OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	AI-Driven Predictive Uplink and Semantic-Aware Downlink Communications in Hierarchical Non-Terrestrial Networks
Author(s)	Minani, Frodouard
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/107048
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name (MINANI FRODOUARD)	
Title	AI-Driven Predictive Uplink and Semantic-Aware Downlink Communications in Hierarchical Non-Terrestrial Networks (階層型非地上ネットワークにおけるAI主導の予測型アップリンク通信およびセマンティックダウンリンク通信に関する研究)

Abstract of Thesis

Non-Terrestrial Networks (NTNs), comprising satellites, High-Altitude Platforms (HAPs), Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)/drones, and other aerial communication platforms, are expected to play a pivotal role in sixth-generation (6G) and beyond wireless communication systems. Among these technologies, NTNs leveraging Low Earth Orbit (LEO) satellites have attracted considerable attention due to their ability to provide wide-area coverage and ubiquitous connectivity. While NTNs enable seamless communication in remote, underserved, and highly dynamic environments, the design of efficient communication schemes capable of adapting to rapidly varying channel conditions and limited network resources remains a significant challenge. To overcome these challenges, this thesis leverages Artificial Intelligence (AI) techniques to develop intelligent communication schemes for a hierarchical NTN architecture comprising LEO satellites, HAPs, and ground users. The effectiveness of the proposed schemes is evaluated through optimization-based frameworks and performance analysis. Specifically, this thesis investigates proactive uplink traffic prediction to enable anticipatory resource management, semantic communication (SemCom) for the efficient extraction and transmission of meaningful information in downlink communications, and a hybrid communication framework that integrates conventional Bit Communication (BitCom) with SemCom to improve communication efficiency under diverse network conditions.

Following Chapters 1 and 2, which provide the research background and review related works, Chapter 3 presents a Long Short-Term Memory (LSTM)-based prediction framework for forecasting uplink communication conditions from ground users to HAPs. Using the predicted network state information, a proactive Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL)-based resource allocation scheme is developed to support fairness-aware, load-aware, and utility-driven resource optimization, with the objectives of maximizing system throughput and minimizing end-to-end latency. Evaluation results demonstrate that the proposed framework achieves approximately 93% prediction accuracy for ground user-HAP links and reduces communication latency by approximately 13% compared with conventional reactive approaches.

Next, Chapter 4 investigates downlink communications from satellite to HAPs and proposes a SemCom framework that prioritizes the extraction and transmission of meaningful information instead of raw bit-level data. To enable intelligent semantic-aware decision making, a Mixed-Action Decision Intelligent Semantic-Aware Soft Actor-Critic (MADIS-SAC) framework based on Deep Reinforcement Learning (DRL) is developed. In addition, a novel metric, termed Quality of Semantic (QoSem), is introduced and incorporated into an optimization framework to maximize semantic communication effectiveness while efficiently utilizing network resources. Evaluation results indicate that the proposed framework reduces resource consumption by approximately 50%, improves spectral efficiency by approximately 35%, and lowers communication latency by approximately 25%, demonstrating the effectiveness of semantic-aware communications in NTN downlink scenarios.

Furthermore, Chapter 5 presents a Hybrid Semantic-Bit Communication (HSBC) framework for downlink NTN transmissions, where conventional BitCom and SemCom are dynamically integrated to achieve efficient and adaptive data delivery. A novel performance metric, termed Hybrid Communication Efficiency (HCE), is proposed to jointly capture communication effectiveness, resource utilization, and transmission quality. To maximize HCE, a hierarchical DRL framework is developed, enabling intelligent communication mode selection and seamless switching between BitCom and SemCom according to channel conditions, network resource constraints, and user requirements. Evaluation results show that the proposed framework improves spectral efficiency by approximately 18%, reduces communication latency by approximately 22%, and enhances HCE by approximately 25%, demonstrating the potential of hybrid communication paradigms for future NTN systems.

Overall, the achievements of this thesis demonstrate the strong potential of AI-driven communication schemes to advance the efficiency and intelligence of future information and communication infrastructures. The proposed frameworks provide effective solutions for predictive resource management, semantic-aware communications, and adaptive hybrid communication systems in NTNs. Therefore, the contributions presented in this thesis are considered worthy of the award of the Doctor of Philosophy (Ph.D.) degree in Information Science.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（ Minani Frodouard ）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	猿渡 俊介
	副 査	教授	山口 弘純
	副 査	教授	小泉 佑揮
	副 査	教授	下西 英之
	副 査	教授	猪俣 敦夫

論文審査の結果の要旨

本論文は、低軌道（LEO）衛星、高高度プラットフォーム（HAP）及び地上端末から構成される階層型非地上系ネットワーク（Non-Terrestrial Network: NTN）を対象として、時間変動の大きい伝搬環境と限られた周波数・電力・計算資源の下で、高効率かつ公平な通信を実現するAI駆動型通信制御方式を研究したものである。上りリンクではチャネル予測に基づく資源配分、下りリンクでは意味通信及び意味通信と従来のビット通信を組み合わせたハイブリッド通信を取り上げ、深層学習及び深層強化学習による最適化方式を提案している。

第1章では、6Gに向けたNTNの役割と、衛星移動に伴うチャネル変動、長い伝搬遅延、断続的な接続、限られた搭載資源等の課題を整理している。第2章では、NTNの資源配分、チャネル予測、深層強化学習、意味通信及びハイブリッド意味・ビット通信に関する先行研究を体系的に整理し、予測、公平性、通信・計算資源、意味品質及び通信方式選択を統合的に扱う研究が不足していることを明らかにしている。

第3章では、地上端末からHAP、HAPからLEO衛星へ至る階層型上りリンクを対象として、LSTMによる将来のチャネル及びネットワーク状態予測と、マルチエージェント深層強化学習を組み合わせた資源配分方式を提案している。地上端末とHAPの接続、帯域、サブチャネル及び送信電力を共同で決定することにより、総伝送速度、遅延及び公平性を改善している。評価では約92.8%の予測精度を達成し、従来方式に比べて伝送遅延を約12.2%削減した。また、HAPからLEO衛星への上りリンクについて、Double Deep Q-Network、優先経験再生及び優先サンプリングを組み合わせたMADDQN-PP方式を提案し、HAP間の公平性、リンク負荷及びシステム効用を考慮した資源配分を実現している。

第4章では、LEO衛星からHAPへの画像下り伝送を対象として、重要な意味特徴のみを選択して伝送する意味通信方式を提案している。Vision Transformerを用いて画像から意味情報を抽出し、重要度に応じて送信対象を選択するとともに、意味伝送速度、復元精度及び処理時間を統合したQuality of Semantic（QoSem）指標を新たに定義している。さらに、意味情報選択、送信電力、帯域及び計算資源を共同最適化するMADIS-SAC方式を提案し、低SNR、狭帯域及び低電力の条件でも、従来の非意味通信方式より高い意味品質と資源利用効率を達成することを示している。

第5章では、意味通信とビット通信をチャネル状態、意味的重要度及び利用者の計算能力に応じて切り替える、2ホップのハイブリッド意味・ビット通信方式を提案している。両通信方式を統一的に評価するHybrid Communication Effectiveness（HCE）指標を定義するとともに、LEO衛星とHAPが階層的に資源配分を行うHMATD3-SBRA方式を構築している。評価の結果、固定的な意味通信又はビット通信と比較して、スペクトル効率を最大18%向上させ、遅延を最大22%削減し、HCEを10～25%改善できることを示している。

以上のように、本論文は、階層型NTNにおける予測型上りリンク制御、意味通信及びハイブリッド意味・ビット通信を、AI駆動型資源管理の観点から体系的に研究したものである。特に、予測と深層強化学習を組み合わせた資源配分、意味品質を表すQoSem、異種通信方式を統一的に評価するHCE、ならびに衛星とHAPによる階層型マルチエージェント制御に新規性が認められる。提案方式の有効性も定量的に示されており、次世代衛星通信及び6G非地上系ネットワークの発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として価値あるものと認める。