

การเพิ่มสมรรถนะการสื่อสารระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบรังผึ้งรุ่นที่ห้า Improving the Transmission Performance between Machines in the Fifth-Generation Cellular Networks

นันทชนก กองพิลา (Nunchanok Kongpila)* พิชชฐ์ เชี่ยวชนะกุล (Bhichate Chiewthanakul)^{1**}

(Received: April 14, 2021; Revised: June 15, 2021; Accepted: June 17, 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบรังผึ้งรุ่นที่ห้า การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องแบบไร้สายเป็นกุญแจหลักของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ช่วยให้สามารถดำเนินการเครื่องจักรอัจฉริยะในอุตสาหกรรม ผ่านทางเว็บแอปพลิเคชันที่เชื่อมต่อกันในระบบคลาวด์ การสื่อสารระหว่างเครื่องมีรูปแบบการสื่อสารที่แตกต่างจากการสื่อสารระหว่างมนุษย์ที่ต้องการแพ็กเก็ตขนาดใหญ่สำหรับการเชื่อมโยงลง และพิจารณาโพรโทคอลการสื่อสารเป็นอิสระจากทฤษฎีสารสนเทศ การศึกษานี้นำเสนอการเพิ่มสมรรถนะการส่งผ่านระหว่างเครื่องโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการใช้ทฤษฎีสารสนเทศที่คำนึงถึงแพ็กเก็ตขนาดเล็กสำหรับการเชื่อมโยงขึ้น และโพรโทคอลการสื่อสาร การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่แนะนำสามารถเพิ่มปริมาณงานการส่งผ่านได้ประมาณ 5.333 เท่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลเดิมในแมโครเซลล์

ABSTRACT

This article aimed to improve the transmission performance between machines in the fifth-generation cellular networks. Machine-to-machine communications are the key to the Internet of things, enabling intelligent machines to operate in industries via web applications that are connected in a cloud system. Machine-to-machine communications have a different style from human communications that requires large packets for downlinks and considers the communication protocol independent of information theory. This study proposed an enhancement of the machine-to-machine transmission performance based on using information theory that takes into account short packets for uplink and communication protocols. The result showed that the suggested technique could increase the transmission throughput by approximately 5.333 times compared to those original protocols in the macro cell.

คำสำคัญ: เครื่องกับเครื่อง, ความจุ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Keywords: Machine-to-machine, Capacity, Internet of things

¹Corresponding author: bhichi@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT: Internet of Things) เป็นกระบวนทัศน์ใหม่ (Novel Paradigm) ที่ได้รับความนิยมอย่างรวดเร็วในสถานการณ์ที่เครือข่ายไร้สายมีอิทธิพลของยุคสมัยใหม่ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งช่วยผลักดันให้มีการเพิ่มสมรรถนะการสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่อง (M2M: Machine-to-Machine) ที่ใช้มากสำหรับการดำเนินการในอุตสาหกรรมผ่านการบูรณาการร่วมกับเว็บแอปพลิเคชันที่เชื่อมต่อกันในระบบคลาวด์ อันส่งผลให้รองรับการขยายตัวของการสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องได้ดียิ่งขึ้น [1-3] การทำให้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมีพื้นที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้นจำเป็นต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานจากเครือข่ายแบบไร้สาย แม้ว่าระบบเครือข่ายแบบไร้สายรุ่นที่สี่ทั้งแบบแอลทีอี (LTE: Long Term Evolution) และแบบมาตรฐานขั้นสูงของแอลทีอี (LTE-A: Long Term Evolution Advance) ได้มีการกำหนดคลาสคุณภาพของการให้บริการที่หลากหลาย แต่ก็ได้รับการพัฒนาให้มีความเหมาะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (H2H: Human-to-Human) ที่คำนึงถึงแพ็กเก็ตขนาดใหญ่สำหรับการเชื่อมโยงลง (Downlink) เป็นหลัก ในขณะที่ลักษณะการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องกับเครื่องนั้น มีความต้องการแตกต่างจากการรับส่งข้อมูลระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ จึงส่งผลให้เกิดปัญหาหลายด้าน ได้แก่ การเข้าถึงคลื่นวิทยุ และเครือข่ายหลัก (CNs: Core Networks) [4] ด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ด้านการรองรับคุณภาพของการให้บริการ (QoS: Quality of Service) และด้านการขยายจำนวนของเครื่อง [5] ทั้งนี้เป็นเพราะรูปแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องกับเครื่องนั้น มีลักษณะเป็นแพ็กเก็ตขนาดเล็ก หรือเป็นข้อมูลการวัดสหสัมพันธ์ในแพ็กเก็ตขนาดเล็กที่ส่งออกมาตามลำดับ นั่นคือ สารสนเทศบรรทุก (Information Payload) มีขนาดใกล้เคียงกับสารสนเทศควบคุม (Control Information) และคุณภาพของการให้บริการขึ้นอยู่กับ การเชื่อมโยงขึ้น (Uplink) [6]

การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องในอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยผ่านเครือข่ายแบบไร้สายรุ่นที่ห้า (5G: Fifth-Generation Cellular Systems) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น แต่ยังมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากแนวคิดและการออกแบบระบบไร้สายความเร็วสูงนั้น ล้วนอยู่บนพื้นฐานการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสารสนเทศ (Information Theory) ที่คำนึงถึงแพ็กเก็ตขนาดใหญ่สำหรับการเชื่อมโยงลง และมีการพิจารณาโปรโตคอลสื่อสารให้เป็นอิสระจากทฤษฎีสารสนเทศ ตัวอย่างเช่น เมื่อแพ็กเก็ตข้อมูลจากสถานีฐาน ที่ถูกส่งผ่านการเชื่อมโยงลงเหนือช่องสัญญาณถึงอุปกรณ์ แล้วไม่เกิดการผิดพลาด จากนั้นอุปกรณ์จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลขึ้นไปชั้นเครือข่าย (Network Layer) และแสดงการยอมรับแพ็กเก็ตข้อมูลนี้ด้วยการส่งแพ็กเก็ตการยอมรับ (ACK: Acknowledge) ซึ่งเป็นสารสนเทศควบคุม ผ่านการเชื่อมโยงขึ้นเหนือช่องสัญญาณกลับไปยังสถานีฐาน ภายใต้การพิจารณาว่าแพ็กเก็ตการยอมรับที่ถูกส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้นเหนือช่องสัญญาณไม่เกิดการผิดพลาด เพราะว่าถึงแม้สารสนเทศควบคุมนี้เกิดการผิดพลาดแต่แพ็กเก็ตข้อมูลได้ขึ้นไปชั้นเครือข่ายของ อุปกรณ์แล้ว จึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสื่อสารผ่านการเชื่อมโยงลง [6-7] แต่ถ้าใช้โปรโตคอลเดียวกันนี้กับการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลขนาดเล็กจากเครื่องผ่านการเชื่อมโยงขึ้นเหนือช่องสัญญาณไปยังสถานีฐาน สมมติว่าเกิดการผิดพลาด และอุปกรณ์พิจารณาว่าแพ็กเก็ตที่ส่งผ่านการเชื่อมโยงขึ้นเหนือช่องสัญญาณไม่ผิดพลาด แล้วสถานีฐานจะไม่สามารถส่งแพ็กเก็ตข้อมูลขึ้นไปชั้นเครือข่ายได้ จึงจำเป็นต้องมีการกลไกการควบคุมความผิดพลาด ซึ่งต้องอาศัยสารสนเทศควบคุม จนกว่าแพ็กเก็ตข้อมูลที่ได้รับถูกต้อง แล้วค่อยส่งแพ็กเก็ตข้อมูลขึ้นไปชั้นเครือข่าย ดังนั้น ประสิทธิภาพของโปรโตคอลสื่อสารระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบไร้สายรุ่นที่ห้าจะได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากสารสนเทศควบคุม [8] หรือกล่าวว่าการส่งผ่านแพ็กเก็ตข้อมูลขนาดเล็กระหว่างเครื่องผ่านการเชื่อมโยงขึ้นเหนือช่องสัญญาณในเครือข่ายแบบไร้สายรุ่นที่ห้าควรมีการพิจารณาโปรโตคอลสื่อสารร่วมกับการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสารสนเทศ

ระบบสื่อสารที่มีสมรรถนะสูงและมีความน่าเชื่อถือ ต้องอาศัยมาตรฐานการวัดสมรรถนะจากทฤษฎีสารสนเทศที่เที่ยงตรง เพื่อควบคุมอัตราการใช้รหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding) ในการสื่อสารให้มีความน่าจะเป็นความผิดพลาด

ของแพ็กเก็ต เขียนแทนด้วย ϵ ไม่เกินค่าที่กำหนดตามคุณภาพของการให้บริการที่ต้องการ เนื่องจากมาตรฐานการวัดสมรรถนะในหน่วยบิตต่อสัญลักษณ์ ที่ใช้ในปัจจุบันทั้งความจุ (Capacity) เขียนแทนด้วย C และความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย (Outage Capacity) เขียนแทนด้วย C_e มีความเที่ยงตรงและเหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารไร้สายเมื่อแพ็กเก็ตมีขนาดใหญ่ ดังเช่น แพ็กเก็ตที่ใช้ช่องสัญญาณมากกว่า 1,000 ช่อง [9] เพราะการแพร่กระจายคลื่นในช่วงการส่งผ่านแพ็กเก็ตมีค่าเฉลี่ยความผิดเพี้ยน (Distortion) สอดคล้องกับกฎว่าด้วยจำนวนมาก (LLN: Law of Large Number) ทำให้อัตราการหักสูงที่สุด เขียนแทนด้วย R^* มีค่าลู่เข้า (Convergent) สู่ขอบเขตบน (Upper Bound) ซึ่งคือ ค่าความจุและความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย ในทางตรงกันข้าม การแพร่กระจายคลื่นในช่วงการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กจะมีค่าเฉลี่ยความผิดเพี้ยนไม่สอดคล้องกับกฎข้างต้น ทำให้อัตราการหักสูงที่สุดลู่ออก (Divergent) จากขอบเขตบน ถ้าหากนำมาตรฐานการวัดสมรรถนะนี้มาใช้ในการสื่อสารแพ็กเก็ตขนาดเล็กแล้ว จะทำให้ผลการวัดสมรรถนะผิดพลาด นั่นคือ สถานีฐานได้ผลการวัดอัตราการหักสูงที่สุดในชั้นกายภาพ (Physical Layer) มีค่ามากกว่าความเป็นจริงมาก [10] อันส่งผลให้ตัวจัดกำหนดการที่สถานีฐานจัดสรรทรัพยากรในรูปสล็อตเวลาความถี่ (Time-Frequency Slots) ต่ำกว่าที่เครื่องต้องการอย่างแท้จริง จึงส่งผลให้ความน่าจะเป็นผิดพลาดของแพ็กเก็ตสูงกว่าที่กำหนดมาก นำไปสู่สถานการณ์ที่ระบบเครือข่ายไม่สามารถรองรับคุณภาพของการให้บริการตามความต้องการของเครื่อง [6] เพราะฉะนั้น การศึกษานี้จึงสนใจการเพิ่มสมรรถนะการสื่อสารระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบไร้สายที่ทำได้ ด้วยการนำมาตรฐานการวัดอัตราการหักสูงที่สุดที่เที่ยงตรงร่วมกับกลไกการควบคุมความผิดพลาดที่รวมวิธีการของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบข้างหน้า (Forward-Error Correction Codes) สำหรับการสื่อสารแพ็กเก็ตขนาดเล็ก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดการทำให้ระบบเครือข่ายแบบไร้สายที่ทำได้ รองรับอัตราการเพิ่มจำนวนของเครื่อง การลดความล่าช้า และการให้ความน่าเชื่อถือสูงยิ่ง ที่ดีกว่าค่ามาตรฐานในปัจจุบัน สำหรับการสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโพรโทคอลสแต็กในระบบไร้สายที่ทำได้ ซึ่งใช้แบบจำลองโอเอสไอ (OSI model: Open Systems Interconnection Model) และการเพิ่มสมรรถนะของวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณ โดยอาศัยแนวทาง คือ 1. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัม (Spectrum) ซึ่งหมายถึง การใช้พลังงานต่อบิตลดลง ด้วยวิธีการเข้ารหัสช่องสัญญาณและการกล้ำ (Modulation) ในชั้นกายภาพ 2. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้สัญญาณด้วยการพัฒนาในชั้นกายภาพ และการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (MAC: Medium Access Control) โดยคำนึงถึงความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) และพื้นที่ครอบคลุม โดยใช้มาตรฐานการวัดสมรรถนะทั้งความจุ และความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย ที่เหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารไร้สายเมื่อแพ็กเก็ตมีขนาดใหญ่ [11-14] ทำให้ผลการวัดอัตราการหักสูงที่สุดมีค่ามากกว่าความเป็นจริงมาก ดังนั้น ส่งผลให้ตัวจัดกำหนดการที่สถานีฐานจัดสรรทรัพยากรเวลาความถี่ (Time-Frequency Resource) ผิดพลาดต่ำกว่าความเป็นจริง และนำไปสู่สถานการณ์ที่ระบบเครือข่ายไม่สามารถรองรับคุณภาพของการให้บริการตามความต้องการของเครื่อง [6]

