

วิธีการแทรกสอดการทำงานระหว่าง HAPS และเครือข่ายภาคพื้นดิน  
Interference Coordination Method for Integrated  
HAPS-Terrestrial Networks

6410451199      พศวัต ถิ่นกาญจน์วัฒนา  
6410451431      สรณสิริ หงษ์ษา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.ชาคริต วัชรโรภาส  
ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2 ตุลาคม 2023

# สารบัญ

1	บทนำ ที่มาของปัญหา	1
2	ผลงานที่เกี่ยวข้อง	2
2.1	ผลงานจริงที่เกิดจากการทดลองใช้ HAPS	2
2.2	การประยุกต์ใช้ ICM	3
3	การทำงานร่วมกันระหว่าง HAPS และ Terrestrial Networks	4
3.1	Non-overlapping Areas (Case a)	4
3.2	Overlapping Areas Between HAPS and Terrestrial Coverage (Case b)	4
4	ผลลัพธ์ประสิทธิภาพการทำงานระหว่าง HAPS และ Terrestrial Networks	5
4.1	วิเคราะห์การนำวิธี ICM เข้าไปใช้ในเทคโนโลยี HAPS	5
4.2	การปรับใช้	6
4.3	การประยุกต์ใช้ ICM	6
5	สรุป	7
6	ความเห็นของนิสิต	7

# 1 บทนำ ที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน แนวคิดของระบบเครือข่ายเหนือพื้นดิน (Non Terrestrial Network - NTN) ถูกพัฒนาและนำเสนอออกมาอย่างหลากหลาย และถูกนำไปปรับใช้กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายสัญญาณเครือข่ายเช่นดาวเทียมโดยแบ่งตามระดับวงโคจรได้แก่ ระดับต่ำ (Low-Earth-Orbit - LEO) / ระดับกลาง (Medium-Earth-Orbit - MEO) และระดับสูงที่สุด (Geostationary-Earth-Orbit - GEO) โดยภายในระบบ NTN มีองค์ประกอบสำคัญคือเทคโนโลยีเครือข่ายยานพาหนะไร้นักขับ (High Altitude Platform Station - HAPS) เนื่องจากมีข้อดีคือปรับใช้ง่าย การตอบสนองรวดเร็วและครอบคลุมในวงกว้าง เพื่อควบคุมและรักษาสภาพของเครือข่ายเหล่านี้ การออกแบบระบบเครือข่ายรูปแบบใหม่ที่เกิดจากการรวม NTN และระบบเครือข่ายภาคพื้นดิน (Terrestrial Network - TN) จึงเป็นสิ่งที่ Developer และ Network Engineer ให้ความสนใจ

หลายงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงความท้าทายในการพัฒนาเทคโนโลยี HAPS เช่นการปรับโครงสร้างตัวยานพาหนะ ปรับปรุงระบบกักเก็บและส่งพลังงาน รวมไปถึงระบบระบายความร้อน อีกทั้งยังมีการร่วมมือในภาคธุรกิจหลายองค์กร เพื่อเร่งการพัฒนา HAPS จำเป็นต้องได้รับความร่วมมือจากหลายองค์กร จากงานวิจัย [1] ได้นำเสนอแนวทางการนำเทคโนโลยี HAPS มาปรับใช้ในชีวิตประจำวัน แบ่งออกได้เป็นหลายสถานการณ์ได้แก่

- เครือข่ายแบบเฉพาะ โดยผู้ให้บริการเครือข่ายจะสามารถเข้าถึงตัวอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Platform) ได้แต่เพียงผู้เดียว และจะใช้ Platform ดังกล่าวเพื่อให้บริการสัญญาณเครือข่ายแบบไร้สายแก่ลูกค้า
- ใช้งานเครือข่ายร่วมกัน โดย HAPS อาจถูกนำมาใช้เป็นการร่วมทุนของผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือที่เข้าร่วม
- หน่วยงานเอกชนรับหน้าที่เป็น Host ทำให้ HAPS เป็น Service Platform สาธารณะประเภทหนึ่ง ทุกคนสามารถเข้าถึงได้และมีการเรียกเก็บค่าธรรมเนียมตามปกติ
- หน่วยงานรัฐเป็นผู้ควบคุม
- แบบผสม (Hybrid) โดยผู้ให้บริการมือถือเป็น Host และมอบสิทธิการเข้าถึง Platform กับผู้ให้บริการรายอื่นแทน

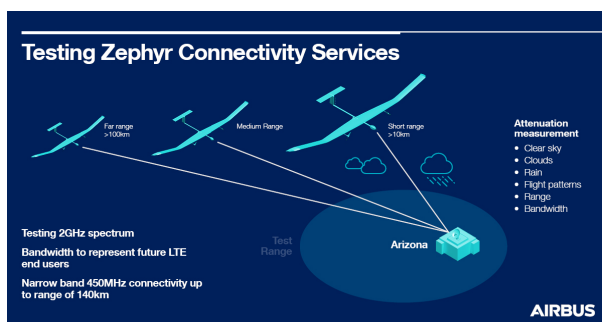
แต่ระหว่างขั้นตอนในการพัฒนาย่อมมีปัญหาหลายประเภทเกิดขึ้นเช่นกัน เช่น ปัญหาในการจัดสรรทรัพยากร สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการรวมสองระบบที่แตกต่างกัน ปัญหาในการจัดสรรทรัพยากรมีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดระหว่างการกระจายสัญญาณรับส่งข้อมูลแบบไดนามิก กล่าวคือ ในความเป็นจริงแล้วปริมาณการรับส่งข้อมูลนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา โดยมีสาเหตุมาจากเทคโนโลยี HAPS เนื่องจากระบบบางส่วนยังไม่สามารถควบคุมให้เสถียรได้ สำหรับเรื่องสัญญาณรบกวนเป็นอีกหนึ่งในปัญหาสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพ HAPS เนื่องจากสัญญาณเครือข่ายที่ HAPS เชื่อมต่อกับ Platform บนโลกนั้นเป็นเพียงสัญญาณไป-กลับเท่านั้น สัญญาณรบกวนจึงเป็นสาเหตุให้เกิดความล่าช้าของเครือข่ายที่ HAPS ควบคุมอยู่

ซึ่งในรายงานฉบับนี้ได้นำเสนอถึงการแก้ไขปัญหาลำดับนี้ด้วยวิธีการแทรกคลื่นสัญญาณอีกประเภทหนึ่ง (Interference Coordination Method) เข้าไประหว่างคลื่นสัญญาณของ HAPS กับ สถานีเครือข่ายภาคพื้นดิน และต้องคำนึงถึงการกระจายปริมาณรับส่งข้อมูลเป็นหลัก เนื่องจากในแต่ละพื้นที่มีจำนวนสัญญาณเครือข่ายประเภทไม่เท่ากัน โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความถี่ของสัญญาณทับซ้อน ผู้ใช้งานเครือข่ายอาจได้รับผลกระทบจากการรบกวนภายในระบบ จึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบขณะที่ดำเนินการแทรกคลื่นสัญญาณเข้าไปด้วยระมัดระวังเพื่อแก้ไขปัญหาลำดับนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีแทรกคลื่นสัญญาณนั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการจัดสรรทรัพยากรแบบเดิม โดยสังเกตที่ความเปลี่ยนแปลงของปริมาณทรัพยากร

