

การวิเคราะห์การประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบ
ถ่วงน้ำหนักในการส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงย้อนหลัง
สำหรับระบบมัลติยูสเซอร์โม

**Analysis of Channel Estimation with the Weight Least
Squares Algorithm in the Reverse-Link
Data Transmission for Multiuser-MIMO**

สุชาดา สิริจัสสาพร

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันนวัตกรรมนคร (MII)
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ
E-mail: ssuchada@mut.ac.th

สัมพันธ์ พรหมพิชัย

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน 833 ถ. พระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ
Email: samphan.p@pit.ac.th

Manuscript received May 15, 2021

Revised May 23, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับการส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงย้อนหลังในระบบมัลติยูสเซอร์โม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประมาณช่องสัญญาณโดยประมาณให้มีค่าใกล้เคียงกับช่องสัญญาณจริง สำหรับป้องกันการเกิดข้อผิดพลาดของสัญญาณที่ฝั่งรับ ในขณะที่ส่งข้อมูลอาจมีการรบกวนสัญญาณได้ จึงมีการนำวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเป็นวิธีการประมาณช่องสัญญาณเพื่อชดเชยผลของสัญญาณที่เกิดความผิดเพี้ยนจากเดิมและป้องกันผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ผลการจำลองการทำงาน พบว่าค่าที่ได้จากวิธี

กำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับประมาณช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงย้อนหลังมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: การประมาณช่องสัญญาณ วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก ระบบมัลติยูสเซอร์โม การส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงย้อนหลัง

ABSTRACT

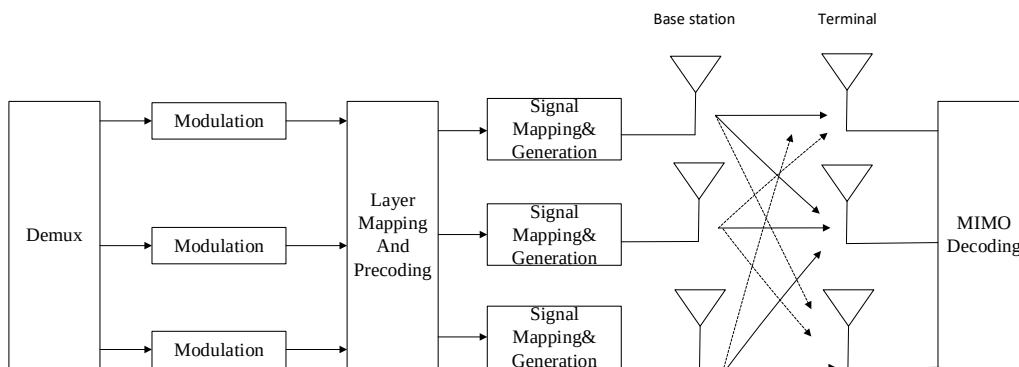
This paper presents the analysis of channel estimation with the weight least squares algorithm in the reverse-link data transmission for Multiuser-MIMO. The weight least square algorithm is used for

channel estimation method to compensate the signal distortion and to prevent the interference effect. The MIMO-based system has a higher spectrum efficiency during data transfer, which may interfere the original data with each other from the inserted external signal. The weight least square algorithm is used for channel estimation method to compensate the signal distortion. Experimental simulation results show that the signal to interference plus noise ratio (SINR) obtained from the weighted least squares algorithm for the channel estimation in the reverse-link data transmission is higher than that of the conventional least squares method.

Keywords: Channel Estimation, WLS algorithm, MU-MIMO systems, Reverse-link Data Transmission

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการการรับ-ส่งข้อมูลในระบบสื่อสารแบบไร้สายมีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น การใช้งานทางอินเทอร์เน็ต เช่น การทำธุรกรรมทางการเงิน การให้บริการด้านความรู้หรือด้านสุขภาพ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางดังนั้นเพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งานที่มีเพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มขนาดความจุของเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อสนับสนุนต่อการใช้งานที่มากขึ้นกว่าในอดีตที่ผ่านมา โดยเทคโนโลยีระบบ MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) เป็นเทคโนโลยีหลักในระบบ 5G ที่รองรับกับเครือข่ายขนาดใหญ่ที่มีจำนวนผู้ใช้งานมาก ทำให้การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลายมากขึ้น [1]



รูปที่1 บล็อกไดอะแกรม MIMO แบบ 3×3 [8]

ระบบ MIMO เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและนำมาใช้ร่วมกับการสื่อสารไร้สายที่ต้องการอัตราส่งข้อมูลสูงโดยสามารถใช้งานช่องความถี่ที่มีแบนด์วิดท์จำกัดได้ ส่วนเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการใช้อัตราส่งข้อมูลสูง ได้แก่ เทคนิคการรวมคลื่นพาห์ (Carrier Aggregation: CA) โดยทำการรวมคลื่นพาห์ในหลายย่านความถี่เพื่อสามารถส่งข้อมูลได้ในชุดเดียวกัน [2]

ระบบ MIMO เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มการส่งอัตราข้อมูลให้สูงมากขึ้น มีประสิทธิภาพของการใช้สเปกตรัมและในส่วนของระบบจะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นในส่วนของ การเชื่อมโยง (link) รวมไปถึงในเรื่องของประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน [3]

ระบบ MIMO เป็นระบบที่มีคุณสมบัติในการใช้งานช่องสัญญาณที่มีความจุสูงในขณะที่ทำการเชื่อมโยงขาลง (downlink) ได้พร้อมกันหลายทิศทาง เรียกว่า ระบบมัลติยูสเซอร์โม

โม (Multiuser MIMO: MU-MIMO) หรือระบบโมโมที่มีหลายผู้ใช้งาน [4] โดยความจุของเครือข่ายระบบ MU-MIMO จะสามารถคำนวณได้จากผลรวมของอัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้งานทุกคนโดยใช้พลังงานน้อยที่สุดที่ระบบต้องการจะเท่ากับผลรวมของพลังงานด้านส่ง (transmitted)

นอกจากนี้องค์ประกอบของระบบ MIMO จะมีเสาอากาศทางด้านส่ง (transmit antennas) อย่างน้อย 8 ต้น และ เสาอากาศทางฝั่งรับอย่างน้อย (receive antennas) 8 ต้น ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11ac ด้านประสิทธิภาพของการประมาณช่องสัญญาณ พบว่าเมื่อทำการประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weight Least Squares: WLS) [5] จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้วิธีการประมาณช่องสัญญาณด้วยกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares: LS) [4] โดยตัวประมาณด้วย

วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (WLS) จะอาศัยเมทริกซ์น้ำหนัก (Weight matrix) สำหรับเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ ในการประมาณช่องสัญญาณ ซึ่งกำหนดได้โดยใช้ค่าผกผันของความแปรปรวนร่วม (Inverse of covariance) ของการวัดช่องสัญญาณ

มีการนำเทคนิค MIMO มาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของการใช้สเปกตรัม [2] เริ่มจากการใช้เทคนิคโมโนแบบผู้ใช้งานเดี่ยว (Single User-MIMO) ที่มีการใช้ช่องประกอบของทรัพยากรความถี่-เวลา (Time-frequency resource) สำหรับผู้ใช้งานเดี่ยว โดยที่เทคนิค MIMO ช่วยทำให้ผู้ใช้งานสามารถใช้ทรัพยากรความถี่ในเวลาเดียวกันได้ผ่านการควบคุมระหว่างผู้ใช้งานที่กำหนดร่วมกัน (Co-scheduled users) ที่สถานียูเออย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์ของบทความนี้เป็นนำเสนอการวิเคราะห์วิธีการประมาณช่องสัญญาณด้วยเทคนิคการประมาณค่า (Channel Estimation: CE) โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก ร่วมกับการส่งข้อมูลแบบเชื่อมโยงย้อนหลัง (Reverse-link transmission) สำหรับระบบมัลติยูเออร์โมโน

2. แบบจำลองของระบบ

2.1 แบบจำลองของระบบ MIMO

ระบบ MIMO (Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) เป็นระบบที่สามารถรองรับเครือข่ายขนาดใหญ่และรองรับผู้ใช้งานจำนวนมาก MIMO สามารถรับ-ส่งคลื่นหลายชุดพร้อมกันผ่านทางเสาอากาศในช่องความถี่เดียวกันโดยระบบ MIMO จัดเป็นเทคโนโลยีสำหรับระบบสื่อสารไร้สายรุ่นใหม่ที่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ในอัตราเร็วที่สูง ๆ ภายใต้ช่องความถี่ที่มีจำกัดเพื่อรองรับกับปริมาณการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นทุกวัน โดยระบบแอลทีอี (Long Term Evolution: LTE) ได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของระบบ MIMO ในการถ่ายโอนข้อมูลข่าวสาร เทคนิคอื่นที่ทำให้อัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น ได้แก่ การรวมกลุ่มคลื่นพาห์ (Carrier Aggregation: CA) เป็นการรวมคลื่นในหลายย่านความถี่มาช่วยกันกระจายเพื่อส่งข้อมูลในชุดเดียวกัน สำหรับระบบ MIMO ได้เข้ามาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการรับ-ส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ [6] แต่เนื่องด้วยความซับซ้อนในการประมวลผลทำให้ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ ทำให้การใช้งานเทคโนโลยี MIMO มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นจากระบบทั่วไป อย่างไรก็ตามในปัจจุบันระบบ MIMO ได้

นำมาใช้งานอยู่ในมาตรฐานของ Wi-Fi IEEE802.11n ซึ่งสามารถรองรับความเร็วในการรับ-ส่งสัญญาณที่สูงขึ้น รวมไปถึงความจุของแบนวิธที่สูงมากขึ้นด้วย

การรวมกลุ่มคลื่นพาห์ เป็นเทคนิคการรวมคลื่นที่ทำให้อัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นโดยนำหลายย่านความถี่มาช่วยกันกระจายเพื่อส่งข้อมูลในชุดเดียวกัน สำหรับระบบ MIMO เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญระบบหนึ่งในการรับ-ส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ แต่เนื่องด้วยความซับซ้อนในการประมวลผลและต้องติดตั้งอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์เพิ่มเติม ทำให้การติดตั้งใช้งานเทคโนโลยี MIMO มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในมาตรฐานยุคใหม่อย่าง Wi-Fi IEEE802.11n และเครือข่าย 4G LTE ล้วนแต่ใช้เทคนิคส่งสัญญาณแบบระบบ MIMO ทั้งสิ้น [7]

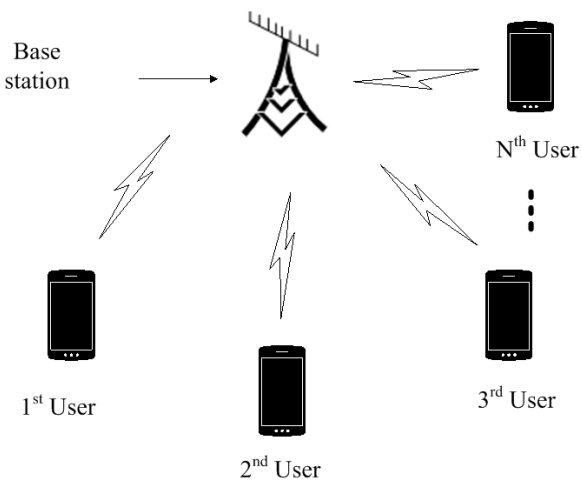
ระบบ MIMO และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงพื้นที่ (Spatial Multiplexing) เป็นเทคนิคที่ 3GPP ได้นำเสนอขึ้นมาเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายโอนข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สายโดยประโยชน์ของ MIMO จะช่วยเพิ่มความจุของการถ่ายโอนข้อมูล มีความหลากหลายทางความถี่ (Diversity frequency) เพื่อช่วยลดผลกระทบจากการเกิดช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่และมีความหลากหลายของอัตราขยาย (Diversity gain) ทำให้สามารถที่จะช่วยเพิ่มค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise Ratio: SNR) ของสัญญาณปรากฏที่เครื่องรับได้โดยบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของ MIMO ที่ประกอบไปด้วยสายอากาศทางด้านรับ 3 ต้นและสายอากาศทางด้านส่ง 3 ต้นร่วมกับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 1 [8] แสดงรูปแบบการทำงานของ MIMO โดยสถานีฐานจะแสดงการทำงานของเสาอากาศเพื่อทำหน้าที่ให้บริการแก่ผู้ใช้งานพร้อมกัน (user terminal : UTs) เสาอากาศแต่ละต้นจะใช้ที่เวลาและคลื่นความถี่เดียวกัน สถานีฐานที่มีเสาอากาศหลายต้นจะส่งข้อมูลไปยังสถานีย่อยในช่วงเวลาและความถี่เดียวกัน ในระบบ MIMO สำหรับผู้ใช้งานหลายรายได้มีการเชื่อมต่อหลายช่องสัญญาณพร้อมกันทำให้สามารถที่จะทำการเชื่อมโยงขาขึ้นและเชื่อมโยงขาลงในช่วงเวลาเดียวกัน โดยคุณลักษณะนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถให้แก่ระบบ MIMO ได้

เทคนิคของโมโนที่สำคัญได้แก่ การเพิ่มค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ให้สูงขึ้น ในระบบโมโนสำหรับผู้ใช้งานรายเดียวต้องการส่งข้อมูลด้วยอัตราที่สูงจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์ทำให้มีความ

หลากหลายในการรับส่งข้อมูล

2.2 แบบจำลองของระบบ MU-MIMO

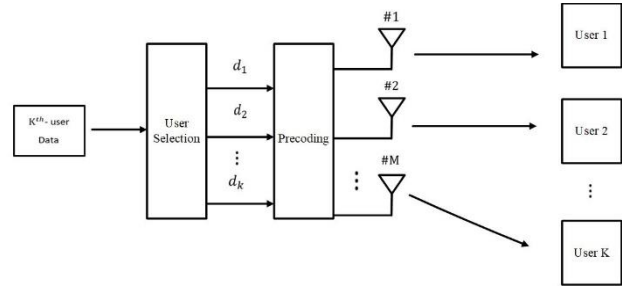
ระบบ MU-MIMO (Multiuser Multiple-input Multiple-output: MU-MIMO) เป็นระบบ MIMO ที่ได้เพิ่มจำนวนของเสาอากาศสื่อสารให้มีจำนวนมากขึ้นเพื่อสามารถส่งข้อมูลได้ในอัตราเร็วสูงขึ้นและรับ-ส่งข้อมูลได้หลากหลายเส้นทางยิ่งขึ้น ทำให้มีรบกวนการรับ-ส่งข้อมูลมากขึ้นกว่าเดิมและยังสามารถลดการเกิดการรบกวนกัน (interference) ได้โดยสถานีฐาน (base station) มีพื้นที่ในการรับ-ส่งสัญญาณที่ครอบคลุมทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการส่งสัญญาณที่ทำให้เกิดการรบกวนกันได้และสามารถลดการจางหายของสัญญาณ (Signal fading) ได้ด้วย สามารถใช้งานอุปกรณ์สื่อสารได้ครั้งละจำนวนมากโดยที่ความเร็วยังคงที่ จากรูปที่ 2 แสดงการสื่อสารสำหรับผู้ใช้งานหลายคน (Multi-User Communication) ที่มีจำนวนของผู้ใช้บริการจำนวนหลายรายในสถานีฐานของระบบเซลลูลาร์ [9] การใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) จะทำการส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งในอัตราสูงที่เพิ่มขึ้นและมีความหลากหลายในการส่งข้อมูลมากขึ้น



รูปที่ 2 ระบบสื่อสารแบบ MU-MIMO ที่มีจำนวนผู้ใช้งานเป็น n [2]

ระบบมัลติยูเซอร์โมโม [2] จะมีจำนวนเสาอากาศเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถที่จะส่งข้อมูลได้หลากหลายเส้นทางมากขึ้นและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนข้อมูล ทำให้สัญญาณมีรบกวนการกระจาย

ได้มากขึ้นกว่าเดิมและยังสามารถลดการเกิดการรบกวนกัน (interference) เนื่องจากสถานีฐานสามารถที่จะหลีกเลี่ยงการส่งสัญญาณไปในทิศทางที่มีการกระจายของสัญญาณที่อาจเกิดการรบกวนกัน



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของ K^{th} Multi-User MIMO [9]

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงความจุของช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้งานเดี่ยว (single-user) ที่มีขนาด $N_R \times N_T$ เมื่อ N_R คือจำนวนเครื่องทางฝั่งผู้รับ [2] โดยที่ N_T คือจำนวนเครื่องทางฝั่งของผู้ส่ง โดยสมมติว่า N_B คือจำนวนของเสาอากาศ และ N_M คือจำนวนของสถานีโมบาย ตามลำดับและมี K เป็นผู้ใช้งานอิสระ โดยทุก ๆ ข้อมูลของผู้ใช้งานอิสระ (K) ได้มีการเชื่อมต่อกับสถานีฐานในการเชื่อมต่อจากหลายช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีเป้าหมาย ได้แก่ การหาจำนวนเครื่องทางฝั่งผู้ส่งและทางฝั่งผู้รับที่น้อยที่สุด ที่ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากที่สุด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ MU-MIMO ทั้งรูปแบบการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลงเพื่อแสดงการทำงานของระบบ MU-MIMO มีดังนี้

การเชื่อมโยงขาขึ้นสำหรับการเข้าถึงช่องสัญญาณหลายทาง (multiple access channel) สำหรับผู้ใช้งานอิสระขณะทำการส่งข้อมูลจากหลายผู้ใช้งานไปยังสถานีฐาน กำหนดให้ N_B คือจำนวนของเสาอากาศ และ N_M คือจำนวนของสถานีโมบาย (mobile station) เมื่อพิจารณา K คือ ผู้ใช้อิสระในระบบ MU-MIMO โดยให้ $\mathbf{x}_u$ เป็นสัญญาณที่ผู้ใช้งานในแต่ละรายขณะเชื่อมโยงขาขึ้นเพื่อส่งข้อมูลเข้ายังสถานีฐานมีขนาด $N_M \times 1$ และ $\mathbf{y}^{UL}$ เป็นสัญญาณที่ได้รับจากผู้ใช้งานแต่ละราย (u) เมื่อ $u = 1, 2, \dots, K$ ที่สถานีฐานมีขนาด $N_B \times 1$ สัญญาณที่ได้รับระหว่าง

สถานีโมบายและสถานีฐาน จะแสดงสัญลักษณ์เป็นช่องสัญญาณ $\mathbf{H}_u^{UL}$ ที่มีขนาด $N_B \times N_M$ เมื่อ $u = 1, 2, \dots, K$ โดยสัญญาณที่สถานีฐานจะได้รับจากทางผู้ใช้งานแต่ละรายมีขนาด $N_B \times N_M$ สามารถเขียนได้ดังนี้ [2]

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{UL} &= \mathbf{H}_1^{UL} \mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_2^{UL} \mathbf{x}_2 + \dots + \mathbf{H}_K^{UL} \mathbf{x}_K + \mathbf{z} \\ &= [\mathbf{H}_1^{UL} \mathbf{H}_2^{UL} \dots \mathbf{H}_K^{UL}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_K \end{bmatrix} + \mathbf{z} = \mathbf{H}^{UL} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_K \end{bmatrix} + \mathbf{z} \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ $\mathbf{z}$ เป็นสัญญาณรบกวนในเครื่องรับเป็นสัญญาณเกาส์เซียนแบบเชิงซ้อนชนิดสมมาตรแบบวงกลมที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (Zero-mean circular symmetric complex Gaussian) ซึ่งเป็นแบบเวกเตอร์สุ่ม (Random vector) มีขนาด $N_B \times 1$

สำหรับช่องสัญญาณของเชื่อมโยงขาลง โดย $\mathbf{X}$ คือ สัญญาณที่ส่งออกมาจากสถานีฐาน $\mathbf{y}_u$ เป็นสัญญาณที่ผู้ใช้งานแต่ละรายจะได้รับ $u = 1, 2, \dots, K$ มีขนาด $N_M \times 1$ และ $\mathbf{H}_u^{DL}$ เป็นช่องสัญญาณทั้งหมดที่ส่งมาจากสถานีฐานที่จะกระจายไปหาผู้ใช้งานมีขนาด $N_M \times N_B$ เขียนได้เป็นสมการดังนี้ [2]

$$\mathbf{y}_u = \mathbf{H}_u^{DL} \mathbf{x} + \mathbf{z}_u, \text{ เมื่อ } u = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

เมื่อ $\mathbf{z}_u$ เป็นสัญญาณรบกวนประเภทเชิงซ้อนชนิดสมมาตรแบบวงกลมที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สำหรับแต่ละผู้ใช้งานมีขนาด $N_M \times 1$ จะแสดงสัญญาณของผู้ใช้งานในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1^{DL} \\ \mathbf{H}_2^{DL} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_K^{DL} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{z}_K \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 การประมาณช่องสัญญาณ

การประมาณช่องสัญญาณ (Channel Estimation: CE) ในการรับ-ส่งสัญญาณข้อมูลนั้น สัญญาณที่ได้รับทางฝั่งรับอาจมีการบิดเบือนโดยผลของช่องสัญญาณ หรืออาจมีการรบกวนกันระหว่าง

ช่องสัญญาณ เพื่อกู้คืนบิตที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ (channel) จะประมาณและทดแทนในส่วนของฝั่งเครื่องรับ (Receiver) [6]

ระบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) ในการส่งสัญญาณนั้น เครื่องส่งจะปรับลำดับบิตให้เป็นสัญลักษณ์ด้วยเทคนิคการมอดูเลตแบบ PSK/QAM (Phase Shift Keying/Quadrature Amplitude Modulation: PSK/QAM) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ผกผัน (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) เพื่อแปลงสัญลักษณ์ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางเวลา (time-domain) แล้วจึงส่งออกไป จากนั้นทางฝั่งรับจะทำการถอดรหัสโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อแปลงข้อมูลจากสัญลักษณ์ทางเวลาให้กลับมามีอยู่ในรูปของสัญลักษณ์ทางความถี่ (frequency-domain) โดยในแต่ละคลื่นพาห่อย่อย (subcarrier) จะมีความเป็นอิสระต่อกัน และการไม่คำนึงถึงสัญญาณรบกวนระหว่างผู้ให้บริการกับผู้ใช้งานเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการหักล้างกันระหว่างข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ จึงต้องทำการชดเชยข้อมูลในส่วนที่ถูกบิดเบือน

สัญญาณที่ส่งออกมาสามารถชดเชยได้ด้วยการประมาณตอบสนองของช่องสัญญาณของแต่ละช่องสัญญาณ โดยทั่วไปช่องสัญญาณสามารถประมาณได้โดยใช้สัญลักษณ์นำร่อง (pilot symbol) ของทั้งเครื่องส่งและเครื่องรับ เทคนิคสำหรับสัญญาณนำร่องนั้น ในการประมาณผลตอบสนองของช่องสัญญาณ จะนำสัญลักษณ์ของ OFDM มาใช้ในการพิจารณา โดยพบว่า จะมีความแตกต่างในแง่มุมของการดำเนินงานรวมถึงรูปแบบของสัญญาณนำร่อง ซึ่งรูปแบบของการใช้งานจะขึ้นอยู่กับในการปรับแต่งในทางเวลาและความถี่

2.3.1 สัญญาณนำร่องสำหรับการประมาณช่องสัญญาณจริง

สัญญาณนำร่อง (Pilot signal) ได้นำมาใช้แทนการส่งสัญลักษณ์ของข้อมูล (data symbols) ในรูปของสัญญาณทางความถี่เพื่อที่จะควบคุมระบบสื่อสาร [3] การที่จะส่งผ่านข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการนำร่องสัญญาณ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square: LS) และวิธีหาค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (minimum-mean-square-error: MMSE) ได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการประมาณช่องสัญญาณในช่วงที่ใช้สัญญาณนำร่อง [8] โดยสมมติให้คลื่นพาห่อย่อยทั้งหมดตั้งฉากกัน (orthogonal) จะเขียนสัญลักษณ์ของการนำร่องสำหรับ N คลื่นพาห่อย่อยในรูปของ

เมทริกซ์เส้นทแยงมุม (diagonal matrix) โดยให้ช่องสัญญาณเป็น $H(k)$ สำหรับแต่ละคลื่นพาห่อย่อย k และสัญญาณที่ได้รับเป็น $Y(k)$ จะเขียนในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y(0) \\ Y(1) \\ \vdots \\ Y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x(1) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & x(N-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(0) \\ H(1) \\ \vdots \\ H(N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z(0) \\ Z(1) \\ \vdots \\ Z(N-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ $\mathbf{H}$ เป็นช่องสัญญาณและ $\mathbf{Z}$ เป็นสัญญาณรบกวน แล้วจะแทนสัญลักษณ์ $\hat{\mathbf{H}}$ เป็นการประมาณค่าของช่องสัญญาณ $\mathbf{H}$ โดยสัญญาณที่ได้รับในรูปของโดเมนความถี่ $Y(k)$ จะอยู่ในรูปสมการดังนี้ [3]

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}(k) + \mathbf{z}(k) \quad (5)$$

2.4 การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดสำหรับระบบ MIMO

การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square channel estimation) เป็นวิธีที่อาศัยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง (equalizer) เพื่อชดเชยผลของช่องสัญญาณและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน โดยทำการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุดของฟังก์ชันเงื่อนไข $J(\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k))$ ได้ดังนี้ [9], [10], [11]

$$\begin{aligned} J(\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k)) &= \|\mathbf{Y}(k) - \mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k)\|^2 \\ &= (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k))^H (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k)) \\ &= \mathbf{Y}^H(k)\mathbf{Y}(k) - \mathbf{Y}^H(k)\mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k) \\ &\quad - \hat{\mathbf{H}}_{LS}^H(k)\mathbf{X}^H(k)\mathbf{Y}(k) + \hat{\mathbf{H}}_{LS}^H(k)\mathbf{X}^H(k)\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

โดยฟังก์ชันอนุพันธ์สามารถหาได้ ดังนี้

$$\frac{\partial J(\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k))}{\partial \hat{\mathbf{H}}_{LS}(k)} = -2(\mathbf{X}^H(k)\mathbf{Y}(k))^* + 2\mathbf{X}^H(k)\mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k) = \mathbf{0} \quad (7)$$

โดยที่ $\mathbf{X}^H(k)\mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}(k) = \mathbf{X}^H(k)\mathbf{Y}(k)$ เขียนในรูปแบบของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k) = (\mathbf{X}^H(k)\mathbf{X}(k))^{-1}\mathbf{X}^H(k)\mathbf{Y}(k) = \mathbf{X}^{-1}(k)\mathbf{Y}(k) \quad (8)$$

โดยส่วนประกอบของการประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด $\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k)$ กำหนดให้ $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ สามารถเขียนการประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด $\hat{\mathbf{H}}_{LS}(k)$ ในแต่ละคลื่นพาห่อย่อย

วิธีหาค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในรูปแบบของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเขียนได้ดังนี้ [2]

$$\begin{aligned} MSE_{LS}(k) &= E\left\{(\mathbf{H}(k) - \hat{\mathbf{H}}_{LS}(k))^H (\mathbf{H}(k) - \hat{\mathbf{H}}_{LS}(k))\right\} \\ &= E\left\{(\mathbf{H}(k) - \mathbf{X}^{-1}(k)\mathbf{Y}(k))^H (\mathbf{H}(k) - \mathbf{X}^{-1}(k)\mathbf{Y}(k))\right\} \\ &= E\left\{(\mathbf{X}^{-1}(k)\mathbf{Z}(k))^H (\mathbf{X}^{-1}(k)\mathbf{Z}(k))\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

2.5 การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับระบบ MIMO

วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least Squares: WLS) เป็นวิธีการที่ได้นำมาใช้ในการแก้ปัญหาในเรื่องของตำแหน่งข้อมูลในเมทริกซ์โดยใช้กฎต่ำสุดของคราเมอร์-ลอร์ (Cramer-Rao lower) มาประยุกต์ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักได้พัฒนาขึ้นมาจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะเขียนในรูปวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักได้ดังนี้ [10], [11]

$$\begin{aligned} J(\hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k)) &= \|\mathbf{Y}(k) - \mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k)\|^2 \cdot \mathbf{W}_{WLS}(k) \\ &= (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k))^H \mathbf{W}_{WLS}(k) \cdot (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k)) \\ &= \mathbf{Y}^H(k)\mathbf{W}_{WLS}(k)\mathbf{Y}(k) - \mathbf{Y}^H(k)\mathbf{W}_{WLS}(k)\mathbf{X}(k)\hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k) \\ &\quad - \hat{\mathbf{H}}_{WLS}^H(k)\mathbf{W}_{WLS}(k)\mathbf{X}^H(k)\mathbf{Y}(k) + \hat{\mathbf{H}}_{WLS}^H(k)\mathbf{W}_{WLS}(k)\mathbf{X}^H(k)\hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k) \end{aligned} \quad (10)$$

ทำการหาอนุพันธ์จากสมการที่ (10) และกำหนดให้เป็น 0 และสามารถคำนวณหา $\hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k)$ ได้

$$\therefore \hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k) = (\mathbf{X}^H(k) \cdot \mathbf{W}_{WLS}(k) \cdot \mathbf{X}(k))^{-1} \mathbf{X}^H(k) \cdot \mathbf{W}_{WLS}(k) \cdot \mathbf{Y}(k) \quad (11)$$

เมื่อ $\mathbf{W}_{WLS}(k)$ คือ เมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix) ของน้ำหนักมีขนาด $M \times N$

ส่วนวิธีการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักมีดังนี้

$$\begin{aligned} \therefore MSE_{WLS}(k) &= E \left\{ \left(\mathbf{H}(k) - \hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k) \right)^H \left(\mathbf{H}(k) - \hat{\mathbf{H}}_{WLS}(k) \right) \right\} \\ &= E \left\{ \left(\mathbf{H}(k) - \frac{\mathbf{X}^{-1}(k) \mathbf{W}_{WLS}(k) \mathbf{Y}(k)}{\mathbf{X}^H(k) \mathbf{W}_{WLS}(k) \mathbf{X}(k)} \right)^H \left(\mathbf{H}(k) - \frac{\mathbf{X}^{-1}(k) \mathbf{W}_{WLS}(k) \mathbf{Y}(k)}{\mathbf{X}^H(k) \mathbf{W}_{WLS}(k) \mathbf{X}(k)} \right) \right\} \\ &= E \left\{ \left(\mathbf{X}^{-1}(k) \mathbf{Z}(k) \right)^H \left(\mathbf{X}^{-1}(k) \mathbf{Z}(k) \right) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

2.6 การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดระบบ MU-MIMO

การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square channel estimation) เป็นวิธีที่อาศัยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง (equalizer) เพื่อชดเชยผลของช่องสัญญาณและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ [2], [12]

$$\mathbf{g}_{jk}^{LS} = \arg \min \|\mathbf{X}_{jk} - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T\|^2 \quad (13)$$

$$\mathbf{s}_k = [s_{k1} \ s_{k2} \ \dots \ s_{kT}]^T, \sum_i \|\mathbf{s}_{k_i}\|^2 = \tau P_T \quad (14)$$

เมื่อ $\mathbf{s}_k$ ลำดับของโพลิต P_T คือ กำลังของด้านส่ง τ คือ สัญลักษณ์นำร่อง สามารถเขียนสมการในรูปของกำลังสองน้อยที่สุดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \|\mathbf{X}_{jk} - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T\|^2 \\ &= (\mathbf{X}_{jk} - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T)^H (\mathbf{X}_{jk} - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T) \\ &= \mathbf{X}_{jk}^H \mathbf{X}_{jk} - \mathbf{s}_k^* \mathbf{g}^H \mathbf{X}_{jk} - \mathbf{X}_{jk}^H \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T + \mathbf{s}_k^* \mathbf{g}^H \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T \end{aligned} \quad (15)$$

โดยสัญญาณที่ได้รับและช่องสัญญาณ $\mathbf{g}^H$ จะกำหนดให้คงที่ โดยทำการหาอนุพันธ์สมการที่ (3) เทียบกับ $\mathbf{g}^H$ แล้วให้มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{g}^H} = 0 \quad (16)$$

และ

$$\mathbf{X}_{jk} = \sum_{l \in \mathcal{J}} \mathbf{g}_{jkl} \mathbf{s}_k^T + \mathbf{N}_j \quad (17)$$

ดังนั้นการประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบปรับตัวได้ $\hat{\mathbf{g}}_{jk}^{LS}$ สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\therefore \hat{\mathbf{g}}_{jk}^{LS} = \mathbf{g}_{jk} + \sum_{l \in \mathcal{J}, l \neq j} \mathbf{g}_{jkl} \frac{\mathbf{s}_k^T \mathbf{s}_k^*}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{s}_k^*} + \frac{\mathbf{N}_j \mathbf{s}_k^*}{\tau P_T} \quad (18)$$

2.7 การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักระบบ MU-MIMO

วิธีกำลังสองน้อยที่สุดได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาในเรื่องของตำแหน่งข้อมูลในเมทริกซ์โดยนำกฎต่ำสุดของคราเมอร์-ลอร์ (Cramer-Rao lower) มาประยุกต์ใช้ภายใต้สัญญาณรบกวน (noise) [5] โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weight Least Squares: WLS) นี้มีดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \|\mathbf{X}_{jk} - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T\|^2 \cdot \mathbf{W} \\ &= (\mathbf{X}_{jk} - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T)^H \cdot \mathbf{W} \cdot (\mathbf{X}_{jk} - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T) \\ &= (\mathbf{X}_{jk}^H \mathbf{W} \mathbf{X}_{jk} - \mathbf{s}_k^* \mathbf{g}^H \mathbf{W} \mathbf{X}_{jk} - \mathbf{X}_{jk}^H \mathbf{W} \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T + \mathbf{s}_k^* \mathbf{g}^H \mathbf{W} \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T) \end{aligned} \quad (19)$$

สัญญาณที่ได้รับและช่องสัญญาณ $\mathbf{g}^H$ จะกำหนดให้คงที่ โดยทำการหาอนุพันธ์สมการที่ (7) เทียบกับ $\mathbf{g}^H$ แล้วให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังนี้

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{g}^H} = 0 \quad (20)$$

จะได้

$$\mathbf{X}_{jk} \mathbf{W} \mathbf{s}_k^* - \mathbf{g} \mathbf{s}_k^T \mathbf{W} \mathbf{s}_k^* = 0 \quad (21)$$

ดังนั้นการประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักปรับตัวได้ $\hat{\mathbf{g}}_{jk}^{WLS}$ สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\therefore \hat{\mathbf{g}}_{jk}^{WLS} = \mathbf{g}_{jk} + \sum_{l \in \mathcal{J}, l \neq j} \mathbf{g}_{jkl} \frac{\mathbf{s}_k^T \mathbf{W} \mathbf{s}_k^*}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{W} \mathbf{s}_k^*} + \frac{\mathbf{N}_j \mathbf{W} \mathbf{s}_k^*}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{W} \mathbf{s}_k^*} \quad (22)$$

เมื่อ $\mathbf{W}$ คือ เมทริกซ์ทแยงมุม (diagonal matrix) ของน้ำหนัก [1]

3 ผลการจำลองการทำงาน

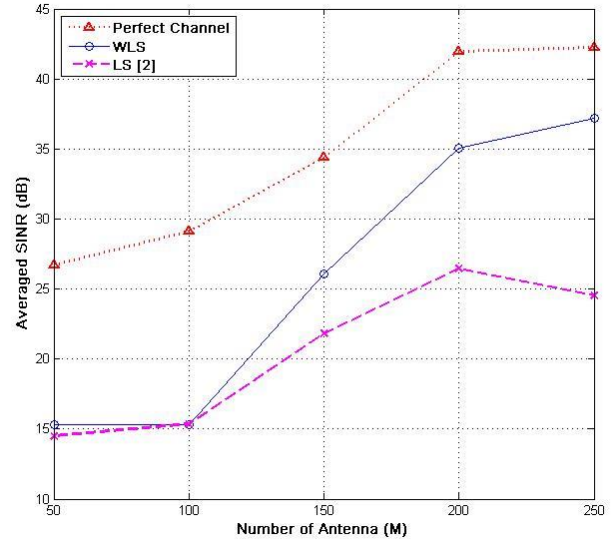
การจำลองการทำงานระบบมัลติยูสเซอร์โม โดยมีการกำหนดตัวแปร ดังนี้ จำนวนเสาอากาศ (M) มีค่าเท่ากับ 50, 100, 150, 200, 250 จำนวนเทอร์มินเตอร์ (Terminator) (K) มีค่าเท่ากับ 20, 100, 150, 200, 250 และ SNR=50 dB ทำการสุ่มช่องสัญญาณขนาด $M \times K$ จำนวนเฟรมของการแบ่งช่วงเวลาในการรับส่งข้อมูล (Time-division Duplex: TDD) มีค่าเป็น 14

ส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รวมถึงสัญญาณแทรกสอดด้วย (Signal to Interference Plus Noise Ratio :SINR) Γ_{jk}^{FL} มีสมการดังนี้

$$\Gamma_{jk}^{FL} = \frac{|g_{jk}^T W_{jk}|^2}{\sum_{i \neq k} |g_{jk}^T W_{jk}|^2 + \sum_{l \neq j} \sum_{i=1}^K |g_{lk}^T W_{li}|^2 + \frac{\sigma_n^2 MK}{P_{BS}}} \quad (10)$$

ผลการจำลองการทำงานโดยทำการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย SINR (Averaged SINR) สมมติว่ารู้ผลตอบสนองของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ (Perfect Knowledge channel) เปรียบเทียบกับอัลกอริธึมแบบ LS และ WLS พบว่าผลที่ได้รับจากการจำลองการทำงานด้วยวิธี LS และ WLS แสดงในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 โดยพิจารณาจากรูปที่ 4 โดยกำหนดให้มีจำนวนเทอร์มินเตอร์มีค่าคงที่ $K=20$ แล้วหาค่า SINR เฉลี่ยที่จำนวนเสาอากาศที่ใช้งาน มีค่าแตกต่างกัน $M = 50, 100, 150, 200, 250$ โดยพบว่า ค่า SINR ที่ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (WLS) จะมีค่าสูงกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (LS) และพบว่าถ้าจำนวนเสาอากาศ (M) มีมากขึ้นจะทำให้ค่า SINR ที่ได้มีค่ามากขึ้นโดย SINR เป็นอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รวมถึงสัญญาณแทรกสอดด้วย

โดยจากรูปที่ 5 แสดงค่า SINR ที่ได้รับ โดยกำหนดให้มีจำนวนเสาอากาศคงที่ $M = 150$ เปรียบเทียบกับจำนวนเทอร์มินเตอร์ที่มีค่าแตกต่างกัน $K = 16, 24, 32, 40$ พบว่า การประมาณช่องสัญญาณวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (WLS) จะให้ค่า SINR ที่สูงกว่าการประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (LS) สรุปได้ว่า การประมาณช่องสัญญาณวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด



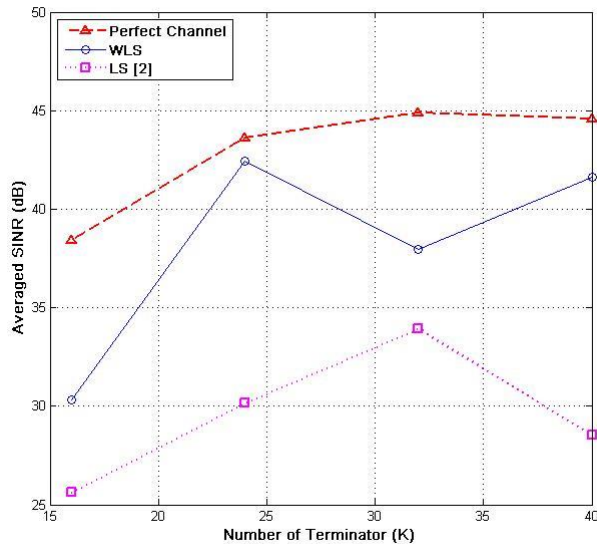
รูปที่ 4 ค่า Averaged SINR ที่ได้รับมาจากการประมาณค่าด้วยวิธีสมมติช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ (Perfect channel) วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (WLS) และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (LS) โดยมีการใช้เสาอากาศ (M) ที่มีจำนวนแตกต่างกัน

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (WLS) และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (LS) ในการประมาณช่องสัญญาณของระบบการส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงย้อนหลังแบบระบบมัลติยูสเซอร์โม จากผลการจำลองการทำงานพบว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักจะให้ค่า SINR สูงกว่าแบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดทั้งในกรณีที่มีการเพิ่มจำนวนเสาอากาศและจำนวนของเทอร์มินเตอร์ในระบบที่มีเพิ่มมากขึ้น

สรุปได้ว่าการประมาณค่าช่องสัญญาณนี้สามารถนำไปพัฒนาด้วยการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารสำหรับผู้ใช้งานหลายคน (Multi-user MIMO) โดยที่มีการใช้เสาอากาศหลายต้นเพื่อรับส่งข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการลดผลกระทบจากช่องสัญญาณหรือสิ่งรบกวนอื่นเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกเพื่อที่จะทำให้สัญญาณที่ได้รับทางด้านฝั่งเครื่องรับมีความแม่นยำมากขึ้นสามารถที่จะรองรับกับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มเข้ามาในระบบและลดผลของการปนเปื้อนของ

สัญญาณ (pilot contamination) ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างช่องสัญญาณได้



รูปที่ 5 ค่า Averaged SINR ที่ได้รับมาจากการประมาณค่าด้วยวิธีสมมติช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ (Perfect channel) วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (WLS) และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (LS) โดยทำการเปรียบเทียบในกรณีที่จำนวนของเทอร์มินเตอร์ (K) แตกต่างกันไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.E. Hossain, M. Hasan, "5G cellular: Key enabling technologies and research challenges", *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 11–21, Jun. 2015.
- [2] Y.S. Cho, J.W. Kim, W.Y. Yang, C. Kang, "MIMO-OFDM Wireless Communications with Matlab", John Wiley & Sons, 2010.
- [3] V. Saxena, "Pilot Contamination and Mitigation Techniques in Massive MIMO Systems", Department of Electrical and Information Technology, LTH, 2014.
- [4] สัมพันธ์ พรหมพิชัย, "หลักการสื่อสารข้อมูลยุคใหม่", มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 296หน้า.
- [5] C. Park, J. Chang, "Time-of-arrival source localization based on weighted least squares estimator in line-of-sight/non-line-of-sight mixture environments", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, no. 12, pp. 1–13, 2016.
- [6] G. Y. Lu, A. Li, L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An overview of massive MIMO: Benefits and challenges", *IEEE Journal Selected Topics Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742–758, Oct. 2014.
- [7] O. Elijah, C. Y. Leow, T. A. Rahman, S. Nunoo, S. Z. Iliya, "A Comprehensive Survey Of Pilot Contamination In Massive MIMO", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, 2016.
- [8] วรุฒิ นิมพัทธ์, สุชาดา สิทธิจงสถาพร และ สัมพันธ์ พรหมพิชัย, "การประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับระบบโมโม", *EECON* 42, 30 ตุลาคม – 1 พฤศจิกายน 2562, หน้า 285–288.
- [9] "Multi-user MIMO", https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-user_MIMO สืบค้นเมื่อ 15 พ.ค. 2564.
- [10] M. Ali, M. MOQBEL, Wangdong, Al-marhabi Z. Ali, "MIMO Channel Estimation Using the LS and MMSE Algorithm", *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, Vol. 12, Jan.-Feb. 2017.
- [11] R. Amiri, F. Behnia, "An Efficient Weighted Least Squares Estimator for Elliptic Localization in Distributed MIMO Radars", *IEEE Signal Processing Letter*, vol. 24, no. 6, pp. 902–906, 2017.
- [12] สัมพันธ์ พรหมพิชัย, "การประมาณช่องสัญญาณของระบบ LTE-TDD Massive MIMO ด้วยสัญญาณนำมีฐานเป็นรหัสตั้งฉาก", *Engineering Transaction*, vol. 23, no.1 (46), ม.ค.-มิ.ย., 2563.
- [13] วรุฒิ นิมพัทธ์, สุชาดา สิทธิจงสถาพร และ สัมพันธ์ พรหมพิชัย, "การประมาณช่องสัญญาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักในการส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงย้อนหลังสำหรับระบบมัลติยูสเซอร์โมโม", *EECON* 42, 30 ตุลาคม – 1 พฤศจิกายน 2562, หน้า 325–328.



สุชาดา สิทธิจงสถาพร จบการศึกษาวិชาการวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันวิศวกรรมมหานคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และรองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีฝ่ายวิจัย โดยหัวข้องานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การประมวลผลขั้นสูง (Advanced signal processing) การประมวลผลเชิงสถิติ (Statistical signal processing) การประมวลผลเชิงภาพและวิดีโอ (Image and video processing) ระบบ

สมองกลฝังตัว (Embedded system) และอัลกอริธึมแบบปรับตัวได้ (Adaptive algorithm)



ดร. สัมพันธ์ พรหมพิชัย ได้รับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2549 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ การ

ประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่และการสื่อสารผ่านระบบดาวเทียม