# บทที่ 4

# ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบ และวิจารณ์สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ขาลง ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยใช้สัญลักษณ์นำช่วยประมาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม พร้อมทั้งการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วที่ได้นำเสนอ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ โดยเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ ในหัวข้อที่หนึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ และสมมุติฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ หัวข้อที่สองจะกล่าวถึงสมรรถนะของระบบ MC-CDMA ขาลง ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยใช้สัญลักษณ์นำช่วยประมาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ และในหัวข้อที่สามจะกล่าวถึงค่าสมรรถนะของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมที่ได้รับการปรับปรุง ที่ได้นำเสนอภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ

## 4.1 วิธีการจำลองระบบ

### 4.1.1 รหัสแผ่ที่ใช้

รหัสแผ่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้รหัสแผ่แบบออโทกอนัล (Orthogonal) ชนิดวอล์ซ-ฮาดามาร์ด (Walsh-Hadamard) ขนาด 16×16 ดังแสดงใน (4.1)

$$H_4 = \begin{bmatrix}
1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\
1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\
1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\
1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\
1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\
1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\
1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\
1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\
1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\
1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\
1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\
1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\
1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\
1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1
\end{bmatrix} \quad (4.1)$$

รหัสแผ่ชนิดวอล์ช-ฮาดามาร์ดนี้ เป็นประเภทหนึ่งของรหัสแผ่แบบออโทกอนัล (Orthogonal) ซึ่งรหัสประเภทนี้จะเป็นรหัสที่ตั้งฉากสมบูรณ์ กล่าวคือมีค่าอัตสหสัมพันธ์เป็นหนึ่ง และค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างกันและกันเป็นศูนย์ โดยรหัสแผ่ชนิดวอล์ช-ฮาดามาร์ดขนาด $16\times16$ นี้นั้น จะสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้ได้จำนวน 16 ราย โดยยังสามารถรักษาความตั้งฉากกันระหว่างรหัสแผ่ของแต่ละผู้ใช้ได้ เนื่องจากข้อดีดังกล่าวรวมถึงการที่รหัสแผ่แบบวอล์ช-ฮาดามาร์ดนี้มีความยาวเป็น $2^n$ จึงสามารถนำกระบวนการแปลงฟูริเยร์อย่างเร็วเข้ามาประยุกต์ใช้ได้ ทำให้เป็นรหัสที่ถูกพิจารณาให้ใช้สำหรับระบบ MC-CDMA

### 4.1.2 สัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ

สัญญาณรบกวน (Noise) ที่ใช้ในการจำลองระบบนี้จะใช้สัญญาณรบกวน แบบ additive white Gaussian noise (AWGN) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของขนาดของสัญญาณเป็นศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนที่เปลี่ยนตามกำลังของสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการจำลองระบบซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับค่า Signal to Noise Ratio (SNR) ที่กำหนดนั่นเอง ซึ่งความยาวของสัญญาณรบกวนจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับความยาวของรหัสแผ่ที่เลือกใช้ นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่ใช้นี้นั้นจะเป็นค่าเชิงซ้อนมีทั้งองค์ประกอบทั้งในส่วนจริง และส่วนจินตภาพ

### 4.1.3 เฟดดิงจากช่องสัญญาณ

เฟดดิงจากช่องสัญญาณนี้เป็นผลมาจากการเดินทางแบบพหุวิถีของสัญญาณจากทางภาคส่งไปยังภาครับ ทำให้สัญญาณที่ทางภาครับได้รับเกิดจากการรวมตัวแบบซ้อนทับกันของสัญญาณในวิถีต่าง ๆ ซึ่งเฟดดิงจากช่องสัญญาณนี้จะทำให้เกิดการลดทอนทั้งเชิงขนาด และเชิงเฟสของคลื่นสัญญาณในแต่ละวิถี โดยที่ขนาดการลดทอนเชิงขนาดของสัญญาณในแต่ละวิถีที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh) ยกเว้นการลดทอนของสัญญาณในวิถีตรงซึ่งจะมีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบไรเชียน (Rician) ส่วนค่าการลดทอนในเชิงเฟสของช่องสัญญาณในแต่ละวิถีนั้นจะมีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) ซึ่งจะพบว่าเมื่อพิจารณาในเชิงความถี่แล้ว ค่าเฟดดิงของช่องสัญญาณในแต่ละคลื่นพาห์ย่อยจะมีลักษณะเป็นการเกิดเฟดดิงแบบเลือกความถี่ โดยค่าเฟดดิงของแต่ละคลื่นพาห์ย่อยนั้นจะมีสหสัมพันธ์ระหว่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการเลือกความถี่ของช่องสัญญาณและสภาวะแวดล้อม

### 4.1.4 ความถี่ดอปเพลอร์

ความถี่ดอปเพลอร์เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นความถี่ดอปเพลอร์จึงเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งต้องคำนึงถึงสำหรับการจำลองระบบ โดยความถี่ดอปเพลอร์นั้นมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของผู้ใช้โทรศัพท์ไร้สายซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเลื่อนทางความถี่ของสัญญาณขึ้น และการเลื่อนทางความถี่ของสัญญาณนี้เองเป็นอีกสาเหตุหนึ่งซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์ย่อยขึ้นในระบบ นอกจากนี้ค่าค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดยังเป็นตัวกำหนดค่าสหสัมพันธ์ทางเวลาของเฟดดิงที่เกิดขึ้นด้วย โดยเมื่อค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่าสหสัมพันธ์ทางเวลาของเฟดดิงมีค่าลดลงทำให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเร็วมากยิ่งขึ้นซึ่งจะส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณสูงมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประมาณช่องสัญญาณซึ่งมีการจัดวางสัญลักษณ์นำร่องในทางเวลา อนึ่งผลกระทบของความถี่ดอปเพลอร์นั้นยังขึ้นอยู่กับค่าความถี่กลางที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณอีกด้วย เนื่องจากค่าความถี่ดอปเพลอร์เป็นค่าที่คิดเทียบกับค่าความถี่กลางที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณ

### 4.1.5 สมมติฐานต่าง ๆที่ใช้ในการจำลองระบบ

การจำลองระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีการกำหนดสมมติฐานเพิ่มเติมดังนี้

- พิจารณาเฉพาะกรณีข่ายเชื่อมโยงขาลง (Downlink) ของระบบ MC-CDMA
- การซิงโครไนซ์ (Synchronize) สัญญาณระหว่างผู้ใช้ และสถานีฐานเป็นไปอย่างสมบูรณ์
- การควบคุมกำลังส่งของสัญญาณจากผู้ใช้โทรศัพท์ไร้สายเป็นไปอย่างอย่างสมบูรณ์
- ในการจำลองระบบนี้นั้นจะทำการส่งข้อมูลโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ตลอดทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
- ผลตอบสนองของช่องสัญญาณลักษณะเป็นแบบกึ่งคงที่ (Quasi-Stationary) คือ จะมีค่าผลตอบสนองที่ไม่เปลี่ยนแปลงภายในหนึ่งสัญลักษณ์
- ในการจำลองระบบนี้นั้นจะละเลยผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างคลื่นสัญลักษณ์ และการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์ย่อย เนื่องจากสมมุติว่ามีการเติมระยะเวลาคุมแบบข้อมูลอุปสรรคหมุนวนที่ยาวมากเพียงพอ
- ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้มีผู้ใช้ในระบบเพียงคนเดียวเนื่องจากเป็นการประมาณช่องสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงขาลง ซึ่งข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณที่มีลักษณะเดียวกัน

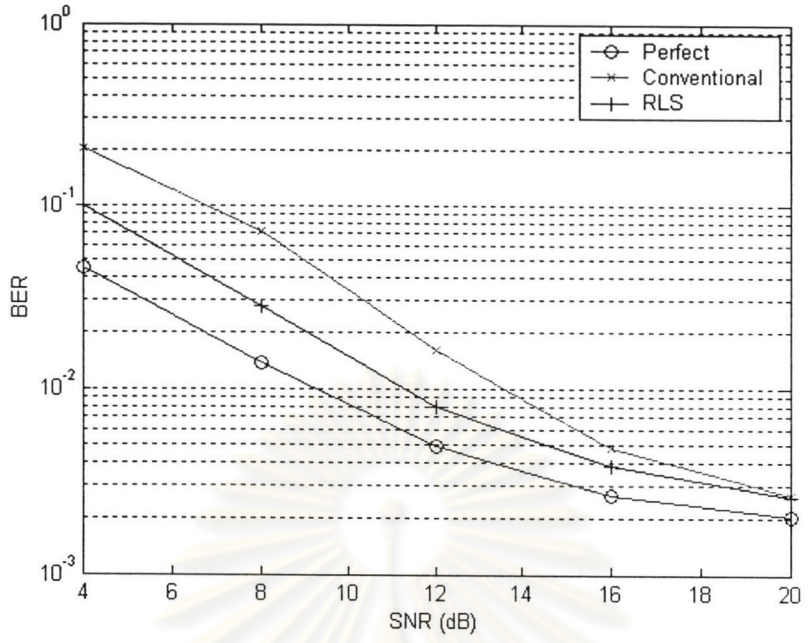
- ตัวปรับเท่าที่ภาครับจะเป็นแบบ MRC ซึ่งให้ผลดีในกรณีที่รหัสแผ่ของผู้ใช้แต่ละคนไม่สูญเสียความตั้งฉากระหว่างกัน
- ในการจำลองระบบนี้จะกำหนดให้ใช้รหัสแผ่แบบวอล์ช-ฮาดามาร์ดซึ่งมีอัตราแผ่ เท่ากับ 16 ซึ่งเท่ากับจำนวนคลื่นพาห์ย่อย เป็นหลัก
- ในการจำลองระบบนี้นั้นจะมีการจำลองระบบซ้ำใหม่จำนวน 100 รอบแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของอัตราผิดพลาดบิตข้อมูล โดยแต่ละรอบจะทำการส่งสัญลักษณ์ข้อมูลทั้งหมด 100,000 สัญลักษณ์
- ระยะห่างของแต่ละวิถีของผลตอบสนองของช่องสัญญาณในการจำลองระบบนี้นั้นจะมีค่าเป็นจำนวนเต็มคาบของสัญลักษณ์ เนื่องจากการเติมอุปสรรคหมุนวนที่ยาวมากเพียงพอ

## 4.2 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ขาลง ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึง สมรรถนะของระบบข่ายเชื่อมโยงขาลงของระบบ MC-CDMA ที่มีการประยุกต์ใช้การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม โดยในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบดังกล่าวนี้นั้น จะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบในกรณีที่สมมุติว่าสามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างถูกต้อง (Perfect channel estimation) และกรณีของการประมาณช่องสัญญาณแบบทั่วไป หรือการประมาณช่องสัญญาณแบบลีสต์สแควร์ (Least Square Channel estimation) ภายใต้สภาวะแวดล้อม และเงื่อนไขต่าง ๆ

### 4.2.1 สมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิต

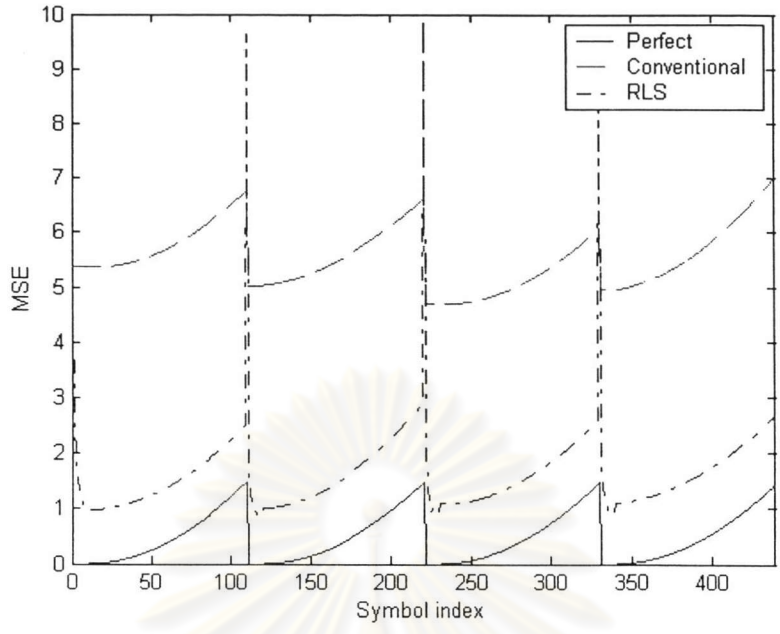
ในการวัดสมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิตของข่ายเชื่อมโยงขาลงของระบบ MC-CDMA ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมนั้น จะอาศัยการจำลองผล โดยจะกำหนดให้ ความยาวเฟรมข้อมูลเท่ากับ 110 สัญลักษณ์ ประกอบด้วยสัญลักษณ์นำร่องจำนวน 10 สัญลักษณ์ สลับกับสัญลักษณ์ข้อมูลขนาดยาว 100 สัญลักษณ์ ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 91 Hz และค่าสัมประสิทธิ์การลืมของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมมีค่าเท่ากับ 0.68 ซึ่งในการทดสอบสมรรถนะของการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมนั้นจะกระทำโดยการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับกรณีของการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีลีสต์ลีสต์สแควร์ และกรณีที่สมมุติว่าสามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างถูกต้อง




รูปที่ 4.1 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม
เมื่อเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีอื่น

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงถึงอัตราความผิดพลาดบิต ของการประมาณช่องสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนไป ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่ากรรมวิธีการประมาณช่องสัญญาณโดยอาศัยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมเข้ามาประยุกต์ช่วยในการประมาณนั้น สามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีกว่าการประมาณช่องสัญญาณแบบทั่วไป ในทุก ๆ ค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดบิตของทั้งสองวิธีจะมีค่าลู่เข้าใกล้อัตราความผิดพลาดบิตของกรณีซึ่งถือว่าการประมาณช่องสัญญาณเป็นไปอย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าการประมาณช่องสัญญาณโดยมีการประยุกต์ใช้รีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมนั้น สามารถทำงานได้ดี และสามารถใช้งานได้ในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 4.2 MSE ของการประมาณช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล โดย RLS อัลกอริทึม เมื่อเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีอื่น ๆ

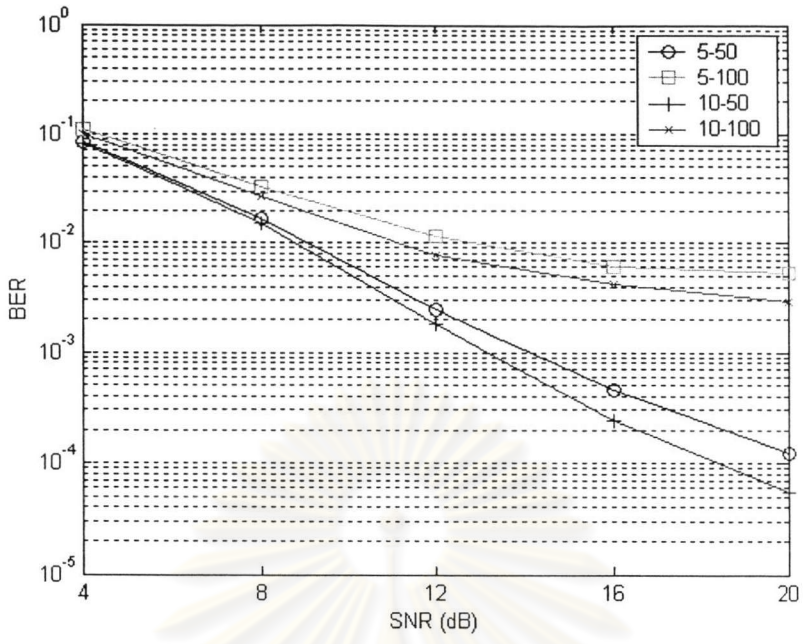
รูปที่ 4.2 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของผลต่างกำลังสองของความผิดพลาด (Mean Squared Error; MSE) ของการประมาณช่องสัญญาณ ซึ่งหาได้จากค่าเฉลี่ยของผลต่างยกกำลังสองของผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ประมาณได้ กับค่าผลตอบสนองจริงของช่องสัญญาณในแต่ละคลื่นพาห์ย่อย ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดค่าความถูกต้องของการประมาณ โดยถ้า MSE มีค่ามากจะแสดงถึงช่องสัญญาณที่ประมาณได้มีค่าผิดพลาดไปจากช่องสัญญาณจริงมาก ในทางตรงกันข้าม ถ้า MSE มีค่าน้อย จะแสดงถึงความถูกต้องในการประมาณมีค่าสูงนั่นเอง ซึ่งจากรูปที่ 4.2 จะพบว่า ค่า MSE ของกรณีที่สมมุติให้การประมาณช่องสัญญาณเป็นไปอย่างถูกต้องจะมีค่ามากที่สุด ตามมาด้วยกรณีของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม และการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีลีสต์ลีสต์สแควร์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการจำลองระบบ รูปที่ 4.1 เนื่องจากถ้าการประมาณช่องสัญญาณมีค่าความถูกต้องสูง (MSE ต่ำ) จะส่งผลให้ระบบสามารถปรับแก้ค่าผลตอบสนองจากช่องสัญญาณได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะทำให้ระบบมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยตามไปด้วย นอกจากนั้นแล้วจากรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นได้อีกว่าค่า MSE จะมีค่าต่ำที่ส่วนต้นของเฟรมข้อมูล และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงส่วนปลายของเฟรมข้อมูล และค่า MSE จะลดลงอีก ณ ส่วนต้นของเฟรมข้อมูลถัดไป เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ เนื่องมากจากระบบที่ใช้ในการจำลองผลมีรูปแบบการจัดวางสัญลักษณ์นำร่องในแนวแกนเวลา ซึ่งสัญลักษณ์นำร่องจะถูกจัดวางในส่วนต้นของเฟรมข้อมูล และตามมาด้วยสัญลักษณ์ข้อมูล สลับกันไป ดังนั้นการประมาณช่องสัญญาณจึงเกิดขึ้นเฉพาะส่วนต้นของเฟรมข้อมูลซึ่งเป็น

ส่วนของสัญลักษณ์นำร่องเท่านั้น จากนั้นจึงนำค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ประมาณได้มาใช้เป็นค่าประมาณของช่องสัญญาณตลอดช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลที่เหลือในเฟรมข้อมูลนั้น ๆ ดังนั้น ณ ตำแหน่งส่วนต้นของเฟรมข้อมูลซึ่งมีการประมาณช่องสัญญาณเกิดขึ้น ค่า MSE ของผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จึงมีค่าน้อย และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในส่วนที่เป็นสัญลักษณ์ข้อมูลเนื่องจากผลตอบสนองของช่องสัญญาณจริงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จึงเปลี่ยนแปลงไปจากค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ประมาณได้ ณ ส่วนต้นของเฟรมข้อมูล

### 4.2.2 สมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อมีการเปลี่ยนความยาวเฟรมข้อมูล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะของการประมาณช่องสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงขาลงของระบบ MC-CDMA โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมในกรณีที่มีการเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวระหว่างสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูลภายในเฟรมข้อมูล รวมถึงความยาวของเฟรมข้อมูลในกรณี เพื่อทดสอบผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างสัญลักษณ์นำร่องกับสัญลักษณ์ข้อมูลภายในเฟรมข้อมูล และค่าความยาวเฟรมข้อมูลที่มีผลต่อประสิทธิภาพและค่าความถูกต้องของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม โดยในการจำลองผลนั้นจะกำหนดให้ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 91 Hz ค่าสัมประสิทธิ์การลืมของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมมีค่าเท่ากับ 0.68 และปรับเปลี่ยนค่าความยาวของเฟรมข้อมูลรวมถึงอัตราส่วนระหว่างสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูลเพื่อทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตไปทั้งหมด 4 กรณี แล้วจึงทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีต่างๆ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนไป โดยค่าอัตราส่วนระหว่างสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองผลนี้ มีทั้งหมด 4 กรณี ได้แก่

- กรณีความยาวสัญลักษณ์นำร่องเท่ากับ 5 สัญลักษณ์ และความยาวสัญลักษณ์ข้อมูลเท่ากับ 50 สัญลักษณ์
- กรณีความยาวสัญลักษณ์นำร่องเท่ากับ 5 สัญลักษณ์ และความยาวสัญลักษณ์ข้อมูลเท่ากับ 100 สัญลักษณ์
- กรณีความยาวสัญลักษณ์นำร่องเท่ากับ 10 สัญลักษณ์ และความยาวสัญลักษณ์ข้อมูลเท่ากับ 50 สัญลักษณ์
- กรณีความยาวสัญลักษณ์นำร่องเท่ากับ 10 สัญลักษณ์ และความยาวสัญลักษณ์ข้อมูลเท่ากับ 100 สัญลักษณ์




รูปที่ 4.3 BER เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวของสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูล

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่ากรณีที่ความยาวสัญลักษณ์นำร่องเท่ากับ 10 สัญลักษณ์ และความยาวสัญลักษณ์ข้อมูลเท่ากับ 50 สัญลักษณ์นั้น จะสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุดในทุกค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ตามมาด้วยกรณีที่ค่าความยาวของสัญลักษณ์นำร่องต่อค่าความยาวของสัญลักษณ์ข้อมูลเท่ากับ 5 ต่อ 50 10 ต่อ 100 และ 5 ต่อ 100 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการจำลองระบบจะพบว่าระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลต่ำจะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลสูง เนื่องมาจาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากรรมวิธีการประมาณช่องสัญญาณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นประเภทจัดวางสัญลักษณ์นำร่องในแนวแกนเวลา และจะทำการประยุกต์ใช้ค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จากส่วนต้นของเฟรมข้อมูล เข้ากับส่วนที่เป็นสัญลักษณ์ข้อมูลที่เหลือทั้งหมด ดังนั้นค่าความถูกต้องของผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ประมาณได้ เมื่อเทียบกับองผลตอบสนองของช่องสัญญาณจริงจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามค่าลำดับสัญลักษณ์ข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณจริงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นจึงส่งผลให้ระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลสูงมีสมรรถนะที่ด้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลต่ำ

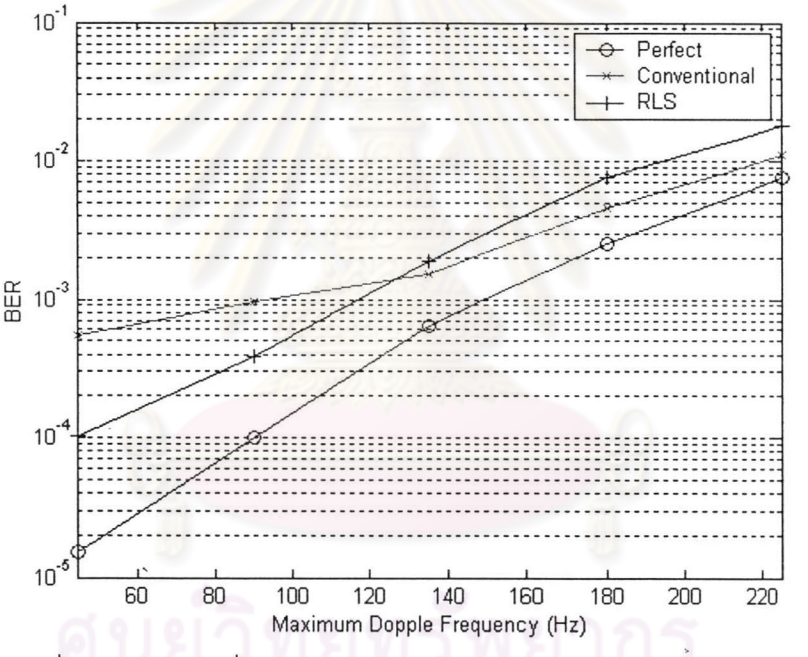
เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลที่เท่ากัน แต่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่องที่ต่างกัน จะพบว่าระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่องที่มากกว่า (อัตราส่วนระหว่างความยาวของสัญลักษณ์นำร่องต่อความยาวของสัญลักษณ์ข้อมูลสูงกว่า) จะสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่า เนื่องมาจากอัลกอริทึมการประมาณช่องสัญญาณแบบรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์นั้นเป็นอัลกอริทึมชนิดปรับตัวได้ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยระยะเวลาในการลู่เข้าของสัญญาณเพื่อให้ค่าความผิดพลาดของการประมาณเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (Steady state) ดังนั้นระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่องที่มากกว่าจึงจะสามารถทำให้อัลกอริทึมเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ดีกว่า จึงส่งผลให้มีค่าความผิดพลาดในการประมาณที่น้อยกว่า และค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่าตามลำดับ

นอกจากนั้นแล้ว เมื่อทำการเปรียบเทียบถึงผลกระทบของทั้งค่าความยาวของช่วงส่วนสัญลักษณ์นำร่อง และค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูล ที่มีผลต่อค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบ จะพบว่าผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลจะส่งผลกระทบมากกว่าผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่อง ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองระบบซึ่งระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่องเป็น 5 สัญลักษณ์ และมีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลเป็น 50 สัญลักษณ์ จะให้สมรรถนะด้านค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีกว่ากรณีของระบบที่มีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่องเป็น 10 สัญลักษณ์ และมีค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลเป็น 100 สัญลักษณ์ ดังนั้นระบบที่มีการเลือกค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่องให้มีค่ามาก และค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลให้มีค่าน้อย (เพิ่มความถี่ในการแทรกสัญลักษณ์นำร่อง) จะส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น อนึ่ง การเลือกค่าความยาวสัญลักษณ์นำร่องให้มีค่ามากเกินความจำเป็นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณมีค่าลดต่ำลง ดังนั้น การเลือกใช้ค่าความยาวของช่วงสัญลักษณ์นำร่อง และความถี่ในการแทรกสัญลักษณ์นำร่องจึงควรเลือกให้เหมาะสมกับค่าคุณสมบัติของช่องสัญญาณ และประสิทธิภาพของระบบที่ต้องการเป็นหลัก

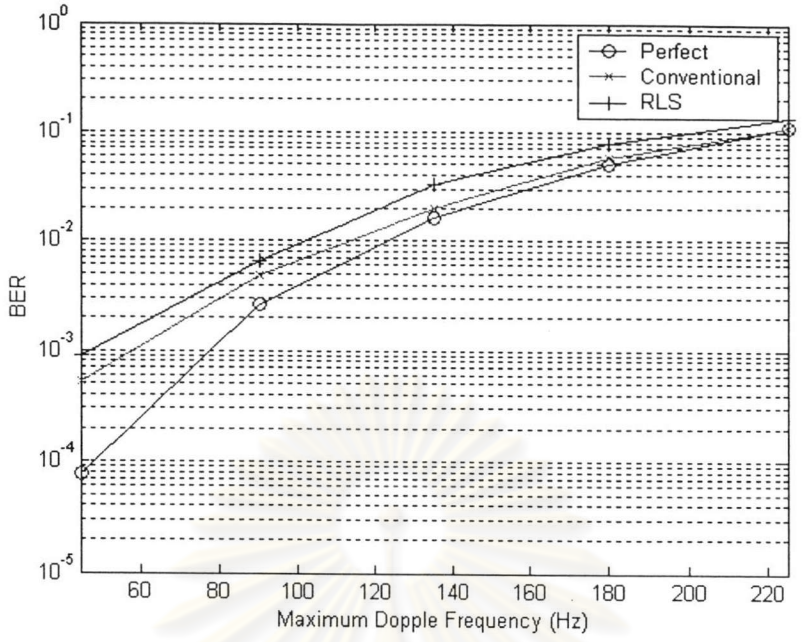
### 4.2.3 สมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อมีการเปลี่ยนค่าความถี่ดอปเพลอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการการเปรียบเทียบสมรรถนะของการประมาณช่องสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงขาลงของระบบ MC-CDMA โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมในกรณีที่ค่าความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณมีค่าแปรเปลี่ยนไป โดยในการแปรเปลี่ยนค่าความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณจะสามารถทำได้โดยปรับเปลี่ยนค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดไป ซึ่งถ้าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่ามากช่องสัญญาณก็จะมีการ

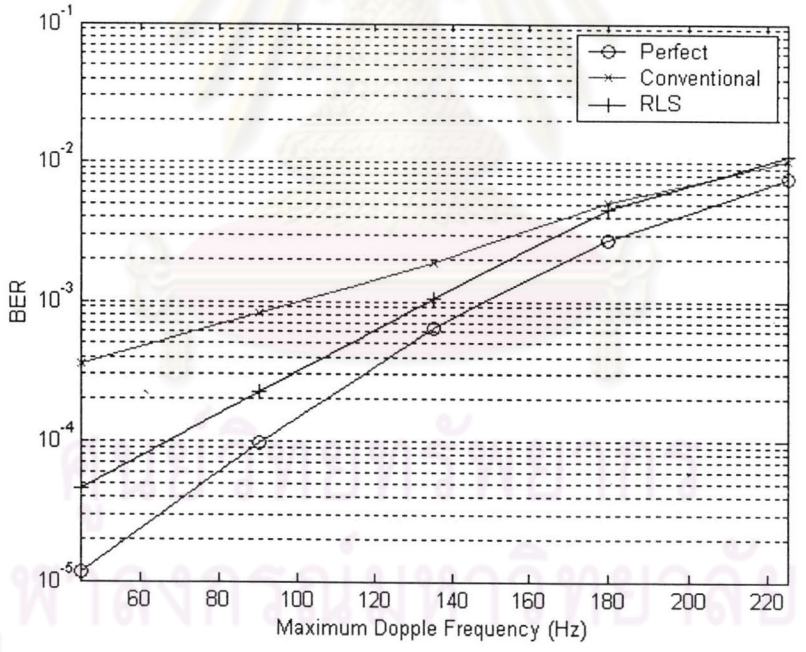
เปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ในทางตรงข้ามถ้าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าน้อยช่องสัญญาณก็จะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ หรือมีคุณลักษณะค่อนข้างคงที่ นั่นเอง ในการจำลองระบบนั้นจะทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิต ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด รวมทั้งทำการพิจารณาเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวระหว่างสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูลภายในเฟรมข้อมูล ดังเช่นในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการประมาณช่องสัญญาณ และผลกระทบของความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการประมาณช่องสัญญาณ รวมถึงผลกระทบของรูปแบบการจัดวางเฟรมข้อมูลอีกด้วย โดยในการจำลองผลนั้น ทุกการทดสอบจะกระทำที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 16 dB และค่าสัมประสิทธิ์การลืมของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมมีค่าเท่ากับ 0.68



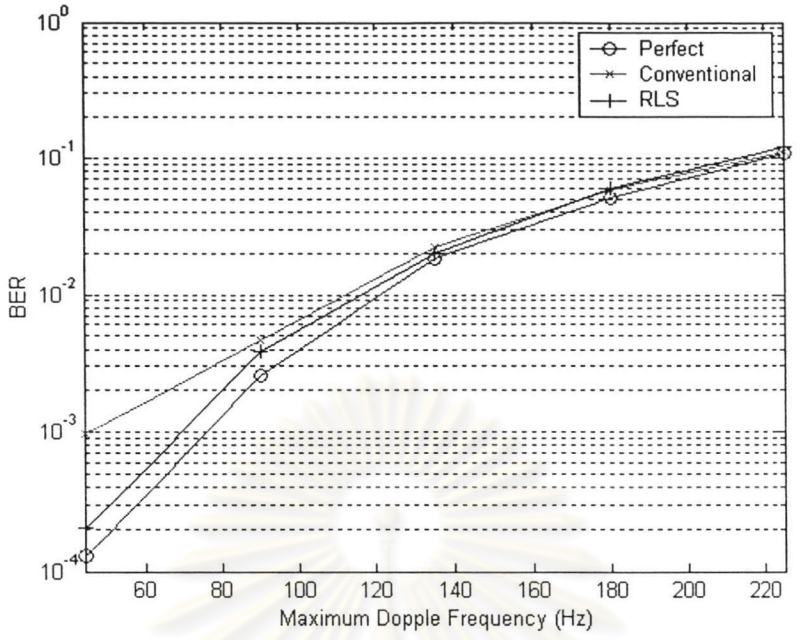

รูปที่ 4.4 BER เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวของสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูล 5-50




รูปที่ 4.5 BER เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวของสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูล 5-100




รูปที่ 4.6 BER เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวของสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูล 10-50




รูปที่ 4.7 BER เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวของสัญลักษณ์นำร่อง และสัญลักษณ์ข้อมูล 10-100

เมื่อพิจารณาผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.4–4.7 จะพบว่า ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะมีค่าสูงมากขึ้นเมื่อช่องสัญญาณมีค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเพิ่มมากยิ่งขึ้น หรือช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นเนื่องจากการประมาณช่องสัญญาณไม่ได้กระทำในทุกๆ สัญลักษณ์ หากแต่จะกระทำเฉพาะส่วนต้นของเฟรมข้อมูลเท่านั้น แล้วจึงประยุกต์ใช้ค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณได้กับส่วนที่เป็นสัญลักษณ์ข้อมูลที่เหลือทั้งหมดภายในเฟรมข้อมูล ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น เมื่อค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณมีการปรับเปลี่ยนที่รวดเร็วขึ้นจึงส่งผลให้ค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณจริงในช่วงของสัญลักษณ์ข้อมูล มีค่าแตกต่างไปจากค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จากส่วนต้นของเฟรมข้อมูลมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของรูปแบบการจัดวางเฟรมข้อมูลที่มีช่วงของสัญลักษณ์ข้อมูลที่มีความยาวสูง ซึ่งจะได้รับผลกระทบจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นอย่างมาก

จากผลการจำลองระบบจะสามารถสังเกตเห็นได้อีกว่าค่าผลต่างของอัตราความผิดพลาดบิตของกรณีที่มีการประมาณช่องสัญญาณ และกรณีที่สมมุติให้สามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างถูกต้องจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากผลกระทบของค่าความถูกต้องในการประมาณผลตอบสนองของช่องสัญญาณจะมีความสำคัญลดลง เนื่องจากถึงแม้ว่าระบบจะสามารถประมาณช่องสัญญาณที่ส่วนต้นของเฟรม

ข้อมูลได้อย่างถูกต้องมากเพียงไร แต่เมื่อถึงส่วนสัญลักษณ์ข้อมูลที่ตำแหน่งท้ายของเฟรมข้อมูล ค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณจริงก็จะมีค่าเบี่ยงเบนไปเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณได้อยู่ดี

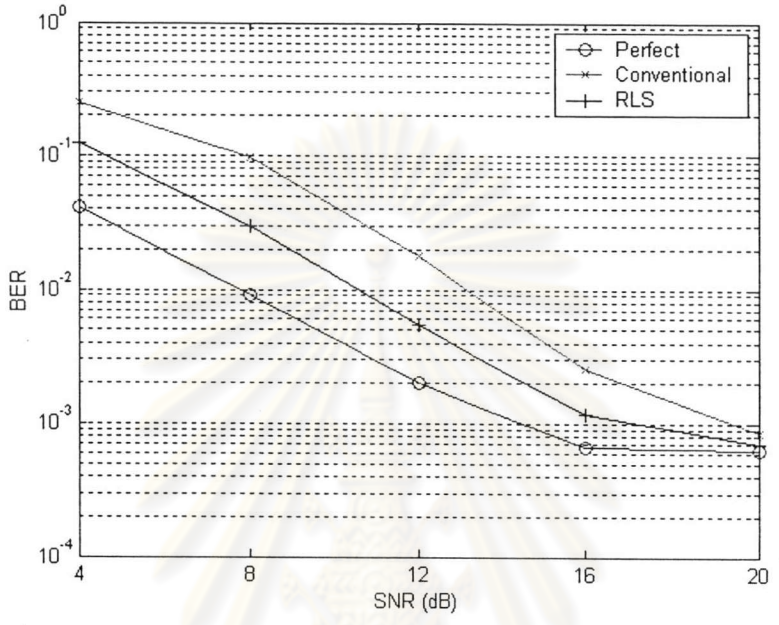
นอกจากนั้นแล้วจากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะพบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม จะมีค่าสูงกว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการประมาณแบบปกติ ในบางช่วงของค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด เนื่องมาจากการที่รีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมซึ่งเป็นอัลกอริทึมชนิดปรับตัวได้นั้น ต้องอาศัยระยะเวลาในการลู่เข้าของค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณ ดังนั้นการใช้ค่าสัญลักษณ์นำร่องซึ่งมีความยาวเพียง 5 สัญลักษณ์จึงอาจไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้การประมาณช่องสัญญาณมีความผิดพลาดเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว นอกจากนั้นแล้ว ในการจำลองระบบนี้ค่าสัมประสิทธิ์การลืมของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมที่ใช้ยังถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.68 ตลอดการทดสอบ ไม่ว่าความรวดเร็วของการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณจะมีค่าเท่าไร ซึ่งเป็นการไม่เหมาะสม จึงส่งผลให้การประมาณช่องสัญญาณ โดย รีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

อนึ่ง ในทางปฏิบัตินั้นค่าความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณจะมีค่าไม่มากนัก อีกทั้งยังมีค่าค่อนข้างคงที่อีกด้วย ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมจริงในทางปฏิบัตินั้นค่าสัมประสิทธิ์การลืมของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมควรจะปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณจริง เพื่อให้การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

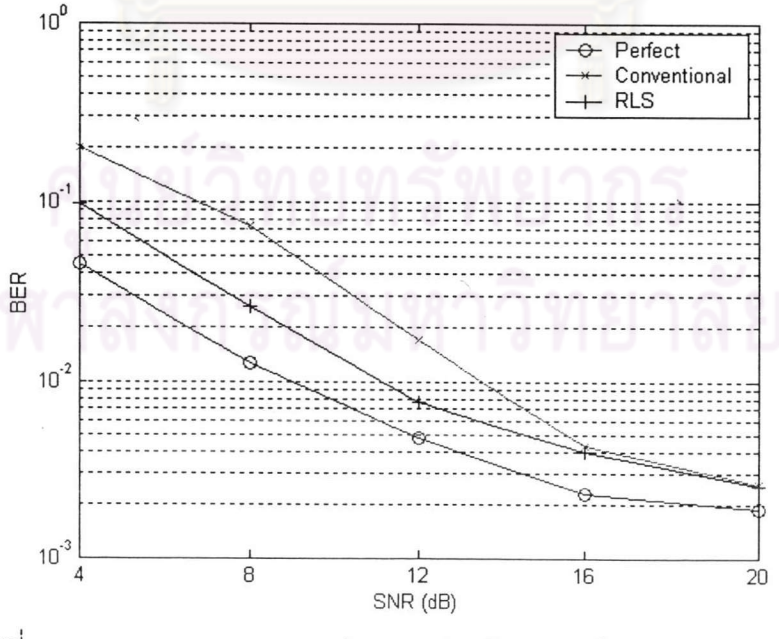
### 4.2.4 สมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อมีการเปลี่ยนวิธีการมอดูเลต

เพื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นในการใช้ด้านความสามารถในการเข้ากันได้กับวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ของการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ในหัวข้อนี้จึงจะทำการทดสอบโดยการจำลองระบบ ซึ่งจะทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตสำหรับวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ โดยจะทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม เทียบกับกรณีของการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีลีสต์ลีสต์สแควร์ และกรณีที่สมมุติว่าสามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างถูกต้องที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ โดยในการจำลอง

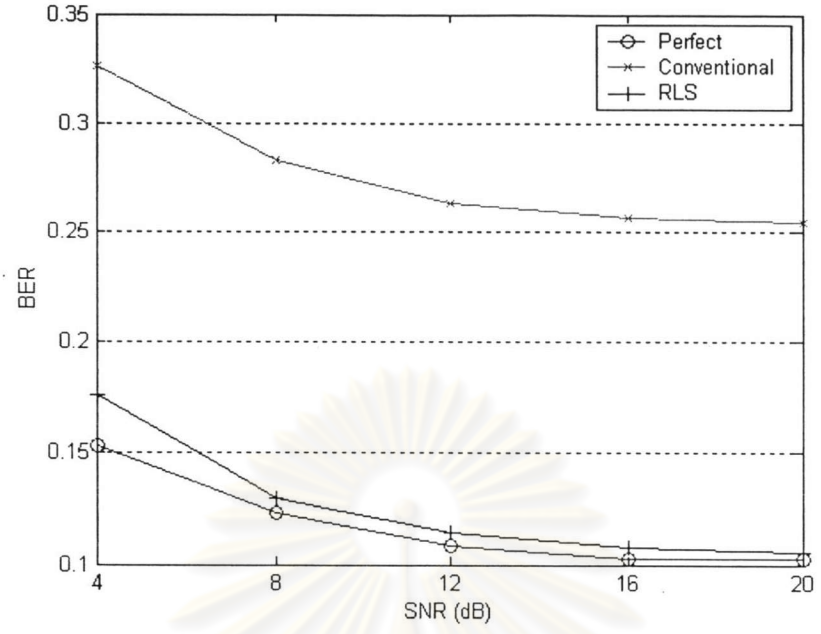
ระบบนั้นจะกำหนดให้ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 91 Hz ค่าสัมประสิทธิ์การลืมของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมมีค่าเท่ากับ 0.68 ในขณะที่แปรเปลี่ยนกรรมวิธีในการมอดูเลตสัญญาณไปทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ การมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK การมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK และการมอดูเลตสัญญาณแบบ 16 QAM




รูปที่ 4.8 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม เมื่อเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีอื่น กรณีการมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK




รูปที่ 4.9 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม เมื่อเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีอื่น กรณีการมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK

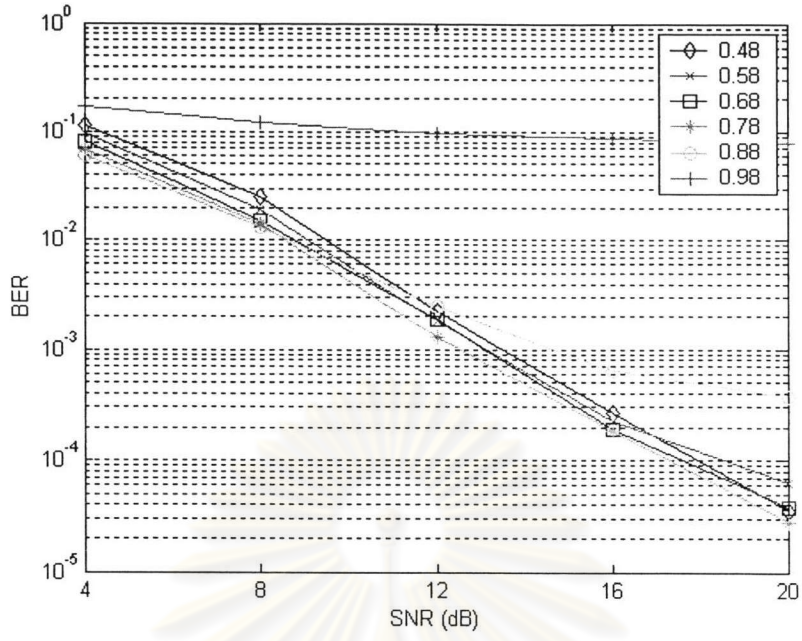



รูปที่ 4.10 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม
เมื่อเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีอื่น กรณีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 16 QAM

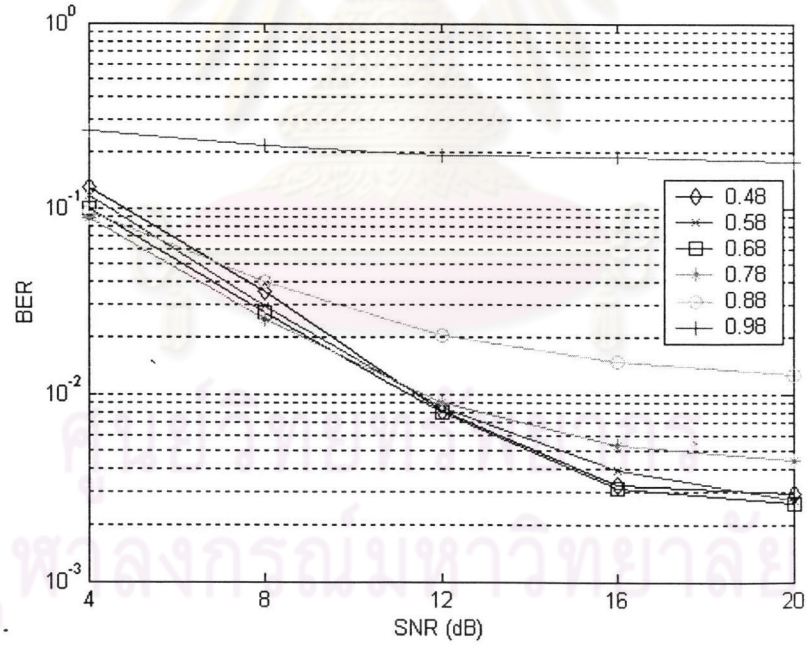
จากผลการจำลองระบบจะพบว่าการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม นั้นยังสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่ากรณีของการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีลีสต์ลีสต์สแควร์ ในขณะทีกรณีที่สมมุติว่าสามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างถูกต้องนั้นสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำที่สุด โดยไม่ขึ้นกับกรรมวิธีในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมนั้นมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายไม่ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล

### 4.2.5 สมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อมีการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลืม

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม โดยในจำลองระบบจะแปรเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลืมของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมไปทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 0.48 0.58 0.68 0.78 0.88 และ 0.98 จากนั้นจึงวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ของค่าสัมประสิทธิ์การลืมในกรณีต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ โดยในการจำลองระบบนั้นจะกำหนดให้ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 45 และ 91 Hz เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการปรับตั้งค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่มีต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณ และเปรียบเทียบผล




รูปที่ 4.11 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม
เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลืม ที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 45 Hz




รูปที่ 4.12 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม
เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลืม ที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์การลืมเป็นพารามิเตอร์สำคัญซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม เนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์การลืมเป็นพารามิเตอร์ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความเชื่อถือ หรือค่าความจดจำที่มีต่อข้อมูลที่ผ่านมาในอดีตของระบบ ซึ่งส่งผลถึงความสามารถในการเรียนรู้ และประสิทธิภาพในการประมาณคุณลักษณะของสัญญาณ รวมถึงค่าความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะช่องสัญญาณอีกด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลืมจึงควรกำหนดให้มีความเหมาะสมโดยควรพิจารณาจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณเป็นหลัก โดยสำหรับช่องสัญญาณที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้า ค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่เลือกใช้ควรมีค่ามากเพื่อให้ระบบเชื่อถือ หรือให้น้ำหนักกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จากก่อนหน้าค่อนข้างมาก และอาศัยคุณลักษณะทางสถิติของช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมาณของระบบ ในทางตรงกันข้ามสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ค่อนข้างเร็ว ค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่เลือกใช้ควรมีค่าน้อย เพื่อให้ระบบเชื่อถือ หรือให้น้ำหนักกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณได้ในปัจจุบันมากกว่าค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณได้ในอดีต ซึ่งจะส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ดี และประสิทธิภาพในการประมาณสูงยิ่งขึ้น

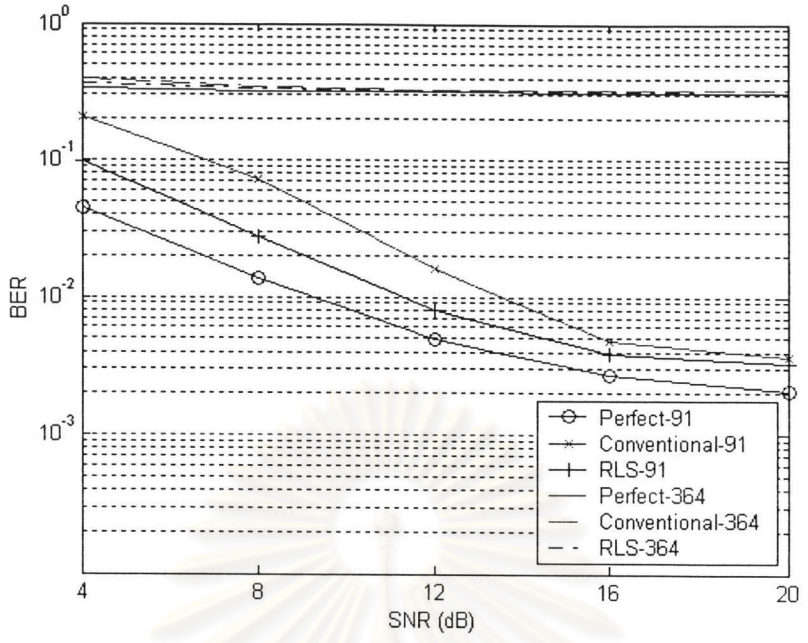
เมื่อพิจารณาผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะพบว่าสอดคล้องกับคุณลักษณะของสัมประสิทธิ์การลืมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น กล่าวคือ ในกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ (กรณีค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 45 Hz) ค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่ให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำที่สุด หรือมีค่าเหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 0.78 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วมากขึ้น (กรณีค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz) จะมีค่าเป็น 0.68 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีค่าความถี่ดอปเพลอร์เท่ากับ 45 Hz

นอกจากนั้นจะเห็นว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่เลือกใช้มีค่าแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่มีค่าเหมาะสมมาก ดังเช่นกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การลืมมีค่าเท่ากับ 0.98 ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบมีคาลดลงอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับกรณีการเลือกค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม

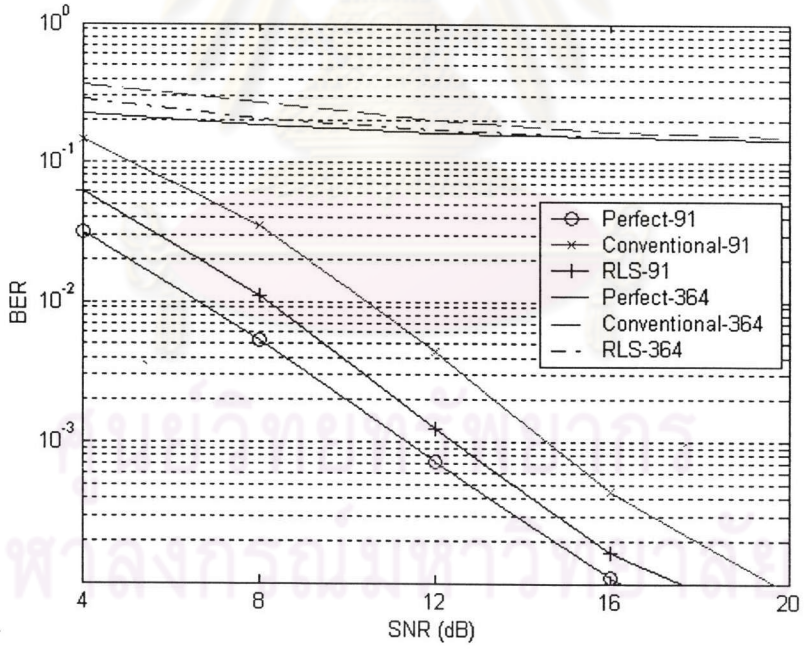
จากผลการจำลองระบบจะเห็นได้ว่า กรณีที่มีการเลือกค่าสัมประสิทธิ์การลืมไม่เหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์การลืมเป็นพารามิเตอร์สำคัญซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม เนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์การลืมเป็นพารามิเตอร์ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความเชื่อถือ หรือค่าความจดจำที่มีต่อข้อมูลที่ผ่านมาในอดีตของระบบ ซึ่งส่งผลถึงความสามารถในการเรียนรู้ และประสิทธิภาพในการประมาณคุณลักษณะของสัญญาณ รวมถึงค่าความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะช่องสัญญาณอีกด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลืมจึงควรกำหนดให้มีความเหมาะสมโดยควรพิจารณาจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณเป็นหลัก

### 4.2.6 สมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อมีการการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล

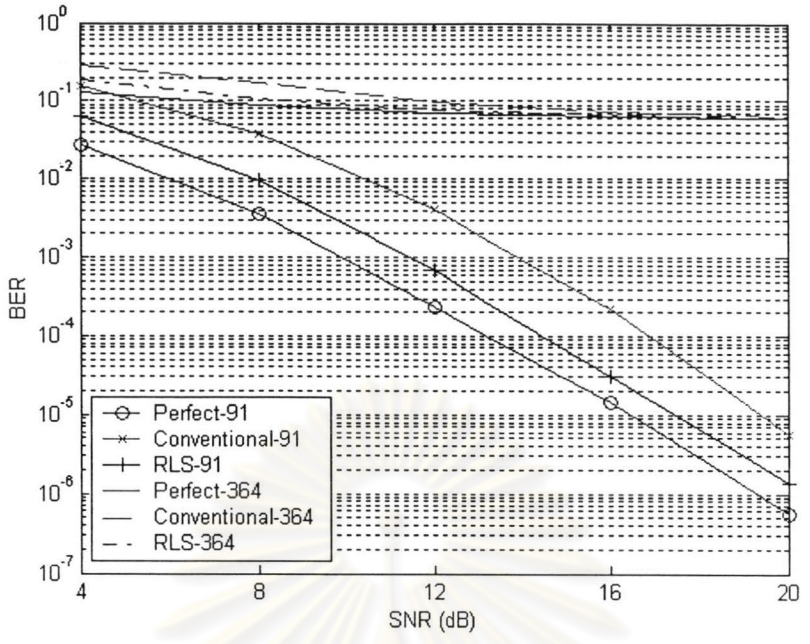
ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล ที่ส่งผลต่อสมรรถนะด้านอัตราความผิดพลาดบิตของระบบ โดยในการจำลองระบบจะแปรเปลี่ยนกรรมวิธีในการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลไปทั้งหมด 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล กรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการเฉลี่ย กรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น และกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจ แล้วทำการวัดอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีต่างๆ เพื่อการเปรียบเทียบ โดยในการจำลองระบบนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การลืมของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.68 และค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 และ364 Hz เพื่อทดสอบผลกระทบของความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลประเภทต่างๆ



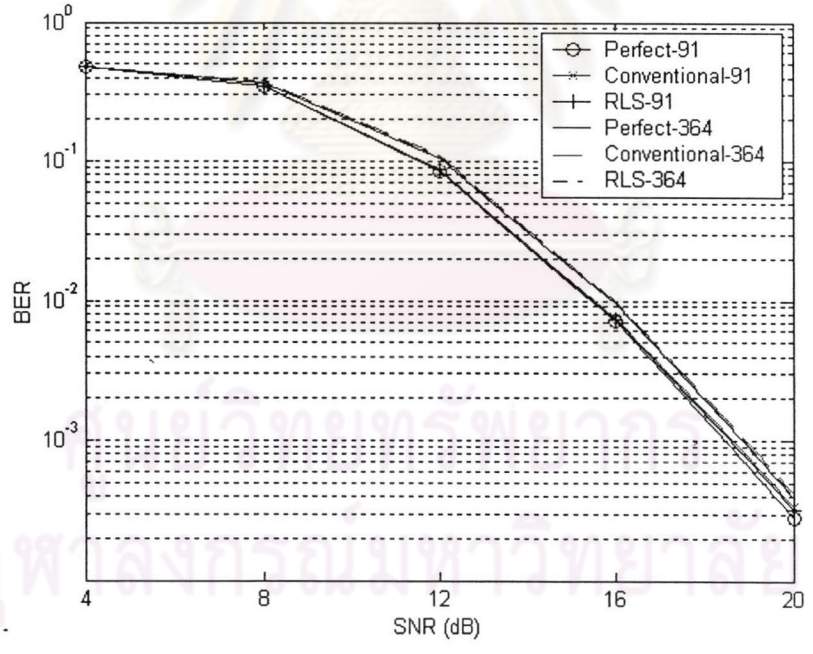

รูปที่ 4.13 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณวิธีต่างๆ ในกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล




รูปที่ 4.14 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณวิธีต่างๆ ในกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธี Average




รูปที่ 4.15 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณวิธีต่างๆ ในกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธี Linear Interpolation




รูปที่ 4.16 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณวิธีต่างๆ ในกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธี Decision Direct

จากผลการจำลองระบบพบว่า กรณีที่สมมุติให้การประมาณช่องสัญญาณเป็นไปอย่างถูกต้องยังคงสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำที่สุด ตามมาด้วยการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม และการประมาณช่องสัญญาณโดยวิธีลีสต์ลีสต์สแควร์ ตามลำดับ ในทุกค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในทุกๆ กรณีของกรรมวิธีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรรมวิธีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลจะพบว่าการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการเฉลี่ย และกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่รวดเร็วนักดังเช่นในกรณีของการกำหนดค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงที่สุดเท่ากับ 91 Hz ในการจำลองระบบนี้ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาถึงค่าความซับซ้อนของระบบจะพบว่าค่าประสิทธิภาพด้านอัตราความผิดพลาดบิตของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งค่อนข้างจะคุ้มค่าเมื่อเทียบกับค่าความซับซ้อนของระบบที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อนึ่งข้อเสียที่สำคัญของการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการเฉลี่ย และการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น คือ จะทำให้เกิดระยะเวลาประวิงขึ้นในระบบ เนื่องจากจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จากเฟรมข้อมูลถัดไปมาช่วยในการปรับปรุงคุณลักษณะของช่องสัญญาณภายในช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลในเฟรมปัจจุบัน

เมื่อพิจารณาผลการจำลองระบบของกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจจะพบว่าในย่านที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจจะสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี คือ สามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลวิธีอื่นๆ อนึ่ง การปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจนั้น มีข้อเสียที่สำคัญคือ ไม่ทนทานต่อสัญญาณรบกวน ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองระบบ ซึ่งจะพบว่าเมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกระบวนการการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจจะมีค่าสูง เมื่อเทียบกับกรณีของกระบวนการการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบอื่นๆ และจะมีค่าลดลงอย่าง

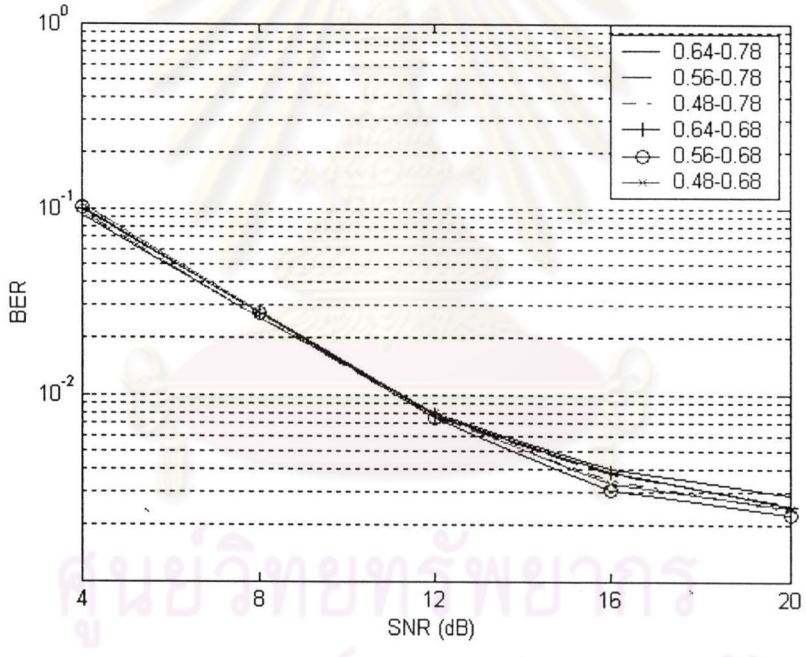
รวดเร็วเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับค่าความถูกต้องในการตัดสินบิตข้อมูลของข้อมูลก่อนหน้า ดังนั้นถ้าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำจนทำให้เกิดการตัดสินบิตผิดพลาด จะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดสะสมขึ้นในระบบตลอดทั้งเฟรมข้อมูล จนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตัดสินบิตโดยรวมมีค่าลดลง นอกจากนี้แล้ว นอกจากนี้แล้วจะสังเกตเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจนั้นจะได้รับผลกระทบจากค่าความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณไม่มากนัก ดังจะเห็นได้จากการจำลองระบบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกรณีที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเป็น 91 Hz และ 364 Hz มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะแตกต่างจากกรรมวิธีในการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลวิธีอื่นๆ ซึ่งอัตราความผิดพลาดบิตจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วขึ้น (ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าสูง) เมื่อพิจารณาด้านระยะเวลาประวิงในการดำเนินการแล้วจะพบว่าการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจนี้ ไม่จำเป็นต้องอาศัยค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ประมาณได้จากเฟรมถัดไปดังเช่นกรณีของการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบอื่นๆ จึงไม่ทำให้เกิดระยะเวลาประวิงในการคำนวณเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาของเฟรมข้อมูลดังเช่นกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลรูปแบบอื่นๆ อนึ่ง เมื่อพิจารณาค่าความซับซ้อนในการคำนวณแล้วจะพบว่าการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำนี้มีความซับซ้อนเหนือกว่าการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลวิธีอื่นๆ อีกทั้งยังต้องรอการตัดสินบิตข้อมูลก่อนหน้าเพื่อใช้ช่วยในการตัดสินบิตข้อมูลปัจจุบันอีกด้วย

## 4.3 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ขาลง ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืม

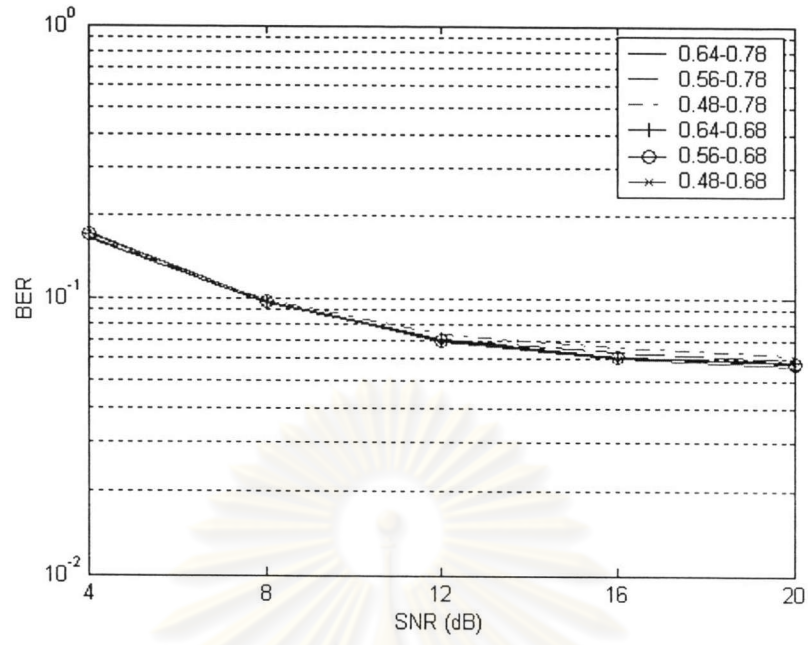
### 4.3.1 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณโดย รีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงประสิทธิภาพ และค่าพารามิเตอร์ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมอัลกอริทึม ซึ่งได้รับการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น โดยในการจำลองระบบจะทำการปรับเปลี่ยนค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืม หรือกล่าว

อีกนัยหนึ่งก็คือ การเปลี่ยนค่าความชันสำหรับการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การลืมของการประมาณช่องสัญญาณโดย รีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมอัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นนั่นเอง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและผลกระทบของค่าความชันสำหรับการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการประมาณช่องสัญญาณของระบบ ในการจำลองระบบนั้นจะทำการแปรเปลี่ยนค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของค่าสัมประสิทธิ์การลืมไปทั้งหมด 6 ค่า คือ ค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมเป็น 0.64-0.78 0.56-0.78 0.48-0.78 0.64-0.68 0.56-0.68 และ0.48-0.68 ตามลำดับ เพื่อทดสอบหาค่าที่เหมาะสมสำหรับช่องสัญญาณในแต่ละกรณี แล้วจึงทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ ซึ่งในการจำลองระบบนี้ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดจะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 91 Hz และ 182 Hz เพื่อทดสอบถึงผลกระทบของความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ ที่ส่งผลต่อการเลือกค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่เหมาะสม




รูปที่ 4.17 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Linearly increasing forgetting factor ที่ค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมต่างๆ ที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz




รูปที่ 4.18 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Linearly increasing forgetting factor ที่ค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมต่างๆ ที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 182 Hz

จากผลการจำลองระบบพบว่าการเลือกค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของช่องสัญญาณเป็นหลัก ดังจะเห็นได้จากค่าต้นและค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไม่รวดเร็วนัก (ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz) จะมีค่าเป็น 0.56 และ 0.68 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วขึ้นมาอีกในระดับหนึ่ง (ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 182 Hz) จะมีค่าเป็นเป็น 0.48 และ 0.68 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นผลการทดสอบระบบที่ได้สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนั้นค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมที่กำหนดให้ใช้นั้นควรมีค่าน้อย เพื่อให้ระบบเชื่อถือคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ที่ได้รับจากการประมาณช่องสัญญาณในปัจจุบันมากกว่าข้อมูลทางสถิติของช่องสัญญาณที่ได้รับจากการประมาณช่องสัญญาณของเฟรมข้อมูลก่อนหน้า เมื่อระบบเริ่มจะสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณได้แล้ว จึงเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การลืมให้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นในส่วนที่เหลือของชุดสัญลักษณ์นำร่อง เพื่อให้ระบบเชื่อถือ และให้น้ำหนักกับข้อมูลทางสถิติของการประมาณในช่วงก่อนหน้าเพื่อช่วยในการประมาณคุณลักษณะช่องสัญญาณในสัญลักษณ์ปัจจุบัน ในทางตรงกันข้ามกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่รวดเร็วนัก (คุณลักษณะ

ของช่องสัญญาณค่อนข้างคงที่) หรือความยาวของช่วงสัญลักษณ์ข้อมูลภายในเฟรมข้อมูลมีค่าไม่มากนัก ค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมที่กำหนดให้ใช้ควรมีค่าสูงยิ่งขึ้นเพื่อให้เชื่อถือ และให้น้ำหนักและเชื่อถือค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ได้จากการประมาณก่อนหน้า เพื่ออาศัยคุณลักษณะทางสถิติของช่องสัญญาณในทางเวลา มาช่วยสำหรับการประมาณช่องสัญญาณในปัจจุบัน

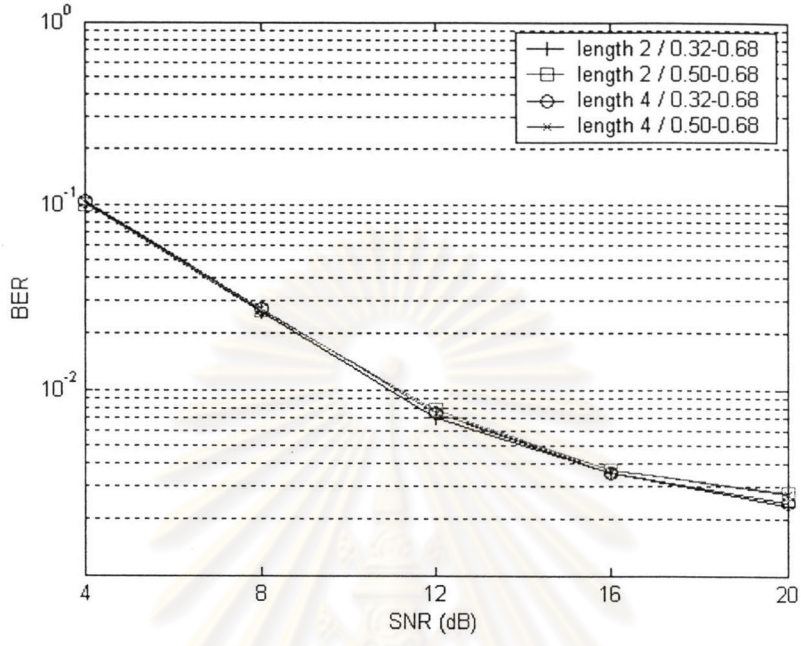
เมื่อพิจารณาค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมจะพบว่า ค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมก็ส่งผลต่อประสิทธิ์ภาพในการประมาณของระบบเช่นเดียวกันกับค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืม ดังจะเห็นได้จากระบบที่มีค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมเท่ากัน แต่มีค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่แตกต่างกัน ก็จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ไม่เท่ากัน โดยการกำหนดค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลืมของการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมอัลกอริทึมแบบปกติ กล่าวคือถ้าช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่กำหนดให้ใช้ควรมีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่กำหนดให้ใช้ก็ควรจะมีค่าลดลงเช่นกัน

ดังนั้น การกำหนดค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมจึงควรกำหนดให้เหมาะสมกับค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณเป็นหลัก โดยการกำหนดค่าตั้งต้น และค่าสุดท้ายของสัมประสิทธิ์การลืมที่เหมาะสมจะส่งผลให้กระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมอัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นนั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

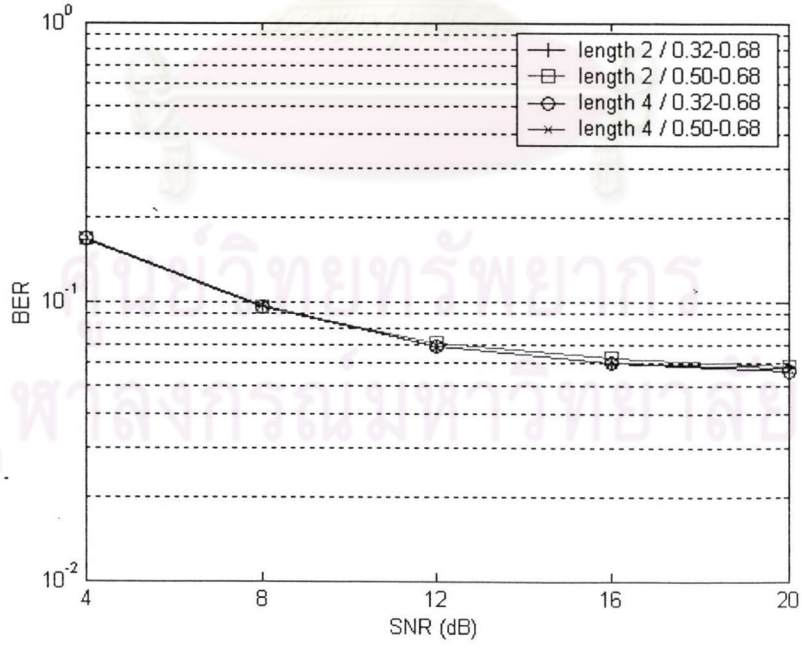
### 4.3.2 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงประสิทธิภาพ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการประมาณช่องสัญญาณของ การประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ โดยจะคำนึงถึงผลกระทบของการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำ รวมถึงช่วงความยาวของสัญลักษณ์นำร่องที่ประยุกต์ใช้ค่าสัมประสิทธิการลืมค่าต่ำ และสัมประสิทธิ์การลืมค่าสูงของระบบ โดยการจำลองระบบจะกระทำโดยปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลืมส่วนที่มีค่าต่ำ ไปทั้งหมด 2 ค่า คือ 0.32 และ 0.50 รวมถึงการปรับเปลี่ยนช่วงระยะความยาวของค่าสัมประสิทธิ์การลืมทั้งสองประเภท ซึ่งจะกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำต่อช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าสูงให้มีค่าเป็น 2 ต่อ 8 สัญลักษณ์ และ 4 ต่อ 6 สัญลักษณ์อีกด้วย ภายใต้สภาวะที่

ช่องสัญญาณมีค่าสูงสุดของความถี่ดอปเพลอร์แตกต่างกันออกไป 2 ค่า ได้แก่ 91 Hz และ 182 Hz ตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบผล




รูปที่ 4.19 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Two step forgetting factor ที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz




รูปที่ 4.20 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Two step forgetting factor ที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 182 Hz

จากผลการจำลองระบบพบว่าการกำหนดค่า และช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมนั้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมรรถนะของการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ โดยจะเห็นได้จากผลการจำลองระบบ คือ ในกรณีที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดของช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับ 91 Hz ค่าอัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำต่อช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าสูงที่เหมาะสมจะมีค่าเป็น 2 ต่อ 8 สัญลักษณ์ ในขณะที่กรณีที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดของช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับ 182 Hz ค่าอัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำต่อช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าสูงที่เหมาะสมจะมีค่าเป็น 4 ต่อ 6 สัญลักษณ์ ซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ เนื่องมาจากดังที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า ค่าสัมประสิทธิ์การลืมนั้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความจดจำ และการให้น้ำหนักของข้อมูลที่ได้รับจากการประมาณในลำดับก่อนหน้าเพื่อนำมาใช้สำหรับการประมาณในปัจจุบัน ดังนั้นถ้าช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วค่าของสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำที่ใช้จึงควรมีค่าน้อย รวมถึงช่วงความยาวที่ใช้สัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำควรมีค่ามากด้วย เพื่อให้ระบบให้น้ำหนักกับการประมาณช่องสัญญาณในปัจจุบันมากกว่าข้อมูลที่ได้จากการประมาณในอดีตซึ่งมีโอกาสผิดเพี้ยนไปจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณจริงในปัจจุบันมาก จากนั้นเมื่อระบบสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณได้แล้วจึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่มีค่าสูงขึ้นเพื่อให้ระบบเชื่อถือ และใช้ประโยชน์จากข้อมูลทางสถิติของช่องสัญญาณที่ได้รับจากการประมาณที่ผ่านมา ในทางตรงกันข้ามถ้าช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่รวดเร็วค่าสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำที่ใช้ควรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากกรณีของค่าสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำที่ใช้ในกรณีของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำที่ใช้จึงควรมีค่าลดลงด้วย เพื่อให้ระบบให้น้ำหนักกับค่าทางสถิติของช่องสัญญาณเพิ่มมากยิ่งขึ้นกว่ากรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำที่มีค่าน้อย และช่วงเวลาของค่าสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่ำที่มีค่ามาก

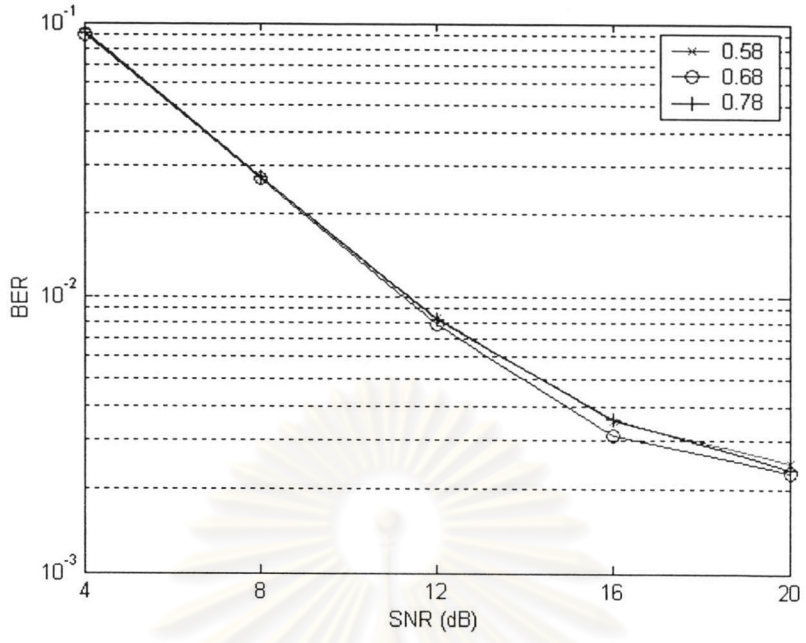
ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า และช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์การลืมค่าสูงและต่ำนั้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพ และค่าความถูกต้องในการประมาณของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ อนึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกรณีที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลืม และค่าช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์ลืมค่าต่างๆ นั้น มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงว่าการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับนั้น มีความทนทานต่อการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลืม และค่าช่วงความยาวของสัมประสิทธิ์ลืมที่ไม่เหมาะสมพอสมควร ทั้งนี้ทั้งนั้นเพื่อให้กระบวนการประมาณช่องสัญญาณ

สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลืม และช่วงระยะเวลาของสัมประสิทธิ์การลืมต่างๆ จึงควรดูจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณเป็นหลัก

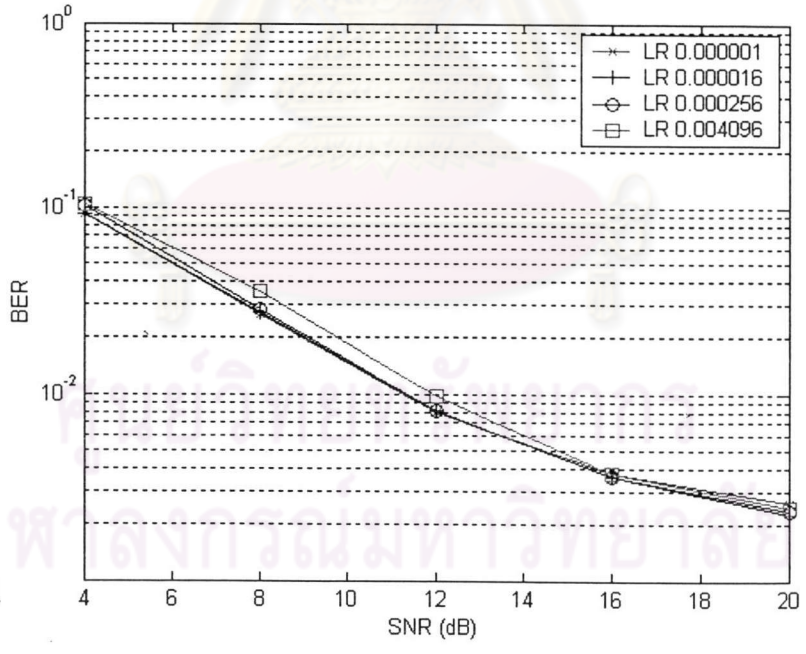
### 4.3.3 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงประสิทธิภาพ และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการประมาณช่องสัญญาณโดย รีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพ และค่าความถูกต้องในการประมาณของระบบ โดยในการจำลองระบบนั้นจะทำการทดสอบถึงผลกระทบของการกำหนดค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมที่ส่งผลต่อค่าความถูกต้องในการประมาณของระบบ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมไป 3 ค่า ได้แก่ 0.58 0.68 และ 0.78 จากนั้นจึงวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสำหรับกรณีต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบจะถูกกำหนดดังนี้ ค่าสูงสุดของความถี่ดอปเพลอร์เป็น 91 Hz และค่าอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.00002 นอกจากนี้แล้วในหัวข้อนี้ยังคำนึงถึงผลกระทบของการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ของระบบอีกด้วย โดยจะทำการจำลองระบบโดยกำหนดให้ค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมมีค่าเท่ากับ 0.68 แล้วจึงทำการจำลองระบบโดยปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ไปทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 0.000001 0.000016 0.000256 และ 0.004096 แล้ววัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ 2 ประเภท คือ ช่องสัญญาณที่มีค่าสูงสุดของความถี่ดอปเพลอร์เป็น 91 Hz และ 273 Hz ตามลำดับ เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการประมาณช่องสัญญาณ ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะช่องสัญญาณดังกล่าว

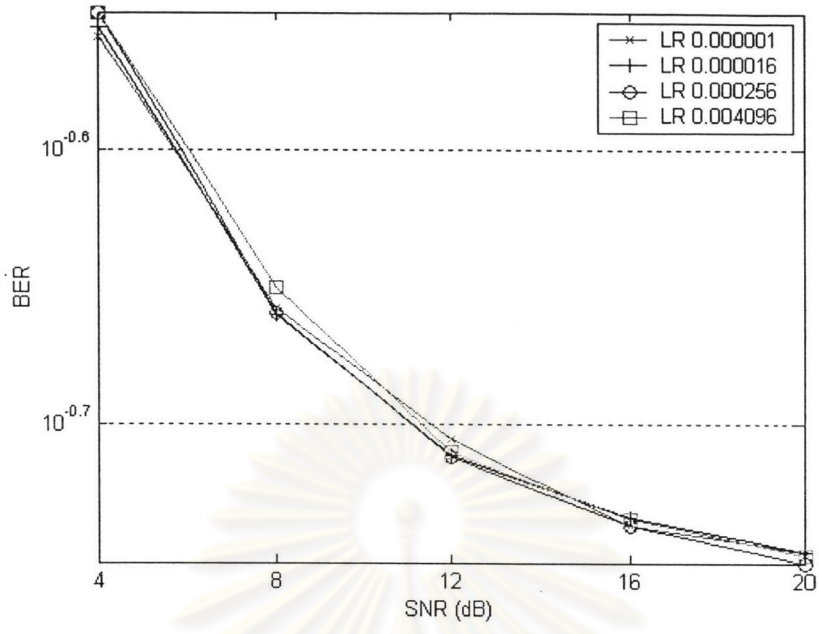
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 4.21 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Adaptive forgetting factor ที่ค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมค่าต่างๆ โดยกำหนดให้ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz




รูปที่ 4.22 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Adaptive forgetting factor ที่ค่าอัตราการเรียนรู้ค่าต่างๆ โดยกำหนดให้ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz




รูปที่ 4.23 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Adaptive forgetting factor ที่ค่าอัตราการเรียนรู้ค่าต่างๆ โดยกำหนดให้ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 273 Hz

จากผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.21 พบว่า การกำหนดค่าตั้งต้นของค่าสัมประสิทธิ์การลืมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการประมาณของระบบ ซึ่งจะเห็นได้จาก ค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมในกรณีที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.68 เนื่องมาจากถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การลืมของการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้นั้น จะสามารถปรับเปลี่ยนได้เองให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณในแต่ละขณะ แต่การปรับเปลี่ยนนั้นอาจกระทำได้ไม่รวดเร็ว หรืออาจใช้ระยะเวลามากในการปรับเปลี่ยนเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมถ้าค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์ที่กำหนดมีค่าไม่เหมาะสม ดังนั้นการกำหนดค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมให้มีค่าที่เหมาะสมใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็นมากที่สุดก็จะยังคงช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพในการประมาณสูงขึ้นกว่ากรณีที่การกำหนดค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การลืมเป็นไปอย่างไม่เหมาะสมได้อีกด้วย เมื่อพิจารณาผลกระทบของการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ของระบบในรูปที่ 4.22 และ 4.23 จะพบว่า ค่าอัตราการเรียนรู้ที่สามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุดสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz จะมีค่าเท่ากับ 0.000016 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราการเรียนรู้ที่สามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุดสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 273 Hz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.000256 จะพบว่ามี

ค่าน้อยกว่า เนื่องมาจากสำหรับช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่รวดเร็วค่าสัมประสิทธิ์การลืมที่มีความเหมาะสมของผลตอบสนองของช่องสัญญาณในแต่ละขณะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดถึงความรวดเร็วในการปรับเปลี่ยนตัวเองของค่าสัมประสิทธิ์การลืมสำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจึงควรกำหนดให้มีค่ามากเพื่อให้ระบบมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลืมได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้มีความเหมาะสมกับผลตอบสนองของช่องสัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในแต่ละขณะ ในทางตรงกันข้ามถ้าผลตอบสนองของช่องสัญญาณมีค่าค่อนข้างคงที่ หรือช่องสัญญาณมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่รวดเร็วค่าอัตราการเรียนรู้ควรกำหนดให้ควรมีค่าน้อยเพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การลืมมีค่าค่อนข้างคงที่ และไม่กวัดแกว่งมากนักซึ่งจะทำให้ระบบสามารถประมาณผลตอบสนองของช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

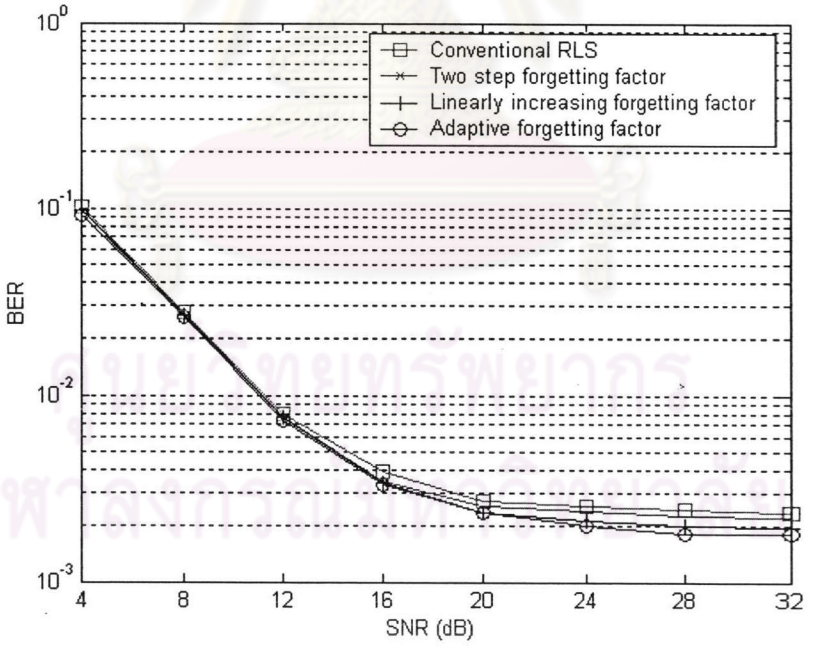
### 4.3.4 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ขาลง ที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการประยุกต์ใช้งานการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมแบบปกติ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพ และค่าความถูกต้องของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืมแบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมแบบปกติ โดยจะพิจารณาจากผลการจำลองระบบ ซึ่งการจำลองระบบนั้นจะทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิต ของกรณีการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืม 3 ประเภท ได้แก่ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น การประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ และการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้เพื่อทำการเปรียบเทียบผล ภายใต้สภาวะที่ช่องสัญญาณมีความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91Hz

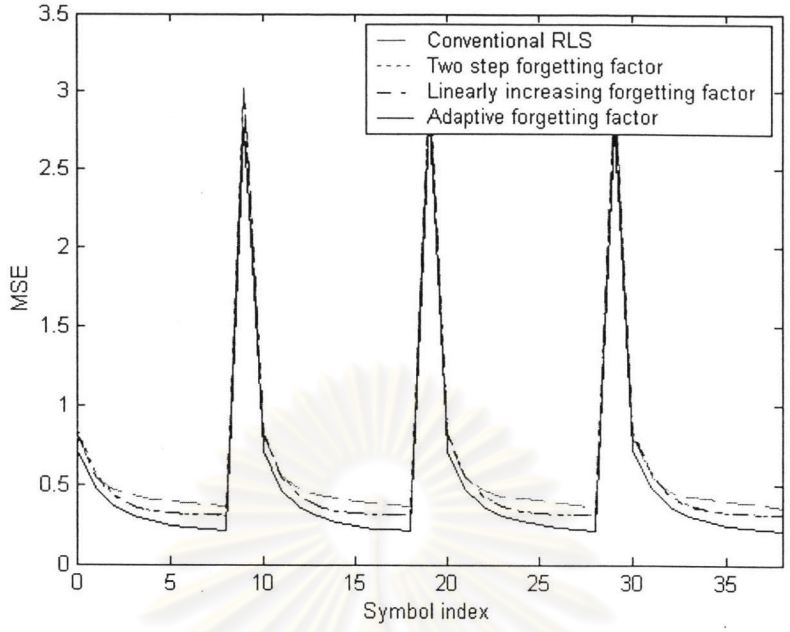
เพื่อพิจารณาถึงค่าความถูกต้องของการประมาณค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมประเภท

ต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการจำลองระบบโดยวัดค่าเฉลี่ยของผลต่างกำลังสองของความผิดพลาดของการประมาณค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณ ณ ตำแหน่งสัญลักษณ์นำร่องของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลอีกด้วย โดยในการจำลองระบบนั้นจะกำหนดให้ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดของช่องสัญญาณเท่ากับ 91Hz และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้มีค่าเท่ากับ 20 dB

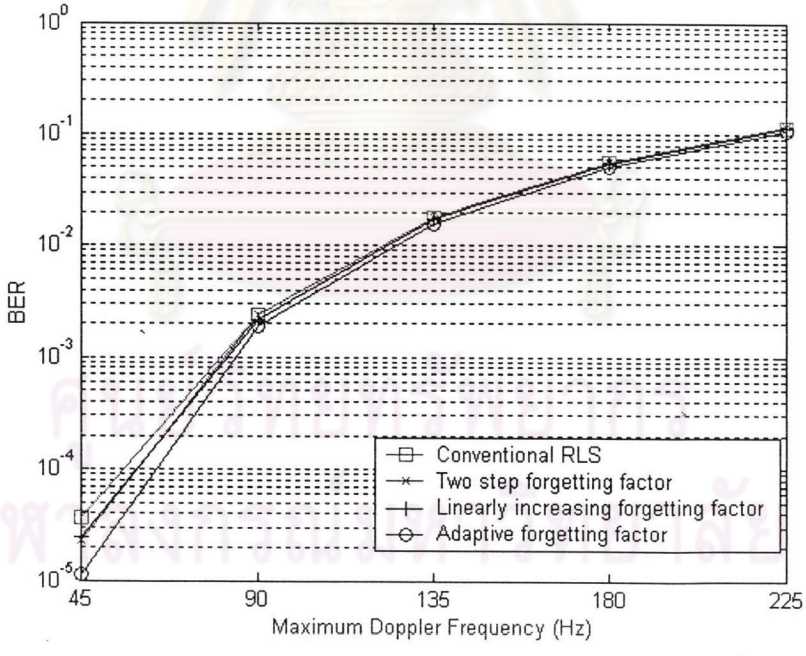
นอกจากนี้แล้ว เพื่อพิจารณาผลกระทบของความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ รวมถึงค่าความคงทนต่อผลกระทบดังกล่าวของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอถึงผลการจำลองระบบ ซึ่งในการจำลองระบบนั้นได้ทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 24 dB โดยปรับเปลี่ยนค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดที่ใช้ในการจำลองระบบไปทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ 45 90 135 180 และ 225 Hz เพื่อทำการเปรียบเทียบผล




รูปที่ 4.24 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืม เมื่อเปรียบเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึมแบบปกติ ที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91Hz




รูปที่ 4.25 MSE ที่ตำแหน่งสัญลักษณ์นำร่องของการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืม เมื่อเปรียบเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึมแบบปกติ ที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91Hz และ SNR เท่ากับ 20 dB



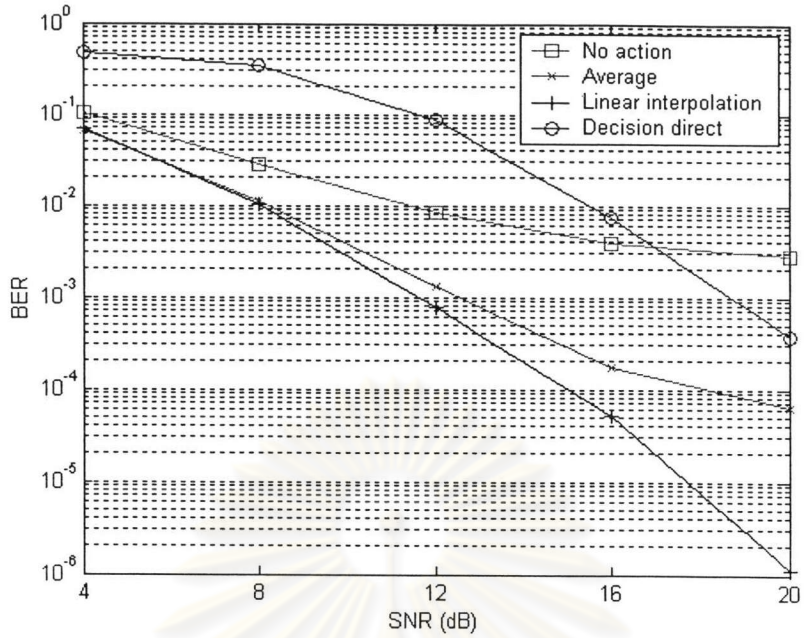

รูปที่ 4.26 MSE กระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืม เมื่อเปรียบเทียบกับการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึมแบบปกติ ที่ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดค่าต่าง ๆ และ SNR เท่ากับ 24 dB

เมื่อพิจารณาผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.24 จะพบว่ากระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์ที่มีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การลืมทั้ง 3 ประเภทนั้น จะสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์แบบปกติในทุกค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูง) โดยกระบวนการประมาณช่องสัญญาณที่สามารถให้ค่าอัตราควาผิดพลาดบิตเรียงจากต่ำไปสูงได้แก่ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น และการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมแบบปกติ ตามลำดับ นอกจากนี้แล้ว เมื่อพิจารณาค่าความถูกต้องในการประมาณของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมแบบต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.25 จะพบว่าค่าเฉลี่ยของผลต่างกำลังสองของความผิดพลาดระบบสอดคล้องที่ได้จากการจำลองระบบนั้น สอดคล้องกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้ กล่าวคือ ระบบที่มีค่าเฉลี่ยของผลต่างกำลังสองของความผิดพลาดต่ำก็จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำตามไปด้วย

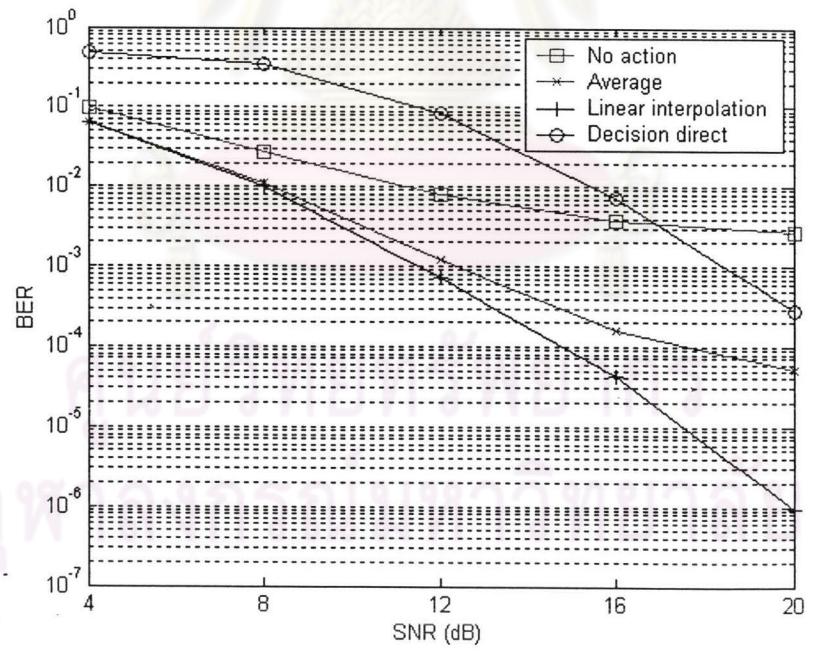
นอกจากนี้แล้วผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.26 ยังแสดงให้เห็นว่ากระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ สามารถทำงานได้ดีทั้งในสภาวะที่การเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว และเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ โดยที่ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้ มีประสิทธิภาพสูงสุด ตามมาด้วย การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น และการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมแบบปกติ ตามลำดับ

### 4.3.5 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ขาลง ที่มีการประยุกต์ใช้งานกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ เข้าร่วมกับกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์ประเภทต่าง ๆ

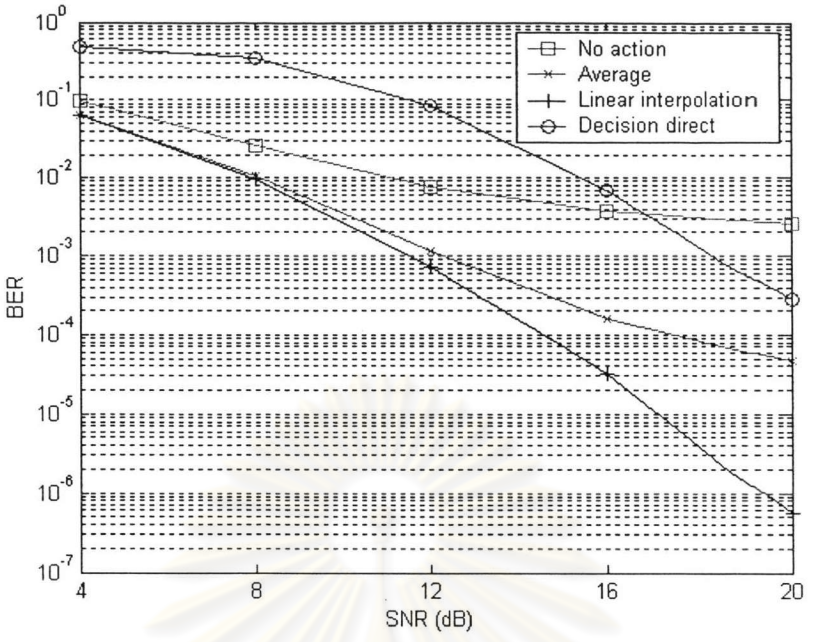
ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของการประยุกต์ใช้งานกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ เข้าร่วมกับกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์ประเภทต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและค่าความถูกต้องในการประมาณของระบบ โดยในการจำลองระบบเพื่อทดสอบผลกระทบดังกล่าว ได้กำหนดให้ระบบมีกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมแบบปกติ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น และการประมาณช่องสัญญาณโดยใช้ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้ ตามลำดับ แล้วประยุกต์ใช้กระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ เข้ากับกระบวนการในการประมาณช่องสัญญาณในประเภทต่าง ๆ ดังกล่าว แล้วจึงวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผล โดยในการจำลองระบบนั้นจะทำการวัดอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดของช่องสัญญาณเท่ากับ 91 และ 273 Hz เพื่อเปรียบเทียบผล นอกจากนี้แล้วเพื่อทดสอบความทนทานต่อความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะของช่องสัญญาณ และค่าความถูกต้องในการประมาณของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ ที่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล จึงกำหนดให้มีการทดสอบระบบที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 20 dB และจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดไปทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 45 90 135 180 และ 225 Hz สำหรับการประมาณช่องสัญญาณในแต่ละกรณีเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบดังกล่าว อีกด้วย



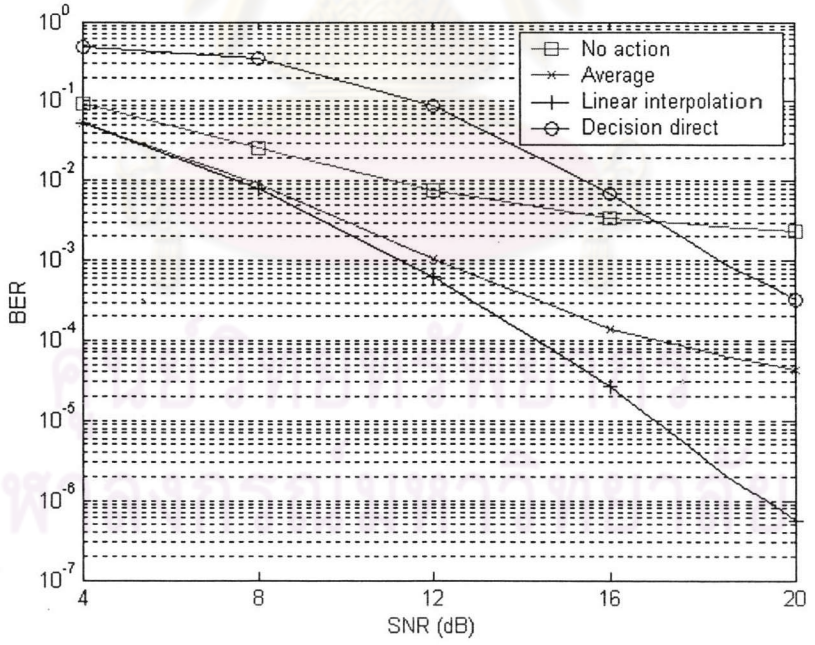

รูปที่ 4.27 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz



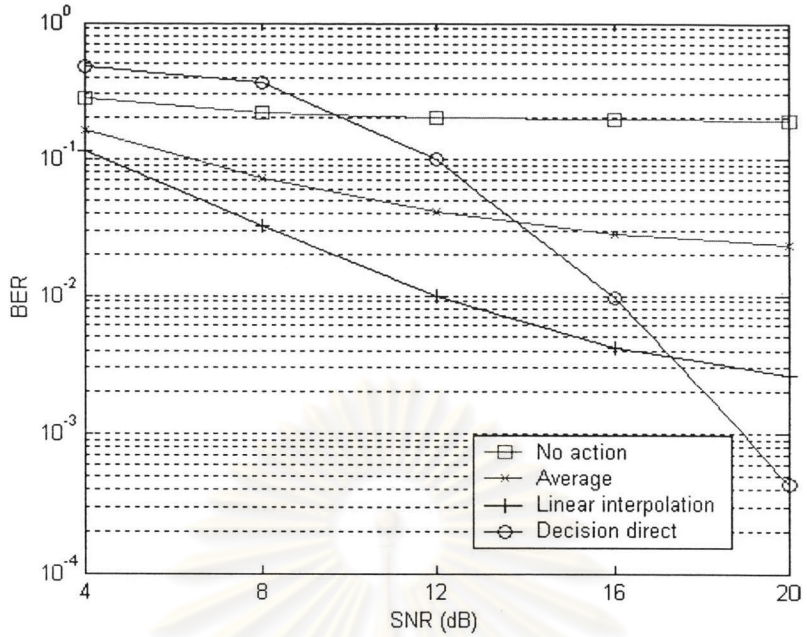

รูปที่ 4.28 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Two step forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz



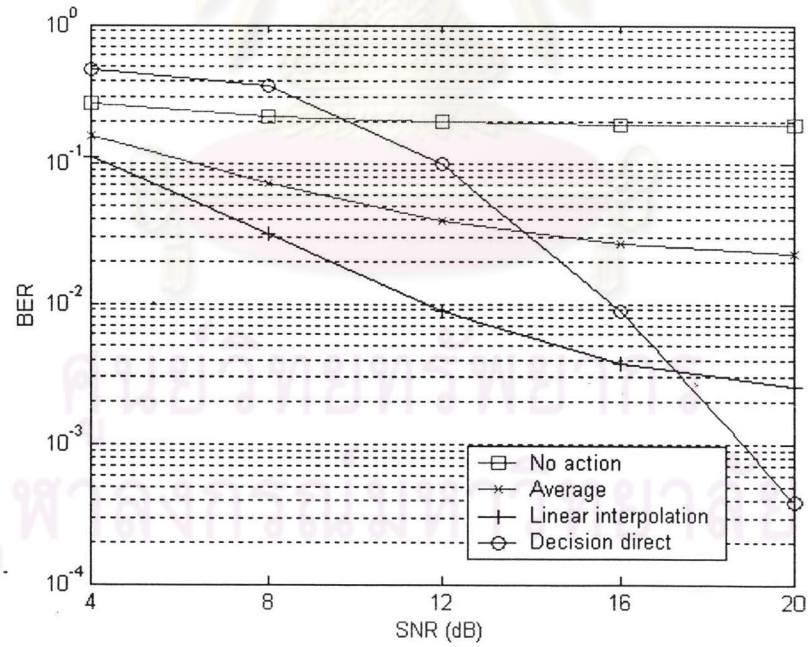

รูปที่ 4.29 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Linearly increasing forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz



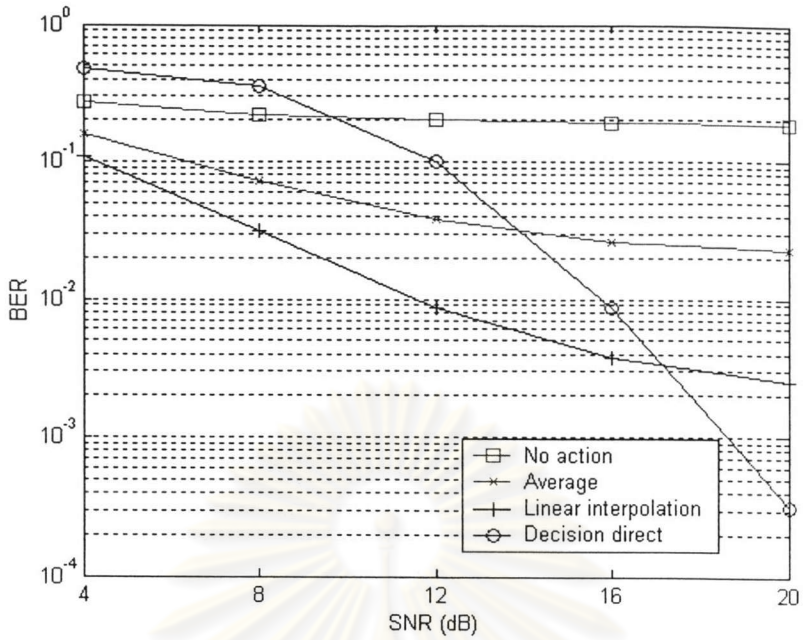

รูปที่ 4.30 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Adaptive forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz



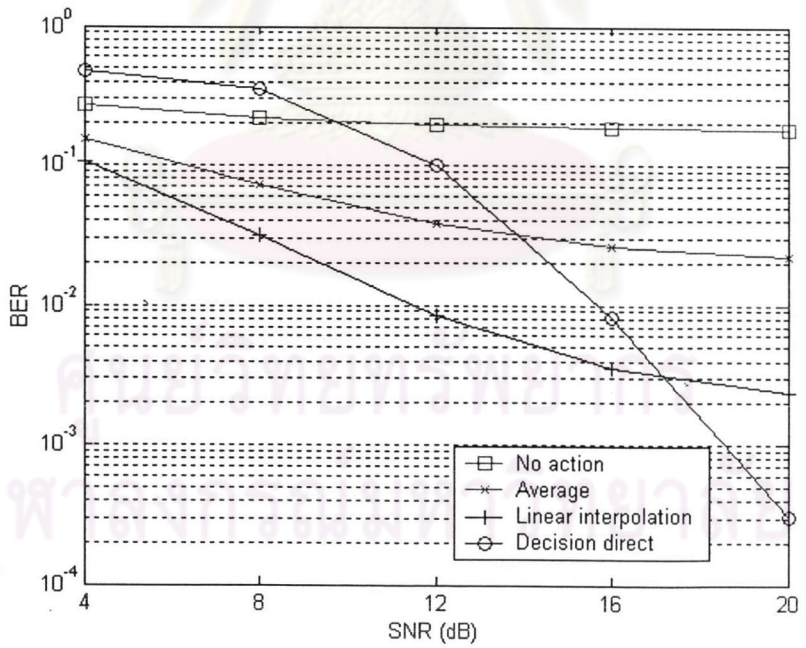

รูปที่ 4.31 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 273 Hz



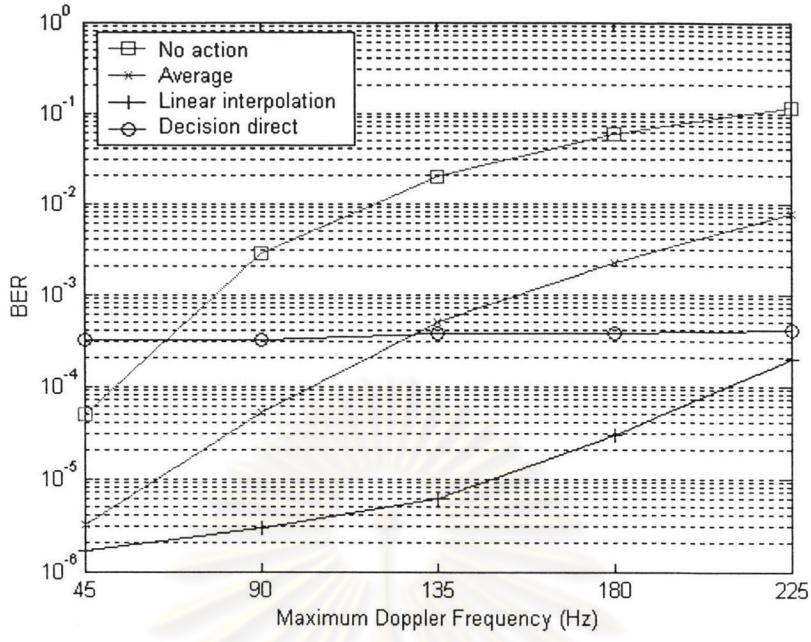

รูปที่ 4.32 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Two step forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 273 Hz



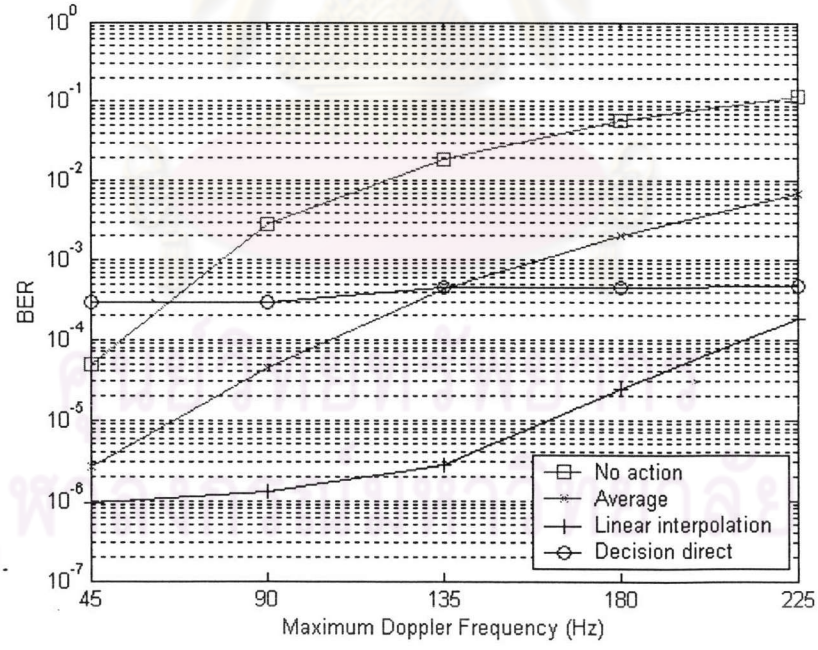

รูปที่ 4.33 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Linearly increasing forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 273 Hz



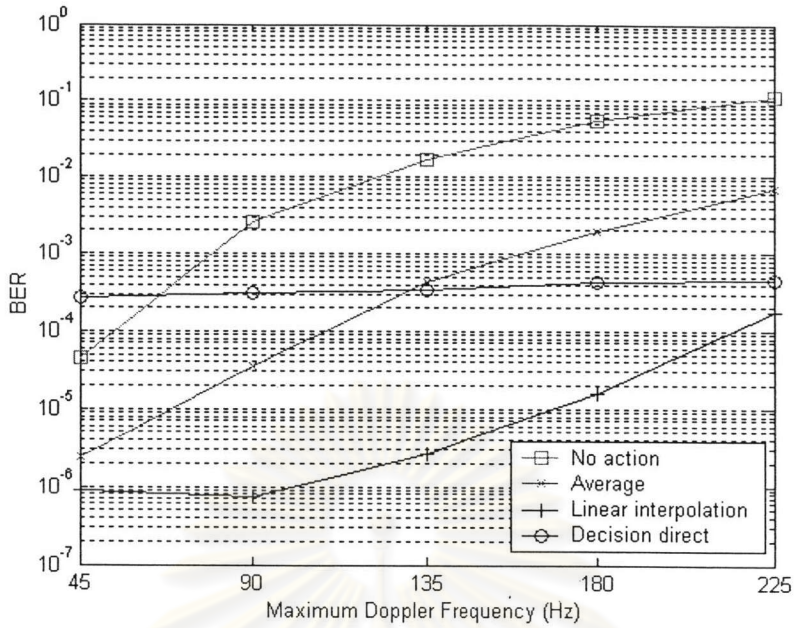

รูปที่ 4.34 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Adaptive forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ ความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 273 Hz



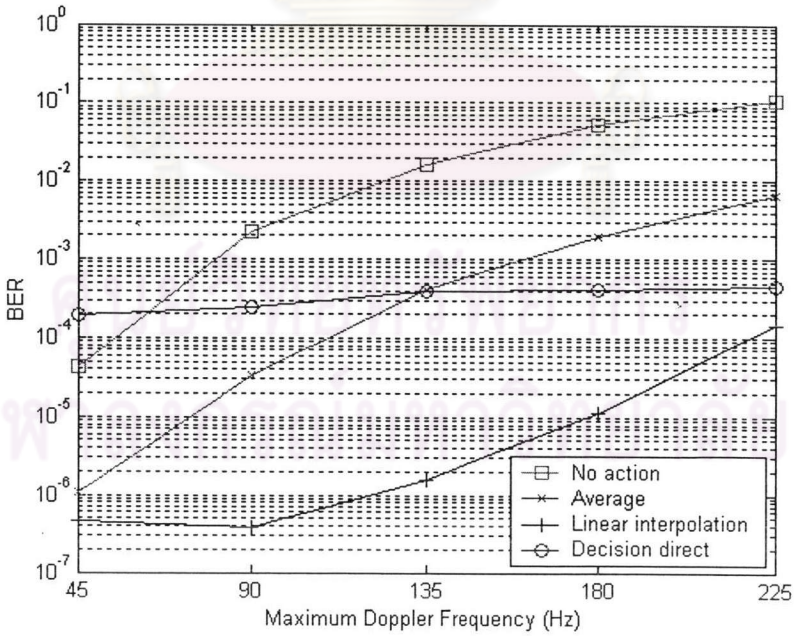

รูปที่ 4.35 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ SNR เท่ากับ 20 dB และมีการปรับเปลี่ยนความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด




รูปที่ 4.36 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Two step forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ SNR เท่ากับ 20 dB และมีการปรับเปลี่ยนความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด




รูปที่ 4.37 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Linearly increasing forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ SNR เท่ากับ 20 dB และมีการปรับเปลี่ยนความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด




รูปที่ 4.38 BER ของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ โดย RLS อัลกอริทึม ประเภท Adaptive forgetting factor ที่มีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ ที่ SNR เท่ากับ 20 dB และมีการปรับเปลี่ยนความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด

จากผลการจำลองระบบพบว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการจำลองระบบของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์ประเภทต่าง ๆ เมื่อใช้กระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบเดียวกัน จะพบว่าการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสามารถปรับตัวได้ จะสามารถให้ประสิทธิภาพของการตัดสินบิตข้อมูลสูงสุด ตามมาด้วยการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมสองระดับ การประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึม ประเภทค่าสัมประสิทธิ์การลืมเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น และการประมาณช่องสัญญาณ โดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์อัลกอริทึมแบบปกติ ตามลำดับ สำหรับทุก ๆ กระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล ดังเช่นการจำลองระบบในหัวข้อก่อนหน้า และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบต่าง ๆ จะพบว่า กระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่า กระบวนการการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการเฉลี่ย และกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูล ตามลำดับ ในทุกประเภทของกระบวนการประมาณช่องสัญญาณโดยรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด

เมื่อพิจารณาผลการจำลองระบบของกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจจะพบว่าการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจนั้นจะมีความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณได้ดีกว่ากระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลประเภทอื่น ๆ เมื่อประยุกต์ใช้งานกับช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าผลตอบสนองอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.31-4.34 ซึ่งในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามาก กระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจจะสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลประเภทอื่น อนึ่ง ข้อเสียที่สำคัญของกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจนั้น คือ ไม่ทนทานต่อสัญญาณรบกวนดังจะเห็นได้จากผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.31-4.34 ในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะ

ช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจนั้น จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลวิธีอื่น ๆ รวมถึงกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่รวดเร็วนักดังเช่นผลการจำลองระบบในรูปที่ 4.27-4.30 ซึ่งกระบวนการประมาณช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองของช่องสัญญาณจึงส่งผลให้กระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจมีประสิทธิภาพที่ไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลวิธีอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาผลการจำลองระบบของกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดจะพบว่าประสิทธิภาพด้านค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด ซึ่งแตกต่างจากกรณีการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลประเภทอื่น ๆ ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าสูงขึ้น และมีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลชนิดอื่น ๆ เมื่อประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองจากช่องสัญญาณอย่างรวดเร็ว หรือระบบที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่าสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจนั้น มีความคงทนต่อความรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองจากช่องสัญญาณที่ดี แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องของการเกิดความผิดพลาดสะสมซึ่งส่งผลให้กระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลโดยวิธีการชี้นำจากกระบวนการตัดสินใจมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีนักเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการปรับปรุงค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณภายในส่วนของสัญลักษณ์ข้อมูลแบบอื่น ๆ เมื่อประยุกต์ใช้งานกับระบบที่มีช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไม่รวดเร็วนัก หรือมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำ