

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นส่วนของผลการวิจัยและการวิจารณ์สมรรถนะที่ได้จากการจำลองระบบเพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบ MC-CDMA ที่ประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรม V-BLAST ที่ได้นำเสนอพร้อมด้วยสมรรถนะของอัลกอริทึมในการลดความซับซ้อนที่ได้นำเสนอ โดยในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ หัวข้อที่หนึ่ง กล่าวถึง ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ หัวข้อที่สอง จะกล่าวถึงสมรรถนะในเงื่อนไขต่าง ๆ ของระบบ MC-CDMA ที่ประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรม V-BLAST ที่ได้นำเสนอ ส่วนหัวข้อที่สาม กล่าวถึงค่าความซับซ้อนที่ลดลงของอัลกอริทึมที่นำเสนอและสมรรถนะในเงื่อนไขต่าง ๆ ของอัลกอริทึมนั้น ๆ

4.1 วิธีการจำลองระบบ

4.1.1 รหัสแม่ที่ใช้

รหัสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้รหัสออโธกอนัลชนิด Walsh เป็นหลัก ซึ่งรหัสประเภทนี้จะมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างกันเป็นศูนย์ ทั้งนี้จะสร้างรหัสนี้ได้โดยใช้กระบวนการทางเมตริกซ์ โดยเมตริกซ์พื้นฐานที่ใช้ในสร้างรหัส Walsh-Hadamard คือ

$$H_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4-1)$$

และรหัสความยาว 2^n สามารถที่จะสร้างได้โดยใช้กระบวนการดังนี้

$$H_n = \begin{bmatrix} H_{n-1} & H_{n-1} \\ H_{n-1} & -H_{n-1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4-2)$$

โดยเมตริกซ์ H_n ขนาด $2^n \times 2^n$ จะถูกสร้างจากเมตริกซ์ H_{n-1} ขนาด $2^{n-1} \times 2^{n-1}$ โดยเริ่มจากเมตริกซ์ H_0 ซึ่งแต่ละแถวของเมตริกซ์ H_n จะถูกใช้เป็นรหัสของผู้ใช้แต่ละคน โดยรหัสเหล่านี้จะมีคุณสมบัติตั้งฉากระหว่างกัน

ส่วนรหัสสุ่มเทียม (Pseudorandom code) นั้นเป็นรหัสที่ถูกสร้างขึ้นมาจากชิพรีจิสเตอร์โดยหากชิพรีจิสเตอร์ที่ใช้มีความยาว n รหัสที่ถูกสร้างขึ้นมาจะมีความยาว $2^n - 1$ ซึ่งจะมีค่าเป็นเลขคี่ที่ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในระบบการรับส่งข้อมูลที่มีการใช้กระบวนการ FFT (Fast Fourier Transform) [1] ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้รหัสที่มีความยาวเป็นจำนวนเท่าของ 2 ดังเช่นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

4.1.2 สัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ

สัญญาณรบกวน (noise) ที่ใช้ในการจำลองระบบนี้จะใช้สัญญาณรบกวน แบบ additive white Gaussian noise (AWGN) ที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดของสัญญาณเป็นศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนที่เปลี่ยนตามกำลังของสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการจำลองระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Signal to Noise Ratio (SNR) ที่ใช้นั่นเอง นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่ใช้นั้นจะเป็นค่าเชิงซ้อน มีทั้งองค์ประกอบในส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

4.1.3 เฟดดิ้งจากช่องสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการจำลองระบบที่มีผลของเฟดดิ้งตลอดทั้งผลการวิจัย โดยเฟดดิ้งนี้จะเป็นผลที่เกิดจากการเกิดพหุวิถีของสัญญาณซึ่งจะส่งผลกระทบต่อขนาด (Amplitude) ของคลื่นสัญญาณและเฟส (Phase) ของสัญญาณ โดยการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเฟดดิ้งนั้นจะเป็นไปตามมาตรฐาน COST207 ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 โดยที่ค่าขนาดของสัญญาณแต่ละวิถีที่เกิดขึ้นนั้น จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh) ยกเว้นขนาดเฟดดิ้งของสัญญาณวิถีตรงซึ่งจะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบไรเซียน (Rician) ส่วนค่าเฟสของเฟดดิ้งของสัญญาณแต่ละวิถีนั้นจะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) เมื่อพิจารณาในเชิงความถี่แล้ว ค่าเฟดดิ้งของแต่ละคลื่นพหุวิถีจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกัน ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติการเลือกความถี่ของช่องสัญญาณ โดยจะขึ้นอยู่กับประเภทของลักษณะสภาพแวดล้อมของช่องสัญญาณนั่นเองว่าเป็นแบบชนบท (rural) หรือแบบเมือง (urban)

4.1.4 ดอปเพลอร์

ในการจำลองระบบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีผลของดอปเพลอร์รวมอยู่ด้วย และจะส่งผลให้เกิดการเลื่อนทางความถี่ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างคลื่นพหุวิถี (ICI) ทั้งนี้จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ นอกจากนี้ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด (f_{max}) จะเป็นตัวกำหนดค่าสหสัมพันธ์ทางเวลาของเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อการจำลองระบบในกรณีที่กำหนดให้มีผลของความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณ โดยเมื่อค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่ามากขึ้น ค่าสหสัมพันธ์ทางเวลาของเฟดดิ้งจะมีค่าที่ต่ำ ทำให้ค่าความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณในหนึ่งเฟรมข้อมูลมีค่าสูงขึ้น

4.1.5 สมมติฐานต่างๆที่ใช้ในการจำลองระบบ

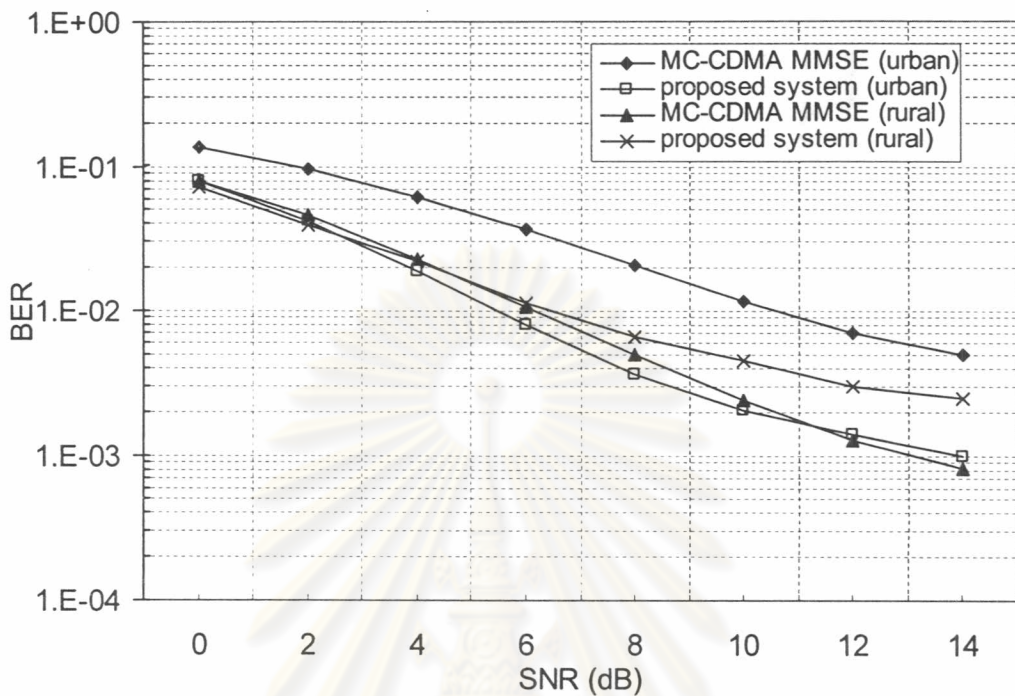
การจำลองระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีการกำหนดสมมติฐานเพิ่มเติมดังนี้

- พิจารณาเฉพาะกรณีข่ายเชื่อมโยงขาขึ้น (Uplink) โดยเครื่องรับของระบบที่ได้นำเสนอนี้จะติดตั้งอยู่ที่สถานีฐาน
- สถานีฐานสามารถทำการซิงโครไนซ์ (Synchronize) สัญญาณที่รับได้ของผู้ใช้ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์
- สถานีฐานสามารถทำการควบคุมกำลังส่งของสัญญาณจากผู้ใช้โทรศัพท์ที่ไร้สายได้อย่างสมบูรณ์
- ในการจำลองระบบนี้นั้นจะทำการส่งข้อมูลโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ตลอดทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
- โดยในทางภาครับที่สถานีฐานนั้นจะกำหนดให้ใช้สายอากาศทางภาครับทั้งสิ้นจำนวน 4 สายอากาศและกำหนดให้สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศคนละสายอากาศที่สถานีฐานนั้นมีความเป็นอิสระต่อกัน
- ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ระบบมีผู้ใช้โดยรวมทั้งสิ้น 16 คนโดยการแบ่งกลุ่มผู้ใช้ที่ใช้รหัสแอมป์ที่ซ้ำกันนั้นจะกำหนดให้มีผู้ใช้ 4 กลุ่ม โดยจะมีผู้ใช้กลุ่มละ 4 คนที่ใช้รหัสแอมป์ซ้ำกัน
- ในการจำลองระบบนี้จะกำหนดให้ใช้รหัสแอมป์ที่มีอัตราแอมป์ เท่ากับ 16 เป็นหลัก
- ในการจำลองระบบนี้นั้นจะมีการจำลองระบบซ้ำใหม่จำนวน 100 รอบแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของอัตราผิดพลาดบิตข้อมูล
- ในการจำลองระบบนี้ ในกรณีที่พิจารณาถึงผลของสัญญาณ ICI จะกำหนดให้มีการเติม cyclic prefix ที่มีความยาวที่เพียงพอเสมอ

4.2 สมรรถนะของระบบ MC-CDMA ที่ประยุกต์ใช้อัลกอริทึม V-BLAST ที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงสมรรถนะของระบบที่นำเสนอในเงื่อนไขต่างๆ โดยจะเริ่มต้นด้วยการเปรียบเทียบกับสมรรถนะของระบบ MC-CDMA เดิมที่มีความจุเท่ากันนั่นคือสามารถรองรับผู้ใช้ได้ 32 คน โดยกำหนดให้ระบบที่นำเสนอใช้รหัสแอมป์ที่มีอัตราแอมป์ (N) และจำนวนผู้ใช้ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน (M) เท่ากับ 16 และ 2 ตามลำดับ ส่วนในระบบ MC-CDMA เดิมนั้นจะกำหนดให้ใช้รหัสแอมป์ (N) เท่ากับ 32 และในระบบ MC-CDMA เดิมนั้นจะเลือกใช้เครื่องรับแบบ MMSE (Minimum mean square error) ซึ่งจะเป็นเครื่องรับที่มีความซับซ้อนที่สูงใกล้เคียงกับเครื่องรับของระบบ MC-CDMA ที่ประยุกต์ใช้อัลกอริทึม V-BLAST ที่นำเสนอ และจะกำหนดให้

ทั้ง 2 ระบบมีการติดตั้งสายอากาศทางภาครับจำนวน 2 สายอากาศเท่ากัน นอกจากนี้จะกำหนดให้มีการส่งสัญญาณนำโดยใช้ค่าความยาวของเฟรมข้อมูลเท่ากับ 150 สัญลักษณ์

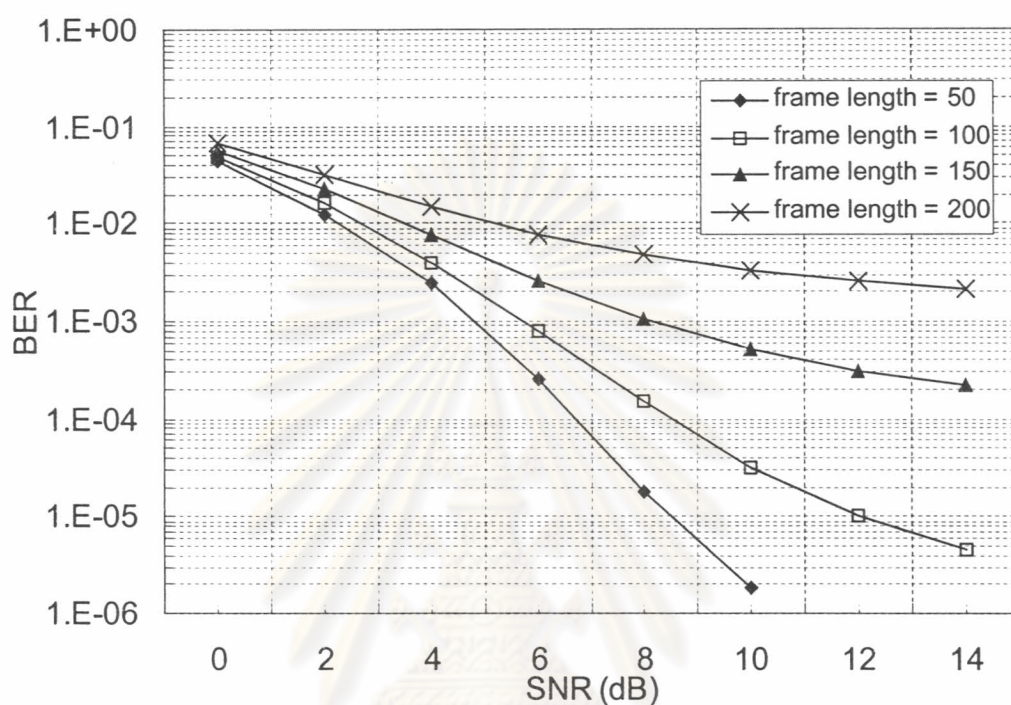


รูปที่ 4-1 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอบริเวณเปรียบเทียบกับระบบ MC-CDMA ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท และแบบเมือง

จากรูปที่ 4-1 นี้จะแสดงถึง อัตราความผิดพลาดบิต เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกำลังต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งจะทำให้การจำลองการรับส่งข้อมูลทั้งในบริเวณสภาพแวดล้อมแบบเมืองและสภาพแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าสมรรถนะของระบบที่นำเสนอนี้จะมีสมรรถนะที่ดีในสภาพแวดล้อมแบบเมืองมากกว่าในสภาพแวดล้อมแบบชนบท ทั้งนี้มีเหตุผลมาจาก ค่าออร์มของนัลลิ่งก์เวกเตอร์ ที่จะไปขยายสัญญาณรบกวนดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ส่วนในระบบ MC-CDMA ดั้งเดิมนั้นสมรรถนะของระบบจะเป็นไปในทางกลับกันโดยที่ในสภาพแวดล้อมชนบทจะให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่าในสภาพแวดล้อมแบบเมือง ทั้งนี้เพราะผลกระทบจากเฟดดิ้งของสภาพแวดล้อมแบบในเมืองจะมีคุณสมบัติการเลือกความถี่ที่สูงนั่นเอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่นำเสนอและระบบ MC-CDMA เดิมนั้นจะเห็นได้ว่าในสภาพแวดล้อมแบบเมืองนั้น ระบบที่นำเสนอมจะมีสมรรถนะที่เหนือกว่าระบบ MC-CDMA เดิม โดยประมาณ 4 dB ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบที่นำเสนอนี้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมแบบเมือง ส่วนในสภาพแวดล้อมแบบชนบทนั้น สมรรถนะของระบบที่นำเสนอมจะใกล้เคียงกับระบบ MC-CDMA เดิมในช่วงที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำๆ และจะมี

สมรรถนะที่ต่ำกว่าในช่วงอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ระบบที่นำเสนอนี้ก็จะยังมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานในสภาพแวดล้อมแบบชนบท เนื่องจากระบบที่นำเสนอจะสามารถใช้รหัสที่มีอัตราเผื่อที่ต่ำจึงสามารถทำให้ส่งข้อมูลด้วยอัตราที่สูงขึ้นได้



รูปที่ 4-2 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอเมื่อส่งข้อมูลด้วยค่าความยาวของเฟรมต่างๆ

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

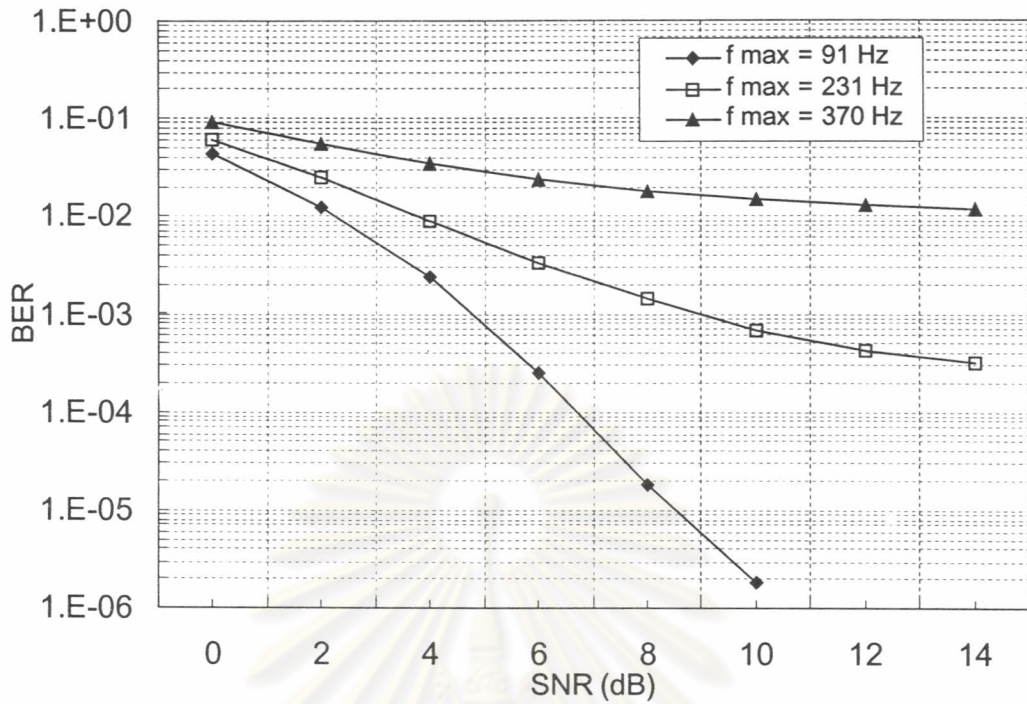
Frame length		50	100	150	200
Mean Square Error Of Estimation	SNR = 2	0.170	0.193	0.225	0.266
	SNR = 4	0.112	0.135	0.167	0.209
	SNR = 6	0.075	0.098	0.130	0.173
	SNR = 8	0.052	0.075	0.108	0.150
	SNR = 10	0.038	0.060	0.092	0.133
	SNR = 12	0.028	0.051	0.083	0.126
	SNR = 14	0.023	0.045	0.078	0.120

ในหัวข้อถัดมานี้จะทำการพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ โดยจะพิจารณาถึงผลของความผิดพลาดของการประมาณช่องสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อเป็นการ

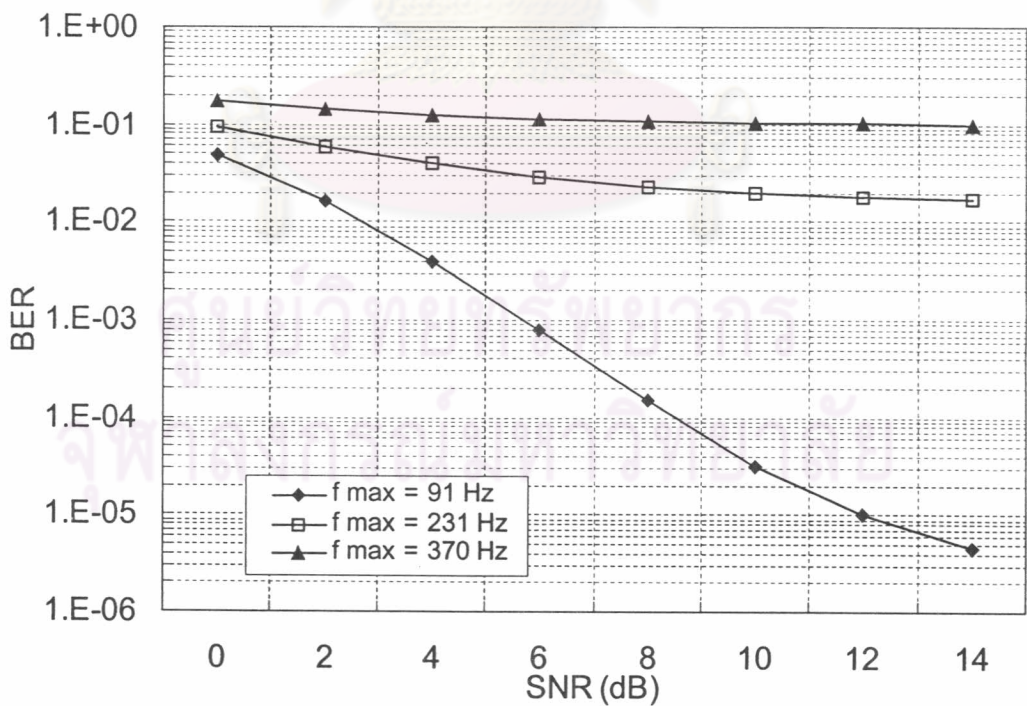
พิจารณาถึงความเหมาะสมที่จะนำระบบมาใช้ในทางปฏิบัติ โดยระบบที่ทำการจำลองนี้จะทำการจำลองที่ความถี่กลาง 5 GHz โดยมีแบนด์วิดท์รวมที่สามารถรองรับทั้งสิ้น 32 คลื่นพาหีย่อยและจะพิจารณาที่สภาพแวดล้อมแบบเมืองเป็นหลักและนอกจากนี้ยังกำหนดให้ความยาวของ cyclic prefix ที่ใช้มีความยาวที่เพียงพอต่อการขจัดผลของการเกิด ICI

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการส่งข้อมูลด้วยความยาวเฟรมที่เพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด (mean square error) ในการประมาณช่องสัญญาณจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าของความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณนี้จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนด้วย ทั้งนี้เพราะที่บริเวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำนั้นแสดงว่ามีสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณที่มาก จึงส่งผลทำให้มีความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณเกิดขึ้นตามมา

และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 4-2 ควบคู่ไปด้วยจะเห็นได้ว่าเมื่อเราใช้ค่าความยาวเฟรมสั้น ๆ ค่าสมรรถนะของระบบที่นำเสนอจะมีค่าที่ดีมากเนื่องจากว่า ค่าความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณนั้นมีค่าที่น้อย แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องคำนึงประสิทธิภาพของแบนด์วิดท์ที่ใช้ควบคู่ไปด้วย โดยยิ่งใช้ความยาวเฟรมที่มีค่าน้อย ค่าประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ที่ได้ก็จะยิ่งต่ำ โดยจากรูปที่ 4-2 นั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ความยาวเฟรม 150 จะทำให้ระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีและมีประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ที่เท่ากับร้อยละ 72.46 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ 10 เดซิเบล จะเห็นได้ว่าเมื่อความยาวเฟรมเพิ่มมากขึ้น ค่าความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้น 0.038-0.133 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบที่นำเสนอจะยังคงมีสมรรถนะที่ดีอยู่สามารถทนทานต่อความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริง



รูปที่ 4-3 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอเมื่อความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเปลี่ยนแปลงไป โดยส่งข้อมูลด้วยค่าความยาวของเฟรม เท่ากับ 50 สัญลักษณ์

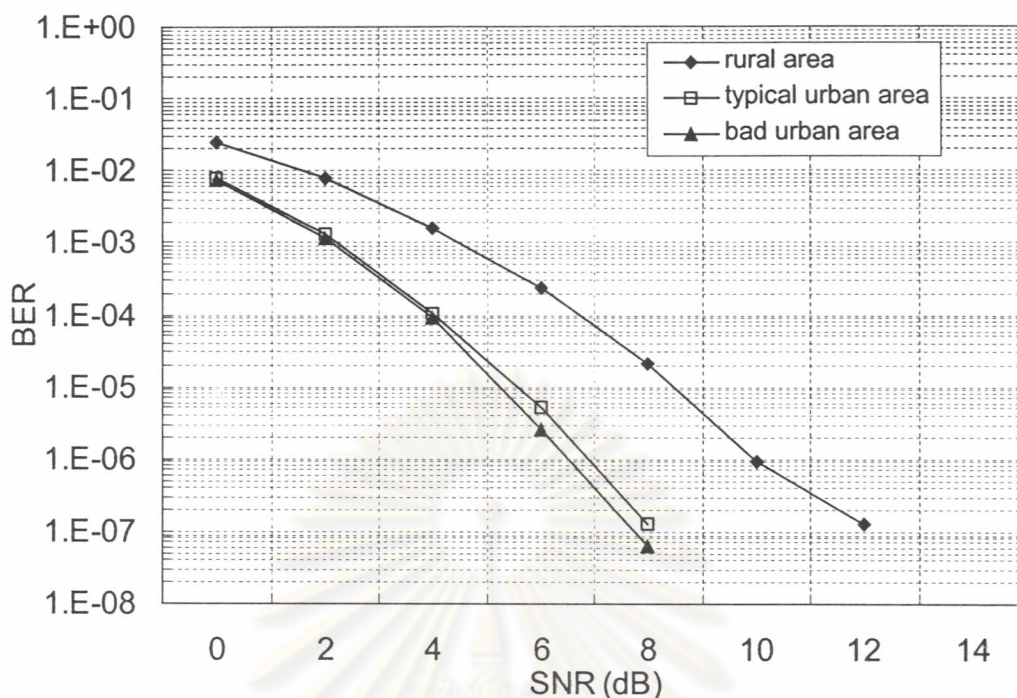


รูปที่ 4-4 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอเมื่อความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเปลี่ยนแปลงไป โดยส่งข้อมูลด้วยค่าความยาวของเฟรม เท่ากับ 100 สัญลักษณ์

ในหัวข้อถัดมาจะทำการพิจารณาถึงผลกระทบของความถี่ดอปเพลอร์ที่เกิดขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการจำลองระบบคือค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด (f_{max}) โดยค่าพารามิเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลและค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ โทรศัพท์ไร้สายดังแสดงไว้ในสมการที่ (2-16) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ค่าความถี่กลางที่ 5 GHz ดังนั้นค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของผู้ใช้โทรศัพท์ไร้สายเท่านั้น โดยในตลอดทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นจะกำหนดให้ใช้ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 91 Hz ซึ่งจะตรงกับค่าความเร็วของผู้ใช้โทรศัพท์ไร้สายที่ 20 km/hr และเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อหาผลของความถี่ดอปเพลอร์ที่เกิดขึ้น จะพิจารณาสมรรถนะของระบบที่นำเสนอนี้ที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเท่ากับ 231 Hz และ 370 Hz ซึ่งนั่นคือเมื่อผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 50 km/hr และ 80 km/hr ตามลำดับนั่นเอง

จากรูปที่ 4-3 จะแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบที่นำเสนอนั้นจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด 370 Hz หรือผู้ใช้โทรศัพท์ไร้สายมีความเร็วในการเคลื่อนที่ 80 km/hr นั้น สมรรถนะของระบบจะต่ำมากโดยเมื่อมีการส่งข้อมูลที่ค่าความยาวเฟรม 50 สัญลักษณ์หรือที่ระบบมีประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ร้อยละ 46.73 นั้น ระบบจะมีสมรรถนะที่ยอมรับได้หรือที่อัตราผิดพลาดบิตประมาณ 1×10^{-2} ที่ SNR 14 dB ส่วนการรับส่งข้อมูลที่ค่าความยาวเฟรม 100 นั้นระบบจะมีประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ร้อยละ 63.69 ซึ่งระบบที่นำเสนอนี้จะมีความผิดพลาดบิตที่สูง คือประมาณ 1×10^{-1} ที่ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 14 dB ทั้งนี้เนื่องจากความถี่คลื่นพาห้ที่ใช้ในการจำลองระบบมีค่าที่สูงจึงทำให้ระบบมีความไวต่อค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดที่เกิดขึ้นมากดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่า การรับส่งข้อมูลในกรณีที่ใช้โทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงนั้นจำเป็นต้องลดความยาวเฟรมให้น้อยลงอีกซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ที่มีค่าต่ำ ดังนั้นเพื่อที่จะส่งข้อมูลที่อัตราเร็วสูงนั้นจำเป็นต้องใช้แบนด์วิดท์โดยรวมที่มีค่ากว้าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



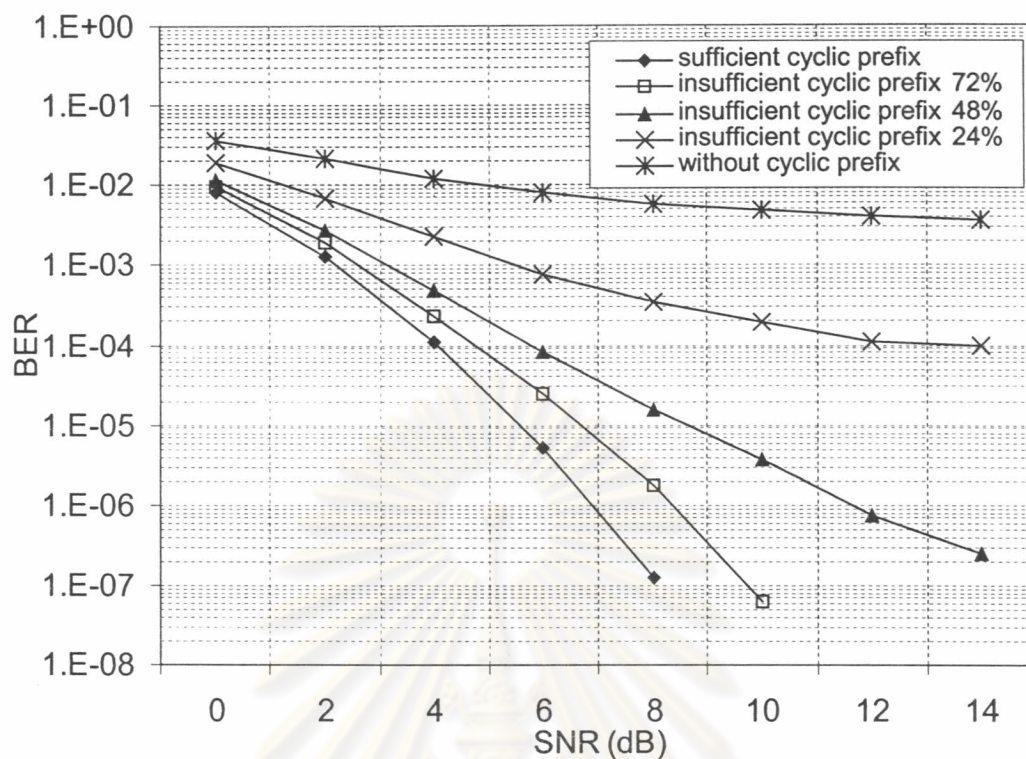
รูปที่ 4-5 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอในสภาพแวดล้อมรูปแบบต่างๆ เมื่อมีการเติม cyclic prefix ที่เพียงพอ โดยกำหนดให้มีการประมาณช่องสัญญาณอย่างถูกต้องสมบูรณ์

ในหัวข้อถัดมาจะพิจารณาสมรรถนะของระบบที่นำเสนอในสภาพแวดล้อมต่างๆ ในที่นี้คือ สภาพแวดล้อมแบบชนบท (rural area) สภาพแวดล้อมแบบเมือง (typical urban area) และสภาพแบบเมืองที่มีสิ่งกีดขวางมาก (bad urban area) โดยจะกำหนดให้การรับส่งข้อมูลของระบบนี้มีการประมาณช่องสัญญาณที่ถูกต้องสมบูรณ์ โดยจะแบ่งพิจารณาในกรณีที่มีการเติม cyclic prefix ที่มีความยาวเพียงพอ และในกรณีที่มีการเติม cyclic prefix ที่มีความยาวไม่เพียงพอซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างคลื่นพหุย่อย (Inter carrier interference : ICI)

จากรูปที่ 4-5 ซึ่งเป็นการจำลองการรับส่งข้อมูลในกรณีที่ cyclic prefix มีความยาวเพียงพอนั้น จะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบที่นำเสนอว่า ระบบที่นำเสนอจะสามารถทำงานได้ดีที่สุดในสภาพแวดล้อมแบบเมืองที่มีสิ่งกีดขวางมาก โดยทั้งนี้จะสอดคล้องดังสมการที่ (2-14) เนื่องจากว่าสภาพแวดล้อมแบบเมืองที่มีสิ่งกีดขวางมากนั้นจะมีการเกิดพหุวิถีและเกิดการกระเจิงที่สูง (rich scattering) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าออร์มของนัลลิงก์เวกเตอร์นั้นมีค่าต่ำซึ่งเมื่อสัญญาณถูกนำมาผ่านกระบวนการของอัลกอริทึม V-BLAST แล้วค่าออร์มของนัลลิงก์เวกเตอร์จะส่งผลไปขยายกำลังของสัญญาณรบกวน ดังนั้นสภาพแวดล้อมแบบเมืองที่มีค่าออร์มนี้ต่ำจึงมีสมรรถนะที่ดีกว่าสภาพแวดล้อมแบบชนบทซึ่งมีค่าออร์มของนัลลิงก์เวกเตอร์ที่สูง โดยเฉพาะ

สภาพแวดล้อมแบบเมืองที่มีสิ่งกีดขวางมากก็จะต้องเกิดการกระเจิงของสัญญาณในปริมาณที่มาก ทำให้สมรรถนะของระบบที่นำเสนอมีค่าที่ดีที่สุด

แต่อย่างไรก็ดีการจำลองการรับส่งข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4-5 นั้นเป็นกรณีที่กำหนดว่าการประมาณช่องสัญญาณทำได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์และใช้ cyclic prefix ที่มีความยาวเพียงพอซึ่งจะเป็นการขัดแย้งกับในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ในแง่ของการเกิดความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณในสภาพแวดล้อมแบบเมืองซึ่งมีการเกิดเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ที่มากจึงทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ (MAI) ในปริมาณที่มากกว่าในสภาพแวดล้อมในชนบท ดังนั้นจึงทำให้การรับส่งข้อมูลในสภาพแวดล้อมแบบเมืองนั้นเกิดความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณที่สูงกว่ามาก ทำให้สมรรถนะในทางปฏิบัติของระบบที่นำเสนอนี้ลดลงไปมากในสภาพแวดล้อมแบบเมืองเมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมแบบชนบท และนอกจากนี้ในแง่ของการเติม cyclic prefix ที่มีความยาวที่เพียงพอสำหรับในสภาพแวดล้อมแบบเมืองนั้นจะทำให้สูญเสียประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากค่าของเวลาประวิงสูงสุด (maximum delay time) ในสภาพแวดล้อมแบบเมืองที่มีสิ่งกีดขวางมากตามมาตรฐาน COST207 จะมีค่าเท่ากับ $6.6 \mu\text{sec}$ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ cyclic prefix ที่มีความยาวทั้งสิ้นสูงถึง 33 ชิป (กำหนดให้คาบของ 1 ชิปมีค่าเท่ากับ $0.2 \mu\text{sec}$) ซึ่งจะทำให้ต้องส่งข้อมูลด้วยค่าประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ที่ต่ำมาก และในสภาพแวดล้อมแบบเมืองนั้น ค่าเวลาประวิงสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $5.0 \mu\text{sec}$ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ cyclic prefix ทั้งสิ้น 25 ชิป จึงจะเพียงพอในการป้องกันสัญญาณแทรกสอดระหว่างคลื่นพหุย่อย (ICI) ที่เกิดจากการเกิดพหุวิถีนี้ได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนค่าเวลาประวิงสูงสุดของสภาพแวดล้อมแบบชนบทนั้นจะมีค่าเท่ากับ $0.6 \mu\text{sec}$ ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ cyclic prefix ที่มีความยาวเพียง 3 ชิป จึงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ที่ใช้มากนัก ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจึงได้พิจารณาถึงผลกระทบของความยาวของ cyclic prefix ที่ไม่เพียงพอนี้ โดยจะพิจารณาในสภาพแวดล้อมแบบเมือง (typical urban) เป็นหลัก ซึ่งความยาว cyclic prefix ที่เพียงพอนี้ จะต้องยาวทั้งสิ้น 25 ชิป โดยการจำลองระบบในหัวข้อนี้จะเลือกให้ใช้ cyclic prefix ที่มีความยาวเท่ากับ 18 ชิป 12 ชิป และ 6 ชิป ซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 72 48 และ 24 ของความยาวที่เพียงพอตามลำดับ รวมถึงจะพิจารณาในกรณีที่ไม่มีกรเติม cyclic prefix ด้วย

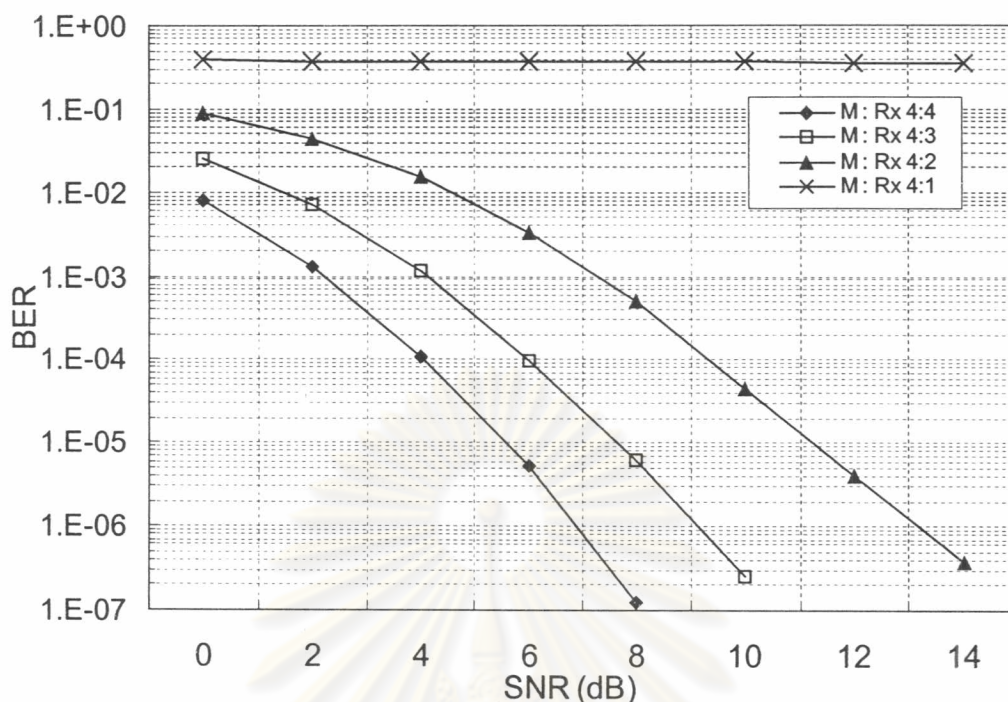


รูปที่ 4-6 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอนี้ เมื่อมีการเติม cyclic prefix ที่ไม่เพียงพอ โดยกำหนดให้มีการประมาณช่องสัญญาณอย่างถูกต้องสมบูรณ์

จากรูปที่ 4-6 จะเห็นถึงผลของสัญญาณแทรกสอดระหว่างคลื่นพาหีย่อย (ICI) ซึ่งเกิดจากการที่เติม cyclic prefix ที่มีความยาวไม่เพียงพอ นั้น จะส่งผลให้สมรรถนะของระบบที่นำเสนอนี้มีสมรรถนะที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีการเติม cyclic prefix นั้น สมรรถนะของระบบที่ได้จะต่ำมาก และเมื่อพิจารณาผลของสมรรถนะของระบบเมื่อลดความยาวของ cyclic prefix ลงทุก ๆ ร้อยละ 24 ของความยาวที่เพียงพอ โดยจะพิจารณาที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 10 dB เมื่อเติม cyclic prefix ที่มีความยาวร้อยละ 72 ของความยาวที่เพียงพอสมรรถนะของระบบจะลดลงประมาณ 1-2 dB และในกรณีที่ cyclic prefix มีความยาวร้อยละ 48 และ 24 ของความยาวที่เพียงพอ สมรรถนะของระบบจะลดลง 4 dB และ 7 dB ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอนี้จะมีความไวต่อผลกระทบของสัญญาณ ICI มาก แต่เนื่องจากระบบที่นำเสนอนี้ในกรณีที่เติม cyclic prefix ที่มีความยาวที่เพียงพอจะมีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำมาก จึงสังเกตได้ว่าในกรณีที่ใช้ cyclic prefix ความยาวร้อยละ 48 หรือประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวที่เพียงพอ ระบบที่นำเสนอนี้ก็จะยังคงมีสมรรถนะที่ดีอยู่

ในหัวข้อถัดมาจะพิจารณาถึงผลของการติดตั้งสายอากาศทางภาครับที่เพิ่มขึ้น ข้อแตกต่างสำคัญที่น่าสังเกตระหว่างระบบที่นำเสนอกับระบบ V-BLAST ดังเดิมนั้นคือ ในระบบ V-BLAST เดิมนั้นถูกเสนอมาให้ใช้ในระบบ Multiple-input Multiple-output ที่ทางภาคส่งและทางภาครับสามารถที่จะส่งข้อมูลความเร็วสูงผ่านทางสายอากาศหลายสายพร้อมกันโดยจะมีข้อจำกัดที่จำนวนสายอากาศทางภาครับควรที่จะมีจำนวนอย่างน้อยเท่ากับจำนวนสายอากาศทางภาคส่ง ดังนั้นถ้าต้องการที่จะส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่สูงขึ้นแล้วจะต้องติดตั้งสายอากาศทั้งสองฝั่งให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการติดตั้งระบบสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามระบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นเป็นระบบ MC-CDMA ที่นำเอาเพียงอัลกอริทึม V-BLAST มาประยุกต์ใช้เท่านั้น โดยมีได้มีข้อจำกัดดังเช่นในระบบ V-BLAST เดิม ทั้งนี้เพราะระบบที่นำเสนอจะพิจารณาสายอากาศหลายสายทางภาคส่งของระบบ V-BLAST เดิมแทนด้วยผู้ใช้โทรศัพท์ไร้สายที่ใช้รหัสแอมป์เดียวกันแทน จึงไม่ได้มีการส่งข้อมูลจากสายอากาศหลายสายอากาศทางภาคส่งแต่อย่างใด แต่จะมีเพียงผู้ใช้โทรศัพท์ไร้สายที่ส่งข้อมูลมายังสถานีฐานโดยใช้รหัสแอมป์เดียวกัน และเมื่อพิจารณาในแง่ของสายอากาศทางภาครับจะเห็นได้ว่าระบบที่นำเสนอจะใช้ตัวแปร Y ดังสมการที่ (3-1) มาใช้ในการประมวลผล ซึ่งจะเป็นการนำเอาสัญญาณที่รับได้จากแต่ละสายอากาศมาคูณกับรหัสแอมป์และสัมพันธ์ของช่องสัญญาณ แล้วจึงนำสัญญาณทั้งหมดจากทุกสายอากาศมารวมกัน ก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการ V-BLAST จึงกล่าวได้ว่าการติดตั้งสายอากาศหลายสายอากาศทางภาครับนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มไดเวอร์ซิตีทางตำแหน่ง (Space diversity) ของระบบเท่านั้น โดยการจำลองในส่วนนี้จะกำหนดให้พิจารณาสมรรถนะของระบบที่นำเสนอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนสายอากาศทางภาครับ โดยแสดงผลการทดลองไว้ดังรูปที่ 4-7 เมื่อสัญลักษณ์ M แทนจำนวนผู้ใช้ที่ใช้รหัสแอมป์ที่ซ้ำกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

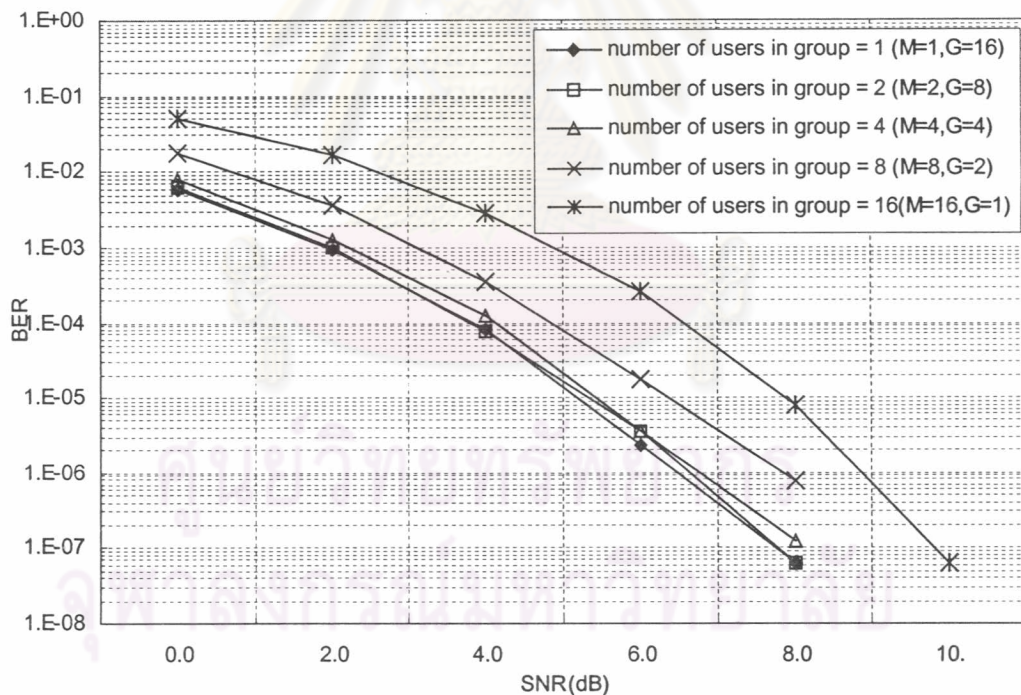


รูปที่ 4-7 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนสายอากาศทางภาครับ โดยกำหนดให้มีการประมาณช่องสัญญาณอย่างถูกต้องสมบูรณ์

จากรูปที่ 4-7 แสดงให้เห็นถึงผลของการติดตั้งสายอากาศทางภาครับเพื่อเพิ่มไดเวอร์ซิตีทางตำแหน่ง โดยระบบที่นำเสนอนี้มีข้อจำกัดที่จะต้องใช้จำนวนสายอากาศทางภาครับตั้งแต่ 2 สายอากาศขึ้นไป ทั้งนี้เพราะในกรณีที่มีการติดตั้งสายอากาศทางภาครับเพียง 1 สายอากาศนั้น เมตริกซ์ space-code cross correlation ในสมการที่ (3-2) ที่ได้ นั้น ค่าสมาชิกแต่ละหลักจะมีสหสัมพันธ์ระหว่างกันสูง ทำให้เมื่อทำการหาเมตริกซ์ผกผันแล้วหาค่าของเวกเตอร์นั้น ค่า norm ของเวกเตอร์ที่ได้จะมีค่าสูงมาก เมื่อนำเวกเตอร์นี้ไปใช้ในกระบวนการประมวลผลก็จะส่งผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณรบกวนให้มาก ทำให้มีความผิดพลาดในการตัดสินใจข้อมูลเกิดขึ้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้สายอากาศทางภาครับเพียง 1 สายอากาศ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะสูงมากจนทำให้ระบบที่นำเสนอนี้ไม่สามารถทำงานได้ และเมื่อทำการติดตั้งสายอากาศทางภาครับเพิ่มขึ้นสมาชิกในเมตริกซ์ space-code cross correlation นั้นจะเกิดจากสัญญาณที่ผ่านการทำ การปรับแก้แบบ maximum ratio combining (MRC) จากทุกสายอากาศทางภาครับมารวมกัน ทำให้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างหลักของเมตริกซ์ space-code cross correlation มีค่าต่ำลงจนกระทั่งระบบที่นำเสนอสถิติการทำงานได้อย่างเหมาะสมและมีสมรรถนะที่ดี โดยเมื่อทำการติดตั้งสายอากาศทางภาครับเพิ่มขึ้น 1 สายอากาศสมรรถนะของระบบจะดีขึ้นประมาณ 3 dB ทั้งนี้ในวิทยา

นิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการรับส่งข้อมูลในทางซ้ายเชื่อมโยงขาขึ้น ซึ่งทางภาครับหรือสถานีฐานสามารถรองรับการติดตั้งสายอากาศและการประมวลผลที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นได้

ในส่วนนี้จะทำการพิจารณาสมรรถนะของระบบที่นำเสนอโดยจะพิจารณาถึงผลกระทบของการจัดกลุ่มผู้ใช้ที่จะใช้รหัสแม่ซ้ำกัน ทั้งนี้จะกำหนดให้จำนวนผู้ใช้ทั้งหมดในระบบมีค่าคงที่เท่ากับ 16 คน และให้ ตัวแปร M คือจำนวนผู้ใช้ในกลุ่มที่ใช้รหัสแม่ที่ซ้ำกันและให้ตัวแปร G คือจำนวนกลุ่มที่มีทั้งหมดหรือจำนวนของรหัสแม่ที่ใช้นั่นเอง โดยการที่มีผู้ใช้ในกลุ่มเดียวกันมาก ๆ ก็จะทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดของผู้ใช้ที่ใช้รหัสแม่เดียวกัน (CAI) ที่สูง ซึ่งการกำจัดสัญญาณแทรกสอดชนิดนี้จะอาศัยอัลกอริทึม V-BLAST ส่วนสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ที่ใช้รหัสแม่ต่างกัน (MAI) นั้น จะไม่ขึ้นอยู่กับการจัดกลุ่มนี้แต่อย่างใด แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราแม่ของรหัสที่ใช้ และคุณสมบัติการเลือกความถี่ของช่องสัญญาณเป็นหลัก นอกจากนี้การที่มีจำนวนผู้ใช้ที่ใช้รหัสแม่ซ้ำกันมาก ๆ นั้นจะมีข้อดีที่จะทำให้ได้ความจุของระบบเพิ่มขึ้น โดยการจำลองการรับส่งข้อมูลในหัวข้อนี้ จะกำหนดให้ทางสถานีฐานติดตั้งสายอากาศทางฝั่งรับจำนวน 4 สายอากาศ

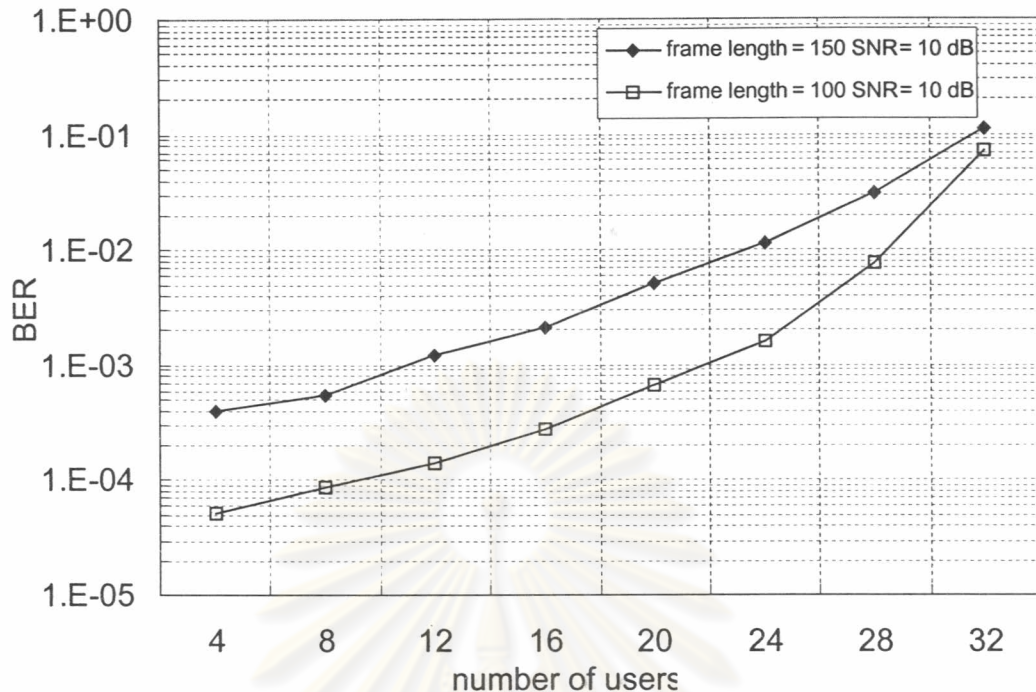


รูปที่ 4-8 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้ที่ใช้รหัสแม่ที่ซ้ำกัน โดยกำหนดให้มีการประมวลช่องสัญญาณอย่างถูกต้องสมบูรณ์

จากรูปที่ 4-8 จะเห็นได้ว่า สมรรถนะของระบบที่นำเสนอนี้จะต่ำลงมากอย่างชัดเจน หากจำนวนผู้ใช้ที่ใช้รหัสแฉ่ซ้ำกันนั้นมีค่าที่มากกว่าสายอากาศทางฝั่งรับซึ่งเท่ากับ 4 ดังเช่นในกรณีที่กำหนดให้มีผู้ใช้เพียงกลุ่มเดียว ($G=1, M=16$) โดยใช้รหัสแฉ่เดียวกันทั้งหมดสมรรถนะของระบบที่ได้จะต่ำที่สุด จากนั้นจะทำการแบ่งผู้ใช้ออกเป็น 2 และ 4 กลุ่ม นั่นคือจะมีจำนวนผู้ใช้ที่ใช้รหัสแฉ่ซ้ำกันในกลุ่มหนึ่ง ๆ 8 คนและ 4 คน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ายิ่งแบ่งกลุ่มออกเป็นจำนวนมากหรือยิ่งมีผู้ใช้รหัสแฉ่ซ้ำกันน้อย ๆ สมรรถนะของระบบก็จะยิ่งดี โดยจะสังเกตได้ว่าที่ $SNR = 8$ dB เมื่อ $G = 1$ อัตราผิดพลาดบิตจะอยู่ประมาณที่ 10^{-5} และเมื่อ $G = 4$ อัตราผิดพลาดบิตจะอยู่ที่ประมาณ 10^{-7} ดังนั้นจึงสามารถที่จะกล่าวได้ว่าการที่จะให้ระบบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีที่สุดนั้นจะต้องกำหนดให้ผู้ใช้ใช้รหัสแฉ่ที่แตกต่างกันให้เต็มที่เสียก่อน ตัวอย่างเช่นถ้ารหัสแบบ Walsh ที่ใช้นั้นมีอัตราแฉ่ เท่ากับ 16 ก็ควรจะให้ผู้ใช้ทั้ง 16 คนแรกใช้รหัสแฉ่ที่แตกต่างกันจนครบเสียก่อน (แบ่งออกเป็น 16 กลุ่ม) จึงค่อยให้ผู้ใช้หลังจากคนที่ 16 เป็นต้นไปเริ่มมาใช้รหัสแฉ่ที่ผู้ใช้ 16 คนแรกใช้ไปแล้ว โดยสมรรถนะของระบบในกรณีที่กำลังกล่าวมานี้ได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณารวมถึงเรื่องความจุของระบบที่นำเสนอด้วย โดยจะทำการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตกับจำนวนผู้ใช้ในระบบที่เปลี่ยนแปลงไปโดยกำหนดให้ใช้รหัสแฉ่ที่มีความยาวเท่ากับ 16 และให้จำนวนผู้ใช้สูงสุดที่ใช้ในการจำลองระบบเท่ากับ 32 คน โดยจะแบ่งออกเป็น 16 กลุ่ม ($M=2, G=16$) โดยให้ผู้ใช้ 16 คนแรกใช้รหัสแฉ่ที่แตกต่างกันจนครบทุกรหัสก่อน จากนั้นจึงให้ผู้ใช้ที่เหลือเริ่มใช้รหัสที่ซ้ำกับผู้ใช้ทั้ง 16 คนแรก ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ระบบที่นำเสนอมีสสมรรถนะดีที่สุดดังกล่าวไว้ในย่อหน้าที่แล้ว ทั้งนี้จะทำการจำลองระบบให้ใกล้เคียงกับในทางปฏิบัติโดยจะกำหนดให้มีการส่งสัญญาณนำและมีการประมาณช่องสัญญาณจริง และจะกำหนดให้ที่ความยาวเฟรมเท่ากับ 100 และ 150 สัญลักษณ์ หรือมีประสิทธิภาพแบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 63.69 และ 72.46 ซึ่งค่าความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-9 BER เฉลี่ยของระบบที่นำเสนอ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้ในระบบ

จากรูปที่ 4-9 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะของระบบที่นำเสนอเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนผู้ใช้ในระบบ จะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนของผู้ใช้ในระบบเพิ่มมากขึ้นอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้ก็จะสูงขึ้น เนื่องจากสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้รายหนึ่งจะมีสัญญาณแทรกสอดทั้งประเภท MAI และ CAI เพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยที่เมื่อเราต้องการให้ระบบที่นำเสนอนี้มีสมรรถนะที่มีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่า 10^{-2} ซึ่งถือเป็นอัตราผิดพลาดบิตที่ระบบมีสมรรถนะที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ก็จะได้เห็นว่าในสภาพแวดล้อมแบบเมื่อนี้ระบบที่นำเสนอนี้จะมีความจุสามารถรองรับผู้ใช้ได้ 24 -28 คน ที่ประสิทธิภาพแบนด์วิดท์หรือยลละ 63.69 -72.46 โดยใช้รหัสแรมที่มีอัตราแรมเพียง 16 เท่านั้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ความจุของระบบตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวข้างต้นนี้ รหัสแรมบางรหัสจะยังไม่ได้มีการถูกใช้ซ้ำ ซึ่งในกรณีที่รหัสแรมมีการถูกใช้ซ้ำจนครบหรือมีจำนวนผู้ใช้ในระบบทั้งสิ้น 32 คน สมรรถนะของระบบจะมีอัตราผิดพลาดบิตอยู่ที่ 10^{-1}

4.3 สมรรถนะและความซับซ้อนของเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึมลดความซับซ้อนต่าง ๆ ที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึมลดความซับซ้อนทั้ง 3 วิธีที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.2 - 3.4 นั่นคือ วิธีการละทิ้งผลของ MAI วิธีการหักล้าง

สัญญาณแบบผสม และวิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมที่มีการใช้วิธีการ multiple slicing ร่วมด้วย ซึ่งอัลกอริทึมเหล่านี้ได้ทำการปรับปรุงมาจากอัลกอริทึม V-BLAST เดิมที่ถูกนำเสนอไว้โดย Foschini ในปี ค.ศ. 1999 โดยในรูปกราฟผลการทดลองจะใช้สัญลักษณ์ย่อแทนดังนี้

- เครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิม จะใช้ตัวย่อว่า "V- BLAST"
- เครื่องรับที่ใช้วิธีการละทิ้งผลของ MAI (Ignored MAI V-BLAST Receiver) จะใช้ตัวย่อว่า "I-MAI BLAST "
- เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสม (Hybrid Interference Cancellation BLAST Receiver) จะใช้ตัวย่อว่า " HIC-BLAST"
- เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมที่ใช้วิธี multiple slicing เข้าร่วมด้วย (Multiple Slicing - Hybrid Interference Cancellation BLAST Receiver) จะใช้ตัวย่อว่า " MS-HIC BLAST"

และสัญลักษณ์ที่ใช้ในตารางแสดงค่าความซับซ้อนจะเป็นดังนี้

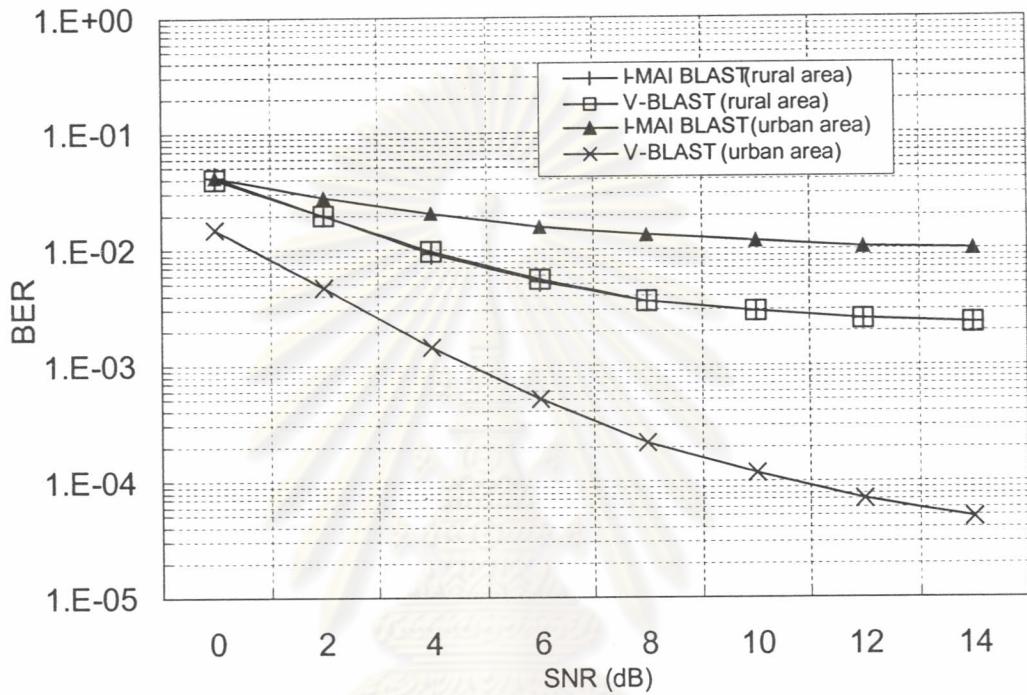
K แทน จำนวนผู้ใช้ในระบบ	N แทน อัตราแอมป์ของรหัสแม่ที่ใช้
P แทนจำนวนสายอากาศทางภาครับ	M แทน จำนวนผู้ใช้ที่เข้ารหัสแม่ที่ซ้ำกัน
G แทนจำนวนกลุ่มของผู้ใช้ที่เข้ารหัสแม่เดียวกัน	

ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมแบบเมืองเป็นหลักและจะทำการคำนวณค่าความซับซ้อน [32] ของอัลกอริทึมที่นำเสนอเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม V-BLAST ที่มีอยู่เดิมเพื่อแสดงให้เห็นถึงปริมาณของค่าความซับซ้อนที่ลดลงไปได้ อย่างชัดเจน ทั้งนี้ค่าความซับซ้อนจะคำนวณจากจำนวนครั้งการคูณเชิงซ้อนที่มีอยู่ในอัลกอริทึม นั้น ๆ เป็นหลัก

4.3.1 เครื่องรับที่ใช้วิธีการละทิ้งผลของ MAI (Ignored MAI V-BLAST Receiver)

เริ่มแรกในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องรับที่ลดความซับซ้อน โดยการละทิ้งผลของ MAI โดยจะมีหลักการที่จะทำให้ขนาดของเมตริกซ์ที่จะต้องทำกระบวนการหาเมตริกซ์ผกผันนั้นมีขนาดที่เล็กลงดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 โดยจะกำหนดให้ระบบมีผู้ใช้ทั้งสิ้น 16 คน และจะถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มคือ กลุ่มผู้ใช้ที่เข้ารหัสแม่เดียวกันกลุ่มละ 4 คน ดังนั้นในอัลกอริทึมเดิมนั้นเมตริกซ์ space-code cross correlation ที่จะถูกนำไปผ่านกระบวนการหาเมตริกซ์ผกผัน เพื่อหาค่าเมตริกซ์จะมีขนาดเท่ากับ 16×16 แต่ในเครื่องรับที่มีการละทิ้งผลของ MAI นี้เมตริกซ์ space-code cross correlation จะถูกแบ่งออกเป็นเมตริกซ์ย่อยขนาด 4×4 จำนวน 4 เมตริกซ์ แทน ซึ่งจะใช้เมตริกซ์ย่อยนี้แทนในขั้นตอนการหาเมตริกซ์ผกผัน โดยใน

อัลกอริทึมเดิมจะต้องทำการหาเมตริกซ์ผกผันขนาด 16×16 จำนวน 16 ครั้ง แต่ในเครื่องรับที่ลดความซับซ้อนโดยละทิ้งผลของ MAI นี้จะทำการหาเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์ขนาด 4×4 จำนวน 4 ครั้งแทน โดยค่าความซับซ้อนที่ลดลงนี้จะถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 4-2 โดยในเงื่อนไขของการส่งข้อมูลดังในการจำลองระบบนี้เครื่องรับประเภทนี้จะมีความซับซ้อนเพียงร้อยละ 24.56 ของอัลกอริทึม V-BLAST เดิมเท่านั้น



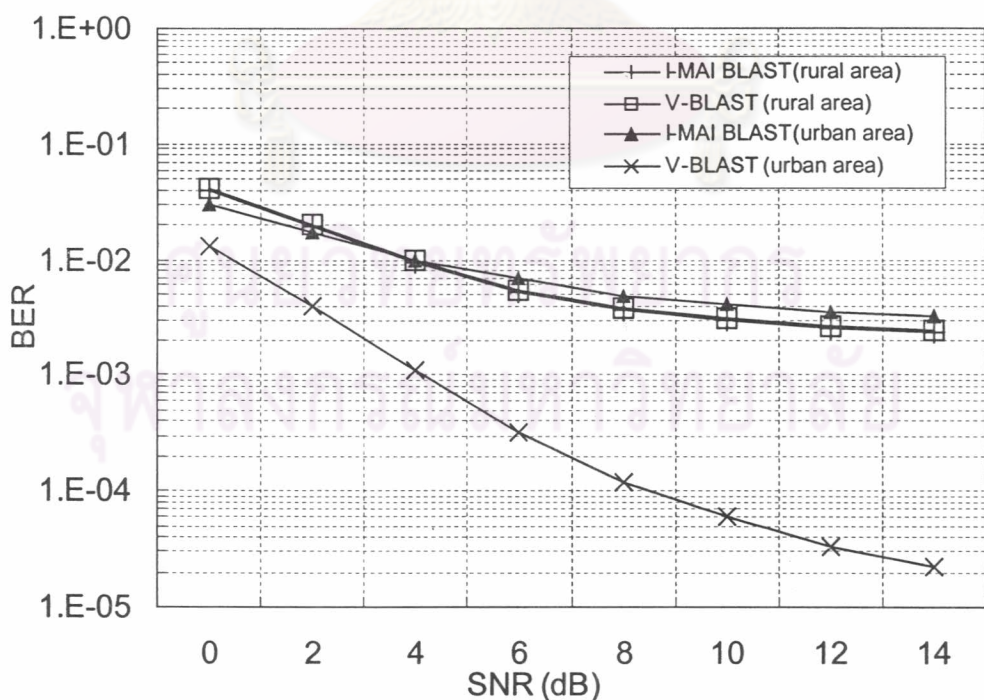
รูปที่ 4-10 BER เฉลี่ยแสดงสมรรถนะของเครื่องรับ I-MAI BLAST
เมื่อมีการใช้รหัสแรมที่มีอัตราเผ่เท่ากับ 16

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าความซับซ้อนของเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม
วิธีการละทิ้งผลของ MAI

receiver	complexity value	case K = 16 ,N=16	Percent of complexity
V-BLAST	$K^4 + 0.5K^3 + (NP + 4)K^2 + (4NP - 1)K$	89,072	100
I-MAI BLAST (G=4,M=4)	$(NP)K^2 + (4NP)K + M(G^4 + 0.5G^3 + 4G^2 - G)$	21,872	24.56

ผลของเครื่องรับที่ใช้วิธีการละทิ้งผลของ MAI นี้ ในสภาพแวดล้อมแบบเมืองนั้น จะมีสมรรถนะที่ต่ำลงมากเมื่อเทียบกับเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST แบบเดิม ทั้งนี้เพราะผลของสัญญาณ MAI นั้นเอง โดยในสภาพแวดล้อมแบบเมืองจะมีการเกิดเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่เกิดขึ้นมากทำให้รหัสแรมที่ใช้มีการสูญเสียความถี่จากระหว่างกันไป ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดแบบ MAI ที่มากตามมา ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องรับที่มีการละทิ้งผลของ MAI นี้ไปจะต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในสภาพแวดล้อมแบบเมืองนี้เอง จากนั้นจึงได้พิจารณารวมถึงกรณีที่มีสัญญาณแทรกสอด MAI ที่ลดลงไปด้วย โดยจะพิจารณาระบบที่ใช้รหัสแรมที่มีอัตราแรมที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4-11 ซึ่งจะทำให้การจำลองระบบด้วยเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 4-10 แต่จะกำหนดให้ใช้รหัสแรมที่มีอัตราแรมเท่ากับ 32 แทน ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของเครื่องรับประเภทที่มีการละทิ้งผลของ MAI ในสภาพแวดล้อมแบบเมืองนั้นจะมีสมรรถนะที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะของระบบที่ได้จะยังคงต่ำกว่าเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิมอยู่มาก

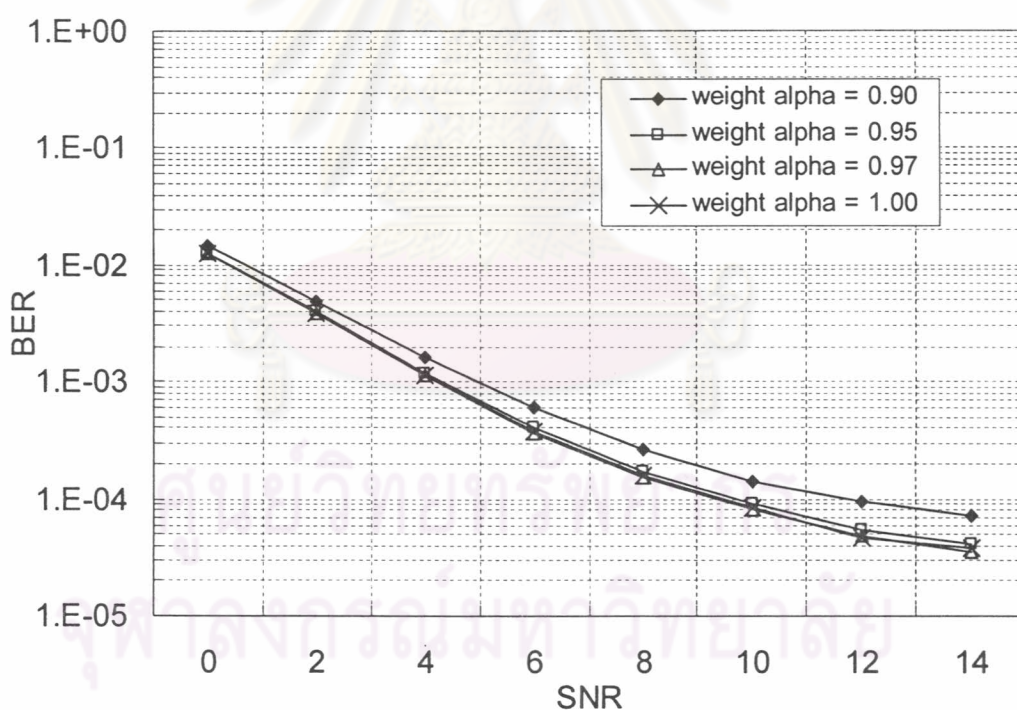
ในขณะที่ในสภาพแวดล้อมแบบชนบทนั้นเครื่องรับที่มีการละทิ้งผลของ MAI นี้จะมีสมรรถนะที่ดีเท่ากับเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิม ทั้งในกรณีที่ใช้รหัสแรมที่มีอัตราแรม 16 และ 32 ดังแสดงในรูปที่ 4-10 และ 4-11 สาเหตุที่ทั้ง 2 กรณีนี้ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันเพราะในสภาพแวดล้อมแบบชนบทนั้นมีปริมาณสัญญาณแทรกสอด MAI ที่น้อยอยู่แล้ว ดังนั้นการใช้รหัสแรมที่มีอัตราแรมที่เพิ่มขึ้นจึงไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบแต่อย่างใด



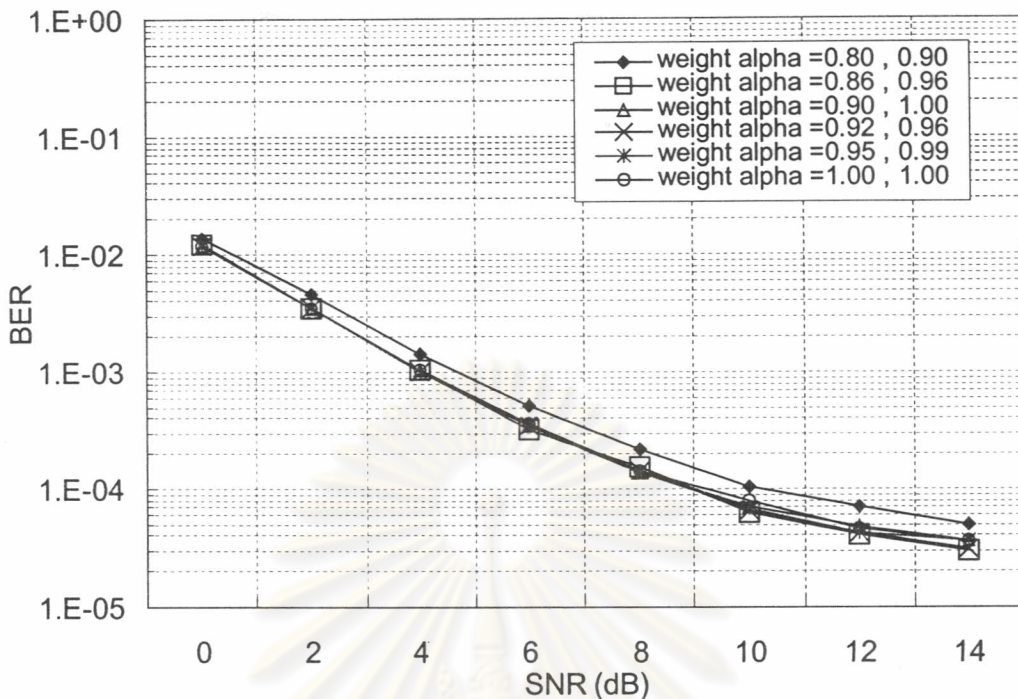
รูปที่ 4-11 BER เฉลี่ยแสดงสมรรถนะของเครื่องรับ I-MAI BLAST เมื่อมีการใช้รหัสแรมที่มีอัตราแรมเท่ากับ 32

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าความซับซ้อนของเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม
วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสม

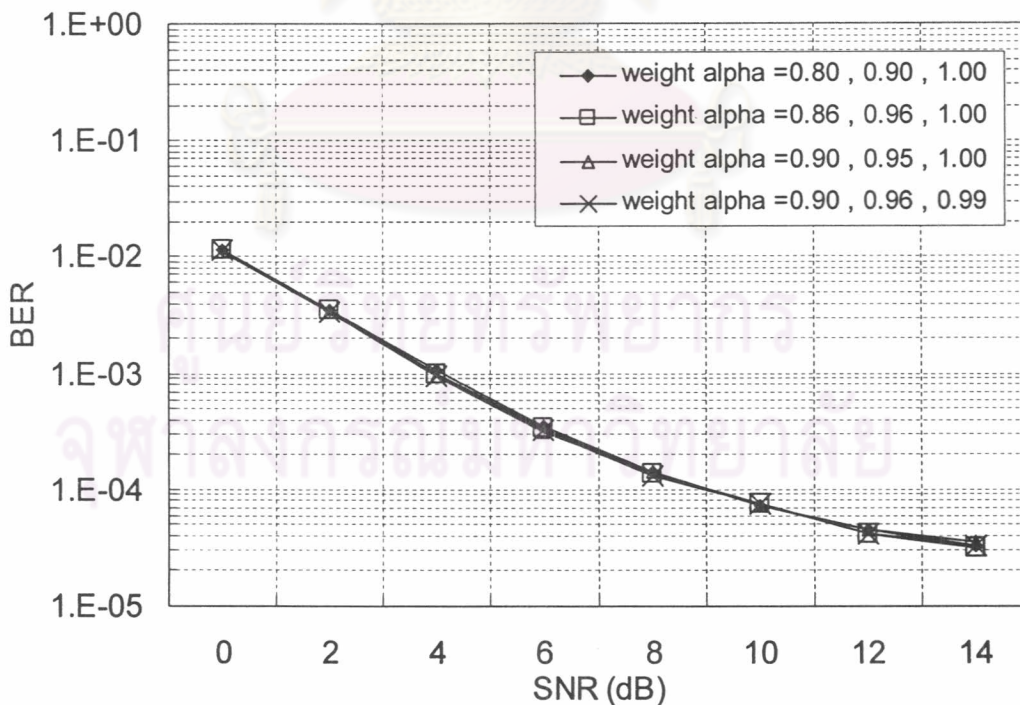
receiver	complexity value	case K = 16 ,N=16	Percent of complexity
V-BLAST	$K^4 + 0.5K^3 + (NP + 4)K^2 + (4NP - 1)K$	89,072	100
HIC BLAST 1state	$K^3 + (NP + 1.5)K^2 + (4NP + 1)K - 1 + (2K^2 + 2K)$	25,519	28.65
HIC BLAST 2state	$K^3 + (NP + 1.5)K^2 + (4NP + 1)K - 1 + 2(2K^2 + 2K)$	26,063	29.26
HIC BLAST 3state	$K^3 + (NP + 1.5)K^2 + (4NP + 1)K - 1 + 3(2K^2 + 2K)$	26,607	29.87



รูปที่ 4-12 BER เฉลี่ยแสดงสมรรถนะของเครื่องรับ HIC BLAST เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง
ค่าถ่วงน้ำหนักในกรณีที่มีการวนซ้ำ 1 รอบ



รูปที่ 4-13 BER เฉลี่ยแสดงสมรรถนะของเครื่องรับ HIC BLAST เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักในกรณีที่มีการวนซ้ำ 2 รอบ

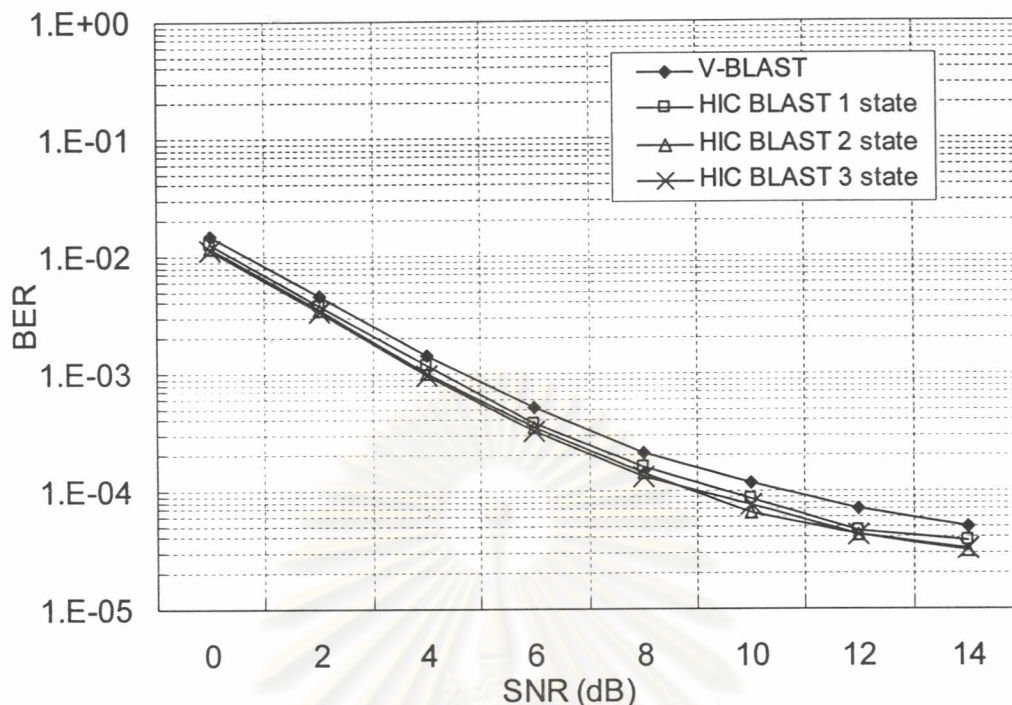


รูปที่ 4-14 BER เฉลี่ยแสดงสมรรถนะของเครื่องรับ HIC BLAST เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักในกรณีที่มีการวนซ้ำ 3 รอบ

ในการจำลองระบบของเครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมนี้จะกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในแต่ละรอบการวนซ้ำนั้นมีค่าที่ไม่เท่ากัน โดยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้จะเป็นดังสมการที่ (3-15) ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะมีค่าน้อยที่สุดในการวนซ้ำรอบแรก และจะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นในการวนซ้ำรอบถัดไป ทั้งนี้เป็นเพราะบิตข้อมูลของผู้ใช้ที่ถูกตัดสินออกมาในการวนซ้ำรอบแรกนั้นจะยังคงมีความน่าเชื่อถือที่ต่ำหรือมีโอกาสผิดพลาดที่สูงนั่นเอง ดังนั้นเมื่อบิตข้อมูลเหล่านี้ถูกนำไปป้อนเพื่อทำการตัดสินใจบิตข้อมูลของผู้ใช้รายถัดไปจึงถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าที่ต่ำ และในการวนซ้ำรอบถัดมาบิตข้อมูลที่ถูกตัดสินออกมาในรอบถัดมานี้จะมีความน่าเชื่อถือที่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อถูกถ่วงน้ำหนักจึงถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าที่สูงขึ้น

จากรูปที่ 4-12 ถึง รูปที่ 4-14 เป็นตัวอย่างการเลือกชุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้กับเครื่องรับประเภทนี้เมื่อมีจำนวนรอบการวนซ้ำ 1 ถึง 3 รอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมรรถนะของเครื่องรับที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะไม่แตกต่างจากกรณีที่ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1.00 ในทุกรอบการวนซ้ำมากนัก ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องให้มีการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักนี้แต่อย่างใด โดยในผลการทดลองต่อจากนี้จะกำหนดให้ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเป็น 1.00 ทั้งหมดหรือไม่มีการถ่วงน้ำหนักนั่นเอง ซึ่งก็จะทำให้ค่าความซับซ้อนที่ได้ลดลงไปด้วย

จากรูปที่ 4-15 ซึ่งแสดงสมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมนี้เทียบกับเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิมโดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเป็น 1.00 ทั้งหมด จะเห็นได้ว่าเครื่องรับนี้จะให้สมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิม ประมาณ 1-2 dB ในสภาพแวดล้อมแบบเมืองและเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีการวนซ้ำ 1-3 รอบนั้น จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของระบบที่ได้จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนักโดยเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการวนซ้ำขึ้นเป็น 3 รอบ สมรรถนะของเครื่องรับที่ได้จะไม่แตกต่างจากการที่ใช้จำนวนการวนซ้ำเพียง 2 รอบ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนการวนซ้ำขึ้นนั้นจะไม่ส่งผลในการเพิ่มความน่าเชื่อถือของบิตข้อมูลที่ทำการตัดสินใจออกมาในรอบถัดไปมากนัก ถึงแม้ค่าความซับซ้อนที่เกิดจากการเพิ่มจำนวนรอบการวนซ้ำขึ้นนั้นจะไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาถึงเวลาประวิงที่ใช้ในการประมวลผลการเพิ่มจำนวนรอบการวนซ้ำขึ้นจะทำให้เสียเวลาในส่วนนี้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาควบคู่กับสมรรถนะของเครื่องรับที่ได้ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนักดังกล่าวข้างต้น จึงกล่าวได้ว่าการใช้การวนซ้ำ 1 รอบนั้นจะทำให้เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4-15 BERเฉลี่ย แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับ HIC BLAST กับเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิม

4.3.3 เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี Multiple Slicing (Multiple Slicing Hybrid Interference Cancellation BLAST Receiver)

เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี multiple slicing นี้ จะมีค่าความซับซ้อนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างแบบผสมธรรมดาที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ทั้งนี้เพราะการผนวกกระบวนการ multiple slicing เข้าไปด้วยจะเป็นการเพิ่มความซับซ้อนขึ้นโดยจะพิจารณาถึงสัญลักษณ์ข้อมูลที่เป็นไปได้หลาย ๆ สัญลักษณ์แทนที่จะเป็นเพียงสัญลักษณ์ข้อมูลเดียว แล้วนำเอาสัญลักษณ์ข้อมูลที่เป็นไปได้เหล่านี้ไปทดลองผ่านกระบวนการต่าง ๆ ของเครื่องรับต่อไป แล้วจึงเลือกตัดสินสัญลักษณ์ข้อมูลนั้นในภายหลัง โดยเลือกจากสัญลักษณ์ข้อมูลที่จะทำให้เกิดค่าระยะความผิดพลาดรวมต่ำที่สุดดังแสดงไว้ในรายละเอียดของหัวข้อที่ 3.4 โดยทั้งนี้การทำ multiple slicing จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ตัวเป็นสำคัญ คือ พารามิเตอร์ S หรือจำนวนสัญลักษณ์ข้อมูลที่เป็นได้ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาและพารามิเตอร์ T หรือค่าจำนวนรอบของการบวกค่าระยะความผิดพลาดสะสมก่อนที่จะทำการตัดสินบิตข้อมูลแต่ละครั้ง โดยค่าความซับซ้อนของเครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี multiple slicing ที่ค่าพารามิเตอร์ S และ T ต่าง ๆ ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 4-4 และ 4-5

ตารางที่ 4-4 แสดงค่าความซับซ้อนของเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม
วิธีการหากล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี Multiple Slicing

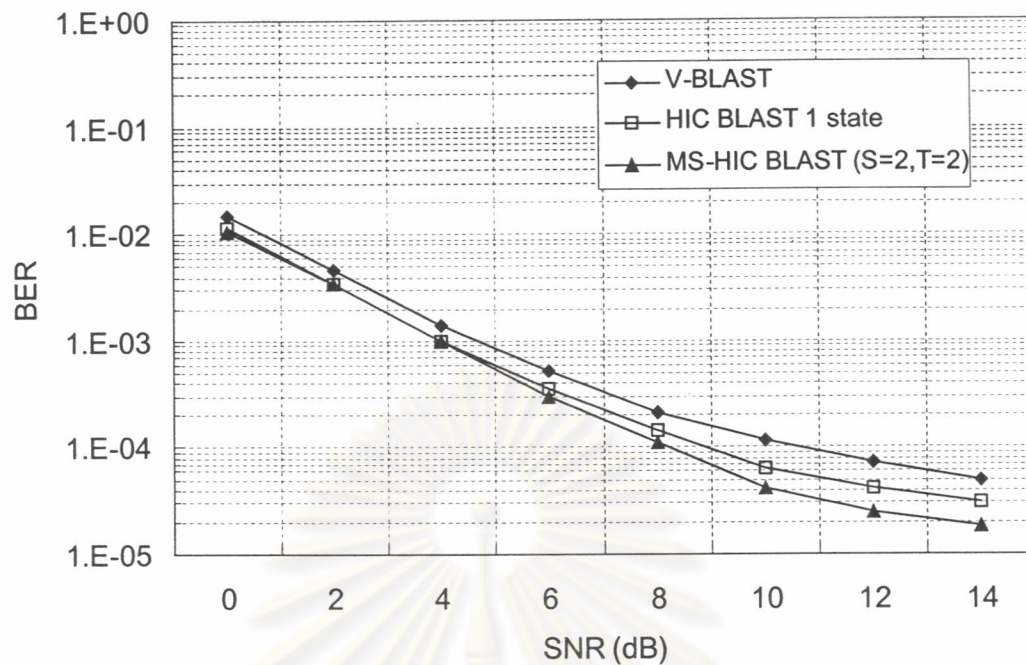
receiver	complexity value	case K = 16 ,N=16		
		(s=1,T=1)	(S=2,T=2)	(S=4, T=4)
MS-HIC BLAST	$K^3 + (NP + 1.5)K^2 + (4NP + 1)K - 1 + [A_1 + B_1]$	25,519	26,153	60,797

เมื่อ $A_1 = \sum_{t=1}^{T-1} [(2K+2)s^{t-1} + 2s^t]$ และ $B_1 = (K-T+1)(2K+2)s^{T-1} + 2s^T$

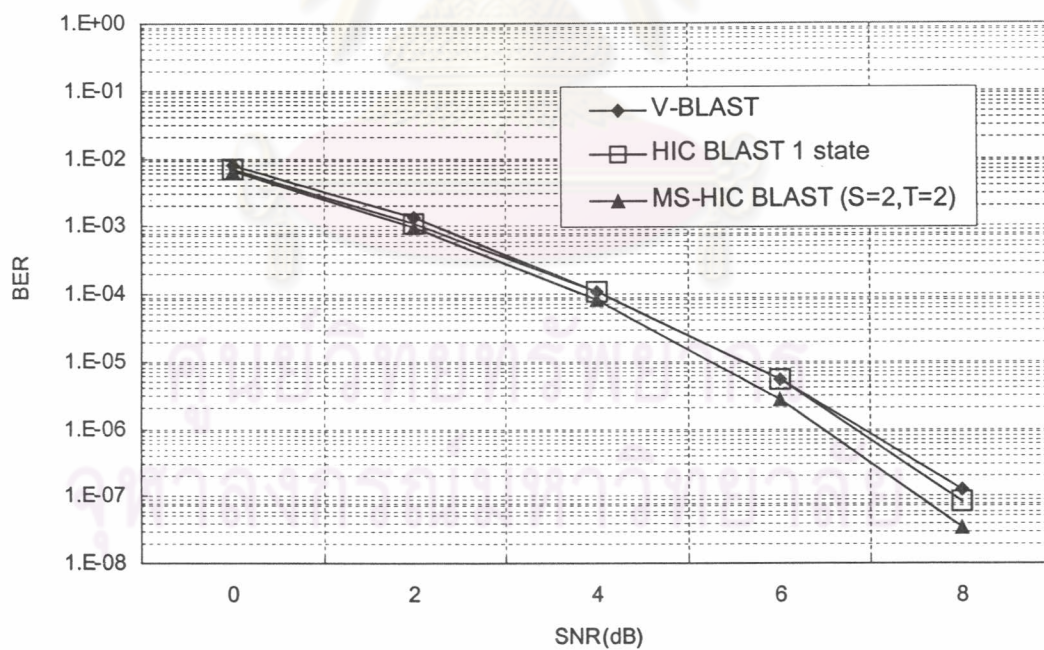
ตารางที่ 4-5 แสดงค่าความซับซ้อนของเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม
วิธีการหากล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี Multiple Slicing เมื่อคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

receiver	case K = 16 ,N=16	Percent of complexity
V-BLAST	89,072	100
HIC BLAST	25,519	28.65
MS-HIC BLAST (S=2,T=2)	26,153	29.36
MS-HIC BLAST (S=4,T=4)	60,797	68.26

ในหัวข้อถัดมานี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การหากล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี multiple slicing นี้โดยจะใช้พารามิเตอร์ S = 2 และ T = 2 โดยการจำลองระบบในส่วนนี้จะทำการจำลองในสภาพแวดล้อมแบบเมือง



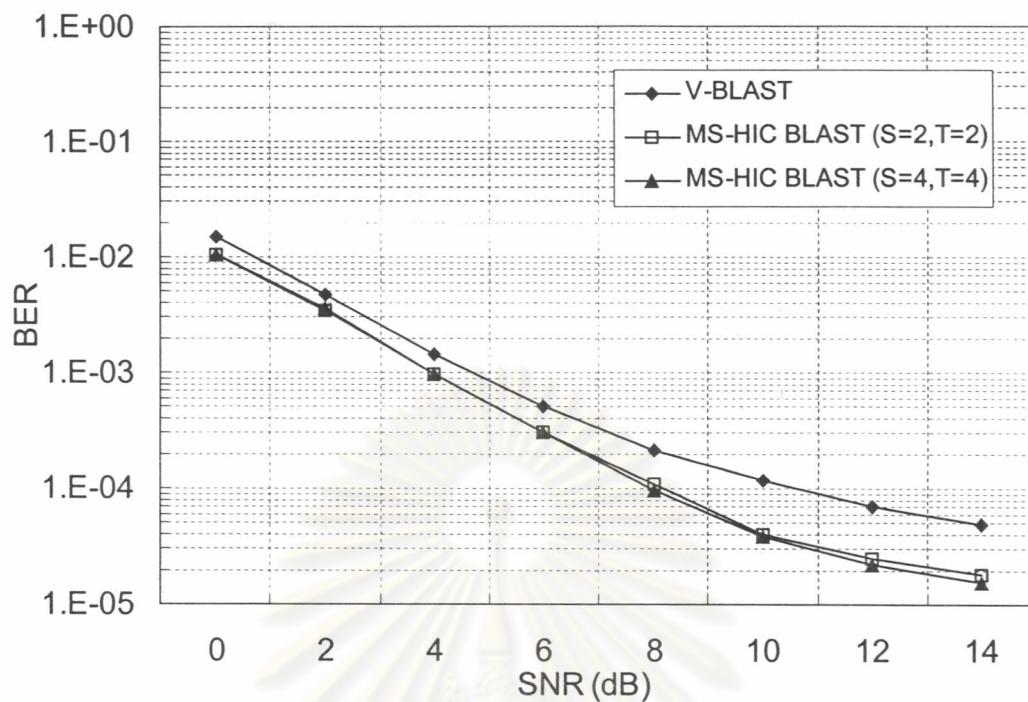
รูปที่ 4-16 BER เฉลี่ย แสดงสมรรถนะของเครื่องรับ MS-HIC BLAST (S=2, T=2)



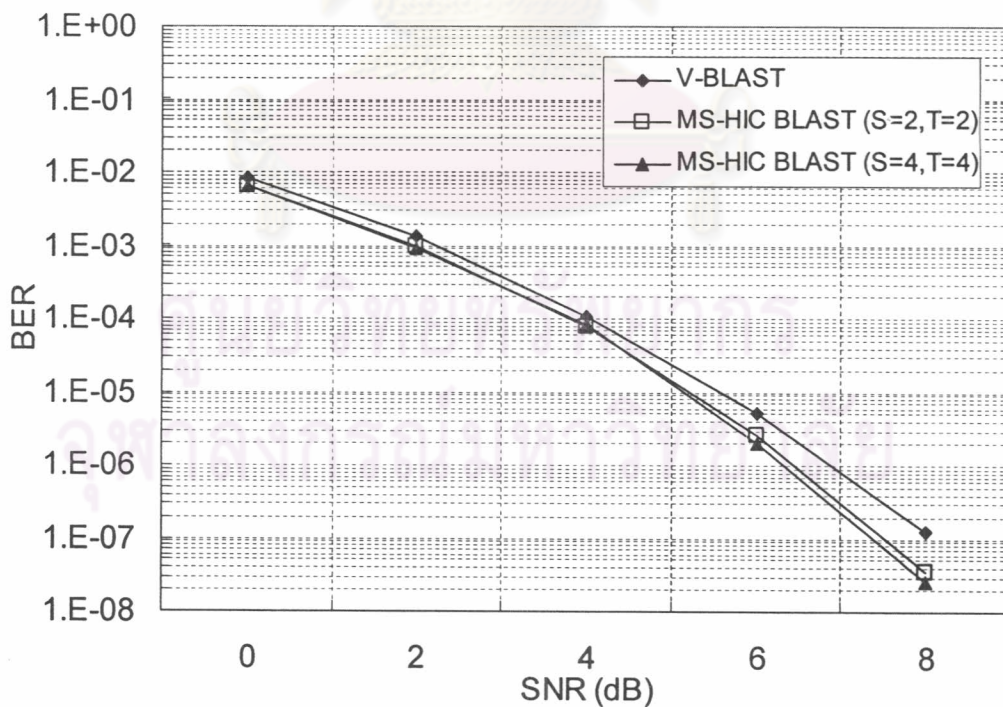
รูปที่ 4-17 BER เฉลี่ย แสดงสมรรถนะของเครื่องรับ MS-HIC BLAST (S=2, T=2)
ในกรณีที่มีการประมาณช่องสัญญาณอย่างถูกต้องสมบูรณ์

จากรูปที่ 4-16 ซึ่งแสดงสมรรถนะเปรียบเทียบกันของเครื่องรับที่ใช้การหักล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี multiple slicing กับเครื่องรับที่ใช้การหักล้างสัญญาณแบบผสมธรรมดา และเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิม ในกรณีที่กำหนดให้มีความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณเกิดขึ้นโดยทำการส่งข้อมูลเป็นเฟรมข้อมูลที่มีความยาว 150 สัญลักษณ์ จากรูปที่ 4-16 จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมร่วมกับวิธี multiple slicing นี้ จะมีสมรรถนะที่เหนือกว่าเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึม V-BLAST เดิมประมาณ 2-3 dB โดยที่จะมีค่าความซับซ้อนเพียงร้อยละ 28.65 ของอัลกอริทึม V-BLAST เดิมเท่านั้นและจะเห็นได้ว่าการผนวกกระบวนการ multiple slicing นี้เข้าไปจะทำให้เครื่องรับนี้มีสมรรถนะที่เหนือกว่าเครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมธรรมดาประมาณ 1-2 dB โดยแลกกับความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.71 เท่านั้น และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 4-17 ซึ่งระบบมีการประมาณช่องสัญญาณอย่างถูกต้องสมบูรณ์ เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมธรรมดานั้นจะมีสมรรถนะที่ไม่แตกต่างจากอัลกอริทึม V-BLAST เดิมมากนัก ขณะที่เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมที่ใช้วิธี multiple slicing รวมด้วยนี้จะมีสมรรถนะที่ดีกว่าอยู่ประมาณ 0.5 dB ทำให้เห็นได้ว่ากรณีที่มีความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณเกิดขึ้น เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมทั้งสองประเภทจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า จึงกล่าวได้ว่าทั้งสองประเภทนี้สามารถทนทานต่อการเกิดความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณได้ดี

ขั้นตอนต่อมาจะทำการพิจารณาเปรียบเทียบกรณีที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ $S = 2$ และ $T = 2$ กับกรณีที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ $S = 4$ และ $T = 4$ จะเห็นได้ว่า กรณีที่ พารามิเตอร์ $S = 4$ และ $T = 4$ นั้นค่าความซับซ้อนของระบบที่ได้จะเพิ่มสูงขึ้นมากเป็นร้อยละ 68.26 ทั้งนี้การคำนวณตามโครงสร้างรูปแบบต้นไม้นั้นจะมีค่าความซับซ้อนเพิ่มสูงขึ้นตามค่า S^T และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-18 และ 4-19 แล้วจะเห็นได้ว่าสมรรถนะของเครื่องรับประเภทนี้เมื่อพารามิเตอร์ $S = 4$ และ $T = 4$ จะไม่แตกต่างจากกรณี $S = 2$ และ $T = 2$ มากนัก ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าความซับซ้อนที่เพิ่มสูงขึ้นมากดังกล่าวแล้ว จะเห็นได้ว่าการใช้พารามิเตอร์ $S = 2$ และ $T = 2$ นั้นมีความเหมาะสมที่จะทำให้เครื่องรับที่ใช้วิธีการหักล้างสัญญาณแบบผสมที่ใช้วิธี multiple slicing เข้าร่วมด้วยนี้มีสมรรถนะที่ดี



รูปที่ 4-18 BER เฉลี่ย แสดงสมรรถนะของเครื่องรับ MS-HIC BLAST (S=4,T=4)



รูปที่ 4-19 BER เฉลี่ย แสดงสมรรถนะของเครื่องรับ MS-HIC BLAST (S=4,T=4)

ในกรณีที่มีการประมาณช่องสัญญาณอย่างถูกต้องสมบูรณ์