวสะท้อนสามารถทำให้มีการเลื่อนของเฟสของคลื่นที่กระทบบนพื้นผิวได้ การทำการควบคุมทิศทางการสะท้อนจากแนวปกตินั้นพื้นผิววัสดุพิเศษที่ใช้ต้องครอบคลุมการเลื่อนของเฟสโดยมีค่ากราเดียนท์ของเฟสได้ครบรอบ  $2\pi$  ซึ่งสามารถทำได้โดยการออกแบบและจัดวางตำแหน่งวัสดุระดับอนุมูลในพื้นผิวที่ใช้เป็นตัวสะท้อน งานวิจัยใน [9] ได้เสนอการออกแบบพื้นผิวในระนาบสองมิติโดยให้การวางระยะห่างของวัสดุอนุมูลมีระยะเท่า ๆ กัน การควบคุมผลกราเดียนท์ของเฟสทำได้โดยการเลือกขนาดวัสดุระดับอนุมูลและทำการจัดวางไปยังตำแหน่งต่าง ๆ อย่างเหมาะสม โดยมุมสะท้อนอันมีผลมาจากกราเดียนท์นั้นเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) ดังสมการ

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\Phi}{dx} \quad (5.11)$$

เมื่อ  $\theta_i$  และ  $\theta_r$  คือมุมตกกระทบและมุมสะท้อนจากพื้นผิวตัวสะท้อนตามลำดับ  $\lambda_0$  คือค่าความยาวคลื่น  $n_i$  คือค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่มีการตกกระทบ และ  $\frac{d\Phi}{dx}$  แสดงถึงเฟสกราเดียนต์ที่มีระยะห่างเท่ากับ  $dx$  หากกรณีที่คลื่นตกกระทบทำมุมตั้งฉากกับผิวสะท้อน สามารถเขียนสมการการสะท้อนได้ดังนี้

$$\theta_r = \arcsin \left[ \frac{c}{2\pi f} \frac{d\Phi}{dx} \right] \quad (5.12)$$

เมื่อ  $c$  คือค่าความเร็วแสงและ  $f$  คือความถี่ของคลื่นสัญญาณที่ตกกระทบพื้นผิว หากความถี่ที่เราสามารถบอกได้ว่ามุมสะท้อน  $\theta_r$  นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับค่าของ  $\frac{d\Phi}{dx}$

## 2) แบบจำลองสภาพนำไฟฟ้าของกราฟีนและการควบคุมเชิงไฟฟ้า

การใช้วัสดุกึ่งตัวนำกราฟีนมาเป็นผิวสะท้อนนั้นเราสามารถออกแบบในลักษณะแบบจำลองการนำไฟฟ้าที่ผิวของกราฟีนชั้นเดียว (monolayer) โดยชั้นที่มีความบางมาก ๆ นี้สามารถทราบค่าสภาพนำไฟฟ้าจากค่าเชิงซ้อน  $\sigma_s(\omega, \mu_c, \Gamma, T)$  เมื่อ  $\omega$  คือค่าความถี่เชิงมุม  $\mu_c$  คือค่าศักย์ทางเคมีเช่นพลังงานเฟอร์มี (Fermi Energy,  $E_F$ ) ที่สัมพันธ์กับค่าการไบแอสด้วยไฟฟ้า  $\Gamma$  คือพารามิเตอร์ของการสูญเสียจากภายในของตัวกราฟีน โดยที่  $\Gamma = \hbar / 2\tau$  เมื่อ  $\tau$  คือค่าเวลาการผ่อนคลายของอิเล็กตรอน - โฟนอน (Electron-Phonon Relaxation Time) จากการศึกษาวิจัยใน [9] ได้กำหนดค่า  $\tau$  เป็น 0.2 ps เนื่องจากเป็นค่าที่ได้รับการยอมรับว่ามีความเหมาะสมและวัดได้จากกราฟีนแบบเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposited, CVD) และ  $T$  คืออุณหภูมิห้อง การนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟีนสามารถแสดงในเชิงคณิตศาสตร์ได้ด้วยสูตรของคุโบะ (Kubo Formula) โดยแสดงความสัมพันธ์ทั้งแบบระหว่างแบนด์ (interband) และภายในแบนด์ (intraband) ร่วมกันดังสมการ

$$\sigma_s = \sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) + \sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) \quad (5.13)$$

โดยที่

$$\sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - j2\Gamma)} \cdot \left( \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1) \right) \quad (5.14)$$

และ

$$\sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) \approx \frac{-je^2}{4\pi\hbar} \ln \left( \frac{2|\mu_c| - (\omega - j2\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - j2\Gamma)\hbar} \right) \quad (5.15)$$

เมื่อ  $e$ ,  $\hbar$  และ  $k_B$  เป็นค่าคงที่มาตรฐานของประจุอิเล็กตรอน ค่าคงที่ของพลังก์ (Planck's constant) และค่าคงที่ของโบลซ์มานน์ (Boltzmann's constant) ตามลำดับ หากมีการไบแอสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปยังโครงสร้างของแผ่นกราฟีนสองชั้นรูปแบบแผ่นตะแกรงจะทำให้ระดับเฟอร์มี (Fermi level) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลที่ทำให้เราสามารถนำมาควบคุมการนำไฟฟ้าของกราฟีนได้ สมการแบบ closed form ของค่าความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่าง  $E_F$  และ  $V_g$  คือ

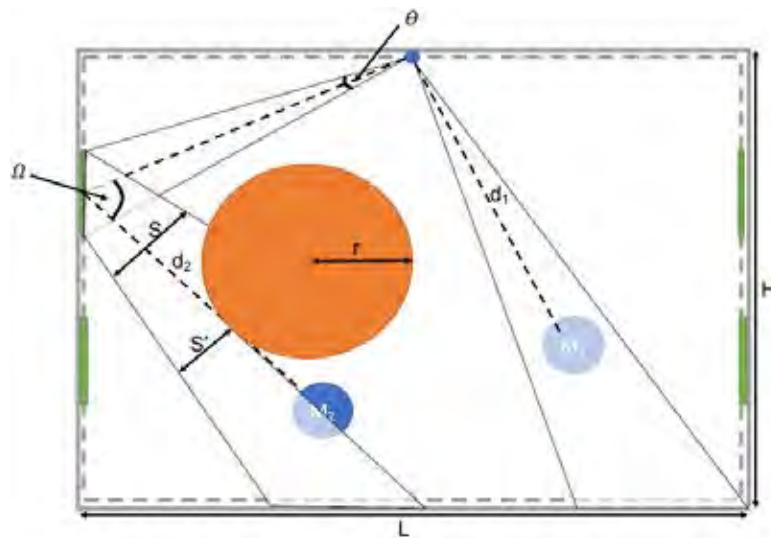
$$E_F \approx \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0 V_g}{e t_s}} \quad (5.16)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  และ  $\epsilon_0$  คือค่า permittivity ของชั้นฉนวนและของสุญญากาศตามลำดับ ค่า  $V_g$  คือค่าการไบแอสด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า ส่วน  $e$  คือค่าประจุอิเล็กตรอน และ  $v_f$  คือค่าความเร็วเฟอร์มี (Fermi velocity) โดยในกราฟีนนั้นมีค่าเท่ากับ  $1.1 \times 10^6$  m/s

## 5.5 การใช้ Deep Learning สำหรับคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการเรียนรู้และจำแนกชนิดพื้นผิวสิ่งกีดขวาง

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการดำเนินการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานในส่วนคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Visions) ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางรวมถึงผู้ใช้งานภายในบริเวณพื้นที่ที่ทำการสื่อสาร โดยนอกจากการตรวจจับตำแหน่งของผู้ใช้งานและสิ่งกีดขวางต่าง ๆ แบบเรียลไทม์แล้วสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาร่วมกันในการสื่อสารไร้สายด้วยความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์คือคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของคลื่นความถี่เช่นการกระเจิง (scattering) และการสะท้อน (reflection) แตกต่างกันไปตามลักษณะของพื้นผิววัสดุที่ตกกระทบ อันจะมีผลต่อทิศทางและกำลังของสัญญาณที่ทำการสื่อสารไปยังผู้ใช้งานได้

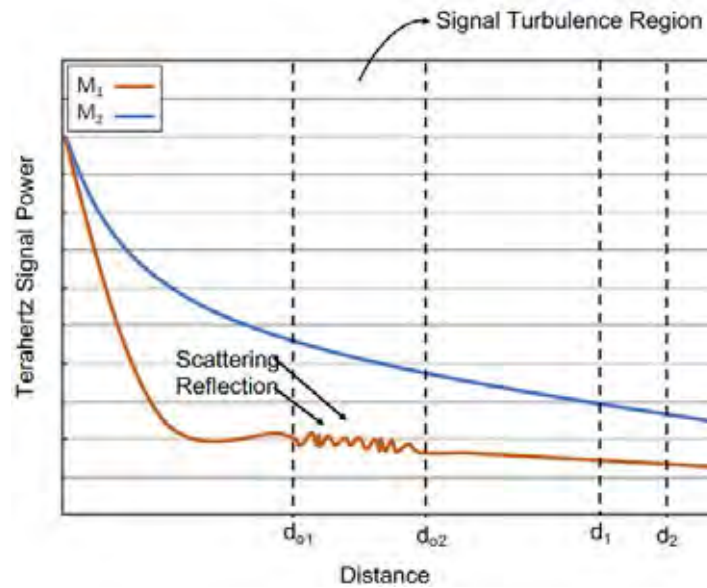
รูป 5-4 แสดงตัวอย่างแบบจำลองทางเรขาคณิตแบบมุมมองจากข้างบนของการสื่อสารไร้สายในย่านเทระเฮิรตซ์ภายในอาคาร โดยมีสิ่งกีดขวางเป็นลักษณะเสาทรงกระบอกรัศมี  $r$  และมีผู้ใช้งานในระบบสองคนคือ  $M_1$  และ  $M_2$  โดยผู้ใช้งาน  $M_1$  ได้รับสัญญาณตรงจากตัวส่งในลักษณะ Line of Sight ส่วนผู้ใช้งาน  $M_2$  ถูกสิ่งกีดขวางบดบังสัญญาณจึงรับสัญญาณผ่านกระจกสะท้อน โดยระยะทางรวมของคลื่นที่ส่งไปถึงผู้ใช้งานทั้งสองคนมีระยะทาง  $d_1$  และ  $d_2$  ตามลำดับ



รูปที่ 5-4 การส่งสัญญาณที่เกิดการกระเจิงและการสะท้อนเนื่องจากการตกกระทบพื้นผิว

เห็นได้ว่าสัญญาณที่ส่งไปยังไปยังผู้ใช้งาน นั้นมีบางส่วนของบีมสัญญาณที่ยังกระทบกับสิ่งกีดขวางซึ่งนอกจากจะทำให้สูญเสียกำลังจากการถูกบดบังแล้วยังมีผลจากปรากฏการณ์การกระเจิงและการสะท้อนด้วย ซึ่งลักษณะความแปรปรวนของสัญญาณจากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูป

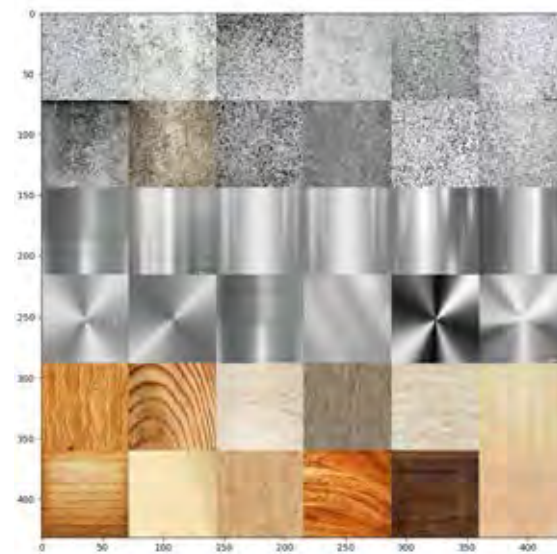
5-5



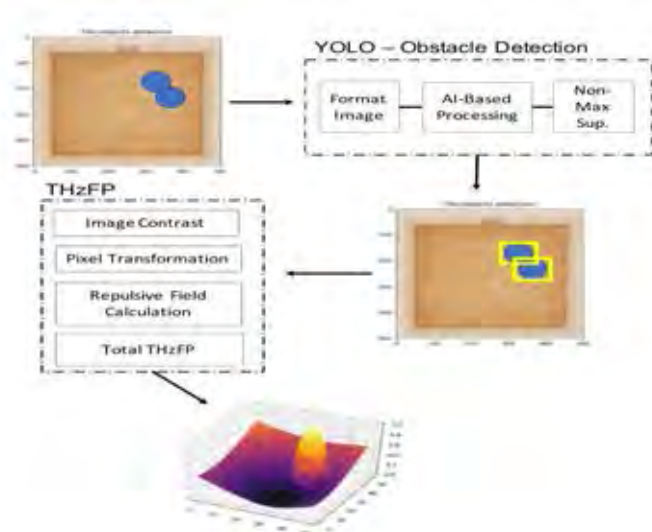
รูปที่ 5-5 ระดับสัญญาณที่ส่งตรงไปยังผู้ใช้งาน (สีน้ำเงิน) และสัญญาณที่มีการกระทบสิ่งกีดขวาง (สีแดง) ซึ่งเกิดการกระเจิงและการสะท้อนออกของสัญญาณ

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Deep Learning ในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ๆ คือการให้ระบบเรียนรู้ชนิดของพื้นผิววัสดุต่าง ๆ โดยโปรแกรมจะนำชุดของภาพตัวอย่างของพื้นผิววัสดุที่ต้องการให้ระบบเรียนรู้มาทำการเทรน (train) และตรวจสอบ (validate) เข้าไปเข้ามาด้วยวิธีการทำ Convolutional Neural Network (CNN) ด้วยเครื่องมือในการโปรแกรมคือ Tensorflow [33] โดยในงานชิ้นนี้ทางทีมวิจัยทำการสอนให้ตัวแบบจำลองเรียนรู้วัสดุ 3 ชนิดคือ ไม้ คอนกรีต และโลหะ ดังตัวอย่างในรูป 5-6 ส่วนในการใช้งานคอมพิวเตอร์วิทัศน์นั้นข้อมูลที่นำมาช่วยในการตรวจจับวัตถุนั้นจำเป็นต้องมีความหลากหลายและพลังในการประมวลผลสูงดังนั้นทีมวิจัยจึงเลือกใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ผ่านระบบคลาวด์ (Cloud Visions) ในโมดูล YOLO (You Only Look Once) [26] ที่สามารถระบุวัตถุชนิดต่าง ๆ ได้ภายในเฟรมเดียวเพื่อระบุและจำแนกประเภทวัตถุรวมทั้งระบุพิกัดของวัตถุชิ้นต่าง ๆ กลับมาให้ระบบเพื่อนำมาคำนวณขอบเขตและสร้าง Artificial Potential Field ต่อไป ดังรูปที่ 5-7





รูปที่ 5-6 ตัวอย่างส่วนของกลุ่มพื้นผิววัสดุที่ทำการเทรนในระบบ Deep Learning คือคอนกรีต โลหะ และไม้

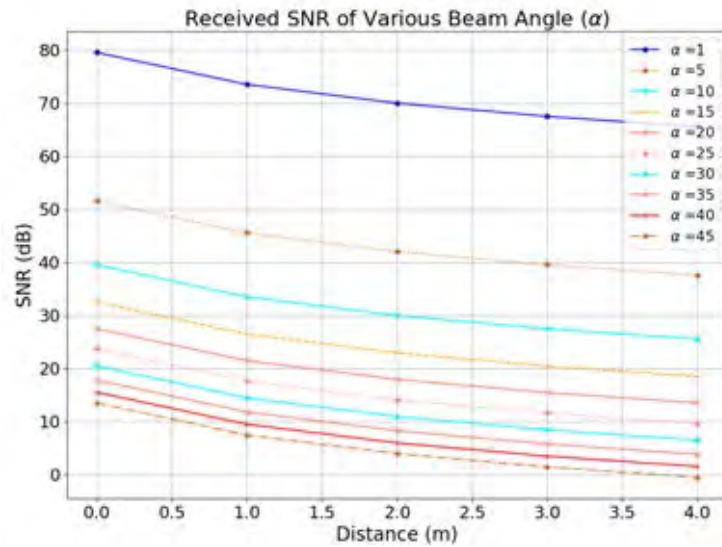


รูปที่ 5-7 การใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ผ่านระบบคลาวด์ในการช่วยจำลองรูปแบบสิ่งกีดขวาง

## 5.6 ผลการจำลอง

### 1) ค่า SNR จากการปรับขนาดปริมสัญญาณ

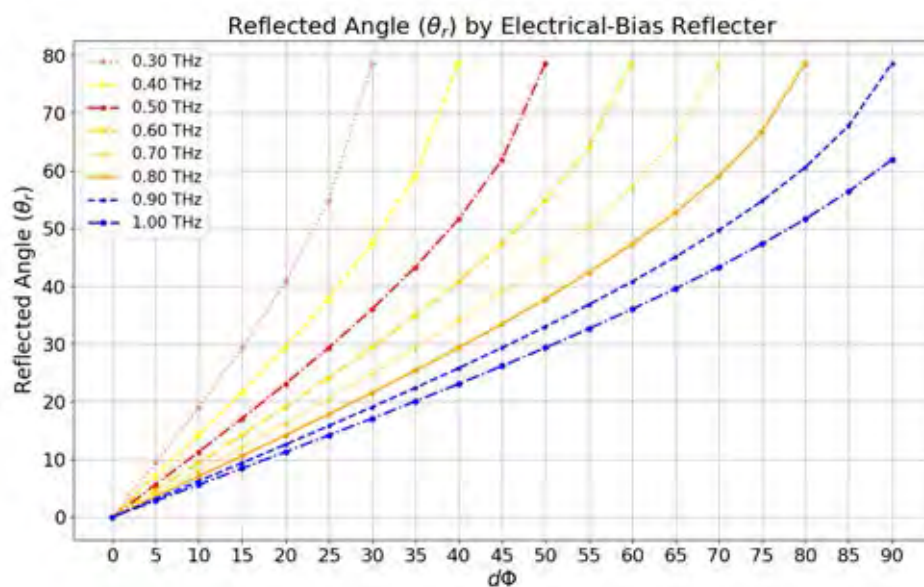
ในแบบจำลองของระบบที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้สนใจการส่งปริมออกจากสายอากาศในรูปแบบโคน (Cone Model) ซึ่งเมื่อคำนวณค่าอัตราขยายสัญญาณตามสมการ (5.6) และนำไปแทนค่าอัตราขยายสัญญาณตามพารามิเตอร์พื้นฐานของตัวส่งและตัวรับ จะพบว่าความกว้างของปริม ( $\alpha$ ) ที่ค่าต่าง ๆ จะได้ระดับสัญญาณที่มีค่า SNR ตามกราฟในรูปที่ 5-8



รูปที่ 5-8 ระดับ SNR ตามการปรับค่าความกว้างของบีมสัญญาณในค่าต่าง ๆ

## 2) มุมสะท้อนแบบไบแอสด้วยกระแสไฟฟ้า

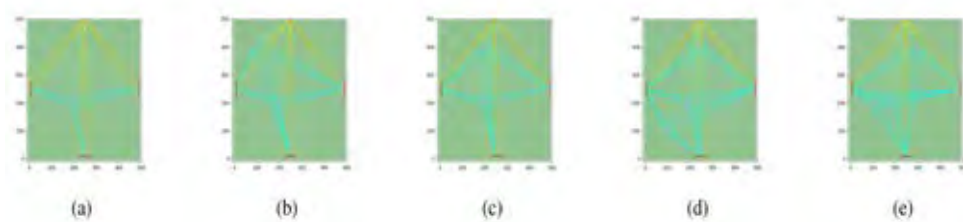
จากที่กล่าวมาในหัวข้อการไบแอสด้วยกระแสไฟฟ้า มุมของการสะท้อน  $\theta_r$  จากผิววัสดุกราฟีนจะขึ้นอยู่กับค่าของ  $\frac{d\Phi}{dx}$  ซึ่งก็คือความชันของเฟสที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะห่างของผิวตัวโลหะเหนี่ยวนำในวงจรถูกกำหนดพารามิเตอร์ของระยะ  $dx$  เป็น  $85 \mu\text{m}$  ตามงานวิจัยใน [9] จะได้มุมสะท้อนจากการออกแบบการวางค่าเฟสกราฟาเดียนท์ ต่าง ๆ กันของความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ในค่า ต่าง ๆ ในช่วง  $0.3 - 1 \text{ THz}$  ดังรูปที่ 5-9



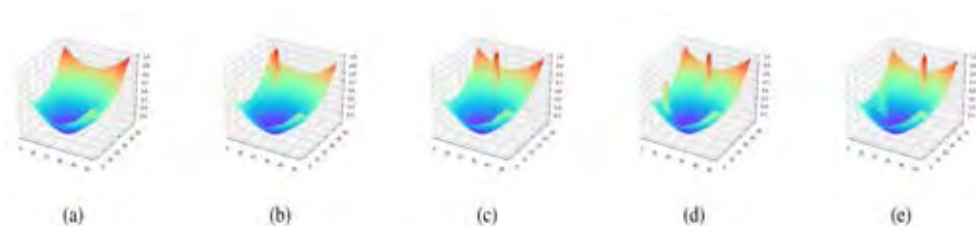
รูปที่ 5-9 ค่ามุมสะท้อนที่เกิดจากค่าเฟสกราฟาเดียนท์และความถี่ต่าง ๆ

3) การตรวจจับตำแหน่งผู้ใช้งานภายในบริเวณ และสถิติการเชื่อมต่อสัญญาณ

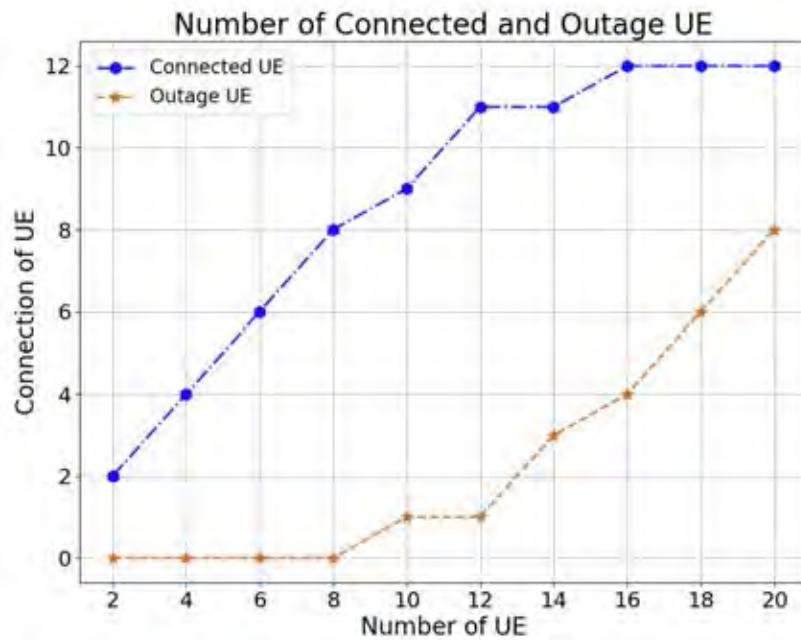
ในที่นี้การจำลองเน้นไปที่การตรวจจับบุคคล โดยไม่มีสิ่งกีดขวางอื่นใดภายในบริเวณที่พิจารณา หมายความว่าเมื่อมีบุคคลผ่านเข้ามาในระบบ ระบบจะถือว่าทุกคนเป็นผู้ใช้งาน (User) และเมื่อมีคนมากกว่าหนึ่งคน สำหรับผู้ใช้งานใด ๆ จะถือว่าคนอื่นในระบบเป็นสิ่งกีดขวาง (Obstacles) ผลการจำลองการตรวจจับผู้ใช้งานในช่วงระยะเวลาต่อเนื่องกันและระบบส่งสัญญาณเทอร์เรสเตอร์วางแผนการส่งไปยังผู้ใช้งานแต่ละคนและตัวสะท้อนแต่ละตัว โดยตัวสะท้อนทำการสะท้อนสัญญาณไปยังมุมที่ต้องการจากการไปแอสเกรสแสไฟฟ้าเป็นดังรูป 5-10 และการคำนวณสนามศักย์ของเทอร์เรสเตอร์แสดงได้ในรูปที่ 5-11ซึ่งเมื่อทำการจำลองจำนวนผู้ใช้งานในระบบมากขึ้นเรื่อย ๆ ผลของการเชื่อมต่อของผู้ใช้งานกับตัวส่งสัญญาณ ทั้งที่สำเร็จ (Connected) และไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (Outage) เป็นดังรูปที่ 5-12 และอัตราการเชื่อมต่อสำเร็จแสดงผลในรูปที่ 5-13



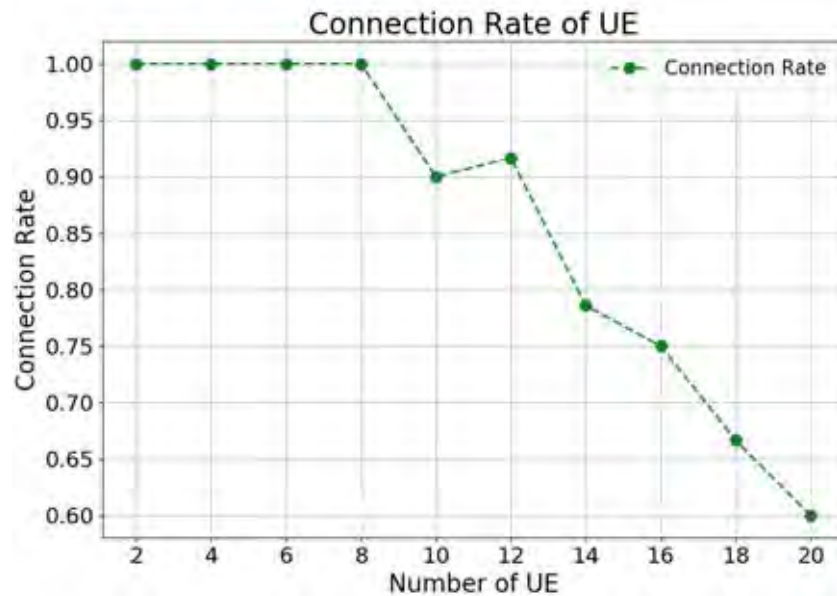
รูปที่ 5-10 ตัวอย่างผลการตรวจจับผู้ใช้งานในระบบในเวลาต่อเนื่องกัน โดยเริ่มจากมีผู้ใช้งานคนเดียว (a) ผู้ใช้งานสองคน (b) ผู้ใช้งานสองคนที่เปลี่ยนตำแหน่งไป (c) ผู้ใช้งานสามคน (d) และผู้ใช้งานสามคนที่เปลี่ยนตำแหน่งไป (d)



รูปที่ 5-11 สนามศักย์เทอร์เรสเตอร์จากการคำนวณผลการตรวจจับจากรูป 5-10 โดยพิจารณามุมมองของผู้ใช้งานคนแรก ผู้ใช้งานอื่น ๆ จะถูกนับเป็นสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 5-12 จำนวนการเชื่อมต่อสำเร็จและไม่สำเร็จของผู้ใช้งานตามจำนวนผู้ใช้งานที่มีในระบบ



รูปที่ 5-13 อัตราการเชื่อมต่อของผู้ใช้งานเมื่อมีผู้ใช้งานในระบบเป็นจำนวนต่าง ๆ

## 5.7 สรุปและอภิปรายผล

จากผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับบีมสัญญาณจากตัวส่งให้เหมาะสมมีผลต่อระดับสัญญาณที่สามารถรับได้ที่เครื่องรับ ทั้งในเชิงความแรงของสัญญาณที่เพียงพอและความกว้าง



2705313941

ของปีมที่มีผลต่อตำแหน่งบริเวณที่สามารถรับสัญญาณได้ แนวทางการศึกษาเรื่องการปรับมุมได้จากการไบแอสกระแสไฟฟ้าสามารถช่วยในการออกแบบระบบการสะท้อนสัญญาณที่มีความแม่นยำและละเอียดกว่าแบบเชิงกลที่ควบคุมทิศทางการสะท้อนได้ยากกว่าในทางปฏิบัติ ส่งผลให้หากไม่มี LoS การใช้งานปีมที่แคบและระดับความแรงสูงก็สามารถสะท้อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้

การจำลองสถานการณ์ด้วยการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ช่วยในการตรวจจับวัตถุต่าง ๆ ถูกจำลองมาใช้ในกรณีการใช้งานในชีวิตจริงที่การสื่อสารด้วยคลื่นสัญญาณที่มีปีมแคบมาก ๆ นั้นสามารถถูกบดบังสัญญาณได้โดยง่ายจากตัวผู้ใช้งานอื่น ๆ ในระบบเช่นกัน ผลการจำลองแสดงค่าสถิติการเชื่อมต่อสำเร็จนั้นมากขึ้นในช่วงแรกที่มีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อกับตัวส่งแบบแนวสายตาหรือการช่วยเหลือจากตัวสะท้อนได้ และการเพิ่มจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อจำนวนผู้ใช้งานมากขึ้น ส่วนจำนวนการเชื่อมต่อไม่สำเร็จก็จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นจากอัตราการเชื่อมต่อที่ค่อย ๆ มีค่าลดลง



2705313941

## บทที่ 6 การพัฒนาระบบอัจฉริยะและการวางแผนโครงข่ายเทระเฮิรตซ์ด้วย ปัญญาประดิษฐ์

สำหรับบทนี้ทางผู้วิจัยจะทำการนำเสนอแนวคิดการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับอุปกรณ์ที่ใช้ระบบสื่อสารสัญญาณเทระเฮิรตซ์เป็นหลัก โดยเน้นถึงการแก้ไขและการจัดการกับปัญหาสำคัญที่เป็นจุดเด่นของคลื่นความถี่ย่านนี้คือการที่สัญญาณในแนวสายตาทถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางต่าง ๆ โดยนำเสนอทั้งการพัฒนาความสามารถในการเรียนรู้ของตัวรับสัญญาณคือตัวอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติที่มีการดำเนินการสู่เป้าหมายภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ เช่นพลังงานจำกัด ความสามารถในการรับสัญญาณที่มีจำกัด เป็นต้น และทางด้านตัวส่งสัญญาณคือการพัฒนาการเรียนรู้ของอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่ทำงานเป็นโครงข่ายเพื่อปรับตัวสู่การอยู่ในตำแหน่งที่สามารถให้ความครอบคลุมสัญญาณได้สูงที่สุด โดยนำการเรียนรู้แบบจุดใจ (Reinforcement Learning) มาร่วมพัฒนาอัลกอริทึมให้กับอุปกรณ์ดังกล่าว

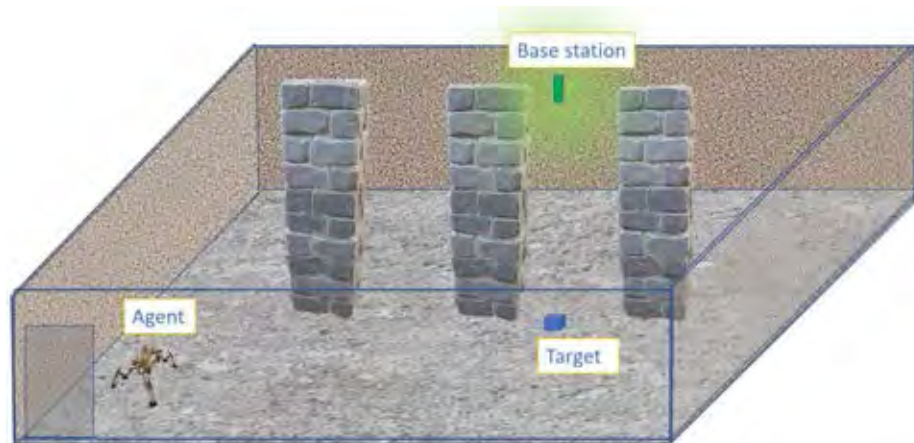
### 6.1 แบบจำลองการพัฒนารการเรียนรู้แบบจุดใจของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

หลักการที่สำคัญของ Reinforcement Learning คือการที่ตัวกระทำหรือ agent ที่จะทำการเรียนรู้เพื่อให้มีความสามารถตัดสินใจทำสิ่งใด ๆ นั้น จะเริ่มด้วยการเรียนรู้ด้วยการลองผิดลองถูก โดยการตัดสินใจกระทำ (Action) จากสถานะ (State) หนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง โดยการกระทำแต่ละครั้งจะได้รับสิ่งที่เรียกว่ารางวัล (Reward) มาเพื่อเก็บเป็นค่าที่ใช้จุดใจหรือเป็นแรงเสริมให้ผู้กระทำมีโอกาสตัดสินใจในการกระทำนั้น ๆ มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับการกระทำที่เป็นไปได้ทุก ๆ รูปแบบจากสถานะที่เป็นอยู่ปัจจุบัน แบบจำลองต่อไปนี้คือรูปที่ 6-1 แสดงตัวอย่างแบบจำลองหนึ่งที่ผู้วิจัยได้ออกแบบสำหรับจำลองการทำงานของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยกำหนดภารกิจให้ตัวอุปกรณ์เรียนรู้วิธีการเคลื่อนที่ไปสู่เป้าหมายที่กำหนดด้วยระยะทางที่สั้นที่สุด โดยให้ตลอดการเดินทางนั้นสามารถติดต่อสื่อสารกับตัวส่งสัญญาณได้มากที่สุดเพื่ออัปเดตข้อมูลตลอดเวลาคือมีการขาดหายของสัญญาณน้อยที่สุด ทั้งจากการถูกบดบังหรืออยู่นอกระยะที่ค่า SNR ขั้นต่ำที่ตัวรับจะสามารถรับสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณได้ และการเรียนรู้แต่ละรอบตัวอุปกรณ์ยังมีพลังงานจำกัดและมีการพลังงานหมดได้หากยังไม่สามารถไปสู่เป้าหมาย



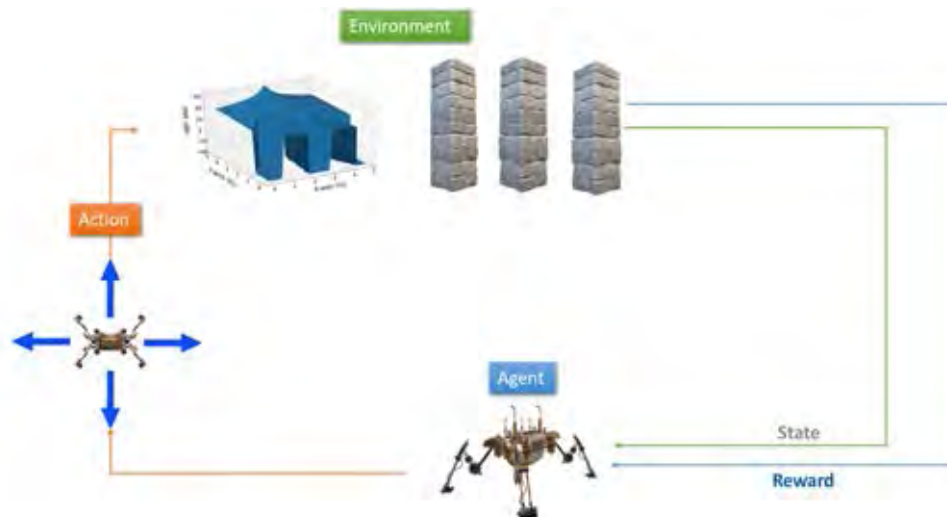
2705313941

CD : iThesis 5671435021 dissertation / rev: 30072562 14:11:05 / seq: 8



รูปที่ 6-1 แบบจำลองระบบการเรียนรู้แบบจงใจในอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

ซึ่งไดอะแกรมของ Reinforcement Learning ของแบบจำลองสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 ไดอะแกรม Reinforcement Learning ของแบบจำลอง

โดยจากรูปที่ 6-2 ตัวอุปกรณ์จะสามารถตัดสินใจกระทำ (Action) เป็นการเคลื่อนที่ไปในทิศใดทิศหนึ่ง และจะมีการปฏิสัมพันธ์หรือมี Interaction กับสิ่งแวดล้อมคือได้รับค่าระดับสัญญาณ SNR ของคลื่นเทระเฮิรตซ์และตำแหน่งของสิ่งกีดขวางหากมีการเคลื่อนที่ไปชน สถานะ (State) ของอุปกรณ์เป็นตำแหน่งที่ตัวอุปกรณ์เคลื่อนที่ไปและค่า Reward คือค่ารางวัลที่ได้รับจากผลของการกระทำแต่ละครั้ง โดยเงื่อนไขของการเรียนรู้และอัลกอริทึมแบบ Q-Learning เป็นดังรูปที่ 6-3



2705313941

### Code Snippet 1 : Learning algorithm for indoor THz autonomous vehicle

```

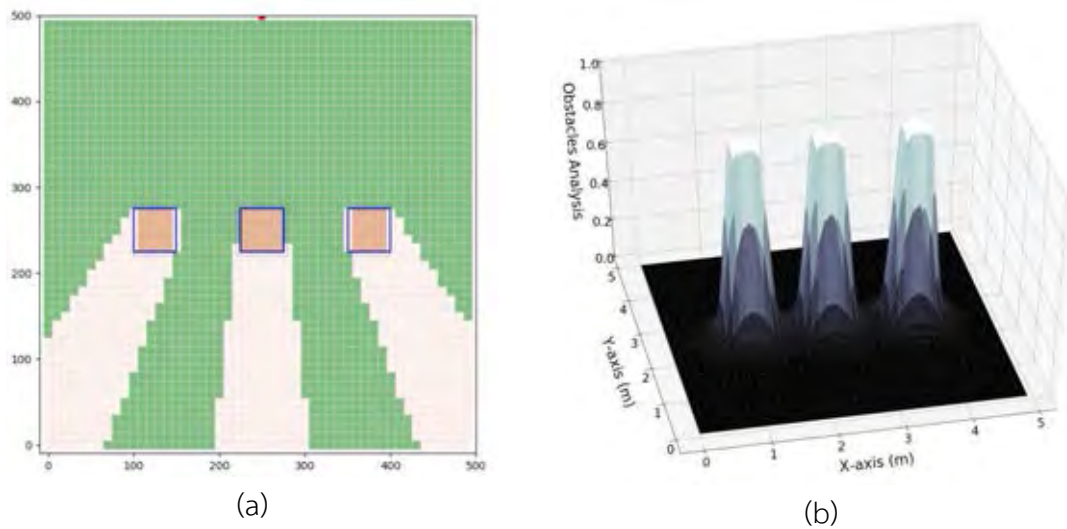
1 Initialize Q,S,R, Episode_max
2 Locate target
3 Set of actions = {up,down,left,right}
4 LoS: Every move has R = -1
5 Outage: Every move has R = -20
6 Target: R=100
7 EP = 0
8 While EP <= Episode_max
9   Q-Algorithm
10 End

```

รูปที่ 6-3 อัลกอริทึมส่วนการเรียนรู้ของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

#### 1) การจำลองระบบ

เมื่อกำหนดรูปแบบของแบบจำลองและองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบเรียบร้อยแล้ว การจำลองสิ่งแวดล้อมที่กำหนดสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 6-4



รูปที่ 6-4 การจำลองสภาพสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดตำแหน่งสิ่งกีดขวางและคำนวณแนวสายตา (a) และการวิเคราะห์สิ่งกีดขวางในระบบ (b)

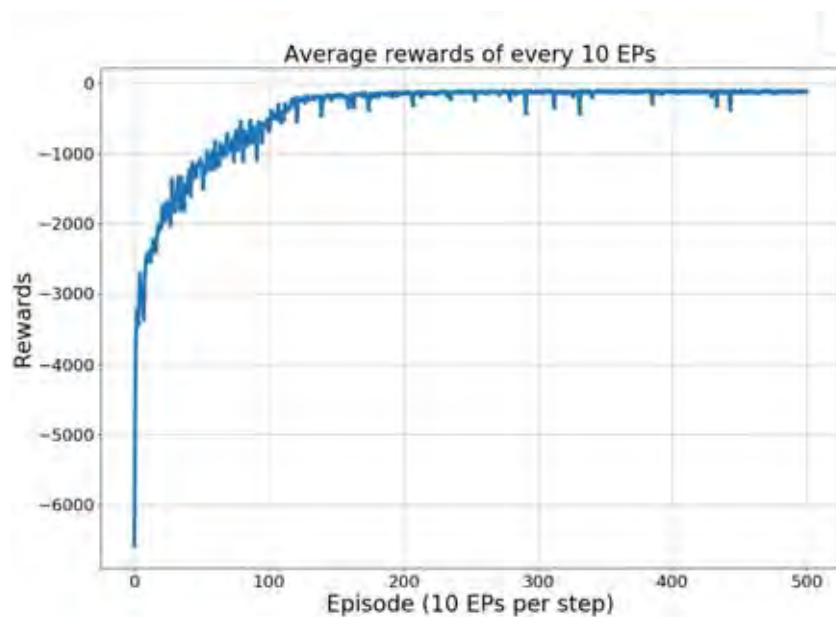
รูปที่ 6-4 แสดงการจำลองสภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารขนาดพื้นที่ 5X5 เมตร มีสิ่งกีดขวางเป็นเสาสามต้นอยู่บริเวณใจกลางห้อง โดยมีตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) อยู่บริเวณกลางผนังห้องด้านบน ซึ่งสามารถคำนวณพื้นที่ครอบคลุมของแนว LoS ของสัญญาณ



ได้ดังรูป 6-4 (a) ส่วนรูปที่ 6-4 (b) เป็นการวิเคราะห์สิ่งกีดขวางเพื่อกำหนดขอบเขตจำกัดของ action โดยกรณีนี้กำหนดให้ตัวอุปกรณ์ไม่สามารถเคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งเดียวกับสิ่งกีดขวางได้

## 2) ผลการจำลอง

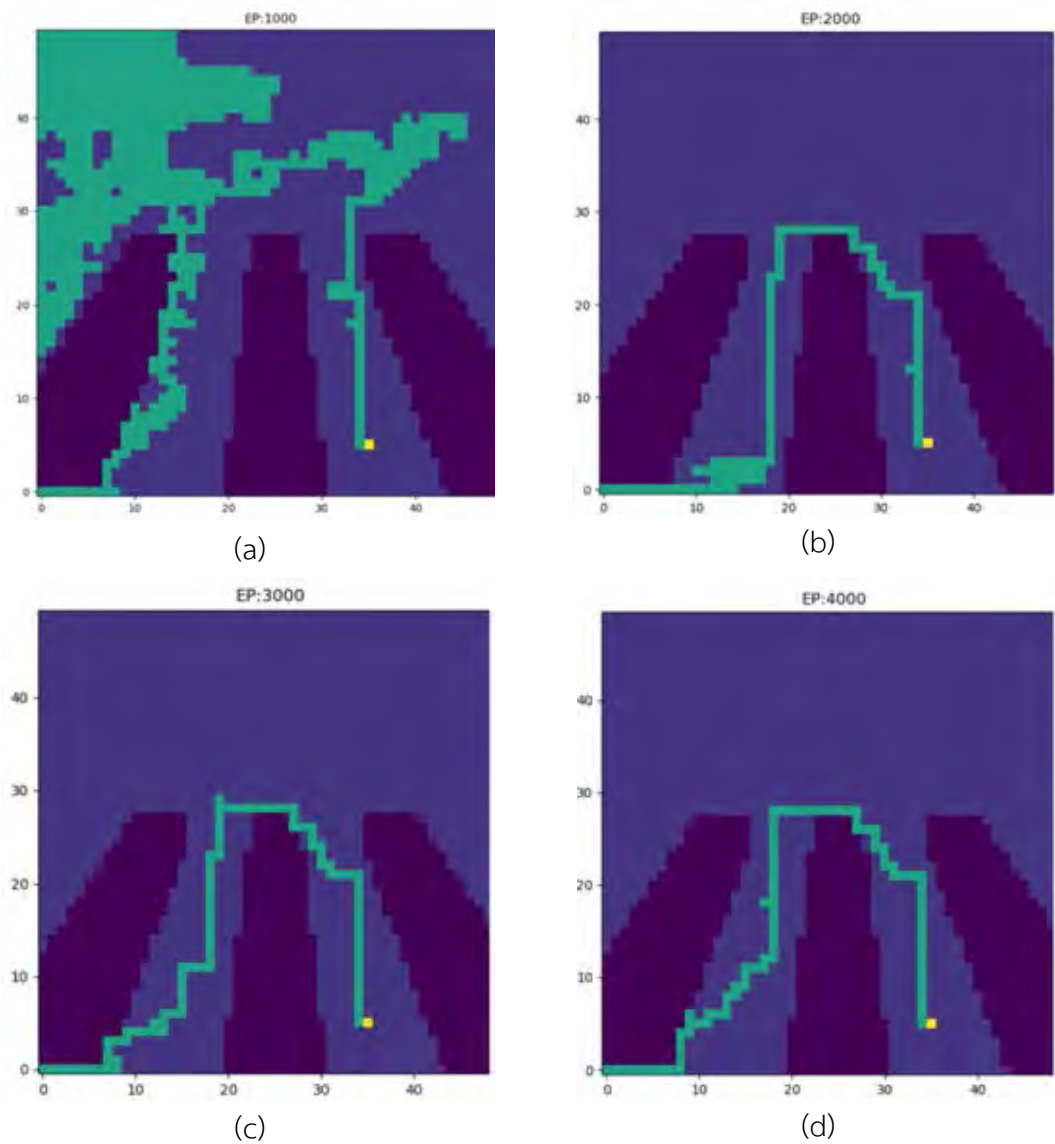
เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ในระบบแล้วทำการจำลองผลโดยในที่นี้จุดตั้งต้นของตัว agent หรืออุปกรณ์เคลื่อนที่มีการตั้งต้นที่ตำแหน่ง (0,0) คือตำแหน่งมุมล่างซ้ายของห้องเสมอ โดยตัวอุปกรณ์จะทำการเดินไปอย่างไร้ทิศทางในรอบแรกสุดของการเรียนรู้ และจะมีการจดจำค่า Reward ที่ได้รับในแต่ละการเคลื่อนที่ โดยจะทำการเดินไปจนกว่าจะเจอเป้าหมายที่กำหนดหรือหมดพลังงาน จะนับเป็นการเรียนรู้หนึ่งรอบ (Episode) ซึ่งจากการจำลองการเรียนรู้ที่ 5000 Episodes นั้นได้ผลดังรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 ผลการเรียนรู้ของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

