

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 มีองค์ประกอบสำคัญคือเทคโนโลยีเครือข่ายยานพาหนะรัศมีสูง (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 อีกทั้งยังมีการร่วมมือในภาคธุรกิจในหลายองค์กร 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

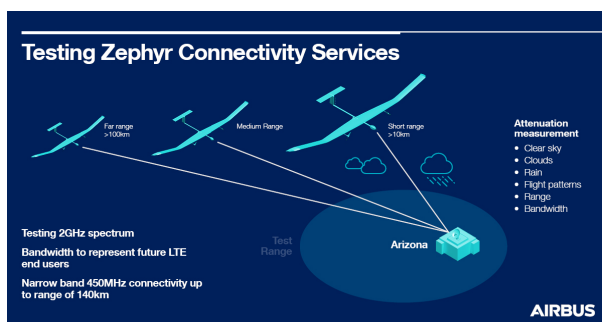
แต่ระหว่างขั้นตอนในการพัฒนาย่อมมีปัญหาหลายประเภทเกิดขึ้นเช่นกัน เช่น ปัญหาในการจัดสรรทรัพยากร สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการรวมสองระบบที่แตกต่างกัน ปัญหาในการจัดสรรทรัพยากรมีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดระหว่างการกระจายสัญญาณรับส่งข้อมูลแบบไดนามิก กล่าวคือ ในความเป็นจริงแล้วปริมาณการรับส่งข้อมูลนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา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

ซึ่งในรายงานฉบับนี้ได้นำเสนอถึงการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ด้วยวิธีการแทรกคลื่นสัญญาณอีกประเภทหนึ่ง (Interference Coordination Method) เข้าไประหว่างคลื่นสัญญาณของ HAPS กับ สถานีเครือข่ายภาคพื้นดิน และต้องคำนึงถึงการกระจายปริมาณรับส่งข้อมูลเป็นหลัก เนื่องจากในแต่ละพื้นที่มีจำนวนสัญญาณเครือข่ายประเภทไม่เท่ากัน โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความถี่ของสัญญาณทับซ้อน ผู้ใช้งานเครือข่ายอาจได้รับผลกระทบจากการรบกวนภายในระบบ จึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบขณะที่ดำเนินการแทรกคลื่นสัญญาณเข้าไประยะมั่วหวั่งเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ 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

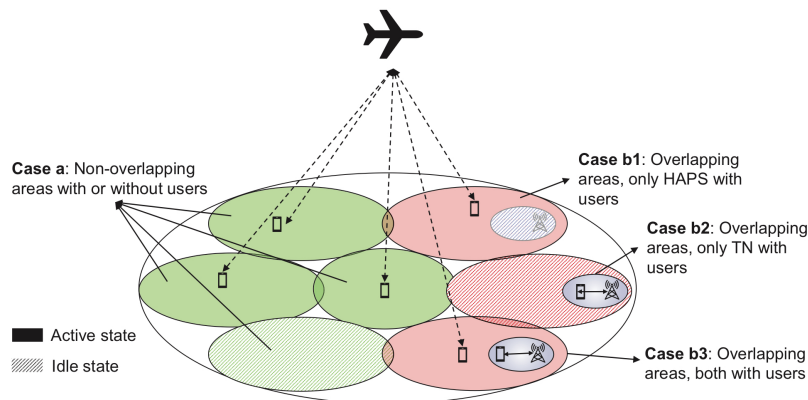
2.2 การประยุกต์ใช้ ICM

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 กระจายสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่กว้าง จึงทำให้ไม่สามารถแยกแยะความถี่ในแต่ละคลื่นสัญญาณได้ การสื่อสารระหว่างสัญญาณจาก HAPS ไปยังสถานีภาคพื้นดินหลัก (Base Station - BS) และอุปกรณ์รับสัญญาณของผู้ใช้งานทั่วไป เช่น Smartphone (User Equipment - UE) 4

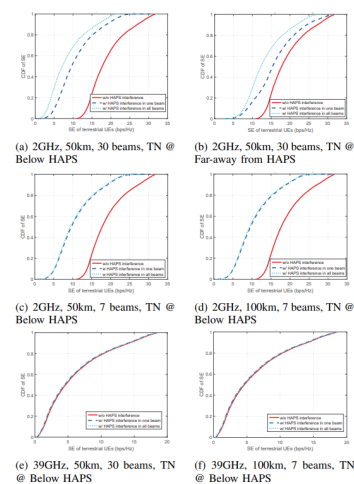
- Type 1 - เกิดสัญญาณรบกวนเป็นหลักที่ฝั่ง UE
- Type 2 - เกิดสัญญาณรบกวนเล็กน้อยที่ฝั่ง H-UE
- Type 3 - สัญญาณ Uplink เกิดสัญญาณรบกวนเล็กน้อยที่ฝั่ง H-UE แสดงให้เห็นว่าการปรับทิศทางส่งสัญญาณส่งผลต่อการลดสัญญาณรบกวน
- Type 4 - การส่งสัญญาณจากสถานีหลัก(Base Station - BS) ไป HAPS Uplink

ผลการทดลองทั้ง 4 Type สรุปได้ว่าสัญญาณที่ส่งจากสถานีหลักไปยัง HAPS ด้วยการปรับมุมและทิศทางสามารถช่วยลดโอกาสที่จะเกิดสัญญาณรบกวนและลดปริมาณทรัพยากรที่ใช้ และประเมินผลออกมาเป็นกราฟดังนี้ 5

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

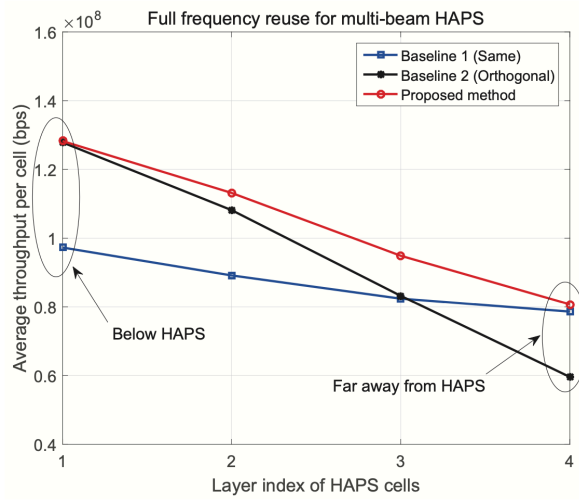
6 ความเห็นของนิสิต

พศวัต ถิ่นกาญจน์วัฒนา:

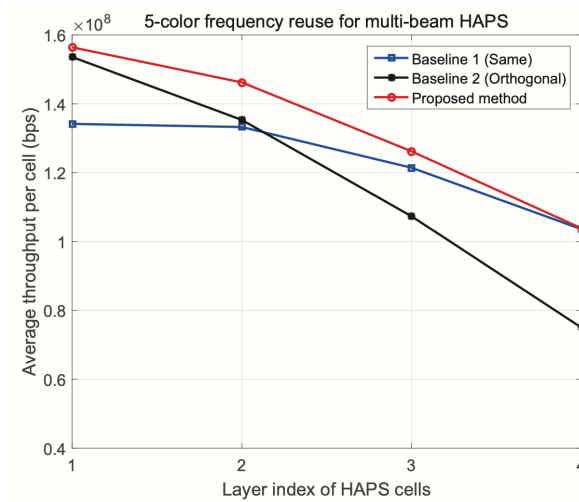
การแทรกสอดการทำงานระหว่าง HAPS และ TN ช่วยให้ distribute work load ระหว่าง platform ทั้งสองได้ ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพและ optimize traffic ให้เหมาะสมกับสถานะปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากผลลัพธ์ประสิทธิภาพตามรูปที่ 6 และ 7 throughput จากการใช้วิธีแทรกสอดจะมากกว่าวิธีอื่น ๆ เมื่อ users อยู่ในระยะที่ไม่ใกล้หรือห่างไกลจาก 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.
- [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
---	----------------------------------	---