## 2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ผลงานจริงที่เกิดจากการทดลองใช้ HAPS

จากงานนำเสนอ [3] กล่าวถึงความร่วมมือของบริษัท Airbus, NTT, DOCOMO, JSAT ในการส่งเสริมงานวิจัยและการพาณิชย์ ในธุรกิจ Space RAN (Radio Access Network) โดยเริ่มต้นจากการติดตั้งระบบ HAPS ในเครื่องบิน ชื่อว่า Zephyr ของบริษัท Airbus บินในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) และเริ่มการทดลองจริงโดยส่งคลื่นวิทยุไปสถานีเครือข่ายภาคพื้นดินด้วยความถี่ UHF - 2GHz, 450MHz เพื่อวัดความสามารถในการกระจายสัญญาณ การทดลองนี้ใช้ระยะเวลา 18 วัน จึงสรุปผลการทดลองได้ว่าที่สัญญาณความถี่ 450MHz นั้นมีระยะการเชื่อมต่อสูงสุดอยู่ที่ 140 กม. 1



แหล่งที่มาของภาพ [3]

รูปที่ 1: Testing Zephyr Connectivity Services

จากงานวิจัย [1] นำเสนอถึงความหลากหลายของ HAPS ที่ปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการในด้านพื้นที่ที่สัญญาณครอบคลุม ด้วยเทคโนโลยีเสาอากาศแบบใหม่ช่วยให้กำหนดทิศทางไปยังพื้นที่เป้าหมายที่ต้องการ กลายเป็นเครือข่าย ประเภทหนึ่งชื่อว่า Fixed wireless access (FWA) เป็นเครือข่ายสัญญาณไร้สายประเภทหนึ่งที่ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงแก่ประชาชนภาคครัวเรือน ในทางทฤษฎีแล้ว FWA ผ่าน HAPS สามารถปลดล็อกขีดจำกัดการถ่ายโอนข้อมูลสูงสุด (Capacity) และความล่าช้า (Latency) ที่ต่ำกว่าเครือข่ายจากดาวเทียม ทำให้อาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือกนอกจากเครือข่ายสัญญาณแบบไฟเบอร์ (Fibre-based) 2



แหล่งที่มาของภาพ [2]

รูปที่ 2: Fixed wireless Internet compare with Satellite Internet

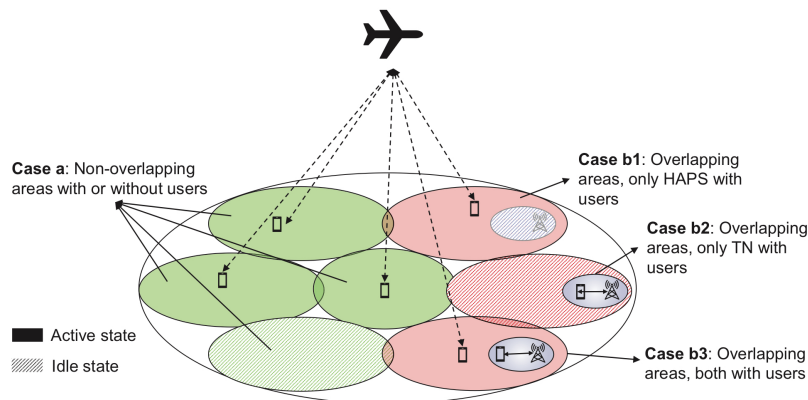
## 2.2 การประยุกต์ใช้ ICM

จากงานวิจัยของ [4] นำเสนอถึงวิธีการแทรกคลื่นสัญญาณ (Interference Coordination Method - ICM) เข้าไประหว่างคลื่นสัญญาณของ HAPS กับ สถานีเครือข่ายภาคพื้นดิน โดยมีเงื่อนไขต่อไปนี้

- คำนึงถึงการกระจายปริมาณรับส่งข้อมูลเป็นหลัก
- ประสิทธิภาพที่ได้โดยเทียบจากปริมาณพลังงาน, ทรัพยากรที่สูญเสียไปและปริมาณข้อมูลที่เคลื่อนที่ผ่านเครือข่าย ณ เวลาที่กำหนด (Traffic Load)

### 3 การทำงานร่วมกันระหว่าง HAPS และ Terrestrial Networks

เทคนิค interference สามารถใช้เพื่อประสานการทำงานระหว่าง HAPS และ TN ได้ นั่นก็เพื่อ utilize ทรัพยากรทั้งบน HAPS และ TN ให้มากขึ้น โดยรูปแบบของการประสานการทำงานนั้นเป็นไปตามรูปที่ 3



รูปที่ 3: Different cases based on the traffic distribution and the deployment of integrated system

หากพิจารณาการกระจาย traffic และความเป็นไปได้ในการที่จะมี TN ที่พร้อมให้ประสานการทำงานอยู่ใน coverage area จะสามารถแบ่งการทำงานได้เป็นหลายกรณี ดังต่อไปนี้

#### 3.1 Non-overlapping Areas (Case a)

กรณีที่เฉพาะ HAPS เท่านั้นที่ให้บริการใน coverage area

#### 3.2 Overlapping Areas Between HAPS and Terrestrial Coverage (Case b)

กรณีที่ทั้ง HAPS และ TN อยู่ใน coverage area ซึ่งในกรณีนี้จะต้องพิจารณาความพร้อมในการให้บริการของทั้ง HAPS และ TN โดยสามารถแบ่งแยกเป็นกรณีย่อยได้ดังนี้

**Traffic only in HAPS system (Case b1)** HAPS ที่ทำงานเพื่อให้บริการ coverage area และ TN base station ใน coverage area นั้นอยู่ห่างไกลกัน เนื่องจากไม่มี traffic เกิดขึ้นใน TN base stations จึงสามารถตั้งเป็นสถานะ idle ได้เพื่อประหยัดการใช้พลังงาน และลด interference ระหว่าง HAPS และ TN

**Traffic only in TN (Case b2)** ไม่มี traffic เกิดขึ้นใน HAPS ใน coverage area และไม่เกิด interference จาก HAPS ไปสู่ TN ใน coverage area แต่ยังคงต้องพิจารณา interference จาก HAPS อื่น ๆ

**Traffic only in both HAPS and TN (Case b3)** เกิด interference ทั้งจาก HAPS อื่น ๆ และระหว่าง HAPS กับ TN ใน coverage area ซึ่งเป็นสาเหตุให้จะต้องออกแบบการประสานการทำงานระหว่าง HAPS และ TN อย่างระมัดระวัง

## 4 ผลลัพธ์ประสิทธิภาพการทำงานระหว่าง HAPS และ Terrestrial Networks

### 4.1 วิเคราะห์การนำวิธี ICM เข้าไปใช้ในเทคโนโลยี HAPS

สาเหตุของสัญญาณรบกวนนั้น เกิดจากข้อจำกัดปริมาณการส่งข้อมูลใน 1 ชุดคำสั่ง (Protocol) HAPS กระจายสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่วงกว้าง จึงทำให้ไม่สามารถแยกแยะความถี่ในแต่ละคลื่นสัญญาณได้ การสื่อสารระหว่างสัญญาณจาก HAPS ไปยังสถานีภาคพื้นดินหลัก (Base Station - BS) และอุปกรณ์รับสัญญาณของผู้ใช้งานทั่วไป เช่น Smartphone (User Equipment - UE) <sup>4</sup>

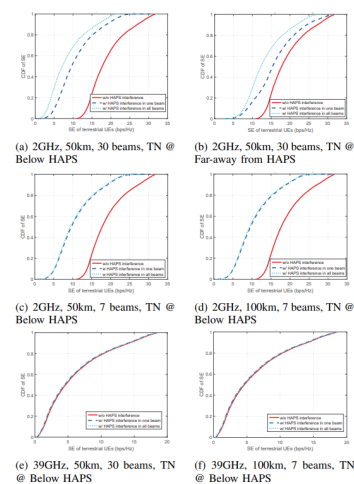
- Type 1 - เกิดสัญญาณรบกวนเป็นหลักที่ฝั่ง UE
- Type 2 - เกิดสัญญาณรบกวนเล็กน้อยที่ฝั่ง H-UE
- Type 3 - สัญญาณ Uplink เกิดสัญญาณรบกวนเล็กน้อยที่ฝั่ง H-UE แสดงให้เห็นว่าการปรับทิศทางส่งสัญญาณส่งผลต่อการลดสัญญาณรบกวน
- Type 4 - การส่งสัญญาณจากสถานีหลัก(Base Station - BS) ไป HAPS Uplink

ผลการทดลองทั้ง 4 Type สรุปได้ว่าสัญญาณที่ส่งจากสถานีหลักไปยัง HAPS ด้วยการปรับมุมและทิศทางสามารถช่วยลดโอกาสที่จะเกิดสัญญาณรบกวนและลดปริมาณทรัพยากรที่ใช้ และประเมินผลออกมาเป็นกราฟดังนี้ <sup>5</sup>

กราฟแสดงถึงผลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนจาก HAPS ไปยังสถานีภาคพื้นดิน (TN) และอุปกรณ์ของผู้ใช้ (UE) ในความถี่และรัศมีครอบคลุมที่แตกต่างกัน (2 GHz, 39 GHz, 0 km., 100 km.) โดยมีตัวชี้วัดคือประสิทธิภาพของสเปกตรัม(Spectral Efficiency - SE) วัดปริมาณข้อมูลที่ส่งผ่านแบนด์วิธ (bandwidth) ภายในระบบ

ANALYSIS FOR INTER-SYSTEM INTERFERENCE		
Interference type	Illustration	Feature
HAPS downlink to terrestrial receiver		Dominant interference due to the wide coverage of HAPS and omni-directional antennas at the UE side.
Terrestrial transmitter to HAPS downlink		Little interference due to the large elevation angle for receiving at H-UE side.
HAPS uplink to terrestrial receiver		Little interference due to the large elevation angle for transmitting at H-UE side.
Terrestrial transmitter to HAPS uplink		Little interference due to the small elevation angle for transmitting at terrestrial BS/UEs.

รูปที่ 4: Analysis for Inter-System Interference



รูปที่ 5: Downlink SE performance in terrestrial network (TN) with or without the interference from HAPS downlink.

## 4.2 การปรับใช้

แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณี Baseline 1 โดย HAPS และเครือข่ายภาคพื้นดิน (TN) ใช้ทรัพยากรเดียวกันโดยไม่คำนึงถึงปริมาณการรับส่งข้อมูล หมายความว่าทรัพยากรนั้นไม่ได้มีการจัดสรรแบบไดนามิกตามปริมาณการรับส่งข้อมูล ส่วนในกรณี Baseline 2 HAPS และเครือข่ายภาคพื้นดินสัญญาณได้มีการจัดสรรทรัพยากรที่ความถี่ที่ 5 และ 15 MHz แสดงให้เห็นว่าทั้งสองระบบมีการจัดสรรทรัพยากรคงที่แต่คนละวิธี ทำให้การนำวิธีแทรกคลื่นสัญญาณ (ICM) มาปรับใช้ช่วยแก้ปัญหาในเรื่องทรัพยากรและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในทั้งสองเครือข่าย จากรูป 6 HAPS ในกรณี Baseline 2 ให้ผลลัพธ์ที่สูงกว่า Baseline 1 สำหรับผู้ใช้ที่อยู่ในขอบเขตของ HAPS ในขณะที่ Baseline 1 ให้ผลลัพธ์ได้ดีกว่าสำหรับผู้ใช้ที่อยู่นอกขอบเขตของ HAPS โดยการทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุดใน layer 2 และ layer 3 จากรูป 7 การส่งข้อมูลด้วยความถี่ 5-color ใน HAPS มีประสิทธิภาพในการทำงานคล้ายกับความถี่แบบสูงสุด

โดยรวมแล้วเราสรุปผลในทาง technical terms ออกมาได้ดังตารางต่อไปนี้ 1

Parameters	Values or assumptions
Carrier frequency	2 GHz
Total bandwidth	20 MHz
Number of HAPS cells	30 cells
Layer number of HAPS cells and layout (Note: Cells with same distance from the center are defined in one layer.)	4 layers with, 1 cell for layer-1, 8 cells for layer-2, 9 cells for layer-3, 12 cells for layer-4
Radius of HAPS coverage	50 km
Number of users	Uniformly distributed in [0,30000]
Number of terrestrial BSs per HAPS cell	Uniformly distributed in [0,6]

ตารางที่ 1: Evaluation Assumptions

## 4.3 การประยุกต์ใช้ ICM

จากงานวิจัยของ [4, Interference Coordination Method for Integrated HAPS-Terrestrial Networks] นำเสนอถึงวิธีการแทรกคลื่นสัญญาณ (Interference Coordination Method - ICM) เข้าไประหว่างคลื่นสัญญาณของ HAPS กับ สถานีเครือข่ายภาคพื้นดิน โดยมีเงื่อนไขต่อไปนี้

- คำนึงถึงการกระจายปริมาณรับส่งข้อมูลเป็นหลัก
- ประสิทธิภาพที่ได้โดยเทียบจากปริมาณพลังงาน, ทรัพยากรที่เสียไปและปริมาณข้อมูลที่เคลื่อนที่ผ่านเครือข่าย ณ เวลาที่กำหนด (Traffic Load)



## 5 สรุป

อ้างอิงจาก [4, Interference Coordination Method for Integrated HAPS-Terrestrial Networks]

การใช้งาน HAPS และ TN ร่วมกันจะต้องคำนึงถึง interference ระหว่างระบบ วิธีที่มีการนำเสนอคือ ให้พิจารณาการกระจาย traffic load และความพร้อมในการให้บริการของ HAPS และ TN ใน coverage area

- พื้นที่ที่ไม่มีการ overlap กันระหว่าง HAPS และ TN จะไม่มีการประสานการทำงาน
- พื้นที่ที่มีการ overlap กันระหว่าง HAPS และ TN จะมีการให้บริการโดย (ก.) HAPS หรือ TN หรือ (ข.) ทั้ง HAPS และ TN โดยพิจารณาจากปัจจัยที่กำหนดจะมีการกำหนดขึ้นเพื่อให้เกิด throughput สูงสุด

พื้นที่ที่ไม่มี traffic load จะเปลี่ยนสถานะของ HAPS beam หรือ TN base station ไปเป็น idle เพื่อประหยัดการใช้พลังงาน

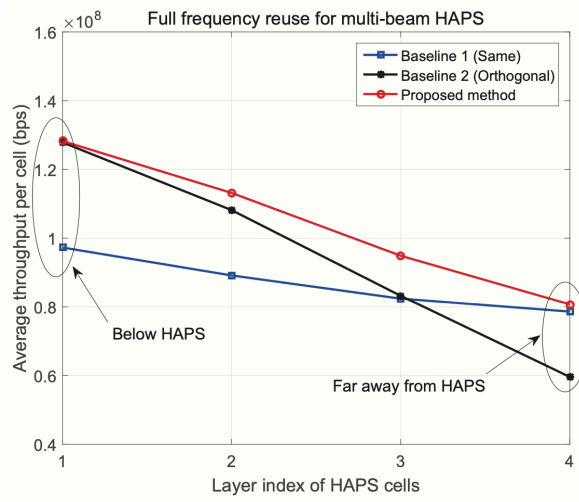
## 6 ความเห็นของนิสิต

**พศวัต ถิ่นกาญจน์วัฒนา:**

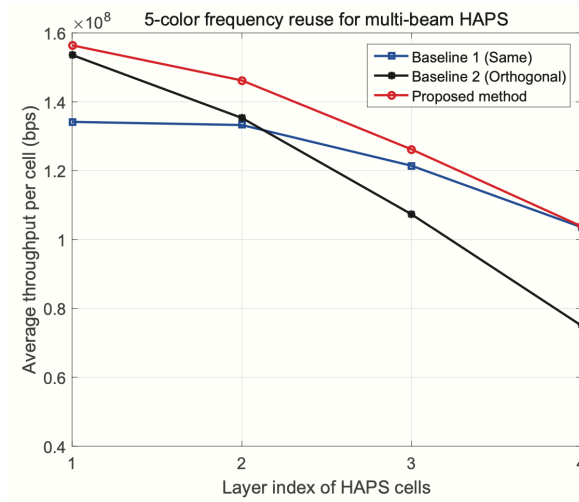
การแทรกสอดการทำงานระหว่าง HAPS และ TN ช่วยให้ distribute work load ระหว่าง platform ทั้งสองได้ ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพและ optimize traffic ให้เหมาะสมกับสถานะปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากผลลัพธ์ประสิทธิภาพตามรูปที่ 6 และ 7 throughput จากการใช้วิธีแทรกสอดจะมากกว่าวิธีอื่น ๆ เมื่อ users อยู่ในระยะที่ไม่ใกล้หรือห่างไกลจาก HAPS นั้นอาจหมายถึง หากจะ adopt วิธีนี้โดยให้ users ในทุก ๆ บริเวณของ coverage area ได้รับ service อย่างเท่าเทียมกัน การ distribute HAPS อาจต้องพิจารณาเพิ่มจำนวนของ UAV ใน coverage area เดียวกัน ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนในการ implement เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

**สรณสิริ หงษ์ษา:**

จากการศึกษาเทคโนโลยี HAPS และวิธี Interference Coordination Method ทำให้ผมคิดว่าการนำวิธีนี้ไปใช้งานจริงภายในระบบเครือข่ายนั้นมีความเป็นไปได้ โดยสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับแรกคือการลดทรัพยากรที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลแต่ละครั้ง ถัดมาเป็นเรื่องของการจัดการสัญญาณรบกวน หากสามารถแก้ไขสองปัญหานี้ได้ ไม่เพียงแต่ HAPS แต่ประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายเหนือพื้นดิน (NTN) ทั้งหมดจะก้าวหน้ายิ่งขึ้น และอาจต่อยอดไปถึงการพัฒนาเครือข่ายสัญญาณ 5G และ 6G ในอนาคต



รูปที่ 6: Average throughput per cell versus different layer index of HAPS cells with full frequency reuse in HAPS



รูปที่ 7: Average throughput per cell versus different layer index of HAPS cells with 5-color frequency reuse in HAPS

## บรรณานุกรม

- [1] GSMA. *High Altitude Platform Systems. Tower in the Skies. version 2.0.* 2022.
- [2] Maddy Hogan. *Fixed Wireless Internet vs. Satellite Internet - Which is best for rural areas?* EarthLink, LLC. 2023. URL: <https://www.earthlink.net/blog/wireless-internet-vs-satellite-internet/>.
- [3] Yoshihisa Kishiyama. *HAPS Strategy of Space Compass.* Space Compass Corporation / NTT DOCOMO, INC. 2022. URL: [https://und.edu/research/soars/\\_files/presentations/spacecompass.pdf](https://und.edu/research/soars/_files/presentations/spacecompass.pdf).
- [4] Wenjia Liu and others. "Interference Coordination Method for Integrated HAPS-Terrestrial Networks". in *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*: 2022, pages 1–6. DOI: [10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860546](https://doi.org/10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860546).

## สารบัญรูป

1	Testing Zephyr . . . . .	2
2	wireless vs satellite . . . . .	2
3	Different interference cases . . . . .	4
4	Interference Type . . . . .	5
5	HAPS compare with downlink . . . . .	5
6	Average throughput with full frequency reuse in HAPS . . . . .	8
7	Average throughput with 5-color frequency reuse in HAPS . . . . .	8

## สารบัญตาราง

1	Evaluation Assumptions . . . . .	6
---	----------------------------------	---