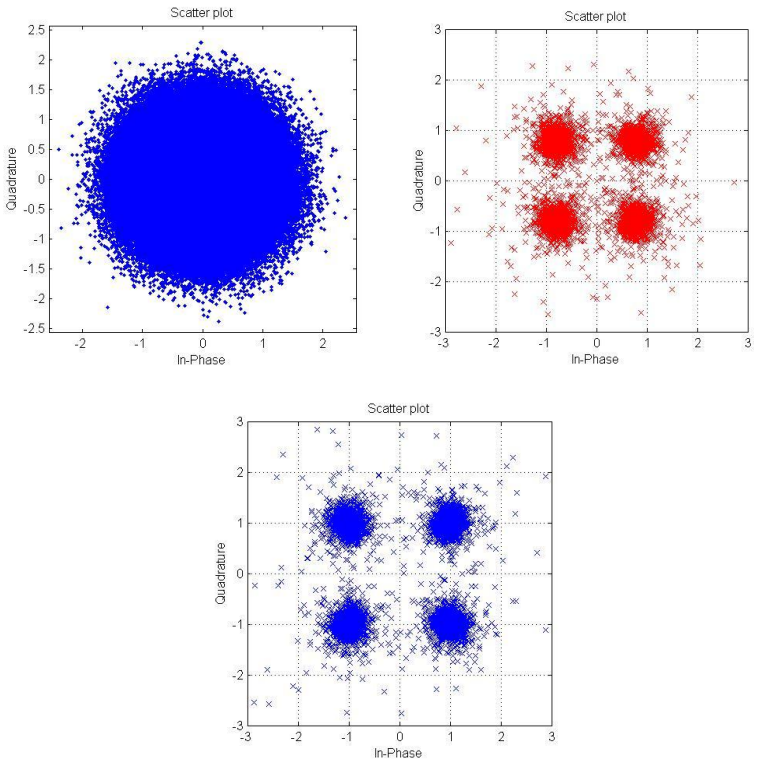
# บทที่ 4

# ผลการศึกษา

## 4.1 ผลการศึกษาแบบจำลองเปรียบเทียบ ZF, ZF-LIF

เพื่อทดสองและวัดประสิทธิภาพของรูปแบบ Low Information Feedback (LIF) และ ZF Equalization ที่ได้มานำเสนอในงานวิจัยนี้ กำหนดให้รูปแบบการสื่อสาร OFDM ภายใต้ช่องสัญญาณเป็นแบบ Multipath Rayleigh Fading Channel ระบบสายอากาศ SISO การ Modulation แบบ QPSK, cyclic prefix 1/8 และ FFT 64 ตามมาตรฐาน IEEE802.11a ผลการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์ในมุมมองของ Constellation Diagram เปรียบเทียบ Symbol ที่ภาครับ เมื่อผ่านช่องสัญญาณแล้ว โดยจำแนกเป็น Low Information Feedback และ ZF equalization เพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 4.1

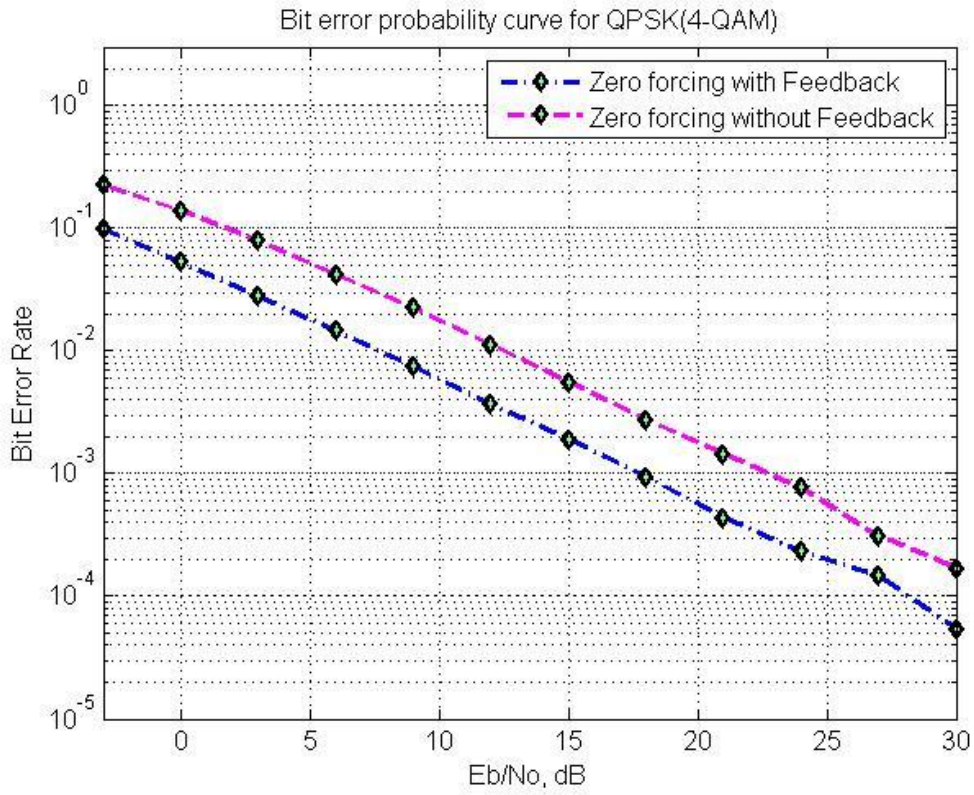
จากการทดลองตามสภาพแวดล้อมที่กำหนดขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบด้วยการส่งข้อมูลจำนวน 64,000 บิต โดยเป็นอิตระทางสถิติและนำผลทั้งหมดมาเฉลี่ยกัน ซึ่งในการทดลองในสภาพแวดล้อมนี้ ใช้พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณแบบพหุวิถี และมีพลังงานในการส่งแต่ละสัญลักษณ์ที่เท่ากัน ค่าพลังงานจากงานวิจัยที่ได้กล่าวข้างต้น ซึ่งยกมาใช้ในการคำนวณเพื่อปรับแก้สัญลักษณ์ ผลที่ได้ดังต่อไปนี้




**รูปที่ 4.1** เปรียบเทียบลักษณะของ constellation กับการใช้งานแต่ละรูปแบบ

ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นที่จะต้องใช้ equalization เพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณที่ภาครับ หากไม่ใช้ equalization ทำให้ภาครับทำงานหนักเนื่องจากต้องตรวจจับ symbol จากรูปสัญญาณจะปนกันเป็นกลุ่มเดียว ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับสัญลักษณ์ข้อมูล ส่งผลให้อัตราความผิดพลาดระดับบิตหรือ bit error rate (BER) สูง

เมื่อวิเคราะห์ในมุมมองของ constellation สามารถมองเห็นกลุ่มของสัญลักษณ์ข้อมูล แสดงให้เห็นว่าที่ภาครับสามารถตรวจจับได้ง่ายกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพของรูปแบบ Low Information Feedback เนื่องจากสามารถแยกแยะแต่ละ symbol ออกจากกันได้อย่างชัดเจนดีกว่า equalization เพียงอย่างเดียวและก็ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า อีกด้วย



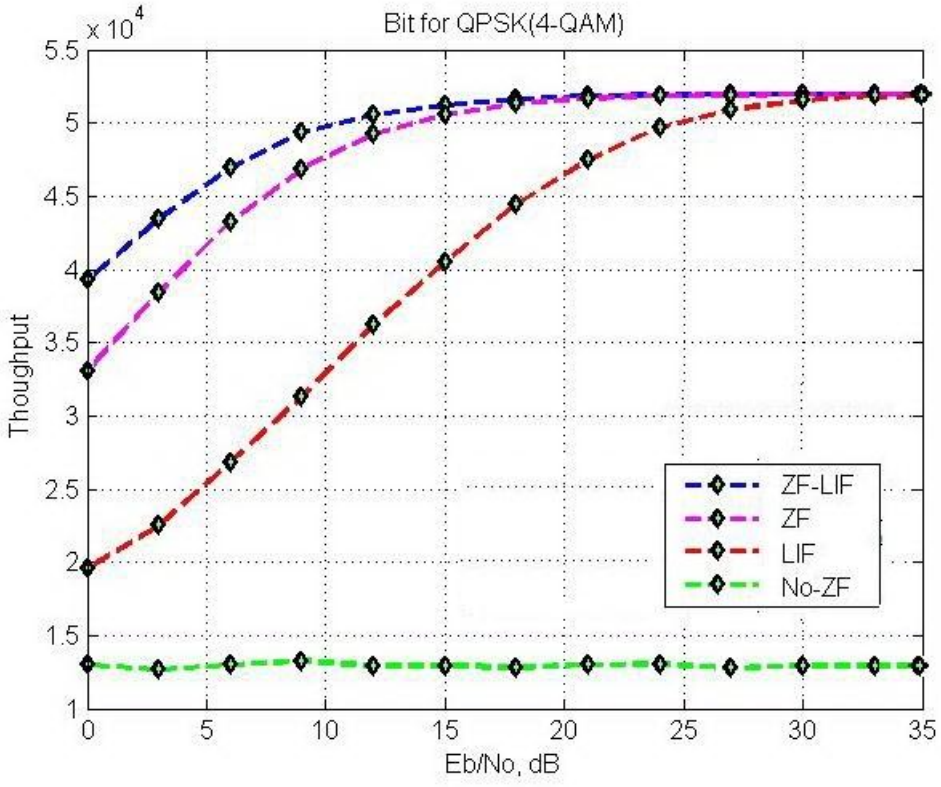

**รูปที่ 4.2** เปรียบเทียบประสิทธิภาพ BER ของการใช้งานแต่ละรูปแบบ

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบของประสิทธิภาพ หรือ BER จากรูปที่ 4.2 จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนว่าเมื่อไม่มีการใช้งาน Low Information Feedback จะความผิดพลาดหรือ BER สูงกว่าแบบที่มีการป้อนกลับ งานวิจัยนี้พิจารณาใช้รูปแบบของ Zero Forcing เป็นพารามิเตอร์เริ่มต้นของการเปรียบเทียบตามเงื่อนไขอื่นต่อไป

ผลการจำลองพิสูจน์ให้เห็นอีกว่า การใช้เทคนิค Zero Forcing equalization ให้ประสิทธิภาพที่ดี เมื่อนำการใช้เทคนิค Low Information Feedback เข้ามาช่วยในการทำงานของระบบจำลอง ทำให้ผลของการทดลองดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากการจำลองพบว่ารูปแบบการผสมผสานทั้งเทคนิค Low Information Feedback เข้าและเทคนิค Zero Forcing equalization เข้าด้วยกันให้ประสิทธิภาพที่ดีเมื่อพิจารณาที่ BER $10^{-3}$ รูปแบบ Low Information Feedback ใช้ Eb/No ประมาณ 15 dB เท่านั้น ในขณะที่การใช้งาน equalization เพียงอย่างเดียวต้องใช้ Eb/No ถึง 20 dB แต่ต่างกัน 5 dB จากความสัมพันธ์ dB = 10 log W จะได้ความหมายของเรื่องนี้โดยสรุปคือ

รูปแบบการใช้งานเทคนิค equalization เพียงอย่างเดียวมีความต้องใช้พลังงานในการส่งมากกว่ารูปแบบ Low Information Feedback ที่นำเสนอหลายเท่า

เมื่อต้องเผชิญกับสัญญาณรบกวน รูปแบบ Low Information Feedback ที่นำเสนอแสดงออกให้เห็นถึงความทนทานต่อสัญญาณที่มีการจางหายแบบแบบพหุวิธี หรือ Multipath Fading เมื่อพิจารณาที่ Eb/No เท่ากับ 20 dB ในรูปแบบ Low Information Feedback 1000 บิตข้อมูลที่นำเสนอ มีโอกาสผิดพลาดแค่ 1 บิตเท่านั้น และเมื่อพิจารณาตลอดเส้นกราฟ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาในทิศทางเดียวกันตลอดแม้ว่า Eb/No น้อยลงก็ตาม จึงวิเคราะห์ได้ว่าการนำ Low Information Feedback มาใช้งานร่วมกับ Zero Forcing equalization ในปลายทางแล้วจึงได้ค่าเฉลี่ยผลลัพธ์นั่นเอง ในมุมมอง throughput จะเห็นภาพได้อย่างชัดเจนว่ารูปแบบ Low Information Feedback ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบ Zero Forcing equalization

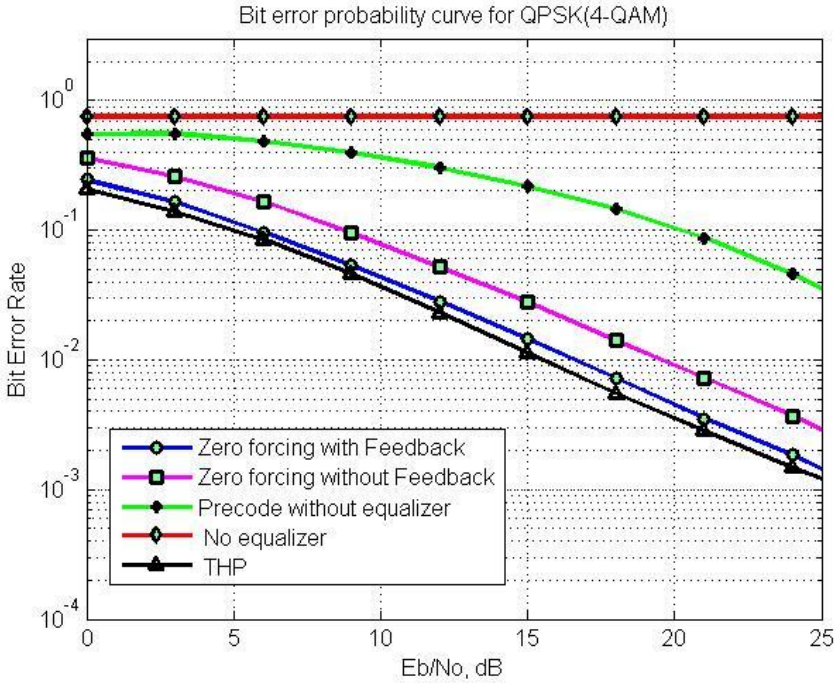



**รูปที่ 4.3** เปรียบเทียบประสิทธิภาพในมุมมอง Throughput ของการใช้งานแต่ละรูปแบบ

เพียงอย่างเดียวโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระดับความแรงสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน Eb/No ยิ่งน้อยยิ่งมองเห็นข้อแตกต่างได้ชัดเจน ดังรูปที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในมุมมอง Throughput ของการใช้งานแต่ละรูปแบบ ใน 1 หน่วยเวลา

**4.2 ผลการศึกษาแบบจำลองเทียบกับ ZF, ZF-Feedback, Information Feedback และ THP**

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองแต่ละรูปแบบภายใต้การประมาณช่องสัญญาณไม่เป็นอุดมคติ เปรียบเทียบประสิทธิภาพ BER จากรูปที่ 4.5 จะเห็นความแตกต่างว่า เมื่อไม่มีการใช้งาน Low Information Feedback จะความผิดพลาด BER สูงกว่าแบบที่มีการป้อนกลับเป็นอย่างมากซึ่งค่าที่ได้นั้นต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อเทียบกับ Low Information Feedback เพียงอย่างเดียวนั้นยังไม่สามารถให้ BER ที่ดีได้เพียงพอ งานวิจัยนี้ใช้รูปแบบของ Zero Forcing equalizer เป็นตัวปรับแต่งสัญญาณซึ่งค่าที่ใช้เริ่มต้นของการเปรียบเทียบดังที่จะแสดงต่อไป




**รูปที่ 4.4** เปรียบเทียบประสิทธิภาพ BER แต่ละรูปแบบภายใต้การประมาณช่องสัญญาณไม่เป็นอุดมคติ

ผลการจำลองพิสูจน์ให้เห็นอีกว่า การใช้เทคนิค Zero Forcing equalization ให้ประสิทธิภาพที่ดี รูปแบบภายใต้การประมาณช่องสัญญาณไม่เป็นอุดมคติ เมื่อนำการใช้เทคนิค Low Information Feedback เข้ามาช่วยในการทำงานของระบบจำลอง ทำให้ผลของการทดลองดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากการจำลองพบว่ารูปแบบการรวม Low Information Feedback เข้ากับอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณแบบ Zero Forcing equalizer เข้าด้วยกันให้ประสิทธิภาพที่ดี เมื่อพิจารณาที่ BER 10-3 รูปแบบ Low Information Feedback ใช้ Eb/No ประมาณ 15 dB เท่านั้น ในขณะที่การใช้งาน equalization เพียงอย่างเดียวต้องใช้ Eb/No ถึง 18 dB โดยประมาณซึ่งต่างกัน 3 dB จากความสัมพันธ์ dB = 10 log W เมื่อนำการเข้ารหัสแบบ Tomlinson – Harashima precoding มาใช้งานเข้ากับระบบเมื่อพิจารณาที่ BER 10-3 จะดีกว่าแบบอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณแบบ Zero Forcing equalizer เพียงอย่างเดียวถึง 5 dB แต่ดีกว่าแบบ Low Information Feedback เพียงนิดเดียว ซึ่งสามารถสรุปได้คือ รูปแบบการใช้งาน Equalizer เพียงอย่างเดียวมีความต้องใช้พลังงานมากกว่ารูปแบบ Low Information Feedback ที่นำเสนอหลายเท่า และเมื่อเทียบกับกระบวนการทำงานแบบ Tomlinson – Harashima precoding ที่มีกระบวนการการทำงานที่ซับซ้อนมากกว่าถึงแม้ผลที่ได้ Tomlinson – Harashima precoding จะดีกว่าแต่ดีกว่าเพียงเล็กน้อยสังเกตุจาก Eb/No เท่ากับ 20 dB

### 4.3 ผลการศึกษาแบบจำลองเปรียบเทียบการทำงานและความซับซ้อน

จากการคำนวณกระบวนการทำงานแบบ Tomlinson – Harashima precoding และรูปแบบ Low Information Feedback ที่มี Equalizer เพียงอย่างเดียว โดยพิจารณาจากสมการที่ (2.54), (2.55), (2.61) และ (2.61) ตามลำดับและรูปที่ (2.30), (2.31 ) และ(3.2) ใช้ตารางที่ 2.4 ในการอ้างอิงดังนี้

**ตารางที่ 4.1** ผลการเปรียบเทียบ Complexity

| ลำดับ | หัวข้อ | ผลการเปรียบเทียบ Complexity | |
|---|---|---|---|
| | | **THP** | **LIF** |
| 1. | ระบบและส่วนประกอบต่างๆ | ใช้อุปกรณ์มาก | ใช้อุปกรณ์น้อย |
| 2. | ขั้นตอนในการคำนวณ | ซับซ้อน | ไม่ซับซ้อน |
| 3. | อัตราข้อมูลที่ได้ | ดีกว่า | ด้อยกว่า |

จากผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนที่ภาครับแล้ว พบว่า LIF มีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบ Tomlinson – Harashima precoding ทั้งรูปแบบในการคำนวณและขนาดของวงจรนำมาประกอบเข้ามาในแบบจำลอง แต่ BER ของแบบ Tomlinson – Harashima precoding จะดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Eb/No เท่ากับ 20 dB แบบ Tomlinson – Harashima precoding ให้ผลลัพท์ที่ดีกว่าเพียงนิดเดียวซึ่งความซับซ้อนมากกว่ารูปแบบ Low Information Feedback ที่จะต้องใช้เพื่อแลกมาด้วยประสิทธิภาพดี