

## การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กผ่านการเชื่อมโยงขึ้นใน เครือข่ายแบบรังผึ้งรุ่นที่สี่

### Uplink Small Packet Transmission Performance Improvements in Fourth-Generation Cellular Networks

ณัฏฐธิดา ตามควร (Nattanicha Tamkuan)\* พิเชษฐ เชี่ยวชนะกุล (Bhichate Chiewthanakul)<sup>1\*\*</sup>

(Received: April 14, 2021; Revised: June 26, 2021; Accepted: June 30, 2021)

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการส่งผ่านข้อมูลระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบรังผึ้งรุ่นที่สี่ สำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กผ่านการเชื่อมโยงขึ้น เพื่อให้ได้สมรรถนะในด้านความน่าเชื่อถือสูง การใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณสูง และค่าความล่าช้าต่ำ แบบจำลองของระบบเป็นการสื่อสารความยาวบล็อกคงที่ร่วมกับการร้องขอทำซ้ำอัตโนมัติแบบไฮบริด โดยเป็นการรับส่งแบบช่องทางเดียวเชิงซ้อนบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก นอกจากนี้ ระบบประยุกต์ใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดแบบไม่เชิงเส้นกำกับสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก ซึ่งบูรณาการร่วมกับโพรโทคอลสื่อสารเข้าถึงโดยสุ่มแบบสล็อตอะโลฮา ผลการศึกษาพบว่า การใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดแบบไม่เชิงเส้นกำกับ ช่วยให้การส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กผ่านการเชื่อมโยงขึ้นมีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณการสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น แต่ให้ค่าความล่าช้าที่สูงกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการใช้มาตรฐานการวัดความจุ

#### ABSTRACT

This article presented a concept of machine-to-machine data transmission in the fourth-generation cellular networks. The purpose was to achieve performance in terms of high reliability, high channel utilization, and low delay for uplink small packet transmission. The system model assumed a fixed blocklength communication in conjunction with a hybrid automatic repeat request over a complex single input and single output (SISO) additive white Gaussian noise channel. In addition, the system applied a nonasymptotic maximum coding rate metric for short packets integrated with slotted-Aloha random access communication protocol. The results of the study showed that the nonasymptotic maximum code rate metric allowed the uplink small packet transmission to achieve high reliability, and more efficient utilization of communication channels, but it resulted in a slightly higher delay compared to a capacity measurement metric.

**คำสำคัญ:** เครื่องกับเครื่อง, ความล่าช้า, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

**Keywords:** Machine-to-machine, Delay, Internet of things

<sup>1</sup>Corresponding author: bhichi@kku.ac.th

\*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\*รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT: Internet of Things) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างรวดเร็วในสถานการณ์การสื่อสารแบบไร้สาย [1-2] มีจุดเด่นที่สำคัญคือ รองรับการสื่อสารแบบเครื่องกับเครื่อง (M2M: Machine-to-Machine) โดยไม่ต้องผ่านการปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ [3] และสามารถบูรณาการร่วมกับเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) ในระบบคลาวด์ (Cloud System) [4-5] ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าการสื่อสารแบบเครื่องกับเครื่อง เป็นรูปแบบหลักในอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง [6] การที่จะทำให้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถมีพื้นที่ครอบคลุมไปทั่วทุกแห่งหนได้ ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบไร้สาย นั่นคือ ระบบเครือข่ายไร้สายแบบไร้สาย ซึ่งเป็นระบบเครือข่ายสื่อสารโทรคมนาคมที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบัน และส่วนใหญ่ใช้ระบบเครือข่ายไร้สายแบบไร้สายรุ่นที่สี่ (4G) ด้วยมาตรฐานแอลทีอี (LTE: Long-Term Evolution) [7] แต่ข้อจำกัดของแอลทีอีที่ไม่เหมาะกับการสื่อสารระหว่างเครื่อง คือ ถูกออกแบบเพื่อรองรับการสื่อสารระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (H2H: Human-to-Human) เป็นหลัก ที่ซึ่งลักษณะของข้อมูลเป็นแพ็กเก็ตที่มีขนาดใหญ่ และคุณภาพของการให้บริการ (QoS: Quality of Service) ขึ้นอยู่กับการเชื่อมโยงลง (Downlink) [8] ในขณะที่การสื่อสารในระบบเครือข่ายแบบเครื่องกับเครื่อง มีลักษณะของข้อมูลเป็นแพ็กเก็ตขนาดเล็ก และต้องการคุณภาพของการให้บริการสำหรับการเชื่อมโยงขึ้น (Uplink) เป็นหลัก จึงทำให้การทำงานของระบบเครือข่ายแบบไร้สายรุ่นที่สี่ เพื่อรองรับการสื่อสารแบบเครื่องกับเครื่องมีความผิดพลาดของการส่งผ่านข้อมูลที่สูง ส่งผลให้มีสมรรถนะการใช้งานต่ำไม่สามารถรองรับคุณภาพของการให้บริการตามที่เครื่องต้องการ [9] ดังนั้น การศึกษานี้จึงนำเสนอวิธีการทำให้แอลทีอีมีความผิดพลาดต่ำสำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กผ่านการเชื่อมโยงขึ้น ทำให้สมรรถนะในด้านการใช้ประโยชน์สูงและรองรับคุณภาพของการให้บริการสำหรับการสื่อสารระหว่างเครื่อง

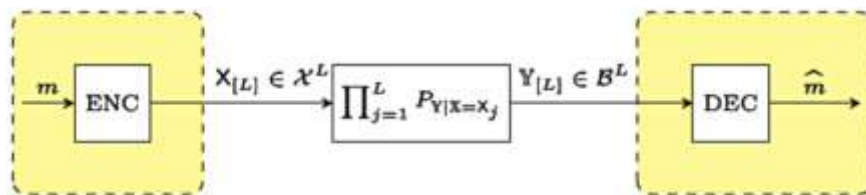
## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบเครือข่ายแบบไร้สายรุ่นที่สี่ หรือแอลทีอีถูกออกแบบให้มีความน่าเชื่อถือสูง ความหน่วงต่ำ (Low Latency) และรองรับอัตราการเพิ่มจำนวนของเครื่อง โดยมุ่งเน้นไปที่การรองรับสารสนเทศแพ็กเก็ตขนาดใหญ่ ที่สมรรถนะการสื่อสารจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานการวัดทางทฤษฎีสารสนเทศ เรียกว่า ค่าความจุ (Capacity) และความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย (Outage Capacity) ซึ่งจัดเป็นมาตรฐานการวัดแบบเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic) บนพื้นฐานค่าลิมิตของจำนวนสัญลักษณ์ในแพ็กเก็ตเข้าสู่อันต์ และพิจารณาโปรโตคอลสื่อสารเป็นอิสระจากทฤษฎีสารสนเทศ แต่ในขณะที่ยังการสื่อสารระหว่างเครื่องต้องการแพ็กเก็ตขนาดเล็กเพื่อให้เกิดความล่าช้าต่ำ มีจำนวนของสัญลักษณ์ในแพ็กเก็ตน้อย ไม่เป็นอิสระจากทฤษฎีสารสนเทศ และหากใช้ค่าความจุ หรือความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหายเป็นมาตรฐานการวัดทางทฤษฎีสารสนเทศ แล้วจะได้อัตราที่สูงสุดจากการคำนวณสูงกว่าความเป็นจริง ส่งผลให้การส่งผ่านเกิดความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตสูง ทำให้ไม่สามารถรองรับคุณภาพของการให้บริการตามที่เครื่องต้องการ [9] มาตรฐานการวัดแบบไม่เชิงเส้นกำกับ (Nonasymptotic) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการสื่อสารที่มีความยาวสัญลักษณ์คงที่ สามารถให้ค่าอัตราที่สูงสุดในรูปขอบเขตบนและขอบเขตล่างสำหรับการสื่อสารแพ็กเก็ตขนาดเล็ก [10] แต่ก็เกิดความยุ่งยากในการประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสาร ในงานของ Tan และ Tomamichel [11] ได้นำเสนอการหาค่าประมาณอัตราที่สูงสุดแบบปกติที่ให้ค่าใกล้เคียงกับขอบเขตล่าง สามารถใช้เป็นมาตรฐานการวัดสำหรับการสื่อสารแพ็กเก็ตขนาดเล็กบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์แบบบวก การทำให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตต่ำมีความสำคัญเพราะจะทำให้ระบบสื่อสารมีความน่าเชื่อถือสูง ช่วยทำให้สมรรถนะในด้านการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณสำหรับการเชื่อมโยงขึ้นสูง และความหน่วงต่ำนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ เพราะมีความเกี่ยวข้องกับสมรรถนะการใช้งานบนระบบเครือข่าย และการตอบสนองต่อความต้องการของเครื่องในระบบเครือข่ายระหว่างเครื่องกับเครื่อง ดังเช่น การใช้พลังงาน อัตราการส่งข้อมูล

ขั้นต่ำ และข้อกำหนดของคุณภาพของการให้บริการจำเพาะ [12] การกระทำให้มีสมรรถนะการใช้งานบนระบบเครือข่ายสูง และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของอุปกรณ์ได้ดี นั้นขึ้นอยู่กับมาตรฐานการวัดอัตรารหัสสูงสุดที่เที่ยงตรงสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก และโพรโทคอลควบคุมความผิดพลาด [11, 13]

## วิธีการวิจัย

ผู้วิจัยใช้แบบจำลองระบบการสื่อสารความยาวบล็อกคงที่ (FBL: Fixed Block-Length) ดังภาพที่ 1 ร่วมกับการร้องขอทำซ้ำอัตโนมัติแบบไฮบริด (HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request) ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับควบคุมความผิดพลาดในระบบแอลทีอี โดยเป็นการรับส่งแบบช่องทางเดียวเชิงซ้อน บนของสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก เพราะในระบบแอลทีอีไม่รองรับพหุนามสำหรับการเชื่อมโยงขึ้น [14] กำหนดโครงสร้างเฟรมข้อมูลเป็นแบบแอลทีอีเอฟดีดี (FDD: Frequency Division Duplex) บนพื้นฐานของมาตรฐานสามจีพีพีแอลทีอี (3GPP LTE standard: 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project Long Term Evolution Standard) [15] และประยุกต์ใช้มาตรฐานการวัดอัตรารหัสสูงสุด (Maximum Coding Rate) แบบไม่เชิงเส้นกำกับ (Nonasymptotic Stage) เขียนแทนด้วย  $R^*(\cdot)$  ในหน่วยบิตต่อสัญลักษณ์ ที่มีความเที่ยงตรงสูงสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก [11] และสามารถบูรณาการร่วมกับโพรโทคอลสื่อสารแบบการเข้าถึงโดยสุ่มเหนือช่องสัญญาณการเชื่อมโยงขึ้น [13]



ภาพที่ 1 แบบจำลองระบบการสื่อสารความยาวบล็อกคงที่ [13]

สำหรับ  $n$  แทนความยาวของแพ็กเก็ตในหน่วยสัญลักษณ์ ซึ่งแต่ละสัญลักษณ์ใช้หนึ่งของสัญญาณ และ  $\epsilon$  แทนขอบเขตบนน้อยสุดของความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ต แล้วค่าประมาณมาตรฐานการวัดอัตรารหัสสูงสุดของระบบสื่อสารสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก [11] สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$R^*(n, \epsilon) \approx C - \sqrt{\frac{V}{n}} Q^{-1}(\epsilon) + \left( \frac{\log n}{2n} \right) \quad (1)$$

เมื่อ  $Q^{-1}(\cdot)$  แทนฟังก์ชันผกผันของคิว ส่วนค่าความจุ  $C$  ในหน่วยบิตต่อสัญลักษณ์ และค่าการกระจายของช่องสัญญาณ (Channel Dispersion)  $V$  ได้จากการประยุกต์งานของ [10] แล้วได้สมการที่ (2) และ (3)

$$C(\rho) = \log(1 + \rho) \quad (2)$$

$$V(\rho) = \frac{\rho(2+\rho)}{(1+\rho)} (\log e)^2 \quad (3)$$

เมื่อ  $\rho$  แทนอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (SNR: Signal-to-Noise Ratio)

ผู้วิจัยเลือกใช้แพ็กเก็ตขนาดเล็ก  $n = 168$  สัญลักษณ์ ที่สามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบการจราจรที่ปลอดภัยและสมาร์ทมิเตอร์ (Smart Meter) [16-17] และสอดคล้องกับโอเอฟดีเอ็ม (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) แบบ 7 สัญลักษณ์ต่อสล็อต (Symbols/Slot) หรือ 14 สัญลักษณ์ต่อเฟรมย่อย (Symbols/Subframe)

แต่ละบล็อกทรัพยากร (RB: Resource Block) ซึ่งใช้ระยะเวลาหนึ่งสล็อต ประกอบด้วย 12 โทน (Tones) ด้วยระยะห่างคลื่นพาหะย่อย (SCS: Sub-Carrier Spacing) เป็น 15 กิโลเฮิรตซ์ ด้วยระยะเวลา 0.5 มิลลิวินาทีต่อสล็อต หรือระยะเวลา 1 มิลลิวินาทีต่อเฟรมย่อย และในหนึ่งเฟรมประกอบด้วย 10 เฟรมย่อย [14] ที่สามารถนำไปต่อยอดกับโครงสร้างเฟรมโอเพนดีเอ็มในระบบเครือข่ายแบบรังผึ้งที่ห้า เพื่อครอบคลุมพื้นที่ภายนอกในแมโครเซลล์ (Macro Cell) [18]

เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน  $p = 6$  เดซิเบล และความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ต  $\epsilon = 10^{-5}$  ที่รองรับการสื่อสารที่น่าเชื่อถือระดับมาก [19] จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการที่ (2) และสมการที่ (3) แล้วได้ค่าความจุ  $C = 0.697$  บิตต่อสัญลักษณ์ เท่ากับ  $0.697 \times 7 / (0.5 \times 10^{-3}) = 9,758$  บิตต่อวินาที หรือเท่ากับ  $9,758 / 0.697 / 168 = 83.3$  แพ็กเก็ตต่อวินาที และค่าการกระจายของช่องสัญญาณ  $V = 0.181$  เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ (1) แล้วใช้วิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม [20] ได้ค่าประมาณของมาตรฐานการวัดอัตราสูงสุด  $R^*(n, \epsilon) = 0.564$  บิตต่อสัญลักษณ์ เท่ากับ  $0.564 \times 7 / (0.5 \times 10^{-3}) = 7,896$  บิตต่อวินาที หรือเท่ากับ  $7,896 / 0.564 / 168 = 83.3$  แพ็กเก็ตต่อวินาที เพราะฉะนั้น หากใช้ค่าความจุเป็นมาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดที่ใช้สำหรับการสื่อสารแบบทั่วไป เช่น การสื่อสารระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ จะส่งผลให้ช่องสัญญาณเข้าสู่สถานะสัญญาณขาดหาย (Outage State) [21] ด้วยความน่าจะเป็นมากกว่า  $10^{-5}$  หรือกล่าวว่ามีความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตมากกว่า  $10^{-5}$  ทำให้ไม่สามารถรองรับระบบการสื่อสารที่น่าเชื่อถือระดับมากได้สำเร็จ

การพิจารณาหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตสามารถทำได้โดย เริ่มต้นให้  $k = nR$  เป็นขนาดสารสนเทศในหน่วยบิต เมื่อ  $R$  เป็นอัตราส่วนที่ใช้ในงานในหน่วยบิตต่อสัญลักษณ์ แล้วการประมาณความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตใน [11] สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$\epsilon^*(k, n) \approx Q\left(\frac{nC - k + (\log n)/2}{\sqrt{nV}}\right) \quad (4)$$

#### 1. ผลกระทบของมาตรฐานการวัดความจุสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก

การเชื่อมโยงขึ้นในเครือข่ายแบบรังผึ้งที่สี่หรือแอลทีอี อยู่บนพื้นฐานของการใช้มาตรฐานการวัดความจุภายใต้การสมมติว่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตเป็นศูนย์ ซึ่งแนวคิดนี้มีความเหมาะสมในกรณีที่แพ็กเก็ตมีขนาดใหญ่ ดังการประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ แต่หากนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารระหว่างเครื่องจะส่งผลให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตมากกว่าศูนย์ [9]

จากสมการที่ (4) เมื่อใช้มาตรฐานการวัดความจุเป็นอัตราส่วนที่ใช้งาน นั่นคือ  $R = C$  จะได้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตด้วยมาตรฐานการวัดความจุ เขียนแทนด้วย  $\epsilon_c^*(n)$  ดังสมการที่ (5)

$$\epsilon_c^*(n) \approx Q\left(\frac{\log n}{2\sqrt{nV}}\right) \quad (5)$$

เพราะว่า  $C \geq R$  ทำให้  $nC - k \geq 0$  และอีกทั้ง  $Q(\cdot)$  เป็นฟังก์ชันลด (Decreasing Function) ดังนั้น เมื่อค่าความยาวของแพ็กเก็ตคงที่และอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนไว้ จะพบว่า  $\epsilon_c^*(n) \geq \epsilon^*(k, n)$  นั่นคือ การใช้มาตรฐานการวัดความจุสำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กจะทำให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตมากกว่าศูนย์ และขึ้นกับความยาวของแพ็กเก็ต เพราะฉะนั้น การพิจารณาการไหลการทำงานของโปรโทคอลสื่อสารให้เป็นอิสระจากทฤษฎีสารสนเทศ จะทำให้การส่งผ่านข้อมูลไม่สามารถรองรับคุณภาพของการให้บริการในระดับที่น่าเชื่อถือมากได้สำเร็จ

พิจารณากรณี  $n = 168$  สัญลักษณ์และอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน  $p = 6$  เดซิเบลหรือเท่ากับค่าการกระจายของช่องสัญญาณ  $V = 0.181$  ในสมการที่ (5) จากนั้นใช้วิธีการเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม [20] แล้วได้

ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตเป็น  $\epsilon_c^*(168) = 0.42 \gg 10^{-5}$  ซึ่งบอกเป็นนัยว่าการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กนี้ผ่านการเชื่อมโยงขึ้นในเครือข่ายแบบริงฝักรุ่นที่สี่หรือแอลทีอีโดยอาศัยมาตรฐานการวัดที่มีอยู่ในระบบจะไม่สามารถรองรับคุณภาพของการให้บริการในระดับที่นาเชื่อถือได้

## 2. ความล่าช้าของการส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้น

ระยะเวลาที่เครื่องส่งแพ็กเก็ตผ่านการเชื่อมโยงขึ้นไปยังสถานีฐานหรือความล่าช้า (Delay) จะมีผลต่อความหน่วง (Latency) ซึ่งเป็นข้อกำหนดในคุณภาพของการให้บริการในระบบแอลทีอี ดังนั้นการทราบค่าความล่าช้าแพ็กเก็ตในการส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้นจึงมีความสำคัญ ผู้วิจัยใช้โพรโทคอลสื่อสารแบบการเข้าถึงโดยสุ่มเหนือช่องสัญญาณการเชื่อมโยงขึ้นไปยังสถานีฐาน (BS: Base Station) เป็นแบบสล็อตอะโลฮา (Slotted-Aloha) ที่มีอยู่ในมาตรฐานแอลทีอี เพราะให้ปริมาณงาน (Throughput) สูงกว่าแบบทีดีเอ็มเอ (TDMA: Time-Division Multiple-Access) [9]

ให้  $\lambda_{id}$  เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนแพ็กเก็ตที่พยายามใช้ช่องสัญญาณในหนึ่งวินาที หรือบางทีเรียกว่าภาระ (Load) สำหรับเครื่องจำนวน  $M$  เครื่อง ให้แต่ละเครื่องมีการส่งข้อมูลด้วยแพ็กเก็ตขนาด  $n$  สัญลักษณ์ไปยังสถานีฐาน แต่ละแพ็กเก็ตจะถูกส่งออกภายในเวลาที่สอดคล้องกับการใช้  $n$  ช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณทั้งหมดจำนวน  $n$  นี้จะถูกแยกออกเป็น  $L = 12$  สล็อต แต่ละสล็อตมีขนาดเท่ากันเป็น 14 ช่องสัญญาณ เพื่อสอดคล้องกับมาตรฐาน 14-OFDM เมื่อประยุกต์สูตรใน [9] ได้ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตต่อเวลาเข้าสู่ช่องสัญญาณ  $\lambda$  ดังสมการที่ (6)

$$\lambda = \frac{\lambda_{id}M}{12} \left(\frac{11}{12}\right)^{M-1} \cdot (1 - \epsilon^*) \quad (6)$$

พิจารณาที่ภาระเข้าสู่ช่องสัญญาณด้วยค่าเฉลี่ย  $\lambda_{id}$  เท่ากันทั้งกรณีการใช้ค่าประมาณมาตรฐานการวัดอัตราหัดสูงสุด  $R^*$  และกรณีการใช้ค่าความจุ  $C$  เพื่อการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณและความล่าช้า ในกรณีใช้ค่าประมาณมาตรฐานการวัดอัตราหัดสูงสุด  $R^*$  ได้ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตต่อเวลาเข้าสู่ช่องสัญญาณ  $\lambda_{R^*}$  ดังสมการที่ (7)

$$\lambda_{R^*} = \frac{\lambda_{id}M}{12} \left(\frac{11}{12}\right)^{M-1} \cdot (1 - \epsilon^*(k, n)) \quad (7)$$

และกรณีใช้มาตรฐานการวัดเป็นความจุได้ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตต่อเวลาเข้าสู่ช่องสัญญาณ  $\lambda_C$  ดังสมการที่ (8)

$$\lambda_C = \frac{\lambda_{id}M}{12} \left(\frac{11}{12}\right)^{M-1} \cdot (1 - \epsilon_C^*(n)) \quad (8)$$

พิจารณาให้แต่ละเครื่องก่อกำเนิดแพ็กเก็ตอย่างเป็นอิสระต่อกัน การให้บริการการส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้นตามลำดับเวลาการเข้าสู่ช่องสัญญาณ และระยะเวลาการให้บริการสำหรับแต่ละแพ็กเก็ตมีการแจกแจงเดียวกันและเป็นอิสระต่อกัน (IID: Identically and Independent Distribution) แล้วแบบจำลองสล็อตอะโลฮาสามารถแทนด้วยคิวแบบ M/G/1 [22]

ให้  $\mu$  เป็นค่าเฉลี่ยอัตราการให้บริการในหน่วยแพ็กเก็ตต่อวินาที และให้  $\hat{\rho} = \lambda/\mu$  แทนการใช้ประโยชน์ (Utilization) สมมติว่า  $\hat{\rho} < 1$  เพื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่โดยตลอด และเนื่องจากแพ็กเก็ตมีขนาดคงที่จึงส่งผลให้  $\mu$  มีค่าคงที่ เมื่อประยุกต์สูตรของโพลเลเชคและคินทซ์ชิน (Pollaczek-Khinchine) [23] แล้วความล่าช้าของการส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้น  $T$  วินาที สามารถหาได้จากสมการที่ (9)

$$T = \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda}{2\mu^2(1-\hat{\rho})} \quad (9)$$

ในกรณีใช้ค่าประมาณมาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุด  $R^*$  ด้วยค่า  $\mu = 83.3$  และ  $\lambda = \lambda_{R^*}$  และให้  $\hat{\rho}_R = \lambda_{R^*}/\mu$  แทนค่าในสมการที่ (9) แล้วความล่าช้าของการส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้น  $T_{R^*}$  วินาที สามารถหาได้จากสมการที่ (10)

$$T_{R^*} = \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda_{R^*}}{2\mu^2\left(1 - \frac{\lambda_{R^*}}{\mu}\right)} \quad (10)$$

ในทำนองเดียวกัน กรณีใช้ค่ามาตรฐานการวัดความจุ  $C$  ด้วยค่า  $\mu = 83.3$  และ  $\lambda = \lambda_C$  และให้  $\hat{\rho}_C = \lambda_C/\mu$  แทนค่าในสมการที่ (9) แล้วความล่าช้าของการส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้น  $T_C$  วินาที สามารถหาได้จากสมการที่ (11)

$$T_C = \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda_C}{2\mu^2\left(1 - \frac{\lambda_C}{\mu}\right)} \quad (11)$$

พิจารณาอัตราส่วนระหว่างการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณด้วยมาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุดต่อการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณด้วยมาตรฐานการวัดความจุ เขียนแทนด้วย  $\hat{\rho}_R/\hat{\rho}_C$  โดยสมการที่ (7) และสมการที่ (8) ได้

$$\begin{aligned} \frac{\hat{\rho}_R}{\hat{\rho}_C} &= \frac{\lambda_{R^*}}{\lambda_C} \\ &= \frac{1 - \epsilon^*(k, n)}{1 - \epsilon_C^*(n)} \end{aligned} \quad (12)$$

เพราะฉะนั้น อัตราส่วนระหว่างการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณด้วยมาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุดต่อการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณด้วยมาตรฐานการวัดความจุจึงเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความน่าจะเป็นความไม่ผิดพลาดของแพ็กเก็ตเมื่อใช้มาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุดต่อความน่าจะเป็นความไม่ผิดพลาดของแพ็กเก็ตเมื่อใช้มาตรฐานการวัดความจุ

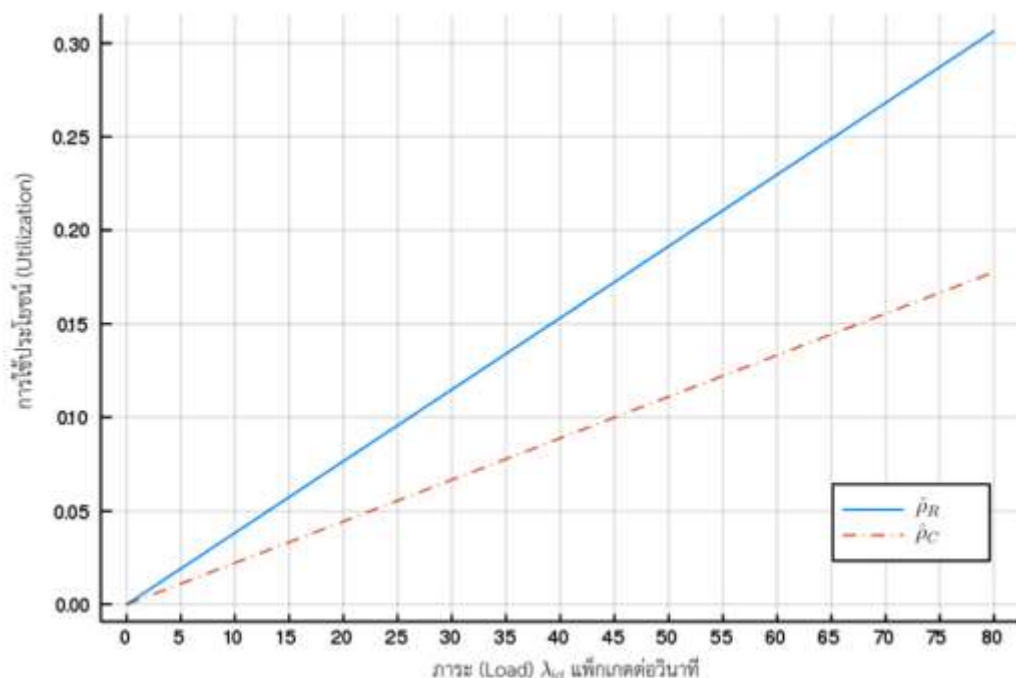
## ผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้มีการใช้พารามิเตอร์ ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน  $\rho = 6$  เดซิเบล ขนาดความยาวของแพ็กเก็ต  $n = 168$  เพื่อหาค่าความจุ  $C$  อัตราหัสสูงสุด  $R^*(n, \epsilon)$  และค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตเมื่อใช้มาตรฐานการวัดความจุ ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ใช้งานเครื่อง  $M_0 = 20$  เครื่อง และแต่ละเครื่องมีการเฉลี่ย  $\lambda_{id} = 1$  ถึง 80 แพ็กเก็ตต่อวินาที เพื่อเปรียบเทียบผลการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณและความล่าช้าในระบบสื่อสารเมื่อใช้มาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุดและมาตรฐานความจุ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ค่าความจุเป็นมาตรฐานการวัดสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก ส่งผลให้ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตเท่ากับ  $\epsilon_C^*(n) = 0.42$  ค่านี้สูงมากเมื่อเทียบกับการใช้ค่าประมาณมาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุดของระบบสื่อสารสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก ที่ให้ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตเท่ากับ  $\epsilon^*(k, n) = 10^{-5}$  และผลค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตที่สูงมากนี้ที่ได้จากการใช้ค่าความจุ  $C$  เป็นมาตรฐานการวัดสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็กก็สอดคล้องกับใน [9, 13] การที่ค่า  $\epsilon_C^*(n) \gg \epsilon^*(k, n) = 10^{-5}$  บอกเป็นนัยว่าการใช้ค่าประมาณมาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุดของระบบสื่อสารสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็กช่วยให้ระบบสื่อสารมีความน่าเชื่อถือ ในขณะที่การใช้ค่าความจุ  $C$  เป็นมาตรฐานการวัดสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็กไม่สามารถรองรับระบบสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือ

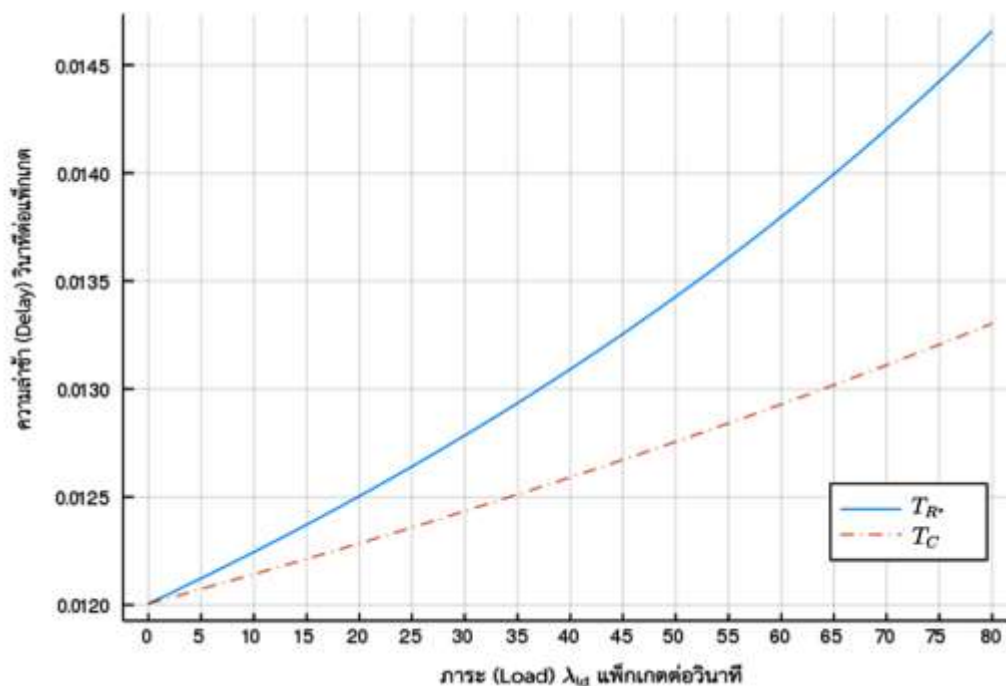
การแสดงผลเปรียบเทียบสมรรถนะในเชิงการใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณ ระหว่างการใช้ค่าประมาณของมาตรฐานการวัดอัตราหัสสูงสุด  $R^*(n, \epsilon) = 0.564$  บิตต่อสัญลักษณ์ และการใช้ค่าความจุ  $C = 0.697$  บิตต่อสัญลักษณ์ เมื่อ

จำนวนเครื่อง 20 เครื่อง และภาระ  $\lambda_d$  มีค่าระหว่าง 1 ถึง 80 แพ็กเก็ตต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบการจราจรที่ปลอดภัยและสมารถมีเตอร์ [16] และให้ผลจากการศึกษาในด้านความล่าช้าอยู่ในช่วงที่รองรับคุณภาพของการให้บริการได้ ทั้งนี้ หากต้องการให้ระบบสื่อสารรองรับมากกว่า 20 เครื่อง สามารถทำได้โดยการใช้จำนวนของสัญญาณเป็นพหุคูณของ 168 ของสัญญาณ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อภาระเพิ่มขึ้นการใช้ประโยชน์ของสัญญาณก็จะสูงขึ้น โดยการใช้ประโยชน์ของสัญญาณมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นต่อภาระสำหรับทั้งสองมาตรฐานการวัด และอัตราการใช้ประโยชน์ของสัญญาณจากมาตรฐานการวัดอัตราสูงสุด  $R^*(n, \epsilon)$  มีค่ามากกว่ากรณีการใช้มาตรฐานการวัดด้วยค่าความจุตลอดทุกช่วงของภาระ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 ซึ่งบอกเป็นนัยว่า ที่ภาระเท่ากันการใช้ค่าประมาณของมาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดช่วยให้แพ็กเก็ตสามารถเข้าสู่ช่องสัญญาณได้มากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อภาระมีค่ามากเมื่อแทนค่า  $\epsilon^*(k, n) = 10^{-5}$  และ  $\epsilon_c^*(n) = 0.42$  ในสมการ (12) จะพบว่า  $\hat{\rho}_R/\hat{\rho}_C = (1 - 10^{-5})/(1 - 0.42) = 1.72$  หรือ 172% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดช่วยให้มีการใช้ประโยชน์ของสัญญาณสูงกว่าการใช้มาตรฐานการวัดความจุถึง 72% เสมอ โดยไม่ขึ้นกับจำนวนของเครื่องและภาระที่เปลี่ยนแปลง

การแสดงเปรียบเทียบสมรรถนะในเชิงความล่าช้า ระหว่างการใช้ค่าประมาณของมาตรฐานการวัดอัตราสูงสุด  $R^*(n, \epsilon) = 0.564$  บิตต่อสัญลักษณ์ และการใช้ค่าความจุ  $C = 0.697$  บิตต่อสัญลักษณ์ เมื่อจำนวนเครื่อง 20 เครื่อง และภาระ  $\lambda_d$  มีค่าระหว่าง 1 ถึง 80 แพ็กเก็ตต่อวินาที ผลการศึกษาพบว่าค่าความล่าช้าจะค่อยเพิ่มขึ้นอย่างช้าเมื่อภาระเพิ่มขึ้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3 สังเกตว่าค่าความล่าช้าต่ำสุดอยู่ที่ 12 มิลลิวินาที และสูงสุดประมาณที่ 15 มิลลิวินาที อัตราการเพิ่มขึ้นของความล่าช้าเมื่อภาระเพิ่มขึ้นมีไม่มาก และค่าความล่าช้าจากค่าประมาณของมาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการใช้ค่าความจุเป็นมาตรฐานการวัด ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่สูงกว่าของการใช้ประโยชน์ของสัญญาณในมาตรฐานการวัดอัตราสูงสุด [23]



ภาพที่ 2 การใช้ประโยชน์ของสัญญาณ  $\hat{\rho}_R$  และ  $\hat{\rho}_C$  เมื่อใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุด  $R^*(n, \epsilon)$  และความจุ  $C$  ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ค่าความล่าช้า  $T_{R^*}$  และ  $T_C$  เมื่อใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุด  $R^*(n, \epsilon)$  และความจุ  $C$  ตามลำดับ

## สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้นำเสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะการส่งผ่านข้อมูลระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบไร้สายที่สี่หรือ แอลทีอีที่รองรับพื้นที่ครอบคลุมภายนอกระยะไกล ด้วยการประยุกต์ใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดแบบไม่เชิงเส้น กำกับ ที่มีความเที่ยงตรงสูงสำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก บุรณาการร่วมกับโพรโทคอลสื่อสารแบบการเข้าถึงโดยสุ่มบน ช่องสัญญาณแบบสล็อตเวลาสำหรับการเชื่อมโยงขึ้นไปยังสถานีฐานที่มีอยู่ในมาตรฐานแอลทีอี ผลการศึกษาพบว่าใน ด้านการรองรับระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องที่ต้องการความเชื่อถือสูงนั้น วิธีการใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดที่ นำเสนอสามารถให้ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตต่ำด้วยค่า  $10^{-5}$  สำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็ก จึง สามารถรองรับระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องที่ต้องการความเชื่อถือสูงได้ ในขณะที่การใช้ความจุเป็นมาตรฐานการวัดให้ ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแพ็กเก็ตสูงมากด้วยค่า 0.42 สำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็ก จึงไม่สามารถ รองรับระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องที่ต้องการความเชื่อถือสูงได้ ในด้านประโยชน์ของการใช้ช่องสัญญาณนั้น พบว่า วิธีการใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ความจุเป็นมาตรฐานการวัด สามารถให้ค่า ประโยชน์ของการใช้ช่องสัญญาณที่สูงกว่ามากถึง 72% เมื่อเทียบกับวิธีการใช้ความจุเป็นมาตรฐานการวัด ส่วนในด้าน ความล่าช้าการส่งผ่านแพ็กเก็ตที่เกิดขึ้นจากการใช้มาตรฐานการวัดอัตราสูงสุดอยู่ระหว่าง 12 ถึง 14 มิลลิวินาทีจะมี ค่าสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการใช้ความจุเป็นมาตรฐานการวัดที่ภาระเท่ากัน

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการศาสตราจารย์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และ อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Atzori L, Iera A, Morabito G. The internet of things: A survey. *Computer networks*. 2010;54(15):2787–2805.
2. SECTOR S, ITU O. Series y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks next generation networks–frameworks and functional architecture models. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Recommendation ITU-T Y. 2012;2060.
3. Fadlullah ZM, Fouda MM, Kato N, Takeuchi A, Iwasaki N, Nozaki Y. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid. *IEEE Communications Magazine*. 2011;49(4):60–65.
4. Doukas C, Maglogiannis I. Bringing IoT and cloud computing towards pervasive healthcare. In: 2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. IEEE; 2012. p. 922–926.
5. Zhou J, Leppanen T, Harjula E, Ylianttila M, Ojala T, Yu C, et al. Cloudthings: A common architecture for integrating the internet of things with cloud computing. In: Proceedings of the 2013 IEEE 17th international conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD). IEEE; 2013. p. 651–657.
6. Jover RP, Murnets I. Connection-less communication of IoT devices over LTE mobile networks. In: 2015 12th annual IEEE international conference on sensing, communication, and networking (SECON). IEEE; 2015. p. 247–255.
7. Cox C. An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications. John Wiley & Sons; 2012.
8. 3GPP TR 25 913. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (EUTRAN); 2009.
9. Durisi G, Koch T, Popovski P. Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets. *Proceedings of the IEEE*. 2016;104(9):1711–1726.
10. Polyanskiy Y, Poor HV, Verdú S. Channel coding rate in the finite blocklength regime. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010;56(5):2307.
11. Tan VYF, Tomamichel M. The third-order term in the normal approximation for the AWGN channel. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2015;61(5):2430–2438.
12. Ghavimi F, Chen HH. M2M communications in 3GPP LTE/LTE-A networks: Architectures, service requirements, challenges, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014;17(2):525–549.
13. Östman J. Short-Packet Communications: Fundamental Performance and Key Enablers. 2019;.
14. ETSI T. 136 213, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. Technical Report Version 11.2. 0 (2013); 2013.
15. Lozano A, Jindal N. Transmit diversity vs. spatial multiplexing in modern MIMO systems. *IEEE Transactions on wireless communications*. 2010;9(1):186–197.



16. Popovski P. Ultra-reliable communication in 5G wireless systems. In: 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity. IEEE; 2014. p. 146–151.
17. Laner M, Nikaein N, Svoboda P, Popovic M, Drajić D, Krco S. Traffic models for machine-to-machine (M2M) communications: types and applications. In: Machine-to-machine (M2M) Communications. Elsevier; 2015. p. 133–154.
18. Sanfilippo G, Galinina O, Andreev S, Pizzi S, Araniti G. A concise review of 5G new radio capabilities for directional access at mmWave frequencies. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 2018; p. 340–354.
19. Caire G, Taricco G, Biglieri E. Optimum power control over fading channels. IEEE Transactions on Information Theory. 1999;45(5):1468–1489.
20. Stein W, et al. Sage Mathematics Software, Version 9.2 [Internet]. 2020. Available from: <http://www.sagemath.org>
21. Biglieri E, Proakis J, Shamai S. Fading channels: Information-theoretic and communications aspects. IEEE Transactions on Information Theory. 1998;44(6):2619–2692.
22. Yao X, Yang OW. A queueing analysis of slotted ALOHA systems. In: Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. IEEE; 1993. p. 1234–1238.
23. Bertsekas DP, Gallager RG, Humblet P. Data networks. vol. 2. Prentice-Hall International New Jersey; 1992.