

บทที่ 5

การทดสอบระบบทั่วไป

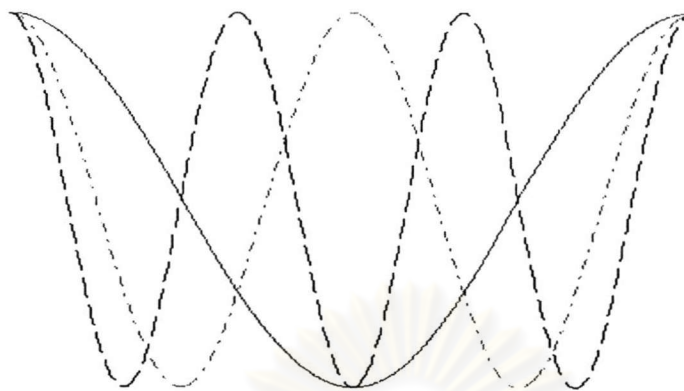
5.1 บทนำ

ระบบการสื่อสารดิจิทัลแบบ OFDM ซึ่งมีการแบ่งข้อมูลส่งไปในคลื่นพหุย่อยหลายชุดในเวลาพร้อม ๆ กัน ทำให้สัญญาณที่ส่งไปสามารถทนต่อการรบกวนแบบ ISI ได้ดีกว่าเดิมเนื่องจากคาบสัญลักษณ์ที่กว้างขึ้นตามจำนวนคลื่นพหุย่อยที่ใช้ นอกจากนี้การมอดูเลตด้วยวิธี OFDM นี้ยังมีการใช้คุณสมบัติการตั้งฉากกัน เพื่อให้ใช้แบนด์วิดท์ได้คุ้มค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับการมอดูเลตโดยทั่วไป แต่ก็มีโอกาสที่สัญญาณจะถูกรบกวนโดยผลของ ICI ได้เช่นกันหากสัญญาณนั้นเกิดการประวิงไปมากเกินกว่าเวลาคุมที่กำหนดไว้ และถึงแม้ว่าระบบ OFDM จะสามารถแก้ไขผลของ ISI ได้ดีขึ้น แต่เราก็ยังไม่สามารถแก้ไข ISI ในส่วนที่เป็น INSI ได้ ดังนั้นการใช้กระบวนการหักล้างหรืออีควอไลเซอร์จึงเป็นอีกทางหนึ่งซึ่งพยายามที่จะแก้ไขปัญหา ISI ให้ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในบทนี้จะแสดงถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีผลต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบ

5.2 การจำลองการส่งสัญญาณในระบบ OFDM ด้วย IFFT

ในการสร้างสัญญาณของระบบ OFDM นั้นจะทำโดยใช้ผลการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (IFFT) ซึ่งแต่ละจุดบน IFFT จะแทนแต่ละความถี่ของคลื่นพหุย่อย ในรูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างของสัญญาณทางเวลาของสัญญาณที่มีการแทนค่าบิตสัญลักษณ์เป็น 1 ในตำแหน่งที่ 2,3 และ 4 ของ IFFT ดังในสมการที่ 5.1 โดยสัญญาณที่มีความถี่น้อยสุดแทนสัญลักษณ์ที่ถูกใส่ในตำแหน่งที่ 2 ของ IFFT และตำแหน่งถัด ๆ ไปที่มากขึ้นก็แทนด้วยสัญลักษณ์ที่มีความถี่มากขึ้นตามลำดับ

$$IFFT \leftarrow \begin{bmatrix} 0 & \leftarrow f_0 \\ 1 & \leftarrow f_1 \\ 1 & \leftarrow f_2 \\ 1 & \leftarrow f_3 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 1 & \leftarrow f_{n-2} \\ 1 & \leftarrow f_{n-1} \\ 1 & \leftarrow f_n \end{bmatrix} \quad (5.1)$$



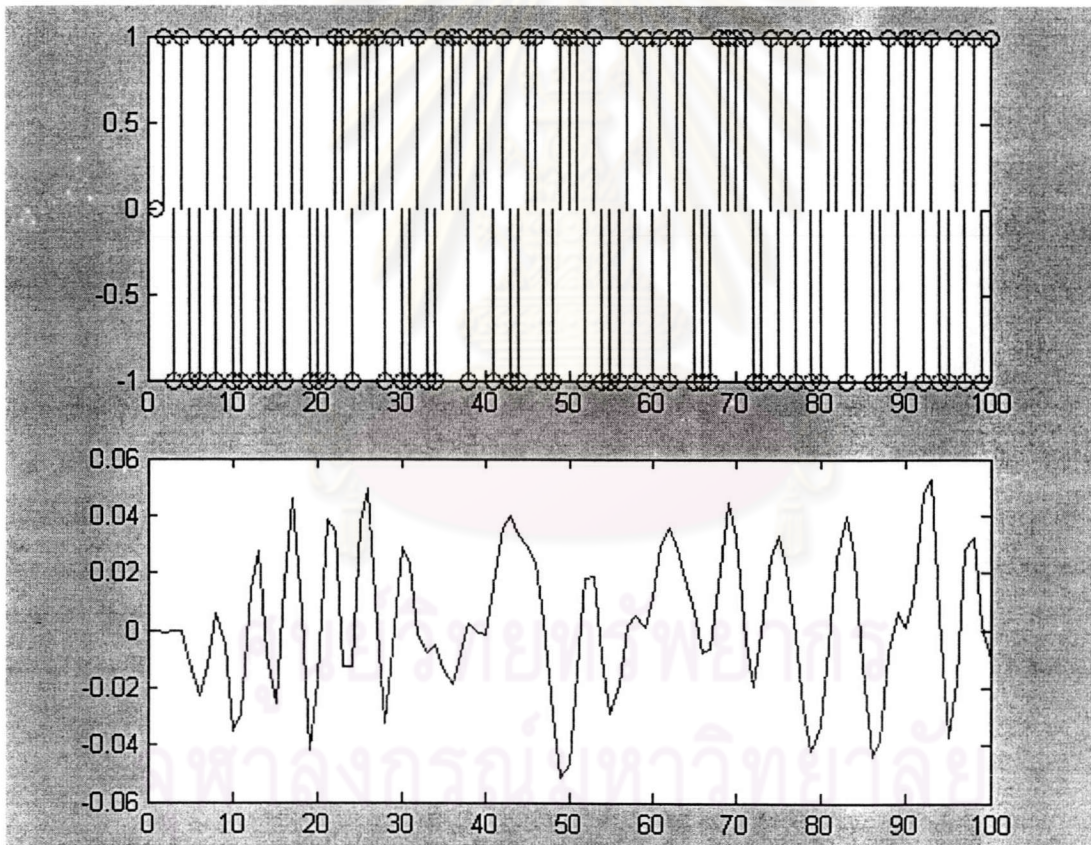
รูปที่ 5.1 สัญญาณ OFDM ซึ่งแยกให้เห็นเป็นคลื่นพหุย่อย 3 ชุด

จุดแรกของ IFFT (f_0) ซึ่งเป็นจุดที่มีความถี่เป็นศูนย์จะไม่ถูกใช้สำหรับการสร้างสัญญาณเนื่องจากเป็นสัญญาณ DC นอกจากนี้สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือจุดต่าง ๆ บน IFFT นั้นจะมีคู่ของมันเสมอ (ยกเว้นจุดแรกความถี่ศูนย์ที่ไม่มีคู่) ดังนั้นในการใส่ค่าสัญลักษณ์ใด ๆ ลงบนความถี่หรือบนแต่ละจุดของ IFFT นั้นจึงต้องใส่เป็นคู่ด้วยเช่นกัน โดยค่าทั้งสองของสัญลักษณ์ในแต่ละคู่ถ้าเป็นคอนจูเกตซึ่งกันและกันจะทำให้ได้สัญญาณด้านเวลาที่เป็ค่าจริงทั้งหมด ในแต่ละตำแหน่งที่มีการใส่บิตสัญลักษณ์นั้นหลังการแปลงฟูริเยร์แบบผกผันจะได้สัญญาณในโดเมนเวลาที่มีความถี่ประจำตำแหน่งนั้น ๆ หากแต่มีเฟสที่แตกต่างกันขึ้นกับบิตสัญลักษณ์ที่ใส่ลงไป ดังในรูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบการใส่บิตสัญลักษณ์ที่มีค่าเป็น $1+i$, $1-i$, $-1+i$, $-1-i$ ลงในความถี่ f_1



รูปที่ 5.2 รูปร่างของสัญญาณที่ค่าสัญลักษณ์ต่าง ๆ

จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้นจะขอยกตัวอย่างเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น เช่นถ้าต้องการส่งสัญญาณด้วยระบบ OFDM ไปบนคลื่นพาห่อย่อยจำนวน 128 ชุด จากที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่าแต่ละคลื่นพาห่อย่อยจะมีคู่คอนจูเกตของตัวเอง ดังนั้นจึงต้องใช้ IFFT เพิ่มเป็น 256 จุด ซึ่งเทียบได้กับการสุ่มโดยทั่วไปที่ต้องใช้ความถี่เป็น 2 เท่าซึ่งหมายความว่าในกรณีนี้จึงต้องใช้ IFFT ที่มีอย่างน้อย 256+1 จุด สำหรับบิตสัญลักษณ์ข้อมูลในนี้จะกำหนดให้มี 128 ค่าโดยเป็นแบบสุ่มและมีการเข้ารหัสแบบ BPSK ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการข้างต้นแล้ว ลักษณะของสัญญาณในโดเมนความถี่และโดเมนเวลาจะเป็นดังในรูปที่ 5.3 (ในรูปตัดมาแสดงเพียง 100 จุดจากทั้งหมด 256 จุด ทั้งนี้เพื่อต้องให้เห็นรายละเอียดของสัญญาณได้อย่างชัดเจน) สัญญาณในรูปที่ 5.3 นั้นประกอบขึ้นจากสัญญาณย่อย ๆ ทั้งหมด 128 ความถี่ซึ่งแต่ละสัญญาณมีคุณสมบัติตั้งฉากกัน (orthogonal)

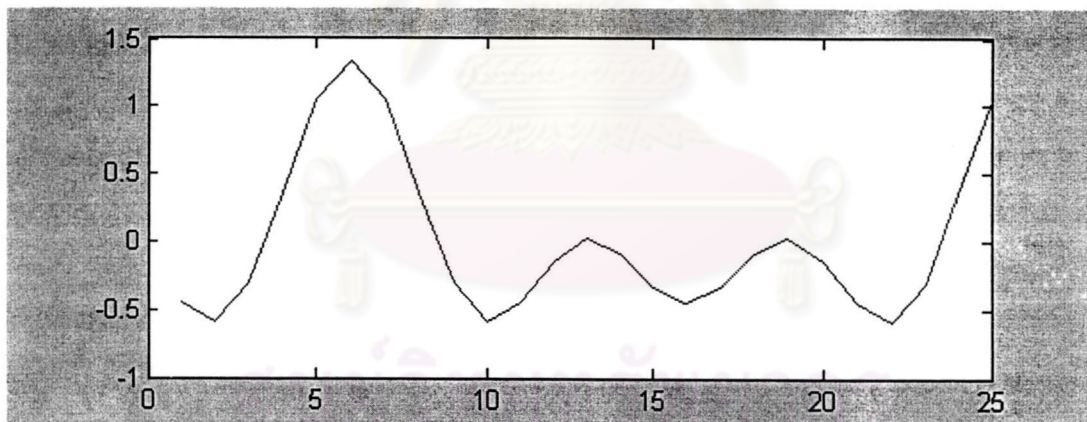


รูปที่ 5.3 ตัวอย่างของสัญญาณ
(ก) โดเมนความถี่ (ข) โดเมนเวลา

5.3 การรบกวนทางความถี่ (ICI) และการทดสอบ

การรบกวนทางความถี่หรือ ICI หมายถึงการรบกวนที่เกิดจากคลื่นพาห่ออื่น ๆ ซึ่งส่งผลทำให้ข้อมูลที่อยู่บนคลื่นพาห่อที่กำลังพิจารณาเกิดความผิดเพี้ยนไป ดังนั้นในระบบ OFDM ซึ่งมีการส่งข้อมูลไปบนคลื่นพาห่อหลายชุดพร้อม ๆ กันจึงมีโอกาสเกิด ICI ได้เช่นกัน แต่ระบบ OFDM ก็มีวิธีการป้องกันการเกิด ICI โดยการใช้เวลาคูมแบบ Cyclic Extension ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดแล้วในบทที่ 2 สำหรับในส่วนของบทนี้จะทำการทดสอบให้เห็นว่า ICI ส่งผลกระทบอย่างไรต่อสัญญาณ และเวลาคูมแบบ Cyclic Extension สามารถแก้ปัญหานี้ได้อย่างไร สำหรับในการทดสอบเพื่อให้เห็นถึงผลกระทบและการแก้ปัญหาเกี่ยวกับ ICI ได้โดยง่าย กำหนดให้ระบบที่ใช้ทดสอบประกอบไปด้วยคลื่นพาห่อย่อยเพียง 3 ชุดซึ่งแทนด้วย $[f_1, f_2, f_3]$ ซึ่งที่จริงใช้เมตริกซ์ขนาดเพียงแค่ 7 จุด (คิดจาก 2 เท่าของจำนวนคลื่นพาห่อที่ใช้ บวกกับจุดแรกซึ่งเป็น DC) ก็เพียงพอ แต่ในที่นี้จะใช้เมตริกซ์ขนาด 20 จุดเพื่อความละเอียดในการสุ่มตัวอย่าง

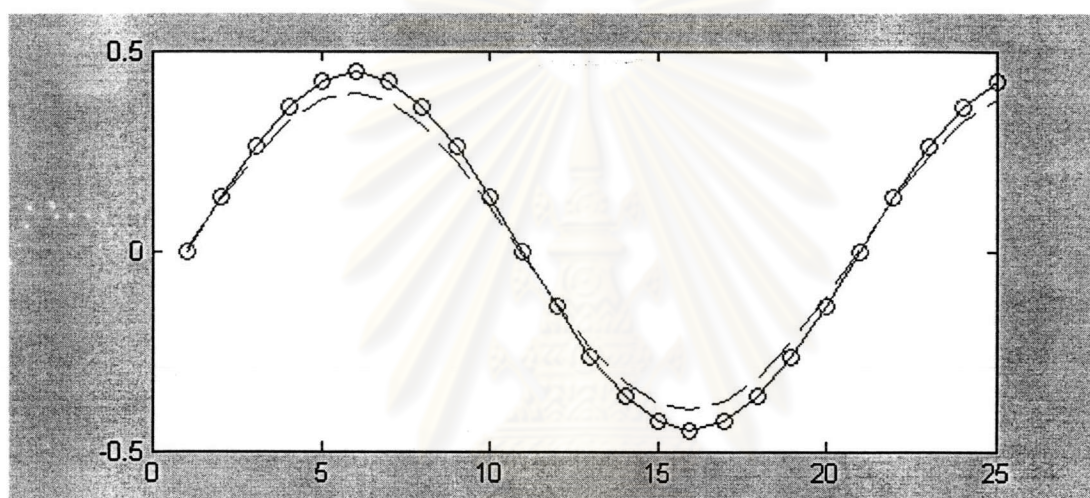
เริ่มต้นจะกำหนดให้บิตข้อมูลที่ส่งมีค่าเป็น 1 1 1 และเวลาคูมที่ใช้เป็น 5 บิตซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณทางเวลามีลักษณะดังในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างสัญญาณ OFDM ในโดเมนเวลา

สัญญาณรวมที่ได้นี้กำหนดให้เมื่อผ่านช่องสัญญาณจะเกิดพหุวัตินขึ้นอีก 1 เส้นทางโดยกำหนดให้มีการประวิงไป 2 รูปแบบคือ 2 บิต และ 8 บิตเพื่อทดสอบผลของเวลาคูม สำหรับในการทดสอบนี้จะพิจารณาแต่สัญญาณในความถี่ f_1 และผลของ ICI เท่านั้น ดังนั้นผลของ INSI ของความถี่ f_1 จะถูกตัดออกไป รูปที่ 5.5 เป็นรูปของสัญญาณเฉพาะความถี่ f_1 หลังจากที่ผ่านมาช่องสัญญาณทั้ง 2 แบบที่

เกิดการประวิงไปน้อยกว่าและมากกว่าเวลาคุม โดยจะเห็นได้ว่าหลังจากผ่านช่องสัญญาณที่มีการประวิงไป 2 บิตซึ่งน้อยกว่าเวลาคุมนั้นรูปร่างของสัญญาณยังคงเหมือนเดิม ในขณะที่เมื่อผ่านช่องสัญญาณที่มีการประวิงไป 8 บิตซึ่งมากกว่าเวลาคุม รูปร่างสัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนไปจากเดิมทั้งขนาดและเฟส โดยจากการจำลองพบว่าลักษณะของสัญญาณดังกล่าวให้ผลของข้อมูลเป็น $0.8871 + 0.0198i$ ซึ่งผิดไปจากเดิมที่กำหนดให้บิตข้อมูลมีค่าเป็น 1 ดังนั้นจากการทดสอบนี้จึงแสดงให้เห็นว่าหากเวลาประวิงของสัญญาณพหุวิถีมีค่าไม่มากไปกว่าเวลาคุม สัญญาณนั้นจะยังคงรูปร่างไว้ได้โดยไม่ผิดเพี้ยน

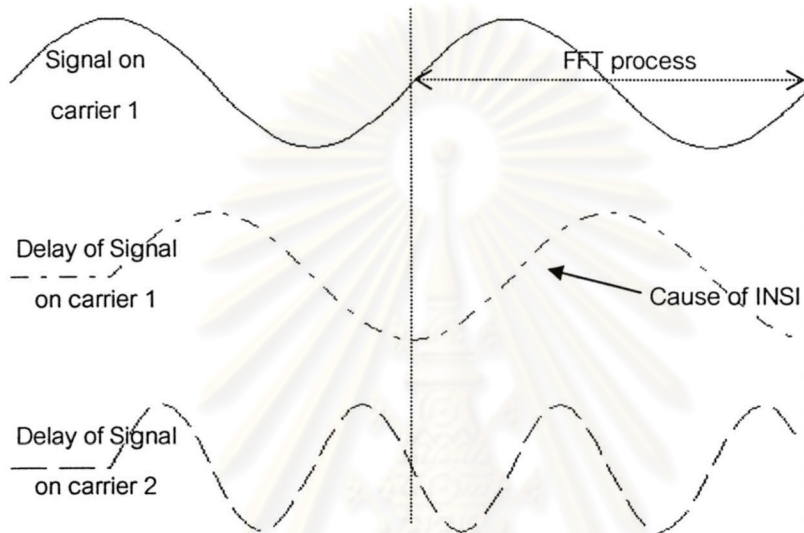


รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบรูปร่างของสัญญาณที่ประวิงไปน้อยและมากกว่าเวลาคุม

5.4 การรบกวนทางสัญลักษณ์ (ISI)

การที่ระบบ OFDM อาศัยการส่งบิตข่าวสารไปบนคลื่นพาห่อย่อยหลาย ๆ ชุดพร้อมกัน ทำให้คาบของสัญลักษณ์มีความมากขึ้น ในสภาวะที่ต้องรับสัญญาณจากพหุวิถี (multipath) ซึ่งแต่ละวิถีมีการประวิงที่ต่างกันออกไปนั้น แต่ละสัญลักษณ์ในระบบ OFDM สามารถทนต่อการรบกวนแบบ ITSI (inter symbol interference) ได้ตราบใดที่การประวิงนั้นไม่มากไปกว่าเวลาคุม (guard time) ที่ระบบได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบจะยังคงอยู่ในสภาวะที่การประวิงในแต่ละวิถีไม่มากไปกว่าเวลาคุม แต่ระบบก็จะยังคงเจอกับการรบกวนรูปแบบหนึ่งนั่นคือ INSI (inner symbol interference)

การรบกวนแบบ INSI นี้เกิดจากการที่ความถี่คลื่นพหุย่อยในแต่ละตัวนั้นเกิดการประวิงไป จึงทำให้เกิดการรบกวนต่อความถี่นั้น ๆ เองดังในรูปที่ 5.6 แต่ระบบ OFDM นั้นถูกออกแบบมาให้สามารถกำจัดเพียงผลของการประวิงของความถี่อื่นที่ไม่ตรงกับความถี่ตนเองตนเองเท่านั้น ดังนั้น ถ้าฟังก์ชัน OFDM จึงไม่สามารถจัดการกับการรบกวนแบบ INSI นี้ได้



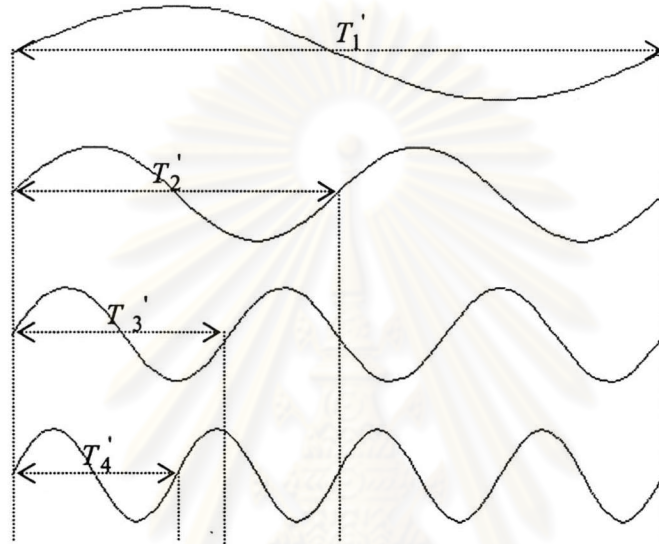
รูปที่ 5.6 การเกิดพหุวิติในสัญญาณ OFDM

การวิเคราะห์ INSI ทางการคำนวณ

สมมติให้ระบบ OFDM หนึ่งใช้ความถี่คลื่นพหุย่อยทั้งหมด N ชุด โดยความถี่ของแต่ละคลื่นพหุย่อยแทนด้วย $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ ตามลำดับ โดย f_1 จะเป็นความถี่หลักหรือความถี่มูลฐานซึ่ง $f_n = n \cdot f_1$ เสมอ และถ้ากำหนดให้ T เป็นคาบของสัญลักษณ์ OFDM และ T_n' เป็นคาบย่อยของคลื่นพหุย่อยที่ n ดังในรูปที่ 5.7 จะได้ว่า

$$T_n' = \frac{T}{n}, \quad n = (1, 2, \dots, N) \quad (5.2)$$

ในการวิเคราะห์นี้อยู่บนสมมติฐานที่ว่า มีสัญญาณที่เกิดการประวิงไปเมื่อเทียบกับสัญญาณหลักเพียงวิธีเดียวเท่านั้น เวลาที่ประวิงไปนั้นให้แทนด้วยตัวแปร τ สำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุดของแต่ละคลื่นพหุย่อยที่มีการประวิงไปนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อค่า τ มีค่าเท่ากับครึ่งคาบย่อยของแต่ละความถี่ ซึ่งเขียนได้ดังในสมการที่ 5.3



รูปที่ 5.7 คาบสัญญาณที่แตกต่างกันในแต่ละคลื่นพหุย่อย

$$\tau_n = \frac{T_n'}{2} + mT_n' \quad , m = (1, 2, \dots) \quad (5.3)$$

จากสมการที่ 5.2 และ 5.3 จะได้ว่า

$$n = \frac{(2m+1)}{\left(\frac{2\tau_n}{T}\right)} \quad , n = (1, 2, \dots, n) \quad (5.4)$$

เมื่อกำหนดให้ Δ แทนสัดส่วนที่เกิดการประวิงไปเมื่อเทียบกับคาบหลักจะได้ว่า

$$n = \frac{(2m + 1)}{2\Delta} \quad , n = (1, 2, \dots, n) \quad (5.5)$$

$$\Delta = \frac{\tau_n}{T}$$

ค่า n ในสมการที่ 5.5 ซึ่งต้องเป็นจำนวนเต็มนั้นบอกถึงคลื่นพายุย่อยที่เกิด INSI รุนแรงที่สุดในกรณีที่เกิดการประวิงไป τ ยกตัวอย่างเช่นถ้าการประวิงที่เกิดขึ้นมีค่า $\tau = \frac{T}{8}$ ซึ่งทำให้ $\Delta = \frac{1}{8}$ นำไปแทนค่าในสมการที่ 5.5 จะได้ค่า n ดังนี้

$$n = 4 \times (2m + 1) \quad (5.6)$$

$$n = 4, 12, 20, 28 \dots$$

ค่า n ที่ได้ในสมการที่ 5.6 นั้นบอกถึงลำดับของคลื่นพายุย่อยที่โดนผลกระทบของ INSI อย่างเต็มที่ ซึ่งจากตัวอย่างที่สมมุติ ผลการคำนวณแสดงว่าคลื่นพายุย่อยที่ 4, 12, 20, 28,... นั้นจะมีโอกาสตัดสินค้าบิตผิดพลาดเนื่องมาจากผลของการประวิงของสัญญาณมากที่สุด

อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากสมการที่ 5.5 และ 5.6 ไม่ได้หมายความว่า จะมีแค่คลื่นพายุย่อยใน ความถี่นั้นเท่านั้นที่โดนผลกระทบจาก INSI ความถี่อื่นนอกเหนือจากค่าที่หาได้ก็โดนผลกระทบนี้ด้วยเช่นกัน หากแต่ค่าที่หาได้จากสมการที่ 4 นั้นเป็นความถี่ที่โดนผลกระทบจาก INSI มากที่สุด

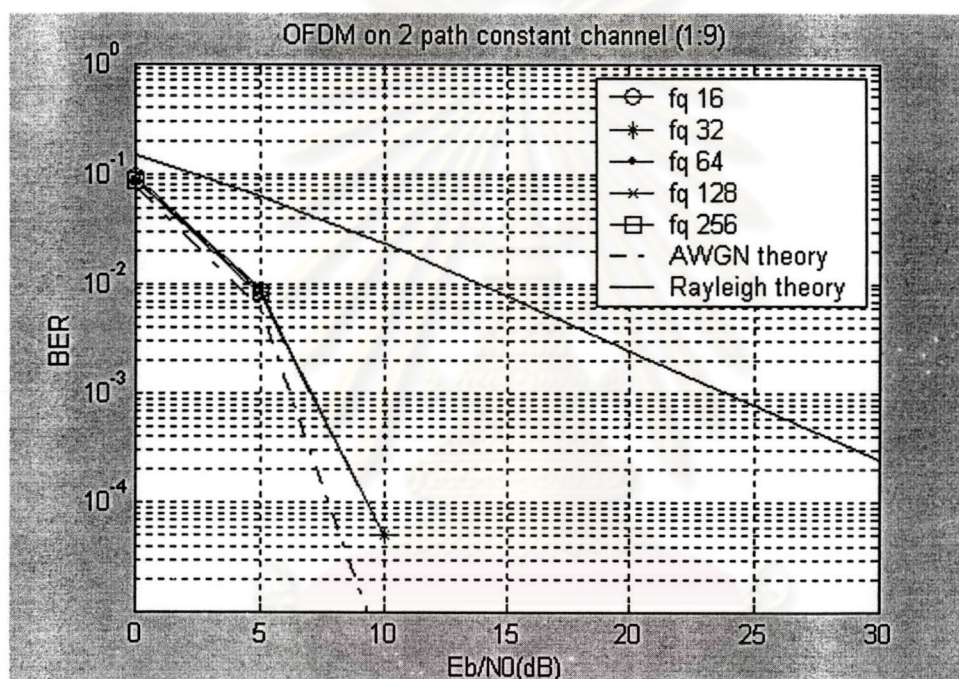
5.5 OFDM ซึ่งใช้กระบวนการหักล้าง

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบระบบ OFDM ซึ่งมีการใช้กระบวนการหักล้างในการแก้ไขปัญห อันเกิดจากผลการรบกวนแบบพหุวิถี ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้สัญญาณที่ภาครับเป็นผลรวมของสัญญาณจาก 2 วิถีและมาถึงที่ภาครับในเวลาต่างกันค่าหนึ่ง และลักษณะของช่องสัญญาณในการทดสอบนี้จะแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ ช่องสัญญาณแบบคงที่และช่องสัญญาณแบบเรย์ลี

5.5.1 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณคงที่

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบกระบวนการหักล้าง บนช่องสัญญาณที่มีลักษณะคงที่ในสัดส่วนที่ต่าง ๆ กันคือ 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 และ 9:1 โดยสัดส่วนที่กำหนดนี้หมายถึงสัดส่วนตัวคูณ เฟดดิ้งที่

ไปลดทอนหรือขยายขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละเส้นทาง สำหรับกระบวนการหักล้าง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถใช้ได้กับกรณีสัญญาณเกิดพหุวิถีแบบ 2 เส้นทางเท่านั้น ในการทดสอบนี้จะตั้งสมมติฐานว่าสัญญาณที่ส่งไปในแต่ละเฟรมมีเพียง 1 สัญลักษณ์ (แต่มีหลายบิตขึ้นอยู่กับจำนวนคลื่นพาห่อย่อยที่ใช้) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกสามารถที่จะกำหนดให้สัญลักษณ์ที่รู้ค่า (known symbol) ซึ่งกระบวนการหักล้าง จำเป็นต้องใช้เป็นค่าตั้งต้นในกระบวนการมีค่าเท่ากับจำนวนบิตในส่วนต้นของแต่ละเฟรมที่ไม่โดนผลกระทบจากพหุวิถีได้

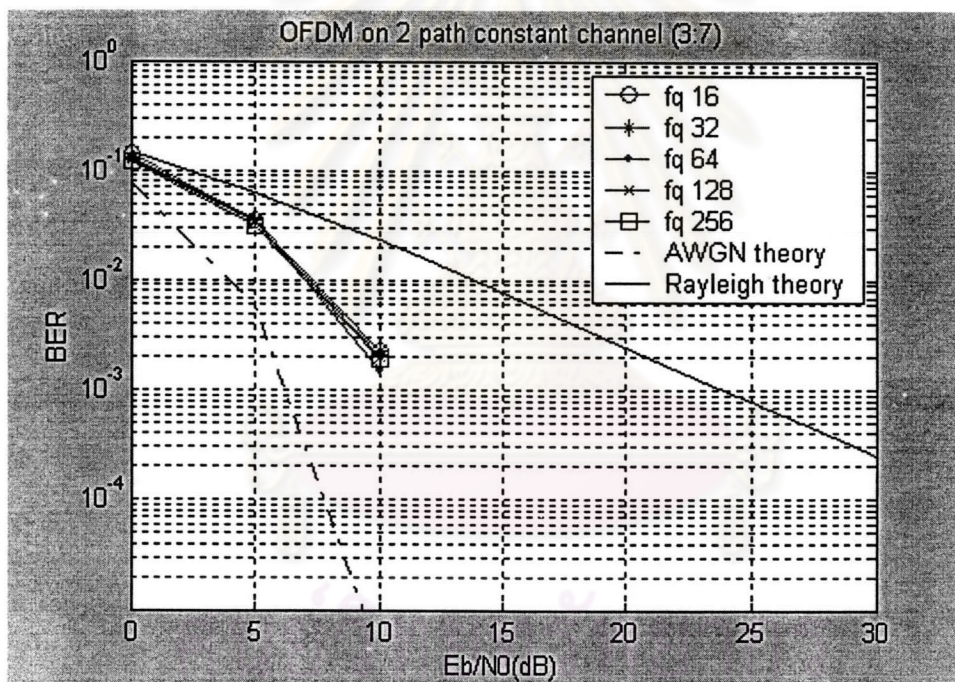


รูปที่ 5.8 BER ของระบบที่ใช้กระบวนการหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 1:9

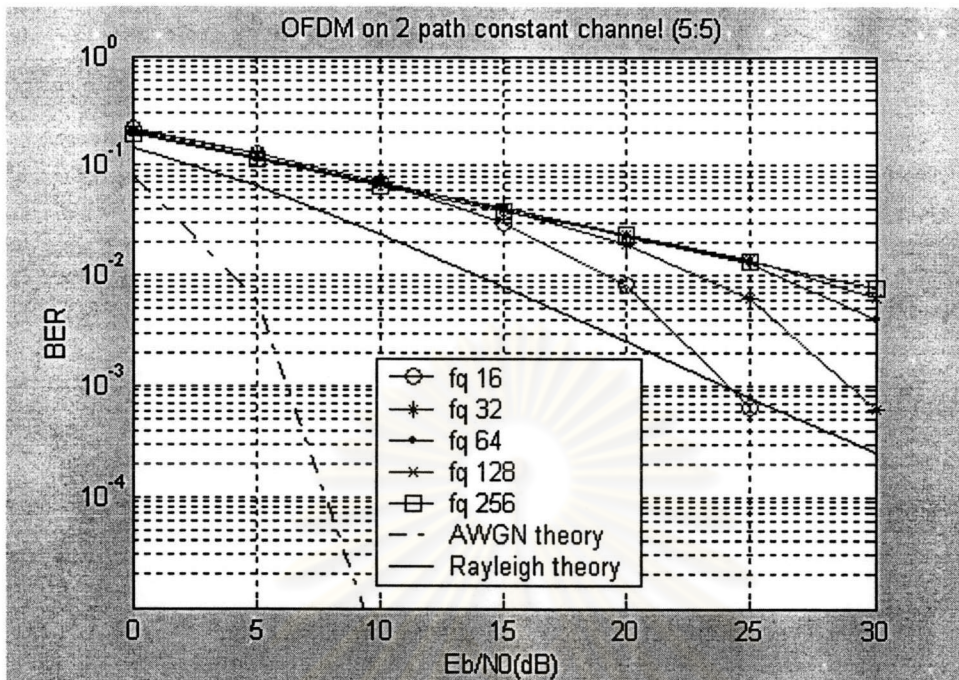
สำหรับผลการทดสอบบนช่องสัญญาณที่มีสัดส่วนเป็น 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 และ 9:1 นั้นได้ผลการทดสอบดังในรูปที่ 5.8 ถึง 5.12 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากรณีที่ช่องสัญญาณมีสัดส่วนเป็น 1:9 และ 9:1 นั้น กระบวนการหักล้างจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดและการตัดสินใจผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงกับช่องสัญญาณที่โดนเพียง AWGN เท่านั้น ซึ่งแสดงว่าในกรณีที่ช่องสัญญาณทั้งสองมีสัดส่วนเป็น 1:9 และ 9:1 นั้น กระบวนการหักล้าง สามารถกำจัดผลการรบกวนจากพหุวิถีได้แทบจะทั้งหมด สำหรับผลการทดสอบเมื่อช่องสัญญาณมีค่าสัดส่วนเป็น 3:7 และ 7:3 ก็ให้ผลใกล้เคียงกัน และเมื่อเทียบกับกรณีก่อนหน้านี้อาจจะเห็นว่าอัตราการตัดสินใจผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม

และกรณีสุดท้ายที่ซึ่งช่องสัญญาณมีค่าสัดส่วนเป็น 5:5 นั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการบิดสินบิตผิดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับ 2 กรณีข้างต้น ทั้งนี้จึงอาจสรุปได้ว่ากระบวนการหักล้าง จะใช้ได้ดีในกรณีที่ช่องสัญญาณมีขนาดเฟดดิ้งต่างกันมาก ๆ

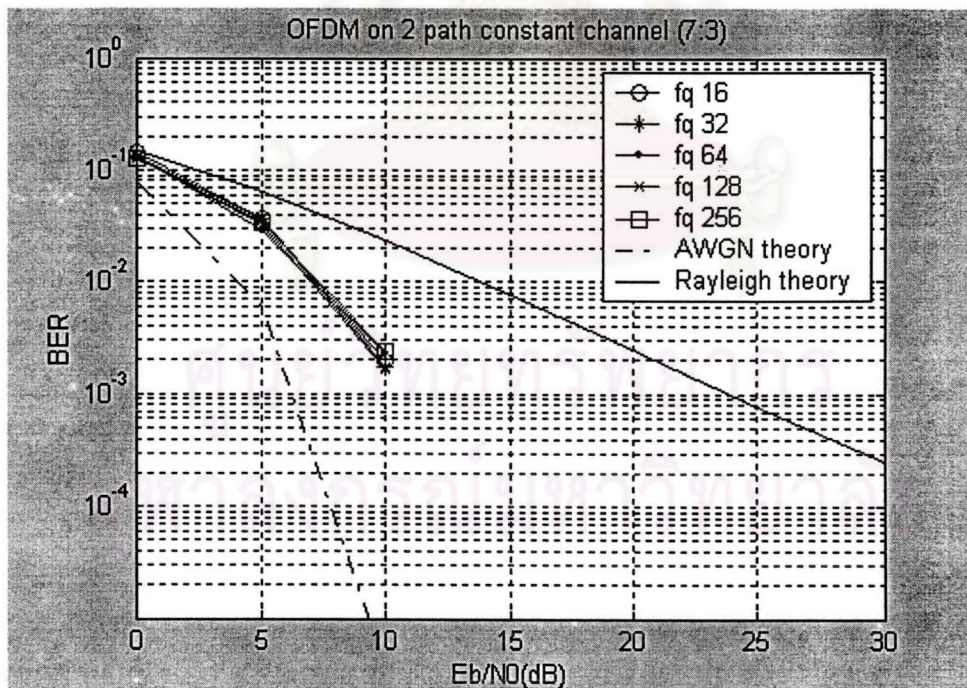
นอกจากนี้ในรูปที่ 5.10 ซึ่งเป็นกรณีที่ช่องสัญญาณมีค่าสัดส่วนเป็น 5:5 นั้นจะเห็นว่าความสามารถของกระบวนการหักล้าง สำหรับสัญญาณ OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาห้อย่อยต่าง ๆ กันนั้นแตกต่างกันอย่างมีรูปแบบ โดยจากรูปจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณใช้จำนวนคลื่นพาห้มากขึ้นความสามารถของกระบวนการหักล้างในการแก้ไขผลของพหุวิถีจะแยลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความผิดพลาดสะสมในตัวกระบวนการหักล้าง ซึ่งจำนวนบิตที่กระบวนการหักล้างจะต้องจัดการในกรณีของสัญญาณที่ใช้จำนวนคลื่นพาห้มาก ๆ นั้นมีมากกว่าสัญญาณที่ใช้จำนวนคลื่นพาห้น้อย ๆ



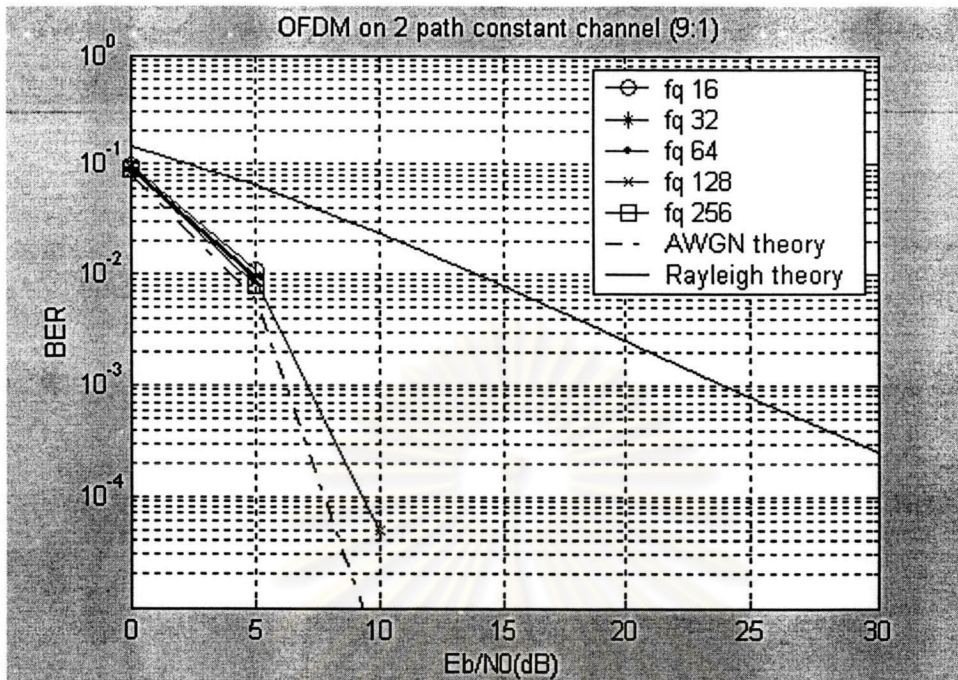
รูปที่ 5.9 BER ของระบบซึ่งใช้กระบวนการหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 3:7



รูปที่ 5.10 BER ของระบบที่ใช้กระบวนการหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 5:5



รูปที่ 5.11 BER ของระบบที่ใช้กระบวนการหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 7:3

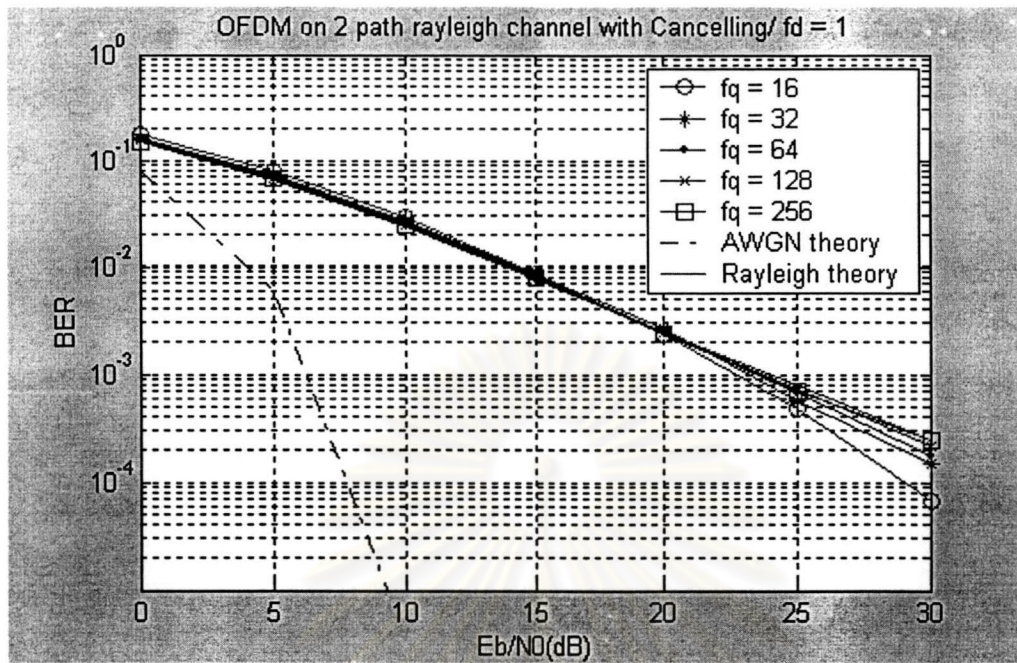


รูปที่ 5.12 BER ของระบบที่ใช้กระบวนการหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 9:1

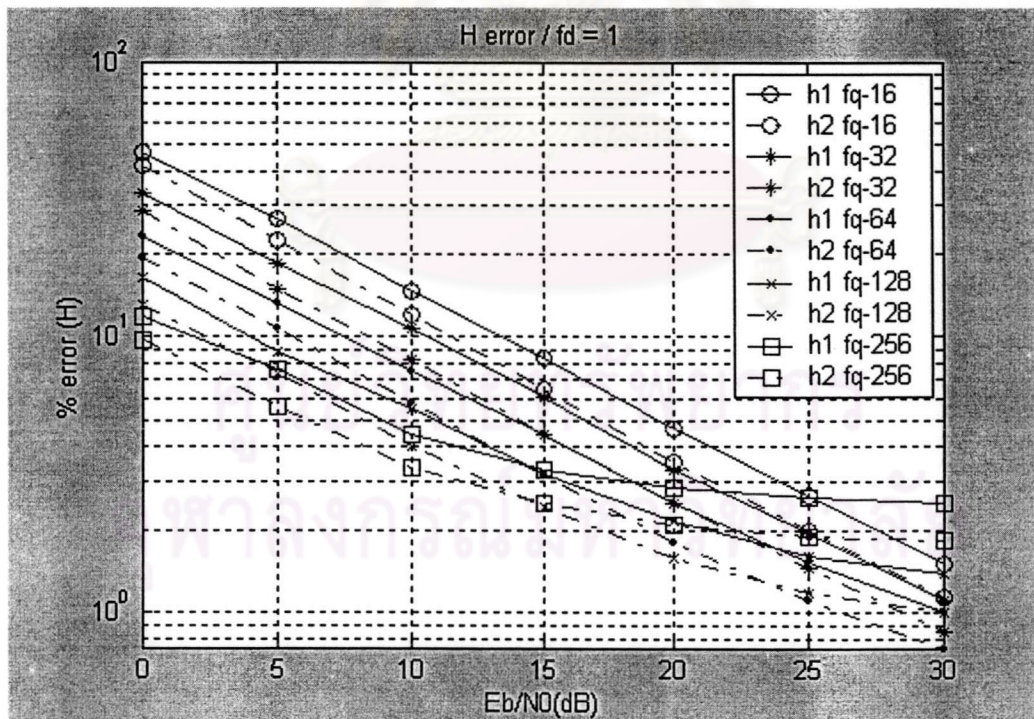
5.5.2 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรย์ลี 2 เส้นทาง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบกระบวนการหักล้างบนช่องสัญญาณพหุวิถี 2 เส้นทางซึ่งแต่ละเส้นทางมีการแจกแจงแบบเรย์ลีและเป็นอิสระต่อกัน สำหรับการแจกแจงเรย์ลีในการทดสอบนี้จะใช้ค่า $f_{d \max}$ เป็น 1 10 และ 40 ตามลำดับ ตัวแปร $f_{d \max}$ นี้เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกถึงความเร็วในการเปลี่ยนแปลงค่าเฟดดิ้งในช่องสัญญาณได้ โดยค่า $f_{d \max}$ ยิ่งมีมากเท่าไร ค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณก็ยิ่งเปลี่ยนแปลงเร็วเท่านั้น สำหรับตัวแปรที่กำหนดค่า $f_{d \max}$ นั้นคือความเร็วของภาครับ โดยภาครับที่เคลื่อนที่เร็วจะมี $f_{d \max}$ มากกว่าภาครับที่เคลื่อนที่ช้า

การส่งสัญญาณในระบบ OFDM ซึ่งใช้จำนวนคลื่นพาห่อย่อยจำนวนต่าง ๆ และค่าเฟดดิ้งช่องสัญญาณแต่ละเส้นทางเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลีที่มีค่า $f_{d \max}$ เท่ากับ 1 ให้ผลการทดสอบเป็นดังในรูปที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการตัดสินใจผิดพลาดทุกแบบในกรณีนี้มีค่าใกล้เคียงกับผลในทางทฤษฎีเมื่อช่องสัญญาณไม่มีผลของพหุวิถี แสดงว่ากระบวนการหักล้างสามารถกำจัดผลของพหุวิถีที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี และเมื่อตรวจสอบถึงความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละกรณีได้ผลเป็นดังในรูปที่ 5.14



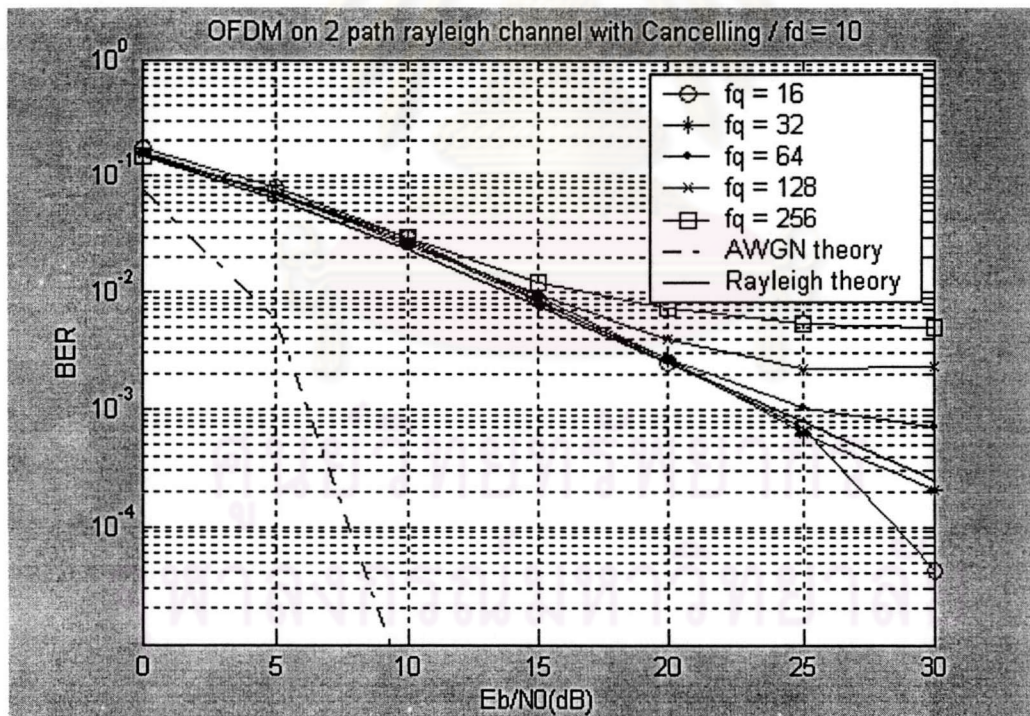
รูปที่ 5.13 BER ของระบบซึ่งใช้กระบวนการหักล้างในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 1$



รูปที่ 5.14 การประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 1$

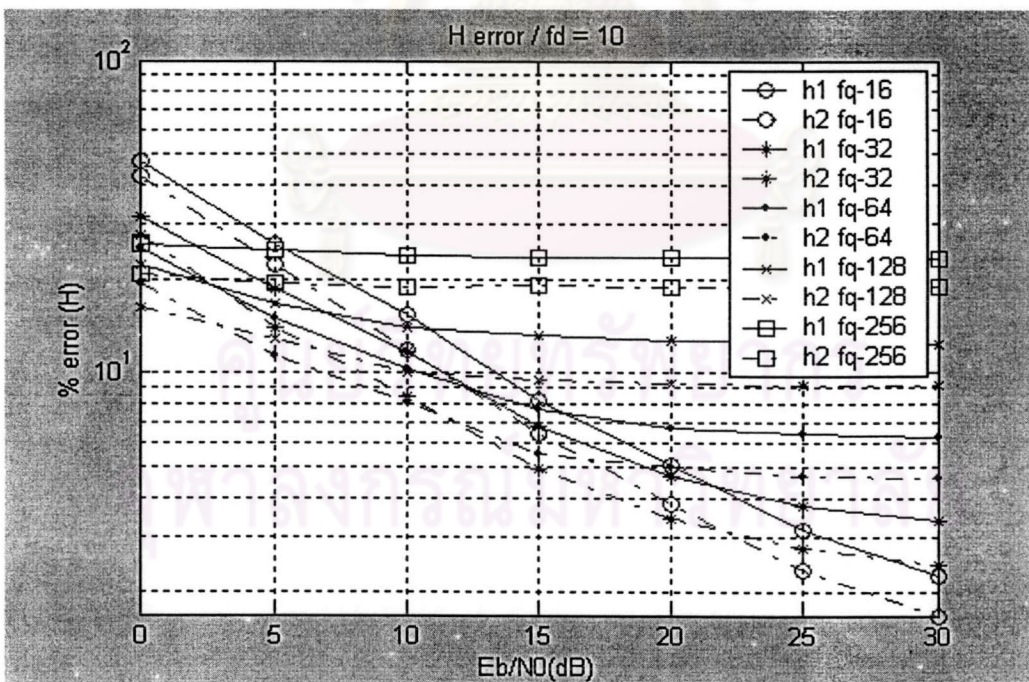
จากรูปที่ 5.14 จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในกรณีที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนน้อย ๆ มีแนวโน้มสูงกว่ากรณีที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ช่องสัญญาณแบบเรย์ลีที่มีค่า $f_{d \max}$ เท่ากับ 1 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงเวลา 1 คาบสัญญาณ ดังนั้นสิ่งที่ทำให้การประมาณค่าคลาดเคลื่อนไปนั้นจึงโน้มเอียงไปในด้านผลจากการรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีการกระจายแบบสุ่ม ดังนั้นสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนน้อยซึ่งมีจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการประมาณค่าเฟดดิ้งน้อยด้วยนั้น จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดมากกว่าสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนมากซึ่งมีจำนวนตัวอย่างในการประมาณค่าเฟดดิ้งมากกว่า

ในการทดสอบต่อมาเพิ่มค่า $f_{d \max}$ เท่ากับ 10 ได้ผลการซิมูเลชันเป็นดังในรูปที่ 5.15 ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพของกระบวนการหักล้างในการแก้ไขพหุวิถีในสัญญาณ OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาห้จำนวนน้อย ๆ จะดีกว่าในสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนมากกว่า โดยจากรูปพอจะประมาณได้ว่ากระบวนการหักล้างยังคงสามารถกำจัดผลของพหุวิถีได้อย่างดีในสัญญาณ OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาห้ต่ำกว่า 64 ชุด



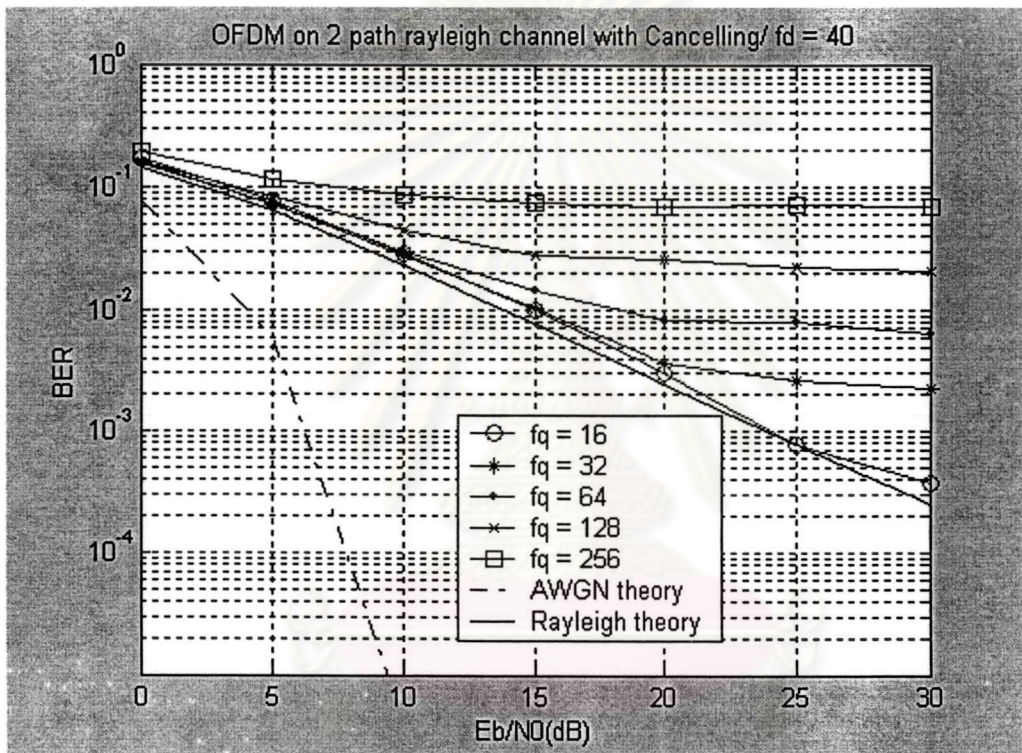
รูปที่ 5.15 BER ของระบบซึ่งใช้กระบวนการหักล้างในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d \max} = 10$

และเมื่อตรวจสอบถึงความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ โดยความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณเรย์ลีที่มีค่า $f_{d \max}$ เท่ากับ 10 เป็นดังในรูปที่ 5.16 ซึ่งเมื่อดูแนวโน้มโดยรวมจะพบว่าสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนมากกว่ามีแนวโน้มในการประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของช่องสัญญาณเรย์ลีในกรณีนี้มีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีก่อนหน้านี้ การที่เฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นทำให้ในแต่ละคาบของสัญลักษณ์มีโอกาสเจอกับเฟดดิ้งได้หลายค่า ดังนั้นสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห้หลายชุดทำให้คาบสัญลักษณ์กว้างขึ้นนั้น มีโอกาสเจอกับเฟดดิ้งที่หลากหลายค่ามากกว่าสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห้น้อยชุด (กระบวนการหักล้าง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้กำหนดให้สัญลักษณ์ 1 ตัวต้องโดนค่าเฟดดิ้งที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องมีการนำค่าเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นกับแต่ละบิตในสัญลักษณ์นั้น ๆ มาหาค่าเฉลี่ยแทน) นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าเมื่อค่า E_b/N_0 มีค่ามากขึ้น ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเฟดดิ้งในสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนมากกว่าจะแย้ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการที่ E_b/N_0 มีค่าสูง ๆ ซึ่งเราสามารถที่จะละผลการรบกวนแบบ AWGN ออกไปได้นั้น ทำให้กล่าวได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการที่เฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไม่ใช่จากผลของ AWGN อย่างกรณีก่อนหน้านี้



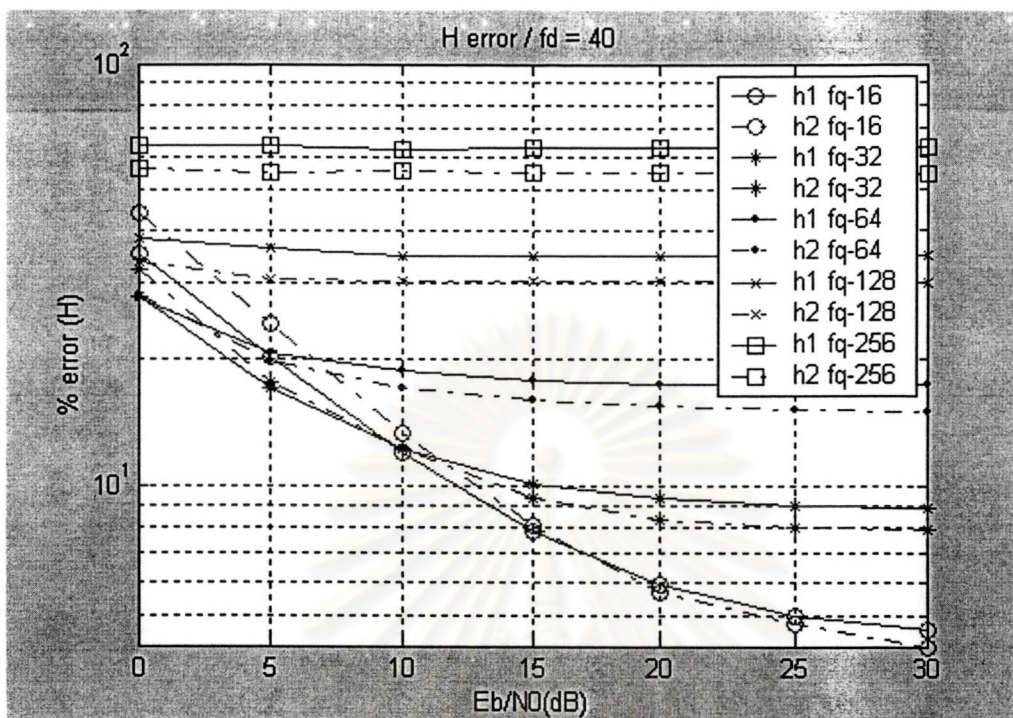
รูปที่ 5.16 การประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d \max} = 10$

การทดลองชุดสุดท้ายของกระบวนการหักล้าง ในช่องสัญญาณพหุวิถีที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลีนี้กำหนดให้ $f_{d \max}$ เท่ากับ 40 ซึ่งจะทำให้เฟดดิ้งมีการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่า 2 กรณีก่อนหน้านี้ ผลการทดสอบอัตราการตัดสินค่าผิดพลาดสำหรับกรณี $f_{d \max}$ เท่ากับ 40 เป็นดังในรูปที่ 5.17 โดยจากรูปจะเห็นว่า ประสิทธิภาพของกระบวนการหักล้างในการกำจัดผลของพหุวิถีมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ที่ช่องสัญญาณมีค่า $f_{d \max}$ เท่ากับ 10 หากแต่ในกรณีนี้ผลลัพธ์ของแต่ละกรณีมีความแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้นกว่าเดิม



รูปที่ 5.17 BER ของระบบซึ่งใช้กระบวนการหักล้างในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d \max} = 40$

ความผิดพลาดในการประมาณค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสำหรับกรณี $f_{d \max}$ เท่ากับ 40 เป็นดังในรูปที่ 5.18 ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้เช่นกันแต่มีความชัดเจนมากขึ้นเนื่องจากเฟดดิ้งในกรณีนี้มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีก่อนหน้านี้ ทำให้ผลของการประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดอันเกิดจากการรบกวนโดย AWGN มีน้ำหนักน้อยลงกว่าเดิม ซึ่งการวิเคราะห์ในจุดนี้สอดคล้องกับในรูปที่จะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนมากเกิดการประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดมากกว่าสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห้จำนวนน้อยอย่างชัดเจน



รูปที่ 5.18 การประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดในช่องสัญญาณเรยลี $f_{d_{max}} = 40$

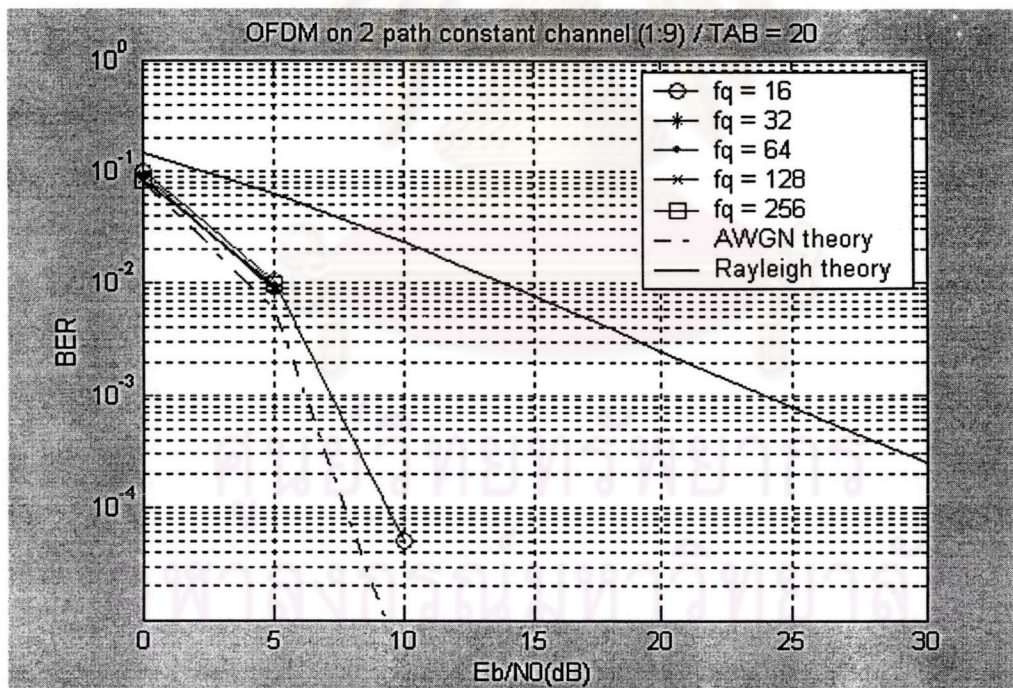
5.6 OFDM ซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบอีควอลไลเซอร์ โดยนำมาใช้ร่วมกับการส่งสัญญาณในระบบ OFDM การทดสอบทั้งหมดมีข้อสมมติฐานว่าช่องสัญญาณพหุวิถีที่ใช้มี 2 วิถี โดยแต่ละวิถีมีระยะห่างกันเป็นระยะเวลาคงที่ค่าหนึ่ง ในการทดสอบนี้จะทำเช่นเดียวกับในกรณีกระบวนการหักล้างที่ซึ่งการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณคงที่และช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรยลี

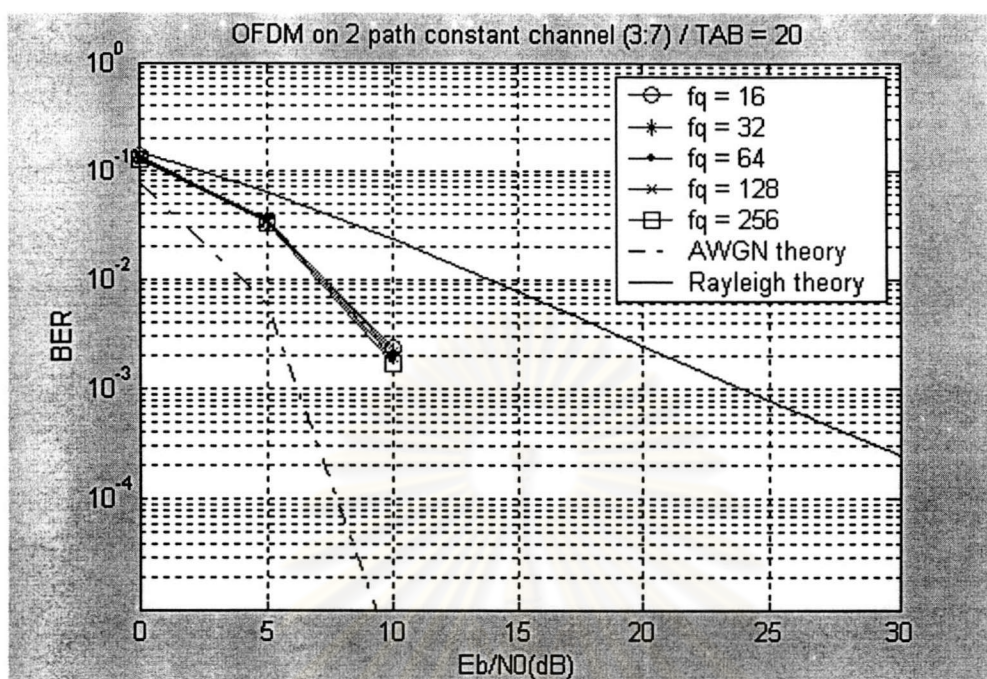
5.6.1 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณคงที่

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์ชนิด Zero-Forcing ในสภาพช่องสัญญาณพหุวิถี 2 ชุด ซึ่งในการทดลองนี้จะกำหนดให้คุณลักษณะของช่องสัญญาณแต่ละวิถีมีค่าคงที่ในสัดส่วนต่าง ๆ กันเพื่อที่จะสามารถวัดประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์ในแต่ละกรณีได้ ในการทดลองนี้จะกำหนดคุณลักษณะของช่องสัญญาณเชิงขนาดระหว่างวิถีที่หนึ่งและวิถีที่ 2 เป็นสัดส่วน 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 และ 9:1 เช่นเดิม

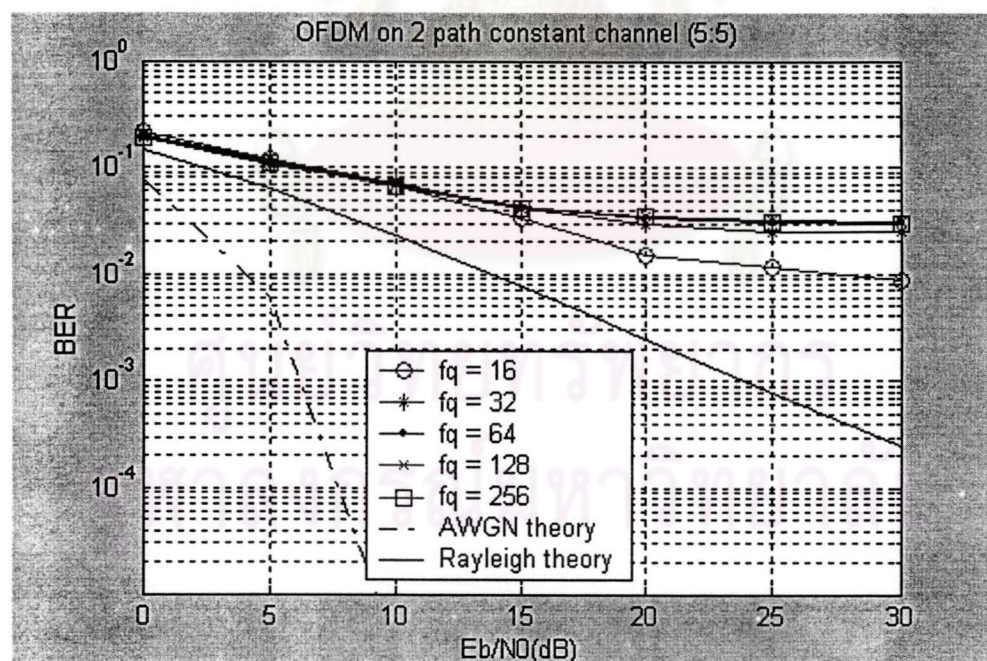
การทดสอบในบทนี้จะนำอ็ควอลไอเซอร์ที่มีขนาด 20 แท็บมาใช้กับระบบ OFDM ที่มีจำนวนคลื่นพาย้อย่อยจำนวนต่าง ๆ กันคือ 4, 16, 32, 64 และ 128 อย่างไรก็ตามสัญญาณหลังจากผ่านการแปลงฟูริเยร์แบบผกผันซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสร้างสัญญาณแบบ OFDM อาจจะมีพลังงานเฉลี่ยต่อบิตเปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้ในการแปลงของแต่ละโปรแกรมที่ใช้ทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องตรวจสอบขนาดพลังงานเฉลี่ยต่อบิตให้คงเดิมและเท่ากันทุกการทดสอบ ในการทดสอบทั้งหมดในบทนี้จะกำหนดให้พลังงานเฉลี่ยต่อบิตมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ การทดสอบประสิทธิภาพของอ็ควอลไอเซอร์จากการซิมูเลชัน ที่อัตราส่วนคุณลักษณะช่องสัญญาณเชิงขนาดมีค่าเป็น 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 และ 9:1 ให้ผลดังรูปที่ 5.19 – 5.23 ตามลำดับ จากผลการทดสอบโดยรวมมีจะเห็นว่า สามารถใช้อ็ควอลไอเซอร์ช่วยในการแก้ไขปัญหาพหุวิถีได้ เช่นเดียวกับกระบวนการหักล้าง โดยทั้ง 2 วิธีจะทำงานได้ดีเมื่อสภาพของช่องสัญญาณทั้งสองมีขนาดเฟดดิ้งต่างกันมาก ๆ และจะมีประสิทธิภาพไม่ดีเมื่อเฟดดิ้งมีขนาดใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าประสิทธิภาพของอ็ควอลไอเซอร์แยกว่าการใช้กระบวนการหักล้างเล็กน้อย



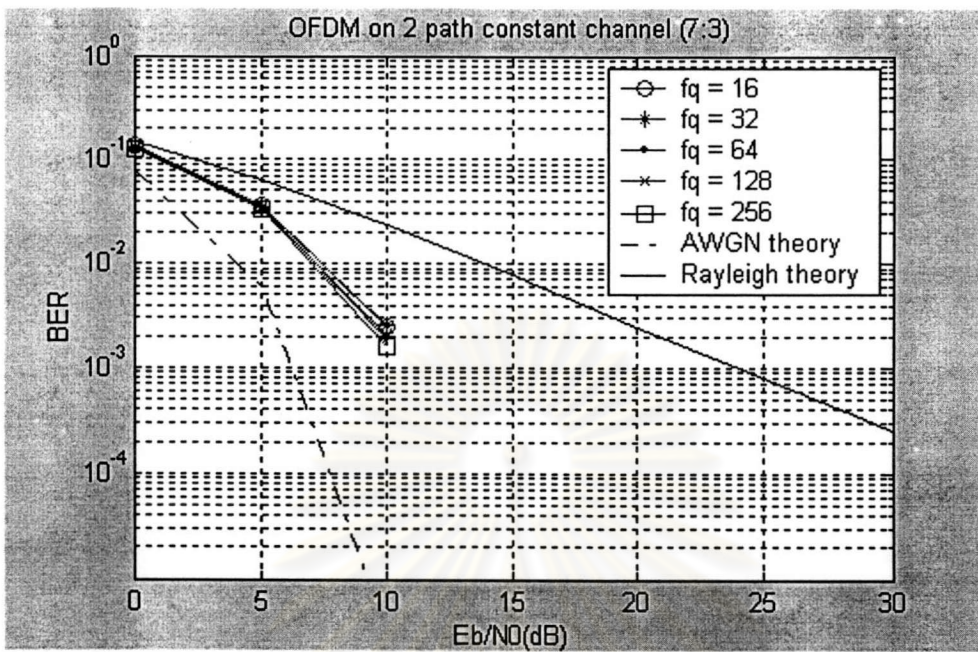
รูปที่ 5.19 BER ของระบบซึ่งใช้อ็ควอลไอเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 1:9



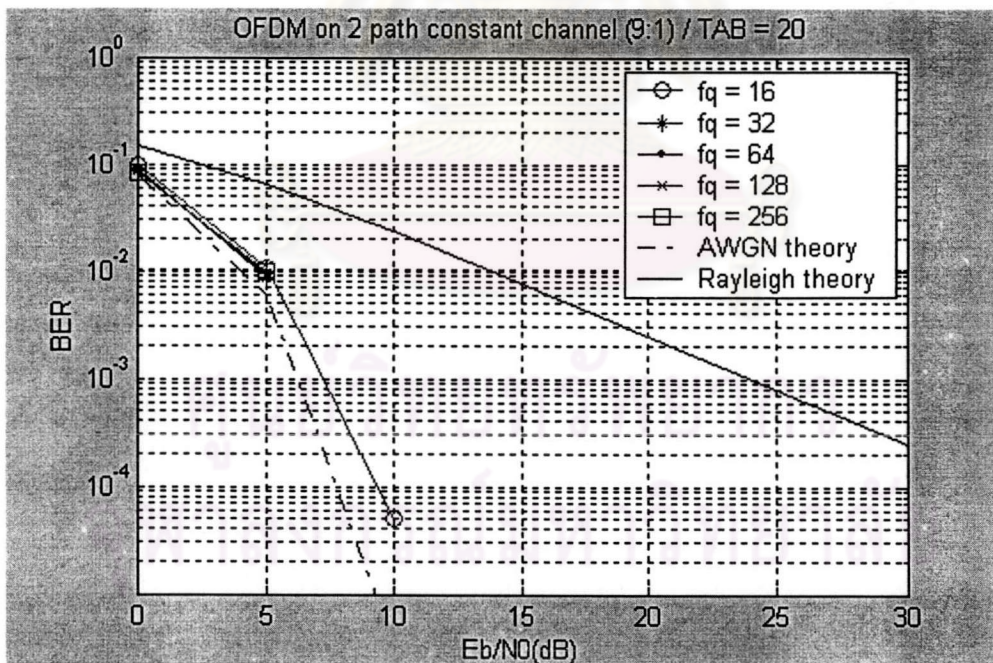
รูปที่ 5.20 BER ของระบบที่ใช้คิวโคโลเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 3:7



รูปที่ 5.21 BER ของระบบที่ใช้คิวโคโลเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 5:5



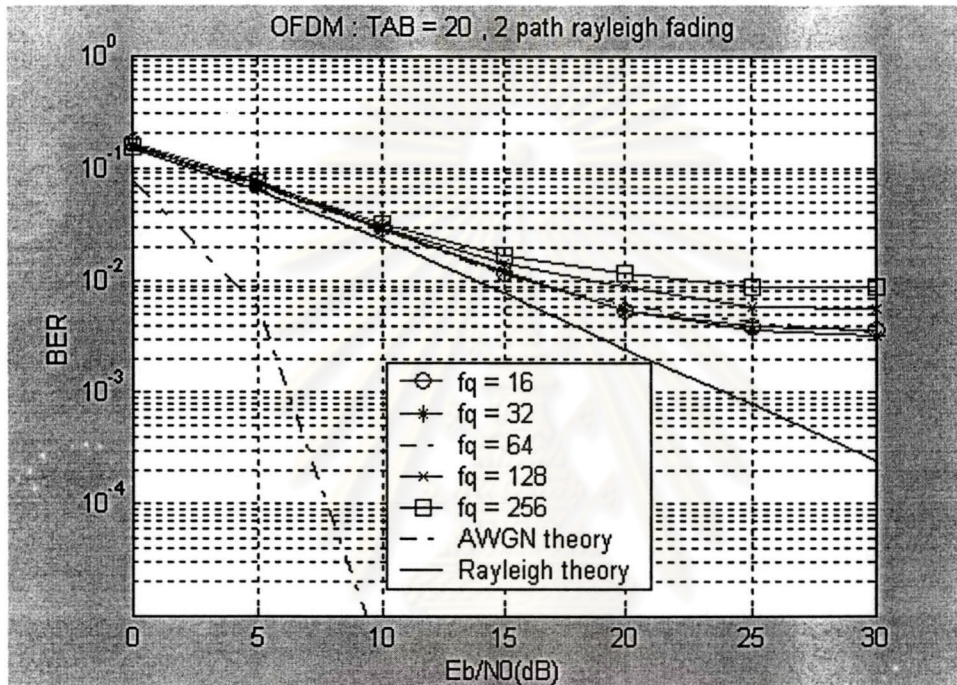
รูปที่ 5.22 BER ของระบบที่ใช้ไอควอลไลเซชันโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 7:3



รูปที่ 5.23 BER ของระบบที่ใช้ไอควอลไลเซชันโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 9:1

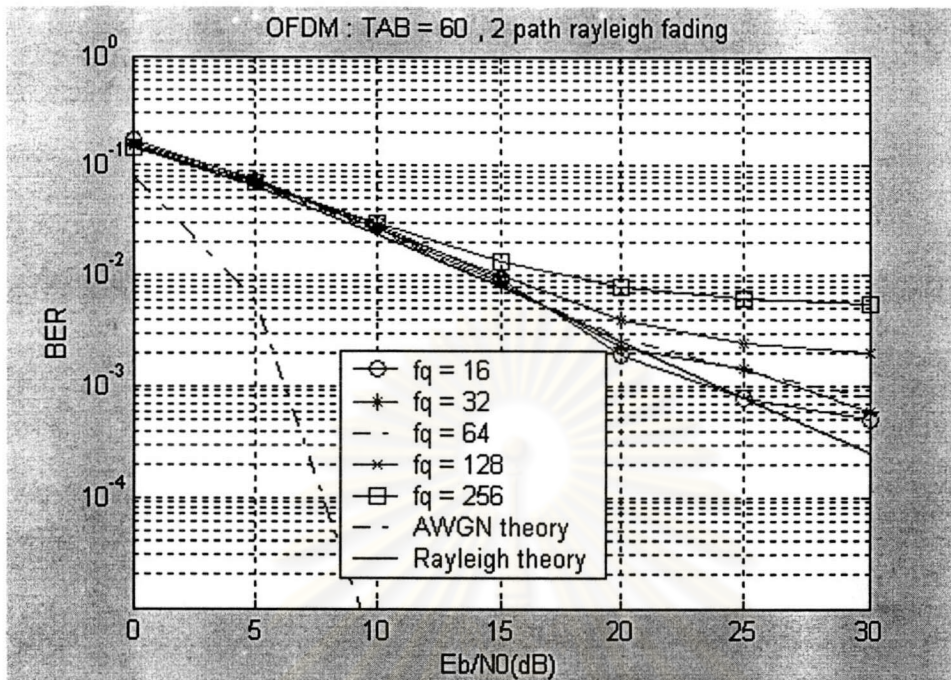
5.6.2 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรย์ลี

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์ชนิด Zero-Forcing ซึ่งมีขนาด 20 แท็บเช่นเดิม แต่เป็นการทดสอบกับสภาพของสัญญาณที่มี 2 วิธีโดยแต่ละวิธีมีการแจกแจงแบบเรย์ลี และวิธีที่ตามหลังมีการประวิงไป ผลการทดสอบเป็นดังในรูปที่ 5.24 และ 5.25



รูปที่ 5.24 BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์ 20 แท็บในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 10$

จากผลการทดสอบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์ที่มี 20 และ 60 แท็บดังในรูปที่ 5.24 และ 5.25 ตามลำดับนั้น จะเห็นว่าอีควอลไลเซอร์สามารถใช้ในการลดผลกระทบจากสัญญาณพหุวิถีได้ แต่ถ้าจะให้ประสิทธิภาพในการแก้ไขบิดผิดพลดมีค่าใกล้เคียงกับการใช้กระบวนการหักล้าง กล่าวคือทำให้ อัตราการตัดสินผิดพลาดของภาครับ มีค่าใกล้เคียงกับกรณีของสัญญาณแบบวิถีเดียวซึ่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลีได้นั้น อีควอลไลเซอร์จำเป็นต้องใช้แท็บจำนวนมากขึ้นดังจะเห็นได้จากผลการชิมูเลชัน

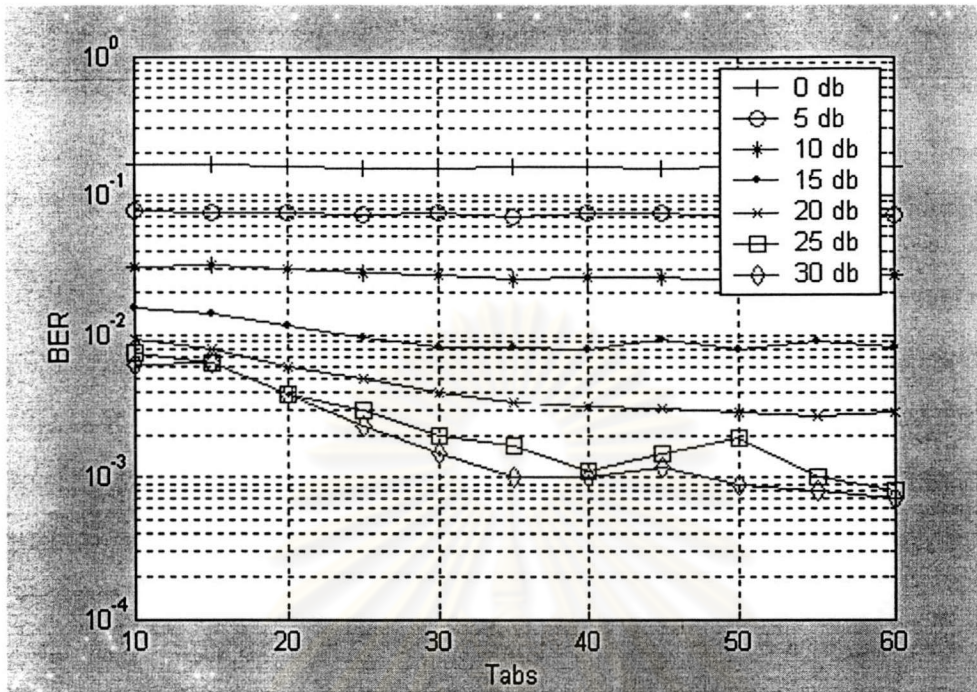


รูปที่ 5.25 BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์ 60 แท็บในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 10$

สมรรถนะของอีควอลไลเซอร์กับจำนวนแท็บ

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของอีควอลไลเซอร์และจำนวนแท็บที่ใช้ที่ค่าระดับพลังงานต่าง ๆ ในการทดสอบกำหนดให้สัญญาณ OFDM ใช้คลื่นพาหีย่อยจำนวน 32 ชุด อีควอลไลเซอร์ที่ใช้มีจำนวนแท็บตั้งแต่ 10 ถึง 60 ผลการทดสอบเป็นดังในรูปที่ 5.26

จากรูปที่ 5.26 จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของอีควอลไลเซอร์ที่มีแท็บมากกว่ามีแนวโน้มที่ดีกว่าอีควอลไลเซอร์ที่มีจำนวนแท็บน้อย โดยความแตกต่างนี้จะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น จากผลการทดลองตามรูปที่ 5.26 พบว่าที่ระดับพลังงานตั้งแต่ 15 เดซิเบลขึ้นไป สมรรถนะของอีควอลไลเซอร์นั้นดีขึ้นตามจำนวนแท็บจนกระทั่งถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และหลังจากนั้นสมรรถนะของอีควอลไลเซอร์จะไม่เพิ่มขึ้นอีกแม้จะเพิ่มจำนวนแท็บก็ตาม สำหรับที่ระดับพลังงานต่ำกว่า 15 เดซิเบลจะเห็นว่าสมรรถนะของอีควอลไลเซอร์นั้นแย่มาก ๆ กันหมดไม่ว่าจะใช้จำนวนแท็บเป็นเท่าไรก็ตาม ซึ่งผลการทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจ เพื่อกำหนดจำนวนแท็บที่ใช้ในอีควอลไลเซอร์ที่ค่าระดับพลังงานต่าง ๆ ได้



รูปที่ 5.26 สมรรถนะของอีควอไลเซอร์เทียบกับจำนวนแทปที่ค่าพลังงานระดับต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย