เครื่องรับเซมิบลายด์ที่อาศัยพารามิเตอร์ของการผสมร่วมด้วยสำหรับทำการประมาณหาช่องสัญญาณของระบบ TDD massive MIMO

Semi-blind with Mixing Parameter Receiver for Channel Estimation in TDD massive MIMO Systems

สัมพันธ์ พรหมพิชัย สกล อุดมศิริ วสันต์ อู่ยายโสม พัฒนา อินทนิ จันทร์ อัญญะโพธิ์ และ ปัณณวิชญ์ ภัทร์สรณ์สิริ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน 833 ถ. พระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ

Correspondence Email: samphan.p@pit.ac.th

Manuscript Received March 8, 2024
Revised April 9, 2024
Accepted April 18, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการนำหลักการของเซมิบลายด์มาประยุกต์ใช้กับอัลกอลิธึมแบบ LS สำหรับทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณระบบ TDD massive MIMO พารามิเตอร์การผสมได้ถูกนำมาใช้สำหรับทำการผสมสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จากสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูล รหัสตั้งได้ฉากได้ถูกนำมาใช้สำหรับระบุสถานีฐานและผู้ใช้งาน รวมทั้งทำการเข้าจังหวะเฟรมข้อมูลเพื่อลดผลจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็ม ผลการจำลองการทำงานพบว่าอัลกอลิธึมเซมิบลายด์ที่นำเสนอสามารถที่จะปรับปรุงสมรรถนะของ SINR และอัตราความสำเร็จในการถ่ายโอนข้อมูลของข่ายการเชื่อมโยงขาลงให้สูงขึ้นเหนือกว่าอัลกอลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมและอัลกอลิธึม LS ทั่วไป

คำสำคัญ: *การประมาณช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณจางหายแบบเลือกความถี่ อัลกอลิธึมแบบ LS การปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องระบบ TDD massive MIMO*

ABSTRACT

This paper presents the application of the semi-blind principle to an LS algorithm to estimate the channel state information of the TDD massive MIMO systems. The mixing parameter is used to mix the channel coefficients that are estimated from the pilot and data signals. The orthogonal codes are used to identify base stations and users, including frame synchronization, to reduce the effect of full pilot contamination. The simulation results show that the proposed semi-blind algorithm can improve the SINR performance and the achievable downlink rate of downlink systems, which are higher than those of the LS algorithm using the orthogonal code and the conventional LS algorithm.

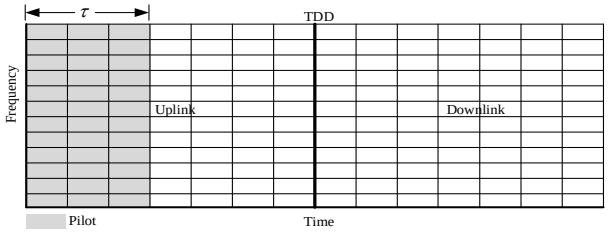
Keywords*: Channel Estimation, Frequency-selective Fading Channel, LS Algorithm, Pilot Contamination, TDD massive MIMO Systems*

1. บทนำ

ระบบ Multiple-input Multiple-output (MIMO) เป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency) และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัม (Spectral Efficiency) ของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ยุค 5G (Fifth Generation)

และในยุคถัดไป [1], [2] โดยระบบจะมีการติดตั้งเสาอากาศหลายต้น (massive MIMO Antenna) ที่สถานีฐาน (Base Station) ทำให้สามารถที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมด้วยการประยุกต์ใช้หลักการประมวลผลสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear) [3] มาทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณ (Channel State Information, CSI) แบบ MIMO [4] ได้อย่างถูกต้อง

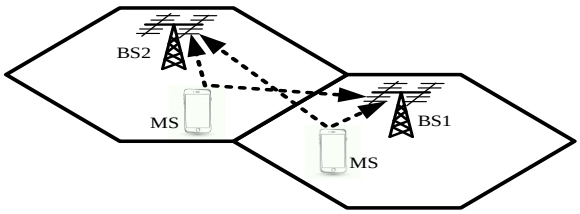
ลักษณะการจัดสรรช่องเวลา (Time Slot) สำหรับทำการส่งสัญญาณของการเชื่อมโยงขาขึ้น (Uplink) และการเชื่อมโยงขาลง (Downlink) ของระบบ Time Division Duplex (TDD) แสดงดังรูปที่ 1 การประมาณหาสถานะช่องสัญญาณของระบบ TDD จะกำหนดให้กระทำในฝั่งการเชื่อมโยงขาขึ้น [5] สถานีฐานซึ่งมีหน่วยประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำหน้าที่ในการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่ซับซ้อนแบบ MIMO โดยอาศัยสัญญาณเทรน (Training Signal) หรือสัญญาณนำร่อง (Pilot Signal) ที่ถูกส่งออกมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่มาปรากฏยังสายอากาศ MIMO และเครื่องรับของสถานีฐาน จากนั้นจะอาศัยความคล้ายกันของช่องสัญญาณการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่ได้รับมาจากการเชื่อมโยงขาขึ้นจะถูกนำไปใช้เพื่อทำการชดเชยผลของช่องสัญญาณแบบ MIMO สำหรับระบบการเชื่อมโยงขาลงด้วย [6] โดยความเที่ยงตรงของการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณสำหรับระบบ TDD massive MIMO ที่กระทำในการเชื่อมโยงขาขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับลำดับของสัญญาณนำร่อง (Pilot Sequence) ที่ได้ทำการจัดสรรไปให้กับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายนั้น ๆ ว่ามีคุณสมบัติตั้งได้ฉาก (Orthogonal) กันมากน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตามเนื่องจากจำนวนของสัญญาณนำร่องที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากกันที่มีใช้งานอยู่ในระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายนั้นมีอยู่อย่างจำกัด เมื่อเทียบกับจำนวนของอุปกรณ์สื่อสาร (User Equipment) ที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ [7] รวมทั้งการที่เครือข่ายต้องการที่จะรักษาประสิทธิภาพของการถ่ายโอนข้อมูลที่สูง (ลด Overhead ในส่วนของสัญญาณนำร่องลง) ดังนั้นการนำสัญญาณนำร่องกลับมาใช้ซ้ำ (Pilot Reuse) กับเซลข้างเคียง (Neighbouring Cell) จึงเป็นสิ่งที่ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ [8] โดยการนำสัญญาณนำร่องมาใช้ซ้ำจะส่งผลกระทบทำให้การประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่กระทำในข่ายการเชื่อมโยงขาขึ้นของเซลเป้าหมาย (Target Cell) ผิดเพี้ยนไปเนื่องจากถูกรบกวนจากการส่งสัญญาณนำร่องจากเซลข้างเคียง ทำให้มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากลดลง โดยการรบกวนที่เกิดมาจากการใช้สัญญาณนำร่องซ้ำของเซลข้างเคียงนี้จะถูกเรียกว่า การปนเปื้อนของสัญญาณนำร่อง (Pilot Contamination) [9] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 *การจัดสรรช่องเวลาสำหรับทำการส่งสัญญาณของข่ายการเชื่อมโยงขาขึ้น และการเชื่อมโยงขาลงของระบบ TDD ตามมาตรฐาน LTE 3GPP*

เนื่องจากระบบ TDD massive MIMO มีการติดตั้งสายอากาศที่สถานีฐานอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลทำให้สามารถที่จะลดผลกระทบที่เกิดจากการจางหายของช่องสัญญาณแบบรวดเร็ว (Fast Fading Channel) ลงไปได้ อย่างไรก็ตามระบบเครือข่าย TDD ที่มีการให้บริการแบบไร้สายอยู่ทั่วไปนั้นจะเป็นแบบ Multi-cell massive MIMO ซึ่งจะได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่อง [10] – [13] ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอหลากหลายวิธีการเพื่อลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องประกอบไปด้วย การออกแบบลักษณะของสัญญาณนำร่อง การกำหนดลำดับของสัญญาณนำร่อง การเข้ารหัสสัญญาณนำร่อง การประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณ เพื่อหลีกเลี่ยงการส่งสัญญาณนำร่องพร้อมกันระหว่างเซลข้างเคียง วิธีการการเลื่อน (Shift) ลำดับของสัญญาณนำร่องระหว่างเซลไม่ให้ตรงกัน [14], [15] จะช่วยลดปัญหาจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องลงได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะต้องอาศัยการควบคุมจากส่วนกลางเพื่อจัดสรรลำดับเฟรมของสัญญาณนำร่องของเซลที่ใช้งานอยู่ภายในเครือข่ายไม่ให้ตรงกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้เครือข่ายที่ใช้งานกับระบบ TDD massive MIMO มีความซับซ้อนสูง [16] การเข้ารหัสสัญญาณนำร่องทำงานกับการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบ Multi-cell TDD massive MIMO โดยอาศัยหลักการของ Minimum Mean Square Error (MMSE) เพื่อลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องระหว่างเซล (Inter-cell) ได้ถูกนำเสอนไว้ใน [17], [18] การประมาณหาสถานะ

ของช่องสัญญาณด้วยอัลกอลิธึมอันดับสอง ที่อาศัยคุณสมบัติทางด้านสถิติด้วยการนำค่าความแปรปรวนร่วม(Covariance) มาใช้ร่วมสำหรับทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณได้นำเสนอไว้ใน [19] การวิเคราะห์หาค่า Mean Square Error (MSE) ของอัลกอลิธึมแบบทั่วไปสำหรับทำการประมาณหาช่องสัญญาณและนำเสนอวิธีการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่แม่นยำขึ้นด้วยการปรับปรุง H-infinity ภายใต้ สถาณการณ์ที่มีการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องได้ถูกนำเสนอไว้ใน [20] การนำหลักการของการทำซ้ำ (Iterative Method) มาใช้กับอัลกอลิธึมเชิงเส้นแบบ MMSE สำหรับทำการประมาณหาสถานะช่องสัญญาณของระบบ MIMO ได้มีการนำเสนอใน [21] โดยอัลกอลิธึมที่นำเสนอจะมีสมรรถนะในการลู่เข้า (Convergence Speed) ที่รวดเร็ว การนำหลักการของ Space-based มาใช้กับการประมาณหาช่องสัญญาณของระบบ massive MIMO รวมทั้งได้มีการนำเสนอแบบจำลอง Spatial Basis Expansion Model (SBEM) ที่สามารถจะนำไปใช้งานได้ทั้งระบบ TDD และ Frequency Division Duplex (FDD) ได้ถูกนำเสนอใน [22]



รูปที่ 2 *การปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องที่เกิดขึ้นกับระบบการเชื่อมโยงขาขึ้น*

การออกแบบสัญญาณนำร่องเพื่อลดผลกระทบจากการแทรกสอดระหว่างเซล (Inter-cell Interference) ได้ถูกนำเสนอไว้ใน [23] – [25] สำหรับใช้งานกับระบบ MIMO Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) อย่างไรก็ตามหลักการดังกล่าวทำการพิจารณาเฉพาะระบบที่สถานีฐานมีการติดตั้งสายอากาศหลายต้นแบบ MIMO เท่านั้นไม่ได้รวมไปถึงระบบที่สถานีฐานมีการติดตั้งสายอากาศเป็นจำนวนมากหรือระบบ massive MIMO

การออกแบบสัญญาณนำร่องเพื่อลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องสำหรับนำมาใช้งานกับระบบ massive MIMO ได้มีการนำเสนอใน [26] – [29] โดยผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องสำหรับอัลกอลิธึมที่นำมาใช้ในประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณแบบ MMSE และทำการวิเคราะห์อัลกอลิธึมแบบ Normalised MSE (NMSE) รวมทั้ง [26] ได้นำเสนอการออกแบบสัญญาณนำร่องที่เหมาะสมสุด (Optimal Pilot Signal) สำหรับทำการปรับปรุงอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) ให้สูงขึ้นภายใต้แบบจำลองของช่องสัญญาณสองรูปแบบ การออกแบบสัญญาณนำร่องเพื่อลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่อง ด้วยการนำรหัสตั้งได้ฉากมาทำการมอดูเลตกับสัญลักษณ์ (Symbol) ของสัญญาณนำร่องเพื่อทำการระบุสถานีฐานได้นำเสนอไว้ใน [30]

เครือข่ายไร้สายยุคที่ 5 กำหนดให้ต้องมีความเร็ว (Speed) ของการถ่ายโอนข้อมูลระดับ Gb/s และต้องมีเวลาแฝงของระบบ (Latency) ต่ำอยู่ในหน่วยของวินาที เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายดังกล่าว ระบบ OFDM ได้ถูกนำมาใช้สำหรับลดผลกระทบจากการจางหายของช่องสัญญาณแบบเลือกความถี่ (Frequency-selective Fading Channel) หรือช่องสัญญาณแบบมัลติพาธ (Multipath Channel) และเพื่อช่วยสนับสนุนให้การถ่ายโอนข้อมูลมีอัตราบิต (Data Rate) สูง ในส่วนของการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference, ISI) นั้นสามารถที่จะละเลยได้ในกรณีที่ระบบมีการเติม Cyclic Prefix (CP) ที่ยาวมากกว่าช่องสัญญาณไร้สายแบบมัลติพาธ อย่างไรก็ตามการที่จะเข้าถึงคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้จะต้องคำนึงถึงการเข้าจังหวะ (Synchronization) เฟรมข้อมูลของระบบ 5G OFDM ด้วย

การเลือกใช้ OFDM กับระบบเครือข่ายไร้สายยุคที่ 5 และยุคถัดไปดูเหมือนจะมีแต่ข้อดี อย่างไรก็ตามการใช้งาน OFDM นั้นจะต้องคำนึงถึง Peak to Power Average Ratio (PAPR) [31] และการเข้าจังหวะของเฟรมข้อมูลด้วย โดยการเข้าจังหวะของเฟรมข้อมูล OFDM นั้นจะเป็นตัวกำหนดความความถูกต้องของการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณ การดีมอดูเลต (Demodulate) ข้อมูลที่ภาครับและกำหนดความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทำการถ่ายโอนภายในระบบเครือข่าย ระบบ 5G จะอาศัย Primary Synchronization Signal (PSS) เป็นสัญลักษณ์พิเศษเพื่อใช้สำหรับทำการเข้าจังหวะ โดยสัญลักษณ์จะต้องมีความแตกต่างและสามารถที่จะทำการแยกแยะออกมาจากสัญลักษณ์ของข้อมูลได้

การวิเคราะห์สมรรถนะการเข้าจังหวะของระบบ 5G New Radio (NR) กรณีที่ข้อมูลทางสถิติสถานะของช่องสัญญาณไม่สมบูรณ์ได้มีการนำเสนอใน [32] โดยการตรวจสอบจะครอบคลุมความน่าจะเป็นของสถานการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ 5G NR อย่างไรก็ตามในบทความนี้ไม่ได้กล่าวถึงในส่วนของ OFDM บทความที่ [33] ได้ทำการอธิบายถึงภาพรวม องค์ประกอบคุณสมบัติที่สำคัญในการเข้าจังหวะของโพรโทคอลในชั้นกายภาพ (Physical Layer Protocol) ของระบบ 5G NR โดยกระบวนการเข้าจังหวะจะมุ่งเน้นให้อุปกรณ์ทุกตัวที่ใช้งานอยู่ภายในระบบเครือข่ายจะต้องมีการเข้าจังหวะกัน อย่างไรก็ตามบทความนี้ไม่ได้กล่าวถึงช่องสัญญาณแบบไร้สายที่นำมาใช้งานกับระบบกระบวนการเข้าจังหวะของระบบ 5G NR และการสร้างกลไกการสื่อสารระหว่างกระบวนการเข้าจังหวะของระบบ 5G NR กับกลไกการสื่อสารระหว่าง Radio Resource Control (RRC) และโพรโทคอลในชั้นกายภาพได้ถูกนำเสนอไว้ใน [34] อย่างไรก็ตามบทความนี้ไม่ได้พิจารณาถึงช่องทางการสื่อสารแบบอื่น รวมทั้งผลการจำลองการทำงานไม่ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจาก Carrier Frequency Offsets (CFO)

บทความนี้ได้นำหลักการของเซมิบลายด์มาใช้กับอัลกอลิธึม LS รวมทั้งยังมีการนำพารามิเตอร์การผสมที่มีค่าเหมาะสมสุดมาใช้สำหรับทำการผสมเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่ได้รับมาจากสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูล รวมทั้งมีการนำรหัสตั้งได้ฉากมาใช้สำหรับระบุสถานีฐานและผู้ใช้งาน และทำการเข้าจังหวะเฟรมข้อมูล โดยจุดประสงค์ของการนำเสนอเทคนิคดังกล่าวเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องรับให้สามารถที่จะประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณแบบ massive MIMO ได้ใกล้เคียงกับช่องสัญญาณจริงและสามารถที่จะลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็มให้ได้มากที่สุด

2. แบบจำลองเบสแบนด์ของระบบ TDD massive MIMO

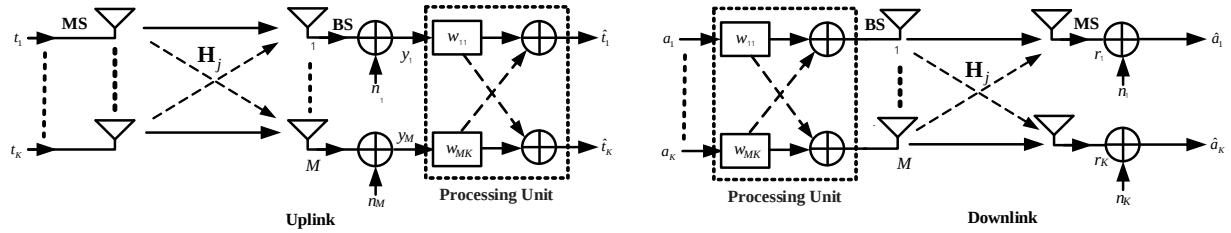
หัวข้อนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเบสแบนด์ของการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลงสำหรับทำงานกับระบบ TDD Massive MIMO ตามมาตรฐานของ LTE 3GPP

2.1 แบบจำลองของข่ายการเชื่อมโยงขาขึ้น

โทรศัพท์เคลื่นที่ในยุคที่ 5 (NR) ระบบ TDD massive MIMO ตามมาตรฐานของ LTE 3GPP ที่สถานีฐานจะมีการติดตั้งสายอากาศอยู่เป็นจำนวนมากหรือมีลักษณะที่เป็นแบบ massive MIMO โดยกระบวนการสำหรับทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณไร้สาย massive MIMO ที่มีลักษะการจางหายแบบเลือกความถี่นั้นสามารถที่จะกระทำได้ผ่านระบบการเชื่อมโยงขาขึ้น เนื่องจากที่สถานีฐานจะมีการติดตั้งหน่วยประมวลผล (Processing Unit) ขนาดใหญ่ที่มีความเร็วในการทำงานสูง ส่งผลทำให้สามารถที่จะทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่ซับซ้อนได้อย่างทันกาลและแม่นยำ รวมทั้งที่สถานีฐานยังมีแหล่งจ่ายพลังงานที่เพียงพอสำหรับสนับสนุนการทำงานของหน่วยประมวลผลและระบบที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งถือว่าเป็นข้อได้เปรียบของระบบเครือข่าย TDD ที่เหนือกว่าเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคเก่าที่ใช้งานระบบ FDD โดยการทำงานของเครือข่ายของระบบ FDD จะทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่ข่ายการเชื่อมโยงขาลง โดยตัวปรับเท่า (Equalizer) ที่ติดตั้งอยู่ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำหน้าที่ในการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่ซับซ้อนแบบ MIMO ในช่วงเวลานั้น ๆ ด้วยสัญญาณนำร่องที่ถูกส่งออกมาจากสถานีฐาน ซึ่งการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่ซับซ้อนด้วยตัวปรับเท่านั้นจะมีขีดจำกัดของความแม่นยำและความถูกต้อง แบบจำลองของข่ายการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลงสำหรับทำงานกับระบบ TDD massive MIMO ตามมาตรฐานของ LTE 3GPP แสดงดังรูปที่ 3

ทำการพิจารณาช่องเวลา TDD เฟรมสำหรับข่ายเชื่อมโยงขาขึ้น สัญลักษณ์ของสัญญาณนำร่องหรือสัญญาณเทรนที่ถูกส่งออกมาจากผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Station: MS) รายที่ k ทำงานอยู่ภายในขอบเขตพื้นที่รับผิดชอบของเซล j มีดังนี้

$$\mathbf{p}_{j,k\text{Pilot}} = \left[p_{j,k1} \;\; p_{j,k2} \cdots p_{j,k\tau} \right]^T \tag{1}$$



รูปที่ 3 *แบบจำลองเบสแบนด์ของข่ายการเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลงของระบบ TDD massive MIMO*

บทความนี้ได้นำรหัสตั้งได้ฉาก $\mathbf{c}_j = \left[c_{j,1} c_{j,2} \ldots c_{j,\tau}\right]^T$ มาทำการมอดูเลตกับสัญลักษณ์ของสัญญาณนำร่อง ดังนี้

$$\mathbf{t}_{j,k\text{Pilot}} = \mathbf{p}_{j,k\text{Pilot}} \cdot \mathbf{c}_j \tag{2}$$

โดยกำลังงานของสัญญาณนำร่องที่ถูกมอดูเลตกับรหัสตั้งได้ฉากแล้วจะเท่ากับ $\sum_{i=1}^{\tau} \mathbf{t}_{jk\text{Pilot}} = P_{\text{T}}$ และ τ คือความยาวสัญลักษณ์ของสัญญาณนำร่อง

จุดประสงค์ของการนำรหัสตั้งได้ฉาก $\mathbf{c}_j$ ที่ถูกระบุไว้สำหรับแต่ละเซลมาทำการมอดูเลตกับสัญลักษณ์ของสัญญาณนำร่อง ($\mathbf{p}_{j,k\text{Pilot}}$) เพื่อทำการระบุสถานีฐานของแต่ละเซลให้มีความแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้สามารถที่จะช่วยลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่อง [30] รวมทั้งยังสามารถที่จะใช้เป็นสัญลักษณ์ PSS เพื่อช่วยในการเข้าจังหวะเฟรมข้อมูล OFDM ได้อีกด้วย

สัญญาณนำร่องที่ถูกมอดูเลตด้วยรหัสตั้งได้ฉากของผู้ใช้งานรายที่ k ทำงานอยู่ในขอบเขตของเซล j ($\mathbf{t}_{j,k\text{Pilot}}$) จะถูกส่งไปมอดูเลตกับคลื่นพาหะย่อย (Subcarrier) ที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากที่ระบุไว้สำหรับผู้ใช้งานรายที่ k จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยังสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่รายที่ k เพื่อทำการส่งออกอากาศต่อไป

สัญญาณนำร่องที่ถูกมอดูเลตด้วยรหัสตั้งได้ฉากของผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวน K รายและมีการมอดูเลตกับคลื่นพาหะย่อยที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากจำนวน K ความถี่ ทำงานอยู่ในขอบเขตของเซล j ($\mathbf{t}_j$ มีขนาด $K \times \tau$) จะถูกส่งจากสายอากาศผ่านช่องสัญญาณไร้สายที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่ $\mathbf{H}_j$ มีขนาด $M \times K$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_j &= [\mathbf{h}_{j,1}, \ldots, \mathbf{h}_{j,K}] \\ \mathbf{h}_{j,k} &= [h_{j,k,1}, \ldots, h_{j,k,M}]^T \end{aligned} \tag{3}$$

โดย $\mathbf{h}_{j,k}$ คือช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่สำหรับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศต้นที่ k

สัญญาณที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่มีจำนวน M พาธจะถูกส่งไปปรากฏยังสายอากาศตัวรับแบบ massive MIMO ที่มีการติดตั้งสายอากาศที่สถานีฐานจำนวน M ต้น รวมทั้งสัญญาณจะถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) ที่มีค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ δ_n^2 ($\mathbf{n}_j$) อีกทั้งยังมีสัญญาณแทรกสอดจากเซลข้างเคียง ($i \neq j$) ปนเปื้อนมาด้วย สัญญาณเบสแบนด์ปรากฏที่เครื่องรับของสถานีฐานมีได้ดังนี้

$$\mathbf{y}_j = \sqrt{P_{\text{B}}}\mathbf{H}_j\mathbf{t}_j + \sqrt{\gamma P_{\text{B}}} \sum_{l=1, l\neq j}^{L} \mathbf{H}_l\mathbf{t}_l + \mathbf{n}_j \tag{4}$$

โดย $\mathbf{y}_j$ คือสัญญาณเบสแบนด์ปรากฏที่เครื่องรับของสถานีฐานมีขนาด M×1, P_{B} คือกำลังงานที่ถูกส่งออกมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่มาปรากฏยังเครื่องรับของสถานีฐาน ส่วน γ คือเกนไขว้ (Cross Gain) ซึ่งเป็นเกนสำหรับกำหนดความแรงของสัญญาณแทรกสอดที่ถูกส่งออกมาจากเซลข้างเคียง ($i \neq j$) และ L จำนวนของเซลข้างเคียงที่ส่งสัญญาณเข้ามาแทรกสอดเซลเป้าหมาย (j)

หลังจากที่เครื่องรับของสถานีฐานได้รับสัญญาณเบสแบนด์มาจากสายอากาศจำนวน M ต้นแล้ว สัญญาณเบสแบนด์จะถูกส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผลขนาดใหญ่ที่ติดตั้งอยู่ภายในสถานีฐาน โดยหน่วยประมวลผลจะนำกฎเกณฑ์หรือวิธีการของอัลกอลิธึมแบบต่างๆ มาใช้สำหรับทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณจางหายแบบเลือกความถี่ ($\hat{\mathbf{H}}_j$) จากนั้นจะนำสัมประสิทธิ์ของ

ช่องสัญญาณที่ประมาณได้ $\hat{\mathbf{W}}_j$ มาใช้เพื่อทำการชดเชยผลของช่องสัญญาณ massive MIMO ที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่ของระบบการเชื่อมโยงขาลง โดยกระบวนการของการชดเชยจะกระทำก่อนที่สัญญาณจะถูกส่งออกจากสถานีฐานไปยังสายอากาศแบบ massive MIMO จำนวน *M* ต้น

2.2แบบจำลองของข่ายการเชื่อมโยงขาลง

แบบจำลองเบสแบนด์ของข่ายการเชื่อมโยงขาลงแสดงดังรูปที่ 3 กำหนดให้ข้อมูลที่ต้องการจัดส่งออกไปจากสถานีฐานเซล *j* ประกอบไปด้วยข้อมูลของผู้ใช้งานจำนวน *K* รายที่ถูกมอดูเลตกับคลื่นพาห์ย่อยที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากจำนวน *K* ความถี่ ดังนี้

$$\mathbf{a}_j = \left[a_{j,1}, \ldots a_{j,K} \right] \tag{5}$$

จากนั้นข้อมูล $\mathbf{a}_j$ ที่มีขนาด *K*×1 จะถูกนำไปคูณกับเมตริกซ์สัมประสิทธิ์เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (Weight Matrix Coefficient) ที่ได้รับมาจากการประมาณค่า $\hat{\mathbf{W}}_j = \left[\hat{\mathbf{w}}_{j1}\ \hat{\mathbf{w}}_{j2} \cdots \hat{\mathbf{w}}_{jK} \right]$ มีขนาด *M*×*K* ซึ่งได้รับมาจากการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณไร้สาย โดยสัญญาณที่ได้รับการชดเชยช่องสัญญาณแล้วจะถูกส่งออกอากาศผ่านทางสายอากาศ massive MIMO จำนวน *M* ต้น สัญญาณคลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกจากสายอากาศจะเดินทางผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่ $(\mathbf{H}_j)$ มีขนาด *M*×*K* และถูกแทรกสอดจากสัญญาณที่ส่งออกมาจากเซลข้างเคียง ($i \neq j$) ก่อนที่จะไปปรากฏยังสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่ นอกจากนั้นสัญญาณเบสแบนด์ปรากฏที่ภาครับของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยังถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบ AWGN อีกด้วย ดังนั้นสัญญาณเบสแบนด์ปรากฏที่ภาครับของโทรศัพท์เคลื่อนที่รายที่ *k* ทำงานอยู่ภายในขอบเขตการให้บริการของเซล *j* มีได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_j &= \mathbf{H}_j^T \mathbf{x}_j + \sum_{l=1, l\neq j}^{L} \mathbf{H}_l^T \mathbf{x}_l + \mathbf{n}_j \\ \mathbf{x}_j &= \sqrt{\frac{P_A}{MK}} \hat{\mathbf{W}}_j \begin{bmatrix} a_{j,1} \\ a_{j,2} \\ \vdots \\ a_{j,K} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{6}$$

โดย P_A คือกำลังส่งรวมที่ได้รับมาจากวงจรขยายกำลังที่ถูกติดตั้งอยู่กับสถานีฐานสำหรับทำหน้าที่ขับสัญญาณผ่านสายอากาศจำนวน *M* ต้น และ *T* คือตัวดำเนินการเปลี่ยนตำแหน่ง (Transpose)

3. การประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณด้วยหลักการเซมิบลายด์

ผลกระทบจากช่องสัญญาณไร้สาย สัญญาณแทรกสอดจากเซลข้างเคียงและสัญญาณรบกวน จะส่งผลทำให้สัญญาณปรากฏที่เครื่องรับของสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่เกิดการผิดเพี้ยนทั้งขนาดและเฟส ส่งผลทำให้มีอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate: BER) เกิดขึ้นสูง การที่จะลด BER ที่เกิดขึ้นกับระบบ TDD massive MIMO นั้น ที่เครื่องรับของสถานีฐานจะต้องทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณไร้สาย โดยช่องสัญญาณที่ทำการประมาณได้นั้นจะต้องมีความใกล้เคียงกับช่องสัญญาณจางหายแบบเลือกความถี่จริงมากที่สุด รวมทั้งยังต้องมีความสามารถที่จะขจัดผลของสัญญาณแทรกสอดจากเซลข้างเคียงและสามารถที่จะลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย

บทความนี้นำเสนอวิธีการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณด้วยอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ ด้วยการนำรหัสที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากมาทำการมอดูเลตกับสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูลสำหรับทำการระบุ สถานีฐานของแต่ละเซลและระบุข้อมูลของผู้ใช้งานแต่ละราย (*k*) ที่ทำงานอยู่ภายในเซล *j* ให้มีความแตกต่างกันและนำมาใช้สำหรับทำการเข้าจังหวะเฟรมข้อมูล ดังนั้นสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูลที่ถูกมอดูเลตด้วยรหัสตั้งได้ฉากสำหรับข่ายการเชื่อมโยงขาขึ้นมีได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{j,k\text{Pilot}} &= \mathbf{p}_{j,k\text{Pilot}} \cdot \mathbf{c}_{j\text{Pilot}} \\ \mathbf{t}_{j,k\text{Data}} &= \mathbf{d}_{j,k\text{Data}} \cdot \mathbf{c}_{j,k\text{Data}} \end{aligned} \tag{7}$$

โดย $\mathbf{c}_{j\text{Pilot}} = \left[c_{p,j,1} c_{p,j,2} \ldots c_{p,j,\tau} \right]^T$ คือรหัสตั้งได้ฉากสำหรับระบุสถานีฐาน *j*, $\mathbf{c}_{j,k\text{Data}} = \left[c_{d,j,1} c_{d,j,2} \ldots c_{d,j,\tau} \right]^T$ คือรหัสตั้งได้ฉากของผู้ใช้งานรายที่ *k* ทำงานอยู่ในเซล *j* และ $\mathbf{d}_{j,k\text{Data}} = \left[d_{j,1} d_{j,2} \ldots d_{j,\tau} \right]^T$ คือข้อมูลของผู้ใช้งานรายที่ *k*

สัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ใช้งานรายที่ *k* จะผ่านช่องสัญญาณไร้สายที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่และถูกแทรกสอดจากการส่งสัญญาณ

ของเซลข้างเคียง ($i \neq j$) ก่อนที่จะไปปรากฏยังสายอากาศจำนวน M ต้นของสถานีฐาน รวมทั้งสัญญาณเบสแบนด์ปรากฏที่ภาครับของสถานีฐานยังถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบ AWGN อีกด้วย ดังนั้นสัญญาณเบสแบนด์ปรากฏที่ภาครับของสถานีฐานทั้งในส่วนของสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูล สำหรับใช้ในการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณ มีได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\mathbf{Y}_{j,k\text{Pilot}} &= \sqrt{P_{\text{B}}}\mathbf{h}_{j,k}.\mathbf{t}^{T}_{j,k\text{Pilot}} + \sqrt{\gamma P_{\text{B}}}\sum_{l=1,l\neq j}^{L}\mathbf{h}_{l,k}.\mathbf{t}^{T}_{l,k\text{Pilot}} + \mathbf{N}_{j} \\ \mathbf{Y}_{j,k\text{Data}} &= \sqrt{P_{\text{B}}}\mathbf{h}_{j,k}.\mathbf{t}^{T}_{j,k\text{Data}} + \sqrt{\gamma P_{\text{B}}}\sum_{l=1,l\neq j}^{L}\mathbf{h}_{l,k}.\mathbf{t}^{T}_{l,k\text{Data}} + \mathbf{N}_{j}\end{aligned} \quad (8)$$

โดย $\mathbf{N}_j$ คือเมตริกซ์ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN มีขนาด $M\times\tau$

หลังจากที่เครื่องรับของสถานีฐานได้รับสัญญาณเบสแบนด์ของสัญญาณนำร่อง $\mathbf{Y}_{j,k\text{Pilot}}$ และสัญญาณข้อมูลข้อมูล $\mathbf{Y}_{j,k\text{Data}}$ ที่มีขนาด $M\times\tau$ แล้ว หน่วยประมวลผลของสถานีฐานจะใช้ประโยชน์จากสัญญาณเบสแบนด์ทั้งสองส่วนนี้มาทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณด้วยอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์

บทความนี้นำหลักการของเซมิบลายด์มาทำการประยุกต์ใช้กับอัลกอลิธึมแบบ Least Square (LS) [35] ที่อาศัยคุณสมบัติทางด้านสถิติอันดับสองและมีความซับซ้อนของการคำนวณต่ำ โดยพารามิเตอร์การผสม (Mixing Parameter) [36] – [37] ได้ถูกนำมาใช้เพื่อทำการกำหนดอัตราส่วนของการผสมสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่ได้รับมาจากการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่มาจากการใช้สัญญาณนำร่อง และสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่ได้รับมาจากการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่มาจากการใช้สัญญาณข้อมูล โดยสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่ได้รับการผสมแล้วจะถูกนำมาใช้สำหรับทำการปรับกระบวนการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณให้เป็นปัจจุบัน (Update) รวมทั้งมีการนำรหัสตั้งได้ฉากมาใช้สำหรับระบุสถานีฐานและผู้ใช้งาน และใช้เป็นสัญลักษณ์พิเศษ (PSS) สำหรับทำการเข้าจังหวะเฟรมข้อมูล OFDM ส่งผลทำให้สามารถที่จะลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องจากเซลข้างเคียงได้มากขึ้น

อัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ที่นำเสนอจะมีความซับซ้อนของการคำนวณต่ำเนื่องจากใช้ข้อมูลที่มีขนาดเล็กและอาศัยคุณสมบัติทางด้านสถิติในอดีตเข้ามาช่วย ส่งผลทำให้อัลกอลิธึมสามารถที่จะปรับตัวตามคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณแบบไร้สายในทางปฏิบัติ ที่พารามิเตอร์ของการจางหายแบบเลือกความถี่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้อย่างทันกาล อีกทั้งอัลกอริธึมที่นำเสนอไม่ต้องการทราบค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมช่องสัญญาณ (Channel Covariance Matrix) ของสถานีฐานจากเซลข้างเคียงที่เข้ามาแทรกสอดเหมือนกับอัลกอลิธึมแบบ MMSE ที่ต้องการทราบค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม ส่งผลทำให้อัลกอลิธึมแบบ MMSE มีความซับซ้อนของการคำนวณสูงซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อด้อยของอัลกอลิธึมดังกล่าว

ฟังก์ชันต้นทุน (Cost Function) ของอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ จะอาศัยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำสุด (Mean Square Error) มาทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณ ที่ถูกส่งออกมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลเป้าหมาย j มีได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{h}}_{j,k} = \arg\min_{\mathbf{h}_{j,k}} \left\| \mathbf{Y}_{j,k} - \mathbf{h}_{j,k}\mathbf{t}^{T}_{j,k} \right\|^{2} \quad (9)$$

โดย

$$\begin{aligned}\mathbf{Y}_{j,k} &= \mathbf{Y}_{j,kPilot} \quad \text{or} \quad \mathbf{Y}_{j,k\text{Data}} \\ \mathbf{h}_{j,k}\mathbf{t}^{T}_{j,k} &= \mathbf{h}_{j,k}\mathbf{t}^{T}_{j,kPilot} \quad \text{or} \quad \mathbf{h}_{j,k}\mathbf{t}^{T}_{j,kData}\end{aligned} \quad (10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (Weight Vector Coefficient) ของการประมาณหาสถานะช่องสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซล j ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ มีได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{h}}_{j,k}(n) = \mathbf{Y}_{j,k}(n)\mathbf{t}^{*}_{j,k}(n)\left(\mathbf{t}^{T}_{j,k}(n)\mathbf{t}^{*}_{j,k}(n)\right)^{-1} \quad (11)$$

โดย n คือลำดับสัญลักษณ์ (Symbol Sequence)

บทความนี้ได้นำพารามิเตอร์การผสม (ϕ) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ เพื่อทำการกำหนดอัตราส่วนของการผสมสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการลดการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องจากเซลข้างเคียง โดยค่าสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักสำหรับประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ที่

นำเสนอ และสามารถที่จะปรับตัวได้อย่างทันกาล มีดังนี้

$$\hat{\mathbf{h}}_{j,k}(n+1)=\hat{\mathbf{h}}_{j,k}(n)-\mu\begin{pmatrix}(1-\phi)\mathbf{Y}_{j,k\text{Pilot}}(n)(\hat{\mathbf{h}}^{T}_{j,k}(n_i)\mathbf{Y}^{T}_{j,k\text{Pilot}}(n)\mathbf{t}^{*}_{j,k\text{Pilot}}(n))\\ \left(\mathbf{t}^{T}_{j,k\text{Pilot}}(n)\mathbf{t}^{*}_{j,k\text{Pilot}}(n)\right)+\phi\mathbf{Y}_{j,k\text{Data}}(n)(\hat{\mathbf{h}}^{T}_{j,k}(n_i)\\ \mathbf{Y}^{T}_{j,k\text{Data}}(n)\mathbf{t}^{*}_{j,k\text{Data}}(n))\left(\mathbf{t}^{T}_{j,k\text{Data}}(n)\mathbf{t}^{*}_{j,k\text{Data}}(n)\right)\end{pmatrix} \quad (12)$$

โดย ϕ คือพารามิเตอร์การผสม μ คือ Step Size และ

4. ผลการจำลองการทำงาน

ทำการจำลองการทำงานของระบบ TDD massive MIMO ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยระบบเครือข่ายยึดตามมาตรฐานของ LTE 3GPP พารามิเตอร์ของระบบเครือข่ายมีดังนี้ กำหนดให้สถานีฐานมีการติดตั้งสายอากาศแบบ massive MIMO จำนวน M ต้น ส่วนทางด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่กำหนดให้ติดตั้งสายอากาศเพียงต้นเดียว เทคนิคการเข้าถึงหลายทางของระบบเครือข่ายทั้งข่ายการเชื่อมโยงขาขึ้นและข่ายการเชื่อมโยงขาลงจะเป็นแบบ Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) ตามมาตรฐานของ LTE 3GPP [38] กำหนดให้หนึ่ง Resource Block (RB) grid ประกอบไปด้วย 7 OFDM สัญลักษณ์ โดยหนึ่ง OFDM สัญลักษณ์จะประกอบด้วยคลื่นพาห์ย่อยที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉาก จำนวน N=12 ความถี่ แต่ละความถี่ของคลื่นพาห์ย่อยจะกำหนดให้มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 15 kHz ดังนั้นในหนึ่ง OFDM สัญลักษณ์จะต้องการแบนด์วิดท์ร่วมนัย (Coherent Bandwidth) เท่ากับ B_c=180 kHz ช่วงเวลา 1 RB (7 OFDM สัญลักษณ์) จะเท่ากับ T_S=71.4 μs มีส่วนของ Cyclic Prefix หรือเวลาคุม (Guard Time) อยู่เท่ากับ T_{CP}=4.76 μs การส่งสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูลสำหรับใช้ในการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณไร้สายแบบ massive MIMO มีความยาวสัญญาณละ τ =16 สัญลักษณ์ รหัสตั้งได้ฉากที่จะนำไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูลเลือกใช้รหัสแบบ Hadamard ที่มีความยาวเท่ากับ τ

กำหนดให้สัญญาณปรากฏที่เครื่องรับของผู้ใช้งานรายที่ k ทำงานอยู่ในขอบเขตของเซล j มี SNR=25 dB ช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานเป็นช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่ชนิด Pedestrian โดยลักษณะของการจางหายจะแปรไปตามเวลา [39] โมเดลของเซลจะเป็นแบบ ITU Urban Macro หนึ่งเซลไซต์ (Cell Site) จะประกอบไปด้วยเซลรูปหกเหลี่ยมจำนวน 3 เซลและมีทั้งหมด 7 เซลไซต์ กำหนดให้เซลข้างเคียง ($i \neq j$) จำนวน 6 เซลทำการส่งสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็ม (Full Pilot Reuse) [40] มารบกวนเซล j โดยมีการทับซ้อนทั้งความถี่และช่องเวลา กำลังงานของสัญญาณนำร่องจากเซลข้างเคียงที่แทรกสอดเข้ามารบกวนโทรศัพท์เคลื่อนที่รายที่ k จะมีการปรับเปลี่ยนไปตามบริเวณที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ของเซล ($i \neq j$) ทำงานอยู่ สำหรับกรณีที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ทำงานอยู่ในบริเวณขอบเซลจำนวน 3 ราย ส่งสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็มเข้ามารบกวนสถานีฐานของเซลเป้าหมาย j มีเกนไขว้ γ =0.3 โทรศัพท์เคลื่อนที่ของเซล ($i \neq j$) จำนวน 2 ราย ส่งสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็มเข้ามารบกวนสถานีฐานของเซลเป้าหมาย มีเกนไขว้ γ =0.2 และโทรศัพท์เคลื่อนที่ของเซล ($i \neq j$) จำนวน 1 ราย ส่งสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็มเข้ามารบกวนสถานีฐานของเซลเป้าหมาย มีเกนไขว้ γ =0.1

เนื่องจากอัลกอลิธึมที่นำเสนอเป็นแบบเซมิบลายด์ที่มีการนำพารามิเตอร์การผสมมาใช้ด้วย ดังนั้นการจำลองการทำงานจะเริ่มด้วยการหาค่าพารามิเตอร์การผสมที่เหมาะสมสุด (Optimal Mixing Parameter Value, ϕ_{opt}) ที่จะทำให้สมรรถนะของ Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR) ที่ได้รับจากเครื่องรับสูงสุด โดยการจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย TDD massive MIMO จะใช้พารามิเตอร์ตามที่กำหนดไว้ด้านบน และสถานีฐานมีการติดตั้งสายอากาศอยู่จำนวน M=100 ต้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของ SINR กับพารามิเตอร์การผสมที่มีการปรับเปลี่ยนจาก 0 ไปจนถึง 1

ผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4 โดยพบว่าค่าพารามิเตอร์การผสมที่เหมาะสมสุดสำหรับอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ที่นำเสนอจะอยู่ที่ $\phi_{\text{opt}}=0.1$ ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้สมรรถนะของ SINR ที่ได้รับมาจากเครื่องรับแบบเซมิบลายด์สูงสุด

ต่อไปทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของ SINR (13) ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมที่นำเสนอเทียบกับอัลกอลิธึม LS แบบดังเดิม (ไม่ใช้รหัสตั้งได้ฉาก) อัลกอลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วย [30] และอัลกอลิธึม Zero-Forcing (ZF) อุดมคติที่สมมติว่าทราบเมตริกซ์ช่องสัญญาณไร้สายที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่ของผู้ใช้งานทุกรายที่ปรากฏอยู่ในระบบขณะนั้น (รวมถึงผู้ใช้งานรายแทรกสอดจากเซลอื่นด้วย) โดยพารามิเตอร์ของอัลกอลิธึม LS แบบดังเดิม อัลกอลิธึม LS มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วยและอัลกอลิธึม

แบบเซมิบลายด์ที่นำเสนอกำหนดให้ $\mu = 1\times10^{-2}$ นอกจากนี้อัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ยังมีการกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์การผสมที่ได้รับมาจากการจำลองการทำงานที่ผ่านมาคือ $\phi = 0.1$

ผลการจำลองการทำงานการเปรียบเทียบสมรรถนะ SINR ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมต่าง ๆ เทียบกับจำนวนสายอากาศแบบ massive MIMO ที่มีการติดตั้งอยู่ที่สถานีฐานตั้งแต่ *M*=10 จนถึง *M*=100 ต้นแสดงดังรูปที่ 5

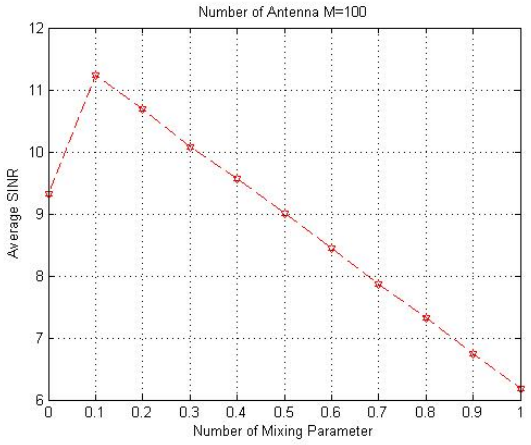
$$\mathrm{SINR}_{j,k} = E\left(\frac{\left|\mathbf{h}_{j,k}^{T}\hat{\mathbf{h}}_{j,k}\right|}{\sum_{l\neq j}^{L}\left|\mathbf{h}_{l,k}^{T}\hat{\mathbf{h}}_{jk}\right| + \delta_n^2\left\|\hat{\mathbf{h}}_{j,k}\right\|}\right) \quad (13)$$

โดย $\mathbf{h}$ คือสัมประสิทธิ์จริงของช่องสัญญาณจางหายแบบเลือกความถี่ $\hat{\mathbf{h}}$ คือสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่ทำการประมาณได้จากอัลกอลิธึมแบบต่าง ๆ และ E คือค่าความคาดหวัง (Expected Value)

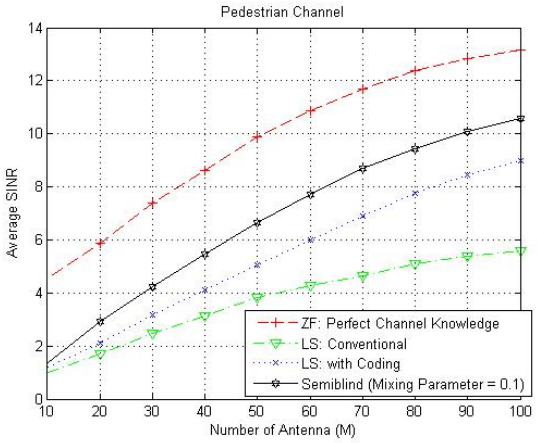
จากผลการจำลองการทำงานพบว่าสมรรถนะ SINR ของโทรศัพท์เคลื่อนที่รายที่ *k* ทำงานอยู่ภายในเซล *j* จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของสายอากาศ (*M*) ที่ถูกติดตั้งไว้ที่สถานีฐาน หรืออาจกล่าวได้ว่าสมรรถนะ SINR ของเครื่องรับโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีการปรับปรุงเพิ่มขึ้นตามจำนวนของสายอากาศ อย่างไรก็ตามสมรรถนะ SINR ไม่ได้เพิ่มขึ้นไปตามจำนวนของสายอากาศที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

ทำการพิจารณาต่อไปจะพบว่าอัลกอลิธึมที่ใช้รหัสที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณนำร่องเพื่อใช้สำหรับระบุสถานีฐาน [30] นั้น สามารถที่จะปรับปรุงสมรรถนะ SINR ของเครื่องรับที่ใช้อัลกอลิธึม LS แบบดั้งเดิมได้ โดยถ้าทำการพิจารณากรณีที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ *M*=100 ต้น จะพบว่าสมรรถนะของ SINR ที่ได้รับมาจากอัลกลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วย สามารถที่จะปรับปรุงได้ประมาณ 3.4 dB เมื่อเทียบกับสมรรถนะที่ได้รับจากอัลกอลิธึม LS ดังเดิม

สมรรถนะ SINR ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมแบบเซมิบลายด์ที่นำเสนอ โดยการนำสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูลมาทำการมอดูเลตด้วยรหัสตั้งได้ฉาก รวมถึงมีการนำค่าพารามิเตอร์การผสมที่เหมาะสมสุด (ϕ_{opt}) มาใช้ร่วมด้วย สามารถที่จะปรับปรุงสมรรถนะ SINR (ที่ *M*=100 ต้น) ให้เหนือกว่าอัลกลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วยประมาณ 1.5 dB และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัลกอลิธึม LS แบบดั้งเดิมพบว่าสามารถที่จะปรับปรุงสมรรถนะ SINR ให้สูงขึ้นได้ถึง 4.9 dB



รูปที่ 4 *ค่าเฉลี่ย SINR ต่อด้วยค่าพารามิเตอร์การผสม ϕ ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมเซมิบลายด์ที่นำเสนอ*



รูปที่ 5 *ค่าเฉลี่ย SINR ต่อด้วยต่อจำนวนสายอากาศ (M) ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึม ZF อุดมคติ อัลกอลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วย อัลกอลิธึม LS แบบดังเดิมและอัลกอลิธึมเซมิบลายด์ที่มีการใช้ค่าพารามิเตอร์การผสม $\phi_{\mathrm{opt}} = 0.1$ ทำงานภายใต้ช่องสัญญาณจางหายแบบเลือกความถี่ที่มีการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็ม*

ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย MSE (14) ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึม

แบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6 โดยค่าเฉลี่ย MSE ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึม Zero-Forcing (ZF) อุดมคติจะมีค่าต่ำที่สุด ถัดขึ้นมาจะเป็นค่าค่าเฉลี่ย MSE ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมที่นำเสนอ อัลกอลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วย และค่าเฉลี่ย MSE สูงสุดคือค่าที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึม LS แบบดังเดิม โดยอัลกอลิธึมที่นำเสนอที่มีการนำรหัสตั้งได้ฉากมาใช้ในการตรวจจับส่วนหัว (Header) ของเฟรมสำหรับทำการเข้าจังหวะเฟรมข้อมูล สามารถที่ช่วยทำให้การประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณทำได้ถูกต้องมากขึ้น สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ย MSE ที่ได้รับจะมีค่าต่ำ

