บทที่ 7

การทดสอบและวิเคราะห์ระบบที่นำเสนอ

7.1 บทนำ

บทนี้จะเป็นการทดสอบเปรียบเทียบรวมไปถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ OFDM ที่มีการแก้ปัญหาสัญญาณพหุวิถีที่ด้านรับด้วยอีควอไลเซอร์ซึ่งมีระบบจัดสรรการทำงาน และอีควอไลเซอร์ซึ่งมีระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้

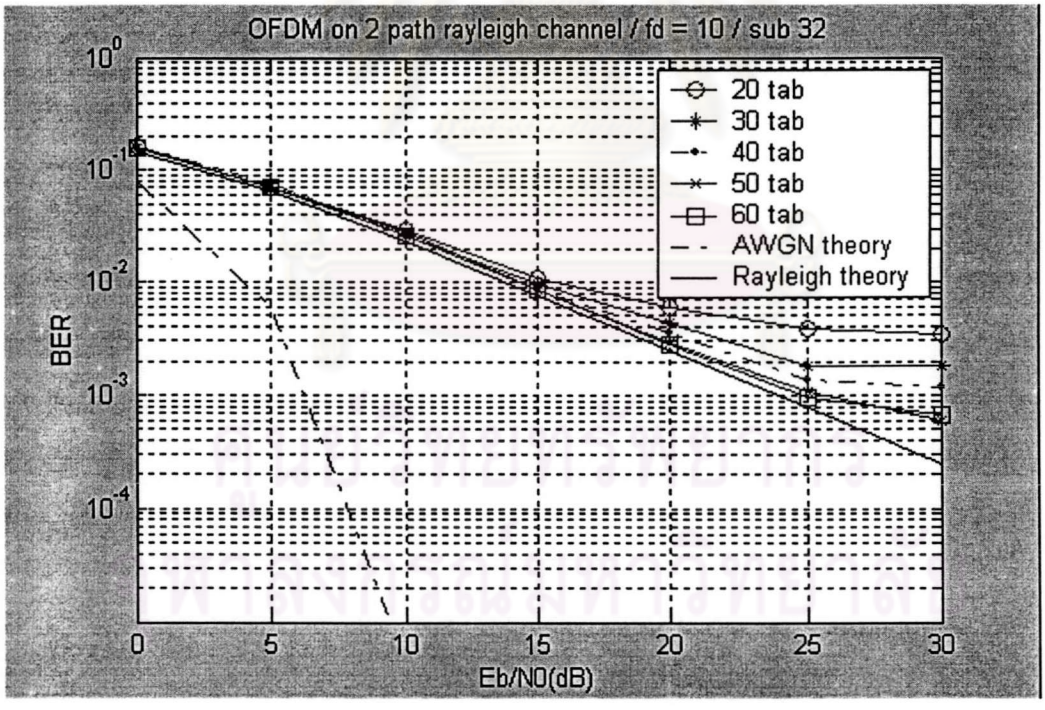
7.2 ประสิทธิภาพระบบที่ใช้อีควอไลเซอร์ธรรมดาเทียบกับเมื่อใช้ระบบจัดสรรการทำงาน

ในส่วนแรกนี้จะเป็นการทดสอบระบบจัดสรรการทำงาน ซึ่งมีการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรอีควอไลเซอร์แบบ Zero-Forcing และกระบวนการหักล้างโดยในการทดสอบนี้จะนำค่าเฟดดิงของช่องสัญญาณที่ประมาณได้ไปตรวจสอบ ทั้งนี้เพื่อดูว่าค่าตัวคูณของแต่ละแท็ปในเวลานั้นทำให้อีควอไลเซอร์มีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงไร ซึ่งถ้าอีควอไลเซอร์มีประสิทธิภาพต่ำกว่าค่าที่กำหนดก็จะส่งสัญญาณ OFDM ที่รับมานั้นเข้าสู่กระบวนการหักล้างแทน (ในงานวิจัยนี้จะขอเรียกค่าที่กำหนดนี้ว่าค่าการตัดสินใจ) สำหรับในขั้นต้นจะแสดงให้เห็นว่าระบบ OFDM ที่ซึ่งด้านรับใช้เพียงอีควอไลเซอร์ธรรมดาในการแก้ปัญหาสัญญาณพหุวิถีนั้น ประสิทธิภาพที่ได้มีความสัมพันธ์อย่างไรกับจำนวนแท็ปที่ใช้ โดยจะทำการซิมูเลชันกับสัญญาณ OFDM ที่ประกอบด้วยคลื่นพาห์ย่อย 32 และ 128 ชุด และช่องสัญญาณที่ใช้เป็นแบบพหุวิถี 2 เส้นทางซึ่งมีการแจกแจงแบบเรย์ลีที่ค่า $f_{d\max}$ เท่ากับ 10 ผลการซิมูเลชันได้ดังในรูปที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของอีควอไลเซอร์นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนแท็ปที่ใช้ โดยจำนวนแท็ปที่มากขึ้นจะทำให้อีควอไลเซอร์สามารถแก้ไขสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปได้ดีขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการให้ระบบมีความสามารถในการแก้ไขสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปจากผลของพหุวิถีมาก ๆ ก็จำเป็นที่จะต้องใช้จำนวนแท็ปมากตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามระบบที่ต้องพึ่งพาแท็ปเป็นจำนวนมากนั้นจะทำให้ต้นทุนของระบบสูงตามไปด้วยเช่นกัน และนี่เป็นประเด็นซึ่งทำให้งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะเสนอระบบจัดสรรการทำงาน ซึ่งจะทำให้อีควอไลเซอร์ยังคงสามารถแก้ไขผลของพหุวิถีได้ดีเช่นเดิมแต่ด้วยจำนวนแท็ปที่น้อยลง

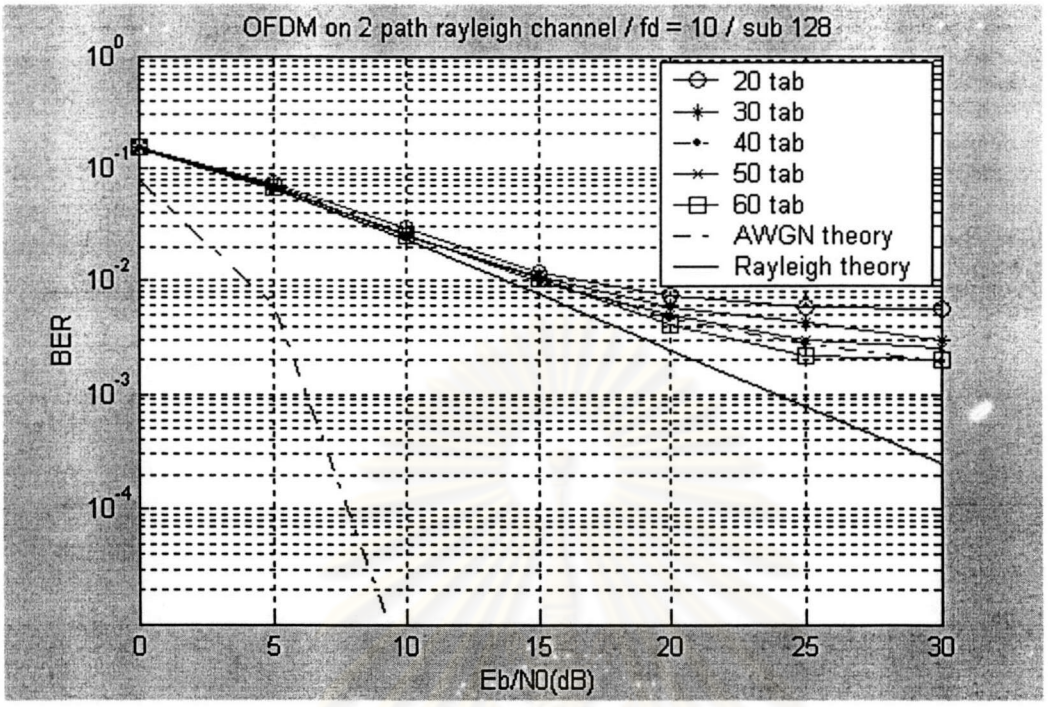
สำหรับในการทดสอบระบบจัดสรรการทำงานนั้นจะใช้อีควอไลเซอร์ที่มีเพียง 20 แท็ป เพื่อแสดงให้เห็นว่าแม้จะใช้จำนวนแท็ปที่น้อยกว่า แต่ประสิทธิภาพที่ได้ก็ยังคงใกล้เคียงกับอีควอไลเซอร์ทั่วไปซึ่งใช้แท็ปจำนวนมาก ๆ และจะกำหนดให้ค่าการตัดสินใจของระบบจัดสรรการทำงานมีค่าคงที่

เป็น 0.9 โดยช่องสัญญาณยังคงเป็นแบบพหุวิถี 2 เส้นทางและมีค่า $f_{d\max}$ เท่ากับ 10 ผลการซิมูเลชันเป็นดังในรูปที่ 7.3

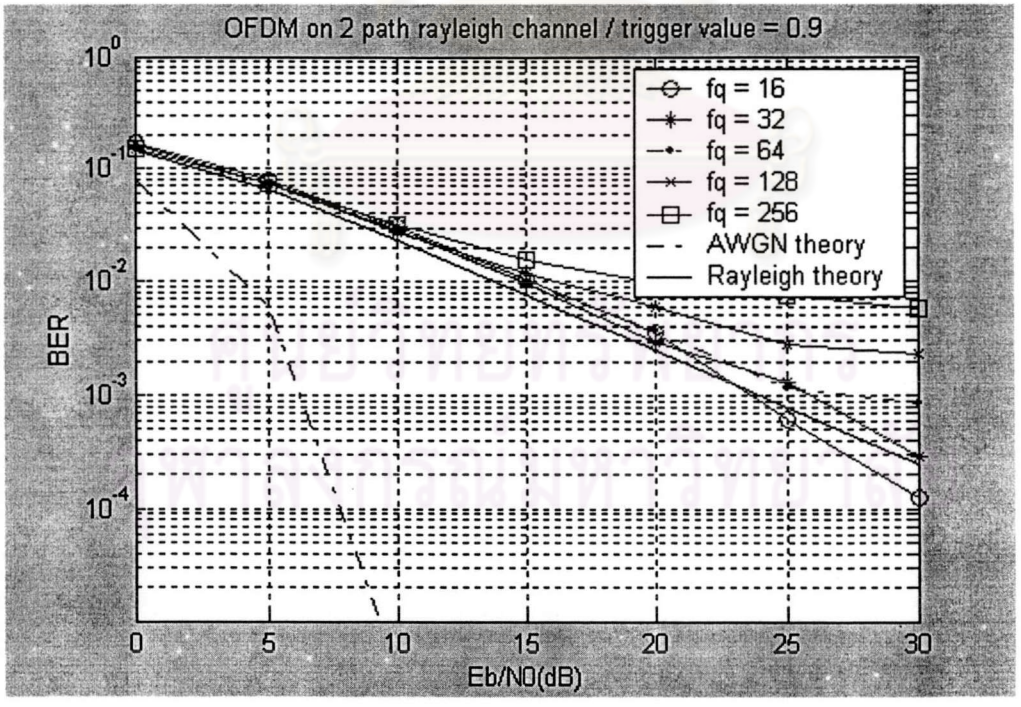
จากผลการซิมูเลชันในรูปที่ 7.3 และ 7.4 แสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้ระบบจัดสรรการทำงานมีอัตราการตัดสินบิตผิดพลาดที่ภาครับดีใกล้เคียงกับระบบที่ใช้อีควอไลเซอร์ธรรมดา ซึ่งใช้แท็ปจำนวนมาก ๆ ดังแสดงไว้ก่อนหน้านี้ โดยทั้งนี้จะเห็นว่าระบบจัดสรรการทำงานที่ใช้อีควอไลเซอร์ขนาด 20 แท็ปที่ค่าการตัดสินใจ 0.9 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเทียบกับระบบที่ใช้อีควอไลเซอร์ธรรมดาที่ใช้คลื่นพาห์ย่อยเท่ากันนั้น ระบบที่มีระบบจัดสรรการทำงานสามารถให้ประสิทธิภาพไม่ด้อยไปกว่าอีควอไลเซอร์ธรรมดาขนาด 60 แท็ปมากนัก และจากผลการซิมูเลชันจะได้ว่าระบบจัดสรรการทำงานซึ่งมีค่าการตัดสินใจอยู่ที่ 0.9 ต้องพึ่งพาการทำงานของกระบวนการหักล้างประมาณ 20 เปอเซนต์ ในขณะที่ถ้าค่าการตัดสินใจเพิ่มเป็น 0.95 ดังในรูปที่ 7.4 ก็จะได้ประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้นแต่ว่าก็จำเป็นต้องพึ่งพาการทำงานของกระบวนการหักล้างมากขึ้นด้วยเช่นกัน



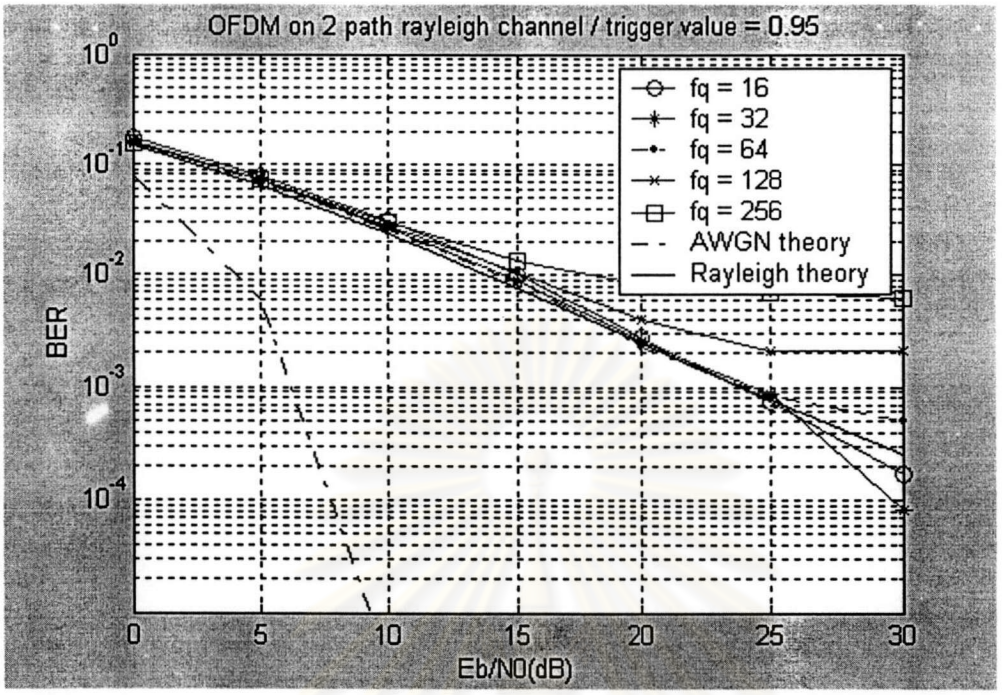
รูปที่ 7.1 BER ของสัญญาณ OFDM (32 sub) ซึ่งใช้อีควอไลเซอร์ธรรมดา



รูปที่ 7.2 BER ของสัญญาณ OFDM (128 sub) ซึ่งใช้อีควอไลเซอร์ธรรมดา



รูปที่ 7.3 BER ของสัญญาณ OFDM ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงานที่ค่าการตัดสินใจ 0.9



รูปที่ 7.4 BER ของสัญญาณ OFDM ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงานที่ค่าการตัดสินใจ 0.95

7.3 ค่าการตัดสินใจ

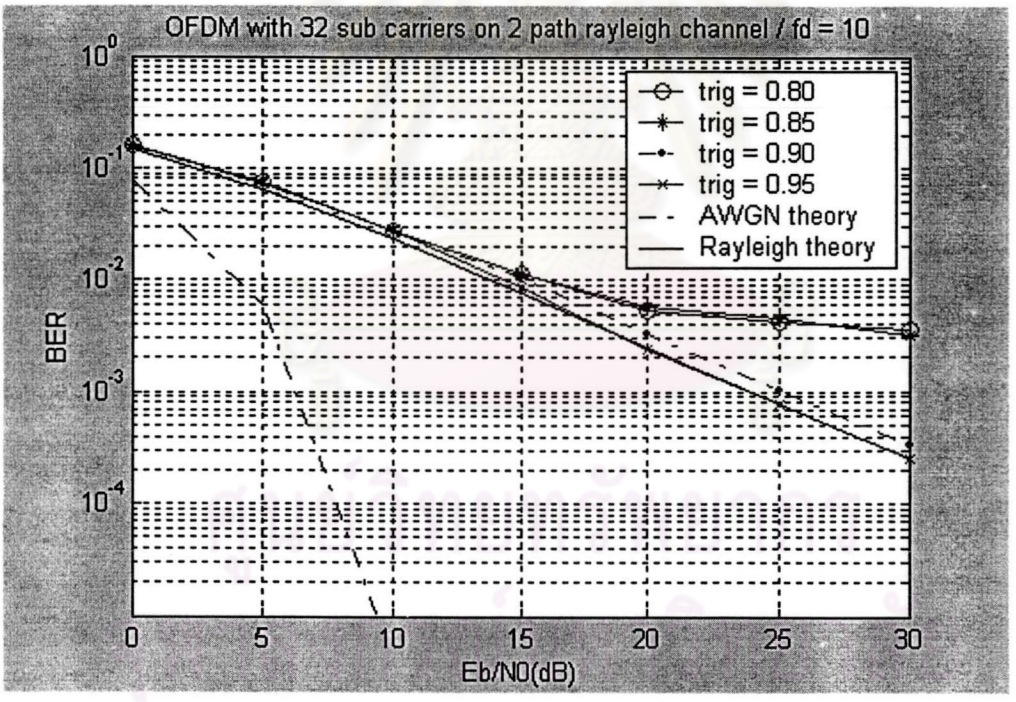
ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าการตัดสินใจของระบบจัดสรรการทำงาน ซึ่งค่าการตัดสินใจนี้จะเป็นค่าที่ใช้ตัดสินว่าสัญญาณที่รับได้ในครั้งนั้น ๆ จะถูกนำไปแก้ไขผลของพหุวิถีในสัญญาณด้วยอีควอไลเซอร์หรือกระบวนการหักล้าง ในการทดสอบนี้จะใช้ระบบจัดสรรการทำงานซึ่งใช้อีควอไลเซอร์ขนาด 20 แท็ป และช่องสัญญาณมีการแจกแจงแบบเรย์ลี 2 เส้นทางซึ่งมีค่า $f_{d\max}$ เท่ากับ 10 สัญญาณ OFDM ที่ส่งมีจำนวนคลื่นพาห์ย่อยเป็น 32 และ 128 ชุด ผลการซิมูเลชันเป็นดังรูปที่ 7.5 และ 7.6 ตามลำดับ

ทั้งสองกรณีดังในรูปที่ 7.5 และ 7.6 จะเห็นว่าเมื่อค่าการตัดสินใจมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการตัดสินบิตผิดพลาดมีค่าลดลง ค่าการตัดสินใจในที่นี้มีการคำนวณเปรียบเทียบโดยอาศัยค่าเฟดดิงซึ่งมีการประมาณค่าที่ภาครับโดยอาศัยสัญลักษณ์นำ ซึ่งที่ภาครับจะมีการนำค่าเฟดดิงที่ประมาณได้นั้นไปคำนวณเพื่อหาค่าตัวคูณในแท็ปของอีควอไลเซอร์ หลังจากนั้นระบบจะนำค่าตัวคูณนั้นมาคำนวณกลับเพื่อวัดประสิทธิภาพของอีควอไลเซอร์อีกทีหนึ่ง ซึ่งค่าประสิทธิภาพนี้จะนำไปใช้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าการตัดสินใจซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้ อย่างไรก็ตามพบว่า

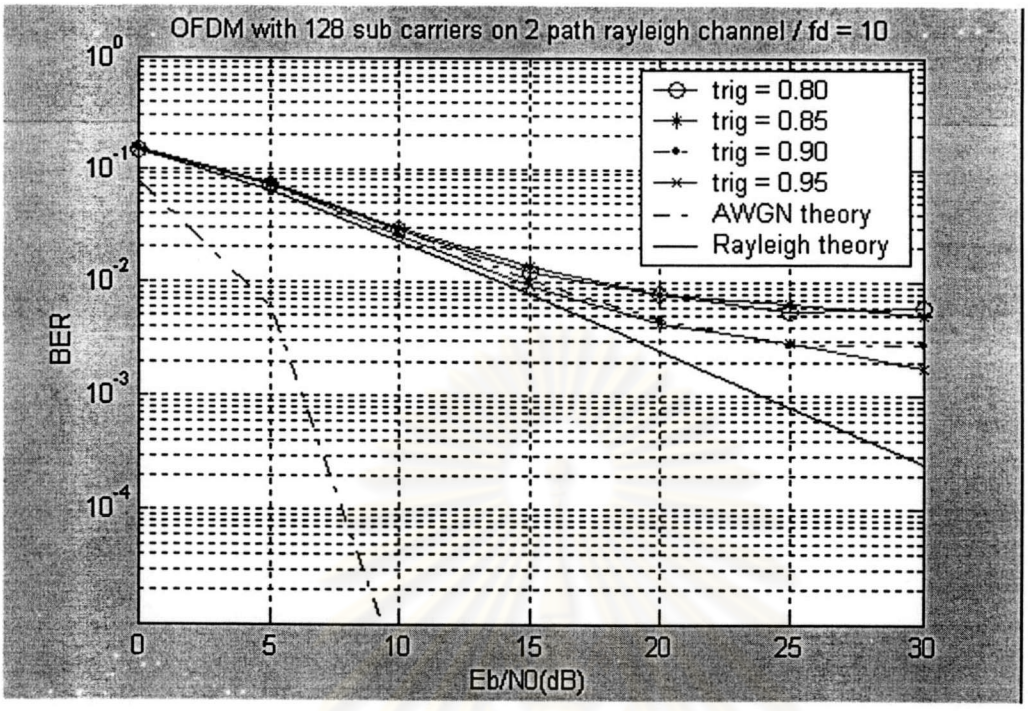
ประสิทธิภาพต่ำสุดของอีควอไลเซอร์ที่ภาครับอยู่ที่ประมาณ 85 เปอเซนต์ สัดส่วนในการทำงานของกระบวนการ Canceling จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าการตัดสินใจที่กำหนด โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตัดสินใจและสัดส่วนในการทำงานของแต่ละวงจรจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

7.4 สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้าง

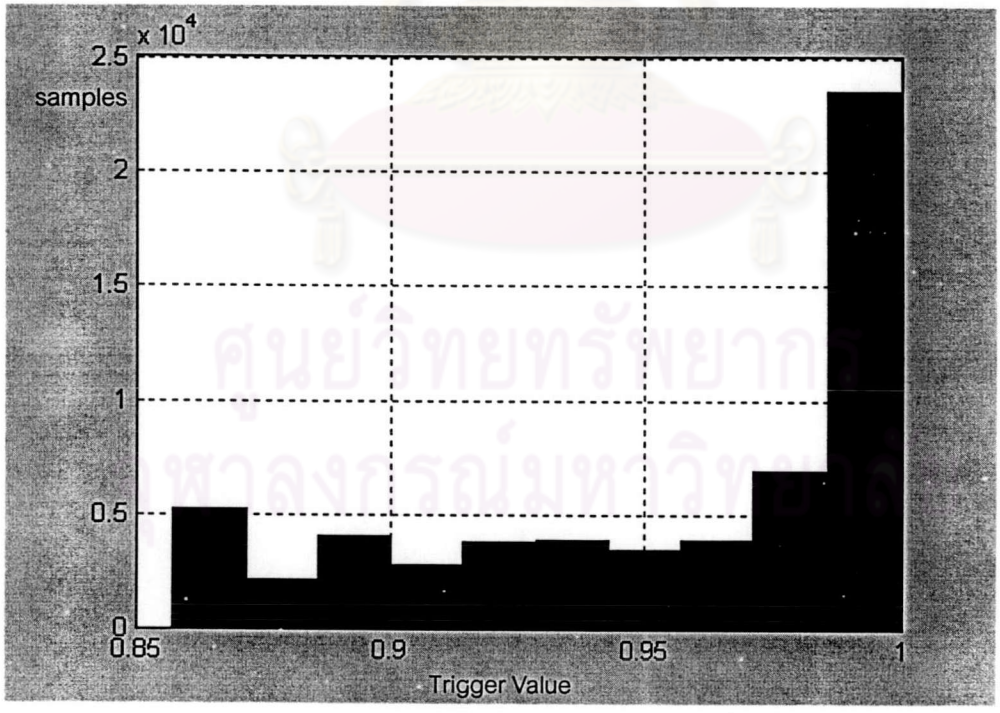
จากที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่า เมื่อค่าการตัดสินใจมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนในการทำงานของกระบวนการหักล้างมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นได้จากรูปที่ 7.7 ซึ่งเป็นฮีสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าประสิทธิภาพของอีควอไลเซอร์ โดยฮีสโตแกรมนี้ได้มาจากการจำลองเฟดดิงช่องสัญญาณแบบเรย์ลี 2 เส้นทางและนำค่าเฟดดิงนั้นมาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ว่านี้ยิ่งเข้าใกล้ 1 มากเท่าไหร่ก็หมายถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นตามไปด้วยของอีควอไลเซอร์



รูปที่ 7.5 BER ของสัญญาณ OFDM (32 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงาน

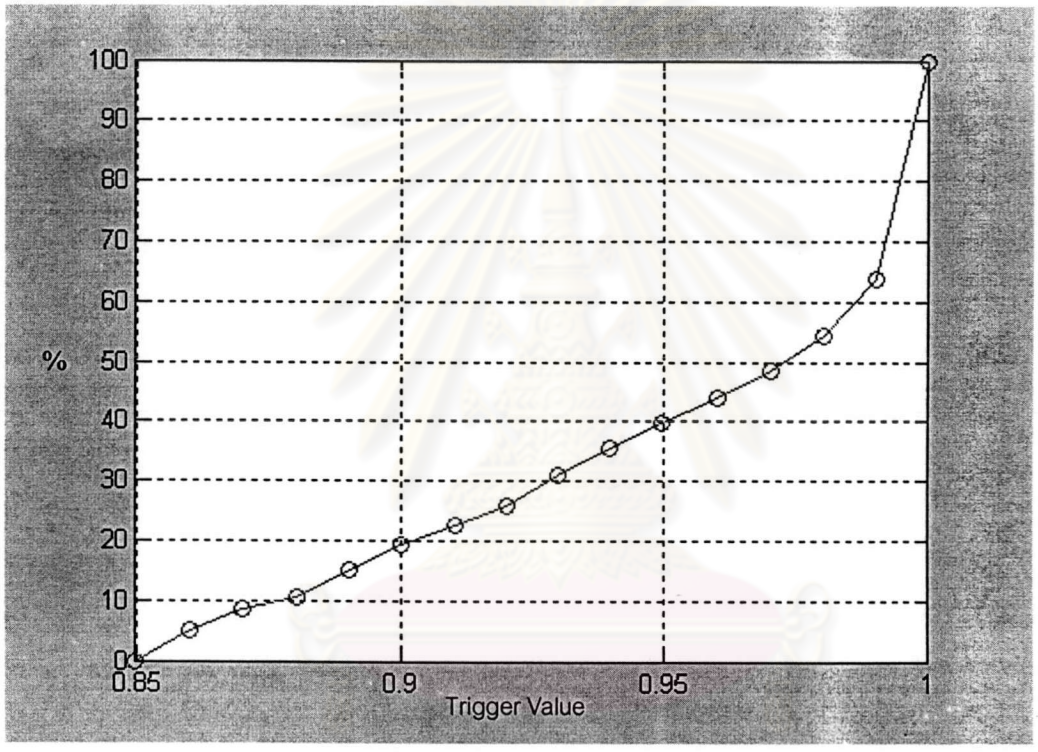


รูปที่ 7.6 BER ของสัญญาณ OFDM (128 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงาน



รูปที่ 7.7 ฮีสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าประสิทธิภาพของอีควอไลเซอร์

อีสโตแกรมในรูปที่ 7.7 สามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปฟังชันสะสมได้ ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างตามค่าการตัดสินใจที่กำหนดได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังในรูปที่ 7.8 โดยแกนนอนในรูปแทนค่าการตัดสินใจ ส่วนแกนตั้งแทนเปอเซนต์ที่กระบวนการ Canceling จะถูกเรียกใช้ที่ค่าการตัดสินใจนั้น ๆ ซึ่งถ้าค่าการตัดสินใจมีค่าเป็น 1 นั่นหมายถึงว่ากระบวนการหักล้างต้องทำทำงานเต็ม 100 เปอเซนต์นั่นเอง และจากการซิมูเลชันพบว่ากระบวนการหักล้างไม่ถูกใช้เลยสำหรับค่าการตัดสินที่ต่ำกว่า 0.85 โดยประมาณ



รูปที่ 7.8 สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างที่ค่าการตัดสินใจต่าง ๆ

7.5 ประสิทธิภาพของระบบจัดสรรการทำงานที่แต่ละค่าพลังงานและระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้

จากผลการทดสอบก่อนหน้านี้พบว่าที่แต่ละค่าพลังงานของสัญญาณรับ ค่าการตัดสินใจแต่ละค่าจะทำให้อีควอไลเซอร์มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดไม่เท่ากัน โดยในช่วงสัญญาณมีค่าพลังงานสูง ความสามารถของอีควอไลเซอร์หรือประสิทธิภาพที่ได้เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มค่าการตัดสินใจนั้น ดูจะคุ้มค่ามากกว่าในช่วงที่สัญญาณมีพลังงานต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองพล็อตค่า

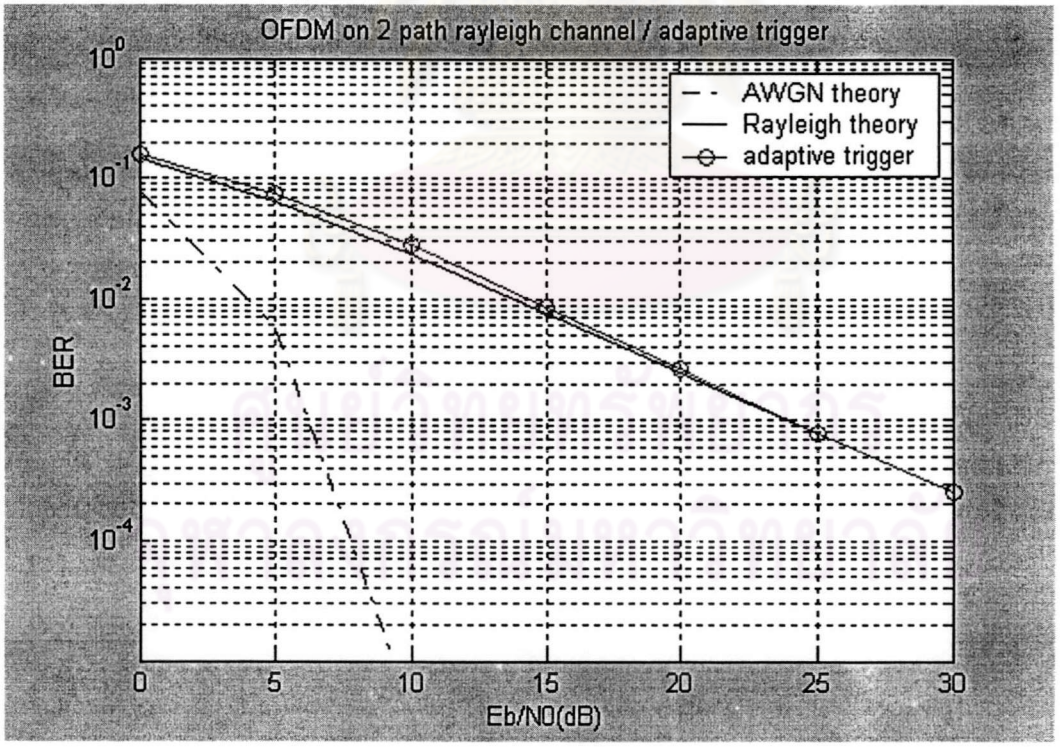
ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นโดยเทียบกับค่าการตัดสินใจที่ 0.85 (จากการซิมูเลชันพบว่ากระบวนการหักล้างจะมีการทำงานก็ต่อเมื่อค่าการตัดสินใจมากกว่า 0.85 โดยประมาณ ซึ่งตรงนี้สามารถคิดได้ว่าเมื่อค่าการตัดสินต่ำกว่า 0.85 ระบบจัดสรรการทำงานจะมีคุณสมบัติเทียบเท่าอีควอไลเซอร์ธรรมดาทุกประการ) ที่ค่าการตัดสินใจต่าง ๆ กัน ได้ผลดังในตารางที่ 7.1 และ 7.2 ซึ่งเป็นสัญญาณ OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาห์ย่อย 32 และ 128 ชุดตามลำดับ

ในกรณีที่ใช้คลื่นพาห์ย่อย 32 ชุดนั้น ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจัดสรรการทำงานที่ค่าการตัดสินใจต่าง ๆ กันซึ่งแสดงดังในตารางที่ 7.1 นั้น จะเห็นว่าที่ค่า E_b / N_0 มากกว่า 10 ขึ้นไปโดยประมาณ ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อถึงค่าการตัดสินใจระดับหนึ่ง

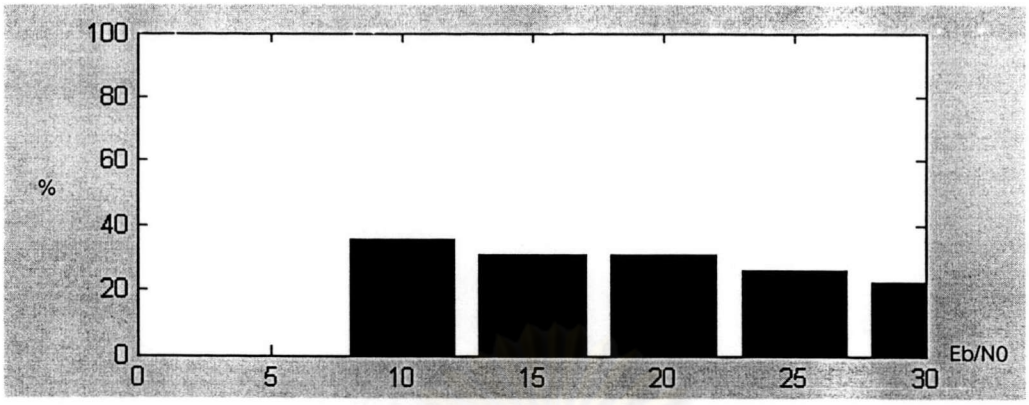
ตารางที่ 7.1 ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามค่าการตัดสินใจของระบบจัดสรรการทำงานที่ค่าของพลังงานต่าง ๆ ของสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห์ย่อย 32 ชุด

Eb/N0 / trigger	0 db	5 db	10 db	15 db	20 db	25 db	30 db
0.86	-1.5251	5.3949	9.5238	1.0490	21.8978	13.0435	39.7260
0.87	-0.8151	-2.0022	9.5238	0	24.0876	48.9130	53.4247
0.88	-2.7347	-1.8354	7.4230	11.8881	27.7372	61.9565	76.7123
0.89	-1.2096	0.5562	2.3810	20.6294	30.6569	71.7391	78.0822
0.90	-2.1036	1.6685	7.4230	9.7902	27.7372	81.5217	90.4110
0.91	-3.3658	-1.2236	4.0616	16.4336	45.2555	73.9130	93.1507
0.92	-2.9187	1.9466	6.8627	17.4825	41.6058	80.4348	95.8904
0.93	-2.8925	1.2236	3.9216	27.6224	51.8248	79.3478	94.5205
0.94	-1.3936	-1.8910	8.6835	26.2238	50.3650	86.9565	91.7808
0.95	-3.4709	2.1691	7.9832	23.4266	54.7445	82.6087	93.1507
0.96	-2.6558	0.8343	15.6863	26.5734	51.8248	73.9130	91.7808
0.97	-2.7347	1.6685	8.6835	28.6713	46.7153	85.8696	97.2603
0.98	-3.3395	-1.7798	11.4846	29.3706	46.7153	86.9565	87.6712
0.99	-1.9984	4.6162	7.4230	29.3706	62.0438	80.4348	93.1507
1	-2.7610	0.0556	7.2829	20.2797	52.5547	76.0870	95.8904

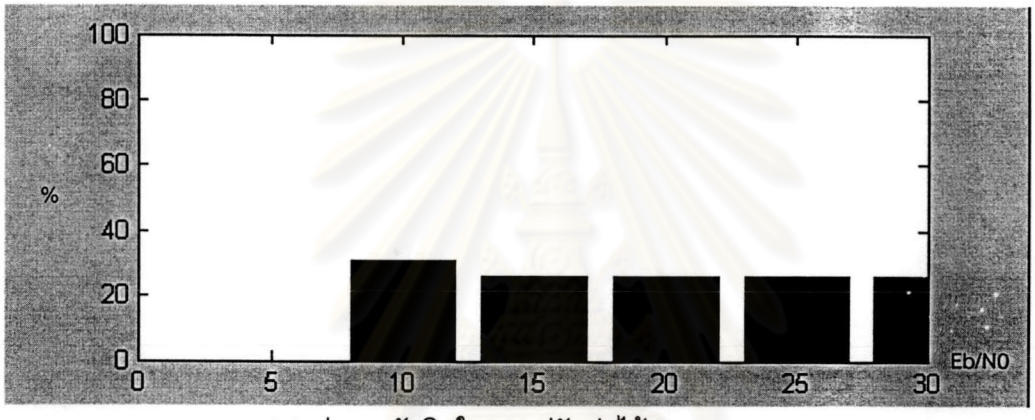
จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนว่า เมื่อค่าการตัดสินใจมากขึ้นจะทำให้สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างมากตามไปด้วยนั้น และเมื่อนำมาประกอบกับข้อมูลที่ได้รับในส่วนนี้ที่ว่าประสิทธิภาพที่ได้เพิ่มขึ้นไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการตัดสินใจที่เพิ่มขึ้น และที่ระดับพลังงานแต่ละค่าก็ยังให้ประสิทธิภาพไม่เท่ากันอีกด้วย จากสิ่งเหล่านี้ทำให้ดูเหมือนว่าคงเป็นการดีถ้าจะกำหนดให้ค่าการตัดสินใจจำกัดอยู่เพียงระดับหนึ่ง โดยยังคงให้ประสิทธิภาพที่ได้ไม่แตกต่างจากค่าการตัดสินใจที่สูงกว่านั้นมากนัก และเมื่อทดลองให้กลุ่มชุดตัวเลขที่พิมพ์ด้วยตัวเลขหนาในตารางที่ 7.1 แสดงถึงกลุ่มตัวเลขที่ประมาณได้ว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยค่าจำกัดของค่าการตัดสินใจที่ค่า E_b / N_0 ที่ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เดซิเบลกำหนดให้มีค่า 0.85, 0.85, 0.94, 0.93, 0.93, 0.92 และ 0.91 ตามลำดับ ผลการซิมูเลชันของระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าตามที่ลองกำหนดนี้เป็นดังในรูปที่ 7.9 ซึ่งจะเห็นว่ายังคงสามารถให้ประสิทธิภาพที่น่าพอใจ และเมื่อมาดูที่สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างจะเป็นดังในรูปที่ 7.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้นี้สามารถช่วยลดสัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างได้ โดยประสิทธิภาพที่ได้ยังคงใกล้เคียงเดิม



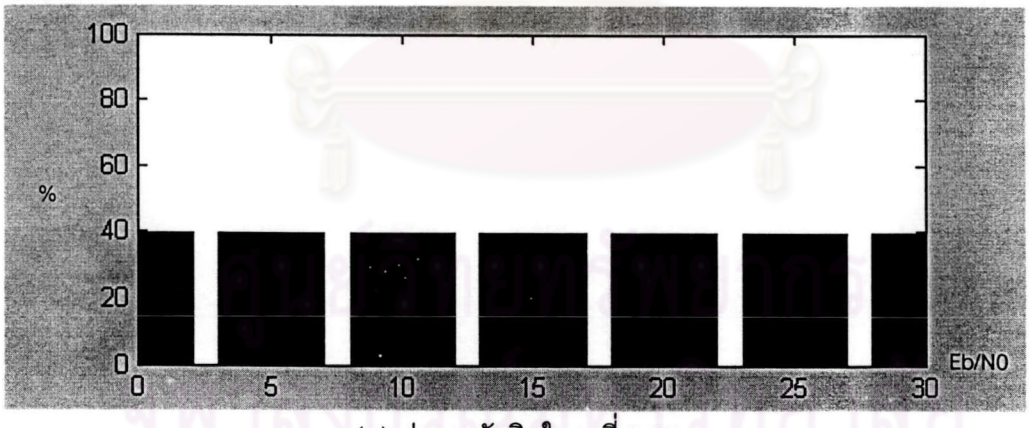
รูปที่ 7.9 BER ของสัญญาณ OFDM (32 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้



(ก) ค่าการตัดสินใจแบบปรับค่าได้ (32 sub)



(ข) ค่าการตัดสินใจแบบปรับค่าได้ (128 sub)



(ค) ค่าการตัดสินใจคงที่ 0.95

รูปที่ 7.10 สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างที่ค่าพลังงานต่าง ๆ

สำหรับในกรณีสัญญาณ OFDM ที่มีคลื่นพาห์ย่อย 128 ชุด ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจัดสรรการทำงานที่ค่าการตัดสินใจต่าง ๆ เป็นดังในตารางที่ 7.2 และเมื่อทำการทดสอบโดย

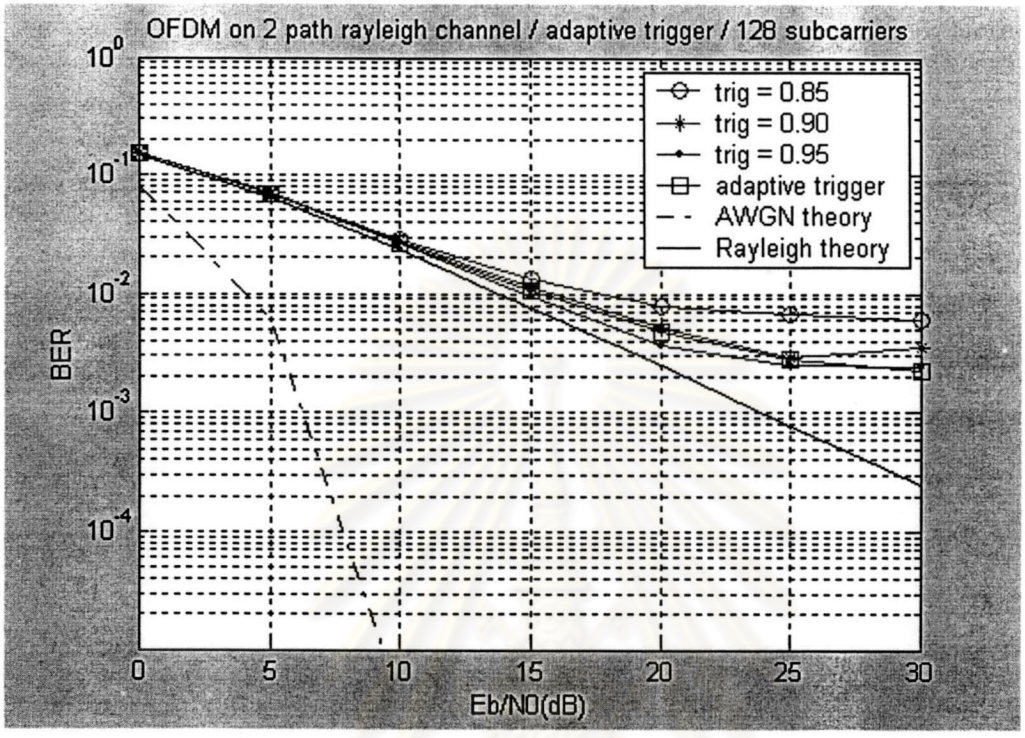
กำหนดค่าการตัดสินใจที่ค่า E_b / N_0 เป็น 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เดซิเบลให้มีค่า 0.85 0.85, 0.93, 0.92, 0.92, 0.92 และ 0.92 ตามลำดับ ได้ผลการซิมูเลชันของระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้ตามที่กำหนดดังกล่าวเป็นดังในรูปที่ 7.11

ตารางที่ 7.2 ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามค่าการตัดสินใจของระบบจัดสรรการทำงานที่ค่าของพลังงานต่าง ๆ ของสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห์ย่อย 128 ชุด

Eb/N0 / trigger	0 db	5 db	10 db	15 db	20 db	25 db	30 db
0.86	-0.4398	2.4390	0.7194	10.3226	11.1675	-1.5267	24.0602
0.87	0.5223	-1.5679	-2.8777	1.6129	31.9797	-0.7634	22.5564
0.88	-3.6833	-0.8130	-1.8705	16.4516	26.3959	6.8702	33.0827
0.89	0.4673	1.2195	11.6547	9.0323	23.3503	25.1908	48.8722
0.90	0.4673	0.1742	4.0288	19.6774	35.5330	40.4580	46.6165
0.91	0	-0.9872	4.1727	13.2258	41.1168	40.4580	63.9098
0.92	-0.6597	6.1556	4.7482	23.8710	43.1472	47.3282	72.9323
0.93	0.2474	3.6005	7.3381	23.8710	46.1929	48.8550	52.6316
0.94	-1.5668	4.3554	5.0360	21.9355	43.6548	54.9618	60.9023
0.95	-1.4843	0.6969	10.5036	27.4194	58.3756	54.1985	69.1729
0.96	-0.8796	2.1487	6.1871	27.4194	54.3147	60.3053	64.6617
0.97	0.1924	3.3682	8.2014	29.0323	47.2081	61.0687	68.4211
0.98	0.2749	2.4390	10.6475	26.4516	47.2081	59.5420	65.4135
0.99	0.3299	1.7422	15.9712	25.8065	49.7462	52.6718	51.8797
1	-0.0550	3.7166	11.7986	23.2258	48.2234	57.2519	72.9323

จากผลการซิมูเลชันในรูปที่ 7.11 จะเห็นว่าความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดของระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้เมื่อใช้กับสัญญาณ OFDM ซึ่งมีคลื่นพาห์ย่อย 128 ชุดก็ไม่ด้อยไปกว่าการกำหนดให้ค่าการตัดสินใจคงที่เป็น 0.95 เท่าไรนักเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ที่ใช้กับสัญญาณ OFDM ซึ่งมีคลื่นพาห์ย่อย 32 ชุด แต่ว่าระบบจัดสรรการทำงานนั้นสามารถที่จะลดสัดส่วนการทำงาน

ของกระบวนการหักล้างโดยรวมได้ดังในรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.11 BER ของสัญญาณ OFDM (128 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้

7.6 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบระบบ OFDM ที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยการซิมูเลชันสรุปได้ว่า การใช้ระบบจัดสรรการทำงานจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าอีควอไลเซอร์ธรรมดาซึ่งมีจำนวนแท็ปเท่ากัน โดยประสิทธิภาพนี้สามารถเทียบเท่ากับกับอีควอไลเซอร์ธรรมดาที่ใช้แท็ปจำนวนมาก ๆ ได้ ซึ่งทำให้ประหยัดจำนวนแท็ปได้มาก แต่อย่างไรก็ตามระบบจัดสรรการทำงานนี้ก็มีส่วนกระบวนการหักล้างซึ่งมีกระบวนการที่ซับซ้อนกว่าเพิ่มเข้ามา โดยระบบจำเป็นต้องมีการแบ่งการทำงานบางส่วนให้กับกระบวนการหักล้างนี้จัดการแทน ทั้งนี้เพื่อให้คงไว้ซึ่งประสิทธิภาพตามที่กำหนด นอกจากนี้ในการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า ระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้ซึ่งออกแบบมาเพื่อต้องการให้ระบบมีการพึ่งพากระบวนการหักล้างน้อยที่สุดนั้น ยังคงสามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีตามต้องการได้เช่นกัน