จากรูปที่ 6-5 เป็นผลการเรียนรู้ที่ทำการเฉลี่ยในทุก ๆ 10 รอบ จะเห็นได้ว่าค่าผลรวมของรางวัล (Reward) ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อมีรอบการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น จนค่าที่ได้จะมีการลู่เข้าค่าที่ดีที่สุดเมื่อเรียนรู้ไปจนถึงระดับ optimum

เส้นทาง (path) การเดินทางของตัวอุปกรณ์ที่ทำการเรียนรู้สามารถจำลองแผนภาพสำหรับการเดินทางในแต่ละช่วงได้ดังรูป 6-6



รูปที่ 6-6 เส้นทางการเดินของอุปกรณ์เคลื่อนที่อัตโนมัติเมื่อผ่านการเรียนรู้เป็นจำนวน 1000 รอบ (a) 2000 รอบ (b) 3000 รอบ (c) และ 4000 รอบ (d)

รูปที่ 6-6 แสดงเส้นทางการเดินทางผ่านการเรียนรู้เป็นช่วงระยะ 1000, 2000, 3000, และ 4000 รอบโดยแสดงแผนภาพดังภาพย่อยที่ 6-6 (a)-(d) ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อรอบการเรียนรู้มากขึ้นการเดินทางของอุปกรณ์ก็จะมีรูปแบบซับซ้อนและมุ่งสู่เป้าหมายได้ดีขึ้น โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขการรักษาการติดต่อ (Connectivity) กับตัวส่งสัญญาณให้ได้มากที่สุดเช่นกัน

## 6.2 การวางแผนโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณ

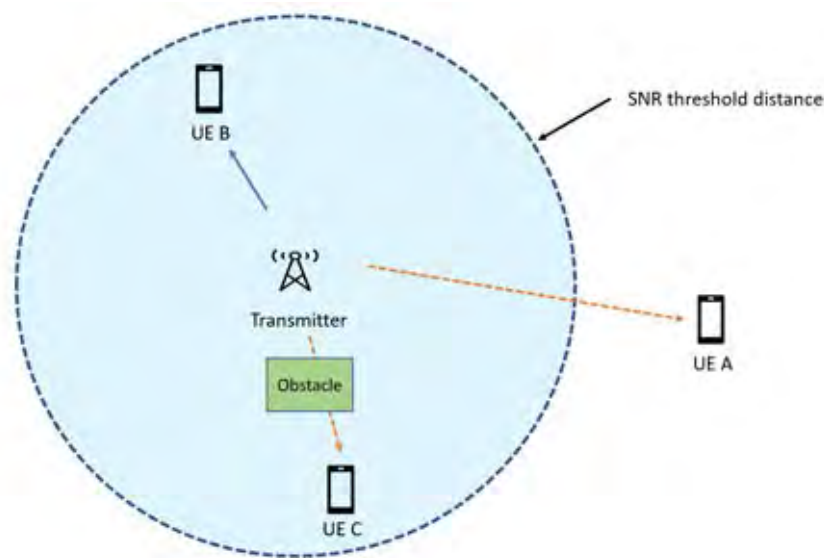
หัวข้อนี้แสดงแนวความคิดการวางแผนโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณทะเลอเรียตซีให้สามารถมีความครอบคลุมสัญญาณสูงที่สุดด้วยจำนวนจุดส่งสัญญาณที่จำกัด ซึ่งแบบจำลองที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอคือการคำนวณการวางตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) จำนวนหนึ่ง ๆ ให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางได้มากที่สุด โดยส่วนแรกเป็นการพัฒนาโปรแกรมจำลองเพื่อคำนวณความครอบคลุมด้วยหลักการเรย์เทรซซึ่งซึ่งระบบจะทำการกำหนดรูปแบบสิ่งแวดล้อมและพารามิเตอร์ของตัวส่งสัญญาณ จำนวนของตัวส่งสัญญาณที่จะใช้ และจะคำนวณความเป็นไปได้ของวิธีการวางตำแหน่งทั้งหมด และความครอบคลุมที่ได้ในแต่ละกรณี ด้วยวิธีการ Exhaustive Search เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นตำแหน่งที่ตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวควรถูกวางอยู่ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความครอบคลุมสูงสุด แบบจำลองระบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นดังรูป 6-7



รูปที่ 6-7 แบบจำลองสิ่งแวดล้อมภายนอกอาคารขนาด 10x10 เมตรที่มีสิ่งกีดขวาง

แบบจำลองสิ่งแวดล้อมในรูป 6-7 แสดงพื้นที่ภายนอกอาคารขนาด 10 x 10 เมตร มีสิ่งกีดขวาง (Obstacles) กระจายตัวอยู่ 6 ตำแหน่ง โดยมีเซตของสถานีส่ง (Tx) ที่ต้องการวางลงไปในพื้นที่ดังกล่าวเป็นจำนวนต่าง ๆ ที่ต้องการ โดยความครอบคลุมที่ทำการพิจารณานั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก ๆ สองสิ่งคือ สัญญาณที่มีในบริเวณใด ๆ คือสัญญาณที่ได้จากแนว

สายตาหรือ LoS กับตัวส่งสัญญาณเท่านั้นโดยไม่ถูกบดบังจากสิ่งกีดขวาง และสัญญาณที่บริเวณนั้นต้องถึงระดับสัญญาณขั้นต่ำ (SNR Threshold) ที่ตัวรับกับตัวส่งสามารถทำการสื่อสารระหว่างกันได้ ดังแสดงในรูป 6-8



รูปที่ 6-8 ความครอบคลุมสัญญาณของตัวส่ง แสดงขอบเขตของค่าระดับสัญญาณต่ำสุดที่ทำการสื่อสารได้ (SNR threshold distance) และการบดบังของสิ่งกีดขวาง

จากรูป 6-8 เห็นได้ว่าสัญญาณจากตัวส่งจะมีรัศมีเป็นระยะทางหนึ่งที่ระดับค่า SNR ที่ตัวรับจะได้รับนั้นถึงค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำการสื่อสารกันได้ หากพ้นระยะนี้ก็จะถือว่าสัญญาณขาดหาย (Outage) ดังตัวอย่างผู้ใช้งาน A (UE A) ที่อยู่นอกบริเวณดังกล่าว อุปสรรคสำคัญของคลื่นในย่านเทระเฮิรตซ์คือการถูกสิ่งกีดขวางปิดกั้นสัญญาณนั้นเห็นได้จากผู้ใช้งาน C (UE C) ที่แม้จะอยู่ในรัศมีที่ค่า SNR สูงก็ไม่สามารถทำการสื่อสารได้เนื่องจากการสื่อสารถูกขวางในแนว LoS ของสัญญาณ ลักษณะของผู้ใช้งานที่ทำการเชื่อมต่อสื่อสารได้จะต้องอยู่ในรัศมีครอบคลุมของสัญญาณและไม่ถูกบดบัง ดังตัวอย่างคือผู้ใช้งาน B (UE B)

อัลกอริทึมของการคำนวณหาวิธีการวางตำแหน่งตัวส่งสัญญาณให้ได้ค่าความครอบคลุมสูงสุดแสดงได้ดังนี้

---

**Algorithm 1** Transmitter locating algorithm for maximize signal coverage
 

---

```

1: Parameters:  $N$  is the number of transmitters,  $G$  is the
   number of defined grids of available transmitter locations
   in the area,  $SNR$  is the minimum required SNR threshold
   ,  $Loc_i$  is Tx location plan of combination  $i$  ,  $cov()$  is
   a function that calculate coverage area of located Tx
   set ( $Loc_i$ ),  $sort()$  is a function that selects the highest
   coverage from all  $Loc_i$ 
2: Initialize:
3:  $N \leftarrow$  Tx number to calculate
4:  $SNR \leftarrow$  minimum required SNR of UEs in the system
5:  $G, Loc_i \leftarrow$  all available locations for Tx
6:  $P \leftarrow$  transmitted power (all Tx have equal transmitted
   power in this model)
7: function OPTIMIZING( $N, SNR, G$ )
8:    $P \leftarrow T_x - configuration$ 
9:   for  $g = 1$  to  $G$  do
10:     $Cov_g \leftarrow cov(SNR)$   $\triangleright$  calculating coverage area
11:   end for
12:   for  $n = 1$  to  $N$  do
13:     $sum(Cov_g)$  of  $T_{xn}$ 
14:     $Loc_i \leftarrow \{g \in G\}$   $\triangleright$  combination of Tx locations
15:   end for
16:   return  $sort(Cov), Loc_{max}(Cov)$ 
17: end function

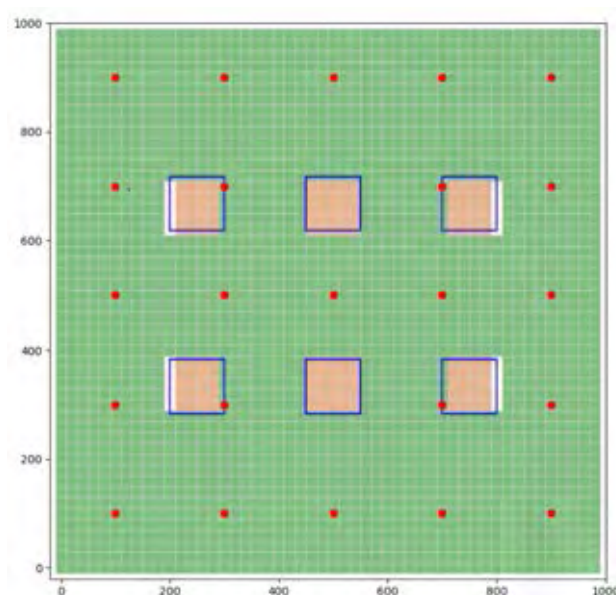
```

---

## 1) การจำลองระบบ

สิ่งแวดล้อมภายนอกอาคารตั้งแบบจำลองสามารถนำมากำหนดในโปรแกรมจำลองได้ดังรูป

6-9

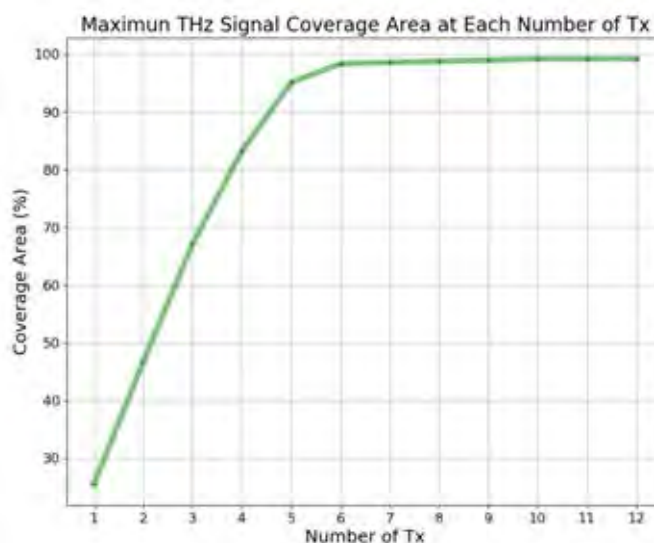


รูปที่ 6-9 โปรแกรมทำการจำลองสิ่งแวดล้อม และระบุตำแหน่งที่สามารถวางตัวส่งสัญญาณได้

รูป 6-9 แสดงการจำลองสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่ต้องการวางโครงข่ายตัวส่งสัญญาณ โดยเป็นพื้นที่ภายนอกอาคารที่มีสิ่งกีดขวางตามที่ระบุไว้ในแบบจำลอง โดยขนาดสิ่งกีดขวางในที่นี่กำหนดให้เป็นขนาด 1x1 เมตร ความละเอียดของระยะห่างของการวางตำแหน่งตัวส่งสัญญาณที่ใช้นำมาคำนวณในที่นี้ตั้งไว้ที่ 2 เมตร ตัวโปรแกรมคำนวณจะทำการหาพิกัดการวางตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวส่งสัญญาณที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ไม่ซ้อนทับกับตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง ตำแหน่งที่ได้แสดงในจุดสีแดงต่าง ๆ ในรูป 6-9

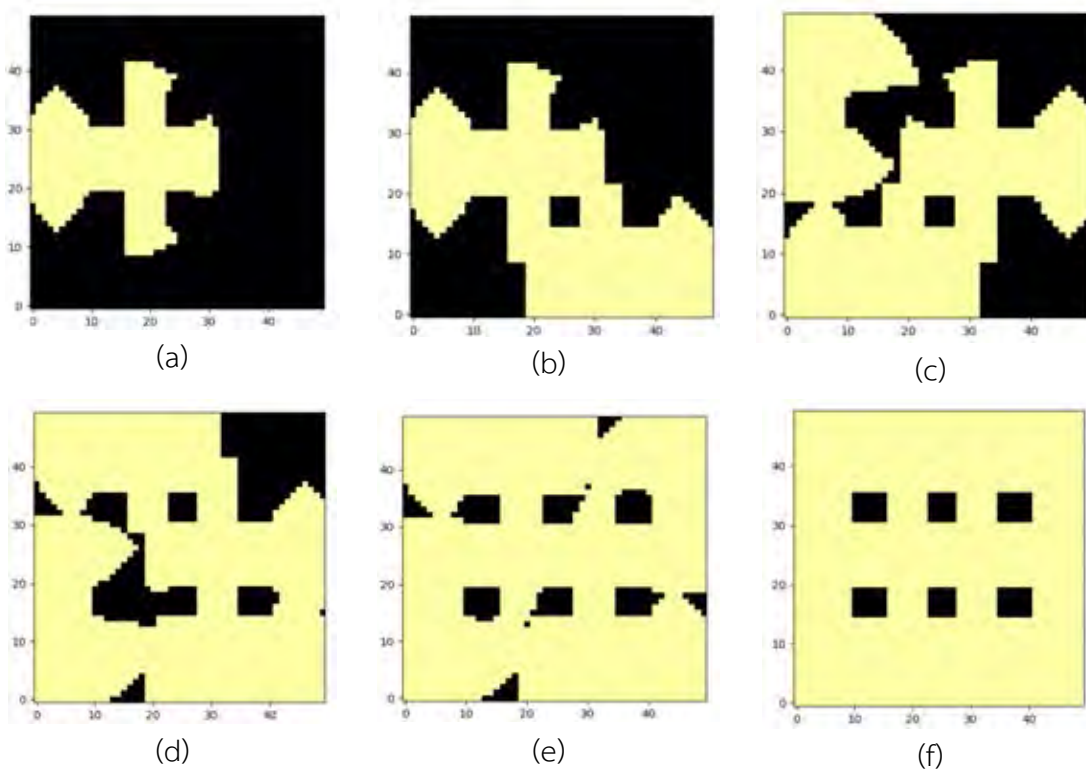
## 2) ผลการจำลอง

จากการจำลองระบบที่การสื่อสารมีค่า SNR Threshold ( $\tau$ ) ซึ่งตั้งไว้ที่ 3 dB นั้น โดยมีตัวส่งสัญญาณที่ต้องการทดสอบจำนวน 1-12 ตัว สามารถคำนวณพื้นที่ครอบคลุมที่มากที่สุดได้ ดังกราฟในรูปที่ 6-10



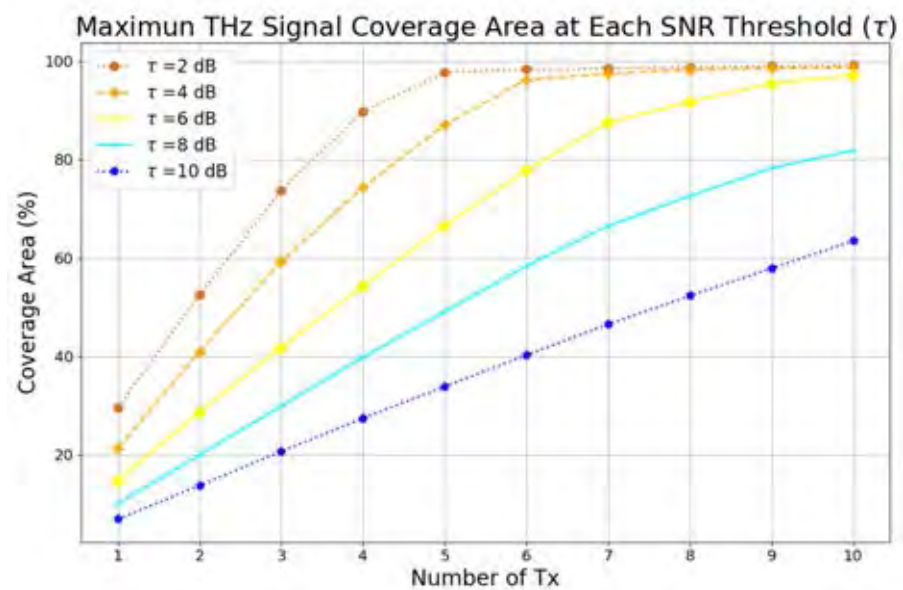
รูปที่ 6-10 พื้นที่ครอบคลุมสูงที่สุดจากการวางตำแหน่งที่คำนวณได้ของตัวส่งสัญญาณ 1 – 12 ตัว

จากรูป 6-10 เห็นได้ว่าพื้นที่ครอบคลุมสูงเกือบสูงสุดที่การใช้ตัวส่งสัญญาณ 6 ตัว ในที่นี้จึงทำการตัดสินใจใช้ตัวส่งสัญญาณเพียงไม่เกิน 6 ตัวเท่านั้น ซึ่งการวางตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณ 1 – 6 ตัวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6-11



รูปที่ 6-11 การวางตำแหน่งที่ได้พื้นที่ครอบคลุมมากที่สุดโดยใช้ตัวส่งสัญญาณ 1-6 ตัวดังแสดงในรูป (a)-(f) ตามลำดับ

การเปรียบเทียบพื้นที่ครอบคลุมด้วยจำนวนการใช้ตัวส่งต่าง ๆ โดยค่า SNR Threshold ที่ต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6-12

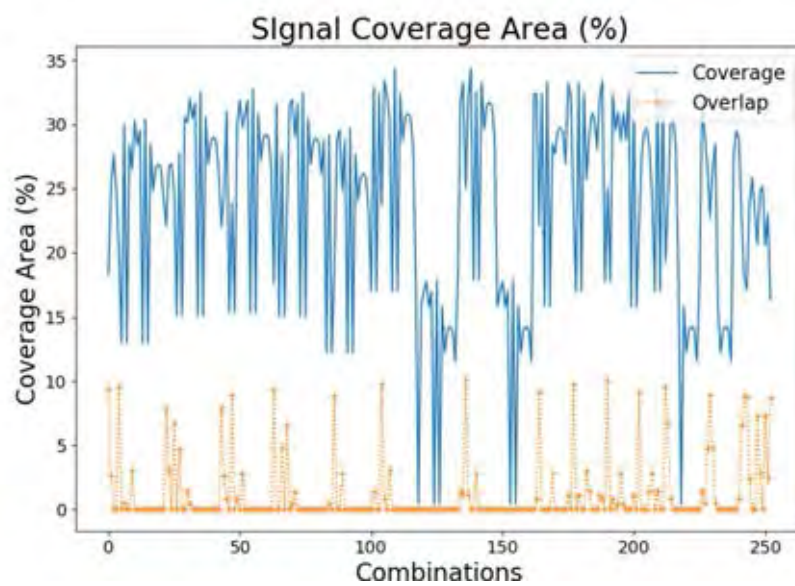


รูปที่ 6-12 เปรียบเทียบพื้นที่ครอบคลุมของการวางตำแหน่งตัวส่งสัญญาณที่ค่า SNR Threshold ต่าง ๆ

### 6.3 การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการวางแผนโครงข่ายด้วยการเรียนรู้ของตัวส่งสัญญาณ

จากหัวข้อที่ผ่านมา การวางแผนโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณสามารถหาพื้นที่ครอบคลุมได้ โดยการนำพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสัญญาณจากตัวส่งแต่ละตัวนำมาจัดกลุ่มของตำแหน่งต่าง ๆ และคำนวณหารูปแบบการวางที่ได้ความครอบคลุมสูงสุดผ่านกระบวนการ Exhaustive Search ในทุก ๆ รูปแบบที่เป็นไปได้จากทุก combinations ของการวางตำแหน่งตัวส่งสัญญาณ ในหัวข้อนี้ทางผู้วิจัยต้องการนำเสนอการเรียนรู้ผ่านกระบวนการ Reinforcement Learning ในภาคตัวส่งสัญญาณ ให้เรียนรู้การหาตำแหน่งของตนเองที่จะส่งผลให้ทั้งโครงข่ายมีความครอบคลุมสูงสุด โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวสามารถตรวจจับสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวเพื่อประมาณการพื้นที่ครอบคลุมของตนเองได้ และตรวจจับสัญญาณรบกวนจากตัวส่งสัญญาณตัวอื่นจากการที่ตั้งอยู่ในจุดที่รัศมีสัญญาณซ้อนทับกัน

ตัวอย่างการหาพื้นที่ครอบคลุมและค่าพื้นที่การซ้อนทับแสดงดังรูปที่ 6-13



รูปที่ 6-13 ค่าพื้นที่ครอบคลุมและพื้นที่ซ้อนทับของตัวส่งสัญญาณ 2 ตัว

ดังนั้นแนวทางการออกแบบฟังก์ชันของการให้รางวัล (Reward) แก่ตัวส่งสัญญาณที่อยู่ในกระบวนการเรียนรู้คือความครอบคลุมสัญญาณของตนเองและทำการให้โทษหรือการตั้งค่า Penalty ด้วยขนาดพื้นที่ที่มีสัญญาณรบกวนมาซ้อนทับ

จากการทดสอบการพัฒนา Reinforcement Learning กับตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว สามารถแสดงได้ดังรูป 6-14 และค่าการซ้อนทับของสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 6-15

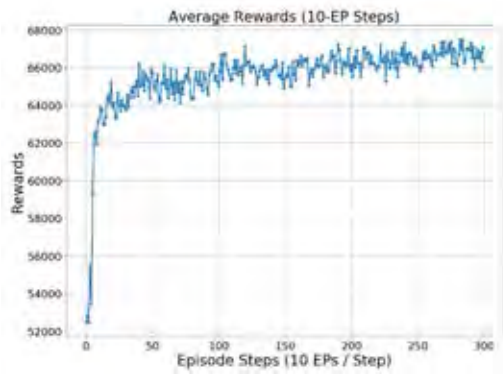




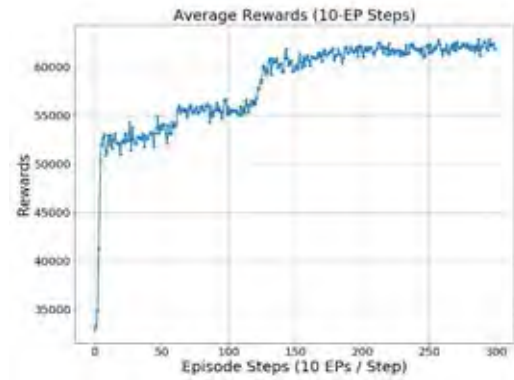
(a)



(b)



(c)

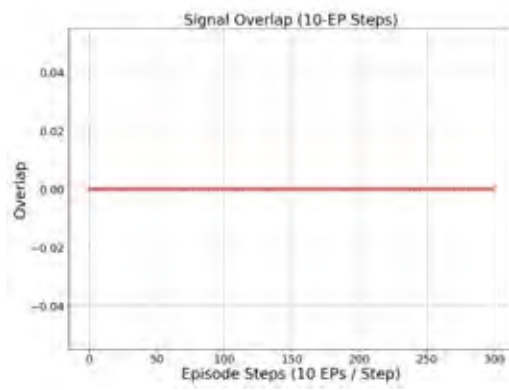


(d)

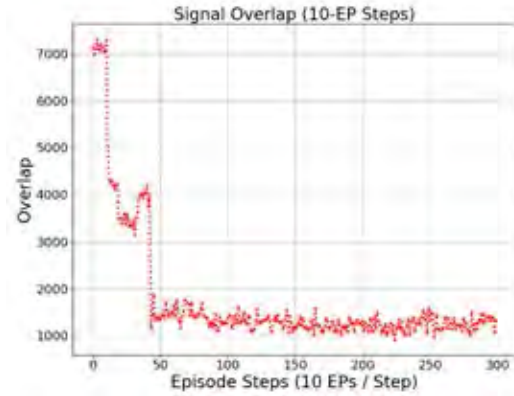
รูปที่ 6-14 การเรียนรู้ของตัวส่งสัญญาณจำนวน 1-4 ตัวตามภาพที่ (a) – (d) ตามลำดับ



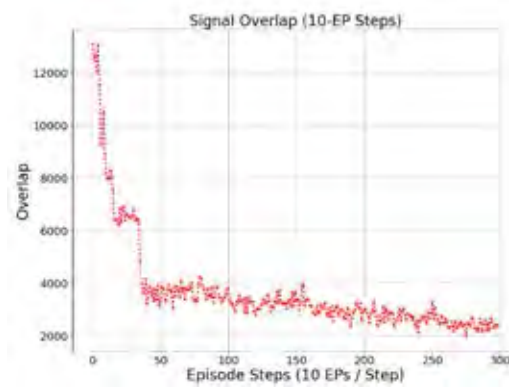
2705313941



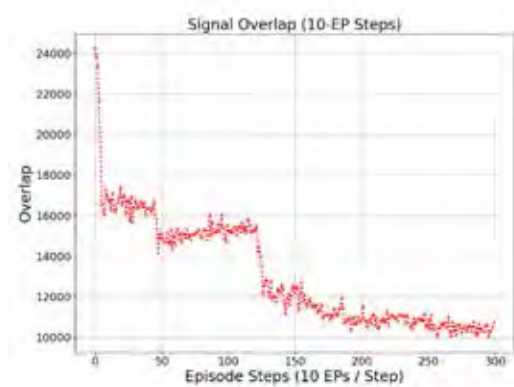
(a)



(b)



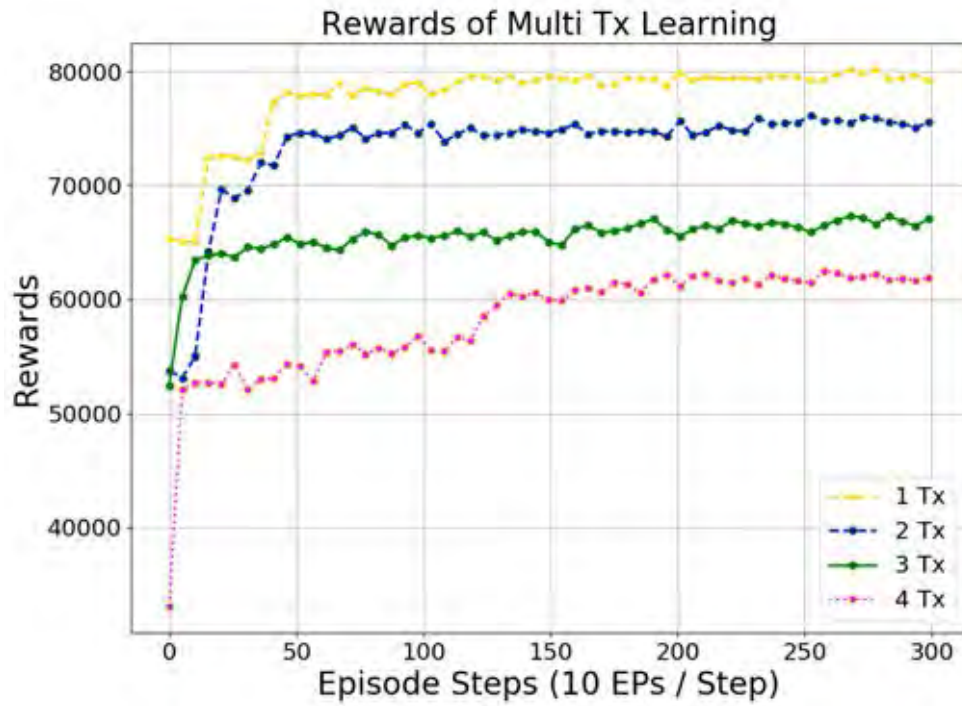
(c)



(d)

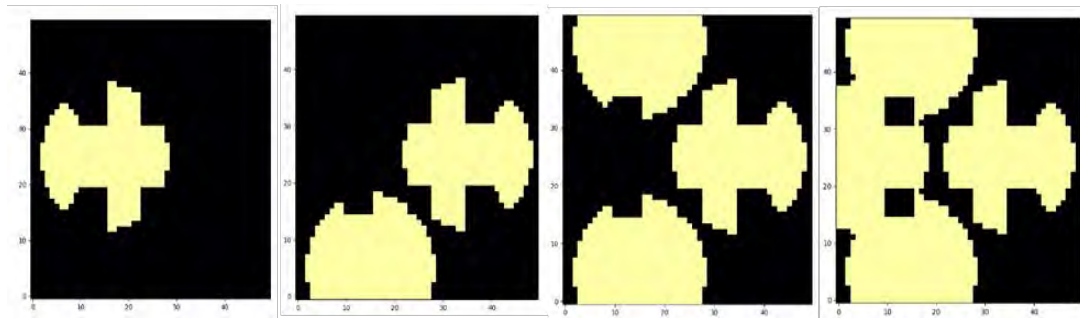
รูปที่ 6-15 ค่าการซ้อนทับของสัญญาณจากตัวส่งจำนวน 1-4 ตัวตามภาพที่ (a) – (d) ตามลำดับ

การเปรียบเทียบค่ารางวัลสะสมของการเรียนรู้ในระบบที่มีจำนวนตัวส่งสัญญาณต่าง ๆ กันนั้นแสดงตามกราฟในรูปที่ 6-16

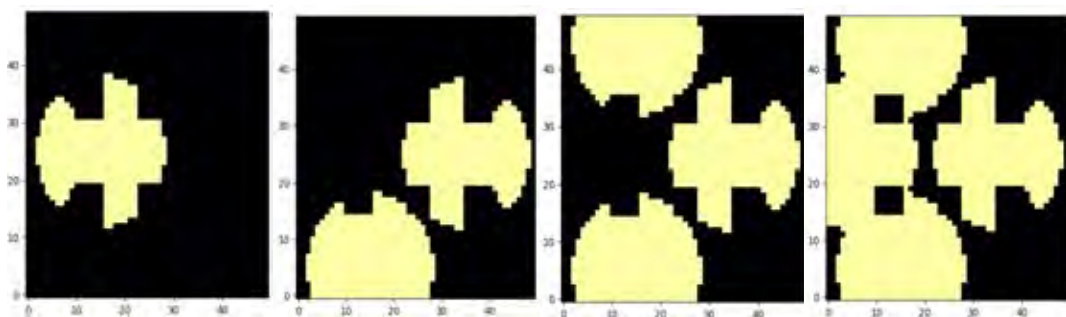


รูปที่ 6-16 เปรียบเทียบการเรียนรู้ของตัวส่งสัญญาณในระบบที่มีตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว

เมื่อทำการเปรียบเทียบตำแหน่งการวางตัวส่งสัญญาณที่ SNR Threshold = 5 dB ระหว่างการคำนวณแบบ Exhaustive Search กับการทำการเรียนรู้แบบ Reinforcement Learning ของตัวส่งสัญญาณจะได้ผลดังรูปที่ 6-17



(a)



(b)

รูปที่ 6-17 เปรียบเทียบตำแหน่งการวางเสาตัวส่งสัญญาณจากการคำนวณแบบ Exhaustive Search

(a) และแบบให้ตัวส่งสัญญาณทำการเรียนรู้ด้วย Reinforcement Learning (b)

จากรูป 6-17 แสดงให้เห็นว่าการเรียนรู้แบบจงใจโดยอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอสามารถหาตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดได้ตรงกับวิธีการคำนวณแบบเต็มรูปแบบ หรือ Exhaustive Search

#### 6.4 สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาปัญญาประดิษฐ์ให้กับอุปกรณ์การสื่อสารไร้สายนั้นสามารถทำได้ทั้งในตัวอุปกรณ์เคลื่อนที่และตัวระบบสโตร์กซ์ข่ายสัญญาณ จากแบบจำลองของการพัฒนาการเรียนรู้และตัดสินใจของอุปกรณ์เคลื่อนที่นั้นทำให้เห็นได้ว่าเมื่อตั้งเงื่อนไขการเรียนรู้ที่เหมาะสมสามารถทำให้อุปกรณ์ที่เริ่มจากการลองผิดลองถูกนั้นสามารถมุ่งเข้าไปหาเป้าหมายโดยบรรลุข้อกำหนดทั้งการประหยัดพลังงานด้วยการใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดและความต่อเนื่องของการเชื่อมต่อกับตัวส่งสัญญาณมีตลอดเวลา ส่วนในภาคส่งนั้นผลการจำลองแสดงว่าการให้ตัวส่งเรียนรู้และสามารถตัดสินใจในการกำหนดตำแหน่งของตัวเองสามารถสร้างแผนการวางโครงข่ายที่ทำให้ได้ค่าความครอบคลุมสัญญาณสูงที่สุดโดยเทียบเคียง

กับการคำนวณแบบ Exhaustive Search เช่นกัน ซึ่งผลต่าง ๆ ดังกล่าวมาของการศึกษาในบทนี้ สามารถช่วยเป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ที่มีความชาญฉลาดได้ โดยเฉพาะตัวอย่างจากแบบจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแนวทางสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในอนาคตที่ต้องการใช้คลื่นความถี่สูง ๆ หรือสภาพแวดล้อมที่มีการถูกปิดกั้นสัญญาณจากสิ่งกีดขวางได้เป็นอย่างดี



2705313941

CD :Thesis 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนองานวิจัยและการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพการสื่อสาร โดยเน้นความถี่ในย่านเทระเฮิรตซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านคลื่นสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ทั่วถึง โดยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาหมุมอับสัญญาณจากสิ่งกีดขวางอันเป็นข้อจำกัดหลักของคลื่นในย่านดังกล่าว และควบคุมจัดการพลังงานที่ใช้ให้เกิดประโยชน์เต็มที่ โดยนำหลักการที่เป็นที่สนใจในการวิจัยและพัฒนากระบวนการสื่อสารไร้สายในย่านเทระเฮิรตซ์ในปัจจุบันมาประกอบในการวิจัยคือ หลักการใช้ตัวสะท้อน (Reflector) มาช่วยในการพัฒนาศักยภาพของระบบ และการวิจัยด้านวัสดุที่เป็นที่สนใจอย่างสูงในปัจจุบันคือการใช้กราฟีนเป็นวัสดุในการสะท้อนด้วยการไบแอสทางไฟฟ้า นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังนำเสนอแนวทางการใช้สนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field) มาร่วมเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์สิ่งกีดขวางและเส้นทางที่เหมาะสมของสัญญาณไปสู่ผู้ใช้งาน และประเด็นสำคัญที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการพัฒนาความรู้คิด (Cognitive) ของระบบ ซึ่งได้นำหลักการของปัญญาประดิษฐ์ทางการเรียนรู้ด้วยแรงจูงใจหรือแรงเสริม (Reinforcement Learning) มาพัฒนาระบบสื่อสารทั้งตัวรับคืออุปกรณ์เคลื่อนที่ และตัวส่งคือ transmitter ให้มีความสามารถในการเรียนรู้และตัดสินใจได้ดีที่สุดตามโจทย์หรือจุดมุ่งหมายที่ต้องการได้

ในบทที่ 3 ผลการทดสอบการเพิ่มความครอบคลุมสัญญาณภายในห้องโดยใช้กระจกสะท้อนด้วยเทคนิคเรย์เทรซซิงแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งกระจกหรือตัวสะท้อนในตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสม และตัวกระจกมีความสามารถในการปรับมุมการสะท้อนของคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์ได้นั้นสามารถเพิ่มอัตราการจำนวนให้บริการของผู้ใช้งานภายในห้องได้เป็นอย่างมาก อีกทั้งผลการวิจัยเรื่องการเรียนรู้เชิงสถิติด้วยตนเองของกระจกแต่ละตัวนั้นสามารถบอกเราได้ว่าการเก็บค่าสถิติการรองรับผู้ใช้งานที่ถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางสามารถใช้ในการออกแบบมุมติดตั้งเริ่มต้นที่ดีที่สุดของกระจกแต่ละตัวได้อีกด้วยเนื่องจากการเก็บสถิติอย่างเป็นอิสระจากกันของกระจกแต่ละตัวนั้น ค่ามุมที่ได้จะได้ผลการรองรับผู้ใช้งานใกล้เคียงกับการคำนวณจากการทำการค้นหาเต็มรูปแบบ (full search) ในทุก ๆ การจัดกลุ่มของทุก ๆ มุมของกระจกแต่ละตัว ผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อเป็นค่าตั้งต้นในการติดตั้งตัวสะท้อนสำหรับการติดตั้งระบบสื่อสารด้วยคลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ภายในอาคารใด ๆ ได้

บทที่ 4 พิจารณาถึงอุปสรรคที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับคลื่นความถี่ย่านเทระเฮิรตซ์ก็คือ การถูกสิ่งกีดขวางบดบังสัญญาณ ทำให้สูญเสียการสื่อสารในแนวสายตา (Line of Sight) ไป เพื่อ บรรเทาปัญหาดังกล่าวงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการใช้เทคนิคการนำสนามศักย์ประดิษฐ์ (Artificial Potential Field) มาใช้ร่วมกับการสื่อสารไร้สายภายในอาคารที่มีสิ่งกีดขวางระหว่างตัวส่ง และตัวรับสัญญาณ ซึ่งสนามศักย์ประดิษฐ์ที่เกิดขึ้นได้เกิดจากการวิเคราะห์รูปแบบสิ่งกีดขวางที่ระบบ เซ็นเซอร์ตรวจจับได้และนำมาทำการสังเคราะห์เป็นสนามศักย์ขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลใช้ระบบตัดสินใจว่า ควรส่งสัญญาณไปในทิศทางใด ๆ หรือไม่ เพื่อให้ตัวส่งสัญญาณสามารถส่งสัญญาณที่จะส่งไปถึงผู้รับ ได้จริงเท่านั้น และสามารถปิดสายอากาศส่วนที่พิจารณาแล้วว่าไม่เป็นประโยชน์ต่อการสื่อสารได้ เพื่อ เป็นการประหยัดพลังงาน ทำให้ระบบสื่อสารเทระเฮิรตซ์ที่ทำการติดตั้งนั้นสามารถบริหารจัดการ ทรัพยากรทางด้านกำลังงาน ทำให้ระบบสื่อสารเทระเฮิรตซ์ที่ทำการติดตั้งนั้นสามารถบริหารจัดการ ทรัพยากรทางด้านกำลังงาน (Energy Aware) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในบทที่ 5 สิ่งที่สามารถนำมาเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบสื่อสารโทรคมนาคมได้คือการใช้ ความรู้ด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การใช้เทคโนโลยี Deep Learning สำหรับคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) เพื่อตรวจจับ ตำแหน่งของวัตถุที่เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวางต่าง ๆ รวมทั้งระบุชนิดของวัตถุนั้น ๆ เพื่อประมวลผลการ สร้างสนามศักย์ประดิษฐ์ ณ เวลาใด ๆ แบบ real time เพื่อให้ระบบสามารถบริหารจัดการรูปแบบ การส่งผ่านสัญญาณที่เหมาะสมออกจากตัวส่งได้ และการระบุชนิดของวัตถุยังสามารถช่วยให้คำนวณ ผลทางฟิสิกส์ของคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์เช่นการกระเจิง หรือการเลี้ยวเบน ที่ผ่านไปทางวัตถุขึ้น ต่าง ๆ ได้ เพื่อให้ผลการคำนวณของค่า SNR ของสัญญาณที่ส่งไปถึงผู้ใช้งานนั้นมีค่าแม่นยำที่สุด และ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอการจำลองการปรับแบบจำลองของรูปแบบบีมสัญญาณ ให้มีความ กว้างของบีมที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถรองรับผู้ใช้งานพร้อมกันจำนวนมากที่สุดได้

และการพัฒนาระบบ Cognitive ให้แก่ระบบให้มีความสามารถเรียนรู้และตัดสินใจด้วย ตนเองได้ ถูกนำเสนอในบทที่ 6 ด้วยการพัฒนาหลักการ Reinforcement Learning ให้แก่ระบบโดย นำเสนอทั้งแนวทางการพัฒนาความรู้ที่รู้จำให้แก่ทั้งตัวอุปกรณ์รับ และอุปกรณ์ส่งสัญญาณเพื่อให้ ผู้อ่านสามารถเห็นแนวทางและประโยชน์ของการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในระบบสื่อสารไร้สายได้ชัดเจน ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการวิจัยดังที่กล่าวมาข้างต้นได้มีความครอบคลุมในศาสตร์ ต่าง ๆ ของการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายที่นำหลักการของการเรียนรู้ของเครื่องและ ปัญญาประดิษฐ์มาร่วมเพิ่มขีดความสามารถให้ระบบ และการนำเทคโนโลยีที่กำลังเติบโตและเป็นสิ่งที่ นักวิจัยกำลังให้ความสนใจมาเป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัยจะทำให้เป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ เกี่ยวข้องในอนาคตได้



2705313941

CD :Thesis 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

## บรรณานุกรม

1. Gubbi, J., et al., *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. 2013. **29**(7): p. 1645-1660.
2. Atzori, L., A. Iera, and G.J.C.n. Morabito, *The internet of things: A survey*. 2010. **54**(15): p. 2787-2805.
3. Wollschlaeger, M., T. Sauter, and J.J.I.e.m. Jasperneite, *The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0*. 2017. **11**(1): p. 17-27.
4. Heath, R.W., et al., *An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems*. 2016. **10**(3): p. 436-453.
5. Akyildiz, I.F., J.M. Jornet, and C.J.P.C. Han, *Terahertz band: Next frontier for wireless communications*. 2014. **12**: p. 16-32.
6. Giaretta, A., et al., *Security vulnerabilities and countermeasures for target localization in bio-nanotechnology communication networks*. 2015. **11**(4): p. 665-676.
7. Hill, C., et al., *HITRANonline: An online interface and the flexible representation of spectroscopic data in the HITRAN database*. 2016. **177**: p. 4-14.
8. Barros, M.T., R. Mullins, and S.J.I.T.o.V.T. Balasubramaniam, *Integrated Terahertz communication with reflectors for 5G small-cell networks*. 2016. **66**(7): p. 5647-5657.
9. Zhang, Y., et al., *Terahertz beam switching by electrical control of graphene-enabled tunable metasurface*. 2017. **7**(1): p. 14147.
10. Jornet, J.M. and I.F. Akyildiz. *Graphene-based plasmonic nano-transceiver for terahertz band communication*. in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*. 2014. IEEE.
11. Jornet, J.M. and I.F. Akyildiz. *Graphene-based nano-antennas for electromagnetic nanocommunications in the terahertz band*. in *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*. 2010. IEEE.
12. Yun, Z. and M.F.J.I.A. Iskander, *Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications*. 2015. **3**: p. 1089-1100.



2705313941

CD iThesis 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8



13. Sun, S., et al. *Path loss, shadow fading, and line-of-sight probability models for 5G urban macro-cellular scenarios*. in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. 2015. IEEE.
14. Vadakkepat, P., K.C. Tan, and W. Ming-Liang. *Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning*. in *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. CEC00 (Cat. No. 00TH8512)*. 2000. IEEE.
15. Müller, V.C. and N. Bostrom, *Future progress in artificial intelligence: A survey of expert opinion*, in *Fundamental issues of artificial intelligence*. 2016, Springer. p. 555-572.
16. Jordan, M.I. and T.M.J.S. Mitchell, *Machine learning: Trends, perspectives, and prospects*. 2015. **349**(6245): p. 255-260.
17. Whitley, D.J.S. and computing, *A genetic algorithm tutorial*. 1994. **4**(2): p. 65-85.
18. Yao, X.J.P.o.t.l., *Evolving artificial neural networks*. 1999. **87**(9): p. 1423-1447.
19. Mitola, J. and G.Q.J.I.p.c. Maguire, *Cognitive radio: making software radios more personal*. 1999. **6**(4): p. 13-18.
20. Akyildiz, I.F., et al., *A survey on spectrum management in cognitive radio networks*. 2008.
21. Ghafoor, S., et al., *Cognitive radio for disaster response networks: survey, potential, and challenges*. 2014. **21**(5): p. 70-80.
22. Qiu, R.C., et al., *Cognitive radio network for the smart grid: Experimental system architecture, control algorithms, security, and microgrid testbed*. 2011. **2**(4): p. 724-740.
23. Sutton, R.S. and A.G. Barto, *Introduction to reinforcement learning*. Vol. 2. 1998: MIT press Cambridge.
24. Schmidhuber, J.J.N.n., *Deep learning in neural networks: An overview*. 2015. **61**: p. 85-117.
25. LeCun, Y., Y. Bengio, and G.J.n. Hinton, *Deep learning*. 2015. **521**(7553): p. 436.
26. Redmon, J., et al. *You only look once: Unified, real-time object detection*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016.

27. Harvey, J., A. Krywonos, and C.L.J.o.e. Vernold, *Modified Beckmann-Kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattering angles*. 2007. **46**(7): p. 078002.
28. Watkins, C.J. and P.J.M.l. Dayan, *Q-learning*. 1992. **8**(3-4): p. 279-292.
29. Lawrence, S., et al., *Face recognition: A convolutional neural-network approach*. 1997. **8**(1): p. 98-113.
30. Ronneberger, O., P. Fischer, and T. Brox. *U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation*. in *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*. 2015. Springer.
31. Khamsawad, L., et al., *Simulation of Signal Coverage for Terahertz Communications*.
32. Liu, Y. and Y. Zhao. *A virtual-waypoint based artificial potential field method for UAV path planning*. in *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*. 2016. IEEE.
33. Abadi, M., et al. *Tensorflow: A system for large-scale machine learning*. in *12th {USENIX} Symposium on Operating Systems Design and Implementation ({OSDI} 16)*. 2016.



2705313941



2705313941

CU IThesis 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8

ชื่อ-สกุล	นายมนุสส์ เพ็งนู
วัน เดือน ปี เกิด	27 กันยายน 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดเพชรบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปี 2544 ต่อมาได้สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี 2551 และ บริหารธุรกิจมหาบัณฑิตสาขาการจัดการการบิน คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2554



2705313941

CD Thesais 5671435021 dissertation / recv: 30072562 14:11:05 / seq: 8