

## การออกแบบและพัฒนากลไกปรับปรุงเส้นทางสำหรับเครือข่ายเนมดาต้า

### A Design and Development of Path-convergence Mechanisms for Named Data Networking

ธงชัย เจือจันทร์<sup>1</sup>, สมนึก พ่วงพรพิทักษ์<sup>2</sup>, นพรัตน์ โพธิ์สิงห์<sup>1</sup>, สุวัฒน์ กล้วยทอง<sup>3</sup>, อภิชาติ สมรัตน์<sup>1</sup>  
Thongchai Chuachan<sup>1</sup>, Somnuk Puangpronpitag<sup>2</sup>, Nopparat Posing<sup>1</sup>, Suwat Gluaythong<sup>3</sup>,  
Apichart Somrat<sup>1</sup>

Received: 19 May 2017; Accepted: 16 October 2017

#### บทคัดย่อ

เครือข่ายเนมดาต้าเป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่มีแนวโน้มจะถูกนำไปใช้ กับการเชื่อมต่อสื่อสารที่มีความซับซ้อนในปัจจุบัน ด้วยการชี้แจงให้เกิดประเภทอินเทอร์เน็ตเรสในการค้นหาข้อมูลจากการใช้ชื่อของข้อมูล และตัวข้อมูลสามารถถูกสำรองไว้บนอุปกรณ์เครือข่ายได้ จึงทำให้การเข้าแพ็กเก็ตเกิดประเภทอินเทอร์เน็ตเรสมีความสำคัญสูงต่อการได้รับข้อมูลในเครือข่ายเนมดาต้า โดยในปัจจุบัน อัลกอริทึมเบสรูท ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งบนระบบทดสอบของกลุ่มวิจัยเนมดาต้า อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมเบสรูทยังมี ปัญหาหลายประการ เช่น การเลือกเส้นทางจากค่าที่ต่ำที่สุด ทำให้เปลี่ยนเส้นทางได้ไม่ทันเหตุการณ์ เป็นต้น งานวิจัยนี้จึง พัฒนาการเลือกเส้นทางโดยออกแบบอัลกอริทึม Longest Prefix Reduction (LPR) ที่ช่วยให้การส่งต่อแพ็กเก็ตอินเทอร์เน็ตเรส มีประสิทธิภาพสูงขึ้น แล้วพัฒนาซอฟต์แวร์ต้นแบบต่อยอดจาก Named Forwarding Daemon ผลการทดสอบพบว่า LPR ช่วยให้เครือข่ายเนมดาต้าใช้เวลาปรับปรุงเส้นทางและมีสัดส่วนการสูญหายของแพ็กเก็ตลดลงได้มากกว่าร้อยละ 90

**คำสำคัญ:** เครือข่ายเนมดาต้า การทดลองบนเครือข่ายจริง การปรับปรุงเส้นทาง

#### Abstract

Named Data Networking (NDN) is a promising candidate for future network architecture, and is well suited to today's complex networks. A named prefix of the NDN Interest-packet has been used for searching a desire data. Furthermore, such NDN data can be temporarily stored in intermediate devices without concerning for locations. So, the Interest-packet plays an important role for NDN network communication. Currently, A Best-Route algorithm has been widely used in the major NDN's network Testbed. However, the Best-Route always selects a lowest routing cost, which is unreliable in disruptive networks. In this paper, we have developed a Longest Prefix Reduction (LPR) algorithm to handle NDN path-convergence. LPR actively updates routing paths to the data, and improves several aspects to multi-path connection. We have implemented our LPR in Named Forwarding Daemon (NFD). LPR experimental results show that a network loss has been reduced approximately 90%.

**Keywords:** Named Data Networking, Test-bed, Path convergence

<sup>1</sup> อาจารย์, สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์, ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์. E-mail: thongchai.c@srru.ac.th, n\_posing@hotmail.com, apichart@comsci.srru.ac.th

<sup>2</sup> อาจารย์, สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์, คณะวิทยาการสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. E-mail: {somnuk.p@msu.ac.th}

<sup>3</sup> อาจารย์, สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์. E-mail: suwat\_gl@srru.ac.th

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University. E-mail: thongchai.c@srru.ac.th, n\_posing@hotmail.com, apichart@comsci.srru.ac.th

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Computer Science, Faculty of Informatics, Mahasarakham University. E-mail: somnuk.p@msu.ac.th

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Information Technology, Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University. E-mail: suwat\_gl@srru.ac.th

## บทนำ

ในปัจจุบันการเชื่อมต่อสื่อสารในระบบเครือข่ายจะใช้โพรโทคอล TCP/IP<sup>1</sup> ซึ่งมีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบ Point-to-Point และการใช้เพียงโพรโทคอล TCP/IP จะไม่สัมฤทธิ์ผลเมื่อมีผู้ใช้บริการจำนวนมาก จึงทำให้มีบริการกระจายเนื้อความ (Content) ไปยังแหล่งต่าง ๆ เหมาะกับการบริการแบบ Best Effort Service เช่น การใช้ Content Distribution Network (CDN)<sup>2</sup> เป็นส่วนเสริมให้การเชื่อมต่อโดยใช้โพรโทคอล TCP/IP ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ CDN ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและยังมีประเด็นปัญหาด้านความมั่นคงดัง Liang และคณะ<sup>2</sup> ได้กล่าวไว้

Named Data Networking (NDN)<sup>3</sup> จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงสถาปัตยกรรมเครือข่ายให้เหมาะกับลักษณะการเชื่อมต่อเครือข่ายในปัจจุบัน ซึ่งเป็นแบบ Content-Distribution ที่มีการกำหนดให้แพ็กเก็ตข้อมูล (Data) มีชื่อหน้า (Prefix) กำกับ และผู้รับ Data ใช้แพ็กเก็ต Interest ส่งไปยังเครือข่ายเพื่อหา Data ที่ต้องการโดยไม่ต้องกังวลถึงแหล่งที่มา และสามารถสำรอง (Cache) ข้อมูลไว้ตามอุปกรณ์เราเตอร์ได้

ถึงแม้เครือข่าย NDN จะมีวิธีทำให้ข้อมูลมี ชื่อหน้า (Prefix) กำกับและถูกสำรองข้อมูลได้ แต่สถาปัตยกรรมเครือข่าย NDN ยังคงมีปัญหาหลายประการ และหนึ่งในปัญหาที่สำคัญคือ การปรับปรุงเส้นทางการเชื่อมต่อ ที่ต้องมีการตอบสนอง (Responsiveness) ที่ยังไม่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของเครือข่าย ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบและพัฒนาระบบการปรับปรุงเส้นทางและการเลือกเส้นทาง Longest Prefix Reduction (LPR) สำหรับเครือข่าย NDN ด้วยการปรับปรุง Routing Cost ของเส้นทางการเชื่อมต่อ ให้ตอบสนองต่อเส้นทางเชื่อมต่อล้มเหลวได้รวดเร็วขึ้น

ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับพัฒนาต้นแบบจากแนวคิดของงานวิจัยนี้ มีหลายกลุ่มซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนการส่งต่อแพ็กเก็ตในเครือข่าย NDN เช่น Named Forwarding Daemon (NFD)<sup>4</sup> และ Content Centric Network (CCN)<sup>5</sup> ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ NFD เป็นเครื่องมือพัฒนาต่อ ยอด เพราะ NFD เป็นซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส และเป็นต้นแบบจากกลุ่มนักวิจัยเครือข่าย NDN แล้วทำการทดลองซอฟต์แวร์ต้นแบบบนระบบเครือข่าย Testbed จากผลการทดลองพบว่า NFD จากงานวิจัยนี้ช่วยปรับปรุงเส้นทางได้รวดเร็วขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ช่วยเพิ่มอัตราการส่งได้รับข้อมูลสูงขึ้น ซึ่งช่วยให้การเชื่อมต่อในเครือข่าย NDN มีประสิทธิภาพดีขึ้น

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงขั้นตอนการปรับปรุงเส้นทางสำหรับเครือข่าย NDN

2. พัฒนาต่อ ยอดซอฟต์แวร์ NFD สำหรับการเลือกเส้นทางส่งต่อแพ็กเก็ตในเครือข่าย NDN

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### เครือข่ายเนมดาต้า

เครือข่าย Named Data Networking (NDN)<sup>3</sup> เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เกิดจากแนวคิดของ Jacobson<sup>6</sup> หลังจากเล็งเห็นถึงรูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสารบนอินเทอร์เน็ตที่มีปริมาณ (Volume) สูงขึ้น และรูปแบบการใช้งานที่เปลี่ยนแปลงจาก Point-to-point เป็น Content Distribution หน่วยงาน National Science Foundation (NSF)<sup>7</sup> จึงเสนอที่จะกำหนดสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่สนับสนุนการใช้งานในอนาคตมากขึ้น NDN เป็นหนึ่งในสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เป็นที่ยอมรับในกลุ่มนักวิจัย

การปรับปรุงเครือข่าย NDN ดัง Figure 1 ด้านซ้ายเป็นสถาปัตยกรรม TCP/IP ซึ่งมี IP เป็นเอว (Waist) ของระบบเครือข่าย ซึ่งเป็นตัวประสานระหว่างโพรโทคอลใน Layer 2 ที่ทำงานกับฮาร์ดแวร์เครือข่ายและประสิทธิภาพสูงขึ้น และชั้น TCP, UDP และแอปพลิเคชัน ที่ควบคุมการส่งแพ็กเก็ตและขยายตัวอย่างมากในระดับแอปพลิเคชัน การใช้ IP จำเป็นต้องระบุต้นทางและปลายทาง จึงทำให้ IP เป็นการส่งข้อมูลแบบ Stateless ที่ประกอบด้วยต้นทาง (Source) และปลายทาง (Destination) ในสถาปัตยกรรมเครือข่าย NDN จะให้ความสำคัญกับข้อมูล มากกว่าแหล่งของข้อมูล เช่น ต้นทาง (Source) และปลายทาง (Destination) โดยข้อมูลจะถูกแบ่งเป็นก้อน Content-Chunk ซึ่ง Content-Chunk สามารถถูกกระจายนำไปเก็บสำรองไว้ได้บนอุปกรณ์เครือข่ายต่างๆ และเป็นส่วน Waist ของระบบเครือข่าย NDN ในชั้นที่อยู่สูงขึ้นไปจะมีชั้น Security ซึ่งใช้สำหรับจัดการความมั่นคงให้กับข้อมูล ด้วยวิธีเข้ารหัสและชั้น Strategy เครือข่าย NDN ใช้สำหรับการวางแผนการส่งต่อแพ็กเก็ต โดย NDN ยังคงสนับสนุนฟังก์ชันของเครือข่ายหลายประเภท เช่น TCP/IP, Ethernet และอื่น ๆ เป็นต้น ทำให้ NDN ถูกนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่าย

ชั้น Strategy เป็นหนึ่งในส่วนสำคัญของเครือข่าย NDN ซึ่งปัจจุบันในชั้นนี้ใช้อัลกอริทึม Best-Route (BR)<sup>8</sup> ในการปรับปรุงเส้นทางเพื่อค้นหา Content โดยใช้ค่า Routing Cost ด้วยการใช้อัลกอริทึม Dijkstra และการกำหนดเอง จึงทำให้การปรับปรุงเส้นทางทำได้ช้า เป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะพัฒนากลไกการปรับปรุงเส้นทางที่ช่วยให้ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของเครือข่าย NDN สูงขึ้น

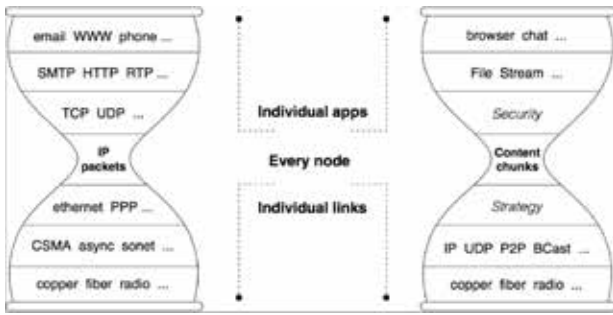


Figure 1 NDN Architecture<sup>3</sup>

**การส่งต่อแพ็กเก็ตในเครือข่าย NDN**

ในเครือข่าย NDN มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่หลากหลาย เช่น CCN<sup>5</sup>, NFD<sup>4</sup> และการพัฒนาเป็นระบบปฏิบัติการ เช่น RIOS เป็นต้น โดยทุกซอฟต์แวร์จะมีกลไกการทำงานตามกลไกใน Figure 2 ซึ่งในเครือข่าย NDN จะมีแพ็กเก็ต 2 ประเภท คือ Interest และ Data ในแพ็กเก็ต Interest ทำหน้าที่ค้นหา Data ที่ต้องการและเราเตอร์มีขั้นตอนการทำงานตามลำดับต่อไปนี้

1. เมื่อได้รับแพ็กเก็ต Interest ที่เราเตอร์จะค้นหาแพ็กเก็ต Data ที่ถูกสำรองไว้ก่อนหน้านี้ใน Content Store (CS) และถ้าหากพบ Data อยู่ใน CS ก็จะตอบกลับไปยังผู้ส่ง Interest และสิ้นสุดการทำงาน
2. หากไม่พบแพ็กเก็ต Data ใน CS ระบบจะนำ Interest ไปตรวจสอบในตาราง Pending Interest Table (PIT) ซึ่งเป็นตารางในการตรวจสอบสถานะการส่ง Interest ภายใต้อินเตอร์เฟซเดียวกันก่อนหน้านี้ ซึ่งถ้าหากมี Interest ถูกส่งออกไปก่อนหน้านี้แล้ว เราเตอร์จะเก็บ Face (Network Interface ในสถาปัตยกรรมเครือข่าย TCP/IP) ไว้ใช้ส่งแพ็กเก็ต Data กลับทาง Face ต่าง ๆ ที่มีการร้องขอ จึงทำให้เราเตอร์ไม่ส่งแพ็กเก็ต Interest ในเส้นทาง Upstream ซ้ำซ้อน
3. ในกรณีที่แพ็กเก็ต Interest ถูกนำไปตรวจสอบใน PIT แล้วไม่พบการส่ง Interest ก่อนหน้า ระบบจะตรวจสอบตาราง Forwarding Information Base (FIB) โดยค้นหา Face ที่จะส่ง Interest ออกไปยังปลายทางด้วยอัลกอริทึม Longest Prefix Match (LPM)<sup>8</sup> และส่งต่อแพ็กเก็ตออกจากเราเตอร์เพื่อหา Data ต่อไป แต่ถ้าหากใช้ LPM ค้นหา Face ที่จะส่งแพ็กเก็ตไม่ได้ เราเตอร์จะแจ้งผู้ส่ง Interest ในเส้นทาง Downstream โดยใช้แพ็กเก็ต Negative ACK (NACK) เพื่อแจ้งเราเตอร์ก่อนหน้า ไม่มีเส้นทางเชื่อมต่อไปยังปลายทางได้

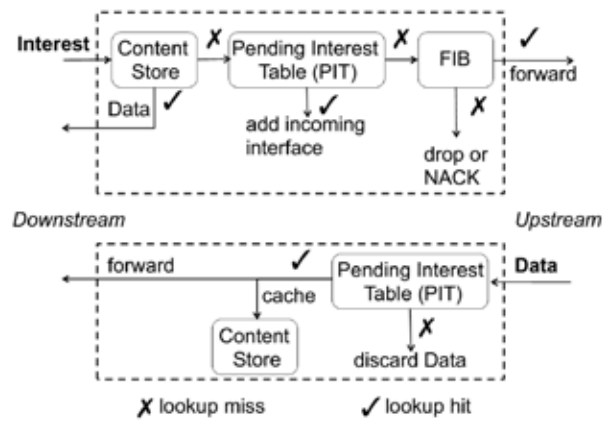


Figure 2 NDN Forwarding<sup>3</sup>

เราเตอร์ที่ได้รับแพ็กเก็ต Data แล้ว เราเตอร์จะเริ่มตรวจสอบชื่อของข้อมูล (Prefix) ที่อยู่ในแพ็กเก็ตประเภท Data ซึ่งถ้าหากยังคงมีอยู่ใน PIT ก็จะส่งแพ็กเก็ต Data ออกทางรายการ Face ที่มีการร้องขอก่อนหน้านี้ และทำการสำรอง (Cache) แพ็กเก็ต Data นั้นไว้เพื่อใช้กับร้องขอในครั้งถัดไป แต่ถ้าหากไม่พบ Prefix ของ Data ในตาราง PIT เราเตอร์จะละทิ้ง (Drop) แพ็กเก็ต Data ดังกล่าว เพราะเป็น Data แปลกปลอมในระบบกลไกการปรับปรุงเส้นทางในเครือข่าย NDN ก่อนหน้า

อัลกอริทึมที่ใช้จัดการเส้นทางในการส่งแพ็กเก็ต Interest มีหลายอัลกอริทึม เช่น BR<sup>9</sup>, NCC, Broadcast และ Client Control โดย BR คือ อัลกอริทึมที่ถูกนำมาใช้ใน NFD สำหรับการส่งต่อแพ็กเก็ต Interest ซึ่ง BR ทำงานหลังจากได้รับแพ็กเก็ต Interest แล้วใช้ Prefix ของ Interest ตรวจสอบใน PIT และถ้าหากพบ Prefix ใน PIT เราเตอร์จะส่งแพ็กเก็ตออกไปยัง Face ที่มีค่า Routing Cost ต่ำที่สุด แต่ถ้าหากไม่พบ แพ็กเก็ตจะถูกนำไปประมวลผลกับ Face ที่แพ็กเก็ตถูกส่งครั้งล่าสุดไม่เกิน 100 ms และมี Prefix คล้ายกันมากที่สุด

จากการใช้ BR จะเห็นว่า Routing Cost ถูกกำหนดโดยการใช้อัลกอริทึม Dijkstra คำนวณระยะทางไปยังปลายทางแบบ Multipath ตามกลไกของโพรโทคอล Named Link-State Routing (NLSR)<sup>10</sup> แต่การกำหนด Routing Cost ด้วยวิธีดังกล่าวถูกกำหนดแบบถาวร ทำให้การใช้อัลกอริทึม BR เลือกส่งแพ็กเก็ตผ่านทาง Face ที่ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ โดยไม่คำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น เส้นทางที่เชื่อมต่อล้มเหลว เป็นต้น อัลกอริทึม BR จึงยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้กับเครือข่าย NDN ที่หลากหลาย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะออกแบบและพัฒนาการปรับปรุงการปรับปรุงเส้นทางแบบอัตโนมัติ และทันต่อสถานการณ์การเปลี่ยนทางเครือข่ายได้ซอฟต์แวร์ Named Forwarding Daemon

**ซอฟต์แวร์ Named Forwarding Daemon (NFD)<sup>4</sup>**

ถูกพัฒนาเป็นเครื่องมือสำหรับประมวลผลแพ็กเก็ต Interest และ Data บนอุปกรณ์เราเตอร์ในเครือข่าย NDN โดย NFD มีโครงสร้างดัง Figure 3 ทำหน้าที่เป็น Multiplexer ระหว่างเราเตอร์ ประกอบด้วยส่วน Forwarder ทำหน้าที่จัดการวางแผนการส่งต่อแพ็กเก็ต โดยใช้โมดูล Strategies และเป็นส่วนติดต่อกับระหว่างระบบ Face (Face System) ระบบ CS, PIT และ FIB เป็นต้น ในส่วนของ Face System นั้น จะจัดการวิธีการ Multiplex ซึ่งปัจจุบันสามารถทำงานได้บนเครือข่าย Ethernet และการวางซ้อน (Overlay) อยู่บน TCP และ UDP ได้ เมื่อ Forwarder ได้รับ Prefix ของแพ็กเก็ตที่จะส่งไปยังปลายทางแล้ว Forwarder จะส่งแพ็กเก็ตที่มี Prefix ดังกล่าวสู่ระบบ Face System และส่งไปยังปลายทางผ่านช่องทางต่าง ๆ ต่อไป ใน Forwarder ยังเชื่อมกับระบบ CS, PIT และ FIB ตามสถาปัตยกรรมเครือข่าย NDN ที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งจัดการโดยใช้ไลบรารี ndn-cxx และเป็นไลบรารีสำคัญสำหรับ NFD ในการประมวลผลแพ็กเก็ต Interest และ Data

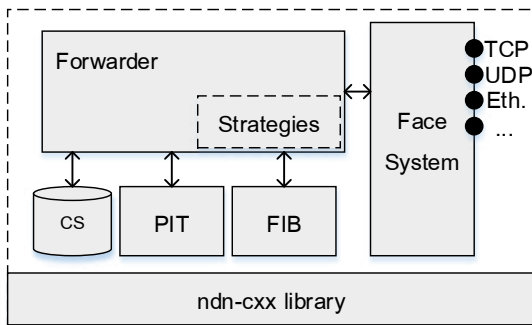


Figure 3 NFD Components

**การออกแบบและพัฒนา LPR**

**อัลกอริทึม Longest Prefix Reduction**

อัลกอริทึม Longest Prefix Reduction (LPR) ของงานวิจัยนี้ มีแนวคิดที่จะปรับปรุงวิธีการจัดการ Routing Cost ร่วมกับการจัดการ Prefix ของแพ็กเก็ต Interest ในการเลือกเส้นทางการเชื่อมต่อในเครือข่าย NDN โดยได้เพิ่มขั้นตอนการประมวลผลแพ็กเก็ต Interest ในเราเตอร์ดังนี้

1. เมื่อ LPR ได้รับแพ็กเก็ต Interest จะเลือก Face ที่ใช้ส่งต่อแพ็กเก็ตไปที่ Upstream จาก Face ( $F_{out}$ ) ที่มี C ต่ำที่สุด และ Prefix ตรงกันยาวที่สุด ด้วยการใช้อัลกอริทึม Longest PrefixMatch ที่อยู่ใน NFD
2. เมื่อ  $F_{out}$  เกิด Timeout LPR จะเลือก Face ถัดไปที่มี C ต่ำสุดรองลงมาจนครบทุก Face ที่ใช้งานอยู่
3. หากทุก Face ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ LPR จะลด Prefix ของชื่อ Data ในตาราง FIB ลดลงครึ่งละ 1 เช่น

Prefix ในแพ็กเก็ต Interest ชื่อ /ndn/th/ac/srru/data/01 และใน FIB ของเราเตอร์มี Prefix ชื่อ /ndn/th/ac/srru/data ซึ่งตรงกันที่ Face ที่  $i$  ( $F_i$ ) และเชื่อมต่อไม่ได้ LPR จะลดชื่อ Prefix ในแพ็กเก็ต Interest ให้เหลือ /ndn/th/ac/srru/data แล้วค้นหา Face ที่สนับสนุนการส่ง Interest ใหม่ตามขั้นตอนที่ 1 และ 2

**การพัฒนาและทดลองโปรแกรมต้นแบบ**

**การพัฒนาส่วนประมวลผลแพ็กเก็ต Interest**

การพัฒนาต้นแบบจากแนวคิดของ LPR ได้พัฒนาและนำมารวมกับซอฟต์แวร์ NFD โดยเพิ่มฟังก์ชันการประมวลผลแพ็กเก็ต Interest ดังแสดงใน Figure 4 ตามขั้นตอนดังนี้

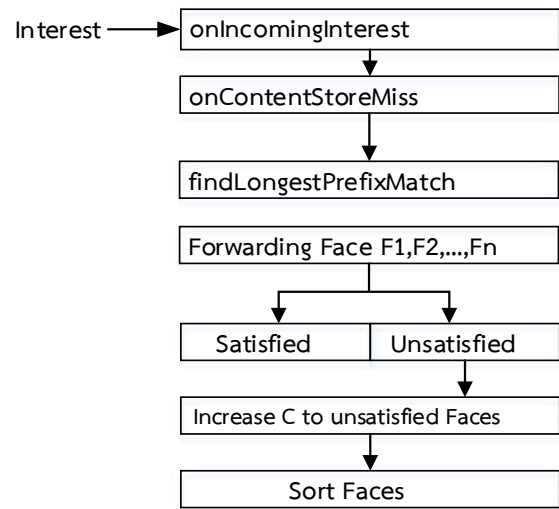


Figure 4 Interest processing for LPR algorithm

1. เมื่อเราเตอร์ได้รับแพ็กเก็ต Interest ผ่านทาง Face ที่  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$  หลังจาก De-multiplex แล้วแพ็กเก็ตถูกส่งเข้าไปยังฟังก์ชัน onIncomingInterest ซึ่งภายใน onIncomingInterest จะมีการตรวจสอบตามขั้นตอนของสถาปัตยกรรม NDN แต่ถ้าหากไม่ได้รับ Data ระบบจะแจ้งเตือนไปยังฟังก์ชัน onContentStoreMiss จากนั้นจะเข้าสู่การเลือกเส้นทางเลือก Face ที่จะส่งแพ็กเก็ต Interest สู่อุปกรณ์ Upstream
2. ค้นหา Face ที่สามารถส่งแพ็กเก็ต Interest ได้จาก Face ที่มี Prefix ตรงกับ Prefix ในแพ็กเก็ต Interest มากที่สุดด้วยฟังก์ชัน findLongestPrefixMatch หลังจากได้รายการ  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$  ที่สนับสนุน การส่งแพ็กเก็ตแล้ว จากนั้นเลือก Face ที่มี Routing Cost (C) ต่ำที่สุด ( $F_{low}$ ) แล้วส่งแพ็กเก็ต Interest ผ่าน  $F_{low}$  ดังกล่าว
3. เมื่อเกิด Timeout ทาง  $F_{low}$  ที่มีการส่ง Interest ออกไปแล้ว NFD จะแจ้งผลไปยังส่วนของ Unsatisfied และ

เพิ่ม C ขึ้นครั้งละ 1 ทาง  $F_{low}$  ก่อนที่จะทำการเรียง Face ทั้งหมดใหม่ โดยให้เรียงจากน้อยไปหามาก แล้วลด Prefix สดสุดท้ายลงทีละ 1 ตามอัลกอริทึม LPR ก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตเกิด Interest ใหม่ (Retransmission) ทาง Face ใหม่ที่มี C ต่ำที่สุด การพัฒนาส่วนประมวลผลแพ็กเก็ตเกิด Data

เมื่อเราเตอร์ได้รับแพ็กเก็ตเกิด Data หมายถึง Face ดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อได้ ดังนั้นใน Face ที่มีสัดส่วนการส่ง Data จาก Downstream สูงจึงมีโอกาสดำเนินการส่ง Interest จะได้รับ Data สูง ในอัลกอริทึม LPR จึงมีการปรับปรุง Routing Cost (C) ตามขั้นตอนใน Figure 5

เมื่อเราเตอร์ได้รับแพ็กเก็ตเกิด Data ระบบจะนำเข้าสู่ฟังก์ชัน onIncomingData แล้วจึงลด C ให้กับ Face ที่ได้รับ Data จากนั้นใช้ฟังก์ชัน getNextHops จะได้รับ Face  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_i$  ที่มี Prefix เดียวกับ Data ที่ได้รับก่อนที่จะลด C ตั้งแต่  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$  ให้กับทุก Face ที่มี Prefix เดียวกัน เพื่อบำรุงระยะห่างของ C ในแต่ละ Face ไม่ให้มีความต่างกันสูงเกินไป และไม่ทำให้ C สูงขึ้นแบบไม่สิ้นสุดจากขั้นตอนการจัดการ C ในส่วนของการประมวลผลแพ็กเก็ตเกิด Interest

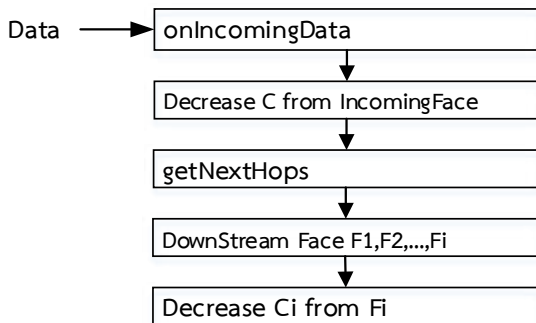


Figure 5 Data processing for LPR algorithm

**วิธีการทดลอง**

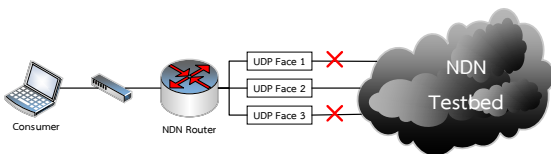


Figure 6 an evaluation scenario

Figure 6 คือ แผนผังการทดลองเพื่อทดสอบอัลกอริทึม BR กับ LPR โดยที่การทดลองครั้งนี้ติดตั้ง NFD รุ่น 0.4.1 เชื่อมต่อกันโดยใช้สับเน็ต 192.168.6.0/24 และใช้ Face ประเภท UDP ทั้งหมด และใช้ซอฟต์แวร์ VirtualBox สร้าง Virtual Machine (VM) ติดตั้งระบบปฏิบัติการลินุกซ์ CentOS รุ่น 7 มีหน่วยประมวลผล 1 แกน RAM 1024Gb ฮาร์ดดิสก์ 20Gb และกำหนดเครือข่ายแบบ Bridge

เครื่อง Consumer กำหนดให้เชื่อมต่อไปยัง NDN Router ผ่านทาง UDP Face โดยกำหนด Prefix ชื่อ /ndn ให้กับ FIB ซึ่งจะทำให้ทุกแพ็กเก็ตถูกส่งไปยัง NDN Router ขณะเดียวกันเครื่อง NDN Router ก็ใช้ UDP Face เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ NDN Testbed ตาม Figure 7 ผ่านทางโหนด SRRU และทั้ง 3 Face ของ NDN Router มีค่า Routing Cost เท่ากับ 0 และกำหนด Prefix ที่เชื่อมเข้าสู่โหนด SRRU คือ /ndn เมื่อเชื่อมเข้าสู่โหนด SRRU แล้ว ทำการตัดการเชื่อมต่อของ Face ที่ 1 และ Face ที่ 3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Convergence Time เมื่อมีเส้นทางการเชื่อมต่อมีความขัดข้อง



Figure 7 NDN Testbed

ที่เครื่อง Consumer ใช้ซอฟต์แวร์ ndnping ทดสอบเชื่อมต่อไปยังโหนดต่างๆ ตาม Prefix ใน Table 1 แล้วประเมินค่า Convergence Time และ Lost Rate ของการใช้อัลกอริทึม BR และ LPR ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ผล โดยในงานวิจัยนี้ กำหนดให้การประเมินประสิทธิภาพและประสิทธิผลใช้ช่วงความเชื่อมั่น 95%

แต่ละ Prefix จาก Table 1 ในการทดสอบ Convergence Time แต่ละโหนดถูกส่งแพ็กเก็ตจำนวน 30 ครั้ง สำหรับการตรวจสอบ Loss Rate การเชื่อมต่อไปยังปลายทางจะใช้จำนวนครั้งต่างกัน 3 แบบ คือ 10, 50 และ 100 ครั้งตามลำดับ เพื่อสังเกตประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรของเครื่องทดสอบ และการส่งแพ็กเก็ตแต่ละครั้งจะมีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ในระดับเครือข่ายท้องถิ่น ที่ประกอบด้วย ช่องแบนด์วิดท์ 100Mbps และไม่ให้เกิดภายนอกระบบ Testbed ในเครือข่ายท้องถิ่นของงานวิจัยนี้

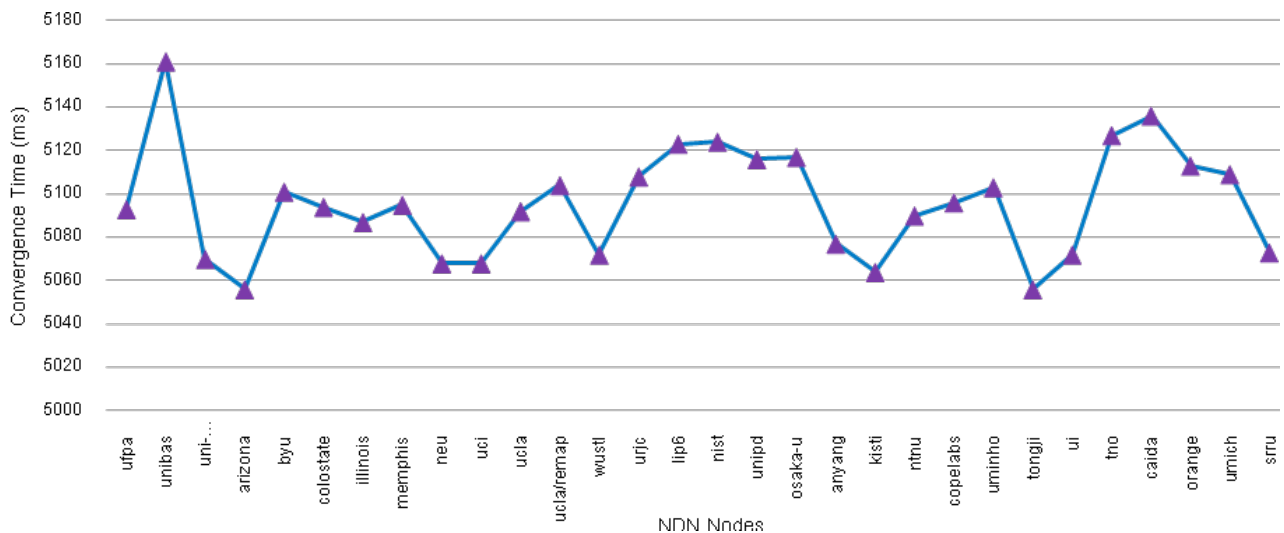
**Table 1** Testbed Prefixes

/ndn/br/ufpa	/ndn/ch/unibas
/ndn/de/uni-goettingen	/ndn/edu/arizona
/ndn/edu/byu	/ndn/edu/colostate
/ndn/edu/illinois	/ndn/edu/memphis
/ndn/edu/neu	/ndn/edu/uci
/ndn/edu/ucla	/ndn/edu/ucla/remap
/ndn/edu/wustl	/ndn/es/urjc
/ndn/fr/lip6	/ndn/gov/nist
/ndn/it/unipd	/ndn/jp/ac/osaka-u
/ndn/kr/anyang	/ndn/kr/re/kisti
/ndn/no/ntnu	/ndn/pt/ulusofona/copelabs
/ndn/pt/uminho	/ndn/cn/edu/tongji
/ndn/id/ac/ui	/ndn/nl/tno
/ndn/org/caida	/ndn/com/orange
/ndn/edu/umich	/ndn/th/ac/srru

**ผลการประเมิน NFD**

**ผลการประเมิน Convergence Time**

ในการประเมินผลค่า Convergence Time ระหว่างการใช้อัลกอริทึม BR และ LPR โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ LPR ที่ช่วยให้ Convergence Time ต่ำกว่าการใช้ BR ซึ่งผลการทดลองใน Figure 8 เป็น Convergence Time ของอัลกอริทึม LPR โดยในแกน x คือ โหนดทดสอบมีทั้งสิ้น 30 โหนด และแกน y คือ Convergence Time



**Figure 8** LPR Convergence Time

ที่เกิดขึ้นหลังจากมีการปรับปรุงเส้นทางในหน่วยมิลลิวินาที ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ค่าเฉลี่ยที่ได้จากซอฟต์แวร์ ndnping และ LPR มี Convergence Time โดยรวมอยู่ระหว่าง 5095.5±9.04 ms แตกต่างจากการใช้ BR ซึ่งไม่สามารถเชื่อมต่อกับปลายทางได้ จึงเกิด Timeout และไม่มีผลการปรับปรุงเส้นทางแต่อย่างใด

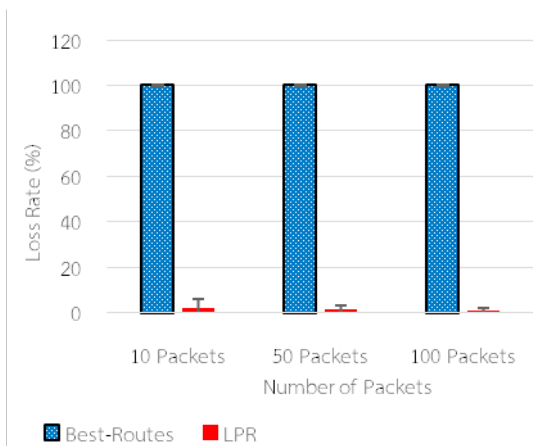
**ผลการประเมิน Loss Rate**

Loss Rate เป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ประสิทธิภาพและประสิทธิภาพผลให้การส่งต่อแพ็กเก็ตได้ในปริมาณที่สูงขึ้น ผลที่เกิดจากการประเมินระหว่างการใช้อัลกอริทึม BR และ LPR แสดงใน Figure 9 ในแกน x คือ จำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งไปยังปลายทาง และแกน y คือสัดส่วนร้อยละของ Loss Rate จากผลการทดลองพบว่าการใช้อัลกอริทึม BR เกิดการสูญหายของแพ็กเก็ตร้อยละ 100 เพราะการตอบสนองต่อปัญหาการเชื่อมต่อมีความล่าช้า และอัลกอริทึม BR ไม่เลือกเส้นทางใหม่จนกว่าจะได้รับแพ็กเก็ตประเภท NACK และลบเส้นทางดังกล่าวออกจาก FIB แต่ในการทดลองบนระบบ Testbed ในงานวิจัยนี้ 1) แพ็กเก็ต NACK ไม่ถูกส่งกลับมายัง Consumer เพราะ NDN Router มีตาราง FIB และตาราง PIT ซึ่งรอการเกิด Timeout และถูกอัปเดตด้วยแพ็กเก็ต Interest อย่างต่อเนื่อง 2) การปรับค่า Cost ของอัลกอริทึม BR ถูกกำหนดเองโดยผู้ดูแลระบบทำให้ BR ต้องเลือกเส้นทางเดิมอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้จะไม่สามารถเชื่อมต่อได้ จึงทำให้การส่งแพ็กเก็ตจำนวน 10, 50 และ 100 ไปยัง Testbed ไม่สามารถทำได้ แต่เมื่อปรับเปลี่ยนมาใช้อัลกอริทึม LPR จะเห็นว่าเมื่อส่งแพ็กเก็ตจำนวน 10 แพ็กเก็ตจะมี Loss Rate อยู่ที่ร้อยละ 2.08±4.0 เมื่อ

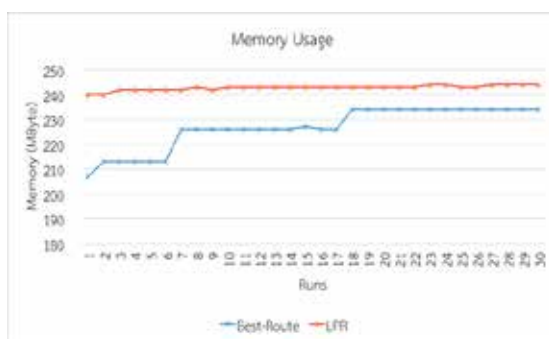
เพิ่มจำนวนแพ็กเก็ตเป็น 50 แพ็กเก็ต Loss Rate มีสัดส่วนลดลงเหลือร้อยละ  $1.67 \pm 1.78$  และในกรณีที่ส่งแพ็กเก็ตจำนวน 100 แพ็กเก็ต Loss Rate ต่ำลงเหลือร้อยละ  $0.9 \pm 1.10$  จากผลการทดลองนี้แสดงถึงอัลกอริทึม LPR สามารถที่จะปรับปรุง Routing Cost และช่วยให้ NFD สามารถเลือกเส้นทางส่งแพ็กเก็ต Interest ทาง Face ที่ใช้งานได้จริงได้อย่างรวดเร็ว และช่วยเพิ่มทั้งประสิทธิภาพและประสิทธิผลการเชื่อมต่อสื่อสารในเครือข่าย NDN ได้

**ผลการประเมินประสิทธิภาพ**

การประเมินประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรจากงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการใช้ CPU และ RAM โดยทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาทีระหว่างการทดลอง จำนวน 30 ครั้ง พบว่า อัตราการจัดการ Memory ใน



**Figure 9** Loss Rate of Best-Route and LPR



**Figure 10** Memory Load

Figure 10 จะเห็นว่าอัลกอริทึม LPR มีอัตราการใช้ Memory สูงกว่าการใช้อัลกอริทึม BR ซึ่งเกิดจากการเพิ่มฟังก์ชันการปรับปรุง Routing Cost และการลด Prefix เพื่อค้นหาเส้นทางในเครือข่าย NDN แต่การใช้ Memory ของอัลกอริทึม LPR ค่อนข้างอยู่ในระดับคงที่ และสูงกว่าการใช้อัลกอริทึม BR เพียงเล็กน้อย

สำหรับในเป็นร้อยละ CPU คงเหลือหลังจากใช้ NFD ที่เปิดใช้งานอัลกอริทึม BR และ LPR ซึ่งในแกน x แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ และในแกน y คือ ร้อยละของ CPU คงเหลือ โดยผลจากการทดลองเห็นได้ชัดว่าการใช้ NFD ที่มีอัลกอริทึม BR และ LPR มีอัตรา CPU คงเหลืออยู่ในระดับเดียวกันคือมากกว่าร้อยละ 99 ดังนั้น BR และ LPR ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของการใช้ CPU

**สรุปและอภิปรายผล**

สถาปัตยกรรมเครือข่าย NDN ถูกสร้างเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้ในยุคที่ Content สำคัญสำหรับแอปพลิเคชันในเครือข่าย NDN จึงใช้ Named Prefix เป็นเครื่องมือในการรับ Content โดยใช้แพ็กเก็ต Interest และ Data การใช้ Named Prefix เป็นเครื่องมือในการรับแพ็กเก็ตช่วยให้ NDN เชื่อมต่อเครือข่ายได้แบบ Multipath โดยในปัจจุบัน NDN ใช้อัลกอริทึม BR และมีการตัดสินใจด้วยการใช้ Routing Cost ซึ่งยังมีปัญหาหลายด้าน เช่น ตอบสนองต่อการเลือกเส้นทางที่เชื่อมต่อล้มเหลวล่าช้า งานวิจัยนี้จึงพัฒนาอัลกอริทึม LPR ช่วยปรับปรุงเส้นทางเลือกเส้นทางส่งแพ็กเก็ตให้สนับสนุนการส่งแพ็กเก็ตแบบ Multipath ได้ดีขึ้น โดยได้จัดการวิธีส่งแพ็กเก็ต Interest จากการปรับปรุงวิธีกำหนด Routing Cost แบบยืดหยุ่น

งานวิจัยนี้ได้้นำแนวคิดพัฒนาต่อยอดในซอฟต์แวร์ NFD ทดสอบบนระบบ NDN Testbed และผลการทดลองแสดงถึงประสิทธิภาพและประสิทธิผลการปรับปรุงเส้นทางส่งแพ็กเก็ต Interest ซึ่งช่วยให้ LPR มี Lost Rate ต่ำว่าการใช้ BR มากกว่าร้อยละ 90 ได้

**เอกสารอ้างอิง**

1. Socolofsky T, Kale C. A TCP/IP Tutorial. IETF; 1991 Jan. Report No.: 1991.
2. Liang J, Jiang J, Duan H, Li K, Wan T, Wu J. When HTTPS Meets CDN: A Case of Authentication in Delegated Service. In Washington, DC, USA; 2014. p. 67–82.
3. Zhang L, Afanasyev A, Burke J, Jacobson V, claffy kc, Crowley P, et al. Named Data Networking. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2014 Jul;44(3):66–73.
4. Afanasyev A, Shi J. Named Data Networking Forwarding Daemon [Internet]. 2016 [cited 2016 Apr 9]. Available from: <http://redmine.named-data.net/projects/nfd>

5. Jacobson V, Smetters D, Thornton J, Plass M, Briggs N, Braynard R. Networking Named Content. *Communication of the ACM*. 2012 Jan;55(1):117–24.
6. Jacobson V. A New Way to look at Networking [Internet]. 2006 [cited 2014 May 1]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=8Z685OF-PS8>
7. Cruikshank D. NSF Future Internet Architecture Project [Internet]. 2010 [cited 2015 Jun 30]. Available from: <http://www.nets-fia.net/>
8. Afanasyev et al A. NFD Developer's Guide. University of California, Los Angeles; 2014 Aug. Report No.: NDN-0021. p. 1-60.
9. Shi J. Best Route Strategy version 2: recognize consumer retransmission [Internet]. 2014 [cited 2015 Aug 1]. Available from: <https://redmine.named-data.net/issues/1871>
10. Hoque M, Syed A, Alyyan A, Zhang B, Zhang L, Wang L. NLSR: Named-data Link State Routing Protocol. In Hong Kong, China; 2013. p. 15–20.