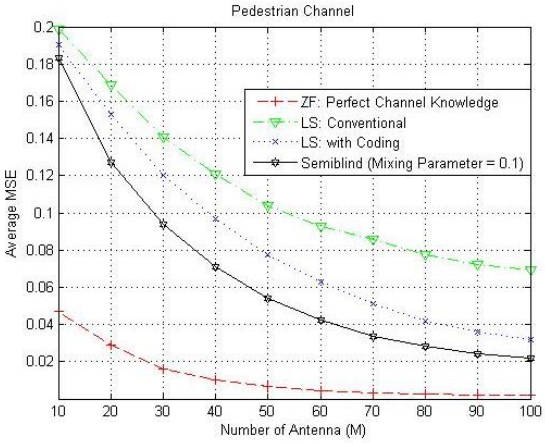
$$\mathrm{MSE} = E\left(\left\|\hat{\mathbf{h}}_{j,k} - \mathbf{h}_{j,k}\right\|^2\right) \tag{14}$$

จากนั้นทำการวัดสมรรถนะอัตราความสำเร็จในการถ่ายโอนข้อมูลของข่ายการเชื่อมโยงขาลง (Achievable Downlink Rate) ดัง (15) [41] ของอัลกอลิธึมแบบต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของ $N_{Pilot} = \tau$ และ $N_{coh} = 416$

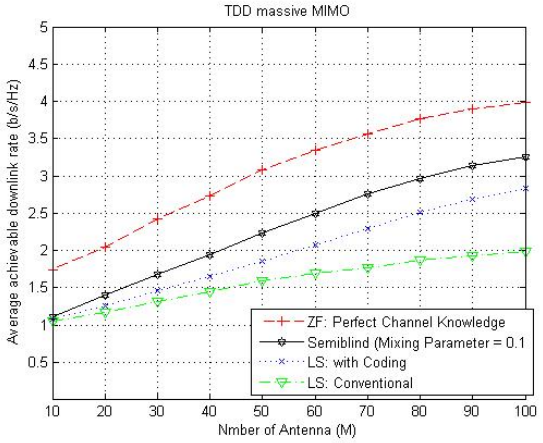
$$\mathrm{A}_{j,k} = E\left(\left(\frac{N_{coh} - N_{Pilot}}{N_{coh}}\right)\left[\frac{T_S - T_{CP}}{T_S}\right]\log_2\left(1 + \mathrm{SINR}_{j,k}\right)\right) \text{ b/s/Hz} \tag{15}$$

โดย N_{Pilot} คือ Time and Frequency Resource ที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณนำร่อง และ N_{coh} คือ Coherent Time and Frequency Resource

จากผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 7 พบว่าความจุของอัตราความสำเร็จในการถ่ายโอนข้อมูลสำหรับข่ายการเชื่อมโยงขาลง ($\mathrm{A}_{j,k}$) ที่ได้รับมาจากทุกอัลกอลิธึม จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของสายอากาศแบบ massive MIMO ที่ติดตั้งไว้ที่สถานีฐาน โดย $\mathrm{A}_{j,k}$ ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึมที่นำเสนอสามารถที่จะปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัลกลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วย 0.45 b/s/Hz และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัลกอลิธึม LS แบบดั้งเดิม พบว่าสามารถที่จะปรับปรุงสมรรถนะของ $\mathrm{A}_{j,k}$ ให้สูงขึ้นได้ถึง 1.75 b/s/Hz



รูปที่ *6 ค่าเฉลี่ย MSE ต่อด้วยจำนวนสายอากาศ (M) ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึม ZF อุดมคติ อัลกอลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วย อัลกอลิธึม LS แบบดังเดิมและอัลกอลิธึมเซมิบลายด์ที่มีการใช้ค่าพารามิเตอร์การผสม* $\phi_{\mathrm{opt}} = 0.1$



รูปที่ *7 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการถ่ายโอนข้อมูลสำหรับข่ายการเชื่อมโยงขาลงของระบบ TDD massive MIMO ต่อด้วยจำนวนสายอากาศ (M) ที่ได้รับมาจากอัลกอลิธึม ZF อุดมคติ อัลกอลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วย อัลกอลิธึม LS แบบดังเดิมและอัลกอลิธึมเซมิบลายด์ที่มีการใช้ค่าพารามิเตอร์การผสม* $\phi_{\mathrm{opt}} = 0.1$

จากผลการจำลองการทำงานสามารถที่จะยืนยันได้ว่า การนำหลักการของเซมิบลายด์มาประยุกต์ใช้กับอัลกอลิธึมแบบ LS รวมทั้งมีการนำรหัสตั้งได้ฉากมาใช้ระบุสถานีฐาน ผู้ใช้งานและทำหน้าที่เข้าจังหวะเฟรมข้อมูล สำหรับทำการประมาณหาสถานะของช่องสัญญาณจางหายแบบเลือกความถี่ของระบบเครือข่าย TDD massive MIMO สามารถที่จะช่วยลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็มได้ โดยหลักการที่นำเสนอสามารถที่จะปรับปรุงสมรรถนะ SINR และอัตราความสำเร็จในการถ่ายโอนข้อมูลที่ได้รับมาจากอัลกลิธึม LS แบบดั้งเดิมให้สูงขึ้นได้

5. สรุป

การนำหลักการของเซมิบลายด์มาใช้กับอัลกอลิธึม LS และนำพารามิเตอร์การผสมมาใช้สำหรับทำการผสมเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จากสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูล รวมทั้งยังมีการนำรหัสที่มีคุณสมบัติตั้งได้ฉากมามอดูเลตกับสัญญาณนำร่องและสัญญาณข้อมูลเพื่อระบุสถานีฐานและผู้ใช้งาน รวมทั้งทำการเข้าจังหวะเฟรมข้อมูล ผลการจำลองการทำงานพบว่าค่าของพารามิเตอร์การผสมที่เหมาะสมสุดจะเท่ากับ 0.1 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปใช้กับอัลกอลิธึมที่นำเสนอ ปรากฏว่าสมรรถนะ SINR และอัตราความสำเร็จในการถ่ายโอนข้อมูลที่ได้รับมาจากอัลกลิธึมที่นำเสนอมีการปรับปรุงให้สูงขึ้นเหนือกว่าสมรรถนะที่ได้รับมาจากอัลกลิธึม LS ที่มีการใช้รหัสตั้งได้ฉากร่วมด้วยและอัลกอลิธึม LS แบบดั้งเดิม ภายใต้การทำงานกับสภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนของสัญญาณนำร่องซ้ำแบบเต็ม จากผลการจำลองการทำงานยืนยันได้ว่า หลักการที่นำเสนอสามารถที่จะประมาณสถานะของช่องสัญญาณได้ถูกต้องมากขึ้นและสามารถที่จะขจัดสัญญาณปนเปื้อนได้ดีกว่าอัลกอลิธึมแบบดั้งเดิม

เอกสารอ้างอิง

[1] F. Rusek, D. Persson, B.K. Lau, et al., “Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays”, IEEE Signal Process. Mag., 2013, 30, (1), pp. 40 – 60.

[2] E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, et al., “Massive MIMO for next generation wireless systems”, IEEE Commun. Mag., 2014, 52, (2), pp. 186 – 195.

[3] J. Zhao, S. Ni, Y. Gong, et al., “Pilot reuse with a large number of antennas: performance analysis and pilot contamination reduction”, in Proc. 2017 9th Int. Conf. Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, October 2017, pp. 1 – 6.

[4] T.L. Marzetta, G. Caire, M. Debbah, et al., “Special issue on massive MIMO”, J. Commun. Netw., 2013, 15, (4), pp. 333 – 337.

[5] J. Hoydis, S. Ten Brink, M. Debbah, “Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: how many antennas do we need?”, IEEE J. Sel. Areas Commun., 2013, 31, (2), pp. 160 – 171.

[6] F. Kaltenberger, J. Haiyong, M. Guillaud, and R. Knopp, “Relative channel reciprocity calibration in mimo/tdd systems,” in Proc. Future Network and Mobile Summit, June 2010, pp. 1 – 10.

[7] L. Lu, G.Y. Li, t A.L. Swindlehurs, et al., “An overview of massive MIMO: benefits and challenges”, IEEE J. Sel. Top. Signal Process., 2014, 8, (5), pp. 742 – 758.

[8] H. Gao, F. Zhang S., et al., ‘A unified transmission strategy for TDD/FDD massive MIMO systems with spatial basis expansion model”, IEEE Trans. Veh. Technol., 2016, 66, (4), pp. 3170 – 3184.

[9] T.L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas”, IEEE Trans. Wirel. Commun., 2010, 9, (11), pp. 3590 – 3600.

[10] O. Elijah, C.Y. Leow, T.A. Rahman, et al., “A comprehensive survey of pilot contamination in massive MIMO 5G system”, IEEE Commun. Surv. Tutor., 2015, 18, (2), pp. 905 – 923.

[11] H.Q. Ngo, T.L. Marzetta, E.G. Larsson, “Analysis of the pilot contamination effect in very large multicell multiuser MIMO systems for physical channel models”, in Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP), Prague, Czech Republic, July 2011, pp. 3464 – 3467.

[12] J. Jose, A. Ashikhmin, T.L. Marzetta, et al., “Pilot contamination problem in multi-cell TDD systems”, in Proc. IEEE Int. Sym. on Information Theory, Seoul, Korea, August 2009, pp. 2184 – 2188.

[13] B. Gopalakrishnan, N. Jindal, “An analysis of pilot contamination on multiuser MIMO cellular systems with many antennas”, in Proc. IEEE 12th Int. Workshop Signal Processing Advances in Wireless Communications, San Francisco, CA, USA, August 2011, pp. 381 – 385.

[14] J. Zhang, B. Zhang, S. Chen, et al., “Pilot contamination elimination for large-scale multiple-antenna aided OFDM systems”, IEEE J. Sel. Top. Signal Process., 2014, 8, (5), pp. 759 – 772.

[15] F. Fernandes, Ashikhmin A., Marzetta T.L., “Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems”, IEEE J. Sel. Areas Commun., 2013, 31, (2), pp. 192 – 201.

[16] J. Zhang, B. Zhang, Chen S., et al., “Pilot contamination elimination for large-scale multiple-antenna aided OFDM systems”, IEEE J. Sel. Top. Signal Process., 2014, 8, (5), pp. 759 – 772.

[17] J. Jose, Ashikhmin A., Marzetta T.L., et al., “Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems”, IEEE Trans. Wireless Commun., 2011, 10, (8), pp. 2640 – 2651.

[18] A. Ashikhmin, T. Marzetta, “Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems”, in Proc. 2012 IEEE Int. Sym. Information Theory (ISIT), Cambridge, MA, USA, August 2012, pp. 1137 – 1141.

[19] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, et al., “A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems”, IEEE J. Sel. Areas Commun., 2013, 31, (2), pp. 264 – 273.

[20] P. Xu, J. Wang, J. Wang, et al., “Analysis and design of channel estimation in multicell multiuser MIMO OFDM systems”, IEEE Trans. Veh. Technol., 2015, 64, (2), pp. 610 – 620.

[21] J. Ma, S. Zhang, H. Li, et al., “Iterative LMMSE individual channel estimation over relay networks with multiple antennas”,

IEEE Trans. Veh. Technol., 2018, 67, (1), pp. 423 – 435.

[22] H. Xie, F. Gao, S. Jin, “An overview of low-rank channel estimation for massive MIMO systems”, IEEE Access, 2016, 4, pp. 7313 – 7321.

[23] J.W. Kang, Y. Whang, H.Y. Lee, et al., “Optimal pilot sequence design for multi-cell MIMO-OFDM systems”, IEEE Trans. Wirel. Commun., 2011, 10, (10), pp. 3354 – 3367.

[24] R. Zhang, X. Cheng, M. Ma, et al., “Interference-avoidance pilot design using zcz sequences for multi-cell MIMO-OFDM systems”, in Proc. 2012 IEEE Global Communication Conf. (GLOBECOM), Anaheim, CA, USA, April 2012, pp. 5056 – 5061.

[25] G. Kang, Hasselbach P., Yang Y., et al., “Pilot design for inter-cell interference mitigation in MIMO OFDM systems”, IEEE Commun. Lett., 2007, 11, (3), pp. 237 – 239.

[26] J. So, D. Kim, Y. Lee, et al., “Pilot signal design for massive MIMO systems: a received signal-to-noise-ratio-based approach”, IEEE Signal Process. Lett., 2015, 22, (5), pp. 549 – 553.

[27] A. Hu, T. Lv, H. Gao, et al., “Pilot design for large-scale multi-cell multiuser MIMO systems”, in Proc. 2013 IEEE Int. Conf. Communications (ICC), Budapest, Hungary, November 2013, pp. 5381 – 5385.

[28] S. Ni, J. Zhao, Y. Gong, “Optimal pilot design in massive MIMO systems based on channel estimation”, IET Commun., 2016, 11, (7), pp. 975 – 984.

[29] S. Ni, J. Zhao, R. Ran, “Analysis of channel estimation in large-scale MIMO aided OFDM systems with pilot design”, in Proc. 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), Nanjing, China, May 2016, pp. 1 – 5.

[30] S. Phrompichai, “Pilot Based Orthogonal BS identity Code Channel Estimation for LTE downlink MISO systems”, in Proc. International Electrical Engineering Congress (iEECON), 6 - 8 March 2019.

[31] P. Tasao, K. Puntsri and E. Khansalee, “Peak to Average Power Ratio Analysis of Single Carrier FDMA plus Soft-Clipping for PON Systems”, in Proc. 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Rai, Thailand, 2018, pp. 449 - 452.

[32] A. Omri, M. Shaqfeh, M. Mansouri and H. Alnuweiri, “Performance Analysis of 5G NR Synchronization Procedure with Imperfect Channel State Information”, in Proc. 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, Korea (South), 2019, pp. 313 - 317, doi: 10.1109/ICTC46691.2019.8939756.

[33] A. Omri, M. Shaqfeh, A. Ali and H. Alnuweiri, “Synchronization Procedure in 5G NR Systems”, IEEE Access, vol. 7, pp. 41286 - 41295, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907970.

[34] F. Chen, X. Li, Y. Zhang and Y. Jiang, “Design and implementation of initial cell search in 5G NR systems”, China Communications, vol. 17, no. 5, pp. 38-49, May 2020, doi: 10.23919/JCC.2020.05.005.

[35] M. Kay, Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory. Prentice-Hall, 1993.

[36] S. Phrompichai, “SGD Frequency-Domain Space-Frequency Semiblind Multiuser Receiver with an Adaptive Optimal Mixing Parameter”, RADIOENGINEERING, vol. 22, no. 1, pp. 401 – 410, April 2013.

[37] K. Chaiprathum, S. Udomsiri, S. Phrompichai, “ Adaptive Semi-Blind Receiver for TDD Massive MIMO Systems”, in Proc. 2023 20th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Nakhonphanom, Thailand, 2023, pp.1 - 4.

[38] B. Furht and S. A. Ahson, Eds, “Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology”, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009, ch. 12, pp. 441 – 443.

[39] J. P. Kermoal, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen and F. Frederiksen, “A Stochastic MIMO radio channel model with experimental validation”, IEEE Jour. on Selected Areas in Communication, vol. 20, no. 6, August 2002.

[40] P. Xu, J. Wang, and J. Wang, “Effect of pilot contamination on channel estimation in massive MIMO systems”, in Proc. International Conference on Wireless Communication Signal Processing (ICWCSP), October 2013, pp. 1 – 6.

[41] V Saxena, G Fodor, E Karipidis, “Mitigating pilot contamination by pilot reuse and power control schemes for massive MIMO systems”, in Proc. Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 2015, pp. 1 - 6.

ดร. สัมพันธ์ พรหมพิชัย ได้รับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2549 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ การประมวลผลสัญญาณดิจิตอลสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่และการสื่อสารผ่านระบบดาวเทียม การเข้ารหัสข้อมูลและการสื่อสารดิจิตอล

ดร .สกล อุดมศิริ ได้รับปริญญาเอกสาขา Information Science and Control Engineering จาก Nagaoka University of Technology (NUT) ประเทศญี่ปุ่น เมื่อปี พ .ศ. 2553 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ การประมวลผลสัญญาณภาพและวิดีโอดิจิตอล ระบบการเรียนรู้ของเครื่องจักรและ AI และ การประยุกต์ใช้งานระบบ Iots

วสันต์ อู่ยายโสม ได้รับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ Renewable Energy, Power Electronics, Power System Protection, Power System Harmonics, Infrared Thermography in Electrical Power System

นายพัฒนา อินทนิ ได้รับปริญญา D.Eng (Energy and Environment Science), Nagaoka University of Technology, Japan, 2010 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ พลังงานทางเลือก อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไร้สาย

ดร. จันทร์ อัญญะโพธิ์ ได้รับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2565 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ การส่งพลังงานไร้สาย การเขียนโปรแกรมสำหรับระบบสมองกลฝังตัว อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ดร.ปัณณวิชญ์ ภัทร์สรณ์สิริ ได้รับปริญญาเอกสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2560 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ การออกแบบวงจรอนาลอก การออกแบบวงจรรวมซีมอส การสื่อสารและโครงข่าย อินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง