

การหาประสิทธิภาพตัวตรวจจับแบบความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดที่มีความซับซ้อนต่ำโดยวิธีการปรับปรุง สมการของเกาส์-ไซเดลสำหรับระบบสื่อสารแบบระบบโมโนแบบหลายสายอากาศจำนวนมาก

Performance Enhancement of a Low-Complexity MMSE Detector Based on Refinement Gauss-seidel method for massive MIMO system

นิรุตม์ กุลสุวรรณ^{1*} จิรโรจน์ สามารถโชติพันธุ์¹ และ สุภาพร ชุ่มช่วย²

¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

nirut.gu@rmuti.ac.th* และ jirarot.sa@rmuti.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

supaporn.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการหาประสิทธิภาพตัวตรวจจับแบบความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (Minimum Mean Square Error detector : MMSE) โดยการปรับปรุงสมการของเกาส์-ไซเดล (Refinement Gauss-Seidel method : RGS) แม้ว่าตัวตรวจจับ MMSE ดั้งเดิมมีจุดเด่นในเรื่องความซับซ้อนต่ำ แต่พบความซับซ้อนของการสร้างเมทริกซ์ผกผัน ในงานวิจัยนี้ได้นำเกาส์-ไซเดลดั้งเดิม (conventional Gauss-Seidel method : GS) ที่มีจุดเด่นในเรื่องรอบในการคำนวณน้อยมาปรับปรุงสมการ การทดสอบประสิทธิภาพโดยการเปรียบอัตราผิดพลาด (Bit Error Rate : BER) ระบบที่พัฒนากับระบบ MMSE ระบบ GS ผลการทดสอบประสิทธิภาพ พบว่า ตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงระบบ MMSE และดีกว่าแบบ GS นอกจากนี้จำนวนการวนรอบของระบบพัฒนามีค่าน้อยกว่าระบบ GS

คำสำคัญ: ตัวตรวจจับแบบความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด วิธีการเติมสมการของเกาส์-ไซเดล วิธีการแบบเกาส์-ไซเดลดั้งเดิม

Abstract

This article presents the performance enhancement of the Minimum Mean Square Error (MMSE) detector based on a refinement of the Gauss-Seidel method (Refinement Gauss-Seidel method: RGS). Although the conventional MMSE detector is known for its low complexity, it suffers from the high computational cost of matrix inversion. To address this, the conventional Gauss-Seidel (GS) method, which is characterized by a low number of computational iterations, is utilized in the refinement process. Performance evaluation is conducted by comparing the Bit Error Rate (BER) between the proposed detector, the conventional MMSE detector, and the GS-based detector. The test results show that the proposed detector achieves performance close to that of the MMSE detector and

outperforms the GS-based detector. Additionally, the proposed method requires fewer iteration than the GS method.

Keywords: Minimum Mean Square Error detector , the Refinement Gauss-Seidel method , conventional Gauss-Seidel method

1. บทนำ

ระบบสื่อสารแบบโมโนที่สายอากาศจำนวนมาก ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ 5G เพราะระบบดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์สูง [1] ระบบนี้เป็นระบบที่มีการใช้สายอากาศที่สถานีส่ง (base station :BS) จำนวนมาก เพื่อการรองรับผู้ใช้งานที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น ตัวตรวจจับสัญญาณ ณ สถานีรับ (base user : BU) จะไม่ใช้วิธีการตรวจจับสัญญาณที่เหมาะสม (Maximum likelihood : ML) แม้ว่าวิธีนี้จะให้ประสิทธิภาพการประมาณค่าสัญญาณที่ดีที่สุดแต่นำวิธีการตรวจจับสัญญาณ ML ใช้กับระบบโมโนแบบหลายเสาอากาศจำนวนมากทำให้เกิดความซับซ้อนสูง

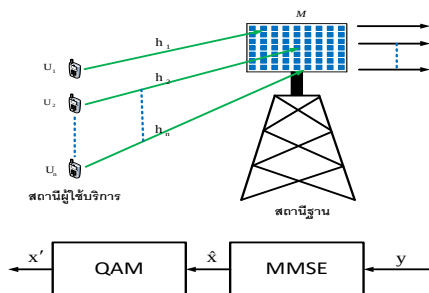
ปัจจุบันวิธีการตรวจจับสัญญาณที่เหมาะสมกับระบบสื่อสารแบบโมโนที่สายอากาศจำนวนมาก มี 2 วิธี ได้แก่ แบบการบังคับเป็นศูนย์ (Zero Forcing : ZF) และวิธีการตรวจจับสัญญาณแบบความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (Minimum Mean Square Error : MMSE) ทั้งสองวิธีเป็นวิธีตรวจวัดสัญญาณแบบเชิงเส้น เมื่อนำมาใช้ในระบบระบบสื่อสารแบบโมโนที่สายอากาศจำนวนมาก ทำให้ระบบมีความซับซ้อนต่ำกว่าวิธี ML อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจจับสัญญาณแบบ MMSE ดั้งเดิมยังคงมีความซับซ้อนสูงที่เกิดจากเมทริกซ์ผกผันเมื่อใช้ในทางปฏิบัติ ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนนักวิจัยจึงได้ประยุกต์การตรวจจับสัญญาณแบบ MMSE ดั้งเดิมด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลข เช่น วิธีอนุกรมนอยมันน์ (Neumann series :NS)[2] ทำให้ระบบสื่อสารแบบโมโนมีความซับซ้อนต่ำมาก แต่ประสิทธิภาพแย่มาก ถ้าระบบมีการใช้สายอากาศจำนวนมากขึ้น วิธีการริชาร์ดสัน (Richardson Method : RS) [3] และวิธีคอนจูเกต-เกรเดียนต์

(Conjugate Gradient Method : CG) [4] เป็นวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขที่ทำให้ประสิทธิภาพใกล้เคียง MMSE แบบดั้งเดิมแต่ต้องการใช้ในการเร่งการลู่เข้าของลำดับการประมาณค่าจำนวนการวนค่าเยอะมาก ซึ่งวิธี RS มีความซับซ้อนต่ำกว่า วิธี CG [5] นอกจากนี้ เพื่อการลดจำนวนลำดับการประมาณค่า เพื่อให้ประสิทธิภาพใกล้เคียง MMSE แบบดั้งเดิม นั้นนักวิจัยได้ใช้วิธีจาโคบี (Jacobi method: JB) และวิธี เกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel method : GS) ซึ่งวิธี JB มีลำดับการประมาณค่ามากกว่าวิธี GS [5]-[6]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการประยุกต์วิธีการปรับปรุงสมการลงในวิธีการแบบเกาส์-ไซเดลดั้งเดิม (conventional Gauss-Seidel method : GS) เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อน และลดตัวเลขในการวนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงตัวตรวจจับแบบ MMSE ดั้งเดิม

2. ระบบเชื่อมโยงขาขึ้น

เริ่มต้นการพิจารณาเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบสื่อสารแบบโมโนที่มีสายอากาศจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีสายอากาศจำนวน M สายอากาศ ณ สถานีฐาน (Base Station : BS) และมีผู้ใช้บริการ (User Station : US) จำนวน U ผู้ใช้งาน ซึ่งหนึ่งผู้ใช้งานมีจำนวนสายอากาศเพียงหนึ่งสายอากาศเท่านั้น



รูปที่ 1 แสดงการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบสื่อสารแบบโมโนที่มีสายอากาศจำนวนมาก

การส่งข้อมูลจากผู้ให้บริการเป็นการกล่าสัญญาณแบบแบบควอดราเจอร์ (Quadrature Amplitude Modulation : QAM) โดยเขียนเวกเตอร์ที่ถูกส่งจากผู้ให้บริการทุกคน คือ $x=[x_1, x_2, \dots, x_u]^T$ การส่งดังกล่าวได้ส่งภายใต้ช่องทางการสื่อสารของระบบสื่อสารแบบโมโนที่มีสายอากาศจำนวนมาก ทำให้สัญญาณที่รับได้ ณ สถานีฐาน มีสมการเวกเตอร์การรับ คือ $y=[y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ เราจึงสามารถเขียนรูปแบบสมการ ณ สถานีฐาน ได้ดังนี้

$$y=Hx+n \quad (1)$$

เมื่อ n คือสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนสีขาว (Additive White Gaussian Noise : AWGN) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองด้าน (two-side power

spectral density) มักเขียนสัญลักษณ์เป็น $CN(0, N_0)$ สัญญาณรบกวนนี้แสดงค่าเวกเตอร์ เป็น $n=[n_1, n_2, \dots, n_M]^T$ H คือเมตริกซ์ของช่องทางการสื่อสารที่จำหายเรย์เลย์แบบเรียบ (flat Rayleigh fading)

2.1 ตัวตรวจจับแบบความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด

(minimum mean square error detector : MMSE)

ตามรูปที่ 1 ภาควิชาตรวจจับ ทำหน้าที่กู้สัญญาณที่ถูกส่ง ทำให้ได้สัญญาณที่รับ ($\hat{x}$) ภาควิชาเป็นการตรวจจับแบบ MMSE ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงวิธีการตรวจจับแบบ ML ดังนั้นค่าประมาณสัญญาณที่ถูกกลับคืนมา (x') นั้น เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\hat{x}=(H^H H+\sigma^2 I_U)^{-1} H^H y=A^{-1} b \quad (2)$$

โดยที่ $b=H^H y$ คือ เป็นสมการการตรวจจับแบบแมตช์ฟิลเตอร์ (matched-filter) และ A คือเมตริกซ์แบบถ่วงน้ำหนักของ MMSE จากสมการที่ 2 เราสังเกตว่าเมตริกซ์นี้เป็นเมตริกซ์ผกผันแบบอย่างละเอียด ซึ่งถ้าคำนวณความซับซ้อนของระบบนี้ ทำให้มีความซับซ้อนสูงสำหรับระบบสื่อสารแบบโมโนที่มีสายอากาศจำนวนมาก ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว เราสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของระบบสมการเชิงเส้นแบบการประมาณค่าด้วยการวนค่าหาคำตอบ หลักการนี้สามารถเขียนสมการได้ คือ [2]

$$Ax=b \quad (3)$$

2.2 วิธีการแบบเกาส์-ไซเดลดั้งเดิม

(Conventional

Gauss-Seidel :GS)

วิธีนี้ได้มีการพิจารณาการแยกองค์ประกอบเมตริกซ์ออกเป็น

$$A=D-L-L^H \quad (4)$$

โดยที่ D คือ เมตริกซ์เส้นทแยงมุม L คือ เมตริกซ์แบบสามเหลี่ยมล่าง และ $-L^H$ คือ เมตริกซ์แบบสามเหลี่ยมบน ดังนั้นสมการของวิธีนี้คือ

$$\hat{x}_{k+1}=(D-L)^{-1} L^H \hat{x}_k+(D-L)^{-1} b, k=1,2, \dots, \infty \quad (5)$$

โดยที่ $\hat{x}_k$ คือเวกเตอร์ค่าประมาณสัญญาณที่รับได้ ณ การวนค่าลำดับที่ k

2.3 วิธีการเติมค่าของเกาส์-ไซเดล (A refinement gauss seidel method : RGS)

เราพิจารณา สมการ (3) โดยการใส่ค่าตัวแปรในสมการ (4) ลงไป จึงสามารถวิเคราะห์หาสมการได้ดังนี้ [7]

$$\begin{aligned}
 (D-L-L^H)X &= b \\
 (D-L)X &= L^H X + b \\
 (D-L)X &= (D-L-A)X + b \\
 (D-L)X &= (D-L)X - AX + b \\
 (D-L)X &= (D-L)X + b - AX \\
 X &= X + (D-L)^{-1}(b - AX)
 \end{aligned} \quad (6)$$

ดังนั้น เราจะได้นิยามของวิธีการเติมค่าของเกาส์-ไซเดล ใหม่คือ

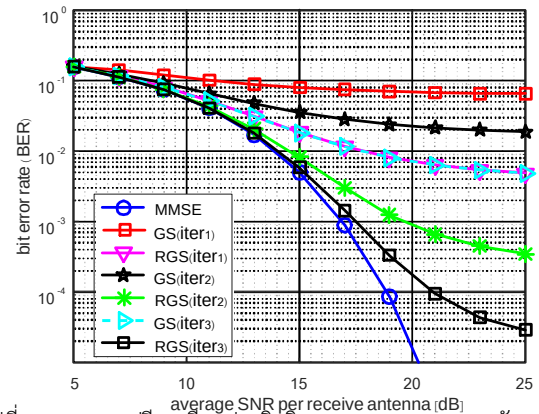
$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + (D-L)^{-1}(b - A\hat{x}_k) \quad (7)$$

เมื่อ $\hat{x}_k$ เป็นการเติมค่าลงในสมการที่ (5) ดังนั้นทำให้เราได้สมการที่ (7) ใหม่ คือ

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_{k+1} &= \left[(D-L)^{-1}L^H \hat{x}_k + (D-L)^{-1}b \right] + \dots \\
 (D-L)^{-1}(b - \left[(D-L)^{-1}L^H \right] \left[(D-L)^{-1}L^H \hat{x}_k + (D-L)^{-1}b \right]) \\
 \hat{x}_{k+1} &= \left[(D-L)^{-1}L^H \right]^2 \hat{x}_k + \left[I_U + (D-L)^{-1}L^H \right] (D-L)^{-1}b \quad (8)
 \end{aligned}$$

3. ผลการวิเคราะห์

ในบทนี้ เราได้ทำการจำลองผลประสิทธิภาพ BER ภายใต้ค่า SNR ต่างๆ ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจจับแบบ MMSE แบบดั้งเดิม และตัวตรวจจับแบบ MMSE โดยวิธีการ GS แบบดั้งเดิม และวิธีการ RGS ในระบบสื่อสารแบบโมโนที่สายอากาศจำนวนมาก วิธีการทั้งหมด ได้ถูกจำลองระบบด้วยการกล้ำสัญญาณแบบ 16 QAM ที่ใช้สายอากาศ ณ สถานีฐานจำนวน 32 สายอากาศ และใช้สายอากาศ ณ สถานีผู้ใช้งานจำนวน 16 สายอากาศ และค่าอัตราส่วนจำนวนสถานีผู้ใช้งานต่อจำนวนสายอากาศสถานีฐานเท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการจำลอง เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบ เนื่องจากการจำลองวิธีการ GS แบบดั้งเดิม ที่มีค่าอัตราส่วนน้อยกว่า 1 ทำให้ประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลต่ำ ที่การวนค่ารอบแรกและสองตามที่ได้อธิบายไว้ในงานวิจัยของ M. A. Albreem และคณะ[5] นอกจากนี้ได้กำหนดค่าเริ่มต้นการวนค่า เท่ากับ ศูนย์



รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ BER ของการตรวจจับสัญญาณแบบ GS และ RGS ในระบบสื่อสารแบบโมโนที่มีสายอากาศจำนวนมากที่ขนาด 32X16 ด้วยการกล้ำสัญญาณแบบ 16 QAM

จากรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาที่ค่า SNR เท่ากับ 15 dB พบว่าวิธี RGS ที่เสนอในการวนรอบครั้งที่ 2 (iter2) ให้ค่า BER ประมาณ 10^{-2} ในขณะที่วิธี GS แบบดั้งเดิมให้ค่า BER ประมาณ 6×10^{-1} ซึ่งหมายความว่าวิธี RGS สามารถลดอัตราผิดพลาดลงได้ถึง 98.33% เมื่อเทียบกับวิธี GS แบบดั้งเดิมที่จำนวนการวนรอบเท่ากัน และประสิทธิภาพ BER ที่ 10^{-2} วิธี GS แบบดั้งเดิม (iter2) ต้องใช้ SNR ประมาณ 19 dB ในขณะที่วิธี RGS (iter2) ต้องการ SNR เพียง 14 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมี SNR gain หรือประหยัดพลังงานในการส่งได้ดีกว่าประมาณ 5 dB

4. สรุป

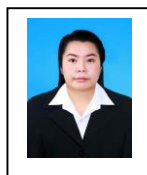
บทความวิจัย เราได้นำเสนอการศึกษา ตัวตรวจจับแบบความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดที่มีความซับซ้อนต่ำโดยอาศัยวิธีการแบบ RGS ในระบบสื่อสารแบบโมโนที่สายอากาศจำนวนมาก โดยได้มีการเปรียบเทียบกับวิธีการแบบ GS และตัวตรวจจับแบบ MMSE ดั้งเดิม พบว่าแบบ RGS ดีกว่าแบบ GS และลดจำนวนการวนรอบของระบบได้ ที่ทำให้ได้ค่าใกล้เคียงตัวตรวจจับแบบ MMSE ดั้งเดิม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนการนำเสนอบทความวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณทีมงานห้องปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และการศึกษา ในวิทยาเขตขอนแก่น (Innovation of Electrical Electronic and Education in Khon Kean campus research laboratory : IEEEKK lab.) ทุกท่านที่ส่งเสริมและให้กำลังใจในการทำงานอย่างดีเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Al-Falahy and, and O. Y. Alani, "Technologies for 5G Networks : Challenges and Opportunities," IT Professional, vol. 19, no. 1, pp. 12–20, 2017.
- [2] B. Yin, M. Wu, C. Studer, J. R. Cavallaro, and C. Dick, "Large-scale MIMO detection for 3GPP LTE: Algorithms and FPGA implementations," IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 18, No. 5, pp. 916-929, Mar. 2014.
- [3] X. Gao, L. Dai, Y. Ma, and Z. wang, "Low-complexity near-optimal signal detection for uplink large-scale MIMO systems," Electronics Letters, vol. 18, pp. 1326-1328, August 2014.
- [4] Y. Hu, Z. Wang, X. Gao, and J. Ning, "Low-complexity signal detection using CG method for uplink large-scale MIMO systems," in Proc. IEEE Int. Conf. Communication system, pp. 477-481, Nov. 2014.
- [5] M. A. Albreem, W. A. Salah, A. Kumar, M. H. Alsharif , A. H. Rambe, M. Jusoh, and A. N. Uwaechia, "Low Complexity Linear Detectors for Massive MIMO: A Comparative Study," in IEEE Access, vol. 9, pp. 45740-45753, 2021.
- [6] L. Dai, X. Gao, X. Su, S. Han, C. -L. I and Z. Wang, "Low-Complexity Soft-Output Signal Detection Based on Gauss-Seidel Method for Uplink Multiuser Large-Scale MIMO Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 10, pp. 4839-4845, Oct. 2015.
- [7] V. B. Kumar Vatti, and T. K. Eneyew, "A refinement of Gauss-Seidel method for solving of linear system of equation," Int. J. Contemp. Math. Sciences, vol. 6, pp. 117-121, 2011.



สุภาพร ชุ่มช่วย อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์
และอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขต
ชุมพร สนใจงานวิจัยด้านการประมวลสัญญาณ
ดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสารและการประมวลสัญญาณ
ภาพ



นิรุตม์ กุลสุวรรณ อาจารย์สาขาวิชาครุศาสตร์
อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุ
ศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชม
งคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น สนใจงานวิจัยด้าน
การประมวลสัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสาร



จิรโรจน์ สามารถโชติพันธุ์ อาจารย์สาขาวิชาครุ
ศาสตร์อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น สนใจงานวิจัย
ด้านการประมวลสัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสาร