

การปรับปรุงประสิทธิภาพของต้นไม้เทอร์นารี เพื่อรองรับระดับการให้บริการที่มีคุณภาพแตกต่างกัน

วรกร ศรีเชวงทรัพย์¹ จิตติชญา ธนมิตรสมบุญ² กันติชา กิตติพิรชล^{3*}

^{1,2,3*} ห้องปฏิบัติการระบบการคำนวณขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : kanticha@tni.ac.th

รับต้นฉบับ : 14 ตุลาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข : 3 พฤศจิกายน 2568; ตอรับบทความ : 27 พฤศจิกายน 2568

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ 3 อัลกอริทึม ซึ่งปรับปรุงประสิทธิภาพของต้นไม้เทอร์นารีให้สามารถรองรับระดับคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกัน โดยอัลกอริทึมทั้ง 3 ได้แก่ อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 และ อัลกอริทึม Adaptive Probability สำหรับอัลกอริทึมที่นำเสนอจะแบ่งผู้ใช้ออกเป็น 2 คลาส ได้แก่ คลาส 1 และ คลาส 2 กำหนดให้ผู้ใช้คลาส 1 มีลำดับความสำคัญสูงกว่าผู้ใช้คลาส 2 ในอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 สามารถสุ่มเลือกได้ทั้ง 3 ช่องสัญญาณ อัลกอริทึมที่ 2 ได้แก่ อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 ในอัลกอริทึมนี้ ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณหลัง อัลกอริทึมที่ 3 ได้แก่ อัลกอริทึม Adaptive Probability ในอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี ผู้ใช้แต่ละคนจะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จากทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งเมื่อมองในรูปแบบของความน่าจะเป็น ผู้ใช้แต่ละรายสุ่มเลือกช่องสัญญาณแต่ละช่องด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/3$ สำหรับอัลกอริทึม Adaptive Probability จะกำหนดให้ความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแต่ละช่องไม่เท่ากัน อย่างเช่น กำหนดให้ความน่าจะเป็นของการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ $1/2$ $2/5$ และ $1/10$ ตามลำดับ จากพฤติกรรมการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ต่างกันระหว่างผู้ใช้คลาส 1 และผู้ใช้คลาส 2 ทำให้ผู้ใช้แต่ละคลาสมีค่าประวิงเวลาที่ไม่เท่ากัน จึงสามารถนำอัลกอริทึมทั้ง 3 นี้ มาใช้เพื่อรองรับระบบที่ต้องการคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า ทุกอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในระบบที่ต้องการรองรับคุณภาพการให้บริการที่ต่างกันได้ โดยเฉพาะอัลกอริทึม Adaptive Probability สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ให้สามารถรองรับคุณภาพการให้บริการที่ต่างกันจำนวนหลายระดับ ในขณะที่ยังคงค่าประวิงเวลาที่เหมาะสม

คำสำคัญ: การปรับความน่าจะเป็น การเข้าใช้ช่องสัญญาณ การแก้ปัญหาการชนกัน การเข้าถึงบางส่วน อัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี

Improving Efficiency of Ternary Tree to Support Different Quality of Service Levels

Warakorn Srichavengsup¹ Titichaya Thanamitsomboon² Kanticha Kittipeerachon^{3*}

^{1,2,3*} *Advanced Computation Systems Laboratory: ACS, Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology,
Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: kanticha@tni.ac.th

Received: 14 October 2025; Revised: 3 November 2025; Accepted: 27 November 2025

Published online: 26 December 2025

Abstract

This paper presents three algorithms that improve the performance of Ternary tree to support different quality of service levels. These algorithms are Partial Access type 1, Partial Access type 2 and Adaptive Probability algorithms. For the proposed algorithms, users are divided into two classes, namely class 1 and class 2, with class 1 users given higher priority than class 2 users. In Partial Access type 1 algorithm, class 1 users randomly select one slot from the first two slots, while class 2 users can access all three slots. In Partial Access type 2 algorithm, class 1 users randomly select 1 slot from the first 2 slots, while class 2 users randomly select 1 slot from the last 2 slots. Third algorithm is Adaptive Probability algorithm. In Ternary tree algorithm, each user randomly selects 1 slot out of 3 slots. When viewed in terms of probability, each user randomly accesses each slot with a probability of $1/3$. Adaptive probability algorithms use different probability values for each slot. For example, let the probability of accessing slots 1, 2, and 3 be $1/2$, $2/5$, and $1/10$, respectively. Due to the different channel access behavior between class 1 and class 2 users, each class of users has different delay values. Therefore, these three algorithms can be used to support systems that require different quality of service levels. The results show that each algorithm can provide different quality of service, especially Adaptive Probability algorithm, which can adjust its parameters to accommodate different quality of service levels while maintaining an appropriate delay.

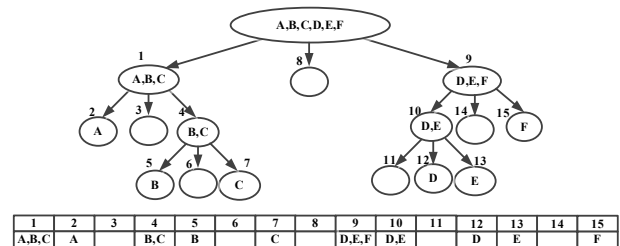
Keywords: Adaptive probability, Channel access, Collision resolution, Partial access, Ternary tree algorithm

1) บทนำ

ในปัจจุบัน ผู้ใช้งานเครือข่ายจำนวนมากมีความต้องการในการส่งข้อมูลจำนวนมาก เมื่อผู้ใช้หลายคนส่งข้อมูลพร้อมกัน จะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องมีอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณเพื่อลดการชนกันของข้อมูล อัลกอริทึมที่นิยมใช้ในการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ อัลกอริทึมที่ไม่มีการชนกันของข้อมูล (collision free algorithm) ตัวอย่างของอัลกอริทึมกลุ่มนี้ได้แก่ TDMA [1]–[3] FDMA [4]–[6] และ CDMA [7]–[9] โดยจะมีการแบ่งช่องสัญญาณให้ผู้ใช้งานแต่ละรายอย่างชัดเจน แต่อัลกอริทึมนี้ มีข้อจำกัดตรงที่ หากมีช่วงเวลาใดที่ผู้ใช้งานไม่มีข้อมูลที่ส่งช่องสัญญาณที่ว่างนั้น จะสามารถแบ่งให้ผู้ใช้งานอื่นใช้งานได้ และอัลกอริทึมนี้ไม่เหมาะที่จะรองรับผู้ใช้งานจำนวนมาก เพื่อให้รองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากขึ้น มีผู้เสนออัลกอริทึมที่มีการชนกันของข้อมูล (collision-based algorithm) ตัวอย่างของอัลกอริทึมกลุ่มนี้ได้แก่ อัลกอริทึมต้นไม้ไบนารี [10], [11] อัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี [12] โดยอัลกอริทึมไบนารีจะแบ่งผู้ใช้ที่เกี่ยวข้องกับการชนกันออกเป็น 2 กลุ่ม ในขณะที่อัลกอริทึมเทอร์นารีจะแบ่งผู้ใช้ที่เกี่ยวข้องกับการชนกันออกเป็น 3 กลุ่ม และเมื่อเกิดการชนกันซ้ำจะมีการแบ่งกลุ่มย่อยซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าผู้ใช้ทุกคนจะประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต้นไม้ไบนารีและอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี อัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารีจะมีสมรรถนะที่ดีกว่าโดยผู้ใช้จะมีค่าประวิงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณน้อยกว่าอัลกอริทึมต้นไม้ไบนารี [12], [13]

บทความวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารีให้สามารถรองรับระดับการให้บริการที่มีคุณภาพแตกต่างกัน โดยนำเสนออัลกอริทึม 3 ตัว ได้แก่ อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 และอัลกอริทึม Adaptive Probability โดยปกติในต้นไม้เทอร์นารี ผู้ใช้แต่ละคนจะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จากทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 1 ผู้ใช้ทุกคนจะมีค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยเท่ากัน สำหรับอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 สามารถสุ่มเลือกได้ทั้ง 3 ช่องสัญญาณ อัลกอริทึมที่ 2 ได้แก่ อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 ในอัลกอริทึมนี้ ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ

จาก 2 ช่องสัญญาณหลัง อัลกอริทึมที่ 3 ได้แก่ อัลกอริทึม Adaptive Probability ในอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี ผู้ใช้แต่ละคนจะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จากทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งเมื่อมองในรูปแบบของความน่าจะเป็น ผู้ใช้แต่ละรายสุ่มเข้าใช้ช่องสัญญาณแต่ละช่องด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/3$ อัลกอริทึม Adaptive Probability นี้กำหนดให้ความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแต่ละช่องไม่เท่ากัน โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายในปัจจุบันได้อย่างเช่น เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เครือข่ายระบบอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง และเครือข่ายยุค 5G เนื่องจากเครือข่ายข้างต้นจำเป็นต้องส่งข้อมูลหลากหลายประเภท ซึ่งข้อมูลแต่ละประเภทต้องการระดับคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกัน สำหรับรายละเอียดของทั้ง 3 อัลกอริทึมจะแสดงในหัวข้อถัดไป



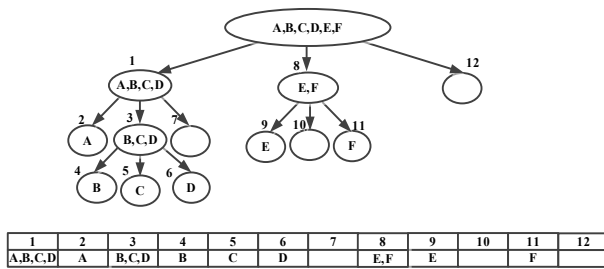
รูปที่ 1 : การแก้ปัญหาการชนกันของต้นไม้เทอร์นารี

2) อัลกอริทึมที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้ จะแสดงรายละเอียดของอัลกอริทึมที่นำเสนอ 3 ตัว โดยแสดงตัวอย่างประกอบ กำหนดให้ผู้ใช้ในระบบมีอยู่ 2 คลาส ได้แก่ ผู้ใช้คลาส 1 และผู้ใช้คลาส 2 โดยผู้ใช้คลาส 1 ต้องการระดับคุณภาพการให้บริการที่สูงกว่าผู้ใช้คลาส 2

