MODELLING AND ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR EFFICIENT CONTENT DISTRIBUTION IN NEXT-GENERATION CONTENT DELIVERY SOLUTIONS USING FOG-CDN

PRATEEK

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MAY 2025

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2025

MODELLING AND ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR EFFICIENT CONTENT DISTRIBUTION IN NEXT-GENERATION CONTENT DELIVERY SOLUTIONS USING FOG-CDN

by

PRATEEK

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MAY 2025

This work is dedicated to…

my daughter for her joyful presence and unconditional love …

my wife for her patience, support, and advice…

my parents for their unwavering guidance…

&

in the memory of my late maternal grandfather (Retd. Hon. Sub. Hira Lal Yadav),

whose hard work still inspires.

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis titled **Modelling and Analysis of Algorithms for Efficient Content Distribution in Next-Generation Content Delivery Solutions using Fog-CDN** submitted by **Prateek**, to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a bonafide record of his research work under my supervision.

The contents of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma.

Prof. Subrat Kar
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016
India

ACKNOWLEDGEMENTS

I express my heartfelt gratitude to the invaluable individuals and friends whose proficiency, advice, and motivation have enabled the realization of this thesis.

To begin with, I am grateful to Prof. Subrat Kar, my supervisor, for taking me under his wing during my Ph.D. journey. His guidance and mentoring were invaluable in improving my critical thinking and research skills. I distinctly remember his words, "Frame your thoughts in simple and clear words," which motivated me to excel in both research and writing skills. Even as I write this, I see what he meant. His contributions became even more evident when I transitioned to full-time academic pursuits. My heartfelt thanks to the members of my SRC committee: Prof. Sumantra Dutta Roy (Chairman), Prof. Seshan Srirangarajan, and Prof. Bhawani Shankar Panda. Their guidance and valuable inputs have contributed significantly to the depth and rigor of my thesis.

Academic Acknowledgments: My academic journey has been shaped by the invaluable contributions of numerous friends and colleagues. I extend my sincere appreciation to Dr. Ajay Yadav (super-simple! and now, my colleague), Dr. Meenakshi (a dedicated lab researcher and labmate), Dr. Dileep Baptala (sports enthusiast, hard-working, and my early research helper), Dr. Venkatesh Khammammetti (a super friend! and my first roommate in IITD) and Mr. Syed Bilal Qaisar Naqvi (an IEEE paper digger and publishing genius) for their unwavering support and camaraderie. I also want to thank Dr. Bodhibrata Mukhopadhyay, Dr. Navneet Pratap Singh (IIT Indore), Mr. Nitin Lohar, Mr. Manoj Sharma, Ms. Sonal Gupta, and Mr. Animesh Chattopadhyaya for their intellectual exchanges. A special thanks goes to Mr. Manoj Rana for his bits of help during the last years of my Ph.D. I thank Mrs. Sagarika Dutta Bishwas for her unwavering assistance in administrative tasks.

Lastly, I thank my friends from the Udaigiri hostel, with whom I played, roamed, and discussed during the initial Ph.D. journey.

Family and Friends: With heartfelt gratitude to my dear wife Pratibha, for her endless care and patience; to my wonderful daughter Ira, for being my source of joy and motivation; to my supportive parents, Ramesh Chandra Yadav and Savitri Yadav, for their unwavering guidance and encouragement; to my elder brothers, Piyush and Prasoon, for their unending support; and to my in-laws, Atma Yadav and Amba Yadav, for caring our newborn daughter Ira in her initial months.

My heartfelt thanks go to Dr. Sahil Anchal for being there when it was needed most. Thanks to Eswar Dhullipala (Nani) for all the years in and out of the campus we spent together as my campus confidante.

Finally, I am thankful to IIT Delhi for the resources and facilities provided to me during my Ph.D.

Prateek

ABSTRACT

The ever-increasing demand for data necessitates the use of novel techniques in Content Distribution Networks (CDNs) to ensure efficient content delivery with guaranteed Quality of Service (QoS). One promising approach is the distributed fog-based CDN model, which relies on the optimal placement of fog nodes to meet these demands. Despite numerous academic efforts to develop CDN models, many critical aspects of CDN technology remain underexplored. These include the integration of fog computing with CDNs for localized processing, scalability challenges, efficient content distribution, improved adaptability to diverse user demand requirements, and cost-effective infrastructure management. This thesis addresses these issues by proposing various comprehensive approaches to build an efficient content distribution model.

First, we introduce the problem of deploying fog nodes and establishing the content distribution path to achieve guaranteed QoS, named the Fog-CDN problem. This NP-hard problem is a non-linear instance of the facility location problem. We construct this as an optimization problem by considering geographical regions, the locations of open public WiFi access points (OPWAPs), QoS, and cost to achieve three primary research objectives: strategic placement of fog nodes to process end-user requests, construction of a content distribution path with guaranteed QoS, and cost minimization when building a fog-based CDN model. We propose a framework with a heuristic for optimal fog node placement (*PFOLR*) and two approaches for content distribution, Greedy Performance-based Node Selection (*GPDS*) and Greedy Fog Node Selection Algorithm (*GFNSA*), to achieve these objectives. Our results demonstrate that the proposed methods outperform baseline techniques and provide near-optimal solutions.

Next, we propose the Joint Optimization Algorithm for Fog-node Placement and Content Distribution (*JFnP-CDA*) to jointly optimize fog-node placement and content distribution. Using a two-step procedure using clustering and the Voronoi method, along with a nonlinear programming method, we optimize the size of the geographi-

cal regions, the locations of OPWAPs, QoS, and the cost. We validate the effectiveness of the *JFnP-CDA* algorithm using real-world OPWAP data, demonstrating its validity over baseline methods. We optimize (jointly) the deployment and distribution factor and address the impact of fog node deployment on content distribution, a topic often overlooked in current research.

Next, we focus on factors such as space-time considerations, load balancing, and response time to enhance the Fog-CDN model capability. For this, we analyzed the locations of OPWAPs in two metropolitan cities of India (Mumbai and Chennai) by scraping and proposed a study to enhance the content distribution process within a Fog-CDN model, which coordinates numerous edge network hot spots near end users. To address the challenges of complexity and cost in Fog-CDN, we proposed a heuristic to optimize the problem objective. Our approach reduces service delays and costs by optimizing the Fog-CDN problem to build optimal service sub-regions and distribute content efficiently. We validate the effectiveness of this model by using real-world OPWAP data from metro cities, demonstrating that the proposed algorithm outperforms existing techniques in both cost and performance metrics.

Finally, to improve the Fog-CDN performance, we studied the Fog-CDN model to leverage cache deployments at various levels. Traditional CDNs have inherent limitations in effectively distributing content in densely populated areas. Therefore, the deployment of distributed fog node caches in Fog-CDN needs a closer look because it affects critical parameters: network resources (caching and storage), quality of service (QoS; latency), and costs (capital and operational expenditure). Consequently, we focused on analyzing those critical parameters by presenting an in-depth analysis of content popularity. For this, we have *scraped* and analyzed real-world data from YouTube to gain insights into content characteristics, which are crucial for minimizing QoS issues and costs. Additionally, we explore the deployment of micro-caches at the edge level, presenting various use cases to ensure low cost and high performance. We discuss the trade-offs between content popularity, caching, storage, and performance, demonstrating that our proposed model outperforms baseline CDN models in total cost and QoS guarantees.

सारांश

डेटा की लगातार बढ़ती मांग के कारण सेवा की गुणवत्ता की गारंटी (क्यूओएस) के साथ कुशल सामग्री वितरण सुनिश्चित करने के लिए सामग्री वितरण नेटवर्क (सीडीएन) में नवीन तकनीकों के उपयोग की आवश्यकता होती है। एक आशाजनक दृष्टिकोण वितरित कोहरा-आधारित सीडीएन मॉडल है, जो इन मांगों को पूरा करने के लिए कोहरे नोड्स के इष्टतम स्थान पर निर्भर करता है। सीडीएन मॉडल विकसित करने के लिए कई अकादमिक प्रयासों के बावजूद, सीडीएन तकनीक के कई महत्वपूर्ण पहलुओं की अभी तक खोज नहीं की गई है। इनमें स्थानीयकृत प्रसंस्करण, मापनीयता चुनौतियों, कुशल सामग्री वितरण, विविध उपयोगकर्ता मांग आवश्यकताओं के लिए बेहतर अनुकूलनशीलता और लागत प्रभावी बुनियादी ढांचे के प्रबंधन के लिए सीडीएन के साथ फ़ॉग कंप्यूटिंग का एकीकरण शामिल है। यह थीसिस एक कुशल सामग्री वितरण मॉडल बनाने के लिए विभिन्न व्यापक दृष्टिकोणों का प्रस्ताव करके इन मुद्दों को संबोधित करती है।

सबसे पहले, हम इष्टतम क्यूओएस प्राप्त करने के लिए फॉग नोड्स को तैनात करने और सामग्री वितरण पथ स्थापित करने की समस्या का परिचय देते हैं, जिसे फॉग-सीडीएन समस्या के रूप में जाना जाता है। यह एनपी-हार्ड समस्या सुविधा स्थान समस्या का एक गैर-रेखीय उदाहरण है। हम भौगोलिक क्षेत्रों, खुले सार्वजनिक वाई-फाई एक्सेस प्वाइंट (ओपीडब्ल्यूएपी) स्थानों, क्यूओएस और तीन प्राथमिक अनुसंधान उद्देश्यों को प्राप्त करने की लागत पर विचार करके इसे एक संयुक्त अनुकूलन समस्या के रूप में बनाते हैं: अंतिम-उपयोगकर्ता अनुरोधों को संसाधित करने के लिए फॉग नोड्स का रणनीतिक प्लेसमेंट, निर्माण गारंटीशुदा क्यूओएस के साथ एक सामग्री वितरण पथ, और कोहरे-आधारित सीडीएन मॉडल के निर्माण की लागत को कम करना। हम इन उद्देश्यों को प्राप्त करने के लिए इष्टतम फॉग नोड प्लेसमेंट (पीएफओएलआर) और दो एल्गोरिदम, लालची प्रदर्शन-आधारित नोड चयन (जीपीडीएस) और लालची फॉग नोड चयन एल्गोरिदम (जीएफएनएसए) के लिए एक दोहरे चरण की रूपरेखा का प्रस्ताव करते हैं। हमारे परिणाम दर्शाते हैं कि प्रस्तावित विधियाँ आधारभूत तकनीकों से बेहतर प्रदर्शन करती हैं और लगभग-इष्टतम समाधान प्रदान करती हैं।

इसके बाद, हम फॉग-नोड प्लेसमेंट और सामग्री वितरण (जेएफएनपी-सीडीए) के लिए संयुक्त अनुकूलन एल्गोरिदम का प्रस्ताव देते हैं, जो संयुक्त रूप से फॉग नोड प्लेसमेंट और सामग्री वितरण को अनुकूलित करता है। नॉनलाइनियर प्रोग्रामिंग के साथ-साथ क्लस्टरिंग और वोरोनोई पद्धति से जुड़ी दो-चरणीय प्रक्रिया का उपयोग करके, हमारा लक्ष्य भौगोलिक क्षेत्रों, ओपीडब्ल्यूएपी स्थानों, क्यूओएस और लागत को अनुकूलित करना है। हम वास्तविक दुनिया ओपीडब्ल्यूएपी डेटा का उपयोग करके जेएफएनपी-सीडीए एल्गोरिदम की प्रभावशीलता को मान्य करते हैं, जो आधारभूत तरीकों पर इसकी श्रेष्ठता को प्रदर्शित करता है। इस कार्य का उद्देश्य संयुक्त रूप से तैनाती और वितरण कारक को अनुकूलित करना, जिसे अक्सर वर्तमान शोध में अनदेखा किया गया है।

फिर, हमने फॉग-सीडीएन मॉडल क्षमता को बढ़ाने के लिए स्पेस-टाइम विचार, लोड संतुलन और प्रति-क्रिया समय जैसे कारकों पर ध्यान केंद्रित किया। हमने स्क्रैपिंग के माध्यम से विभिन्न महानगरीय शहरों के ओपीडब्ल्यूएपी स्थानों का विश्लेषण किया है और फॉग-सीडीएन मॉडल के भीतर सामग्री वितरण प्रक्रिया को बढ़ाने के लिए एक अध्ययन का प्रस्ताव दिया है, जो अंतिम उपयोगकर्ताओं के पास कई एज नेटवर्क हॉट स्पॉट का समन्वय करता है। फॉग-सीडीएन में उच्च जटिलता और लागत की चुनौतियों का समाधान करने के लिए, हमने समस्या उद्देश्य को अनुकूलित करने के लिए एक अनुमान का प्रस्ताव रखा। हमारे दृष्टिकोण का उद्देश्य इष्टतम सेवा उप-क्षेत्रों का निर्माण करने और सामग्री को कुशलतापूर्वक वितरित करने के लिए फॉग-सीडीएन समस्या को संयुक्त रूप से अनुकूलित करके सेवा में देरी और लागत को कम करना है। हमने मेट्रो शहरों से वास्तविक दुनिया के ओपीडब्ल्यूएपी डेटा का उपयोग करके इस मॉडल की प्रभावशीलता को मान्य किया, यह प्रदर्शित करते हुए कि हमारा प्रस्तावित एल्गोरिदम लागत और प्रदर्शन मेट्रिक्स दोनों में मौजूदा तकनीकों से बेहतर प्रदर्शन करता है।

अंत में, फ़ॉग-सीडीएन प्रदर्शन को बेहतर बनाने के लिए, हम फ़ॉग-सीडीएन मॉडल पर एक अध्ययन प्रस्तुत करते हैं जो विभिन्न स्तरों पर कैश परिनियोजन का लाभ उठाता है। पारंपरिक सीडीएन में घनी आबादी वाले क्षेत्रों में सामग्री को प्रभावी ढंग से वितरित करने में अंतर्निहित सीमाएँ हैं। इसलिए, फ़ॉग-सीडीएन में वितरित फ़ॉग नोड कैश की व्यापक तैनाती के विश्लेषण पर बारीकी से नज़र डालने की ज़रूरत है जो महत्वपूर्ण मापदंडों को प्रभावित करता है: नेटवर्क संसाधन (कैशिंग और भंडारण), सेवा की गुणवत्ता (QoS ; विलंबता), और लागत (पूंजी और परिचालन व्यय)। परिणामस्वरूप, हमने सामग्री की लोकप्रियता का गहन विश्लेषण प्रस्तुत करके उन महत्वपूर्ण मापदंडों का विश्लेषण करने पर ध्यान केंद्रित किया। इसके लिए, हमने YouTube से वास्तविक दुनिया के डेटा को स्क्रैप किया और उसका विश्लेषण किया ताकि सामग्री विशेषताओं में अंतर्दृष्टि प्राप्त की जा सके, जो QoS मुद्दों और लागतों को कम करने के लिए महत्वपूर्ण हैं। इसके अतिरिक्त, हम कम लागत और उच्च प्रदर्शन सुनिश्चित करने के लिए विभिन्न उपयोग मामलों को प्रस्तुत करते हुए, किनारे के स्तर पर माइक्रो-कैश की तैनाती का पता लगाते हैं। अध्याय का समापन सामग्री लोकप्रियता, कैशिंग, भंडारण और प्रदर्शन के बीच व्यापार-नापसंद पर चर्चा करके होता है, तथा यह दर्शाता है कि हमारा प्रस्तावित मॉडल कुल लागत और QoS गारंटी में बेसलाइन सीडीएन मॉडल से बेहतर प्रदर्शन करता है।

Contents

List of Tables

List of Figures

ABBREVIATIONS

ABR	Adaptive Bit Rate
APs	Access Points
CCP	Cloud-based Content Provider
CDN	Content Distribution/Delivery Network
COTS	Commercial Off-The-Shelf
CSP	Cloud Service Provider
DPI	Deep Packet Inspection
ES	Edge Severs
FOG-CDN	Fog-based Content Distribution Network
FNPP	Fog Node Placement Problem
GUI	Graphical User Interface
HTTP	Hypertext Markup Language
IaaS	Infrastructure as a Service
ICN	Information Centric Network
IoT	Internet of Things
IPTV	Internet Protocol Television
ISP	Internet Service Provider
MANO	Management and Orchestration
MIP	Mixed Integer Programming
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MLS	Mobile Live Streaming
NAT	Network Address Translation
NFs	Network Functions
NFV	Network Function Virtualization
NFVI	Network Function Virtualization Infrastructure
NIST	National Institute of Standards and Technology
NS	Network Service
O&M	Orchestration and Management

OSS/BSS	Operational Support System/Business Support System
OPWAPs	Open Public WiFi Access Points
PoD	Point of Deployment
PoP	Point of Presence
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RTT	Round Trip Time
RO	Resource Orchestration
SaaS	Software as a Service
SDN	Software Defined Network
SE-B	Semi-Edge-Broadcast
SE-U	Semi-Edge-Unicast
SFC	Service Function Chaining
SLA	Service Level Agreement
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDN	Ultra Dense Network
VoD	Video-on-Demand
VAS	Value-added Service
WAN	Wide Area Network
WOA	Whale Optimization Algorithm