

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การวางแผนวิทยุของการใช้ระบบ 5G และ 6G ร่วมกันสำหรับการบริการ บรอดแบนด์เคลื่อนที่

ศุภชาติ จินคง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Electrical and Electronics Commons](#)

Recommended Citation

จินคง, ศุภชาติ, "การวางแผนวิทยุของการใช้ระบบ 5G และ 6G ร่วมกันสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่" (2022).
Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 6569.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6569>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การวางแผนวิทย์ของการใช้ระบบ 5G และ 6G ร่วมกันสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Radio Planning of Using Both 5G and 6G Systems for Mobile Broadband Services



Mr. Supachart Chinkhong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การวางแผนวิฤของการใช้ระบบ 5G และ 6G ร่วมกัน |
| โดย | นายศุภชาติ จินคง |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

| | |
|---|---------------------------------|
| | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล) | |
| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | |
| | ประธานกรรมการ |
| (รองศาสตราจารย์อัษฎกร วุฒิสีทธิกุลกิจ) | |
| | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง) | |
| | กรรมการ |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี) | |
| | กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ) | |

ศุภชาติ จินคง : การวางแผนวิทยุของการใช้ระบบ 5G และ 6G ร่วมกันสำหรับการ
บริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่. (Radio Planning of Using Both 5G and 6G Systems
for Mobile Broadband Services) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พสุ แก้วปลั่ง

ในอนาคตอันใกล้เทคโนโลยี 6G จะเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก 6G มี
จุดมุ่งหมายที่จะให้บริการด้วยอัตราข้อมูลที่สูงถึงระดับ Tbps และมี Latency ต่ำมาก ซึ่งการนำ
เทคโนโลยี 6G เข้ามาใช้งานจะช่วยแก้ปัญหาความคับคั่งของ Traffic ในช่วงเวลาที่มีอุปกรณ์ใช้งาน
จำนวนมากได้ ในอนาคตจะมีบริการที่ต้องการใช้อัตราข้อมูลที่สูงขึ้นอีกมาก เช่น Virtual Reality
(VR) Extended Reality (XR) และ Hologram ซึ่งเป็นบริการที่ต้องการอัตราข้อมูลระดับสูง โดย
การนำเทคโนโลยี 6G เข้ามาใช้บริการจะสามารถช่วยให้สามารถใช้งานเทคโนโลยีเหล่านี้ได้เพียงพอ
วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ประเมินและเสนอแนวทางการวางแผนวิทยุของระบบ 5G และ 6G ให้
ใช้งานร่วมกัน ซึ่งพิจารณาจากอัตราการใช้งานข้อมูลรวมสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ใน
พื้นที่ต่าง ๆ อัตราข้อมูลการให้บริการของสถานีฐานทั้ง 5G และ 6G และพื้นที่ครอบคลุมของทั้ง
5G และ 6G ที่คำนวณจากการสูญเสียเชิงวิถี และแสดงตำแหน่งและพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน
บนพื้นที่ที่กำหนด วิทยานิพนธ์นี้แสดงผลการวิเคราะห์บนพื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban เทียบเท่า
ได้กับพื้นที่ศูนย์การค้าย่านสยามสแควร์ และพื้นที่ตัวอย่าง Urban เทียบเท่าได้กับพื้นที่ชุมชนอยู่
อาศัยในตำบลบางปู จังหวัดสมุทรปราการ โดยเลือกใช้งานสถานีฐานของ 5G ให้ครอบคลุมพื้นที่
ให้บริการทั้งหมด และใช้สถานีฐานของ 6G ในตำแหน่งที่มีผู้คนใช้งานเป็นจำนวนมาก ซึ่งผลลัพธ์
ของงานวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในการวางแผนพื้นที่ติดตั้งโครงข่ายเบื้องต้น เพื่อตั้ง
สถานีฐาน 5G และ 6G สำหรับขยายพื้นที่ให้บริการต่อไปในอนาคต

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6470286221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: 6G, 5G, Mobile broadband services, Radio planning, Total path loss,
Coverage area

Supachart Chinkhong : Radio Planning of Using Both 5G and 6G Systems
for Mobile Broadband Services. Advisor: Asst. Prof. PASU KAEWPLUNG

In the near future, 6G technology will play a significant role. 6G aims to provide services with data rates up to Tbps and low latency. Introducing 6G technology will help alleviate traffic congestion during periods of high usage by many devices. In the future, services that require even higher data rates, such as virtual reality (VR), extended reality (XR), and holograms, 6G technology will be possible to support these technologies effectively. The objective of this thesis aims to introduce an approach for the radio planning using base stations of both 5G and 6G that should be installed in service area. The coverage area of the base station in both 5G and 6G is calculated based on total path loss. Each position of the base station and the coverage area are shown in the sample area, which is a dense urban equivalent to Siam Square shopping center in Bangkok and urban equivalent to Bangpu subdistrict in Samutprakarn, by using 5G base stations to cover the sample area and 6G base stations in a location of many use cases. The result can be used to analyze the preliminary network installation to establish the base station for extending the service area in the future.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ทั้งช่วยให้คำปรึกษา องค์ความรู้ แนวคิด ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มคิดหัวข้อวิทยานิพนธ์ไปจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสร็จสมบูรณ์ อีกทั้งยังช่วยให้ได้มีโอกาสในการเขียนผลงานไปเสนอในการประชุมงานวิชาการระดับนานาชาติ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบและอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และความเข้าใจในวิชาที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคุณรุ่งรัฐ วิรติกุล รุ่นพี่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ค่อยช่วยเหลือแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนการศึกษาในการศึกษาในระดับปริญญาโท

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ช่วยสนับสนุนเป็นกำลังใจตลอดเวลาจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท

ศุภชาติ จินคง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูปภาพ..... | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ผลที่ได้รับจากการศึกษาวิทยานิพนธ์ | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน..... | 5 |
| 2.1 เทคโนโลยี 5G และ คุณสมบัติ 3 ประการของเทคโนโลยี 5G..... | 5 |
| 2.2 คุณสมบัติของเทคโนโลยี 6G | 6 |
| 2.3 การแบ่งคลื่นความถี่โครงข่าย 5G และ 6G..... | 7 |
| 2.4 อัตราข้อมูลสำหรับการใช้งานในบริการต่าง ๆ ใน Mobile Broadband (MBB) | 8 |
| 2.5 การคำนวณอัตราข้อมูลของ 5G-NR..... | 15 |
| 2.6 Link Power Budget | 19 |
| 2.7 Receiver Sensitivity | 20 |
| 2.8 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Link Power Budget..... | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.9 Transmission Power และ Antenna Gain | 22 |
| 2.10 การคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 5G..... | 23 |
| 2.11 อัตราข้อมูลของ 6G..... | 26 |
| 2.12 ระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G | 27 |
| 2.13 การ Migration จาก 5G ไปสู่ 6G | 28 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและผลลัพธ์ของงานวิจัย | 30 |
| 3.1 การคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G | 30 |
| 3.2 ผลตัวอย่างการคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G..... | 30 |
| 3.3 การคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G..... | 31 |
| 3.4 ผลตัวอย่างการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G | 31 |
| 3.5 หลักการออกแบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้ใช้งานร่วมกัน | 33 |
| 3.6 ผลลัพธ์ของงานวิจัย | 36 |
| 3.7 ผลตัวอย่างการวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ Dense Urban | 38 |
| 3.8 ผลตัวอย่างการวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ Urban..... | 44 |
| บทที่ 4 วิเคราะห์ผลลัพธ์ของวิทยานิพนธ์ | 50 |
| 4.1 วิเคราะห์พื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban | 50 |
| 4.2 วิเคราะห์พื้นที่ตัวอย่าง Urban | 53 |
| 4.3 วิเคราะห์ผลการวางแผนโครงข่าย | 55 |
| บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 56 |
| บรรณานุกรม..... | 58 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 63 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 1 แสดงย่านความถี่ 5G ในประเทศไทย และการ Duplex สัญญาณ..... | 7 |
| ตารางที่ 2 แสดง Use Cases สำหรับ XR และ ข้อกำหนด [19] | 12 |
| ตารางที่ 3 แสดงอัตราข้อมูลของแต่ละบริการบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ต [22], [23] | 14 |
| ตารางที่ 4 แสดง Subcarrier Spacing ของ ค่า Numerology ที่แตกต่างกัน [12] | 15 |
| ตารางที่ 5 แสดง Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของคลื่น 700 MHz, 2600 MHz และ 26 GHz | 16 |
| ตารางที่ 6 แสดงจำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของ FR1 | 18 |
| ตารางที่ 7 แสดงจำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของ FR2 | 18 |
| ตารางที่ 8 แสดงกำลังส่งสูงสุดของสถานีฐานแต่ละ Class..... | 22 |
| ตารางที่ 9 แสดงหลักเกณฑ์กำลังส่ง อัตราขยาย และความสูงจากพื้นดินของสถานีฐาน | 23 |
| ตารางที่ 10 แสดงสมการ Total Path Loss ในแต่ละพื้นที่..... | 24 |
| ตารางที่ 11 แสดงสมการ Cell Radius ในแต่ละพื้นที่..... | 25 |
| ตารางที่ 12 แสดง Shadow Fading Margin ในแต่ละ Terrain | 26 |
| ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบข้อจำกัดทางประสิทธิภาพต่าง ๆ ของ 6G และ 5G [34] | 27 |
| ตารางที่ 14 Losses และระยะครอบคลุมสถานีฐานโดยแบ่งการใช้งานตาม Use Cases ต่าง ๆ [35] | 28 |
| ตารางที่ 15 แสดง Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของคลื่น 325 GHz [39] | 30 |
| ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G..... | 30 |
| ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G | 31 |

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 18 ค่าพารามิเตอร์ของการใช้งานบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ของผู้ใช้บริการในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง [40] - [44] | 38 |
| ตารางที่ 19 ค่าพารามิเตอร์ของ Base Station ทั้งหมดในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง | 39 |
| ตารางที่ 20 ค่าพารามิเตอร์ของการใช้งานบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ของพื้นที่ Urban ตัวอย่าง [40], [41], [43], [44]..... | 44 |
| ตารางที่ 21 ค่าพารามิเตอร์ของ Base Station และ Cell Radius ทั้งหมดในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 45 |
| ตารางที่ 22 ผลลัพธ์จากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว และ การวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว โดยใช้พื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban ขนาด 0.2252 km ² | 51 |
| ตารางที่ 23 ผลลัพธ์จากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว และการวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว โดยใช้พื้นที่ตัวอย่าง Urban ขนาด 0.305 km ² | 54 |

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1 คุณสมบัติ 3 ประการของเทคโนโลยี 5G..... | 6 |
| รูปที่ 2 คุณสมบัติของเทคโนโลยี 6G..... | 7 |
| รูปที่ 3 Extended Reality (XR) | 10 |
| รูปที่ 4 ความแตกต่างของ VR AR และ MR | 11 |
| รูปที่ 5 ข้อกำหนดแบนด์วิดท์เทียบกับมาตรฐาน IEEE 802 และผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ [21]..... | 13 |
| รูปที่ 6 Flowchart ของการส่งข้อมูลวัตถุ 3 มิติ [21]..... | 14 |
| รูปที่ 7 ตัวอย่างการสร้าง Hologram บนสมาร์ตโฟน | 14 |
| รูปที่ 8 จำนวน Slot และ Symbol ตามลำดับ Numerology..... | 17 |
| รูปที่ 9 มิติ Resource Block..... | 17 |
| รูปที่ 10 จำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth | 18 |
| รูปที่ 11 การสูญเสียจากการถูกดูดกลืนในบรรยากาศกับความถี่ | 21 |
| รูปที่ 12 เปรียบเทียบข้อจำกัดทางประสิทธิภาพต่าง ๆ ของ 6G และ 5G [34]..... | 26 |
| รูปที่ 13 ผลการคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G..... | 31 |
| รูปที่ 14 ผลการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G | 32 |
| รูปที่ 15 Flowchart การออกแบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้ใช้งานร่วมกัน | 33 |
| รูปที่ 16 อัตราข้อมูลรวมของพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง..... | 40 |
| รูปที่ 17 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง..... | 40 |
| รูปที่ 18 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง..... | 40 |
| รูปที่ 19 อัตราข้อมูลของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง..... | 40 |
| รูปที่ 20 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง .. | 41 |
| รูปที่ 21 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง .. | 41 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 22 Cell Radius ของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง | 41 |
| รูปที่ 23 จำนวนของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 และ FR2 และ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง | 42 |
| รูปที่ 24 ตำแหน่งของสถานีฐานบนพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง | 42 |
| รูปที่ 25 อัตราข้อมูลรวมในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 46 |
| รูปที่ 26 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 46 |
| รูปที่ 27 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 46 |
| รูปที่ 28 อัตราข้อมูลของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 46 |
| รูปที่ 29 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 47 |
| รูปที่ 30 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 47 |
| รูปที่ 31 Cell Radius ของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 47 |
| รูปที่ 32 จำนวนของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 และ FR2 และ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 48 |
| รูปที่ 33 ตำแหน่งของสถานีฐานบนพื้นที่ Urban ตัวอย่าง | 48 |
| รูปที่ 34 จำนวนของสถานีฐานของระบบ 5G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban | 50 |
| รูปที่ 35 จำนวนของสถานีฐานของระบบ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban | 51 |
| รูปที่ 36 จำนวนของสถานีฐานของระบบ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ตัวอย่าง Urban | 53 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านโทรคมนาคมได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เริ่มจากยุคการสื่อสารในระบบแอนะล็อกยุค 1G ในปี 1980 หลังจากนั้น เทคโนโลยีทางด้านโทรคมนาคมได้ถูกพัฒนามาจนถึงยุคปัจจุบันคือ ยุค 5G ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงในทุกด้าน และในอนาคตภายในปี 2030 [1] จะถึงยุคของ 6G ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า 5G ถึง 10 เท่า การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านโทรคมนาคมเพื่อรองรับการใช้งานเทคโนโลยีสื่อสารที่เพิ่มขึ้นในทุกภาคส่วน ตั้งแต่การใช้ในชีวิตประจำวัน ธุรกิจ อุตสาหกรรม และการศึกษา ซึ่งการคาดการณ์ของอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณทราฟฟิกในการใช้ข้อมูลที่เพิ่มขึ้นจาก 158 EB ต่อเดือน ในปี 2022 เป็น 5016 EB ต่อเดือน ในปี 2030 [2]

เทคโนโลยี 6G จะมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเทคโนโลยี 5G ซึ่งคุณสมบัตินี้สื่อถึงภาพรวมของความสามารถในการตอบสนองความต้องการของ Use Case ซึ่งมีความแตกต่างกัน ประกอบด้วย Enhanced Mobile Broadband (eMBB) เป็นบริการบรอดแบนด์ไร้สายที่สามารถรับ - ส่งอัตราข้อมูลในปริมาณสูง Ultra Reliable Low Latency Communication (URLLC) คือ บริการที่ตอบสนองผู้ใช้งานที่ต้องการความน่าเชื่อถือ (Reliability) และความหน่วงเวลา (Latency) ต่ำ และ Massive Machine Type Communication (mMTC) คือ บริการที่ตอบสนองการใช้งานที่มีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์สื่อสารจำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน ซึ่งในคุณสมบัติของ 5G อาจยังไม่ตอบสนองความต้องการของ Use Case ได้อย่างเต็มที่ โดย 6G จะมีครอบคลุมการตอบสนองต่อ Use Case ต่าง ๆ ได้มากกว่า โดยการปรับปรุงทางด้าน การรับ - ส่งข้อมูลในปริมาณสูงของ eMBB และการเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมาก ของ mMTC เป็น Ubiquitous Mobile Broadband (uMBB) [1], [3] เช่น การปรับปรุงความสามารถของการให้บริการฮอตสปอตเพื่อให้รองรับการขยายตัวของบริการใหม่อย่าง Virtual Reality (VR) ด้วยข้อมูลอัตราสูงถึง 1 Gbps/User การปรับปรุงทางด้าน การรับ - ส่งข้อมูลในปริมาณสูงของ eMBB บริการที่มีความน่าเชื่อถือสูงด้วยความหน่วงต่ำของ URLLC เป็น Ultra-Reliable Low Latency Broadband Communication (ULBC) [1], [3] เช่น Automatic Guided Vehicle (AGV) ในสถานที่อุตสาหกรรม บริการที่มีความน่าเชื่อถือสูงด้วยความหน่วงต่ำของ URLLC การเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมาก ของ mMTC เป็น Massive Ultra Reliable Low Latency Communication (mULC) [1], [3] ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวก

ความสะดวกในการปรับใช้งานเซ็นเซอร์จำนวนมากและเพิ่มความน่าเชื่อถือ เพื่อตอบสนองบริการในอนาคตที่เพิ่มชิ้นการใช้งานเพียงเทคโนโลยี 5G อาจยังไม่เพียงพอต่อการรองรับบริการทั้งหมดจึงนำเทคโนโลยี 6G เข้ามาเพื่อรองรับบริการต่าง ๆ ที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต

ย่านความถี่ของโครงข่าย 6G จะอยู่ในช่วง THz มีความถี่อยู่ใน 275 GHz – 3 THz [2] ความเร็วของโครงข่าย 6G Peak Data Rate 1 Tbps แต่ของโครงข่าย 5G Peak Data Rate 10 Gbps ความหน่วงเวลาของโครงข่าย 6G อยู่ที่ 1 ms แต่ของโครงข่าย 5G อยู่ที่ 10 ms [4] ซึ่งการนำ 6G เข้ามาช่วยจะสามารถรองรับการใช้งานของ Use Case ต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นในอนาคตที่ 5G ไม่สามารถรองรับได้ เช่น Holographic-Type Communication (HTC), Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) และ Extended Reality (XR) เป็นต้น การนำโครงข่าย 6G เข้ามาใช้งานร่วมกับ 5G จะใช้งานโครงข่าย 6G แบบ Non-Standalone [5], [6] ซึ่งเป็นการใช้งานโครงข่าย 6G ผ่าน Core Network ของ 5G โดยการใช้งานเทคโนโลยี 5G และ 6G ร่วมกัน จะใช้ Core Network เดิมของ 5G เป็นหลัก ปรับไปใช้งาน 6G แบบ Non-Standalone ในบางส่วนเพื่อให้รองรับการใช้งานของ Use Case ได้เพียงพอ ช่วยให้ประหยัดต้นทุนของผู้ให้บริการโครงข่าย ทำให้สามารถใช้งานเทคโนโลยี 6G ได้เร็วขึ้น

การวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ใด ๆ นั้นต้องพิจารณาอยู่ 2 ปัจจัยหลัก [7] คือ ครอบคลุมของสถานีฐาน (Coverage) ต้องครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด และอัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีฐาน (Capacity) ต้องเพียงพอต่อการให้บริการแต่ละพื้นที่ในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก

จากการสืบค้นงานวิจัยต่าง ๆ ยังไม่พบบางงานวิจัยที่ทำการออกแบบระบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ใช้งานร่วมกัน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นเพียงการออกแบบระบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 4G-LTE และ 5G ที่ใช้งานร่วมกัน [8] ซึ่งเป็นงานวิจัยช่วงเปลี่ยนผ่านการใช้งานจากยุค 4G มาเข้าสู่ยุค 5G และ การออกแบบระบบการติดตั้งสถานีฐานของการใช้งานในโครงข่าย 5G [9] ซึ่งเป็นการใช้งานในยุคปัจจุบัน

จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเสนอวิธีการประเมินและออกแบบระบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้มีระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดและมีอัตราการข้อมูลรวมทุกบริการเพียงพอทุกบริการเพื่อรองรับการใช้งานบริการสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่และบริการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินและเสนอแนวทางติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้ใช้งานร่วมกัน โดยมีระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดและมีอัตราข้อมูลรวมที่เพียงพอสำหรับการใช้งานทางด้านบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่
2. เพื่อจำลองการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้ใช้งานร่วมกัน โดยมีระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดที่กำหนดได้ และแสดงระยะครอบคลุมสถานีฐานของทุกสถานีฐานลงบนพื้นที่ที่กำหนด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. คำนวณอัตราข้อมูลสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ได้ทั้ง Download และ Upload เพื่อนำไปออกแบบระบบ 5G และ 6G เพื่อใช้งานร่วมกันได้
2. คำนวณและออกแบบระบบ 5G และ 6G ร่วมกันได้ โดยมีระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดและมีอัตราการข้อมูลรวมทุกบริการเพียงพอทุกบริการ
3. บริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ที่พิจารณาในการศึกษาวิจัย ประกอบด้วยบริการรับชมวิดีโอความละเอียดสูง (Full HD, 4K และ 8K), Virtual Reality (VR), Extended Reality (XR), Holographic-Type Communication (HTC) และ Web Browsing
4. กำหนดพื้นที่ตัวอย่างภายนอกอาคารเท่านั้น โดยกำหนดพื้นที่ตัวอย่างเป็น Dense Urban และ Urban
5. การคำนวณอัตราข้อมูล และระยะครอบคลุมสถานีฐาน ของ 6G ใช้การอ้างอิงจากรายงานที่ได้รับการยอมรับในทางวิชาการ เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีที่ออกมารองรับอย่างชัดเจน
6. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการแสดงผล
7. ไม่มีการทดลองจริง

1.4 ผลที่ได้รับจากการศึกษาวิทยานิพนธ์

1. แนวทางสำหรับการประเมินและออกแบบระบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ร่วมกัน
2. สามารถประมาณอัตราข้อมูลสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ในพื้นที่ต่าง ๆ ทั้ง Download และ Upload ได้ และจำนวนของสถานีฐานทั้งของ 5G และ 6G ได้
3. สามารถแสดงตำแหน่งและพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานโดยแสดงผลทั้งของ 5G และ 6G ในพื้นที่ที่กำหนดลงบนแผนที่ได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การวางแผนวิทยุของการใช้ระบบ 5G และ 6G ร่วมกันสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ มีแผนการดำเนินงานดังนี้

1. ในขั้นตอนการศึกษาและทบทวนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบ 5G และ 6G โดยเริ่มศึกษาตั้งแต่การพัฒนาการของระบบโทรคมนาคมโดยเริ่มตั้งแต่ยุค 1G ถึงยุคของ 6G โดยปัจจัยหลักในการออกแบบระบบจะต้องคำนึงถึงอัตราข้อมูลรวมของแต่ละบริการ และพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละสถานีฐาน
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ Radio Wave Propagation ของระบบ 5G และ 6G ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการประเมินและเสนอแนวทางติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G
3. เสนอแนวทางสำหรับการประเมินและออกแบบระบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G
4. สรุปผลการดำเนินการวิจัย
5. จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 เทคโนโลยี 5G และ คุณสมบัติ 3 ประการของเทคโนโลยี 5G

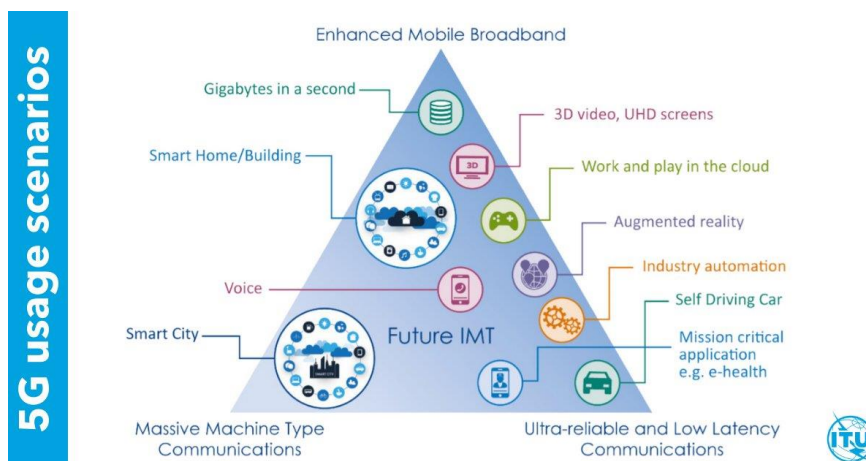
เทคโนโลยี 5G หรือ IMT-2020 เป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์การสื่อสารไร้สาย พัฒนาขึ้นตามความต้องการในการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายในยุคปัจจุบัน โดยมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายซึ่งถูกเสนอโดย ITU Radio Communication Sector (ITU-R) ซึ่งมีกลุ่มงาน 3GPP เป็นกลุ่มศึกษา พัฒนา และเผยแพร่มาตรฐานนี้ตั้งแต่มาตรฐาน Release 15 จนถึงปัจจุบันถึง Release 16 [10]

IMT – 2020 แบ่งคุณสมบัติหลักของเทคโนโลยี 5G ได้ 3 ประการ ดังรูปที่ 1 เพื่อรองรับการให้บริการโครงข่ายตามความต้องการของภาคธุรกิจในทุกรูปแบบและผู้ใช้งานดังนี้

1. Enhanced Mobile Broadband (eMBB) คือ บริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่สามารถรับ - ส่งอัตราข้อมูลในปริมาณสูง พร้อมเพิ่มความสามารถในการรับ - ส่งข้อมูลในขณะเคลื่อนที่ (Mobility) รวมถึงรองรับการเชื่อมต่อข้อมูลของอุปกรณ์สื่อสารได้มากขึ้น ตัวอย่างบริการของ eMBB เช่น การรับชมสื่อมัลติมีเดียความชัดระดับ 4K 8K หรือ รับชมแบบ 3 มิติ ผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่เรียกว่า Virtual Reality (VR) และ Augmented Reality (AR)

2. Ultra Reliable Low Latency Communication (URLLC) เป็นบริการที่ตอบสนองผู้ใช้งานที่ต้องการความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูลที่ในงานต้องการความแม่นยำสูง ความหน่วงของระบบต่ำ (Latency) ส่วนใหญ่เป็นบริการ Remote Operation เช่น การควบคุมเครื่องจักรในโรงงาน หรือการควบคุมรถยนต์ไร้คนขับ

3. Massive Machine Type Communication (mMTC) เป็นบริการที่ตอบสนองการใช้งานที่มีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์สื่อสารจำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน โดยที่อัตราข้อมูลไม่สูงมากนัก มีความหน่วงของเวลาต่ำและใช้พลังงานน้อย เช่น การควบคุมอุปกรณ์ Internet of Things (IoT) ในเมืองอัจฉริยะ และการเกษตรอัจฉริยะ [10], [11]



รูปที่ 1 คุณสมบัติ 3 ประการของเทคโนโลยี 5G

2.2 คุณสมบัติของเทคโนโลยี 6G

คุณสมบัติของเทคโนโลยี 6G มีคุณสมบัติแบ่งได้เป็น 6 ประการ ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันกับคุณสมบัติของเทคโนโลยี 5G ทั้งหมด 3 ประการดังที่ได้กล่าวมาคือ eMBB URLLC และ mMTC

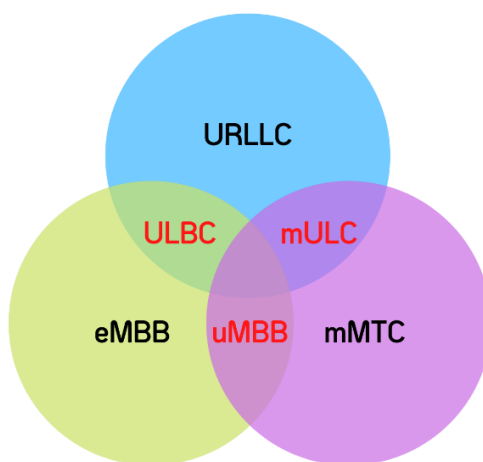
ซึ่งในคุณสมบัติทั้ง 3 ดังกล่าวของ 5G ยังไม่ตอบสนองความต้องการของ Use Case ได้อย่างเต็มที่ โดย คุณสมบัติของเทคโนโลยี 6G [1], [3] จะมีครอบคลุมการตอบสนองต่อ Use Case ต่าง ๆ ได้มากกว่า โดยมีคุณสมบัติเพิ่มเติมมาอีก 3 ประการคือ

1. Ubiquitous Mobile Broadband (uMBB) [1], [3] เป็นการปรับปรุงทางด้าน การรับ - ส่งข้อมูลในปริมาณสูงของ eMBB และการเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมากของ mMTC เช่น การปรับปรุงความสามารถของการให้บริการฮอตสปอตเพื่อให้รองรับการขยายตัวของบริการใหม่ เช่น Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), Extended Reality (XR) และ Hologram เป็นต้น ซึ่งเป็นบริการที่ต้องการอัตราข้อมูลอัตราสูงถึง 1 Gbps/Use Case

2. Ultra Reliable Low Latency Broadband Communication (ULBC) [1], [3] เป็นการปรับปรุงทางด้าน การรับ - ส่งข้อมูลในปริมาณสูงของ eMBB และบริการที่มีความน่าเชื่อถือสูงและความหน่วงต่ำของ URLLC เช่น Automatic Guided Vehicle (AGV) ในสถานที่อุตสาหกรรม

3. Massive Ultra Reliable Low Latency Communication (mULC) [1], [3] เป็นการปรับปรุงทางด้านบริการที่มีความน่าเชื่อถือสูงและความหน่วงต่ำของ URLLC และการเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมากของ mMTC ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกในการปรับใช้งานเซ็นเซอร์จำนวน

มากและเพิ่มความน่าเชื่อถือ เช่น ใช้เซ็นเซอร์ในการควบคุมการผลิต การขนส่ง ความปลอดภัย สาธารณะ และการดูแลสุขภาพ เป็นต้น



รูปที่ 2 คุณสมบัติของเทคโนโลยี 6G

2.3 การแบ่งคลื่นความถี่โครงข่าย 5G และ 6G

2.3.1 การแบ่งคลื่นความถี่ในโครงข่าย 5G

ในประเทศไทย คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ได้จัดการประมูลคลื่นความถี่ ในย่าน 700 MHz 2500 MHz และ 26 GHz ให้บริษัทเอกชนได้นำคลื่นไปให้บริการบรอดแบนด์ความเร็วสูง 5G มีรายละเอียดดังตารางที่ 1 ซึ่งย่านความถี่ที่จะถูกใช้งานเพื่อระบบ 5G ในประเทศไทยจะอยู่ในช่วง n28 (703 – 748 MHz), n41 (2496 – 2690 MHz) และ n258 (24.3 – 25.1 GHz และ 25.2 – 27 GHz) ตามมาตรฐานของ 3GPP ITU-R [12]

ตารางที่ 1 แสดงย่านความถี่ 5G ในประเทศไทย และการ Duplex สัญญาณ

| ย่านความถี่ 5G-NR | ช่วงความถี่ Downlink | ช่วงคลื่นความถี่ Uplink | Duplex Mode |
|-------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------|
| 700 MHz (n28) | 703 – 748 MHz | 758 – 803 MHz | FDD |
| 2600 MHz (n41) | 2496 – 2690 MHz | | TDD |
| 26 GHz (n258) | 24.3 – 25.1 GHz และ 25.2 – 27 GHz | | TDD |

โดยแบ่งการใช้งานในแต่ละย่านดังนี้

ย่านความถี่ 700 MHz เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ชนบทและชานเมือง เนื่องจากมีความสามารถในการให้บริการครอบคลุมพื้นที่กว้างและส่งสัญญาณทะลุอาคาร และสิ่งกีดขวางได้ [13]

ย่านความถี่ 2600 MHz เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่เขตเมืองและชานเมือง เนื่องจากมีความสามารถในการให้บริการอัตราข้อมูลสูง และมีระยะครอบคลุมที่กว้าง [13]

ย่านความถี่ 26 GHz เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่เขตเมืองและชานเมือง ที่มีความหนาแน่นสูงได้ เนื่องจากมีความสามารถในการให้บริการอัตราข้อมูลสูงถึงระดับ Gbps จะใช้งาน [13]

2.3.2 การแบ่งคลื่นความถี่ในโครงข่าย 6G

ในการแบ่งคลื่นความถี่ในโครงข่าย 6G คาดการณ์ว่าจะใช้ช่วงความถี่ในย่าน THz ซึ่งแบ่งการใช้งานได้เป็น 2 ช่วงคือ mmWave Part 2 คือช่วง 275 – 300 GHz และ Far IR Part 1 คือช่วง 0.3 – 3 THz [2] โดยสำหรับย่านความถี่ของ 6G จะมีการใช้งานที่ย่านความถี่สูง ไม่เหมือนกับ 5G ที่มีการใช้งานในช่วงย่านความถี่สูงและความถี่ต่ำร่วมกัน ทำให้การใช้งานในย่านความถี่ 6G ทั้งย่านความถี่ mmWave Part 2 และย่าน Far IR Part 1 เหมาะสำหรับการสื่อสารไร้สายในพื้นที่แบบ Dense Urban ทั้งภายนอกอาคาร ระหว่างอาคาร และภายในอาคาร เช่น บริเวณย่านศูนย์การค้าและศูนย์ประชุมที่ต้องการใช้งานอัตราข้อมูลที่สูง เป็นต้น แต่ย่านความถี่ 6G มีความถี่ที่สูงมากทำให้ระยะส่งสัญญาณได้ไม่ไกลมาก [2], [14]

2.4 อัตราข้อมูลสำหรับการใช้งานในบริการต่าง ๆ ใน Mobile Broadband (MBB)

2.4.1 วิดีโอความละเอียดสูง (Ultra High Definition Video)

จากรายงานของ Cisco Visual Networking Index (VNI) ได้คาดการณ์รูปแบบของกราฟฟิคที่มีการใช้งานปริมาณมากที่สุดภายในปี 2020 คือ Traffic Internet Video และ Internet Protocol Video on Demand (IPVOD) ซึ่งเป็นวิดีโอความละเอียดสูง UHD Video และ VR เป็นจำนวน 71% ของปริมาณกราฟฟิคทั้งหมดที่คาดการณ์ในปี 2020 ดังนั้นอัตราข้อมูลของบริการ UHD จึงมีผลมากที่สุดต่อการคำนวณอัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีสื่อสารเพื่อรองรับการใช้งานบริการนี้ คำนวณได้ดังสมการที่ (1) [15], [16]

$$UHD \text{ Data Rate [Mbps]} = \frac{Resolution \times R_{fm} \times bpp}{Compression \text{ Ratio}} \times Number \text{ of Device} \times Take \text{ Rate} \quad (1)$$

โดยที่

$Resolution[\text{pixel}]$ คือ ความละเอียดของภาพทั้งในมิติความกว้าง และ ความยาวของภาพ

$R_{fm}[\frac{1}{s}]$ คือ อัตราการเปลี่ยนเฟรมหรือเปลี่ยนภาพ ต่อ 1 วินาที

$bpp[\frac{\text{bit}}{\text{pixel}}]$ คือ จำนวน Bit ต่อ Pixel ที่ใช้ในการแสดงผลสีของแต่ละบิต

$Compression \text{ Ratio}$ คือ อัตราส่วนของขนาดไฟล์วิดีโอที่ถูกบีบอัดแล้วต่อขนาดไฟล์ดิบ

$Number \text{ of Device}$ คือ จำนวนของอุปกรณ์ที่กำลังใช้งานบริการนี้

$Take \text{ Rate}$ คือ เปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ใช้พร้อมกันในเวลาหนึ่ง ๆ

2.4.2 Virtual Reality (VR)

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับวิดีโอได้พัฒนาในส่วนของอุปกรณ์ที่สร้างประสบการณ์ใหม่ในการสร้างภาพ 3 มิติ รับชมได้ทุกทิศทาง 360 องศา เรียกว่า Virtual Reality (VR) ซึ่งวิดีโอที่ถ่ายทอดให้ชมภาพเสมือนในอุปกรณ์แสดงผลภาพ เรียกว่า VR 360 จะแสดงผลวิดีโอ 360 องศาทั้งแนวนอน (Horizontal) และ 180 องศาทั้งแนวตั้ง (Vertical) รอบมุมมองของผู้ใช้งานเปรียบเสมือนการส่งวิดีโอเป็นรูปทรงกลมรอบผู้ใช้งาน สามารถคำนวณอัตราข้อมูลของบริการ VR ได้ตามสมการที่ (2) [17], [18]

$$VR \text{ Data Rate [Mbps]} = \frac{2 \times PPD \times H \times PPD \times V \times R_{fm} \times bpp}{Compression \text{ Ratio}} \times Number \text{ of Device} \times Take \text{ Rate} \quad (2)$$

โดยที่

PPD คือ ค่าความละเอียด ต่อ องศาการมองทั้งแนว Horizontal และ Vertical

H คือมุมมองในแนวตั้ง (Degree)

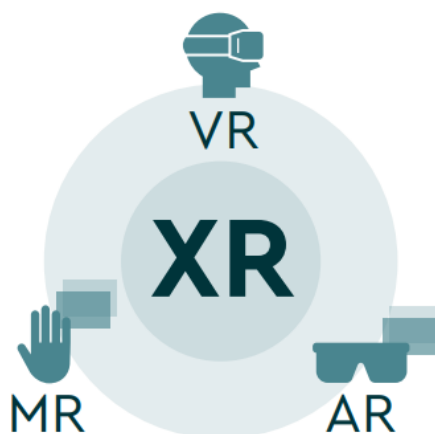
V คือมุมมองในแนวนอน (Degree)

ส่วนค่าพารามิเตอร์ R_{fm} , bpp , $Compression \text{ Ratio}$, $Number \text{ of Device}$, และ $Take \text{ Rate}$ ใช้

ค่าเหมือนกับบริการ UHD

2.4.3 Extended Reality (XR)

Extended Reality (XR) เป็นเทคโนโลยีเสมือนจริงผสมไปยังโลกจริง ซึ่งประกอบด้วย 3 มิติเข้าด้วยกัน โดยเป็นการนำเทคโนโลยี Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) และ Mixed Reality (MR) ดังรูปที่ 3 มารวมกันซึ่งเรียกได้ว่าเป็นการทำให้เกิดโลกเสมือนจริงเกิดขึ้นบนโลกแห่งความเป็นจริงซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจในอนาคต

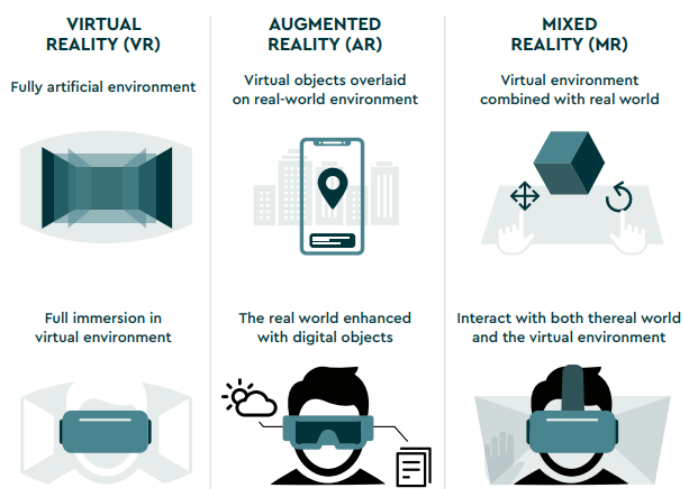


รูปที่ 3 Extended Reality (XR)

Virtual Reality (VR) เป็นเทคโนโลยีที่ทำให้ผู้ใช้ดื่มด่ำกับความเป็นจริงที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยสร้างภาพและเสียงที่เหมือนจริงเพื่อจำลองโลกแห่งความเป็นจริงและสร้างโลกในจินตนาการที่ดึงดูดประสาทสัมผัส (เช่น รูป เสียง) ดังรูปที่ 4

Augmented Reality (AR) เป็นการผสมกันกับโลกจริงและโลกเสมือนด้วยการซ้อนทับเสมือนสิ่งของต่าง ๆ สู่โลกแห่งความจริง ดังรูปที่ 4 ซึ่งแตกต่างจาก VR ที่มาแทนที่โลกเสมือนจริงด้วยคอมพิวเตอร์จำลองโลก AR เปลี่ยนการรับรู้อย่างต่อเนื่องของคน ๆ หนึ่งโลกแห่งความจริง เช่น Pokémon Go และ Snapchat

Mixed Reality (MR) เป็นการผสมของเทคโนโลยี VR และ AR บางครั้งเรียกว่า ไฮบริด ความเป็นจริง MR เป็นการผสมโลกแห่งความจริงเข้ากับโลกเสมือนโลกที่วัตถุจริงและดิจิทัลสามารถอยู่ร่วมกันได้และโต้ตอบกันแบบเรียลไทม์ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะคล้ายกับ AR แต่ MR สามารถวางวัตถุเสมือนไว้เหนือวัตถุของจริง เช่นเดียวกับ VR ที่วัตถุเสมือนจริงสามารถซ้อนทับกับวัตถุจริง ตัวอย่างที่ดีของ MR คือ Microsoft HoloLens [19], [20]



รูปที่ 4 ความแตกต่างของ VR AR และ MR

2.4.3.1 Use Cases สำหรับ XR

1. Streaming เป็นการนำประสบการณ์ที่น่าประทับใจและปรับปรุงประสบการณ์การสตรีมสื่อด้วยความสามารถของ 6 Degrees of Freedom (6DoF) ซึ่ง 6DoF หมายถึง การเคลื่อนที่ของวัตถุเชิงใน 3 มิติ ซึ่งมี 6 องศาอิสระ ประกอบด้วย การเลื่อนตามแนวแกน X, Y และ Z และการหมุนรอบแกน X, Y และ Z ตามลำดับ การนำ 6DoF มาใช้จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถย้ายไปอยู่ในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงและโต้ตอบกับผู้ Streaming ได้ด้วย เช่นการชมการแข่งขันกีฬาหรือคอนเสิร์ต

2. Gaming เมื่อเทคโนโลยี VR เริ่มเข้ามาอุตสาหกรรมเกม ทำให้ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมเกม เมื่อเริ่มใช้เทคโนโลยี XR กับเกมจะส่งผลให้

- 1) ทำให้วัตถุเสมือนจริงดูน่าดึงดูดใจแก่ผู้เล่นและเสริมสร้างสภาพแวดล้อมของเกมที่น่าดึงดูด
- 2) ทำให้ผู้เล่นระยะไกลสามารถเล่นและโต้ตอบในสิ่งเดียวกัน
- 3) ทำให้ผู้เล่นเปลี่ยนตำแหน่งในเกมตามร่างกาย
- 4) ทำให้การเล่นจากพื้นที่สองมิติกลายเป็นสามมิติ

3. Real-Time 3D Communication เทคโนโลยี XR ทำให้อุปสรรคในการสนับสนุนการประชุม หรือ สื่อสารทางไกลได้หายไป เนื่องจากการผสมผสานเทคโนโลยี XR เข้าไปทำให้สามารถสร้างห้องประชุมเสมือนจริง ซึ่งผู้เข้าร่วม (หรืออวตารของผู้เข้าร่วม) สามารถเคลื่อนไหวและโต้ตอบได้กับอีกคนหนึ่งโดยใช้ 6DoF

ตารางที่ 2 แสดง Use Cases สำหรับ XR และ ข้อกำหนด [19]

| XR Service | Data Throughput | | PDB | | RTT | PER | |
|-------------------|-----------------|----------|-----------------------|--------|------|--------------------------|-----------|
| | DL | UL | DL | UL | | DL | UL |
| XR Streaming | 150 Mbps | 300 Mbps | 300 ms | 300 ms | -- | 10^{-5} | 10^{-5} |
| XR Conversational | 50 Mbps | -- | 100 ms ~ 150 ms | -- | -- | 10^1 ~ 10^{-2} | -- |
| XR Gaming | 250 Mbps | 250 Mbps | 2.5 ms | 2.5 ms | 5 ms | 10^{-3} | 10^{-3} |

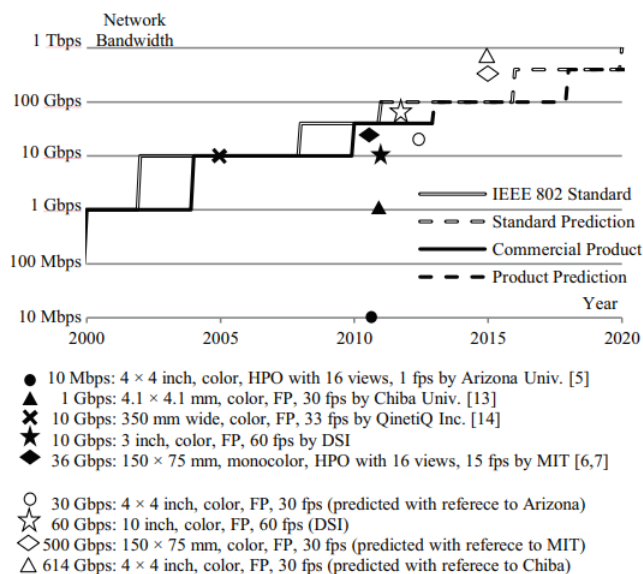
Packet Delay Budget (PDB) ในตารางที่ 2 หมายถึงขีดจำกัดบนของเวลาความล่าช้าระหว่างอุปกรณ์ไร้สาย และ นโยบายและฟังก์ชันบังคับใช้การชาร์จ (Policy and Charging Enforcement Function; PCEF) ซึ่งจำกัดความล่าช้าในการถ่ายโอนแพ็กเก็ตสูงสุด และ ข้อกำหนดที่สำคัญเกี่ยวกับเวลาแฝง

Round Trip Time (RTT) คือข้อกำหนดที่สำคัญเกี่ยวกับเวลาแฝงนอกเหนือจาก PDB ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อคุณภาพของประสบการณ์ (Quality of Experience; QoE) ข้อกำหนดด้านเวลาแฝงจะเพิ่มขึ้นตามไดนามิกและความซับซ้อนในเทคโนโลยี XR

Packet Error Rate (PER) ในตารางที่ 2 คือการวัดความน่าเชื่อถือแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของแพ็กเก็ตแบบ End to End ข้อผิดพลาดที่สังเกตได้ที่ขึ้นในแอปพลิเคชันภายใน PDB ต้องใช้ PER ที่มีความน่าเชื่อถือสูงจะมีค่าอยู่ที่ 10^{-5} สำหรับบริการสตรีมมิ่ง XR [19]

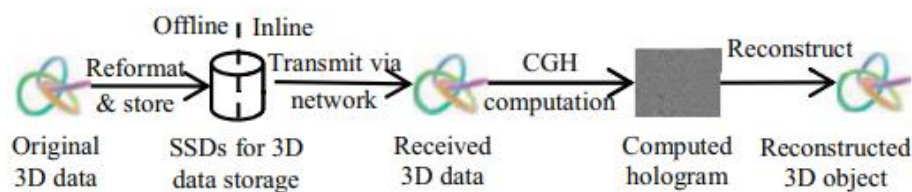
2.4.4 เทคโนโลยี Holographic-Type Communication (HTC)

การส่งผ่านข้อมูลโฮโลแกรมผ่านเครือข่ายบรอดแบนด์จำเป็นต้องมีข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการแสดงผลคือ ขนาดวัตถุ, สี, พารัลแลกซ์ และอัตราการรีเฟรชที่สร้างขึ้นใหม่ โดยผลจากงานวิจัยต่าง ๆ ได้แสดงรายงานผลการวิจัยดังรูปที่ 5 แสดง Bandwidth สำหรับการส่งผ่านข้อมูลโฮโลกราฟิก และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เปรียบเทียบการคาดการณ์ในอนาคตกับมาตรฐานของ IEEE 802 โดย IEEE ได้เข้ามากำหนดมาตรฐานว่าต้องใช้แบนด์วิธเท่าใด เป็นมาตรฐาน IEEE 802 [21]



รูปที่ 5 ข้อกำหนดแบนด์วิธที่เทียบกับมาตรฐาน IEEE 802 และผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ [21]

การลด Bandwidth ในการรับส่งข้อมูลของเครือข่ายคือการส่งข้อมูลวัตถุ 3 มิติแทนโฮโลแกรมที่คำนวณโดยแสดงขั้นตอนในรูปที่ 6 โดยกลุ่ม MIT สาธิตวิธีการนี้โดยจับการเคลื่อนไหวง่ายๆของร่างกายมนุษย์ในแบบ 3 มิติด้วยกล้อง Kinect (640 × 480) ส่งข้อมูลการเคลื่อนไหว 3 มิติผ่านเครือข่ายที่ประมาณ 50 Mbps และสร้างใหม่บนจอแสดงผลโฮโลแกรมระบบที่ 15 fps การเชื่อมโยงกันเฉพาะการเลี้ยวเบน (Diffraction Specific Coherent; DSC) และคำนวณภาพพาโนรามาจากการเคลื่อนไหว 3 มิติที่ได้รับข้อมูลด้วย GPU 3 ตัวในพีซีแบบเรียลไทม์สำหรับ Mark II จอโฮโลแกรม โดยปกติข้อมูลวัตถุ 3 มิติจะมีขนาดเล็กกว่าข้อมูลโฮโลแกรมตัวอย่างเช่น ข้อมูลดิบของวัตถุ 3 มิติแสดงขนาดเป็น กว้าง × ยาว × ความลึก มีขนาด 1920 × 1080 × 50 และสี 24 บิตที่ 60 fps ต้องการ Bandwidth 149.3 Gbps เพราะข้อมูลวัตถุมีความเกี่ยวข้องกันสูงและจุดวัตถุส่วนใหญ่เป็นตำแหน่งที่ว่างสามารถบีบอัดได้ด้วยอัตราส่วนที่สูงเป็นไปได้ 100:1 สิ่งนี้สามารถลดความต้องการ Bandwidth ได้ 1.5 Gbps เนื่องจากการคำนวณ Computer Generated Holograms (CGH) ทำในเครื่องพารามิเตอร์และสามารถตั้งค่าการแก้ไขเฉพาะสำหรับโฮโลแกรมได้ระบบแสดงผลอย่างไรก็ตามการคำนวณโฮโลแกรมในเครื่องต้องใช้การคำนวณ CGH แบบเรียลไทม์ ซึ่งจะใช้ Throughput Data Rate ถึง 9.1 Gbps ในการใช้งานจริง [21] ตัวอย่างการนำโฮโลแกรมมาใช้งานจริงโดยใช้สร้างภาพโฮโลแกรม 3 มิติ บนสาร์ทโฟนดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 Flowchart ของการส่งข้อมูลวัตถุ 3 มิติ [21]



รูปที่ 7 ตัวอย่างการสร้าง Hologram บนสมาร์ทโฟน

2.4.5 อัตราข้อมูลสำหรับบริการอื่น ๆ

นอกจากบริการที่ต้องการความสามารถที่สูง ในด้านแล้วยังมีบริการบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตทั่วไปที่เราใช้งานอยู่แล้วในปัจจุบัน ที่ไม่ต้องพึ่งประสิทธิภาพของโครงข่ายมากนัก อย่างเช่น บริการ Web Browsing มีคำแนะนำเกี่ยวกับอัตราข้อมูลของแต่ละบริการจาก The Federal Communications Commission (FCC) เพื่อใช้ในงานวางแผนโครงข่าย [22] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงอัตราข้อมูลของแต่ละบริการบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ต [22], [23]

| รูปแบบ | user experienced data rate (Mbps) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| บริการท่อง Website | 10 |
| การเล่นเกมออนไลน์แบบมีผู้เล่นคนเดียว | 30 |
| การเล่นเกมออนไลน์แบบมีผู้เล่นหลายคน | 40 |
| Internet of Everything | 100 |
| การดูวิดีโอคุณภาพ 4K | 70 |
| การดูวิดีโอคุณภาพ 8K | 140 |

2.5 การคำนวณอัตราข้อมูลของ 5G-NR

การส่งสัญญาณของอุปกรณ์ 5G มีรูปแบบ Multiplex แบบ Flexible Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Flexible OFDM) ที่มีลักษณะพิเศษคือ Subcarrier Spacing สามารถปรับเปลี่ยนได้หลายค่าขึ้นกับลำดับ Numerology ต่างจาก 4G LTE ที่ค่า Subcarrier Spacing คงที่คือ 15 kHz การคำนวณค่า Subcarrier Spacing เป็นไปตามสมการที่ (3)

$$\Delta f[\text{kHz}] = 2^\mu \cdot 15 \quad (3)$$

โดยที่ μ คือ ค่า Numerology ซึ่งเป็นจำนวนเต็ม มีค่า Subcarrier Spacing และ ช่วงความถี่ที่ใช้ Subcarrier Spacing รายละเอียดตามตารางที่ 4 นอกจากนี้ 3GPP กำหนดค่า Bandwidth ใน 1 Channel ของคลื่นแต่ละความถี่ NR และ Subcarrier Spacing ของคลื่นใน Channel [12] ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 แสดง Subcarrier Spacing ของ ค่า Numerology ที่แตกต่างกัน [12]

| μ | Subcarrier Spacing (kHz) | ช่วงความถี่ |
|-------|--------------------------|---------------|
| 0 | 15 | FR 1 |
| 1 | 30 | FR 1 |
| 2 | 60 | FR 1 และ FR 2 |
| 3 | 120 | FR 2 |
| 4 | 240 | FR 2 |
| 5 | 480 | FR 2 |

ตารางที่ 5 แสดง Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของคลื่น 700 MHz, 2600 MHz และ 26 GHz

| คลื่นความถี่ NR | Subcarrier Spacing | Channel Bandwidth |
|-----------------|--------------------|-----------------------------------|
| 700 MHz (n28) | 15 | 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz |
| | 30 | 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz |
| | 60 | - |
| 2600 MHz (n7) | 15 | 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz |
| | 30 | 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz |
| | 60 | 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz |
| 26 GHz (n258) | 60 | 50 MHz, 100 MHz, 200 MHz |
| | 120 | 50 MHz, 100 MHz, 200 MHz, 400 MHz |

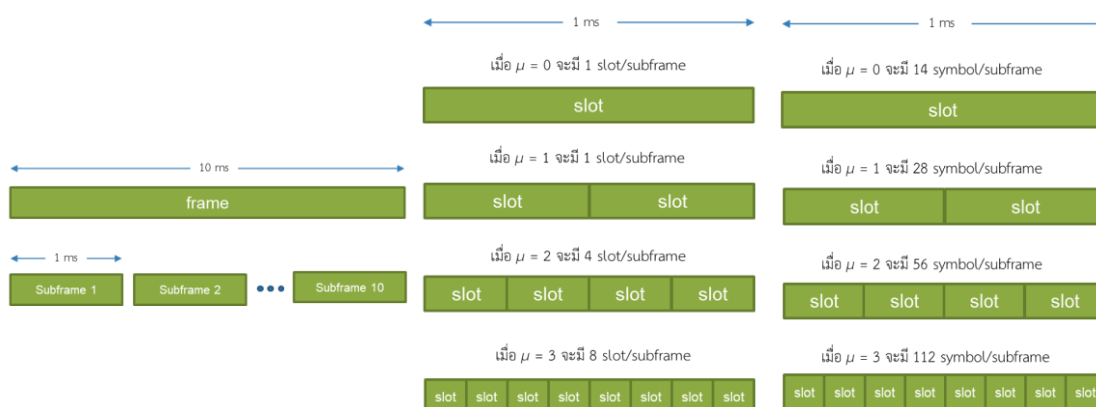
2.5.1 Frame and Subframe

5G-NR ได้มีข้อกำหนดในการส่งข้อมูลต่อ Frame ใช้เวลา 10 ms ซึ่งแต่ละ Frame จะแบ่งได้ 10 Subframe นั่นคือ 1 Subframe ใช้เวลา 1 ms ในแต่ละ Subframe บรรจุ Slot ที่มี 14 Symbol อยู่ภายใน โดยจำนวน Slot ที่บรรจุใน Subframe จะขึ้นกับลำดับ Numerology ดังนั้นจำนวน Symbol ในแต่ละ Subframe [24] และ Symbol Rate ของแต่ละ Subframe จะเป็นไปตามสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\text{Subframe Symbol}[\text{Symbol/Subframe}] = 14 \cdot 2^\mu \quad (4)$$

$$\text{Symbol Rate}[\text{Symbol/s}] = \frac{14 \cdot 2^\mu}{10^{-3}} \quad (5)$$

โดยที่ μ คือ ลำดับ Numerology และสรุปจำนวน Slot และ Symbol ตามลำดับ Numerology ตามรูปที่ 8

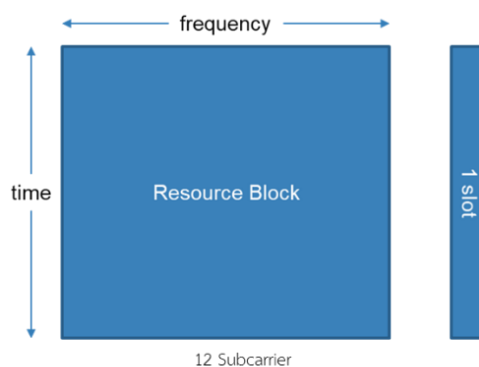


รูปที่ 8 จำนวน Slot และ Symbol ตามลำดับ Numerology

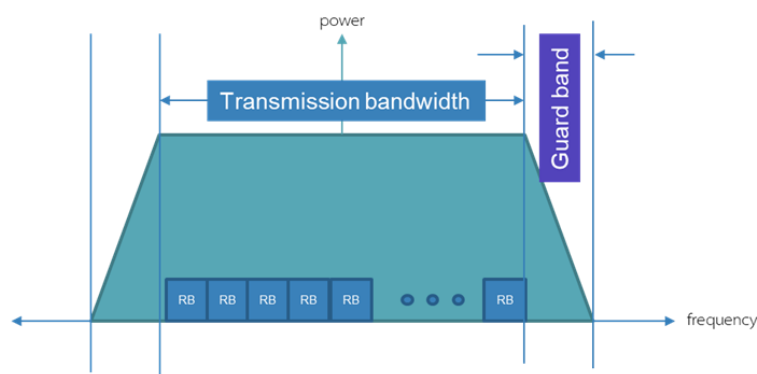
2.5.2 โครงสร้าง Resource Block

ในการส่งข้อมูล 5G-NR ได้กำหนด Block ทางความถี่และทางเวลาขึ้นเรียกว่า Resource Block ในทางความถี่ของ 1 Resource Block จะบรรจุได้ 12 Subcarrier ส่วนในทางเวลา จะบรรจุได้ 1 Time Slot พอดีหรือเรียกได้ว่า บรรจุ 14 Symbol อยู่ภายในเวลา 1 ms แสดงในรูปที่ 9 [24] ซึ่ง Block เหล่านี้แสดงถึงช่องความถี่และเวลาที่แต่บริการในคุณสมบัติของ 5G ใช้ในการรับ - ส่งข้อมูล โดยสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของช่องความถี่และเวลาตามลักษณะการใช้งาน เรียกว่า Flexible NR Framework

จากตารางที่ 7 ค่า Bandwidth ใน 1 Channel ทำให้สามารถหาจำนวน Resource Block ใน 1 Channel Bandwidth ได้โดยนำความกว้าง Bandwidth ใน 1 Channel หักออกด้วย Guard Band ทั้ง 2 ข้างและนำไปหารด้วย มีความกว้างของ Resource แสดงในรูปที่ 10 และสรุปจำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing [12] แสดงในตารางที่ 6 และ 7



รูปที่ 9 มิติ Resource Block



รูปที่ 10 จำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth

ตารางที่ 6 แสดงจำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของ FR1

| Subcarrier Spacing (kHz) | Channel Bandwidth | | | |
|-----------------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
| 15 | 25 RB | 52 RB | 79 RB | 106 RB |
| 30 | 11 RB | 24 RB | 38 RB | 51 RB |
| 60 | - | 11 RB | 18 RB | 24 RB |

ตารางที่ 7 แสดงจำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของ FR2

| Subcarrier Spacing (kHz) | Channel Bandwidth | | | |
|-----------------------------|-------------------|---------|---------|---------|
| | 50 MHz | 100 MHz | 200 MHz | 400 MHz |
| 60 | 66 RB | 132 RB | 264 RB | - |
| 120 | 32 RB | 66 RB | 38 RB | 264 RB |

การคำนวณ Symbol Rate ของ 5G-NR ใน 1 Channel Bandwidth จะอาศัยจากจำนวน Symbol ทั้งหมดที่อยู่ภายใน Resource Block ในเวลา 1 Time Slot (1 ms) เป็นไปตามสมการที่ (6)

$$5G \text{ Symbol Rate} = \frac{12 \cdot N_{PRB}^{BW(j), \mu} \cdot 14 \cdot 2^\mu}{10^{-3}} \quad (6)$$

ดังนั้นการคำนวณอัตราข้อมูลของ 5G-NR ใน 1 Channel Bandwidth จะคำนวณจาก Symbol Rate แล้วแปลงให้เห็นเป็น Bit Rate โดยการคูณด้วย Modulation Order นอกจากนั้น ยังต้องพิจารณา ค่าพารามิเตอร์อื่นอีกเช่น อัตรารหัส LDPC ในการทำ Forward Error Correction [25] ค่าพารามิเตอร์ของ MIMO เช่น ค่า Scaling Factor ซึ่งบ่งบอกว่าประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของสถานีฐาน ค่า Layer ของ MIMO และการตัดส่วนของ Overhead ออก เพื่อใช้ในการคำนวณ Throughput สูงสุดที่สามารถรับ - ส่งได้ของสถานีฐานและอุปกรณ์สื่อสาร [26] เป็นไปตามสมการที่ (7)

$$5G \text{ Data Rate [Mbps]} = 10^{-6} \sum_{j=1}^J (V^{(j)} Q^{(j)} f^{(j)} R_{max} \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu}}{T_s^\mu} (1 - OH^{(j)})) \quad (7)$$

โดยที่

T_s^μ เป็นส่วนกลับของค่า Symbol Rate ใน 1 Time Slot มีค่า $T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14.2\mu}$

J คือ จำนวนของ Carrier ที่ใช้ส่งข้อมูล

μ คือ ลำดับ Numerology

$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ คือจำนวน Resource Block ในแต่ละ Channel Bandwidth

$Q^{(j)}$ คือ จำนวน Bit/Symbol

R_{max} คือ อัตรารหัส LDPC ที่สูงที่สุด มีค่า 948/1024

$f^{(j)}$ คือ Scaling Factor ตามคำแนะนำจากมาตรฐาน Release 15 กำหนดเป็น 1, 0.8, 0.75 และ 0.4

$V^{(j)}$ คือ จำนวนของ Layer ของการส่งสัญญาณจากเสาอากาศไปยังอุปกรณ์สื่อสาร

$OH^{(j)}$ คือ เปอร์เซ็นต์ของส่วน Overhead ในเฟรม

ในประเทศไทยได้มีการกำหนดอัตราส่วนของการรับ - ส่งข้อมูลโดย กสทช. ซึ่งกำหนดอัตราส่วน Downlink : Uplink ไม่เกิน 8 : 2 [27] ทำให้ได้อัตราข้อมูลสำหรับรับ - ส่งข้อมูลเป็นไปตามสมการที่ (8) และ (9)

$$\text{Downlink Data Rate} = 5G \text{ Data Rate [Mbps]} \times \frac{\text{Downlink}}{\text{Downlink} + \text{Uplink}} \quad (8)$$

$$\text{Uplink Data Rate} = 5G \text{ Data Rate [Mbps]} \times \frac{\text{Uplink}}{\text{Downlink} + \text{Uplink}} \quad (9)$$

2.6 Link Power Budget

ในการประมาณพื้นที่ให้บริการต้องพิจารณาถึงลักษณะพื้นที่และคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นต่าง ๆ โดยอาศัยสมการของ Link Power Budget เพื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับ โดยค่ากำลังที่สูญเสียทั้งหมด (Total Path Loss; L_d) ในหน่วย [dB] ที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ สามารถถูกแสดงได้โดยง่ายดังสมการที่ (10) [28]

$$L_d = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - S_{Rx} - Losses \quad (10)$$

โดยที่

P_{Tx} [dBm] คือ กำลังส่งสัญญาณ

S_{Rx} [dBm] คือ กำลังของสัญญาณที่น้อยที่สุดที่เครื่องรับสัญญาณรับได้

G_{Tx} [dB] คือ Gain ของสายอากาศส่ง

G_{Rx} [dB] คือ Gain ของสายอากาศรับ

$Losses$ [dB] คือ กำลังสูญเสียเพิ่มเติมจากปัจจัยต่าง ๆ รวมถึง Margin ที่เผื่อไว้ให้การสื่อสารสัญญาณ

2.7 Receiver Sensitivity

เงื่อนไขในการส่งสัญญาณที่สำคัญ คือ สัญญาณเมื่อถึงเครื่องรับสัญญาณต้องมีกำลังมากกว่า Receiver Sensitivity โดยที่ Receiver Sensitivity (S_{Rx}) ในหน่วย [dBm] คือ กำลังของสัญญาณที่น้อยที่สุดที่เครื่องรับสัญญาณรับได้แล้ว ได้อัตราข้อมูล 95% ของอัตราข้อมูลที่สูงที่สุดที่ช่องสัญญาณรับได้ คำนวณได้จากสมการที่ (11) [29]

$$S_{Rx} = -174 + N_F + 10\log(BW) + SINR \quad (11)$$

โดยที่

N_F [dB] คือ ค่า Noise Figure ของตัวรับสัญญาณ

BW [Hz] คือ แบนด์วิดท์ที่ใช้รับสัญญาณ

$SINR$ [dB] คือ Signal to Noise Ratio

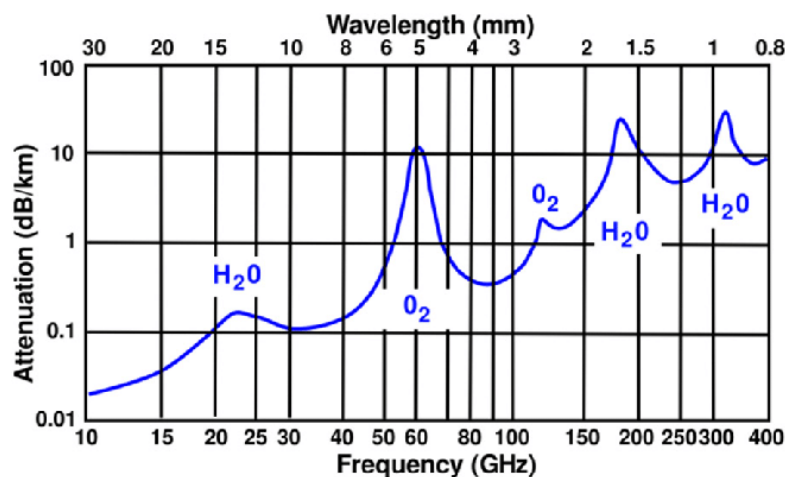
2.8 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Link Power Budget

Total Path Loss ที่ถูกกล่าวถึงก่อนหน้านี้สามารถปรับปรุงเพิ่มเติมให้เหมาะสมกับ Losses จริงในทางปฏิบัติและเพื่อให้เหมาะสมกับประสิทธิภาพการใช้งานจริง ปัจจัยต่อไปนี้ ล้วนแล้วแต่ขึ้นอยู่กับความถี่เป็นส่วนใหญ่ ด้วยเหตุนี้จึงควรนำมาวิเคราะห์สำหรับการใช้งาน

2.8.1 Propagation Loss หรือ Air Loss

Propagation Loss อันเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นผ่านอากาศระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและรับสัญญาณโดยไม่มีการกีดขวางทางกายภาพใด ๆ เป็นผลมาจากการลดทอนจากบรรยากาศ (การดูดกลืนกำลังโดยออกซิเจนและไอน้ำ) และการลดทอนโดยฝนและหมอก [30]

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกดูดกลืนในบรรยากาศซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ด้วยเช่นกัน สารประกอบ 2 ชนิดที่ดูดซึมสัญญาณเป็นพิเศษคือ ออกซิเจน (O_2) และไอน้ำ (H_2O) การดูดซึมสัญญาณจะสูงขึ้นเป็นยอดด้วยความถี่บางความถี่ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การสูญเสียจากการถูกดูดกลืนในบรรยากาศกับความถี่

2.8.2 Rain Attenuation

ฝนและไอน้ำเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้กำลังส่งของสัญญาณที่มีความถี่มากกว่า 10 GHz ถูกดูดกลืน เพราะขนาดของเม็ดฝนมีค่าใกล้เคียงกับขนาดความยาวคลื่น โดยในย่านความถี่ FR2 ค่า Rain Attenuation [31] สามารถประมาณได้ตามสมการที่ (12)

$$A = aR_R^b \quad (12)$$

โดยที่ CHULALONGKORN UNIVERSITY

A [dB/km] คือ Rain Attenuation

R_R [mm/hr] คือ ปริมาณน้ำฝน

a และ b เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ [32] ดังสมการ (13) – (15) ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

สำหรับ $2.9 \text{ GHz} < f < 54 \text{ GHz}$

$$a = 4.21 \times 10^{-5} f^{2.42} \quad (13)$$

สำหรับ $8.5 \text{ GHz} < f < 25 \text{ GHz}$

$$b = 1.41 f^{-0.0779} \quad (14)$$

สำหรับ $25 \text{ GHz} < f < 164 \text{ GHz}$

$$b = 2063 f^{-0.272} \quad (15)$$

2.8.3 Penetration Loss

Penetration Loss [28] คือ การสูญเสียกำลังจากการที่คลื่นทะลุผ่านสิ่งกีดขวางในระหว่างการส่งจากเครื่องส่งไปเครื่องรับ ซึ่งการสูญเสียจะขึ้นกับชนิดของวัสดุ และความถี่ของสัญญาณ สามารถคำนวณ Penetration Loss ได้ 2 กรณี คือ กรณีที่มีการสูญเสียต่ำ มักนิยมใช้กับสิ่งก่อสร้างที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่ไม่ทำให้สัญญาณลดทอนมากนัก เช่น ไม้และกระจก Penetration Loss ($PL_{tw,low\ loss}$) ในกรณีนี้ คำนวณได้จากสมการที่ (16)

$$PL_{tw,low\ loss}[dB] = 5 - 10 \log \left(0.3 \cdot 10^{\frac{-L_{glass}}{10}} + 0.7 \cdot 10^{\frac{-L_{wood}}{10}} \right) \quad (16)$$

อีกกรณี คือ กรณีที่มีการสูญเสียสูง โดยสิ่งก่อสร้างในเขตชุมชนเมืองออกแบบให้มีความแข็งแรงสูง จึงใช้วัสดุประเภทคอนกรีตหนาและกระจกทึบแสง ซึ่งเกิดการลดทอนสัญญาณมาก Penetration Loss ($PL_{tw,high\ loss}$) ในกรณีนี้ คำนวณได้จากสมการที่ (17)

$$PL_{tw,high\ loss}[dB] = 5 - 10 \log \left(0.7 \cdot 10^{\frac{-L_{HRglass}}{10}} + 0.3 \cdot 10^{\frac{-L_{concrete}}{10}} \right) \quad (17)$$

2.9 Transmission Power และ Antenna Gain

Transmit Power คือ กำลังส่งของตัวส่งสัญญาณในสถานียุคก่อนเชื่อมต่อกับเสาอากาศ ตามมาตรฐานจาก 3GPP Release 15 สามารถแบ่ง Class ของสถานียุคได้ 3 Class ได้แก่ สถานีฐานระยะไกล (Wide Area Base Stations) สถานีฐานระยะไกลปานกลาง (Medium Range Base Stations) และสถานีฐานระยะใกล้ (Local Area Base Stations) มีกำลังส่งสูงสุดดังตารางที่ 8 [12]

ตารางที่ 8 แสดงกำลังส่งสูงสุดของสถานียุคแต่ละ Class

| Base Station Class | กำลังส่งสูงสุด (dBm) |
|--------------------|-------------------------------------|
| Wide Area BS | ไม่ได้กำหนด ตามแต่กฎหมายแต่ละประเทศ |
| Medium Range BS | 38 |
| Local Area BS | 24 |

Antenna Gain คือ กำลังขยายของเสาอากาศของอุปกรณ์ทั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณและรับสัญญาณ ซึ่งเทคโนโลยีใช้เสาส่งสัญญาณแบบ Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) โดยเพิ่ม Element บนเสาอากาศเพื่อสามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงขึ้น และสามารถทำ Beam Scanning ได้เพื่อสแกนหาพิกัดของอุปกรณ์และส่งสามารถสัญญาณให้อุปกรณ์แต่ละตำแหน่ง ดังนั้นวิธีนี้ทำให้สามารถใช้ Bandwidth เต็มที่และใช้ได้ตลอดเวลา เรียกว่า Space Division Multiple Access (SDMA)

สำหรับขีดจำกัดกำลังส่งและอัตราขยาย รวมถึงความสูงจากพื้นดินของสถานีฐานตามพื้นที่ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการคำนวณจะอ้างอิงจากประกาศ กสทช. เรื่อง หลักเกณฑ์การอนุญาตและการกำกับดูแลให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นใช้คลื่นความถี่ได้กำหนดและที่ติดตั้งในประเทศไทย [33] ไว้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงหลักเกณฑ์กำลังส่ง อัตราขยาย และความสูงจากพื้นดินของสถานีฐาน

| ตำแหน่งที่ติดตั้ง | กำลังส่ง | อัตราขยาย สายอากาศ | ความสูงจาก พื้นดิน |
|--|--------------|-----------------------|-----------------------|
| กรุงเทพมหานคร และองค์การบริหารส่วนจังหวัด | ไม่เกิน 60 W | ไม่เกิน 6 dBd | ไม่เกิน 60 m |
| เทศบาลนคร เทศบาลเมือง และเมืองพัทยา | ไม่เกิน 30 W | ไม่เกิน 6 dBd | ไม่เกิน 60 m |
| เทศบาลตำบล องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น | ไม่เกิน 10 W | ไม่เกิน 6 dBd | ไม่เกิน 60 m |

2.10 การคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 5G

3GPP Release 15 ได้กำหนดแบบจำลองสำหรับคำนวณในแต่ละ Terrain แบ่งออกเป็น

1. Urban Macro (UMa) คือ พื้นที่ให้บริการที่ครอบคลุมเขตชุมชนเมืองขนาดใหญ่ที่ต้องติดตั้งสถานีฐานขนาดใหญ่ให้ระยะครอบคลุมสถานีฐานต่อเนื่องกันในลักษณะ Cellular แนะนำให้ระยะห่างระหว่างสถานีฐานประมาณ 500 m และสายอากาศสูงจากพื้นประมาณ 25 m

2. Urban Micro Street Canyon (UMi) คือ พื้นที่ให้บริการที่มีระยะครอบคลุมสถานีฐานครอบคลุมเขตชุมชนเมือง สถานีฐานที่ให้บริการในพื้นที่นี้จะมีขนาดเล็กกว่า UMa ครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า UMa ระยะห่างระหว่างสถานีฐานประมาณ 200 m และสายอากาศมีความสูงจากพื้นประมาณ 10 m

3. Indoor Hotspot (InH) คือ คือ พื้นที่ให้บริการครอบคลุมพื้นที่ขนาดเล็กที่ต้องการอัตราข้อมูลที่สูง หรือ มีผู้ใช้บริการหนาแน่นภายในอาคาร

3GPP Release 15 มีสมการเพื่อใช้คำนวณ Total Path Loss และระยะครอบคลุมสถานีฐาน โดยแสดงผลเป็นรัศมีของสถานีฐาน (Cell Radius) ในแต่ละ Terrain ดังกล่าวที่เหมาะสม [28]

ซึ่งตารางที่ 10 แสดงสมการการหาค่า Total Path Loss ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นนำสมการมาจัดรูปใหม่เพื่อนำไปคำนวณหาค่า Cell Radius ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 10 แสดงสมการ Total Path Loss ในแต่ละพื้นที่

| พื้นที่ | กรณี | สมการ Total Path Loss [dB] |
|------------|------|---|
| UMa | LOS | กรณีแรก $10 \text{ m} \leq D_{2D} \leq D_{BP}'$ จะได้ $L_d[\text{dB}] = 28.0 + 22 \log(D_{2D}) + 20 \log(f_c) \quad (18)$ กรณีที่สอง $D_{BP}' \leq D_{2D} \leq 10 \text{ km}$ $L_d[\text{dB}] = 28.0 + 40 \log(D_{2D}) + 20 \log(f_c) - 9 \log((D_{BP}')^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \quad (19)$ |
| | NLOS | $L_d[\text{dB}] = 13.54 + 39.08 \log(D_{2D}) + 20 \log(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5) \quad (20)$ |
| UMi | LOS | กรณีแรก $10 \text{ m} \leq D_{2D} \leq D_{BP}'$ $L_d[\text{dB}] = 32.4 + 21 \log(D_{2D}) + 20 \log(f_c) \quad (21)$ กรณีที่สอง $D_{BP}' \leq D_{2D} \leq 10 \text{ km}$ $L_d[\text{dB}] = 32.4 + 40 \log(D_{2D}) + 20 \log(f_c) - 9.5 \log((D_{BP}')^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \quad (22)$ |
| | NLOS | $L_d[\text{dB}] = 22.4 + 35.3 \log(D_{2D}) + 21.3 \log(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5) \quad (23)$ |
| InH-Office | LOS | $L_d[\text{dB}] = 32.4 + 17.3 \log(D_{2D}) + 20 \log(f_c) \quad (24)$ |
| | NLOS | $L_d[\text{dB}] = 32.4 + 31.9 \log(D_{2D}) + 20 \log(f_c) \quad (25)$ |

ตารางที่ 11 แสดงสมการ Cell Radius ในแต่ละพื้นที่

| พื้นที่ | กรณี | สมการ Cell Radius [m] |
|------------|------|---|
| UMa | LOS | $D_{2D\ UMa-LOS2}[m] = 10^{\frac{L_d}{40}-0.7} \cdot \frac{((D_{BP}')^2 + (h_{BS}-h_{UT})^2)^{0.225}}{\sqrt{f_c}} \quad (26)$ |
| | NLOS | $D_{2D\ UMa-NLOS}[m] = \frac{10^{\frac{L_d}{39.08}-0.3464+0.0153(h_{UT}-1.5)}}{f_c^{0.5117}} \quad (27)$ |
| UMi | LOS | $D_{2D\ UMi-LOS2}[m] = 10^{\frac{L_d}{40}-0.81} \cdot \frac{((D_{BP}')^2 + (h_{BS}-h_{UT})^2)^{0.2375}}{\sqrt{f_c}} \quad (28)$ |
| | NLOS | $D_{2D\ UMi-NLOS}[m] = \frac{10^{\frac{L_d}{35.3}-0.6345+0.0085(h_{UT}-1.5)}}{f_c^{0.6034}} \quad (29)$ |
| InH-Office | LOS | $D_{2D\ InH-LOS}[m] = \frac{10^{\frac{L_d}{17.3}-1.873}}{f_c^{1.156}} \quad (30)$ |
| | NLOS | $D_{2D\ InH-NLOS}[m] = \frac{10^{\frac{L_d}{31.9}-1.016}}{f_c^{0.6269}} \quad (31)$ |

โดยที่

D_{2D} คือ ระยะทางจากเครื่องส่ง

D_{BP}' คือ ระยะทางจากเครื่องส่งไปที่ Breaking Point ของ UMa คำนวณได้จากสมการที่ (32)

$$D_{BP}' = \frac{2\pi(h_{BS}-1)(h_{UT}-1)f_c}{c} \quad (32)$$

f_c คือ ค่าความถี่คลื่นพาห์ [Hz]

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

h_{BS} คือ ความสูงของสถานีฐาน โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 25 m

h_{UT} คือ ความสูงของ User Equipment (UE) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.5 m

การคำนวณ Cell Radius จะใช้ L_d จากสมการที่ (8) เนื่องจากการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานต้องคำนึงถึงกำลังที่สูญเสียทั้งหมดที่สามารถส่งแล้วเครื่องรับยังสามารถรับสัญญาณได้

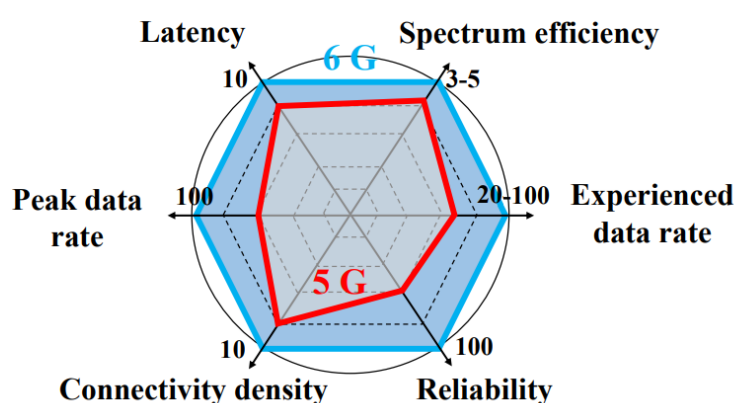
ใน 3GPP Release 15 ยังได้กำหนด Shadow Fading Margin ในแต่ละ Terrain ซึ่งคือ UMa UMi และ InH ไว้ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดง Shadow Fading Margin ในแต่ละ Terrain

| Terrain | LOS Shadow Fading Margin [dB] | NLOS Shadow Fading Margin [dB] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Urban Macro (UMa) | 4 | 6 |
| Urban Micro Street Canyon (UMi) | 4 | 7.82 |
| Indoor Hotspot (InH) LOS | 3 | 8.29 |

2.11 อัตราข้อมูลของ 6G

อัตราข้อมูลสำหรับ 6G คาดว่าจะมีอัตราข้อมูลสูงถึง 1 Tbps ซึ่งเป็นอัตราข้อมูลที่สูงกว่าของ 5G อยู่ถึง 10 เท่า ซึ่งใน 5G มีอัตราข้อมูลของ Downlink อยู่ที่ 20 Gbps และ Uplink อยู่ที่ 10 Gbps ซึ่งใน 6G ได้นำย่านความถี่ THz เข้ามาใช้จึงทำให้สามารถพัฒนาทางด้านการส่งข้อมูลได้สูงกว่า 5G ถึงหลายเท่า นอกจากทางด้านการอัตราข้อมูลแล้ว 6G ยังเหนือกว่า 5G ในอีกหลาย ๆ ด้าน เช่น Latency, Spectrum Efficiency, Connectivity Density และ Reliability [1], [34] ดังรูปที่ 12 และตารางที่ 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านต่าง ๆ ทางด้าน 5G และ 6G การใช้งานความถี่ย่าน THz เหมาะกับการใช้งานสำหรับ Use Cases ที่ต้องการใช้อัตราข้อมูลที่สูงเช่น Holographic-Type Communication (HTC), Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) และ Extended Reality (XR) เป็นต้น แต่ยังมีข้อจำกัดทางด้านระยะในการส่งข้อมูลเนื่องจากความถี่ที่สูงทำให้ไม่สามารถส่งได้ในระยะที่ไกลมากนัก เป็นผลมาจากการสูญเสียเชิงวิถี



รูปที่ 12 เปรียบเทียบข้อจำกัดทางประสิทธิภาพต่าง ๆ ของ 6G และ 5G [34]

ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบข้อจำกัดทางประสิทธิภาพต่าง ๆ ของ 6G และ 5G [34]

| Performance Requirements | Peak Data Rate | Experienced Data Rate | Latency | Reliability | Spectrum Efficiency | Connectivity Density |
|--------------------------|----------------|-----------------------|---------|-------------|---------------------|------------------------------------|
| 5G | 0.01 Tbit/s | 0.1-0.5 Gbit/s | 1 ms | 99.999% | 30 bps/Hz | 10^2 devices /100 m ² |
| 6G | 1 Tbit/s | 10 Gbit/s | 0.1 ms | 99.99999% | 100 bps/Hz | 10^3 devices /100 m ² |

2.12 ระยะเวลาครอบคลุมสถานีฐานของ 6G

6G ได้กำหนดแนวคิดทางด้านระยะครอบคลุมสถานีฐานให้ไปไกลกว่าเดิมที่สามารถทำได้ โดยการปรับใช้ 6G เริ่มภายในปี 2030 6G จะเข้ามาขับเคลื่อนการสื่อสารโทรคมนาคม โดยคาดว่าจะเสนอให้มีบริการที่สามารถครอบคลุมการใช้งานในทุกพื้นที่ เช่น พื้นที่อยู่อาศัย มหาสมุทร และ อวกาศ จะเป็นการลดความเหลื่อมล้ำทางดิจิทัลด้วยการที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้ โอกาสทางธุรกิจที่สูงขึ้นในทุกส่วนของโลกรองรับการเติบโตอย่างต่อเนื่องในผู้ให้บริการท้องถิ่นและเปิดตัวบริการที่จำทำให้ง่ายขึ้น เช่น ความปลอดภัย และสวัสดิการขั้นพื้นฐานแห่งรัฐ เป็นต้น [23], [35] โดยแบ่งการใช้งานตาม Use Cases แต่ละประเภทและระยะครอบคลุมสถานีฐานตามการใช้งานใน 6G จะใช้งานใน 2 ช่วงคือ 30-300 GHz และ 0.3-30 THz [36] ดังตารางที่ 14 เช่น Backhaul /Fronthaul จะมีระยะครอบคลุมที่คาดหวัง 100 m ที่ความถี่ $W1 = 325\text{-}372$ GHz โดยมี Loss ทั้งหมด 22 dB ประกอบด้วย Propagation Loss, Atmospheric Attenuation, Rain/Snow Attenuation และ Cloud/Fog Attenuation WLAN จะมีระยะครอบคลุมที่คาดหวัง 10 m ที่ความถี่ $W2 = 390\text{-}436$ GHz โดยมี Loss ทั้งหมด 1.6 dB ประกอบด้วย Propagation Loss และ Atmospheric Attenuation และ V2X จะมีระยะครอบคลุมที่คาดหวัง 20 m ที่ความถี่ $W1 = 325\text{-}372$ GHz โดยมี Loss ทั้งหมด 1.6 dB ประกอบด้วย Propagation Loss, Atmospheric Attenuation, Rain/Snow Attenuation และ Cloud/Fog Attenuation

ตารางที่ 14 Losses และระยะครอบคลุมสถานีฐานโดยแบ่งการใช้งานตาม
Use Cases ต่าง ๆ [35]

| Use Cases/Application | Propagation Phenomena | Expected Ranges | Losses (dB) | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | Propagation Loss Atmospheric Attenuation Rain/Snow Attenuation Cloud/Fog Attenuation | | W1 = [325-372] GHz | W2 = [390-436] GHz | W3 = [457-495] GHz | W4 = [645-690] GHz | W5 = [827-888] GHz | W6 = [920-962] GHz | W7 = [998-1070] GHz | W8 = [1245-1320] GHz | W9 = [1325-1390] GHz | W10 = [1442-1583] GHz |
| Intra-Device | ● ● ○ ○ | 0.3 m | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.19 | 0.23 | 0.21 | 0.20 |
| Kiosk/Desktop | ● ● ○ ○ | 1 m | 0.16 | 0.17 | 0.23 | 0.24 | 0.24 | 0.36 | 0.65 | 0.75 | 0.69 | 0.66 |
| WLAN | ● ● ○ ○ | 10 m | 1.6 | 1.7 | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 3.5 | 6.5 | 7.5 | 6.9 | 6.6 |
| Data Center | ● ● ○ ○ | 20 m | 3.2 | 3.4 | 4.6 | 4.8 | 4.8 | 7 | 13 | 15 | 13.8 | 13.2 |
| V2X | ● ● ● ● | 20 m | 3.67 | 3.96 | 5.15 | 5.46 | 5.54 | 7 | 13 | 15 | 13.8 | 13.1 |
| HST | ● ● ● ● | 30 m | 5.5 | 5.9 | 7.7 | 8.2 | 8.3 | 10.6 | 19.5 | 22.6 | 20.6 | 19.7 |
| Backhaul/Fronthaul | ● ● ● ● | 120 m | 22 | 23.8 | 30.9 | 32.8 | 33.2 | 42 | 78 | 90 | 82.8 | 78.6 |

2.13 การ Migration จาก 5G ไปสู่ 6G

การ Migration จาก 5G เป็น 6G หมายถึงการเปลี่ยนผ่านจากเทคโนโลยี 5G ในปัจจุบัน ไปสู่เทคโนโลยี 6G ที่กำลังจะมาถึง การพัฒนา 6G ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น โดยคาดว่าจะให้อัตราข้อมูลที่สูงถึง 1Tbps และ Low Latency เมื่อเทียบกับ 5G การเปลี่ยนผ่านจาก 5G ไปสู่ 6G จะต้องมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน อุปกรณ์ และเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่สามารถรองรับความสามารถของ 6G

ประเด็นสำคัญประการหนึ่งสำหรับการพัฒนา 6G คือการใช้งานคลื่นความถี่ใหม่ ในย่าน THz ซึ่งสามารถรองรับอัตราข้อมูลที่สูงกว่ามาก เช่น การสตรีมวิดีโอความละเอียดสูงพิเศษ และเทคโนโลยีไฮโลแกรม สิ่งสำคัญอีกประการของการพัฒนา 6G คือการนำเทคโนโลยีใหม่เข้ามาใช้ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และ Machine Learning ซึ่งจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของเครือข่าย [37]

การเริ่มต้นในยุค 6G นั้นจะใช้งานโครงข่ายแบบ Non-Standalone [5], [6] ซึ่งเป็นการปรับใช้เครือข่าย 6G ให้ใช้งานผ่าน Core Network ของเครือข่าย 5G ที่มีอยู่ โดยเครือข่าย 5G จะทำหน้าที่ Core Network สำหรับเครือข่าย 6G การปรับใช้โครงข่ายแบบ Non-Standalone ช่วยให้การใช้งานในเทคโนโลยี 6G ได้เร็วขึ้น และประหยัดต้นทุนกว่าการเริ่มใช้ 6G ในแบบ Standalone

หลังจากเข้าสู่ยุค 6G อย่างสมบูรณ์จะเริ่มปรับเป็นการใช้งานโครงข่ายแบบ Standalone หมายถึงการปรับใช้เครือข่าย 6G โดยไม่ขึ้นกับ Core Network ของเครือข่าย 5G ในกรณีนี้เครือข่าย

6G จะทำหน้าที่เป็นผู้ให้บริการทั้งหมดโดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีเครือข่ายก่อนหน้านี้ ตัวเลือกการปรับใช้โครงข่ายแบบ Standalone ต้องใช้การลงทุนที่สูง แต่ส่งผลทำให้สามารถใช้ศักยภาพของเทคโนโลยี 6G ได้อย่างเต็มที่ [37] ซึ่งเหมาะกับพื้นที่แบบ Dense Urban และต้องการใช้อัตราข้อมูลในปริมาณสูงสามารถปรับใช้ 6G แบบ Standalone ได้โดยติดตั้งสถานีฐานแบบ Cell Free [38] ส่วนพื้นที่ที่ยังไม่ต้องการใช้งานอัตราข้อมูลในปริมาณที่สูงมากนักสามารถใช้สถานีฐานของ 5G ร่วมกับ 6G ได้โดยให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการและสามารถใช้งานอัตราข้อมูลได้อย่างเพียงพอ

การปรับใช้ทั้งโครงข่ายแบบ Standalone และ Non-Standalone มีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสถานการณ์ในการใช้งาน แต่การปรับใช้โครงข่ายแบบ Standalone เหมาะสำหรับในพื้นที่ ที่ต้องการใช้งานปริมาณอัตราข้อมูลที่สูง และพื้นที่ไม่กว้างมากนัก เช่น ภายในพื้นที่ศูนย์การค้า ศูนย์ประชุม มหาวิทยาลัย เป็นต้น [35], [37] ซึ่งจะทำให้สามารถใช้งานศักยภาพของเทคโนโลยี 6G ได้อย่างเต็มที่



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานและผลลัพธ์ของงานวิจัย

3.1 การคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G

การคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีที่ออกแบบมาสำหรับการคำนวณ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการคำนวณดังนี้ จากสมการคำนวณอัตราข้อมูลของ 5G เป็นไปตามสมการที่ (7) - (9) จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ได้อัตราข้อมูลที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลมาจากค่า Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากความถี่ ถ้าความถี่สูงขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าเหล่านี้สามารถสูงขึ้นได้ตาม ซึ่งใน 6G จะใช้งานความถี่ในย่าน THz ทำให้สามารถได้ค่า Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing สูงขึ้นได้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ความถี่ที่ 325 GHz [39] เนื่องจากเป็นความถี่ที่ใช้ใน 6G ที่อยู่ในย่าน THz และเป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดในการใช้งานที่มี Use Cases นำไปใช้งานดังตารางที่ 14 โดยมีค่า Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ดังตารางที่ 15 [39] ส่วนพารามิเตอร์ Ratio Downlink:Uplink, Modulation Scheme, MIMO Layer และ Scaling Factor ยังใช้ตามในของการคำนวณอัตราข้อมูลของ 5G

ตารางที่ 15 แสดง Channel Bandwidth และ Subcarrier Spacing ของคลื่น 325 GHz [39]

| คลื่นความถี่ | Subcarrier Spacing | Channel Bandwidth |
|--------------|--------------------|-------------------|
| 325 GHz | 120 kHz | 400 MHz, 1 GHz |
| | 240 kHz | 400 MHz, 1 GHz |

3.2 ผลตัวอย่างการคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G

จากข้อเสนอวิธีการคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G ได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 13 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G ตามตารางที่ 16 ได้ผลการคำนวณอัตราข้อมูลสูงสุดของ 6G คือ 1.10 Tbps โดยแบ่งเป็น Downlink 0.87 Tbps และ Uplink 0.23 Tbps ซึ่งจากผลการคำนวณได้ผลลัพธ์ตามที่คาดหวังในการใช้งานสำหรับเทคโนโลยี 6G

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G

| Carrier Frequency | SCS & BW | Modulation Scheme |
|-------------------|----------------|-------------------|
| 325 GHz | 240 kHz, 1 GHz | 256QAM |

Cell Name: 6G : 325 GHz

| | | | | |
|------------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------------|---|
| Band mmWave part2 : 32... | Channel Spacing 240 KHz | Numerology 5 | Bandwidth 1 GHz | Ratio Downlink-Uplink 8 : 2 |
| Modulation Scheme 256QAM | MIMO Layer 8 | Scaling Factor 1 | LDPC Code Rate 0.92578125 | Downlink-Uplink Overhead 0.14 and 0.08 |

Download Throughput: 870643.2 Mbps Upload Throughput: 238896 Mbps Show Cell Data rate Reset Value

รูปที่ 13 ผลการคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G

3.3 การคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G

การคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานสำหรับ 6G ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เสนอวิธีการคำนวณ ดังนี้ จากวิธีคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานตามตารางที่ 11 ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อระยะครอบคลุมสถานีฐานที่แตกต่างกันระหว่าง 5G และ 6G คือ Loss ซึ่งใน 5G จะใช้การคำนวณ Loss ที่ส่งผลตามหัวข้อที่ 2.8 ส่วนของ 6G ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า Loss ตามตารางที่ 14 แทนซึ่ง ค่า Loss จะขึ้นกับความถี่ ในส่วนของ 6G ยังไม่มีสูตรคำนวณที่แน่ชัด จึงใช้ตารางที่ 14 ทดแทนการคำนวณ Loss ของ 6G โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้งานความถี่ที่ 325 GHz ในการแสดงผลเนื่องจากเป็นความถี่ที่ใช้ใน 6G ที่อยู่ในย่าน THz และเป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดในการใช้งานที่มี Use Cases นำไปใช้งาน

3.4 ผลตัวอย่างการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G

จากข้อเสนอวิธีการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G ได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 13 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณอัตราข้อมูลของ 6G ตามตารางที่ 17 ได้ผลการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G คือ 41.98 m ซึ่งจากผลการคำนวณได้ผลลัพธ์ตามที่คาดหวังในการใช้งานสำหรับเทคโนโลยี 6G

ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G

| Carrier Frequency | SCS & BW | SINR | Power & Gain | Pathloss Model | Antenna Height |
|-------------------|----------------|-------|---------------|----------------|----------------|
| 325 GHz | 240 kHz, 1 GHz | 15 dB | 30 dBm + 5 dB | Umi LOS | 10 m |

| | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|-----|----------------|---------------------------------|---|
| Transmit Power | <input type="text" value="30"/> | dBm | Antenna Height | <input type="text" value="10"/> | m |
| Tx Antenna Gain | <input type="text" value="5"/> | dB | | | |

| | | | | | |
|--|--|-----|-----------|-----------------------------------|-----|
| Carrier Frequency | <input type="text" value="325"/> | GHz | Bandwidth | <input type="text" value="1000"/> | MHz |
| Path Loss Model | <input type="text" value="Urban Micro LOS"/> | | Margin | <input type="text" value="10"/> | dB |
| <input checked="" type="checkbox"/> Penetration Loss | | | | | |

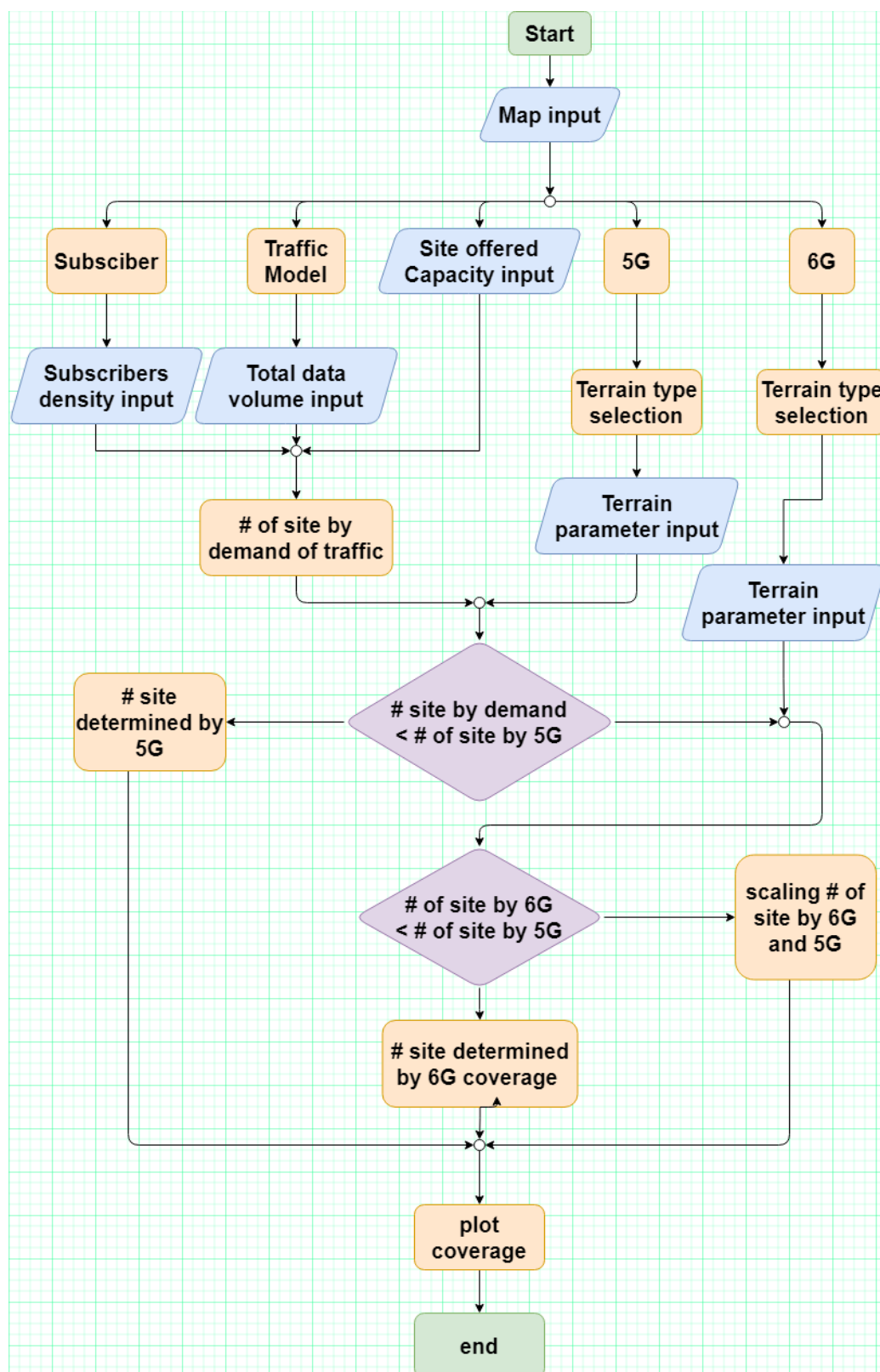
| | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|----|--|---------------------------------|----|
| Rx Antenna Gain | <input type="text" value="0"/> | dB | SINR | <input type="text" value="15"/> | dB |
| Noise Figure | <input type="text" value="5"/> | dB | <input type="button" value="Calculate"/> | | |

| | | | | | |
|-------------|--------------------------------------|-----|----------------------|----------------------------------|-----|
| EIRP | <input type="text" value="35"/> | dBm | Receiver Sensitivity | <input type="text" value="-64"/> | dBm |
| Cell Radius | <input type="text" value="41.9871"/> | m | | | |

รูปที่ 14 ผลการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G



3.5 หลักการออกแบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้ใช้งานร่วมกัน



รูปที่ 15 Flowchart การออกแบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้ใช้งานร่วมกัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้คิดค้นแนวทางการออกแบบการติดตั้งสถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้ใช้งานร่วมกัน โดยมีขั้นตอนการออกแบบตาม Flowchart ดังรูปที่ 15 โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การคำนวณอัตราข้อมูลของผู้ใช้งานในแต่ละพื้นที่และอัตราข้อมูลที่สถานีฐานสามารถส่งได้ การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานทั้งระบบ 5G และ 6G และคำนวณจำนวนสถานีฐานที่ใช้ติดตั้งในพื้นที่โดยใช้งานทั้งระบบ 5G และ 6G ร่วมกันและการแสดงตำแหน่งและพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานลงบนแผนที่ โดยแต่ละขั้นตอนมีหน้าที่ดังนี้

3.5.1 การคำนวณอัตราข้อมูลของผู้ใช้งานในแต่ละพื้นที่และอัตราข้อมูลที่สถานีฐานสามารถส่งได้ เริ่มทำงานโดยรับค่าพารามิเตอร์สำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ พร้อมกับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละสถานีฐาน ได้แก่ Carrier Frequency, Subcarrier Spacing, Bandwidth, Ratio Downlink:Uplink, Modulation Scheme, MIMO Layer และ Scaling Factor ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ผู้ให้บริการเครือข่ายเป็นผู้กำหนดค่าโดยต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ กสทช. สำหรับใช้ภายในประเทศไทยและนำพารามิเตอร์ไปคำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ที่ใช้สมการที่ (1) – (2) และตารางที่ 2 – 3 ในการคำนวณ และคำนวณอัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีฐานทั้งระบบ 5G และ 6G โดยใช้สมการที่ (3) – (9) และตารางที่ 4 – 7 ในการคำนวณ

3.5.2 การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมและจำนวนของสถานีฐานทั้งระบบ 5G และ 6G ที่จะติดตั้ง โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย คือ การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานในระบบ 5G โดยใช้พารามิเตอร์ ได้แก่ Carrier Frequency, Bandwidth, Transmit Power, Transmit Gain, Antenna Height, Receive Gain, SINR, Noise Figure และ Margin ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ผู้ให้บริการเครือข่ายเป็นผู้กำหนดค่าโดยต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ กสทช. สำหรับใช้ภายในประเทศไทย เพื่อคำนวณระยะครอบคลุมของสถานีฐานในย่านระบบ 5G โดยใช้สมการดังตารางที่ 8 – 12 ในการคำนวณ และการคำนวณพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานในระบบ 6G โดยใช้พารามิเตอร์ ได้แก่ Carrier Frequency, Bandwidth, Transmit Power, Transmit Gain, Antenna Height, Receive Gain, SINR, Noise Figure และ Margin ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ผู้ให้บริการเครือข่ายเป็นผู้กำหนดค่าโดยสำหรับสถานีฐาน 6G จะอ้างอิงข้อกำหนดตาม กสทช. สำหรับใช้ภายในประเทศไทย เพื่อคำนวณระยะครอบคลุมของสถานีฐานในระบบ 6G ตามข้อเสนอในหัวข้อ 3.3 และการคำนวณจำนวนสถานีฐานที่ใช้ติดตั้งในพื้นที่โดยใช้งานทั้งระบบ 5G และ 6G ร่วมกัน โดยนำอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่และอัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีฐานทั้งระบบ 5G และ 6G จากขั้นตอน 3.5.1 ระยะ

ครอบคลุมของสถานีฐานในทั้งระบบ 5G และ 6G จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ เพื่อมาเปรียบเทียบและคำนวณจำนวนสถานีฐานทั้งหมดที่จะต้องติดตั้ง โดยจะนำระยะครอบคลุมของสถานีฐาน 5G ในย่านความถี่ FR1 เทียบกับขนาดพื้นที่ให้บริการทั้งหมด เพื่อหาจำนวนสถานีฐานที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดโดยใช้สถานีฐาน 5G ในย่านความถี่ FR1 และนำอัตราข้อมูลรวมของสถานีฐาน 5G ในย่านความถี่ FR1 เทียบกับอัตราข้อมูลรวมสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ เพื่อหาจำนวนสถานีฐานที่ให้อัตราข้อมูลเพียงพอสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่โดยใช้สถานีฐาน 5G ในย่านความถี่ FR1 และเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการกับจำนวนสถานีฐานที่ให้อัตราข้อมูลเพียงพอสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่โดยใช้สถานีฐาน 5G ในย่านความถี่ FR1 หากจำนวนสถานีฐานที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการมากกว่าจะใช้งานเพียงแค่สถานีฐาน 5G ในย่านความถี่ FR1 ถ้าจำนวนสถานีฐานที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแต่อัตราข้อมูลโดยรวมไม่เพียงพอสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ที่จะนำสถานีฐานของ 5G ในย่านความถี่ FR2 เข้ามาติดตั้งเพิ่มโดยทำเพิ่มจำนวนสถานีฐานขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเพียงพอกับอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ หลังจากนั้นจะนำจำนวนสถานีฐานของ 5G ในย่านความถี่ FR2 ไปเปรียบเทียบกับจำนวนสถานีฐานของ 6G โดยค่อย ๆ ลดจำนวนสถานีฐานของ 5G ในย่านความถี่ FR2 ลงและเพิ่มจำนวนสถานีฐานของ 6G จนได้จำนวนสถานีฐานโดยรวมน้อยที่สุด และได้อัตราข้อมูลรวมเพียงพอสำหรับอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่

3.5.3 การแสดงตำแหน่งและพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานลงบนแผนที่ โดยให้ผู้ใช้งานเลือกพื้นที่ที่ต้องการวางแผนโครงข่ายลงบนแผนที่ จากนั้นจะคำนวณพื้นที่วางแผนโครงข่าย แล้วจึงป้อนจำนวนสถานีฐานที่คำนวณได้จากขั้นตอน 3.5.2 และเลือกวางสถานีฐานลงบนแผนที่โดยเลือกติดตั้งสถานีฐานของ 5G ในย่านความถี่ FR1 ให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการและติดตั้งสถานีฐานของ 5G ในย่านความถี่ FR2 และ 6G ในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูงเป็นหลักเช่น พื้นที่สัญจรของผู้คน ตลาด ศูนย์การค้า และป้ายรถโดยสาร เป็นต้น หากเป็นการปรับปรุงติดตั้งสถานีฐานเพิ่มเติม ให้เลือกวางสถานีฐานของเดิมก่อนและจากนั้นพิจารณาเลือกวางสถานีฐานที่จะติดตั้งเพิ่มเติม ในตำแหน่งที่มีความหนาแน่นสูงเป็นหลักเพื่อรองรับปริมาณการใช้งานให้เพียงพอ

3.6 ผลลัพธ์ของงานวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ 5G และ 6G ทำให้สามารถวิเคราะห์ในการวางแผนพื้นที่ติดตั้งโครงข่ายเบื้องต้น เพื่อดำเนินการของ 5G และ 6G โดยใช้การออกแบบตาม Flowchart ในรูปที่ 14 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการแสดงผล โดยใช้ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ขั้นตอนมีการทำงานดังนี้

1. Capacity Calculator แบ่งการทำงานเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการคำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ทั้ง Download และ Upload โดยใช้สมการที่ (1) – (2) และ ข้อมูลจากตารางที่ 2 – 3 ในการคำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ส่วนต่อไปเป็นการคำนวณ อัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีฐาน 5G ทั้งย่านความถี่ FR1 และ FR2 โดยใช้สมการที่ (3) – (9) และข้อมูลจากตารางที่ 4 – 7 ในการคำนวณ อัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีฐานและส่วนสุดท้ายเป็นการคำนวณอัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีฐาน 6G โดยใช้วิธีการคำนวณอัตราข้อมูล 6G ตามข้อเสนอในหัวข้อ 3.1

2. Coverage Calculator แบ่งการทำงานเป็น 4 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการคำนวณ Cell Radius ของ FR1 โดยใช้แบบจำลองของ 3GPP Release 15 ซึ่งรับพารามิเตอร์ได้แก่ Carrier Frequency, Subcarrier Spacing, Bandwidth, Ratio Downlink:Uplink, Modulation Scheme, MIMO Layer, Scaling Factor และใช้สมการดังตารางที่ 8 – 12 ในการคำนวณ ส่วนต่อไปเป็นการคำนวณ Cell Radius ของ FR2 โดยใช้แบบจำลองของ 3GPP Release 15 ซึ่งรับพารามิเตอร์ได้แก่ Carrier Frequency, Bandwidth, Transmit Power, Transmit Gain, Antenna Height, Receive Gain, SINR, Noise Figure, Margin และใช้สมการดังตารางที่ 8 – 12 ในการคำนวณ ส่วนที่สามเป็นการคำนวณ Cell Radius ของ 6G โดยใช้วิธีการคำนวณระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G ตามข้อเสนอในหัวข้อ 3.3 และส่วนสุดท้ายเป็นการคำนวณจำนวนสถานีฐานที่ติดตั้งในพื้นที่โดยใช้งานทั้ง 5G และ 6G ร่วมกัน โดยใช้การนำอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่และอัตราข้อมูลรวมการให้บริการของสถานีฐานทั้งย่านความถี่ FR1 FR2 และ 6G จาก Capacity Calculator Cell Radius ของ FR1 FR2 และ 6G ความหนาแน่นของผู้ใช้งานและขนาดพื้นที่ที่จะติดตั้ง ในการคำนวณโดยการทำงานเป็นไปตาม Flowchart ดังรูปที่ 15 และคำอธิบายในหัวข้อ 3.5.2

3. Plot Coverage เป็นส่วนการแสดงผล โดยนำจำนวนสถานีฐานที่จะติดตั้งและระยะครอบคลุมสถานีฐานจากโปรแกรม Coverage Calculator มาเลือกตำแหน่งที่จะวางลงบนแผนที่เพื่อแสดงผลโดยใช้หลักเกณฑ์ในการตัดสินใจตำแหน่งที่ติดตั้งตามหัวข้อ 3.5.3

ผลลัพธ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการจำลองการวางแผนโครงข่ายโดยใช้งานทั้งโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน ในพื้นที่ตัวอย่างทั้ง Dense Urban และ Urban โดยแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ การคำนวณจำนวนสถานีฐานทั้ง 5G และ 6G และพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานทั้ง 5G และ 6G ทั้งหมดบนพื้นที่วางแผนโครงข่ายตามที่กำหนด

การวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ใด ๆ ผู้ให้บริการโครงข่ายจะต้องสำรวจพฤติกรรมการใช้งานอินเทอร์เน็ตของผู้ใช้บริการในพื้นที่นั้น เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐานและจำนวนของสถานีฐานที่จะติดตั้ง แต่ในรายงานฉบับนี้จะกำหนดพื้นที่ให้บริการ บริการที่ผู้ให้บริการใช้งานได้แก่ Full HD, 4K, 8K, VR/AR, Web Browsing, IoT Game XR Streaming, XR Gaming, Hologram และจำนวนของผู้ใช้งานของแต่ละบริการ อ้างอิงจากสถิติการใช้งานอินเทอร์เน็ตและการคาดการณ์เทคโนโลยีดิจิทัลในอนาคต [40] - [42] ข้อมูลฐานทะเบียนราษฎร์จากกรมการปกครอง [43], [44]



3.7 ผลตัวอย่างการวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ Dense Urban

เลือกพื้นที่ Dense Urban เป็นพื้นที่ตัวอย่างมีขนาด 0.2252 km^2 ซึ่งเทียบเท่ากับขนาดของพื้นที่ศูนย์การค้าย่านสยามสแควร์ ซึ่งเป็นตัวอย่างของพื้นที่รูปแบบ Urban Micro Street Canyon สำหรับการบริการต่าง ๆ ของบรอดแบนด์เคลื่อนที่ โดยประเมินจำนวนผู้ใช้งานทั้งหมดจากสถิติการใช้งานอินเทอร์เน็ตและโดยคาดการณ์ปริมาณการใช้งานจำแนกแต่ละบริการได้แก่บริการ Full HD, 4K, 8K, VR/AR, Web Browsing, IoT และ Game จากการสำรวจพฤติกรรมการใช้งานอินเทอร์เน็ตในพื้นที่และจำนวนของผู้ใช้งานของแต่ละบริการ [40], [41], [43], [44] บริการ XR Streaming, XR Gaming และ Hologram จากการคาดการณ์เทคโนโลยีดิจิทัลในอนาคต [42] แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าพารามิเตอร์ของการใช้งานบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ของผู้ให้บริการในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง [40] - [44]

| บริการ | จำนวน ผู้ใช้งาน Downlink | Downlink Take Rate | อัตรา Downlink ต่อผู้ใช้งาน (Mbps) | จำนวน ผู้ใช้งาน Uplink | Uplink Take Rate | อัตรา Uplink ผู้ใช้งาน (Mbps) |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------|---|------------------------------|------------------------|--|
| Full HD | 2000 | 0.5 | 20 | 1000 | 0.5 | 20 |
| 4K | 500 | 0.5 | 70 | 250 | 0.5 | 70 |
| 8K | 500 | 0.5 | 140 | 250 | 0.5 | 140 |
| VR/AR | 400 | 0.5 | 70 | 200 | 0.5 | 70 |
| XR Streaming | 200 | 0.5 | 150 | 200 | 0.5 | 300 |
| XR Gaming | 700 | 0.5 | 250 | 700 | 0.5 | 250 |
| Hologram | 100 | 0.5 | 9100 | 100 | 0.5 | 1400 |
| Web Browsing | 2000 | 0.5 | 10 | 2000 | 0.5 | 10 |
| IoTs | 10000 | 0.9 | 0.1 | 3500 | 0.9 | 0.1 |
| Game | 800 | 0.5 | 40 | 800 | 0.5 | 40 |

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐานเพื่อเพื่อคำนวณจำนวนสถานีฐานของทั้งย่านความถี่ FR1 FR2 และ 6G และ Cell Radius โดยโปรแกรม Coverage Calculator และอัตราข้อมูลรวม การให้บริการของสถานีฐาน โดยโปรแกรม Capacity Calculator ดังตารางที่ 19 รวมถึงแสดง ตำแหน่งของสถานีฐาน เพื่อแสดงระยะครอบคลุมสถานีฐานรวมลงพื้นที่วางแผนโครงข่ายและประเมิน ว่าระยะครอบคลุมสถานีฐานครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดหรือไม่ โดยโปรแกรม Coverage Plot

ผลการคำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ในพื้นที่ คือ 670.9 Gbps Downlink และ 257.0 Gbps Uplink โดยเผื่อค่า Demand Factor เป็น 1.2 เท่า ทำให้ อัตราข้อมูลที่กำหนด (Requirement Usage) เป็น 805.1 Gbps Downlink และ 308.4 Gbps Uplink ใช้สถานีฐานย่านความถี่ FR1 ที่ความถี่ 2600 MHz ให้อัตราข้อมูลอยู่ที่ 142.4 Mbps Downlink และ 38.1 Mbps Uplink จำนวน 2 สถานี ใช้สถานีฐานย่านความถี่ FR2 ที่ความถี่ 26 GHz ให้อัตราข้อมูลอยู่ที่ 1723.9 Mbps Downlink และ 473.0 Mbps Uplink จำนวน 0 สถานี และใช้สถานีฐานย่านของ 6G ที่ความถี่ 325 GHz ให้อัตราข้อมูลอยู่ที่ 104477.2 Mbps Downlink และ 28667.5 Mbps Uplink จำนวน 11 สถานี ดังรูปที่ 15-22 เพื่อให้บริการเพียงพอสำหรับการ บริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่

ผลการคำนวณพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่างมีค่า 0.2252 km² และพื้นที่ครอบคลุมสถานี ฐานทั้งหมดเป็น 0.5189 km² ครอบคลุมพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่างทั้งหมด แสดงผลตำแหน่ง สถานีฐาน และพื้นที่ในรูปที่ 22

ตารางที่ 19 ค่าพารามิเตอร์ของ Base Station ทั้งหมดในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

| Carrier Frequency | 2600 MHz | 26 GHz | 325 GHz |
|-----------------------|----------------|-----------------|------------------|
| SCS & BW | 15 kHz, 10 MHz | 60 kHz, 100 MHz | 120 kHz, 400 MHz |
| Modulation Scheme | 16QAM | 16QAM | 16QAM |
| Ratio Downlink:Uplink | 8:2 | 8:2 | 8:2 |
| SINR | 9 dB | 10 dB | 15 dB |
| Power & Gain | 35 dBm + 5 dB | 25 dBm + 5 dB | 30 dBm + 5 dB |
| Pathloss Model | Umi NLOS | Umi LOS | Umi LOS |
| Antenna Height | 10 m | 10 m | 10 m |
| Cell Radius | 272.0 m | 45.6 m | 39.6 m |
| จำนวนสถานี | 2 | 0 | 11 |

Downlink Data Rate Calculator

No. Download Service : 10 Create

Service Data Rate : 17.315 Mbps Show Service Data rate

Service name : 4K Service type : - UHD

UHD panel

| | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Resolution : 4K | Frame rate : 60 FPS | Color Dept : SVGA 24 bit |
| Compression : H.265 | Audio Quality : 320 Kbps | |
| Number of Device : 500 | Take rate : 0.5 | Calculate |

Service Data Rate : 17496.3166 Mbps Show Service Data rate

Service name : 8K Service type : - UHD

Total Download Data Rate Usage : 670900 Mbps Calculate Total Data Rate

Uplink Data Rate Calculator

No. Upload Service : 10 Create

Service name : 4K Service type : - UHD

UHD panel

| | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Resolution : 4K | Frame rate : 60 FPS | Color Dept : SVGA 24 bit |
| Compression : H.265 | Audio Quality : 320 Kbps | |
| Number of Device : 250 | Take rate : 0.5 | Calculate |

Service Data Rate : 8748.3183 Mbps Show Service Data rate

Service name : 8K Service type : - UHD

Total Upload Data Rate Usage : 257065 Mbps Calculate Total Data Rate

รูปที่ 16 อัตราข้อมูลรวมของพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

Cell Name : FR1 : 2600 MHz

| | | | | |
|----------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|--|
| Band : FR1 : 2600 MHz (n7) | Channel Spacing : 15 KHz | Numerology : 0 | Bandwidth : 10 MHz | Ratio Downlink:Uplink : 8 : 2 |
| Modulation Scheme : 16QAM | MIMO Layer : 8 | Scaling Factor : 0.8 | LDPC Code Rate : 0.92578125 | Downlink-Uplink Overhead : 0.14 and 0.08 |

Calculate

Download Throughput : 142.4457 Mbps

Upload Throughput : 38.0959 Mbps

Show Cell Data rate

Reset Value

รูปที่ 17 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

Cell Name : FR2 : 26 GHz

| | | | | |
|----------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Band : FR2 : 26 GHz (n258) | Channel Spacing : 60 KHz | Numerology : 2 | Bandwidth : 100 MHz | Ratio Downlink:Uplink : 8 : 2 |
| Modulation Scheme : 16QAM | MIMO Layer : 8 | Scaling Factor : 1 | LDPC Code Rate : 0.92578125 | Downlink-Uplink Overhead : 0.18 and 0.10 |

Calculate

Download Throughput : 1723.8735 Mbps

Upload Throughput : 473.0141 Mbps

Show Cell Data rate

Reset Value

รูปที่ 18 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

Cell Name : 6G : 325 GHz

| | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|--|
| Band : mmWave part2 : 32... | Channel Spacing : 120 KHz | Numerology : 5 | Bandwidth : 400 MHz | Ratio Downlink:Uplink : 8 : 2 |
| Modulation Scheme : 16QAM | MIMO Layer : 8 | Scaling Factor : 0.75 | LDPC Code Rate : 0.92578125 | Downlink-Uplink Overhead : 0.14 and 0.08 |

Calculate

Download Throughput : 104477.184 Mbps

Upload Throughput : 28667.52 Mbps

Show Cell Data rate

Reset Value

รูปที่ 19 อัตราข้อมูลของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

| Coverage 5G FR1 | Coverage 5G FR2 | Coverage 6G | Calculate quantity of base station |
|--|-----------------|---|------------------------------------|
| Transmit Power <input type="text" value="35"/> dBm Tx Antenna Gain <input type="text" value="5"/> dB | | Antenna Height <input type="text" value="10"/> m | |
| Carrier Frequency <input type="text" value="2600"/> MHz Path Loss Model <input type="text" value="Urban Micro NLOS"/> | | Bandwidth <input type="text" value="10"/> MHz Margin <input type="text" value="5"/> dB | |
| <input type="checkbox"/> Penetration Loss | | | |
| Rx Antenna Gain <input type="text" value="0"/> dB Noise Figure <input type="text" value="5"/> dB | | SINR <input type="text" value="9"/> dB <input type="button" value="Calculate"/> | |
| EIRP <input type="text" value="40"/> dBm | | Receiver Sensitivity <input type="text" value="-90"/> dBm | |
| Cell Radius <input type="text" value="272.0139"/> m | | | |

รูปที่ 20 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

| Coverage 5G FR1 | Coverage 5G FR2 | Coverage 6G | Calculate quantity of base station |
|---|-----------------|--|------------------------------------|
| Transmit Power <input type="text" value="25"/> dBm Tx Antenna Gain <input type="text" value="5"/> dB | | Antenna Height <input type="text" value="10"/> m | |
| Carrier Frequency <input type="text" value="26"/> GHz Path Loss Model <input type="text" value="Urban Micro LOS"/> | | Bandwidth <input type="text" value="100"/> MHz Margin <input type="text" value="5"/> dB | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Penetration Loss | | | |
| Rx Antenna Gain <input type="text" value="0"/> dB Noise Figure <input type="text" value="5"/> dB | | SINR <input type="text" value="10"/> dB <input type="button" value="Calculate"/> | |
| EIRP <input type="text" value="30"/> dBm | | Receiver Sensitivity <input type="text" value="-79"/> dBm | |
| Cell Radius <input type="text" value="45.5701"/> m | | | |

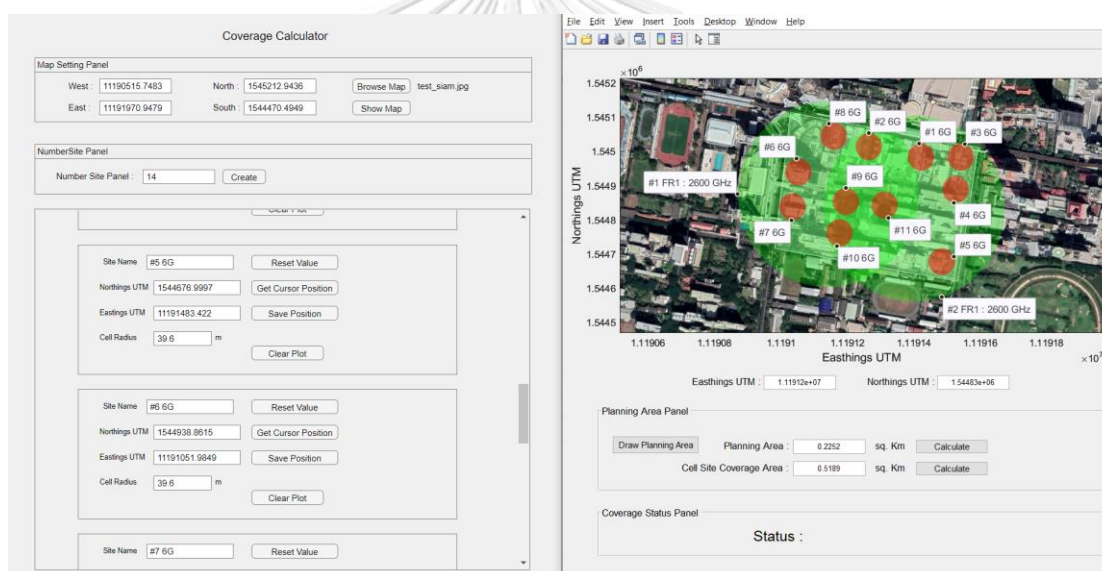
รูปที่ 21 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

| Coverage 5G FR1 | Coverage 5G FR2 | Coverage 6G | Calculate quantity of base station |
|--|-----------------|---|------------------------------------|
| Transmit Power <input type="text" value="25"/> dBm Tx Antenna Gain <input type="text" value="5"/> dB | | Antenna Height <input type="text" value="10"/> m | |
| Carrier Frequency <input type="text" value="325"/> GHz Path Loss Model <input type="text" value="Urban Micro LOS"/> | | Bandwidth <input type="text" value="400"/> MHz Margin <input type="text" value="10"/> dB | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Penetration Loss | | | |
| Rx Antenna Gain <input type="text" value="0"/> dB Noise Figure <input type="text" value="5"/> dB | | SINR <input type="text" value="15"/> dB <input type="button" value="Calculate"/> | |
| EIRP <input type="text" value="30"/> dBm | | Receiver Sensitivity <input type="text" value="-67.9794"/> dBm | |
| Cell Radius <input type="text" value="39.5914"/> m | | | |

รูปที่ 22 Cell Radius ของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

| Coverage 5G FR1 | Coverage 5G FR2 | Coverage 6G | Calculate quantity of base station |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------------|
| Traffic Model | | | |
| Total Download Data Rate Usage | 670.9 Gbps | Requirement Download Usage | 805.1 Gbps |
| Total Upload Data Rate Usage | 257 Gbps | Requirement Upload Usage | 308.4 Gbps |
| Demand Factor | 1.2 | <button>Calculate</button> | |
| Coverage | | | |
| Cell Radius of 5G FR1 | 272 m | Coverage of 5G FR1 | 0.2324 sq km |
| Cell Radius of 5G FR2 | 45.57 m | Coverage of 5G FR2 | 0.006524 sq km |
| Cell Radius of 6G | 39.59 m | Coverage of 6G | 0.004924 sq km |
| <button>Calculate Coverage</button> | | | |
| Quantity of base station | | | |
| No. of site 5G FR1 | 2 | No. of site 6G | 11 |
| No. of site 5G FR2 | 0 | <button>Calculate</button> | |

รูปที่ 23 จำนวนของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 และ FR2 และ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง



รูปที่ 24 ตำแหน่งของสถานีฐานบนพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่าง

จากผลการจำลองวางสถานีฐานในพื้นที่ Dense Urban ตัวอย่างระยะครอบคลุมสถานีฐานในการส่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้โดยใช้งานในย่านความถี่ FR1 โดยเลือกวางในจุดที่สามารถทำให้ได้ระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดได้ และการเลือกวางสถานีฐานของ 6G ได้เลือกวางในพื้นที่ที่มีคนพลุกพล่าน โดยในที่นี้ได้เลือกวางในจุดที่เป็นพื้นที่โล่ง เป็นทางข้ามระหว่างอาคาร ทางเดินที่คนสัญจร ป้ายรถโดยสาร ซึ่งเป็นจุดที่คนพลุกพล่านและมีการใช้งานจำนวนมาก สามารถใช้งานได้เพียงพอและพื้นที่ส่วนอื่น ๆ เป็นอาคารห้างร้านต่าง ๆ จึงใช้ สถานีฐานของ FR1 ซึ่งการเลือกใช้งานสถานีฐานของ 6G แทนการเลือกใช้งานสถานีฐานของ FR2 เนื่องจากระยะครอบคลุม

สถานีฐานของทั้ง 2 สถานีฐานมีระยะใกล้เคียงกันมากโดยที่ Cell Radius ของสถานีฐาน FR2 เท่ากับ 45.57 m สถานีฐานของ 6G เท่ากับ 39.59 m ซึ่ง Cell Radius ของ สถานีฐาน 6G แคบกว่า 5.98 m หรือ 0.0016 km² แต่ให้อัตราข้อมูลที่สูงกว่ามาก จึงเลือกใช้งาน สถานีฐานของ 6G เพื่อให้รองรับการใช้งานได้อย่างเพียงพอ

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้พิกัดในการติดตั้งสถานีฐานในย่านความถี่ FR1 คือ

- (1544893.2469 N° UTM, 11191147.6665 E° UTM)
- (1544839.1851 N° UTM, 11191370.3437 E° UTM)

พิกัดในการติดตั้งสถานีฐานของ 6G คือ

- (1544676.9997 N° UTM, 11191483.4220 E° UTM)
- (1544878.0420 N° UTM, 11191495.5996 E° UTM)
- (1544977.7185 N° UTM, 11191509.5169 E° UTM)
- (1544972.6502 N° UTM, 11191408.6163 E° UTM)
- (1544851.0111 N° UTM, 11191290.3191 E° UTM)
- (1545011.5071 N° UTM, 11191260.7448 E° UTM)
- (1545041.9168 N° UTM, 11191158.1045 E° UTM)
- (1544774.9867 N° UTM, 11191158.1045 E° UTM)
- (1544856.0794 N° UTM, 11191185.9391 E° UTM)
- (1544837.4957 N° UTM, 11191032.8486 E° UTM)
- (1544938.8615 N° UTM, 11191051.9849 E° UTM)

3.8 ผลตัวอย่างการวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ Urban

เลือกพื้นที่ Urban เป็นพื้นที่ตัวอย่างมีขนาด 0.3050 km^2 ซึ่งเทียบเท่ากับขนาดของพื้นที่ชุมชนอยู่อาศัยในตำบลบางปู จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นตัวอย่างของพื้นที่รูปแบบ Urban Macro สำหรับการบริการต่าง ๆ ของบรอดแบนด์เคลื่อนที่ โดยประเมินจำนวนผู้ใช้งานทั้งหมดจากสถิติการใช้งานอินเทอร์เน็ต และโดยคาดการณ์ปริมาณการใช้งานจำแนกแต่ละบริการได้แก่บริการ Full HD, 4K, 8K, VR/AR, Web Browsing, IoT และ Game จากการสำรวจพฤติกรรมการใช้งานอินเทอร์เน็ตในพื้นที่ และ จำนวนของผู้ใช้งานของแต่ละบริการ [40], [41], [43], [44] แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่าพารามิเตอร์ของการใช้งานบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ของพื้นที่ Urban ตัวอย่าง [40], [41], [43], [44]

| บริการ | จำนวนผู้ใช้งาน Downlink | Downlink Take Rate | อัตรา Downlink ต่อ ผู้ใช้งาน (Mbps) | จำนวน ผู้ใช้งาน Uplink | Uplink Take Rate | อัตรา Uplink ต่อ ผู้ใช้งาน (Mbps) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|---|------------------------------|------------------------|---|
| Full HD | 300 | 0.3 | 20 | 100 | 0.3 | 20 |
| 4K | 50 | 0.3 | 70 | 15 | 0.3 | 70 |
| 8K | 50 | 0.3 | 140 | 15 | 0.3 | 140 |
| Web Browsing | 300 | 0.3 | 10 | 100 | 0.3 | 10 |
| IoT | 500 | 0.5 | 0.1 | 200 | 0.5 | 0.1 |
| Game | 200 | 0.3 | 40 | 200 | 0.3 | 40 |

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐานเพื่อเพื่อคำนวณจำนวนสถานีฐานของทั้งย่านความถี่ FR1 FR2 และ 6G และ Cell Radius โดยโปรแกรม Coverage Calculator และ อัตราข้อมูลรวม การให้บริการของสถานีฐานโดยโปรแกรม Capacity Calculator ดังตารางที่ 21 รวมถึงแสดงตำแหน่งของสถานีฐาน เพื่อแสดงระยะครอบคลุมสถานีฐานรวมลงพื้นที่วางแผนโครงข่ายและประเมินว่าระยะครอบคลุมสถานีฐานครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดหรือไม่ โดยโปรแกรม Coverage Plot

ผลการคำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ในพื้นที่ คือ 11.0 Gbps Downlink และ 5.6 Gbps Uplink โดยเผื่อค่า Demand Factor เป็น 1.2 เท่า ทำให้อัตราข้อมูลที่กำหนด (Requirement Usage) เป็น 13.2 Gbps Downlink และ 6.8 Gbps Uplink ใช้สถานีฐานย่านความถี่ FR1 ที่ความถี่ 2600 MHz ให้อัตราข้อมูลอยู่ที่ 142.4 Mbps Downlink และ 38.1 Mbps Uplink จำนวน 2 สถานี ใช้สถานีฐานย่านความถี่ FR2 ที่ความถี่ 26 GHz ให้อัตราข้อมูลอยู่ที่ 1723.9 Mbps Downlink และ 473.0 Mbps Uplink จำนวน 13 สถานี และใช้สถานีฐานย่านของ 6G ที่ความถี่ 325 GHz ให้อัตราข้อมูลอยู่ที่ 104477.2 Mbps Downlink และ 28667.5 Mbps Uplink จำนวน 0 สถานี ดังรูปที่ 25-33 เพื่อให้บริการเพียงพอสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่

ผลการคำนวณในพื้นที่ Urban ตัวอย่างมีค่า 0.3050 km^2 และพื้นที่ครอบคลุมสถานีฐานทั้งหมดเป็น 0.5696 km^2 ครอบคลุมพื้นที่ Urban ตัวอย่างทั้งหมด แสดงผลตำแหน่งสถานีฐาน และพื้นที่ในรูปที่ 33

ตารางที่ 21 ค่าพารามิเตอร์ของ Base Station และ Cell Radius ทั้งหมดในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

| Carrier Frequency | 2600 MHz | 26 GHz | 325 GHz |
|-----------------------|----------------|-----------------|------------------|
| SCS & BW | 15 kHz, 10 MHz | 60 kHz, 100 MHz | 120 kHz, 400 MHz |
| Modulation Scheme | 16QAM | 16QAM | 16QAM |
| Ratio Downlink:Uplink | 8:2 | 8:2 | 8:2 |
| SINR | 9 dB | 10 dB | 15 dB |
| Power & Gain | 30 dBm + 5 dB | 30 dBm + 5 dB | 30 dBm + 5 dB |
| Pathloss Model | Uma LOS | Uma LOS | Uma LOS |
| Antenna Height | 25 m | 25 m | 25 m |
| Cell Radius | 355 m | 56 m | 46 m |
| จำนวนสถานี | 2 | 13 | 0 |

Downlink Data Rate Calculator

No. Download Service : 6 Create

Service name : 1080 Full HD Service type : - UHD

UHD panel

Resolution : 1080 Full HD Frame rate : 60 FPS Color Dept : SVGA 24 bit

Compression : H.265 Audio Quality : 320 Kbps

Number of Device : 300 Take rate : 0.4 Calculate

Service Data Rate : 2099.8396 Mbps Show Service Data rate

Service name : 4K Service type : - UHD

UHD panel

Total Download Data Rate Usage : 11045 Mbps Calculate Total Data Rate

Uplink Data Rate Calculator

No. Upload Service : 6 Create

Service name : 1080 Full HD Service type : - UHD

UHD panel

Resolution : 1080 Full HD Frame rate : 60 FPS Color Dept : SVGA 24 bit

Compression : H.265 Audio Quality : 320 Kbps

Number of Device : 100 Take rate : 0.4 Calculate

Service Data Rate : 700.1599 Mbps Show Service Data rate

Service name : 4K Service type : - UHD

UHD panel

Total Upload Data Rate Usage : 5678 Mbps Calculate Total Data Rate

รูปที่ 25 อัตราข้อมูลรวมในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

Cell Name : FR1 : 2600 MHz

Band : FR1 : 2600 MHz (n7) Channel Spacing : 15 KHz Numerology : 0 Bandwidth : 10 MHz Ratio Downlink-Uplink : 8 : 2

Modulation Scheme : 16QAM MIMO Layer : 8 Scaling Factor : 0.8 LDPC Code Rate : 0.92578125 Downlink-Uplink Overhead : 0.14 and 0.08 Calculate

Download Throughput : 142.4457 Mbps Upload Throughput : 38.0959 Mbps Show Cell Data rate Reset Value

รูปที่ 26 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

Cell Name : FR2 : 26 GHz

Band : FR2 : 26 GHz (n258) Channel Spacing : 60 KHz Numerology : 2 Bandwidth : 100 MHz Ratio Downlink-Uplink : 8 : 2

Modulation Scheme : 16QAM MIMO Layer : 8 Scaling Factor : 1 LDPC Code Rate : 0.92578125 Downlink-Uplink Overhead : 0.18 and 0.10 Calculate

Download Throughput : 1723.8735 Mbps Upload Throughput : 473.0141 Mbps Show Cell Data rate Reset Value

รูปที่ 27 อัตราข้อมูลของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

Cell Name : 6G : 325 GHz

Band : mmWave part2 : 32... Channel Spacing : 120 KHz Numerology : 5 Bandwidth : 400 MHz Ratio Downlink-Uplink : 8 : 2

Modulation Scheme : 16QAM MIMO Layer : 8 Scaling Factor : 0.75 LDPC Code Rate : 0.92578125 Downlink-Uplink Overhead : 0.14 and 0.08 Calculate

Download Throughput : 104477.184 Mbps Upload Throughput : 28667.52 Mbps Show Cell Data rate Reset Value

รูปที่ 28 อัตราข้อมูลของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

MATLAB App

Coverage 5G FR1 Coverage 5G FR2 Coverage 6G Calculate quantity of base station

Transmit Power 30 dBm Antenna Height 25 m

Tx Antenna Gain 5 dB

Carrier Frequency 2600 MHz Bandwidth 10 MHz

Path Loss Model Urban Macro LOS Margin 9 dB

☒ Penetration Loss

Rx Antenna Gain 0 dB SINR 9 dB

Noise Figure 5 dB Calculate

EIRP 35 dBm Receiver Sensitivity -90 dBm

Cell Radius 355.1787 m

รูปที่ 29 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

MATLAB App

Coverage 5G FR1 Coverage 5G FR2 Coverage 6G Calculate quantity of base station

Transmit Power 30 dBm Antenna Height 25 m

Tx Antenna Gain 5 dB

Carrier Frequency 26 GHz Bandwidth 100 MHz

Path Loss Model Urban Macro LOS Margin 10 dB

☒ Penetration Loss

Rx Antenna Gain 0 dB SINR 15 dB

Noise Figure 5 dB Calculate

EIRP 35 dBm Receiver Sensitivity -74 dBm

Cell Radius 56.3164 m

รูปที่ 30 Cell Radius ของสถานีฐานย่านความถี่ FR2 ของ 5G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

MATLAB App

Coverage 5G FR1 Coverage 5G FR2 Coverage 6G Calculate quantity of base station

Transmit Power 25 dBm Antenna Height 25 m

Tx Antenna Gain 5 dB

Carrier Frequency 325 GHz Bandwidth 400 MHz

Path Loss Model Urban Macro LOS Margin 15 dB

☒ Penetration Loss

Rx Antenna Gain 0 dB SINR 15 dB

Noise Figure 5 dB Calculate

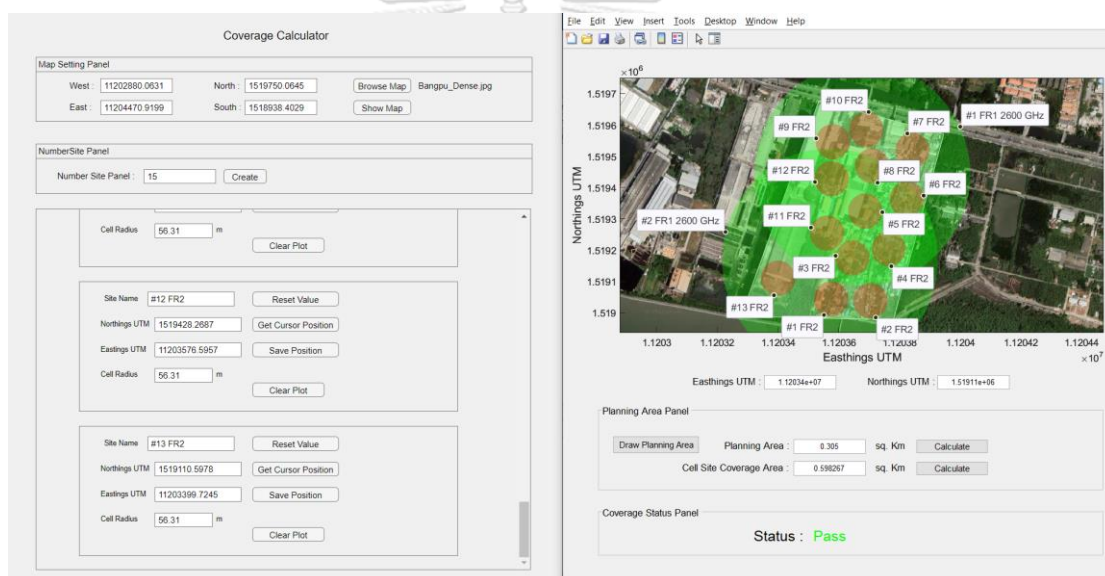
EIRP 30 dBm Receiver Sensitivity -67.9794 dBm

Cell Radius 45.9338 m

รูปที่ 31 Cell Radius ของสถานีฐานของ 6G ในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

| Coverage 5G FR1 | Coverage 5G FR2 | Coverage 6G | Calculate quantity of base station |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------------|
| Traffic Model | | | |
| Total Download Data Rate Usage | 11 Gbps | Requirement Download Usage | 13.2 Gbps |
| Total Upload Data Rate Usage | 5.6 Gbps | Requirement Upload Usage | 6.72 Gbps |
| Demand Factor | 1.2 | <button>Calculate</button> | |
| Coverage | | | |
| Cell Radius of 5G FR1 | 355.2 m | Coverage of 5G FR1 | 0.3964 sq.km |
| Cell Radius of 5G FR2 | 56.31 m | Coverage of 5G FR2 | 0.009961 sq.km |
| Cell Radius of 6G | 45.93 m | Coverage of 6G | 0.006627 sq.km |
| <button>Calculate Coverage</button> | | | |
| Quantity of base station | | | |
| No. of site 5G FR1 | 2 | No. of site 6G | 0 |
| No. of site 5G FR2 | 13 | <button>Calculate</button> | |

รูปที่ 32 จำนวนของสถานีฐานย่านความถี่ FR1 และ FR2 และ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง



รูปที่ 33 ตำแหน่งของสถานีฐานบนพื้นที่ Urban ตัวอย่าง

จากผลการจำลองวางสถานีฐานในพื้นที่ Urban ตัวอย่าง ครอบคลุมสถานีฐานในการส่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้โดยใช้งานสถานีฐานในย่านความถี่ FR1 โดยเลือกวางในจุดที่สามารถทำให้ได้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดได้ และการเลือกวางสถานีฐานโดยใช้งานในย่านความถี่ FR2 โดยวางในพื้นที่ที่มีคนอาศัยและใช้งานเป็นจำนวนมาก เพื่รองรับให้สามารถใช้งานได้เพียงพอ ในพื้นที่ตัวอย่างนี้ไม่เลือกใช้งานสถานีฐานของ 6G เนื่องจากใช้ อัตราข้อมูลจากสถานีฐานในย่านความถี่ FR2 ได้เพียงพอแล้ว หากใช้งานสถานีฐานของ 6G จะได้ อัตราข้อมูลที่สามารถใช้ได้มากเกินไปจนจำเป็นและทำให้ผู้ให้บริการต้องลงทุนในการติดตั้งสถานีฐาน ของ 6G เพิ่ม

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้พิกัดในการติดตั้งสถานีฐานในย่านความถี่ FR1 คือ

- (1519439.3503 N° UTM, 11203692.6081 E° UTM)
- (1519199.2502 N° UTM, 11203572.7921 E° UTM)

พิกัดในการติดตั้งสถานีฐานในย่านความถี่ FR2 คือ

- (1519570.4819 N° UTM, 11203677.3933 E° UTM)
- (1519511.3803 N° UTM, 11203561.3810 E° UTM)
- (1519428.2687 N° UTM, 11203576.5957 E° UTM)
- (1519454.1257 N° UTM, 11203683.0989 E° UTM)
- (1519515.0742 N° UTM, 11203820.0314 E° UTM)
- (1519361.7795 N° UTM, 11203801.0130 E° UTM)
- (1519313.7595 N° UTM, 11203643.1602 E° UTM)
- (1519178.9340 N° UTM, 11203730.6449 E° UTM)
- (1519274.9740 N° UTM, 11203485.3074 E° UTM)
- (1519177.0871 N° UTM, 11203599.4178 E° UTM)
- (1519058.8839 N° UTM, 11203711.6265 E° UTM)
- (1519110.5978 N° UTM, 11203399.7245 E° UTM)
- (1519051.4962 N° UTM, 11203563.2829 E° UTM)

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลลัพธ์ของวิทยานิพนธ์

ในบทนี้จะวิเคราะห์ถึงผลลัพธ์จากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว และการวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว โดยวิเคราะห์พื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban ขนาด 0.2252 km^2 และ Urban ขนาด 0.305 km^2 เป็นพื้นที่ในการวิเคราะห์ผล

4.1 วิเคราะห์พื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban

ผลลัพธ์จากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว และการวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว โดยใช้พื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban ขนาด 0.2252 km^2 เทียบเคียงกับพื้นที่ของศูนย์การค้าย่านสยามสแควร์ ซึ่งอัตราข้อมูลในพื้นที่โดยเผื่อค่า Demand Factor 1.2 เท่า เพื่อรองรับในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานมากจำนวนมาก คือ 734.3 Gbps Downlink และ 309.8 Gbps Uplink ผลลัพธ์การจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน ได้ผลดังรูปที่ 23 ผลการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว ดังรูปที่ 34 ผลการจำลองวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว ดังรูปที่ 35 โดยสรุปผลลัพธ์การจำลองวางแผนโครงข่ายในตารางที่ 22

| Coverage 5G FR1 | | Coverage 5G FR2 | | Coverage 6G | | Calculate quantity of base station | |
|---------------------------------|------------|----------------------------|----------------|-------------|--|------------------------------------|--|
| Traffic Model | | | | | | | |
| Total Download Data Rate Usage | 670.9 Gbps | Requirement Download Usage | 805.1 Gbps | | | | |
| Total Upload Data Rate Usage | 257 Gbps | Requirement Upload Usage | 308.4 Gbps | | | | |
| Demand Factor | 1.2 | | | Calculate | | | |
| Coverage | | | | | | | |
| Cell Radius of 5G FR1 | 272 m | Coverage of 5G FR1 | 0.2324 sq.km | | | | |
| Cell Radius of 5G FR2 | 45.57 m | Coverage of 5G FR2 | 0.006524 sq.km | | | | |
| Cell Radius of 6G | 0 m | Coverage of 6G | 0 sq.km | | | | |
| Calculate Coverage | | | | | | | |
| Quantity of base station | | | | | | | |
| No. of site 5G FR1 | 0 | No. of site 6G | 0 | | | | |
| No. of site 5G FR2 | 612 | | | | | | |
| Calculate | | | | | | | |

รูปที่ 34 จำนวนของสถานีฐานของระบบ 5G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban

The screenshot shows a software interface for network planning. It has four tabs: 'Coverage 5G FR1', 'Coverage 5G FR2', 'Coverage 6G', and 'Calculate quantity of base station'. The 'Calculate quantity of base station' tab is active.

Traffic Model

| | | | |
|--------------------------------|------------|----------------------------|------------|
| Total Download Data Rate Usage | 670.9 Gbps | Requirement Download Usage | 805.1 Gbps |
| Total Upload Data Rate Usage | 257 Gbps | Requirement Upload Usage | 308.4 Gbps |
| Demand Factor | 1.2 | <button>Calculate</button> | |

Coverage

| | | | |
|-------------------------------------|---------|--------------------|----------------|
| Cell Radius of 5G FR1 | 0 m | Coverage of 5G FR1 | 0 sq km |
| Cell Radius of 5G FR2 | 0 m | Coverage of 5G FR2 | 0 sq km |
| Cell Radius of 6G | 39.59 m | Coverage of 6G | 0.004924 sq km |
| <button>Calculate Coverage</button> | | | |

Quantity of base station

| | | | |
|--------------------|---|----------------------------|----|
| No. of site 5G FR1 | 0 | No. of site 6G | 58 |
| No. of site 5G FR2 | 0 | <button>Calculate</button> | |

รูปที่ 35 จำนวนของสถานีฐานของระบบ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban

ตารางที่ 22 ผลลัพธ์จากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว และ การวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว โดยใช้พื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban ขนาด 0.2252 km²

| | จำนวนสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR1 | จำนวนสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 | จำนวนสถานีฐาน 6G | จำนวนสถานีฐานทั้งหมดที่ต้องติดตั้ง |
|--|----------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|
| การจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน | 2 | 0 | 11 | 13 |
| การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว | 0 | 612 | 0 | 612 |
| การวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว | 0 | 0 | 58 | 58 |

จากผลลัพธ์ข้างต้น การจำลองวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียวจะใช้งานสถานีฐานของ 5G ในย่านความถี่ FR2 เป็นจำนวนมากถึง 612 สถานีฐาน เนื่องจากพื้นที่ให้บริการต้องการใช้อัตราข้อมูลที่สูงมาก เมื่อเทียบกับความสามารถในการรับ - ส่งของสถานีฐานของ 5G ในย่านความถี่ FR2 อยู่ที่ 1723.9 Mbps Downlink และ 473.0 Mbps Uplink ทำให้ต้องใช้งานสถานีฐานเป็นจำนวนมาก และจะลด Cell Radius ของแต่ละสถานีฐานลงเหลือ 15 m ซึ่งคิดเป็นระยะครอบคลุมของสถานีฐานได้ 0.0007 km² ทำให้ได้ระยะครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 0.432 km² ซึ่งได้ระยะครอบคลุมที่เพียงพอกับพื้นที่ให้บริการทั้งหมดแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งสถานีฐานของ 5G ในย่าน

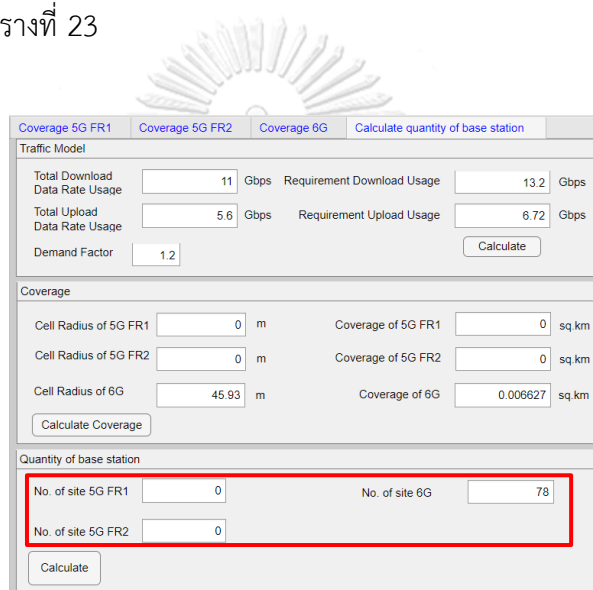
ความถี่ FR1 ทำให้การวางแผนโครงข่ายโดยใช้เพียงแต่ 5G จะต้องใช้ต้นทุนสูงมากในการติดตั้งสถานีฐาน

การจำลองวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียวจะใช้งานสถานีฐานของ 6G เป็นจำนวนมากถึง 58 สถานีฐาน เนื่องจาก Cell Radius ของแต่ละสถานีฐานของ 6G อยู่ที่ 39.6 m โดยการจะติดตั้งสถานีฐานให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการจำเป็นต้องติดตั้งสถานีฐานเป็นจำนวนมากและได้อัตราข้อมูลโดยรวมมากเกินความจำเป็นถึง 9 เท่าเมื่อเทียบกับอัตราข้อมูลรวมสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ซึ่งการวางแผนโครงข่ายโดยใช้เพียงแต่โครงข่าย 6G เพื่อให้รองรับการใช้งานจะได้ผลรวมของอัตราข้อมูลรวมของสถานีฐานที่เกินความจำเป็น และต้องใช้ทุนสูงในการติดตั้งสถานีฐานจำนวนมาก

ผลลัพธ์การจำลองวางแผนโครงข่ายที่ดีที่สุดจะเป็นการใช้งานโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน จะใช้งานสถานีฐานรวมทั้งสิ้นเพียง 13 สถานีฐาน โดยจะแบ่งการใช้งานสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR1 2 สถานี และสถานีฐาน 6G 11 สถานี ซึ่งสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR1 สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดได้และใช้สถานีฐาน 6G ติดตั้งเพิ่มในพื้นที่ให้บริการเพื่อให้รองรับปริมาณข้อมูลได้อย่างเพียงพอสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ซึ่งการเลือกใช้งานสถานีฐานของ 6G แทนการเลือกใช้งานสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 เนื่องจากระยะครอบคลุมสถานีฐานของทั้ง 2 สถานีฐานมีระยะใกล้เคียงกันมาก Cell Radius ของสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 45.57 m สถานีฐานของ 6G 39.59 m ซึ่ง Cell Radius ของสถานีฐาน 6G สั้นกว่า 5.98 m หรือ คิดเป็นระยะครอบคลุมคือ 0.0016 km² แต่ให้อัตราข้อมูลที่สูงกว่ามากและจะเห็นว่าเลือกติดตั้งสถานีฐานโดยใช้สถานีฐาน 5G เพียงอย่างเดียว และการใช้งานสถานีฐาน 6G เพียงอย่างเดียวผลลัพธ์การติดตั้งสถานีฐานจะต้องติดตั้งสถานีฐานเป็นจำนวนมาก การเลือกใช้งานการวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน ยังช่วยลดจำนวนการติดตั้งสถานีฐานลงไปเป็นอย่างมากถึง 554 สถานีฐาน และการนำระบบ 6G เข้ามาใช้งานร่วมกับ 5G จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและตอบโจทย์เรื่องความสามารถการรองรับบริการต่าง ๆ ที่มีความต้องการการใช้งานเพิ่มขึ้นในอนาคตได้เช่น Holographic-Type Communication (HTC), Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) และ Extended Reality (XR) เป็นต้น เนื่องจากบริการเหล่านี้จำเป็นต้องใช้อัตราข้อมูลที่สูงมาก การนำระบบ 6G มาใช้จะทำให้ให้บริการเหล่านี้ได้เนื่องจาก 6G เป็นโครงข่ายที่สามารถให้อัตราข้อมูลสูงถึง 1 Tbps และทำให้ผู้ให้บริการโครงข่ายประหยัดต้นทุนในการติดตั้งสถานีฐานเพื่อรองรับบริการที่เพิ่มขึ้นได้เป็นอย่างมาก

4.2 วิเคราะห์พื้นที่ตัวอย่าง Urban

ผลลัพธ์จากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว และ การวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว โดยใช้พื้นที่ตัวอย่าง Urban ขนาด 0.305 km^2 เทียบเคียงกับพื้นที่ชุมชนอยู่อาศัยในตำบลบางปู จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ในพื้นที่โดยเผื่อค่า Demand Factor 1.2 เท่า คือ 19.3 Gbps Downlink และ 6.3 Gbps Uplink ผลลัพธ์การจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน และ ผลการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว ได้ผลลัพธ์เหมือนกันแสดงดังรูปที่ 32 ผลการจำลองวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว ดังรูปที่ 36 โดยสรุปผลลัพธ์การจำลองวางแผนโครงข่ายในตารางที่ 23



| Coverage 5G FR1 Coverage 5G FR2 Coverage 6G Calculate quantity of base station | | | |
|--|----------|----------------------------|----------------|
| Traffic Model | | | |
| Total Download Data Rate Usage | 11 Gbps | Requirement Download Usage | 13.2 Gbps |
| Total Upload Data Rate Usage | 5.6 Gbps | Requirement Upload Usage | 6.72 Gbps |
| Demand Factor | 1.2 | <button>Calculate</button> | |
| Coverage | | | |
| Cell Radius of 5G FR1 | 0 m | Coverage of 5G FR1 | 0 sq km |
| Cell Radius of 5G FR2 | 0 m | Coverage of 5G FR2 | 0 sq km |
| Cell Radius of 6G | 45.93 m | Coverage of 6G | 0.006627 sq km |
| <button>Calculate Coverage</button> | | | |
| Quantity of base station | | | |
| No. of site 5G FR1 | 0 | No. of site 6G | 78 |
| No. of site 5G FR2 | 0 | <button>Calculate</button> | |

รูปที่ 36 จำนวนของสถานีฐานของระบบ 6G ที่จะติดตั้งในพื้นที่ตัวอย่าง Urban

ตารางที่ 23 ผลลัพธ์จากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียว และการวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียว โดยใช้พื้นที่ตัวอย่าง Urban ขนาด 0.305 km^2

| | จำนวนสถานี ฐาน 5G ย่าน ความถี่ FR1 | จำนวนสถานี ฐาน 5G ย่าน ความถี่ FR2 | จำนวนสถานี ฐาน 6G | จำนวนสถานี ฐานทั้งหมดที่ จะต้องติดตั้ง |
|---|--|--|----------------------|--|
| การจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน | 2 | 13 | 0 | 15 |
| การวางแผนโครงข่าย 5G เพียง โครงข่ายเดียว | 2 | 13 | 0 | 15 |
| การวางแผนโครงข่าย 6G เพียง โครงข่ายเดียว | 0 | 0 | 78 | 78 |

จากผลลัพธ์ข้างต้น การจำลองวางแผนโครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียวจะใช้งานสถานีฐานของ 6G เป็นจำนวนมากถึง 78 สถานีฐาน โดย Cell Radius ของแต่ละสถานีฐานของ 6G อยู่ที่ 45.9 m การจะติดตั้งสถานีฐานให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการจำเป็นต้องติดตั้งสถานีฐานเป็นจำนวนมาก และยังได้อัตราข้อมูลโดยรวมมากเกินไปจนความจำเป็นถึง 450 เท่าเมื่อเทียบกับอัตราข้อมูลรวมสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ ซึ่งการวางแผนโครงข่ายโดยใช้เพียงแต่โครงข่าย 6G เพื่อให้รองรับการใช้งานจะได้ผลรวมของอัตราข้อมูลของสถานีฐานมากเกินไปจนความจำเป็น และต้องใช้ทุนสูงในการติดตั้งสถานีฐานจำนวนมาก

การจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน กับการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G เพียงระบบเดียวจะใช้งานสถานีฐานรวมเท่ากันคือ 15 สถานีฐาน แบ่งเป็นสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR1 2 สถานี และสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 13 สถานี โดยผลการวางแผนโครงข่ายของทั้ง 2 แบบได้ผลลัพธ์เท่ากันเนื่องจากการจำลองวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกันจะเลือกติดตั้งสถานีฐานโดยใช้งานสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR1 เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ก่อน และติดตั้งสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 เพื่อให้รองรับปริมาณการใช้งาน หลังจากนั้นจะทำการลดจำนวนสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 ลงและเพิ่มสถานีฐาน 6G แต่จากพื้นที่นี้จะได้ผลลัพธ์การติดตั้งสถานีฐาน 6G 1 สถานีทดแทนสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 ทั้งหมด ซึ่งจากผลลัพธ์จะทำให้ได้ปริมาณการใช้งานอัตราข้อมูลโดยรวมที่เพียงพอ แต่ไม่สอดคล้องกับขนาดของพื้นที่ให้บริการรวมทั้งหมด เนื่องจากสถานีฐานของ 6G ให้อัตราข้อมูลอยู่ที่ $111939.8 \text{ Mbps Downlink}$ และ $30715.2 \text{ Mbps Uplink}$ ซึ่งเพียงพอ

สำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ แต่ระยะครอบคลุมเพียงแค่ 0.0049 km² ซึ่งน้อยกว่าขนาดพื้นที่ให้บริการถึง 60 เท่า พื้นที่นี้จึงตัดสินใจที่จะติดตั้งสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR1 2 สถานี และสถานีฐาน 5G ย่านความถี่ FR2 13 สถานี เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการและได้ปริมาณการใช้งานอัตราข้อมูลโดยรวมที่เพียงพอ

4.3 วิเคราะห์ผลการวางแผนโครงข่าย

จากการวิเคราะห์พื้นที่ตัวอย่างทั้ง Dense Urban และ Urban จะได้ผลว่าการนำโครงข่าย 6G เข้ามาใช้งานร่วมกับ 5G จะใช้งานในพื้นที่ที่ต้องการใช้งานบริการที่มีอัตราข้อมูลที่สูงและผู้คนหนาแน่น เช่น พื้นที่ย่านศูนย์การค้า ศูนย์ประชุม และมหาวิทยาลัย เป็นต้น เพื่อให้รองรับปริมาณการใช้งานที่เพียงพอ ซึ่งเป็นพื้นที่แบบ Dense Urban ส่วนพื้นที่อยู่อาศัยที่ไม่ใช้งานบริการที่ใช้อัตราข้อมูลสูงยังสามารถใช้งานโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียวเป็นหลักได้ซึ่งเป็นพื้นที่แบบ Urban เพื่อประหยัดต้นทุนในการติดตั้งสถานีฐานเพิ่มขึ้นของผู้ให้บริการ โดยผลจากการวางแผนโครงข่ายบนพื้นที่ตัวอย่าง Dense Urban ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ต้องการใช้อัตราข้อมูลสูง จะมีการนำสถานีฐานของ 6G เข้ามาติดตั้งร่วมกันสถานีฐานของ 5G เพื่อให้ได้จำนวนสถานีฐานที่จะต้องติดตั้งคุ่มค่าที่สุดและผลจากการวางแผนโครงข่ายบนพื้นที่ตัวอย่าง Urban ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ต้องการใช้อัตราข้อมูลไม่สูงมากนักจะสามารถใช้งานสถานีฐานของ 5G ก็เพียงพอแล้ว โดยผลของวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปที่การใช้งานโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกันซึ่งเป็นการใช้งานโครงข่ายในพื้นที่แบบ Dense Urban



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

โครงข่าย 6G เป็นโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโครงข่าย 5G ถึง 10 เท่า ทั้งทางด้าน Data rate, Connectivity Density, Reliability, Latency และอีกหลาย ๆ ด้าน โดยใช้งานความถี่สูงในย่าน THz ซึ่งทำให้มี Peak Data rate สูงถึง 1 Tbps ทำให้เหมาะกับการใช้งานสำหรับ Use Cases ที่ต้องการใช้อัตราข้อมูลที่สูงเช่น Holographic Type Communication (HTC), Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) และ Extended Reality (XR) เป็นต้น แต่ 6G ไม่มีการใช้งานในย่านความถี่ต่ำเหมือน 5G ในย่าน FR1 ซึ่งทำให้ 6G ให้ยังบกพร่องทางด้านระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการโดยรวม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้คิดค้นแนวทางการประเมินและออกแบบระบบการติดตั้ง สถานีฐานของระบบ 5G และ 6G ให้มีระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดและมีอัตราการข้อมูลรวมทุกบริการเพียงพอทุกบริการเพื่อรองรับการใช้งานบริการสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ และบริการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในอนาคต

จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 6 การเลือกวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ตัวอย่างแบบ Dense Urban ซึ่งเป็นพื้นที่เมืองที่มีความหนาแน่นสูงและมีความต้องการใช้อัตราข้อมูลที่สูง จะเลือกใช้การวางแผนโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน เพื่อให้ได้มีระยะครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดและมีอัตราการข้อมูลรวมเพียงพอสำหรับบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ การเลือกวางแผนโครงข่ายในพื้นที่ตัวอย่างแบบ Urban ซึ่งเป็นพื้นที่แบบชุมชนไม่หนาแน่นมากนักและไม่ต้องการใช้อัตราข้อมูลที่สูง จะเลือกใช้การวางแผนโครงข่าย 5G เพียงโครงข่ายเดียวได้ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นให้มีการใช้งานโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกันในพื้นที่แบบ Dense Urban เพื่อให้ได้ผลที่คุ้มค่าที่สุดและยังทำให้ผู้ให้บริการเครือข่ายประหยัดต้นทุนในการติดตั้งสถานีฐานเป็นจำนวนมาก โดยยังใช้งานสถานีฐาน 5G ที่มีอยู่เดิมและติดตั้งสถานีฐานแบบ 6G เพิ่มเติมเพื่อให้รองรับอัตราข้อมูลรวมอย่างเพียงพอ หากเลือกติดตั้งแต่สถานีฐานแบบ 6G ซึ่งเป็นการติดตั้งสถานีฐานใหม่ทั้งหมดจะทำให้ต้องลงทุนเพิ่มเป็นอย่างจำนวนมาก และยังส่งผลถึงผู้ใช้บริการที่ต้องจ่ายค่าบริการที่สูงขึ้น

สำหรับการใช้งานโครงข่าย 6G ไม่สามารถใช้งานเพียงโครงข่ายเดียวได้ ควรใช้งานร่วมกับโครงข่าย 5G เนื่องจากการใช้งานโครงข่าย 6G มีพื้นที่ครอบคลุม ที่น้อยกว่า 5G มากทำให้การจะใช้แต่โครงข่าย 6G เพียงโครงข่ายเดียวต้องใช้งบลงทุนเป็นจำนวนมาก

วิทยานิพนธ์นี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ได้เสนอไว้คือ สามารถคำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ พื้นที่ครอบคลุม จำนวนของสถานีฐานทั้ง 5G และ 6G แสดงตำแหน่งและพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานในพื้นที่ที่กำหนดลงบนแผนที่ได้ ประโยชน์ของวิทยานิพนธ์

ฉบับนี้คือ สามารถนำวิธีการประเมินและออกแบบไปใช้วางแผนโครงข่าย 5G และ 6G เบื้องต้นได้ สำหรับช่วงต้นของการเปลี่ยนผ่านของยุค 5G และ 6G คำนวณอัตราข้อมูลรวมสำหรับการบริการ บรอดแบนด์เคลื่อนที่ พื้นที่ครอบคลุม และ จำนวนของสถานีฐานในการตั้งสถานีฐาน 5G และ 6G สำหรับขยายพื้นที่การให้บริการ โดยสามารถออกแบบเพื่อให้ใช้งานทั้งโครงข่าย 5G และ 6G ร่วมกัน ได้

ค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณอัตราข้อมูลและระยะครอบคลุมสถานีฐานของทั้งโครงข่าย 5G และ 6G สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าเองได้ทั้งหมด ได้แก่ Carrier Frequency, Bandwidth, Transmit Power, Transmit Gain, Antenna Height, Receive Gain, SINR, Noise Figure, Margin, Subcarrier Spacing, Bandwidth, Ratio Downlink:Uplink, Modulation Scheme, MIMO Layer และ Scaling Factor ซึ่งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ควรกำหนดค่าที่อยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐาน และค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ บริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ที่พิจารณาในการศึกษาวิจัย ประกอบด้วยบริการรับชมวิดีโอความละเอียดสูง (Full HD, 4K และ 8K), Virtual Reality (VR), Extended Reality (XR), Holographic-Type Communication (HTC) และ Web Browsing สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าเองได้ทั้งหมด ได้แก่ จำนวนผู้ใช้งาน Downlink, Downlink Take Rate, อัตรา Downlink ต่อผู้ใช้งาน, จำนวนผู้ใช้งาน Uplink, Uplink Take Rate และ อัตรา Uplink ต่อผู้ใช้งาน

การต่อยอดงานในอนาคตในส่วนของการคำนวณอัตราข้อมูลและระยะครอบคลุมสถานีฐานของ 6G เมื่อมีการกำหนดมาตรฐานสำหรับ 6G เพิ่มเติมควรนำเข้ามาพิจารณาเพิ่มและปรับปรุงให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องยิ่งขึ้นไป ในส่วนการออกแบบการติดตั้งโครงข่ายสามารถนำปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยออกแบบงานโครงข่ายจะสามารถได้ผลลัพธ์ในการตัดสินใจในการเลือกติดตั้งโครงข่ายได้มากขึ้น

สำหรับข้อเสนอแนะทางด้านการพัฒนาโปรแกรม สิ่งที่ควรพิจารณาและดำเนินการต่อการลดข้อจำกัดของโปรแกรม เช่น เพิ่มการรับค่าของจำนวนสำหรับการบริการบรอดแบนด์เคลื่อนที่ จำนวนของสถานี และปรับปรุงหน้า User Interface ของโปรแกรม Coverage Calculator, Capacity Calculator และ Plot Coverage ให้อยู่ในรูปเดียวกัน

บรรณานุกรม

- [1] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, "The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey," 2021.
- [2] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed., and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," 2022.
- [3] B. Han, W. Jiang, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, "An Abstracted Survey on 6G: Drivers, Requirements, Efforts, and Enablers," 2021.
- [4] E. A. Kadir, R. Shubair, S. K. A. Rahim, M. Himdi, M. R. Kamarudin, and S. L. Rosa, "B5G and 6G: Next Generation Wireless Communications Technologies, Demand and Challenges," 2021.
- [5] K. David and H. Berndt, "6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G?," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 72-80, 2018.
- [6] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55-61, 2020.
- [7] Nokia Siemens Networks, "Radio Planning Capacity LTE RPESS Radio Planning Capacity."
- [8] M. Agiwal, H. Kwon, S. Park, and H. Jin, "A Survey on 4G-5G Dual Connectivity: Road to 5G Implementation," *IEEE Access*, 2021.
- [9] H. M. Tun, "Radio Network Planning and Optimization for 5G Telecommunication System Based on Physical Constraints," *Journal of Computer Science Research*, vol. 3, no. 1, 2021.
- [10] ITU-R M.2083-0, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," 2015.
- [11] ITU, "Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges," 2018.
- [12] 3GPP TS 38.104 version 15.2.0 Release 15, "5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception," 2018.

- [13] U. Rehfuss, "5G for people and things 700 MHz band as key to success for wide-area 5G services ", 2017.
- [14] A. Shafie, N. Yang, C. Han, J. M. Jornet, M. Juntti, and T. Kurner, "Terahertz Communications for 6G and Beyond Wireless Networks: Challenges, Key Advancements, and Opportunities," *IEEE Network*, pp. 1-8, 2022.
- [15] Y. Qi, "USE CASE ANALYSIS," *Quantifying Data Rate and Bandwidth Requirements for Immersive 5G Experience. IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2016.
- [16] M. Hurbis-Cherrier, "NTSC BROADCAST STANDARDS," in *Voice & Vision ed. 1*, 2007.
- [17] H. Zhang, "VR 360 Video Requirements," *Wireless Access to Ultimate Virtual Reality 360-Degree Video at Home*, 2019.
- [18] E. Bastug, "Toward Interconnected VR," *Toward Interconnected Virtual Reality: Opportunities, Challenges, and Enablers, IEEE Communications Magazine*, 2017.
- [19] A. C. Cirik, "eXtended Reality (XR)," 2020.
- [20] I. F. Akyildiz and H. Guo, "Wireless Extended Reality (XR):Challenges and New Research Directions."
- [21] X. Xu, Y. Pan, P. P. M. Y. Lwin, and X. Liang, "3D Holographic Display and Its Data Transmission Requirement ".
- [22] Federal Communications Commission, "Broadband Speed Guide," 2020.
- [23] C. D. Alwis *et al.*, "Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research," 2021.
- [24] 3GPP TS 38.211 version 15.2.0 Release 15, "5G;NR;Physical channels and modulation," 2019.
- [25] 3GPP TS 38.212 version 15.2.0 Release 15, "5G;NR;Multiplexing and channel coding," 2018.
- [26] 3GPP TS 38.306 version 15.3.0 Release 15, "5G;NR;User Equipment (UE) radio access capabilities," 2020.
- [27] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, "กฎระเบียบเกี่ยวกับการบริหารคลื่นความถี่," 2021.
- [28] 3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 15, "5G;Study on channel model for

- frequencies from 0.5 to 100 GHz," 2018.
- [29] E. Peralta, "5G NR REFERENCE CHANNELS AND SYSTEM PARAMETERIZATION," *5G New Radio Base-Station Sensitivity and Performance*, 2018.
- [30] O. Y. K. A. N. Al-Falahy, "Millimetre wave frequency band as a candidate spectrum for 5G network architecture: A survey," *Physical Communication*, 2018.
- [31] S. J. M. C. Kestwal, L. S. Garia, "Prediction of Rain Attenuation and Impact of Rain in Wave Propagation at Microwave Frequency for Tropical Region (Uttarakhand, India)," *Hindawi Publishing Corporation*, 2014.
- [32] M. C. Kestwal, S. Joshi, and L. S. Garia, "Prediction of Rain Attenuation and Impact of Rain in Wave Propagation at Microwave Frequency for Tropical Region (Uttarakhand, India)," *Hindawi Publishing Corporation*, 2014.
- [33] คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, "หลักเกณฑ์การอนุญาตและกำกับดูแลให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นใช้คลื่นความถี่," 2011.
- [34] C. Han, Y. Wu, Z. Chen, and X. Wang, "Terahertz Communications (TeraCom): Challenges and Impact on 6G Wireless Systems," 2019.
- [35] D. Serghiou, M. Khalily, T. W. C. Brown, and R. Tafazolli, "Terahertz Channel Propagation Phenomena, Measurement Techniques and Modeling for 6G Wireless Communication Applications: A Survey, Open Challenges and Future Research Directions," 2022.
- [36] P. Tang *et al.*, "Channel Measurement and Path Loss Modeling from 220 GHz to 330 GHz for 6G Wireless Communications," 2021.
- [37] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, "6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques," *IEEE Network*, pp. 70-75, 2019.
- [38] W. S. M. B. M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, 2020.
- [39] J. Tan and L. Dai, "THz Precoding for 6G: Challenges, Solutions, and Opportunities," *IEEE Wireless Communications*, pp. 1-8, 2022.
- [40] สำนักยุทธศาสตร์สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม. (2019) จำนวนชั่วโมงการใช้อินเทอร์เน็ตเฉลี่ยต่อวันตามพื้นที่. รายงานผลการสำรวจพฤติกรรมผู้ใช้อินเทอร์เน็ตในประเทศไทย ปี 2562.
- [41] สำนักยุทธศาสตร์สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม.

- (2022) ภาพรวมพฤติกรรมการใช้อินเทอร์เน็ตในประเทศไทย. รายงานผลการสำรวจพฤติกรรมผู้ใช้อินเทอร์เน็ตในประเทศไทย ปี 2565.
- [42] Frost & Sullivan, "การคาดการณ์อนาคตเทคโนโลยีดิจิทัลประเทศไทย 2035."
- [43] กลุ่มสถิติประชากร กองสถิติสังคม. "จำนวนประชากรจากสำมะโนต่อพื้นที่ (ความหนาแน่นของประชากร)." https://data.go.th/dataset/os_01_00014 (accessed 27/4, 2023).
- [44] ส่วนบริหารและพัฒนาเทคโนโลยีการทะเบียน สำนักบริหารการทะเบียน. "จำนวนประชากรในประเทศไทย แยกตามพื้นที่." <https://www.data.go.th/th/dataset/statbyyear> (accessed 27/4, 2023).





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ศุภชาติ จี้นคง

วัน เดือน ปี เกิด

10 ตุลาคม 2541

วุฒิการศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่อยู่ปัจจุบัน

10 ซ.ร่มเกล้า42 แขวงคลองสามประเวศ เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ผลงานตีพิมพ์

S. Chinkhong, P. Kaewplung, “A Design Approach for 5G-NR Radio Planning Using Both FR1 and FR2 on Any Selected Outdoor and Indoor Areas,” International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), SINGAPORE, 5th - 8th February 2023.