2.1) อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1

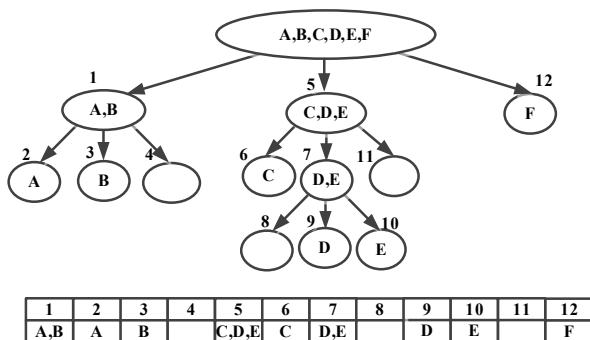
ในอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 สามารถสุ่มเลือกได้ทั้ง 3 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2 กำหนดให้ผู้ใช้ A B และ C เป็นผู้ใช้คลาส 1 และผู้ใช้ D E และ F เป็นผู้ใช้คลาส 2 จากรูปเมื่อมีการแบ่งกลุ่มเกิดขึ้นผู้ใช้ A B และ C จะสุ่มเลือก 1 ใน 2 ช่องสัญญาณแรกเสมอ ในขณะที่ผู้ใช้ D E และ F จะสุ่มเลือกช่องสัญญาณใดช่องสัญญาณหนึ่ง การดำเนินการเช่นนี้ จะทำให้ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนผู้ใช้คลาส 2 ส่งผลให้ผู้ใช้คลาส 1 มีค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยต่ำกว่าผู้ใช้คลาส 2



รูปที่ 2 : การแก้ปัญหาการชนกันของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1

2.2) อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2

อัลกอริทึมที่ 2 ได้แก่ อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 ในอัลกอริทึมนี้ ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณจาก 2 ช่องสัญญาณหลัง ดังแสดงในรูปที่ 3 จากรูปเมื่อมีการแบ่งกลุ่มเกิดขึ้น ผู้ใช้ A B และ C ซึ่งเป็นผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ใน 2 ช่องสัญญาณแรกเสมอ ในขณะที่ผู้ใช้ D E และ F ซึ่งเป็นผู้ใช้คลาส 2 จะสุ่มเลือก 1 ใน 2 ช่องสัญญาณหลังเสมอ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนผู้ใช้คลาส 2 และผู้ใช้คลาส 1 มีค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยต่ำกว่าผู้ใช้คลาส 2



รูปที่ 3 : การแก้ปัญหาการชนกันของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2

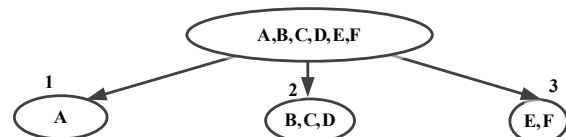
2.3) อัลกอริทึม Adaptive Probability

ในอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี ผู้ใช้แต่ละคนจะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จากทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งเมื่อมองในรูปแบบของความน่าจะเป็น ผู้ใช้แต่ละรายสุ่มเข้าใช้ช่องสัญญาณแต่ละช่องด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/3$ อัลกอริทึม Adaptive Probability กำหนดให้ความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแต่ละช่องไม่เท่ากัน อย่างเช่น กำหนดให้ความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้คลาส 1 เป็นดังนี้ ความน่าจะเป็นในการเข้า

ใช้ช่องสัญญาณที่ 1 เท่ากับ $1/2$ ความน่าจะเป็นของการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 2 เท่ากับ $2/5$ และความน่าจะเป็นของการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 3 เท่ากับ $1/10$ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยค่าความน่าจะเป็นทั้ง 3 ข้างต้น เป็นค่าความน่าจะเป็นที่สมมติขึ้นมา เพื่อให้การยกตัวอย่างเห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น ซึ่งจะพบว่าโอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ 1 เท่ากับ 0.5 โอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ 1 และ 2 เท่ากับ 0.9 ในขณะที่อัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารีมีโอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ 1 เท่ากับ 0.33 โอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ 1 และ 2 เท่ากับ 0.66 จากรูป ผู้ใช้ A ซึ่งเป็นผู้ใช้คลาส 1 สุ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.38 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.5 ผู้ใช้ A จึงสุ่มเลือกช่องสัญญาณแรก ผู้ใช้ B ซึ่งเป็นผู้ใช้คลาส 1 สุ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.68 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.5 แต่น้อยกว่า 0.9 ผู้ใช้ B จึงสุ่มเลือกช่องสัญญาณที่ 2 ผู้ใช้รายอื่น ๆ จะใช้หลักการเดียวกันในการสุ่มเลือกช่องสัญญาณ

การกำหนดค่าความน่าจะเป็นของผู้ใช้คลาส 1 ในการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ 1 (P_1) และค่าความน่าจะเป็นของผู้ใช้คลาส 1 ในการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 (P_2) ตามตัวอย่าง จะทำให้ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนผู้ใช้คลาส 2

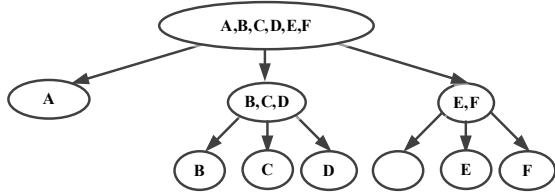
Class	1	1	1	2	2	2
User	A	B	C	D	E	F
P ₁	0.5	0.5	0.5	0.33	0.33	0.33
P ₂	0.9	0.9	0.9	0.66	0.66	0.66
rand	0.38	0.68	0.8	0.36	0.69	0.70
slot	1	2	2	2	3	3



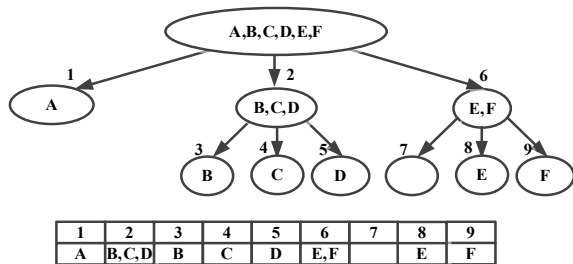
รูปที่ 4 : การแก้ปัญหาการชนกันของอัลกอริทึม Adaptive Probability ชั้นที่ 1