การศึกษาความต้องการของเครื่องจักรอัตโนมัติหรืออุปกรณ์ เพื่อให้สามารถใช้งานในระบบเครือข่ายแบบไร้สายที่ทำได้ สามารถจำแนกได้สองแบบ คือ แบบการสื่อสารที่น่าเชื่อถือระดับมาก (URC: Ultrareliable Communication) ซึ่งหมายถึง บริการการสื่อสาร ที่ซึ่งแพ็กเก็ตข้อมูลถูกแลกเปลี่ยนด้วยปริมาณงานในระดับต่ำปานกลาง ดังเช่น 50 เมกะบิตต่อวินาที (Mb/s) ภายใต้เงื่อนไขของความน่าเชื่อถือไม่น้อยกว่า 99.999 เปอร์เซ็นต์ และความล่าช้าไม่เกิน 4 มิลลิวินาที และแบบการสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องจำนวนมาก (MM2M: Massive Machine-to-Machine Communications) ซึ่งหมายถึง สถานการณ์ที่เครื่องจำนวนมาก ดังเช่น 10,000 เครื่อง จำเป็นต้องได้รับการบริการภายในพื้นที่ที่กำหนด

นั่นคือ เหตุการณ์นี้เกี่ยวข้องกับระบบไซเบอร์กายภาพ (Cyber-Physical Systems) ที่อุปกรณ์จำนวนมากทำงานเป็นอิสระต่อกัน [15-17] มีความเกี่ยวข้องกับแพ็กเก็ตข้อมูลขนาดเล็ก หรือข้อมูลการวัดสหสัมพันธ์ในแพ็กเก็ตขนาดเล็กที่ส่งออกมาเป็นลำดับ [6]

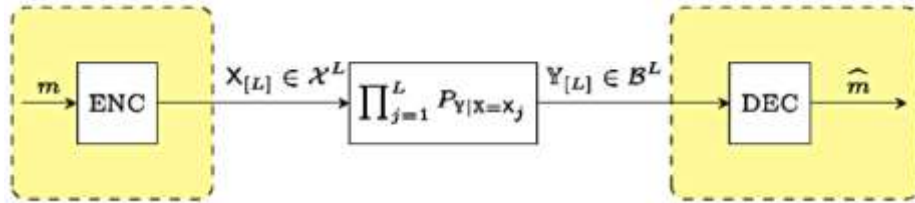
การกำหนดว่าเป็นแพ็กเก็ตขนาดใหญ่ จะพิจารณาจากเกณฑ์ต่อไปนี้คือ เกณฑ์การใช้ช่องสัญญาณจำนวนมาก โดยทั่วไปจะพิจารณาที่แพ็กเก็ตใช้ช่องสัญญาณตั้งแต่ 1,000 ช่องสัญญาณขึ้นไป [9] และเกณฑ์สารสนเทศบรรทุก ซึ่งบรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตนั้นใหญ่กว่าสารสนเทศควบคุม หรือบางทีเรียกว่า เมตาเดตา (Metadata) ที่เกี่ยวข้องกับแพ็กเก็ต ทั้งนี้ เมตาเดตา ประกอบด้วย ส่วนนำ (PA: Preamble) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารของเครือข่ายเพื่อประสานเวลา (Synchronize) จังหวะการส่งสัญญาณระหว่างระบบสองระบบ หรือมากกว่านั้น [18]

การหาอัตราการเข้ารหัสสูงสุดสำหรับความยาวบล็อกจำกัด และความน่าจะเป็นความผิดพลาดบล็อกโดยทั่วไปนั้นอยู่ไกลเกินจากขอบเขต เพราะว่าการค้นหาแบบละเอียด (Exhaustive Search) เหนือทุกแผนวิธีเข้ารหัส ต้องใช้ความซับซ้อนในการค้นหาเท่ากับกรยกกำลังสองชั้น (Double Exponential) ของความยาวบล็อก ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบเอ็นพีฮาร์ด (NP-Hard: Nondeterministic Polynomial Time Hard) [19] ในงานวิจัย [10] ได้นำเสนอการหาค่าประมาณอัตราการเข้ารหัสสูงสุดแบบไม่เชิงเส้นกำกับอย่างเข้มงวด และมีการบูรณาการค่าประมาณอัตราการเข้ารหัสสูงสุดนี้ร่วมกับกฎเกณฑ์การรับการสื่อสารที่น่าเชื่อถือระดับมาก ดังเช่น พหุคูณเข้าพหุคูณออก (MIMO: multiple-input multiple-output) ช่วงห่างเวลาการส่งผ่านสั้น (Short TTI: Short Transmission-Time Interval) การใช้ประโยชน์จากสัญญาณซ้ำ (Diversity Exploitation) สารสนเทศสถานะช่องสัญญาณไม่สมบูรณ์ (Imperfect CSI) และการถอดรหัสที่ผิดคู่ (Mismatched Decoding) ในการส่งผ่านนั้น มีการใช้แบบจำลองของช่องสัญญาณเป็นแบบช่องสัญญาณบล็อกติดจางดังปรากฏใน [20] เพื่อทำให้เกิดการสื่อสารความล่าช้าต่ำความน่าเชื่อถือระดับมาก (URLLC: Ultra-Reliable Low-Latency Communications) บนเงื่อนไขที่ความยาวบล็อกของแพ็กเก็ตข้อมูลต้องมีขนาดเล็ก ทั้งนี้ การที่จะบรรลุความน่าเชื่อถือการส่งผ่านนั้นได้ ต้องกระทำผ่านวิธีการของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบข้างหน้า (Forward-Error Correction Codes) จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในด้านปริมาณงาน (Throughput) สำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบรังผึ้งรุ่นที่ห้า ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราที่เครื่องส่งผ่านแพ็กเก็ตไปยังสถานีฐานได้สำเร็จหรือไม่สูญหาย รวมทั้งสะท้อนถึงคุณภาพของการให้บริการ โดยใช้มาตรฐานการวัดสำหรับแพ็กเก็ตข้อมูลขนาดเล็กร่วมกับกลไกการควบคุมความผิดพลาดที่รวมวิธีการของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบข้างหน้า ดังนั้น การศึกษานี้จึงสนใจศึกษาการใช้หลักการนี้เพิ่มสมรรถนะในเชิงปริมาณงานสำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบรังผึ้งรุ่นที่ห้า

วิธีการวิจัย

ผู้วิจัยใช้แบบจำลองระบบการสื่อสารตรงความยาวบล็อก (FBL: Fixed Block-Length) ซึ่งการตรงความยาวบล็อก หมายถึง การเข้ารหัสแพ็กเก็ตในรูปสัญลักษณ์เชิงซ้อนด้วยจำนวนคงที่ แต่ละสัญลักษณ์เชิงซ้อนจะใช้หนึ่งช่องสัญญาณสำหรับการส่งผ่าน ดังภาพที่ 1 ร่วมกับการร้องขอทำซ้ำอัตโนมัติแบบไฮบริด (HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request) ซึ่งการร้องขอทำซ้ำอัตโนมัติแบบไฮบริด หมายถึง การรวมกันของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบข้างหน้า และการร้องขอทำซ้ำอัตโนมัติ (ARQ: Automatic Repeat Request) สำหรับควบคุมความผิดพลาด และค่าอัตราการเข้ารหัสสูงสุด (Maximum Coding Rate) เขียนแทนด้วย $R^*(\cdot)$ ในหน่วยบิตต่อสัญลักษณ์ สำหรับโปรโตคอลสื่อสารแบบการเข้าถึงโดยสุ่มเหนือช่องสัญญาณการเชื่อมโยงขึ้น เพราะรองรับแพ็กเก็ตข้อมูลขนาดเล็ก พิจารณาภาพที่ 1 สาร m จะถูกเข้ารหัสแล้วได้บล็อกของสัญลักษณ์เชิงซ้อน เขียนแทนในรูปเมทริกซ์ $X_{[L]}$ ซึ่งประกอบด้วย L รหัสค่าย่อย

(Subcodeword) ด้วยความยาว n_c ช่องสัญญาณ ดังนั้น ทั้งรหัสคำจำนวน $n = Ln_c$ ช่องสัญญาณจะถูกส่งผ่านเหนือช่องสัญญาณเรย์บล็อกซีตจาง (Rayleigh Block-Fading Channels) ด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เชิงซ้อนที่เป็นอิสระและการแจกแจงเหมือนกัน $\mathcal{CN}(0, 1)$ เมื่อเครื่องรับได้รับบล็อกของสัญลักษณ์เชิงซ้อนเป็น $Y_{[L]}$ ก็จะทำการถอดรหัส แล้วได้สารที่ถูกลบมาเป็น $\hat{m}$



ภาพที่ 1 แบบจำลองระบบการสื่อสารตรงความยาวบล็อก [10]

เมื่อใช้ผลของการแลกเปลี่ยนการประมาณช่องสัญญาณแบบสัญญาณซ้ำและหลายทางทั้งหมด (Entire Diversity-Multiplexing-Channel-Estimation Tradeoff) สำหรับแพ็กเก็ตขนาดเล็ก เพื่อหลีกเลี่ยงการประมาณอัตรารหัสสูงสุดของระบบสื่อสารสูงกว่าความเป็นจริง จึงใช้ขอบเขตล่างอัตรารหัสสูงสุดของระบบสื่อสารที่เรียกว่า ค่าขอบเขตการทดสอบไม่เป็นอิสระ (DT Bound: Dependence Testing Bound) สำหรับจำนวนสายอากาศส่ง $n_t = 2$ และจำนวนสายอากาศรับ $n_r = 2$ ใน [21] ที่จัดรูปแบบให้ประยุกต์ง่ายขึ้นใน [22] บนพื้นฐานของมาตรฐานสามจีพีทีแอลทีอี (3GPP LTE standard: 3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution Standard) [9] และความน่าจะเป็นความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำสุด $\epsilon^*(\cdot)$ [10] ได้ตั้งสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ

$$R^*(L, n_c, \epsilon, \rho) \geq \max \left\{ \frac{\ln M}{n_c L} : \epsilon_{\text{ub}}(M) \leq \epsilon \right\} \quad (1)$$

เมื่อ M แทน จำนวนค่าของสารทั้งหมด
 $\epsilon_{\text{ub}}(M)$ แทน ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดต่ำสุดจากการเปลี่ยนจำนวนการใช้ประโยชน์สายอากาศส่งและสายอากาศรับ [22]
และ

$$\epsilon^*(L, n_c, M) \triangleq \inf \{ \epsilon : \exists (L, n_c, \epsilon) \text{ รหัส-FBL} \} \quad (2)$$

เมื่อ รหัส-FBL แทน รหัสคำแก้ไขความผิดพลาดแบบข้างหน้า
ให้ $n = n_c L$ เป็นความยาวของแพ็กเก็ตในหน่วยสัญลักษณ์ ซึ่งหนึ่งสัญลักษณ์ใช้จำนวนหนึ่งช่องสัญญาณ ผู้วิจัยเลือกใช้แพ็กเก็ตขนาดเล็ก $n = 168$ สัญลักษณ์ ที่สามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบการจราจรที่ปลอดภัยและสมาร์ทมิเตอร์ (Smart Meter) [17, 23] และสอดคล้องกับโอเอฟดีเอ็ม (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) แบบ 14 สัญลักษณ์ต่อเฟรมย่อย (Symbols/Subframe) แต่ละเฟรมย่อยประกอบด้วย 2 สล็อต (Slots) แต่ละบล็อกทรัพยากร (RB: Resource Block) ซึ่งใช้ระยะเวลาหนึ่งสล็อต ประกอบด้วย 12 โทน (Tones) ด้วยระยะห่างคลื่นพาหะย่อย (SCS: Sub-Carrier Spacing) เป็น 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยระยะเวลา 0.5 มิลลิวินาทีต่อสล็อต เพื่อครอบคลุมพื้นที่ภายนอกในแมโครเซลล์ (Macro Cell) [24] เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน $\rho = 6$ เดซิเบล และอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ต (Packet Error Rate) เท่ากับ 10^{-5} เมื่อส่งผ่านช่องสัญญาณซีตจาง

แบบพหุหน้าเข้าและพหุหน้าออก ด้วย $n_t = n_r = 2$ ซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์แบบการสื่อสารที่นำเชื่อถือระดับมาก ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขใน [25] ได้ค่าประมาณสูงสุดของอัตรารหัสสูงสุดสำหรับ $L = 1, \dots, 42$ ดังตารางที่ 1 สังเกตว่าค่าประมาณอัตรารหัสสูงสุดไม่แปรผันตรงกับจำนวนช่องสัญญาณในเฟรมย่อย เพื่อให้ได้สมรรถนะสูงสุดผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าประมาณอัตรารหัสสูงสุด เป็น $R^*(n, \epsilon) \approx 1.6$ บิต/สัญลักษณ์ สำหรับ $n_c = 14$ และ $L = 12$ อีกทั้งยังสะดวกต่อวิธีการแบบโอเอฟดีเอ็มแบบ 14 สัญลักษณ์ต่อเฟรมย่อย เพราะเป็นรูปแบบเฟรมพื้นฐานในระบบเครือข่ายแบบรั้งฝั่งรับที่ห่า แต่หากใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย $C_{out}(\rho, \epsilon)$ ด้วย $n_c = n = 168$ แล้วได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงของ $C_{out}(\rho, \epsilon)$ ประมาณ 0.3 บิต/สัญลักษณ์ [6, 22]

ตารางที่ 1 ค่าประมาณของอัตรารหัสสูงสุด เมื่อ $L = 1, \dots, 42$

L เฟรมย่อย	n_c ช่องสัญญาณ	$R^*(n, \epsilon)$ บิตต่อช่องสัญญาณ
1	168	0.2
2	84	0.8
4	42	1.3
6	28	1.5
7	24	1.55
12	14	1.6
14	12	1.55
21	8	1.4
28	6	1.3
42	4	1.22

