

บทที่ 6

ระบบที่นำเสนอ

6.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบที่เสนอ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบเดิมในสภาวะช่องสัญญาณที่มีพหุวิถีแบบ 2 เส้นทางโดยใช้อีควอลไลเซอร์ ทั้งนี้เฟดดิ้งในแต่ละเส้นทางจะมีการกระจายตัวแบบเรย์ลีอย่างอิสระต่อกัน ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดจากพหุวิถีโดยใช้ระบบจัดการสรรการทำงาน (Assignment Managing System) ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างอีควอลไลเซอร์แบบ Zero-Forcing กับกระบวนการหักล้าง รวมถึงระบบจัดการสรรการทำงานแบบปรับค่าได้ซึ่งสามารถปรับค่าการตัดสินใจได้ตามพลังงานของสัญญาณที่ได้รับ

6.2 แนวคิดของระบบที่นำเสนอ

สัญลักษณ์ข้อมูลในโครงสร้างของระบบที่เสนอในบทนี้ จะมีพื้นฐานอยู่บนการเข้ารหัสแบบ QPSK และสุดท้ายมีการมอดูเลตเป็นสัญญาณ OFDM เพื่อทำการส่งต่อไป โดยในการมอดูเลตสัญญาณ OFDM นั้นจะมีการกันช่วงเวลาไว้ประมาณ $1/4$ ของคาบสัญญาณเพื่อทำเป็นช่วงเวลาคุม (guard time) ลักษณะของช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบที่เสนอนี้จะประกอบไปด้วยพหุวิถี 2 เส้นทางที่มีการกระจายตัวแบบเรย์ลีที่เป็นอิสระต่อกัน อันที่จริงแล้วระบบ OFDM ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณบนคลื่นพาหุหลายความถี่แบบขนานกันไปในนั้น สามารถทนต่อการเกิดพหุวิถีได้เป็นอย่างดีเนื่องจากสัญญาณที่ประวิงไปในความถี่อื่น ๆ นั้นจะไม่รบกวนต่อความถี่ที่กำลังพิจารณาเลยตราบใดที่การประวิงนั้นไม่เกินช่วงเวลาคุมที่ระบบได้สร้างไว้ แต่ถ้าหากสัญญาณที่ประวิงไปนั้นเป็นความถี่ที่กำลังพิจารณาอยู่ ก็ยังจะทำให้เกิดการรบกวนในความถี่ที่กำลังพิจารณานั้น ๆ ได้ และนี่คือปัญหาซึ่งงานวิจัยนี้พยายามจะแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้น

ระบบที่นำเสนอในขั้นแรกนั้น เป็นการนำอีควอลไลเซอร์เข้ามาช่วยในการจัดการกับปัญหาการประวิงไปของสัญญาณพหุวิถี ตัวอีควอลไลเซอร์ที่ใช้ในระบบที่นำเสนอนี้จะใช้ค่าเวลาที่ประวิงไปของแต่ละเส้นทาง และค่าเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นกับสัญญาณพหุวิถีในแต่ละเส้นทางมาใช้ในการปรับค่าน้ำหนักของตัวแก้ในอีควอลไลเซอร์ ค่าเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นในแต่ละช่องสัญญาณและในแต่ละเวลาเหล่านี้สามารถคำนวณได้ที่ภาครับ เนื่องจากมีสัญลักษณ์นำ (pilot symbol) ซึ่งภาคส่งทำการใส่มาเป็นระยะ ๆ ใน

ทุก ๆ ความถี่จำนวนหนึ่ง หน้าที่ของอีควอลไลเซอร์ที่ภาครับคือการพยายามทำให้สัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นสัญญาณพหุวิถีที่รวมกันอยู่ทั้ง 2 เส้นทางนั้น ให้มีรูปร่างใกล้เคียงกับสัญญาณเดิมที่ถูกส่งออกมาจากภาคส่งมากที่สุด

ระบบที่นำเสนอในขั้นที่สองเป็นการปรับปรุงเพิ่มเติมจากระบบในขั้นแรก โดยจากการทดสอบพบว่า การที่จะแก้ปัญหาการรบกวนจากพหุวิถีด้วยอีควอลไลเซอร์อย่างเดียวให้ได้ผลดีที่สุดนั้นอีควอลไลเซอร์เองจำเป็นจะต้องมีแท็บจำนวนมาก ซึ่งความซับซ้อนและเวลาในการทำงานจะเพิ่มตามจำนวนแท็บ ในขณะที่ถ้าแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยกระบวนการหักล้าง ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าแต่ก็มีความซับซ้อนมากกว่าเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำอีควอลไลเซอร์และกระบวนการหักล้างมาทำงานร่วมกัน ซึ่งสามารถทำให้ลดจำนวนแท็บที่ใช้ลงได้ ในขณะที่ความซับซ้อนโดยรวมก็ยังคงไม่มากนัก โดยจะขอเรียกว่าระบบจัดสรรการทำงาน หลักการทำงานก็โดยอาศัยค่าเฟดดิ้งที่ได้จากการประมาณช่องสัญญาณในขณะใด ๆ ซึ่งเป็นผลจากการให้มีสัญลักษณ์นำถูกสอดแทรกไว้ในทุก ๆ ความถี่จำนวนหนึ่ง และจากการที่ประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์จะขึ้นอยู่กับค่าเฟดดิ้งเป็นสำคัญ ดังนั้นเมื่อใดที่อีควอลไลเซอร์ไม่สามารถทำงานได้ดีถึงระดับที่กำหนด ระบบก็จะทำการเปลี่ยนให้กระบวนการหักล้างจัดการแทน และระบบที่ปรับปรุงต่ออีกระดับคือระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้ ทั้งนี้เนื่องจากพบว่าค่าที่ใช้กำหนดระดับประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์นั้นมีความสัมพันธ์กับระดับพลังงานของสัญญาณรับด้วย ดังนั้นการกำหนดให้ระบบจัดสรรการทำงานมีความสามารถในการปรับระดับประสิทธิภาพที่กำหนดได้ จะสามารถทำให้สัดส่วนการทำงานในกระบวนการหักล้างซึ่งมีกระบวนการซับซ้อนกว่าทำงานได้อย่างคุ้มค่าและเหมาะสมกับสภาวะในเวลาหนึ่ง

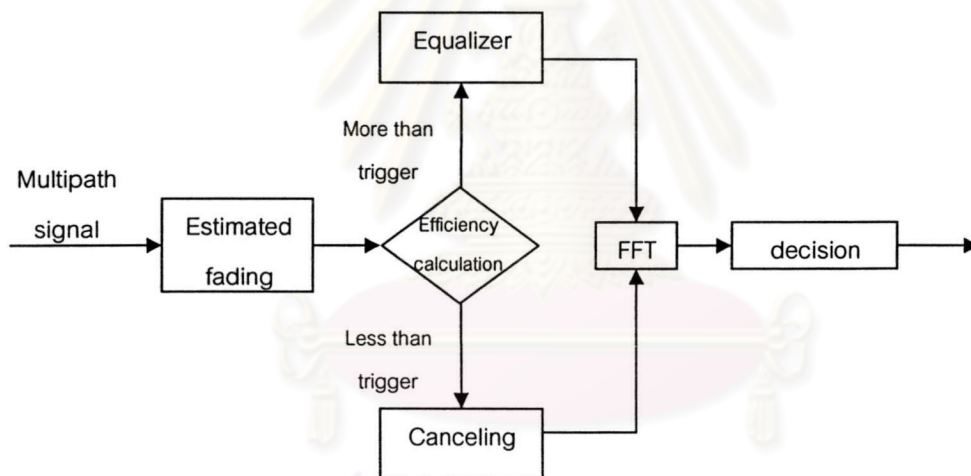
6.3 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

ในระบบที่นำเสนอนี้จะมุ่งเน้นในการจัดการที่ภาครับสัญญาณเท่านั้น โดยภาคส่งมีหน้าที่เพียงส่งสัญลักษณ์นำกับการส่งสัญลักษณ์ข้อมูล (data symbol) ตามที่ระบบได้กำหนดไว้ในตอนแรกแล้วเท่านั้น สำหรับที่ภาครับจะมีการใช้อีควอลไลเซอร์เข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาพหุวิถี โดยอีควอลไลเซอร์จะพยายามปรับรูปสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปให้กลับมามีรูปร่างเช่นเดิม ซึ่งระบบ OFDM ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้อีควอลไลเซอร์ ทำการปรับรูปสัญญาณในขณะที่สัญญาณยังอยู่ในโดเมนเวลา (time domain) หลังจากนั้น จึงนำสัญญาณที่ได้รับการปรับแล้วไปผ่านกระบวนการแปลงฟูริเยร์กลับเป็นโดเมนความถี่ (frequency domain) เช่นเดิมแล้วจึงนำสัญญาณนี้ไปตัดสินใจค่าบิต (decision) ดังในรูปที่ 6.1

สำหรับหลักการของระบบจัดสรรการทำงานนั้น ค่าเฟดดิ้งที่ประมาณได้จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของอีควอไลเซอร์ก่อน จากนั้นหากค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้สูงกว่าระดับที่กำหนด ระบบก็จะให้อีควอไลเซอร์จัดการกับสัญญาณพหุวิถีในขณะนั้นเอง แต่ถ้าค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้ต่ำกว่าระดับที่กำหนด ระบบก็จะให้กระบวนการหักล้างซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 4 จัดการกับสัญญาณพหุวิถีในขณะนั้นแทน กระบวนการที่กล่าวมานี้เป็นดังในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 สัญญาณถูกปรับแต่งโดยอีควอไลเซอร์ก่อนผ่านการแปลงฟูริเยร์

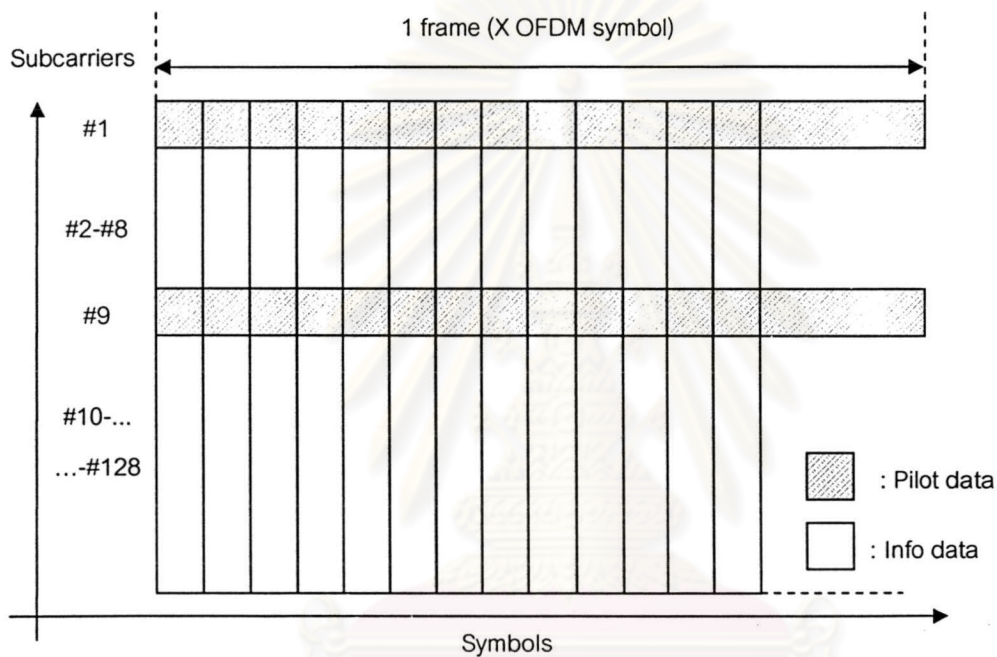


รูปที่ 6.2 โครงสร้างของระบบจัดสรรการทำงาน

สำหรับระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้นั้น โครงสร้างโดยรวมมีลักษณะเช่นเดียวกันกับระบบจัดสรรการทำงาน เพียงแต่ค่าระดับประสิทธิภาพต่ำสุดที่กำหนดของระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้นั้นจะแปรผันไปตามระดับพลังงานของสัญญาณรับ การที่ระดับประสิทธิภาพต่ำสุดสามารถเปลี่ยนแปลงได้จะทำให้ความซับซ้อนของระบบโดยรวมลดลง

6.4 การหาค่าเฟดดิ้งและเวลาที่ประวิงไป

ในระบบที่นำเสนอนี้จะมีการประมาณค่าเฟดดิ้งที่เกิดขึ้น และเวลาที่ประวิงไปในแต่ละช่องสัญญาณโดยอาศัยการแทรกสัญลักษณ์นำเข้าไปเป็นระยะ ๆ ร่วมกับสัญลักษณ์ข้อมูล โดยสัญลักษณ์นำนี้จะใส่เข้าไปทางโดเมนความถี่ทุก ๆ p ความถี่ดังในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การแทรกสัญลักษณ์นำลงในเฟรมสัญญาณ

โครงสร้างการใส่สัญลักษณ์ที่ด้านส่งสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีเพียงสัญลักษณ์นำและส่วนที่มีเพียงสัญลักษณ์ข้อมูลดังในรูปที่ 6.4 ในส่วนที่มีเพียงสัญลักษณ์นำนั้นจะแทนค่าศูนย์ในตำแหน่งที่เดิมเป็นสัญลักษณ์ข้อมูล สำหรับส่วนที่มีเพียงสัญลักษณ์ข้อมูลก็จะแทนค่าศูนย์ในตำแหน่งที่เป็นสัญลักษณ์นำเช่นกัน หลังจากนำสัญญาณนี้ไปผ่านกระบวนการแปลงฟูริเยร์ผกผัน (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) เพื่อเปลี่ยนเป็นโดเมนทางเวลา สัญญาณในส่วนแรกที่มีเพียงสัญลักษณ์นำจะยังคงมีรูปแบบเฉพาะ โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ระบบได้กำหนดไว้ กล่าวคือถ้าให้ N เป็นจำนวนจุดในการแปลงฟูริเยร์แบบผกผันและ N มีค่าเท่ากับ $p \times m$ โดย p คือจำนวนของความถี่ที่สัญลักษณ์นำ 1 ตัวจัดการอยู่ และ m คือจำนวนเต็มคู่ สัญญาณในส่วนที่เป็น

สัญลักษณ์นำหลังจากผ่านการแปลงฟูริเยร์แบบผกผันเป็นสัญญาณในโดเมนเวลาแล้ว จะมีค่าเป็น $C(n,L)$ โดย $(L=1, 2, \dots, X)$ หมายถึงสัญลักษณ์ OFDM ตัวที่ L และ X คือจำนวนสัญลักษณ์ใน 1 เฟรมดังในสมการที่ 6.1

$$C(n,L) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N c_k(L) e^{i2\pi \frac{(k-1)}{N} (n-(L-1).N-1)} \quad (6.1)$$

ค่า n เป็นจำนวนเต็มซึ่ง $(L-1) < n \leq (L)$

$$c_k(L) = ap_k(L) + i \times bp_k(L) \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (6.2)$$

โดยที่ $ap_k(L), bp_k(L)$ เป็นจำนวนเชิงซ้อนและมีค่าดังสมการที่ 6.3

$$ap_k(L), bp_k(L) = \begin{cases} P_L & : k = 1 + p \times l \quad (l = 0, 1, 2, \dots, m-1) \\ 0 & : k \neq 1 + p \times l \quad (l = 0, 1, 2, \dots, m-1) \end{cases} \quad (6.3)$$

ค่า P_L ในสมการที่ 6.3 เป็นแอมพลิจูดของสัญลักษณ์นำซึ่งในระบบที่นำเสนอนี้กำหนดให้มีค่าเป็น 1 และเมื่อนำสมการที่ 6.3 แทนค่าลงในสมการที่ 6.1 จะได้ผลดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} C(n,L) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N c_k(L) e^{i2\pi \frac{(k-1)}{N} (n-(L-1).N-1)} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_L + i.P_L) e^{i2\pi \frac{p \times l}{N} (n-(L-1).N-1)} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L + i.P_L) e^{i2\pi \frac{p \cdot l}{p \cdot m} (n-(L-1).N-1)} \quad , (\because N = m \cdot p) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L + i.P_L) e^{i2\pi \frac{l}{m} (n-(L-1).N-1)} \end{aligned}$$

ซึ่งถ้า $\frac{1}{m}(n-(L-1).(N-1))=u$ โดยที่ $(u=0, 1, \dots, p-1)$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} C(n,L) &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L + i.P_L) e^{i2\pi.l.u} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L + i.P_L) \\ &= \frac{m}{N} (P_L + i.P_L) \\ &= \frac{P_L}{p} + i.\frac{P_L}{p} \quad (\because N = m.p) \end{aligned}$$

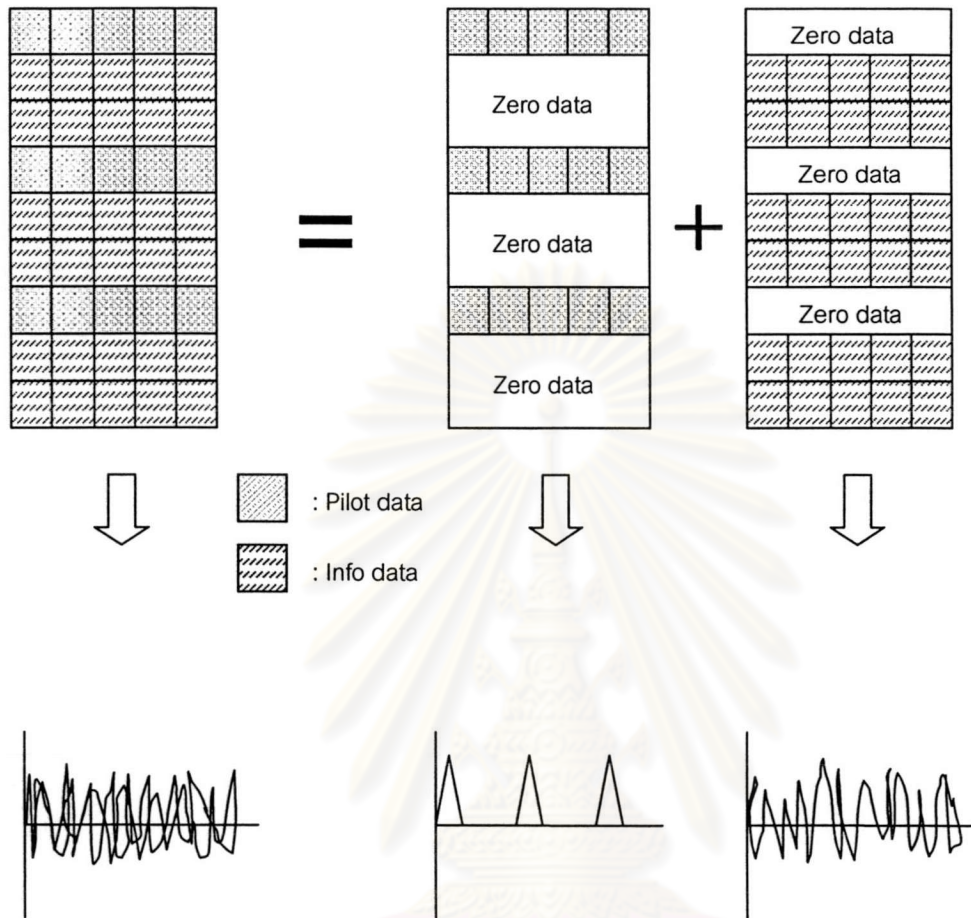
ส่วนที่เหลือนอกจากนั้นจะเป็น

$$\begin{aligned} C(n,L) &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L + i.P_L) e^{i2\pi.\frac{l}{m}(n-(L-1).N-1)} \\ &= \frac{1}{N} (P_L + i.P_L) \sum_{l=0}^{m-1} e^{i2\pi.w.\frac{l}{m}} \\ &= 0 + i.0 \quad (\because m = \text{จำนวนเต็มคู่}) \end{aligned}$$

โดย $w = n - (L-1).N - 1$

สุดท้ายได้ว่า

$$C(n,L) = \begin{cases} \frac{P_L}{p} + i.\frac{P_L}{p} & : n = m.u + (L-1).N + 1, (u = 0, 1, \dots, p-1) \\ 0 & : n \neq m.u + (L-1).N + 1, (u = 0, 1, \dots, p-1) \end{cases} \quad (6.4)$$

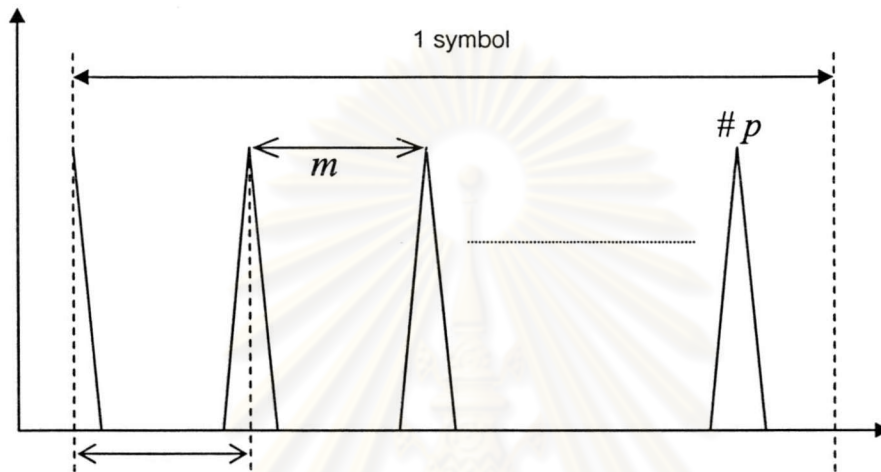


รูปที่ 6.4 เพรมข้อมูลเมื่อแยกเป็นส่วนของสัญลักษณ์นำและสัญลักษณ์ข้อมูล

จากสมการที่ 6.4 จะได้ว่าส่วนที่เป็นสัญลักษณ์นำหลังจากผ่านการแปลงฟูริเยร์ผกผันเพื่อแปลงเป็นสัญญาณในโดเมนเวลาแล้วนั้นจะเป็นสัญญาณที่มี p ยอดโดยมีระยะห่างของแต่ละยอดเป็น m จุด ซึ่งเราจะนำสัญญาณนำในที่อยู่ในโดเมนเวลานี้ไปใช้ในการประมาณค่าเฟดดิ้งและเวลาที่ประวิงไปของแต่ละเส้นทาง

สัญญาณที่ได้รับจะถูกนำมาหาค่าสหสัมพันธ์กับสัญญาณ $C(n, L)$ ที่มีลักษณะดังในรูปที่ 6.5 โดยในการทดสอบนี้สมมติให้สัญญาณที่ได้รับประกอบไปด้วยสัญญาณหลักและสัญญาณที่มีการประวิงไป (delay wave) ซึ่งในสัญญาณทั้ง 2 ส่วนนี้ยังคงมีส่วนที่เป็นสัญลักษณ์นำอยู่ ดังนั้นเมื่อนำไปหาค่าสหสัมพันธ์กับสัญญาณ $C(n, L)$ ที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้นแล้วก็จะได้ผลลัพธ์เป็นรูปแบบ

เฉพาะ ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มาสามารถนำไปใช้ในการประมาณหาค่าเฟดดิ้งทั้งในเชิงขนาดและเชิงมุม ในสัญญาณรับได้ โดยเราจะเรียกข้อมูลที่ได้จากการประมาณรูปแบบของการประวิงไปนี้ว่า EPC (Estimated Propagation Characteristics) [7, 8]



รูปที่ 6.5 รูปร่างของสัญญาณส่วนที่เป็นสัญลักษณ์นำในโดเมนเวลา

สัญญาณที่สามารถคำนวณข้อมูล EPC ได้ นั้น การประวิงที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณจะต้องมีค่าน้อยกว่าระยะห่างแต่ละยอดของสัญญาณ $C(n, L)$ ดังในรูปที่ 6.5 ซึ่งหมายความว่าทราบได้ว่าการประวิงนั้นมีค่าน้อยกว่า m จุด เรายังคงสามารถคำนวณข้อมูล EPC ได้ สำหรับการทดสอบซึ่งใช้การแปลงฟูริเยร์ N จุดและมีคาบของสัญลักษณ์ OFDM เป็น T_s นั้น ค่าประวิงสูงสุดที่ระบบยังคงสามารถหาได้ด้วยวิธีนี้คือ $m/N \cdot T_s$ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าระบบมี $N = 64$, $p = 4$ และแต่ละคลื่นพาห่อย่อยมีอัตราการส่งสัญลักษณ์เป็น 128 k/s ดังนั้นจะได้ $m = 16$, $m/N \cdot T_s = 1.95 \mu\text{s}$ โดยมีค่า $1/N \cdot T_s = 61 \text{ ns}$ เป็นเวลาในแต่ละจุด ด้วยข้อมูล EPC นี้จะทำให้เราสามารถประมาณค่าเฟดดิ้งทั้งในเชิงขนาดและเชิงมุมได้ก่อนการแปลงฟูริเยร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่แปลงสัญญาณที่ภาครับให้อยู่ในโดเมนความถี่

6.5 วิธีหาค่าเฟดดิ้งและเวลาที่ประวิงไป

จากที่ได้กล่าวในข้างต้น สัญญาณที่ด้านส่งจะมีการใส่สัญลักษณ์นำเข้าไปทุก ๆ ช่วง p ความถี่ก่อนการแปลงสัญญาณให้อยู่ในโดเมนเวลา ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ OFDM ตัวที่ L ก่อนการ

แปลงฟูริเยร์แบบผกผันมีค่าดังในสมการที่ 6.5

$$d_k(L) = a_k(L) + i \times b_k(L) \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (6.5)$$

ค่า $d_k(L)$ ในสมการที่ 6.5 เป็นจำนวนเชิงซ้อน โดยที่ $a_k(L), b_k(L)$ ถูกกำหนดให้มีค่าดังในสมการที่ 6.6

$$a_k(L), b_k(L) = \begin{cases} P_L & : k = 1 + p \times l \\ data & : k \neq 1 + p \times l \end{cases} \quad (6.6)$$

$$(l = 0, 1, 2, \dots, m-1)$$

ข้อมูล $d_k(L)$ ในสมการที่ 6.5 จะถูกนำไปแปลงฟูริเยร์แบบผกผันเพื่อทำให้เป็นสัญญาณ OFDM ที่อยู่ในโดเมนเวลา สัญญาณซึ่งผ่านการแปลงแล้วจะอยู่ในรูป discrete ซึ่งแทนด้วย $s(n, L)$ ดังในสมการที่ 6.7 หลังจากนั้นสัญญาณดิจิทัลในสมการที่ 6.7 นี้จะแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อก $s(t, L)$ โดย D/A แล้วจึงทำการส่งต่อไปในช่องสัญญาณ

$$s(n, L) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_k(L) e^{i2\pi \frac{(k-1)}{N} (n-(L-1)N-1)}, \quad (L-1) < n \leq L \quad (6.7)$$

สำหรับสัญญาณ OFDM ทางด้านรับซึ่งประกอบด้วยสัญญาณที่มีการประวิงไปจำนวน X ชุด สามารถเขียนแทนด้วย $r(t, L)$ ดังในสมการที่ 6.8

$$r(t, L) = \alpha e^{i\theta} s(t, L) + \sum_{\eta=1}^x (\beta_\eta e^{i\phi_\eta} s(t - \tau_\eta, L)) \quad , (\eta = 1, 2, \dots, x) \quad (6.8)$$

ค่า τ_η ในสมการที่ 6.8 คือเวลาที่ประวิงไปของสัญญาณที่ η เมื่อเทียบกับสัญญาณหลัก ส่วนค่า $\alpha e^{i\theta}$ และ $\beta_\eta e^{i\phi_\eta}$ คือสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงขนาด (α, β_η) และเชิงมุม (θ, ϕ_η) ของสัญญาณหลักและสัญญาณที่ประวิงไปตามลำดับ

สัญญาณรับที่อยู่ในรูปแอนะล็อกนี้จะถูกสุ่มด้วยอุปกรณ์ A/D เพื่อทำเป็นสัญญาณดิจิทัลซึ่งแทนด้วย $r(n, L)$ และสัญญาณที่ผ่านกระบวนการสุ่มแล้วจะถูกนำไปหาสหสัมพันธ์กับสัญญาณลักษณะเฉพาะ $C(n, L)$ ในสมการที่ 6.4 และด้วยการใช้คุณสมบัติการตั้งฉากกันของสัญญาณประกอบทำให้ได้ค่าสหสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 H(\xi, L) &= \sum_{n=0}^{N-1} r(n + \xi, L) \times C^*(n, L) \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \alpha e^{i\theta} s(n + \xi, L) + \sum_{\eta=1}^x (\beta_{\eta} e^{i\phi_{\eta}} s(n + \xi - \tau_{\eta}, L)) \right\} \\
 &\quad \times \left\{ \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L - i \cdot P_L) e^{i2\pi \frac{l}{m} (n - (L-1)N - 1)} \right\} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{N} \left\{ \alpha e^{i\theta} \sum_{k=1}^N d_k(L) e^{-i2\pi \frac{k-1}{N} (n + \xi - (L-1)N - 1)} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{\eta=1}^x \left(\beta_{\eta} e^{i\phi_{\eta}} \sum_{k=1}^N d_k(L) \cdot e^{-i2\pi \frac{k-1}{N} (n + \xi - (L-1)N - \tau_{\eta} - 1)} \right) \right\} \\
 &\quad \times \left\{ \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L - i \cdot P_L) e^{i2\pi \frac{l}{m} (n - (L-1)N - 1)} \right\} dt \quad (6.9)
 \end{aligned}$$

เนื่องจากข้อมูลประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นสัญญาณนำและส่วนข้อมูลจริง ๆ ดังในรูปที่ 6.4 ดังนั้นจึงสามารถแบ่งสมการของสัญญาณรับออกเป็น 2 ส่วนดังในสมการที่ 6.10 ซึ่งทั้ง 2 ส่วนที่แยกกันนี้ยังคงตั้งฉากกันอยู่

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_k(L) e^{-i2\pi \frac{k-1}{N} (n - (L-1)N - 1)} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L + i \cdot P_L) e^{-i2\pi \frac{l}{m} (n - (L-1)N - 1)} \right\} + (Other\ terms)$$

(6.10)

ผลของส่วนที่เป็นข้อมูล (Others term) ในสมการที่ 6.10 เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการ 6.9 จะมีค่าเป็นศูนย์จากผลของการตัดฉากกัน ดังนั้นจึงสามารถนำเพียงสัญญาณส่วนแรกในสมการ 6.10 ซึ่งเป็นสัญญาณนำไปแทนค่าในสมการที่ 6.9 ได้ผลดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 H(\xi, L) &= \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{N} \left\{ \alpha e^{i\theta} \sum_{k=1}^N (P_L + i \cdot P_L) \cdot e^{-i2\pi \frac{l}{m} (n+\xi - (L-1)N-1)} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{\eta=1}^x \left(\beta_{\eta} e^{i\phi_{\eta}} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L + i \cdot P_L) \cdot e^{-i2\pi \frac{l}{m} (n+\xi - (L-1)N - \tau_{\eta} - 1)} \right) \right\} \\
 &\quad \times \left\{ \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{m-1} (P_L - i \cdot P_L) e^{i2\pi \frac{l}{m} (n - (L-1)N - 1)} \right\} dt \\
 &= \frac{2P_L^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \alpha e^{i\theta} \sum_{l=0}^{m-1} e^{-i2\pi \frac{l}{m} \xi} + \sum_{\eta=1}^x \left(\beta_{\eta} e^{i\phi_{\eta}} \sum_{l=0}^{m-1} e^{-i2\pi \frac{l}{m} (\xi - \tau_{\eta})} \right) \right\} \\
 &= \frac{2P_L^2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\alpha e^{i\theta} \sum_{l=0}^{m-1} e^{-i2\pi \frac{l}{m} \xi} + \sum_{\eta=1}^x \left(\beta_{\eta} e^{i\phi_{\eta}} \sum_{l=0}^{m-1} e^{-i2\pi \frac{l}{m} (\xi - \tau_{\eta})} \right) \right] \quad (6.11)
 \end{aligned}$$

ค่า $0 \leq \xi < m$ ในสมการ 6.11 คือดรรชนีบอกถึงลำดับการทำสหสัมพันธ์ โดยถ้า $\xi = 0$ ก็จะทำให้พจน์ $(2\pi l/m \times \xi)$ มีค่าเป็นศูนย์ตาม และทำให้ตัวแปร l ไม่ส่งผลใด ๆ กับสมการและทำให้ผลรวมลัพท์ที่ได้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง แต่ในทางกลับกันถ้า $\xi \neq 0$ พจน์แรกในสมการที่ 6.11 จะขึ้นกับตัวแปร l โดยที่ $l = (0, 1, 2, \dots, m-1)$ ส่งผลให้ผลรวมลัพท์ของพจน์แรกในสมการที่ 6.11 มีค่าเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกันสำหรับพจน์ที่ 2 ทางขวา โดยถ้าค่า $\xi - \tau_{\eta}$ มีค่าเป็นศูนย์ก็จะส่งผลให้ผลลัพท์รวมท้ายสุดเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง แต่ถ้า $\xi - \tau_{\eta}$ ไม่เท่ากับศูนย์ก็จะส่งผลให้ผลลัพท์รวมท้ายสุดมีค่าเท่ากับศูนย์

จากที่กล่าวในข้างต้นสรุปได้ว่าถ้า ξ เป็นศูนย์จะทำให้ได้ค่าสหสัมพันธ์ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงเฟดดิ้งทั้งในเชิงขนาดและเชิงมุมของสัญญาณในเส้นทางหลัก แต่ถ้า $\xi - \tau_{\eta}$ มีค่าเป็นศูนย์ ($\xi = \tau_{\eta}$) ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ก็จะบ่งบอกถึงเฟดดิ้งเชิงขนาดและเชิงมุมของสัญญาณที่มีการประวิงไป

τ_η อย่างไรก็ตามถ้า ξ หรือ $\xi - \tau_\eta$ ไม่เท่ากับศูนย์ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ก็จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วย และสุดท้ายสามารถสรุปค่าสหสัมพันธ์ได้ในสมการที่ 6.11 ให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นได้ดังในสมการที่ 6.12

$$H(\xi, L) = \begin{cases} \frac{2P_L^2 \cdot m}{N} \alpha e^{i\theta} = \frac{2P_L^2}{p} \alpha e^{i\theta} & , \xi = 0 \\ \frac{2P_L^2 \cdot m}{N} \beta_\eta e^{i\phi_\eta} = \frac{2P_L^2}{p} \beta_\eta e^{i\phi_\eta} & , \xi = \tau_\eta \\ 0 & , \xi \neq (0, \tau_\eta) \end{cases} \quad (6.12)$$

จากสมการที่ 6.12 จะได้ค่าประมาณของเฟดดิ้งในสัญญาณหลักและสัญญาณที่ประวิงไปดังชุดสมการที่ 6.13 โดยที่ $\alpha e^{i\theta}$ แทนค่าเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นในสัญญาณหลัก และ $\beta_\eta e^{i\phi_\eta}$ แทนค่าเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่มีการประวิงไปเป็นเวลา τ_η

$$\begin{aligned} \alpha e^{i\theta} &= \frac{H(\xi, L) \times p}{2P_L^2} & , \xi = 0 \\ \beta_\eta e^{i\phi_\eta} &= \frac{H(\xi, L) \times p}{2P_L^2} & , \xi = \tau_\eta \end{aligned} \quad (6.13)$$

6.6 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์

หน้าที่หลักของอีควอลไลเซอร์ก็คือ การปรับรูปร่างของสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปให้กลับมามีรูปร่างเช่นเดิมโดยอาศัยการปรับค่าตัวคูณในแต่ละตัว ค่าตัวคูณดังกล่าวคำนวณมาจากค่าของเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณเป็นสำคัญดังในสมการที่ 6.14 ซึ่งที่มาของสมการนี้ได้อธิบายไว้ย่อๆ ละเอียดในบทที่ 4 สำหรับการคำนวณค่าประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์ในงานวิจัยนี้ จะอาศัยการตรวจสอบค่า $q_{(n+k)/2}$ ในเมตริกซ์ q ในกระบวนการทำงานของอีควอลไลเซอร์นั้นเมตริกซ์ q นี้จะถูกกำหนดขึ้นก่อนโดยให้มีค่าเป็น 0 ทั้งหมดยกเว้น $q_{(n+k)/2}$ ที่มีค่าเท่ากับ 1 และเมื่อนำมาคำนวณร่วมกับค่าของเฟดดิ้งที่ประมาณได้ตามสมการที่ 6.14 ก็จะได้ผลลัพธ์เป็นเมตริกซ์ w ซึ่งแทนค่าตัวคูณในแต่ละแท็บ แต่การคำนวณค่าประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์จะทำกลับกัน กล่าวคือให้เมตริกซ์ w ที่คำนวณจากกระบวนการดังในตอนต้นเป็นค่าตั้งต้นแทน แล้วจึงคำนวณย้อนกลับไปหาค่า

เมตริกซ์ q ตามสมการ 6.14 เช่นเดิม สำหรับในงานวิจัยนี้จะพิจารณาระดับประสิทธิภาพของอีควอไลเซอร์จาก $q_{(n+k)/2}$ เท่านั้น ซึ่งอีควอไลเซอร์ที่ดีนั้นจะต้องมีค่า $q_{(n+k)/2}$ ใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ q_{n+k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & h_2 & h_1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & h_2 & \dots & \cdot \\ h_n & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & h_n & \cdot & \dots & h_1 \\ 0 & 0 & h_n & \dots & h_2 \\ \cdot & 0 & 0 & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & \dots & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \dots & h_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_k \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

ค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้นี้จะถูกนำไปใช้เพื่อประกอบการตัดสินใจว่า อีควอไลเซอร์มีความเหมาะสมเพียงไรที่จะจัดการกับสัญญาณพหุวิถีในขณะนั้น ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าที่เรียกว่าค่าการตัดสินใจซึ่งหมายถึงค่าประสิทธิภาพต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้ ดังนั้นหากค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้นี้มากกว่าค่าการตัดสินใจ ระบบก็จะยอมให้อีควอไลเซอร์ทำงาน แต่ถ้าหากค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าค่าการตัดสินใจ ระบบก็จะส่งสัญญาณพหุวิถีในขณะนั้นเข้าสู่กระบวนการหักล้างแทน งานวิจัยนี้ขอเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่าระบบจัดสรรการทำงานเนื่องจากการมีการทำงานร่วมกันระหว่างอีควอไลเซอร์และกระบวนการหักล้าง โดยระบบนี้จะมีค่าการตัดสินใจคงที่ตลอดช่วงการทำงาน แต่ถ้าหากค่าการตัดสินใจสามารถปรับเปลี่ยนไปตามพลังงานของสัญญาณรับได้ และงานวิจัยนี้จะขอเรียกว่าระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้