

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	5
4.3	การประยุกต์ใช้ ICM	6
5	สรุป	7
6	ความเห็นของนิสิต	7

1 บทนำ ที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน แนวคิดของระบบเครือข่ายเหนือพื้นดิน(Non Terrestrial Network - NTN) ถูกพัฒนาและนำเสนอออกมาอย่างหลากหลาย และถูกนำไปปรับใช้กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายสัญญาณเครือข่ายเช่นดาวเทียม โดยแบ่งตามระดับวงโคจรได้แก่ ระดับต่ำ(Low-Earth-Orbit - LEO)/ ระดับกลาง(Medium-Earth-Orbit - MEO) ระดับสูงที่สุด(Geostationary-Earth-Orbit - GEO) โดยภายในระบบ NTN มีองค์ประกอบสำคัญคือเทคโนโลยีเครือข่ายยานพาหนะไร้คนขับ (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 อีกทั้งยังมีการร่วมในภาคธุรกิจในหลายองค์กร 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

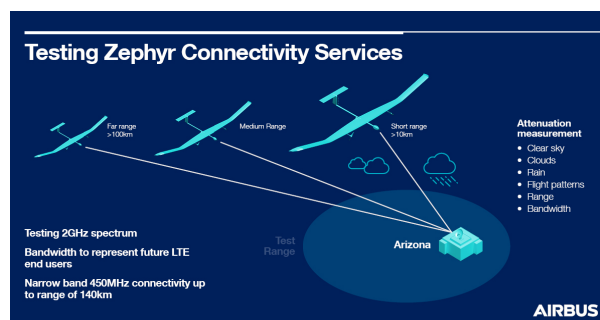
แต่ระหว่างขั้นตอนในการพัฒนาย่อมมีปัญหาหลายประเภทเกิดขึ้นเช่นกัน เช่น ปัญหาในการจัดสรรทรัพยากร สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการรวมสองระบบที่แตกต่างกัน ปัญหาในการจัดสรรทรัพยากรมีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดระหว่างการกระจายสัญญาณรับส่งข้อมูลแบบไดนามิก กล่าวคือ ในความเป็นจริงแล้วปริมาณการรับส่งข้อมูลนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา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

ซึ่งในรายงานฉบับนี้ได้นำเสนอถึงการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ด้วยวิธีการแทรกคลื่นสัญญาณอีกประเภทหนึ่ง (Interference Coordination Method) เข้าไประหว่างคลื่นสัญญาณของ HAPS กับ สถานีเครือข่ายภาคพื้นดิน และต้องคำนึงถึงการกระจายปริมาณรับส่งข้อมูลเป็นหลัก เนื่องจากในแต่ละพื้นที่มีจำนวนสัญญาณเครือข่ายประเภทไม่เท่ากัน โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความถี่ของสัญญาณทับซ้อน ผู้ใช้งานเครือข่ายอาจได้รับผลกระทบจากการรบกวนภายในระบบ จึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบขณะที่ดำเนินการแทรกคลื่นสัญญาณเข้าไประยะมั่วๆเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีแทรกคลื่นสัญญาณนั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการจัดสรรทรัพยากรแบบเดิม โดยสังเกตที่ความเปลี่ยนแปลงของปริมาณทรัพยากร

2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลงานจริงที่เกิดจากการทดลองใช้ HAPS

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



รูปที่ 1: Testing Testing Zephyr Connectivity Services

จากงานวิจัย [High Altitude Platform Systems: Towers in the Skies] นำเสนอถึงความหลากหลายของ HAPS ที่ปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการในด้านพื้นที่ที่สัญญาณครอบคลุม ด้วยเทคโนโลยีเสาอากาศแบบใหม่ช่วยให้กำหนดทิศทางไปยังพื้นที่เป้าหมายที่ต้องการ กลายเป็นเครือข่าย ประเภทหนึ่งชื่อว่า Fixed wireless access (FWA) เป็นเครือข่ายสัญญาณไร้สาย ประเภทหนึ่งให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงแก่ประชาชนภาคครัวเรือน ในทางทฤษฎีแล้ว FWA ผ่าน HAPS สามารถปลดล็อคขีดจำกัดการถ่ายโอนข้อมูลสูงสุด(Capacity)และความล่าช้า(Latency)ที่ต่ำกว่าเครือข่ายจากดาวเทียม ทำให้อาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือกนอกจากเครือข่ายสัญญาณแบบไฟเบอร์(Fibre-based) 2



รูปที่ 2: Fixed wireless Internet compare with Satellite Internet

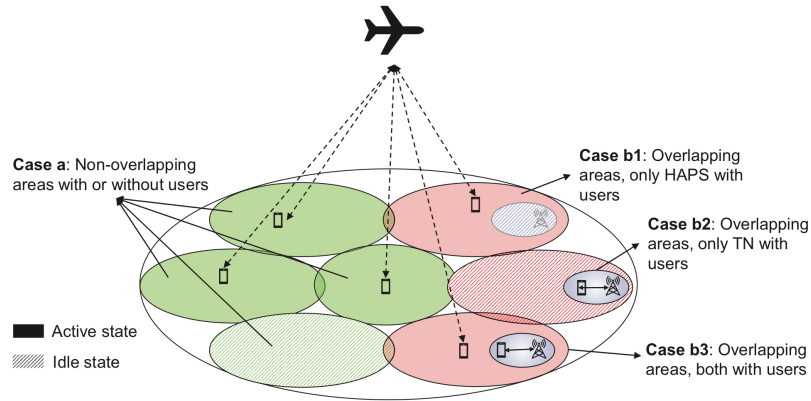
2.2 การประยุกต์ใช้ ICM

จากงานวิจัยของ [3] 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)

กรณีที่มีเฉพาะ HAPS เท่านั้นที่ให้บริการใน coverage area

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

กรณีที่มีทั้ง 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 เกิดจากข้อจำกัด ปริมาณการส่งข้อมูลใน 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

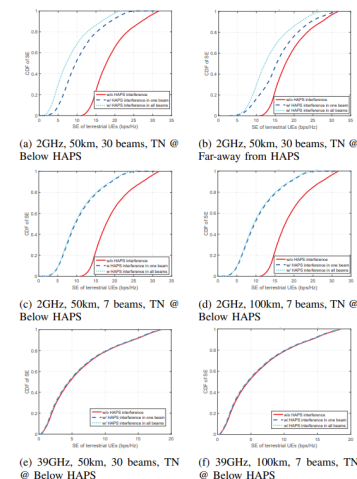
4.2 การปรับใช้

แบ่งออกได้เป็นหลายกรณี ได้แก่

Case a - ทดลองในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณซ้อน(Non-overlapping areas) ผลที่ได้คือจะไม่เกิดสัญญาณรบกวนภายในระบบ ทำให้วิธีการเชื่อมต่อแบบเดิมโดย HAPS เป็นศูนย์กลาง(HAPS Stand-Alone) ยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ

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 BSs/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.

Case b1 - ทดลองในพื้นที่ที่มีสัญญาณทับซ้อนแต่ไม่มีการรับส่งข้อมูลเครือข่ายภาคพื้นดิน(Overlapping area, No traffic in terrestrial systems) ผลที่ได้คือสามารถเปลี่ยนเป็นโหมด Idle เพื่อลดการใช้พลังงานและป้องกันสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ เนื่องจากระยะระหว่าง HAPS กับ User Equipment ห่างกันมาก

Case b2 - ทดลองในพื้นที่ที่มีสัญญาณทับซ้อนแต่ไม่มีการรับส่งข้อมูลทางฝั่ง HAPS(Overlapping areas, No traffic in HAPS Coverage) เมื่อเปิด HAPS beam และสัญญาณจากอุปกรณ์ของผู้ใช้(Customer premises equipment - CPE) ส่งผลในสัญญาณรบกวนระหว่าง HAPS กับ TN ลดลงอย่างมาก

Case b3 - ทดลองในพื้นที่ที่มีสัญญาณรบกวนและมีการรับส่งข้อมูลทั้งสองเครือข่าย(Both overlapping areas and traffic in HAPS with terrestrial systems) ผู้ใช้งานจะได้รับผลกระทบจากทั้งสองระบบ นอกจากนี้ใน Case b3 ยังจำแนกออกเป็น 4 Pattern หลักได้ดังต่อไปนี้ Pattern 1 -> HAPS และ TN ไม่มีการประสานระหว่างทั้งสองระบบ อาจส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนจนส่งผลให้ประสิทธิภาพและการใช้ทรัพยากรลดลง Pattern 2 -> HAPS และ TN กระจายสัญญาณเหมือนเดิม แต่ใช้วิธี Inter-Cell Interference Coordination(ICIC) เป็นอีกความเป็นไปได้ในการลดสัญญาณรบกวน Pattern 3 -> HAPS cells เปลี่ยนสถานะเป็น Idle และให้ Base Station เป็นตัวกลางหลักแทน โดย Pattern นี้ส่งผลแค่ในกรณีที่รับส่งข้อมูลใน cell ต่ำเท่านั้น Pattern 4 -> Base Station เปลี่ยนสถานะเป็น Idle และให้ HAPS จัดการในพื้นที่ที่มีสัญญาณซ้อน โดย Pattern นี้ส่งผลแค่ในกรณีที่ traffic load ใน TN น้อย

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 [3, 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 [3, 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

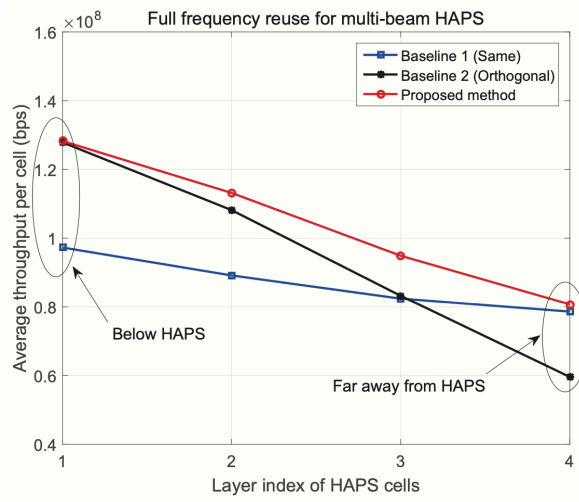
พื้นที่ที่ไม่มี traffic load จะเปลี่ยนสถานะของ HAPS beam หรือ TN base station ไปเป็น idle เพื่อประหยัดการใช้พลังงาน

6 ความเห็นของนิสิต

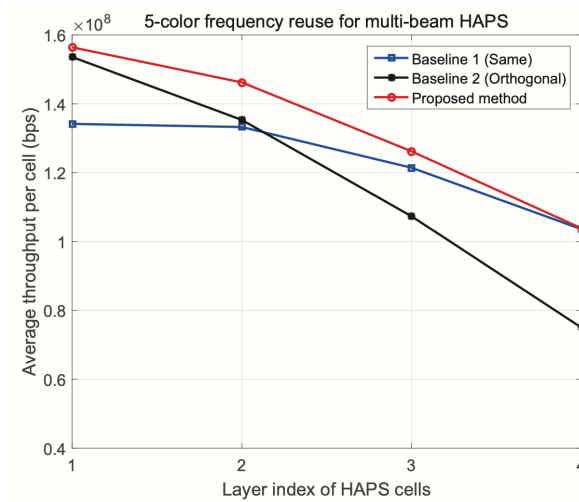
พศวัต ถิ่นกาญจน์วัฒนา:

การแทรกสอดการทำงานระหว่าง HAPS และ TN ช่วยให้ distribute work load ระหว่าง platform ทั้งสองได้ ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพและ optimize traffic ให้เหมาะสมกับสถานะปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากผลลัพธ์ประสิทธิภาพตามรูปที่ 6 และ 7 throughput จากการใช่วิธีแทรกสอดจะมากกว่าวิธีอื่น ๆ เมื่อ users อยู่ในระยะที่ไม่ใกล้หรือห่างไกลจาก HAPS นั้น อาจหมายถึง 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:



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] Yoshihisa Kishiyama. *HAPS Strategy of Space Compass.* Space Compass Corporation / NTT DOCOMO, INC. 2022. URL: https://und.edu/research/soars/_files/presentations/spacecompass.pdf.
- [3] 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
---	----------------------------------	---