1. ความน่าจะเป็นของการส่งผ่านแพ็กเก็ตที่สำเร็จ

แบบจำลองของโพรโทคอลสื่อสารแบบการเข้าถึงโดยสุ่มเหนือช่องสัญญาณการเชื่อมโยงขึ้นไปยังสถานีฐาน (BS: Base Station) นั้น เป็นแบบสล็อตอะโลฮา (Slotted-Aloha) ที่การประมาณของการใช้ช่องสัญญาณค้าง (Backlog) สามารถทำได้สมบูรณ์ [6-7] ให้แต่ละเครื่องจำนวนทั้งหมด M_o เคลื่อนย้ายกลไกของโพรโทคอลสื่อสารแบบการเข้าถึงโดยสุ่ม เพื่อที่จะส่งผ่านไปยังสถานีฐานรับที่ใช้ร่วมกัน (Common Receiver BS) สำหรับผู้ใช้จำนวนทั้งหมด M_o แต่ละผู้ใช้มีการส่งข้อมูลด้วยแพ็กเก็ตขนาด n สัญลักษณ์ ซึ่งเท่ากับ D บิต ไปยังสถานีฐาน แต่ละแพ็กเก็ตจะถูกส่งออกภายในเวลาที่สอดคล้องกับการใช้ n ช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณทั้งหมดจำนวน n นี้จะถูกแยกออกเป็น L สล็อต แต่ละสล็อตมีขนาดเท่ากันเป็น n_c ช่อง แต่ละเครื่องจะนำโพรโทคอลแบบเฟรมอะโลฮา (Framed ALOHA) มาใช้ในการเข้าถึงสล็อต นั่นคือแต่ละเครื่องสุ่มจับหนึ่งใน L สล็อตภายในเฟรมและส่งแพ็กเก็ตของเครื่อง ถ้ามีเครื่องตั้งแต่สองขึ้นไปจับได้สล็อตเดียวกันแล้วจะเกิดการชนกัน (Collision) ขึ้น อันส่งผลให้มีแพ็กเก็ตใดได้รับอย่างถูกต้อง เมื่อประยุกต์สูตรใน [6] จะได้ว่าความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตเข้าสู่ช่องสัญญาณสำเร็จ P_s ดังสมการที่ (3)

$$P_s = \frac{M_o}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{M_o-1} \cdot (1 - \epsilon^*(L, n_c, M)) \quad (3)$$

เมื่อ $\frac{M_o}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{M_o-1}$ เป็นความน่าจะเป็นไม่เกิดการชนกัน

2. ปริมาณงานของการส่งผ่านแพ็กเก็ต

ให้ g เป็นจำนวนแพ็กเก็ตเฉลี่ยที่พยายามใช้ช่องสัญญาณในหนึ่งวินาที หรือบางทีเรียกว่า ภาระ (Load) แล้วได้ปริมาณงาน ซึ่งหมายถึง ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตต่อวินาทีที่ส่งผ่านช่องสัญญาณสำเร็จ สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$s = \frac{gM_o}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{M_o-1} \cdot (1 - \epsilon^*(L, n_c, M)) \quad (4)$$

ผลการวิจัย

ค่าประมาณอัตราหัสสูงสุดสำหรับจำนวนเฟรมย่อย $L = 1, 2, 4, \dots, 42$ ดังปรากฏในตารางที่ 1 มีลักษณะไม่แปรผันตรงกับจำนวนช่องสัญญาณในเฟรมย่อย ค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุดมีค่าเป็น $R^*(n, \epsilon) \approx 1.6$ บิต/สัญลักษณ์ เกิดขึ้นเมื่อ $n_c = 14$ และ $L = 12$ ด้วยอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตเท่ากับ 10^{-5} จึงถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ (Parameters) สำหรับการศึกษา การแสดงเปรียบเทียบสมรรถนะในเชิงปริมาณงานที่ได้ระหว่างการใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุดที่นำเสนอ $R^*(n, \epsilon) \approx 1.6$ บิต/สัญลักษณ์ เท่ากับ 22,400 บิต/วินาที และมาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย $C_{out}(\rho, \epsilon) = 0.3$ บิต/สัญลักษณ์ เท่ากับ 4,200 บิต/วินาที ซึ่งใช้ทั่วไป เมื่ออัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตเฉลี่ย $\epsilon^*(L, n_c, M) = 10^{-5}$ สามารถทำได้ดังนี้ ให้ s_{R^*} เป็นปริมาณงานจากการใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุด และให้ $s_{C_{out}}$ เป็นปริมาณงานจากมาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย เมื่อประยุกต์สมการที่ (4) แล้วได้อัตราส่วนปริมาณงานของมาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุดต่อปริมาณงานจากมาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย ดังสมการที่ (5)

$$\frac{s_{R^*}}{s_{C_{out}}} = \frac{16}{3} \quad (5)$$

เพราะฉะนั้น การใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุดให้สมรรถนะในเชิงปริมาณงานสูงกว่าการใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหายประมาณ 5.333 เท่า โดยเป็นอิสระจากจำนวนของเครื่องในแมโครเซลล์

เนื่องจาก $R^*(n, \epsilon) \approx 1.6$ บิต/สัญลักษณ์ เท่ากับ 22,400 บิต/วินาที และแต่ละแพ็กเก็ตมีจำนวน $n = 168$ สัญลักษณ์ ดังนั้น ได้ค่าเฉลี่ยการให้บริการ $\mu = 83.3$ แพ็กเก็ตต่อวินาที ซึ่งบอกเป็นนัยว่าในแต่ละแมโครเซลล์ต้องควบคุมให้ปริมาณงานน้อยกว่า 83.3 เพื่อการจราจรอยู่ในสภาวะคงที่

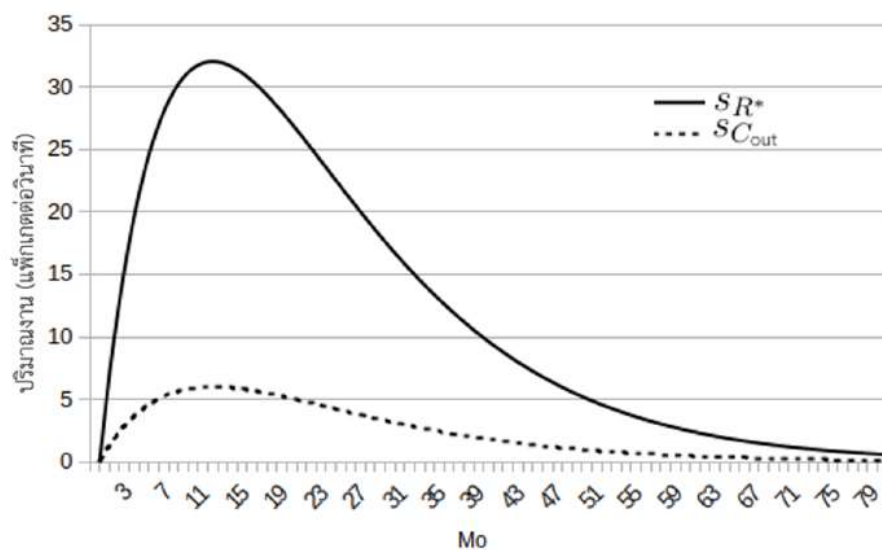
เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากสมการที่ (4) สังเกตว่า ถ้าจริงจำนวนของเครื่อง M_o ปริมาณงานจะแปรผันตรงกับภาระที่เข้าสู่ช่องสัญญาณ g

ต่อไปพิจารณาสมรรถนะในเชิงปริมาณงานในรูปฟังก์ชันของจำนวนเครื่องและภาระ เริ่มต้นด้วยการแทนค่าจำนวนสล็อตต่อแพ็กเก็ต $L = 12$ และ $\epsilon^*(L, n_c, M) = 10^{-5}$ ในสมการที่ (4) แล้วได้สมการที่ (6)

$$s = \frac{33333}{4 \times 10^5} \left(\frac{11}{12}\right)^{M_o-1} \cdot M_o g \quad (6)$$

ในงาน [23] ได้แสดงให้เห็นว่าภาระต่อเครื่อง ดังเช่น ระบบการจราจรที่ปลอดภัยและสมาร์ทมิเตอร์ จะใช้อัตราเฉลี่ยการเข้าสู่ช่องสัญญาณประมาณ 2 ไบต์ต่อวินาที พิจารณากรณีภาระหนัก (Heavy Load) ที่สถานะของการส่งผ่านไม่ออกจาก

สถานะคงที่ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ภาระ $g = 83.3$ เท่ากับค่าเฉลี่ยการให้บริการ แล้วได้ผลเปรียบเทียบสมรรถนะในเชิงปริมาณงานในหน่วยแฟกต์ต่อวินาที เมื่อใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัดสูงสุด และเมื่อใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย ดังภาพที่ 2 พิจารณาเมื่อจำนวนเครื่องเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1 ถึง 12 กรณีใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัดสูงสุด พบว่าปริมาณงานจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วและมีค่าปริมาณงานสูงสุดเท่ากับ 32 แฟกต์ต่อวินาทีเมื่อมีจำนวน 12 เครื่อง ในขณะที่กรณีใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหายปริมาณงานจะเพิ่มขึ้นช้ากว่ามาก และมีค่าปริมาณงานสูงสุดเท่ากับ 6 แฟกต์ต่อวินาทีเมื่อมีจำนวน 12 เครื่อง เช่นเดียวกัน อีกทั้งยังพบว่าปริมาณงานที่ได้จากมาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัดสูงสุด มีค่าสูงกว่าโดยตลอดค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย จากนั้นพิจารณาเมื่อจำนวนเครื่องเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 13 เป็นต้นไป พบว่าปริมาณงานที่ได้จากมาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัดสูงสุด ยังคงมีค่าสูงกว่าโดยตลอดค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย โดยปริมาณงานก็จะค่อยลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าช่วงเพิ่มสำหรับทั้งสองมาตรฐานการวัด สังเกตว่าเมื่อจำนวนเครื่องประมาณ 12 จะได้ปริมาณงานสูงสุดจากการใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัดสูงสุดเท่ากับ 32 แฟกต์ต่อวินาที หรือคิดเป็น 38 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยการให้บริการ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณงานสูงสุดของสล็อตอะไหล่สำหรับแฟกต์ขนาดใหญ่ [7] ในขณะที่การใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหายจะได้ปริมาณงานสูงสุดเท่ากับ 6 แฟกต์ต่อวินาที หรือคิดเป็น 7 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยการให้บริการ ซึ่งต่ำกว่าปริมาณงานสูงสุดของสล็อตอะไหล่สำหรับแฟกต์ขนาดใหญ่ค่อนข้างมาก



ภาพที่ 2 ปริมาณงานที่ได้เมื่อใช้มาตรฐานการวัด $R^*(n, \epsilon)$ และ C_{out}

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้นำเสนอแนววิธีการเพิ่มสมรรถนะการส่งผ่านข้อมูลระหว่างเครื่องในเครือข่ายแบบฝังฝังรุ่นที่ห้าที่รองรับพื้นที่ครอบคลุมภายนอกกระยะไกล ที่เรียกว่าแมโครเซลล์ ซึ่งช่วยเป็นกลไกให้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมีพื้นที่ครอบคลุมที่กว้างทั้งภายนอกและภายในอาคาร สารสนเทศของการสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องมีลักษณะเป็นแฟกต์ขนาดเล็ก ทำให้เมื่อสถานการณ์ใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหายที่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับแฟกต์ขนาดใหญ่ ภายใต้การตรึงความผิดพลาดของแฟกต์เพื่อรองรับคุณภาพของการให้บริการนั้น มีค่าสูงกว่าความ

เป็นจริงมาก ส่งผลให้การส่งผ่านข้อมูลระหว่างเครื่องมีความน่าเชื่อถือที่ต่ำกว่าเกณฑ์ ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้โครงสร้างสล็อตเวลาความถี่แบบระยะห่างคลื่นพาหะย่อยที่เป็น 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เพราะเหมาะสมสำหรับการส่งผ่านแพ็กเก็ตขนาดเล็กที่สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งาน และให้พื้นที่ครอบคลุมในระดับแมโครเซลล์ของเครือข่ายแบบรังผึ้งรุ่นที่ห้า โดยอาศัยการบูรณาการกับมาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุดที่เหมาะสมกับแพ็กเก็ตขนาดเล็กร่วมกับกลไกการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบเฟรมอะโลฮา จากนั้นทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขหาปริมาณงานที่ได้จากหลักการและแนวคิดที่นำเสนอ แล้วเปรียบเทียบกับแนวคิดและวิธีการแบบเดิมที่ใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหาย ผลการศึกษาพบว่าการใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุด ให้สมรรถนะในเชิงปริมาณงานสูงกว่าการใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหายประมาณ 5.333 เท่า โดยเป็นอิสระจากจำนวนของเครื่องในแมโครเซลล์ ปริมาณงานสูงสุดจากการใช้มาตรฐานการวัดค่าประมาณสูงสุดของอัตราหัสสูงสุดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยการให้บริการ มีความสอดคล้องกับปริมาณงานสูงสุดของสล็อตอะโลฮาสำหรับแพ็กเก็ตขนาดใหญ่ในขณะที่ใช้มาตรฐานการวัดความจุเมื่อเทียบกับสัญญาณขาดหายให้ปริมาณงานต่ำกว่าปริมาณงานสูงสุดของสล็อตอะโลฮาสำหรับแพ็กเก็ตขนาดใหญ่ค่อนข้างมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Atzori L, Iera A, Morabito G. The internet of things: A survey. Computer networks. 2010;54(15):2787–2805.
2. Muellerleile C, Robertson SL. Digital Weberianism: bureaucracy, information, and the techno-rationality of neoliberal capitalism. Indiana Journal of Global Legal Studies. 2018;25(1):187–216.
3. Krishnamurthi R, Gopinathan D. A Comprehensive Overview of Blockchain-Driven IoT Applications. Blockchain, Internet of Things, and Artificial Intelligence. 2021;p. 85.
4. Soltanmohammadi E, Ghavami K, Naraghi-Pour M. A survey of traffic issues in machine-to-machine communications over LTE. IEEE Internet of Things Journal. 2016;3(6):865–884.
5. Mehaseb MA, Gadallah Y, Elhamy A, Elhennawy H. Classification of LTE uplink scheduling techniques: An M2M perspective. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015;18(2):1310–1335.
6. 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.
7. Bertsekas DP, Gallager RG, Humblet P. Data networks. vol. 2. Prentice-Hall International New Jersey; 1992.
8. Bana AS, Trillingsgaard KF, Popovski P, De Carvalho E. Short packet structure for ultrareliable machine-type communication: Tradeoff between detection and decoding. In: 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE; 2018. p. 6608–6612.



9. Lozano A, Jindal N. Transmit diversity vs. spatial multiplexing in modern MIMO systems. *IEEE Transactions on wireless communications*. 2010;9(1):186–197.
10. Östman J. Short-Packet Communications: Fundamental Performance and Key Enablers. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden); 2019.
11. Gamage H, Rajatheva N, Latva-Aho M. Channel coding for enhanced mobile broadband communication in 5G systems. In: 2017 European conference on networks and communications (EuCNC). IEEE; 2017. p. 1–6.
12. Zhang L, Xiao M, Wu G, Alam M, Liang YC, Li S. A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks. *IEEE Wireless Communications*. 2017;24(5):44–51.
13. Xu T, Zhou T, Tian J, Sang J, Hu H. Intelligent spectrum sensing: When reinforcement learning meets automatic repeat sensing in 5G communications. *IEEE Wireless Communications*. 2020;27(1):46–53.
14. Belmekki BEY, Hamza A, Escrig B. On the performance of 5g non-orthogonal multiple access for vehicular communications at road intersections. *Vehicular Communications*. 2020;22:100202.
15. Boccardi F, Heath RW, Lozano A, Marzetta TL, Popovski P. Five disruptive technology directions for 5G. *IEEE communications magazine*. 2014;52(2):74–80.
16. Osseiran A, Boccardi F, Braun V, Kusume K, Marsch P, Maternia M, et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE communications magazine*. 2014;52(5):26–35.
17. Popovski P. Ultra-reliable communication in 5G wireless systems. In: 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity. IEEE; 2014. p. 146–151.
18. Buettner M, Yee GV, Anderson E, Han R. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. ACM; 2006. p. 307–320.
19. Costa RA, Langberg M, Barros J. One-shot capacity of discrete channels. In: 2010 IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE; 2010. p. 211–215.
20. Marzetta TL, Hochwald BM. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading. *IEEE transactions on Information Theory*. 1999;45(1):139–157.
21. Polyanskiy Y, Poor HV, Verdú S. Channel coding rate in the finite blocklength regime. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010;56(5):2307.
22. Durisi G, Koch T, Östman J, Polyanskiy Y, Yang W. Short-packet communications over multiple-antenna Rayleigh-fading channels. *IEEE Transactions on Communications*. 2015;64(2):618–629.
23. 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.



24. 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.
25. Caire G, Taricco G, Biglieri E. Optimum power control over fading channels. IEEE Transactions on Information Theory. 1999;45(5):1468–1489.