จากรูปที่ 4 จะพบว่า ผู้ใช้ B C และ D สุ่มเลือกช่องสัญญาณที่ 2 เหมือนกัน ทำให้เกิดการชนกันขึ้น ในขณะที่ผู้ใช้ E และ F ก็สุ่มเลือกช่องสัญญาณเดียวกัน จึงต้องมีการแบ่งกลุ่มครั้งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 หากยังเกิดการชนกันขึ้นอีกจะมีการแบ่งกลุ่มต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าผู้ใช้ทุกคนประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ รูปที่ 6 แสดงหมายเลขช่องสัญญาณที่ผู้ใช้แต่ละรายเข้าใช้

Class	1	1	2	2	2
User	B	C	D	E	F
P ₁	0.5	0.5	0.33	0.33	0.33
P ₂	0.9	0.9	0.66	0.66	0.66
rand	0.40	0.61	0.7	0.36	0.69
slot	1	2	3	2	3



รูปที่ 5 : การแก้ปัญหาการชนกันของอัลกอริทึม Adaptive Probability ขั้นที่ 2



รูปที่ 6 : การแก้ปัญหาการชนกันของอัลกอริทึม Adaptive Probability

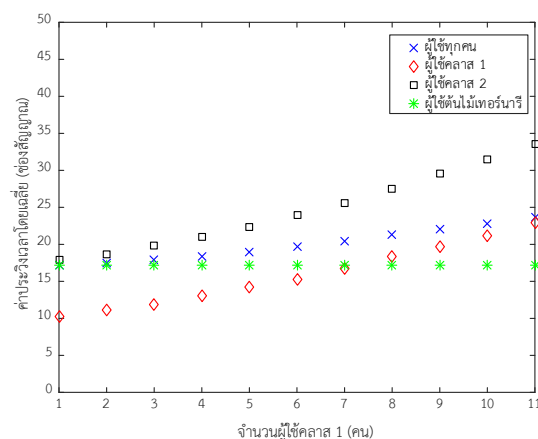
จากรายละเอียดของอัลกอริทึมทั้ง 3 ข้างต้น โอกาสในการประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้คลาส 1 ต่างจากโอกาสในการประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้คลาส 2 จึงสามารถนำอัลกอริทึมที่เสนอ มาใช้รองรับ ทราฟฟิกที่มีความต้องการคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกันได้

3) ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในหัวข้อนี้ จะแสดงสมรรถนะและเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่นำเสนอ กำหนดให้ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการ (QoS index) เท่ากับ อัตราส่วนระหว่างค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยระหว่างผู้ใช้คลาส 2 และผู้ใช้คลาส 1 หากค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการมีค่ามากแสดงว่า มีความแตกต่างระหว่างค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยระหว่างผู้ใช้คลาส 2 และผู้ใช้คลาส 1 มาก

รูปที่ 7 แสดงค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยเมื่อปรับจำนวนผู้ใช้คลาส 1 ของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 กำหนดให้จำนวนผู้ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 12 คน สำหรับอัลกอริทึมนี้ ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 สุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จากช่องสัญญาณทั้งหมด 3 ช่อง จากรูปจะพบว่า ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 และ 2

สูงขึ้นตามจำนวนผู้ใช้คลาส 1 เนื่องจากเมื่อผู้ใช้คลาส 1 มีจำนวนมากขึ้นโอกาสที่จะเกิดการชนกันระหว่างผู้ใช้คลาส 1 ด้วยกันเอง และระหว่างผู้ใช้คลาส 1 และ 2 ใน 2 ช่องสัญญาณแรกจะมากขึ้นตาม และทำให้ผู้ใช้คลาส 1 และ 2 มีโอกาสประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณแรก ๆ ลดลง นอกจากนี้จะพบว่า เมื่อผู้ใช้คลาส 1 เท่ากับ 1 คน ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ทุกคนจะใกล้เคียงกับค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 เนื่องจากผู้ใช้ส่วนใหญ่เป็นผู้ใช้คลาส 2 และเมื่อผู้ใช้คลาส 1 เท่ากับ 11 คน จะพบว่าค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ทุกคนจะใกล้เคียงกับค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 เนื่องจากผู้ใช้ส่วนใหญ่เป็นผู้ใช้คลาส 1 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารีพบว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้คลาส 1 เท่ากับ 1 คน ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 และผู้ใช้ทุกคนของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 จะใกล้เคียงกับค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ของอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี เนื่องจากการที่มีผู้ใช้คลาส 1 เพียงคนเดียวสุ่มเข้าใช้ 2 ช่องสัญญาณแรก การดำเนินการเช่นนี้ส่งผลกระทบต่อค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 น้อย แต่เมื่อผู้ใช้คลาส 1 มีจำนวนมากขึ้น ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 และ 2 จะสูงขึ้น เนื่องจากการที่มีผู้ใช้คลาส 1 จำนวนมากจะทำให้มีโอกาสสูงที่จะเกิดการชนกันเองระหว่างผู้ใช้คลาส 1 และการชนกันระหว่างผู้ใช้คลาส 1 และ 2 ใน 2 ช่องสัญญาณแรก ซึ่งส่งผลให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยสูงขึ้น โดยมีค่ามากกว่าค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ของอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี นั้นแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถปรับปรุงอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี ให้สามารถรองรับระดับการให้บริการที่มีคุณภาพที่แตกต่างกันได้ แต่ต้องแลกกับค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้น

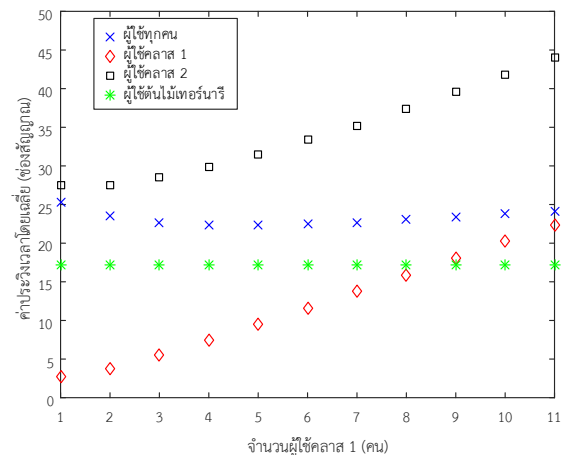


รูปที่ 7 : ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยเมื่อปรับจำนวนผู้ใช้คลาส 1 ของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1

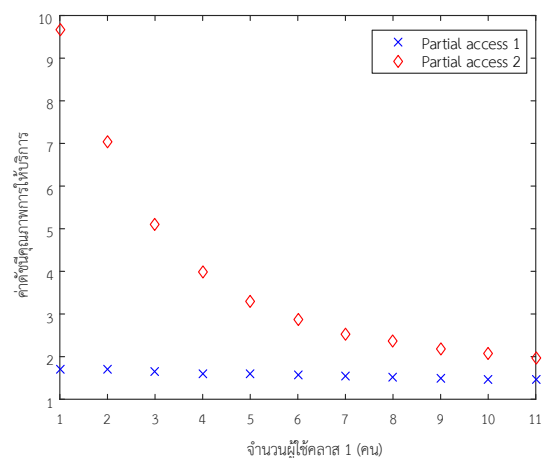
รูปที่ 8 แสดงค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยเมื่อปรับจำนวนผู้ใช้คลาส 1 ของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 กำหนดให้จำนวนผู้ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 12 คน สำหรับอัลกอริทึมนี้ ผู้ใช้คลาส 1 จะสุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จาก 2 ช่องสัญญาณแรก ในขณะที่ผู้ใช้คลาส 2 สุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณ จาก 2 ช่องสัญญาณหลังจากที่ผู้ใช้คลาส 1 สุ่มเลือก 1 ช่องสัญญาณแล้ว จากรูปจะพบว่า ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 และ 2 สูงขึ้นตามจำนวนผู้ใช้คลาส 1 โดยมีเหตุการณ์การเพิ่มของค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เช่นเดียวกับผลของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือในอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยระหว่างผู้ใช้คลาส 1 และผู้ใช้คลาส 2 ต่างกันมาก เนื่องจากในอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 ผู้ใช้คลาส 2 เข้าใช้ได้ทุกช่องสัญญาณ แต่ในอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 ผู้ใช้คลาส 2 เข้าถึงได้เฉพาะ 2 ช่องสัญญาณหลัง ทำให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 สูงขึ้น และเมื่อช่องสัญญาณแรกมีเฉพาะผู้ใช้คลาส 1 เท่านั้นที่เข้าถึงได้ ผู้ใช้คลาส 1 จึงมีโอกาสประสบความสำเร็จในช่องสัญญาณแรก ๆ มากขึ้น ทำให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 มีค่าลดลง ทั้งนี้เมื่อเปรียบผลกับอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี พบว่าเมื่อผู้ใช้คลาส 1 มีจำนวนมากขึ้น ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 และ 2 จะสูงขึ้น เนื่องจากการที่มีผู้ใช้คลาส 1 จำนวนมากจะทำให้มีโอกาสสูงที่จะเกิดการชนกันเองระหว่างผู้ใช้คลาส 1 ใน 2 ช่องสัญญาณแรก และมีการชนกันระหว่างผู้ใช้คลาส 1 ใน 2 ในช่องสัญญาณที่ 2 ซึ่งส่งผลให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยสูงขึ้น โดยมีค่ามากกว่าค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ของอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถปรับปรุงอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารี ให้สามารถรองรับระดับการให้บริการที่มีคุณภาพที่แตกต่างกันได้ แต่ต้องแลกกับค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการเมื่อปรับจำนวนผู้ใช้คลาส 1 จากรูปจะพบว่า ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่า 1 แต่น้อยกว่า 2 และค่านี้มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เนื่องจากอัตราการเพิ่มค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 และ 1 ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 ในขณะที่ ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 มีค่าสูงที่ค่าจำนวนผู้ใช้คลาส 1 เท่ากับ 1 เนื่องจากในกรณีที่จำนวนผู้ใช้คลาส 2 เท่ากับ 11 คน และผู้ใช้ทั้ง 11 คนแย่งเข้าใช้ 2 ช่องสัญญาณหลัง ทำให้มีโอกาสชนกันระหว่างผู้ใช้คลาส 2 สูง

ส่งผลให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 สูงตามไปด้วย เมื่อจำนวนผู้ใช้คลาส 1 มีจำนวนมากขึ้น ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการจะมีค่าลดลง เนื่องจาก อัตราการเพิ่มของค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 มีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มของค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 ดังแสดงในรูปที่ 8



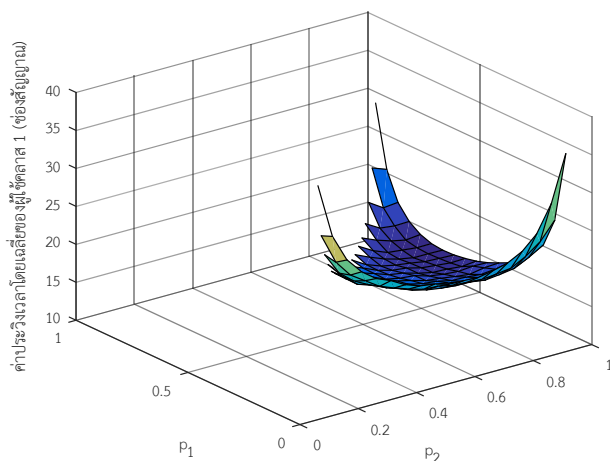
รูปที่ 8 : ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยเมื่อปรับจำนวนผู้ใช้คลาส 1 ของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2



รูปที่ 9 : การเปรียบเทียบค่าดัชนีการให้บริการเมื่อปรับจำนวนผู้ใช้คลาส 1 ของอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 และ 2

รูปที่ 10 แสดงค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 ของอัลกอริทึม Adaptive Probability เมื่อปรับค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 (P_1) และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 (P_2) กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 ที่เหมาะสมได้แก่ ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเพราะจะเป็นค่าที่ผู้ใช้คลาส 1 ใช้เวลารอในการเข้าใช้ช่องสัญญาณน้อย

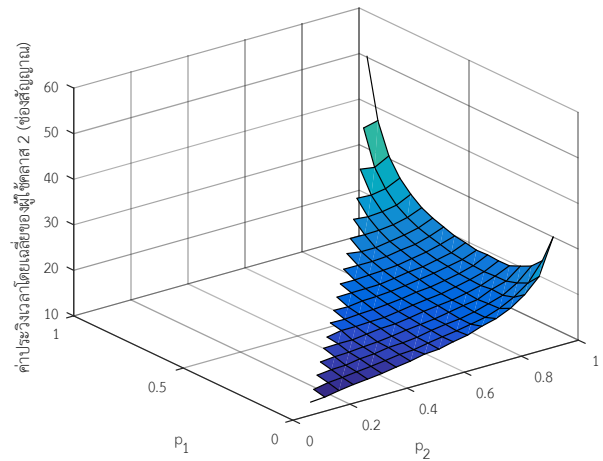
ที่สุด โดยมีค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยเท่ากับ 14.72 ช่องสัญญาณ ซึ่งเกิดขึ้นที่ค่า P_1 และ P_2 เท่ากับ 0.60 และ 0.95 ตามลำดับ เนื่องจากที่ค่าความน่าจะเป็นชุดนี้ ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสสูงที่จะเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 และมีโอกาสชนกันเองระหว่างผู้ใช้คลาส 1 น้อย ในกรณีที่ค่า P_1 และ P_2 มีค่าน้อยเกินไป จะทำให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 สูง ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ค่า P_1 และ P_2 เท่ากับ 0.05 และ 0.1 ตามลำดับ กรณีนี้ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 3 สูง ทำให้จำนวนครั้งในการชนกันระหว่างผู้ใช้คลาส 1 ในช่องสัญญาณที่ 3 สูง และกรณีที่ค่า P_1 และ P_2 เท่ากับ 0.05 และ 0.95 ตามลำดับ กรณีนี้ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 2 สูง ทำให้จำนวนครั้งในการชนกันระหว่างผู้ใช้คลาส 1 ในช่องสัญญาณที่ 2 สูง ซึ่งค่า P_1 ควรจะมีค่าปานกลาง และค่า P_2 ควรจะมีค่าสูง เพื่อให้ผู้ใช้คลาส 1 จะได้มีโอกาสประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแรก ๆ สูง



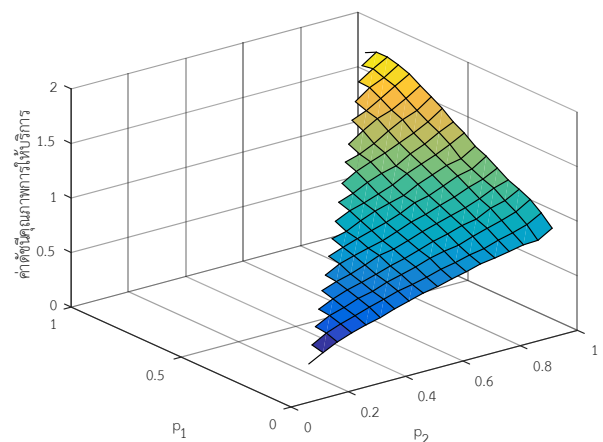
รูปที่ 10 : ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 ของอัลกอริทึม Adaptive Probability เมื่อปรับค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 (P_1) และ ค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 (P_2) กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน

รูปที่ 11 แสดงค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 ของอัลกอริทึม Adaptive Probability เมื่อปรับค่า P_1 และ P_2 กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 ที่เหมาะสมได้แก่ ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเพราะจะเป็นค่าที่ผู้ใช้คลาส 2 ใช้เวลารอในการเข้าใช้ช่องสัญญาณน้อยที่สุด โดยมีค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยเท่ากับ 11.06 ช่องสัญญาณ ซึ่งเกิดขึ้นที่ค่า P_1 และ P_2 เท่ากับ 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ เนื่องจากที่ค่าความน่าจะเป็นชุดนี้

ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 3 สูง ทำให้ผู้ใช้คลาส 2 มีโอกาสประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 สูง ส่งผลให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 ต่ำ



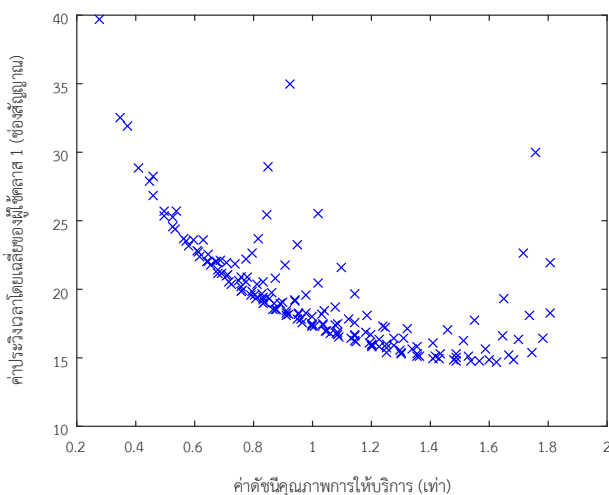
รูปที่ 11 : ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 ของอัลกอริทึม Adaptive Probability เมื่อปรับค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 (P_1) และ ค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 (P_2) กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน



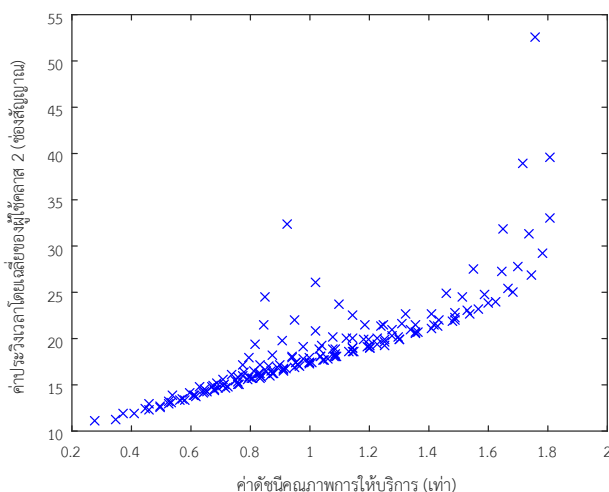
รูปที่ 12 : ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของอัลกอริทึม Adaptive Probability เมื่อปรับค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 (P_1) และ ค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 (P_2) กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน

รูปที่ 12 แสดงค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของอัลกอริทึม Adaptive Probability เมื่อปรับค่า P_1 และ P_2 กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน จากรูปจะพบว่าค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการมีค่าต่ำสุดที่ค่า P_1 และ P_2 เท่ากับ 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ เนื่องจากที่ค่านี้นค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส

1 มีค่าสูง และค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 มีค่าต่ำที่สุด และค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการมีค่าสูงสุดที่ค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 มีค่ามากที่สุดที่ค่า P_1 และ P_2 เท่ากับ 0.9 และ 0.95 ตามลำดับ เนื่องจากกรณีนี้ผู้ใช้คลาส 1 มีโอกาสเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 สูง ทำให้มีโอกาสชนกันระหว่างผู้ใช้คลาส 1 และผู้ใช้คลาส 2 สูง ในช่องสัญญาณที่ 1 และ มีโอกาสสูงที่จะเกิดการชนกันเข้าไปเรื่อย ๆ ทำให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 มีค่าสูงตามไปด้วย

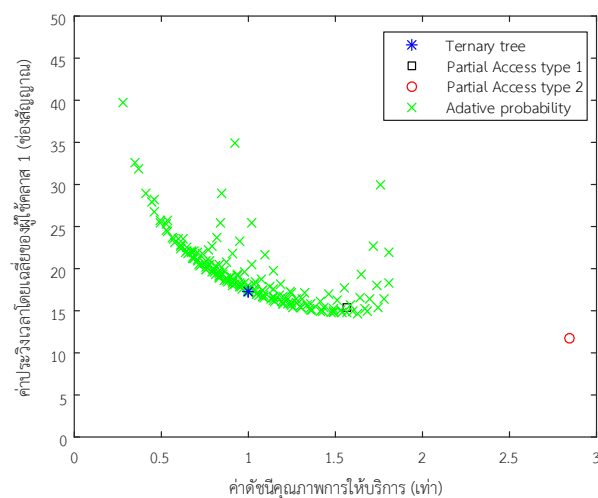


รูปที่ 13 : ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 เมื่อเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของอัลกอริทึม Adaptive Probability กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน

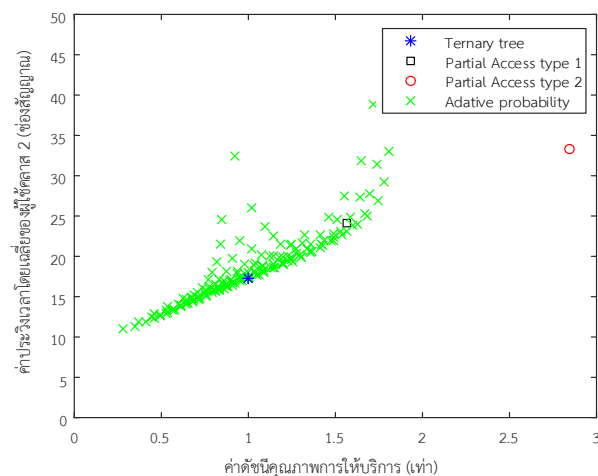


รูปที่ 14 : ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 เมื่อเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของอัลกอริทึม Adaptive Probability กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน

รูปที่ 13 และ 14 แสดงค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 และ 2 ที่ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการต่าง ๆ ของอัลกอริทึม Adaptive Probability จากรูปจะพบว่าที่ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของอัลกอริทึม Adaptive Probability สูง ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 มีค่าต่ำ ในขณะที่ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 มีค่าสูง นอกจากนี้ยังพบว่าอัลกอริทึม Adaptive Probability ให้ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกันเป็นจำนวนมาก ในขณะที่ยังคงค่าประวิงเวลาที่เหมาะสม



รูปที่ 15 : การเปรียบเทียบค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 เมื่อเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของทุกอัลกอริทึม กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน



รูปที่ 16: การเปรียบเทียบค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 2 เมื่อเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของทุกอัลกอริทึม กำหนดจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน

รูปที่ 15 และ 16 แสดงการเปรียบเทียบค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยของผู้ใช้คลาส 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการของทุกอัลกอริทึม กำหนดให้จำนวนผู้ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 12 คน และจำนวนผู้ใช้คลาส 1 และ 2 เท่ากับ 6 คน โดยอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบได้แก่ ต้นไม้เทอร์นารี อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 และอัลกอริทึม Adaptive Probability จากรูปจะพบว่า อัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารีมีค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการเท่ากับ 1 เนื่องจากผู้ใช้ทุกรายมีความเท่าเทียมกันในการใช้งานช่องสัญญาณ นอกจากนี้จะพบว่าอัลกอริทึม Adaptive Probability มีค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก เนื่องจากอัลกอริทึมนี้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่ ค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 (P_1) และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 (P_2) ในขณะที่ต้นไม้เทอร์นารี อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 และอัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 แต่ละอัลกอริทึมให้ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการเพียงค่าเดียว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อัลกอริทึม Adaptive Probability มีความยืดหยุ่นสูง ให้ค่าประวิงเวลาที่เหมาะสม และสามารถนำมาใช้ในระบบที่ต้องการคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกันหลายระดับ

4) สรุปผล

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมต้นไม้เทอร์นารีให้สามารถรองรับระดับคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกัน โดยเสนออัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 1 ซึ่งกำหนดให้ผู้ใช้คลาส 1 เข้าใช้ 2 ช่องสัญญาณแรกเท่านั้น อัลกอริทึมที่ 2 ได้แก่ อัลกอริทึม Partial Access ประเภทที่ 2 ซึ่งจำกัดการเข้าใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้คลาส 1 และ 2 และอัลกอริทึมที่ 3 ได้แก่ อัลกอริทึม Adaptive Probability ซึ่งใช้ค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 (P_1) และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 (P_2) ในการควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้คลาส 1 โดยทั้ง 3 อัลกอริทึม ผู้ใช้คลาส 1 และผู้ใช้คลาส 2 มีพฤติกรรมการเข้าถึงช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ทำให้ผู้ใช้แต่ละคลาสมีค่าประวิงเวลาที่ไม่เท่ากัน จึงสามารถนำอัลกอริทึมทั้ง 3 นี้ มาใช้เพื่อรองรับระบบที่ต้องการคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกันได้ จากผลการทดสอบพบว่า อัลกอริทึม Adaptive Probability มี

ความยืดหยุ่นสูง โดยให้ค่าดัชนีคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกันเป็นจำนวนมาก ในขณะที่ยังคงค่าประวิงเวลาที่เหมาะสม จึงเหมาะที่จะนำมาให้บริการในระบบที่ต้องการคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกันหลายระดับ

REFERENCES

- [1] D. Niyato, P. Wang, and D. I. Kim, "Performance analysis and optimization of TDMA Network with wireless energy transfer," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 8, pp. 4205–4219, 2014.
- [2] G. Pierobon, A. Zanella, and A. Salloum, "Contention-TDMA protocol: Performance evaluation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 51, no. 4, pp. 781–788, 2002.
- [3] X. Wang, A. G. Marques, and G. B. Giannakis, "Power-efficient resource allocation and quantization for TDMA using adaptive transmission and limited-rate feedback," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 9, pp. 4470–4485, 2008.
- [4] J. Zhang, L. L. Yang, L. Hanzo, and H. Gharavi, "Advances in cooperative single-carrier FDMA communications: Beyond LTE-advanced," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 17, no. 2, pp. 730–756, 2015.
- [5] F. R. Farrokhi, A. Lozano, G. J. Foschini and R. A. Valenzuela, "Spectral efficiency of FDMA/TDMA wireless systems with transmit and receive antenna arrays," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 1, no. 4, pp. 591–599, 2002.
- [6] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single carrier FDMA for uplink wireless transmission," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 1, no. 3, pp. 30–38, 2006.
- [7] S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 12, pp. 126–133, 1997.
- [8] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- [9] X. Peng, K. -B. Png, Z. Lei, F. Chin, and C. C. Ko, "Two-layer spreading CDMA: An improved method for broadband uplink transmission," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp. 3563–3577, 2008.
- [10] Y. Y. Guo, H. W. Ding, Y. F. Zhao, J. Guo, and Q. L. Liu, "Probability detection CSMA with monitoring based on the improved binary tree conflict resolution algorithm," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 610, pp. 897–904, 2014.



- [11] W. Srichavengsup and K. Kittipeerachon, "Performance evaluation of modified tree algorithm for supporting traffic with different priority requirements," *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 10, no. 2, pp. 46–56, 2022.
- [12] P. Mathys and P. Flajolet, "Q-ary collision resolution algorithms in random-access systems with free or blocked channel access," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 31, no. 2, pp. 217–243, 1985.
- [13] H. Wu and Y. Pan, *Medium Access Control in Wireless Networks*. New York, NY, USA: Nova Science, 2008.