# บทที่ 3
# วิธีการลดค่าพีเอพีอาร์ในสัญญาณโอเอฟดีเอ็มและการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านให้กับระบบ

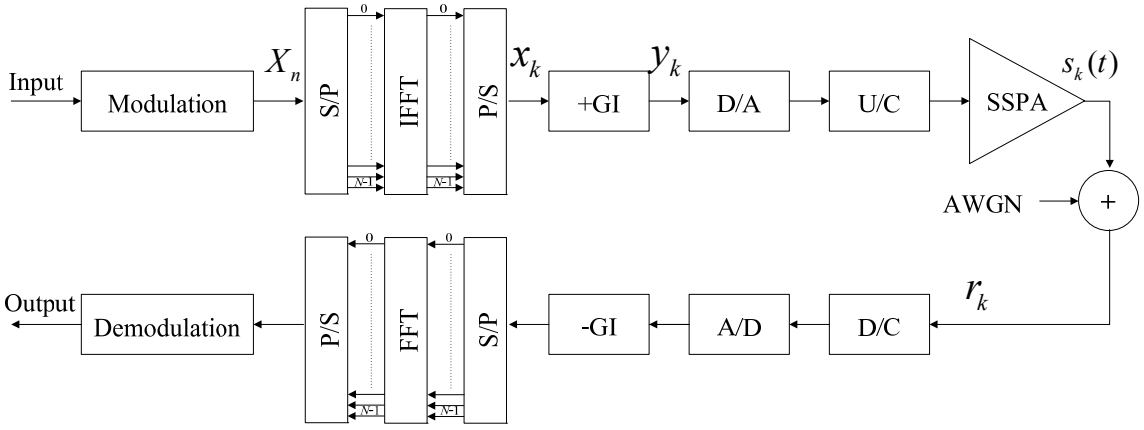
เทคนิคการมอดดูเลทแบบโอเอฟดีเอ็มเป็นระบบมีประสิทธภาพสูงในการใช้งานได้ความถี่ทนทานต่อสภาวะช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบหลายเส้นทาง จึงทำให้เทคนิคการมอดดูเลทแบบโอเอฟดีเอ็มได้รับมาใช้เป็นมาตรฐานระบบการสื่อสารต่างๆมากมายเช่น ระบบโครงข่ายแบบไร้สาย (wireless LAN systems) ระบบทีวีดิจิตอลบอร์ดแคสติ้ง (terrestrial digital broadcasting system) เป็นต้น และในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบโอเอฟดีเอ็มคือ

ปัญหาของเครื่องขยายแบบสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น ปัญหาการกระเพื่อมของสัญญาณในแกนเวลาส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณลดทอนไปและปัญหาการเข้าจังหวะจากทางเครื่องรับได้ยาก ซึ่งจะกล่าวถึงเป็นลำดับไปดังนี้สัญญาณโอเอฟดีเอ็มทางด้านอาณาจักรเวลา การแกว่งมาก (fluctuation) ซึ่งค่าการแกว่าง ของสัญญาณนี้สามารถที่จะวัดได้ในรูปของอัตราส่วน ระหว่างค่าสูงสุดของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มต่อค่าเฉลี่ยนของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในหนึ่งสัญญาลักษณ์ หรือเรียกว่า ค่าพีเอพีอาร์ (PAPR: Peak-to-Average Power Ratio) ซึ่งค่าพีเอพีอาร์ที่สูงนี้ ในทางปฏิบัติแล้ว จะเป็นจะต้องกำหนด จุดการทำงานของวรจรขยายในตำแหน่งที่เป็นเชิงเส้น เพื่อไม่เกิดสัญญาณรบกวน ที่เกิดจาการตัดยอดของสัญญาณที่บริเวณจุดการทำงาน อิ่มตัวของวงจรขยาย หากแต่วิธีการนี้จะทำให้การใช้งานวงจรขยายได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ อีกปัญหาหนึ่งที่เกิดกับสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่มีค่าพีเอพีอาร์สูงคือ ทางเครื่องส่ง-จำเป็นจะต้องมีวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอาล็อก (DAC:Digital-to-Analog Converters) ที่ค่อนข้างราคาแพง เนื่องจากค่าสูงสุดแต่ต่ำสุดของสัญญาณกว้างมาก วิธีการแก้ไขก็คือพยายามลดค่าการแกว่างของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มหรืออีกนัยหนึ่งคือลดค่าพีเอพีอาร์ให้ได้มากที่สุด

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดแบบจำลองระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่ว โดยไม่มีวิธีการลดค่าพีเอพีอาร์เปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีวิธีการลดค่าพีเอพีอาร์แบบที่นำเสนอ ซึ่งทั้งสองวิธีการนี้จะแตกต่างกันเฉพาะทางด้านเครื่องส่งเท่านั้น แต่ทางด้านเครื่องรับจะเป็นแบบเดียวกันซึ่งเครื่องรับแบบทั่วไปสามารถทั่งวิธีการแบบทั่วไปกับเครื่องส่งแบบที่นำเสนอ

### 3.1 แบบจำลองของระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่วไปในช่องสัญญาณแบบ AWGN

ในบล็อกไดอะแกรมระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่วไปสามารถจำลองการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1 จากแสดงการทำส่งรับข้อมูลของระบบโอเอฟดีเอ็มในช่องแบบเกาซ์เซียนน้อยส์(AWGN) การทำงานเริ่มต้นจากสัญญาณข้อมูลที่เป็นดิจิตอลผ่านการมอดดูเลทชั่น(Modulation) ซึ่งวิธีการมอดดูเลทชั่นนี้จะประกอบไปด้วย BPSK, QPSK, 16QAM และ 64QAM การเลือกขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน หลังจากผ่านการมอดดูเลทชั่นแล้วข้อมูลอนุกรมจะเปลี่ยนเป็นแบบขนาน(S/P) เพื่อผ่านเข้าวงจร IFFT จากนั้นเปลี่ยนสัญญาณที่เป็นขนานให้เป็นแบบอนุกรม(P/S) เช่นเดิมและเพิ่มการ์ดไทม์เพื่อป้องการแทรกสอดในแกนเวลาเมื่อผ่านช่องสัญญาณแบบหลายวิถีซึ่งจำเป็นต้องมีในระบบโอเอฟดีเอ็ม




**รูปที่ 3.1** บล๊อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบของระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่วไป

เมื่อผ่านมอดูเลตแล้ว กระบวนการของ IFFT ในแกนความถี่จะแปลงสัญญาณไปยังแกนเวลา โดยผ่านกระบวนการของ IFFT ซึ่งสัญญาณในทางแกนเวลาแสดงได้ดังสมการข้างล่าง

$$y_{(l,k)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_{(l,n)} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \tag{3.1}$$

เมื่อ $l$ แสดงจำนวนลำดับของสัญลักษณ์ที่ $k$ แซมปิล

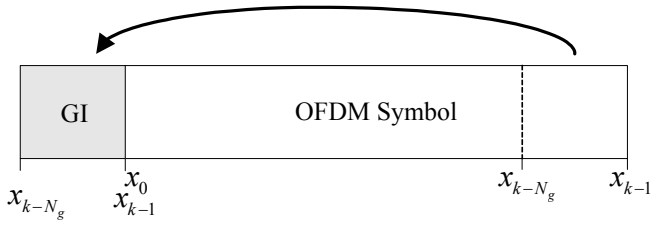
N เป็นจำนวน จุดของ IFFT ที่จำนวน $n$ ของคลื่นพาห์ย่อย

$X_{(l,n)}$ เป็นจำนวนข้อมูล $l$ ที่จำนวน $n$ ของคลื่นพาห์ย่อย

การใส่การ์ดไทม์ (Guard time) หรือช่องเวลาป้องกัน GI (Guard Interval) ก่อนที่จะทำการส่งสัญญาณ เพื่อป้องกันการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ที่เกิดมาจากการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณมัลติพาธเฟดดิง ซึ่งช่องเวลาของ GI นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าค่าดีเลย์สเปรดสูงสุด ของช่องสัญญาณแบบมัลติพาธโดยการใส่ GI แสดงดังรูปที่ (3.2) สัญญาณโอเอฟดีเอ็มเมื่อเพิ่มส่วนช่องเวลาป้องกัน แล้วโดยช่วงเวลาต่อหนึ่งสัญญาณจะเพิ่มขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$y_{k+N_g}(t) = x_k(t) \tag{3.2}$$

เมื่อ $N_R$ เป็นจำนวนแซมปลิ้งของการ์ดไทม์




**รูปที่ 3.2** วิธีการเพิ่มการ์ดไทม์ในสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม

ค่าพีเอพีอาร์หรือค่าประสิทธิภาพของสัญญาณค่าอัตรากำลังงานสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยของสัญญาณในทางแกนเวลาเป็นวิธีการที่นิยมใช้วัดค่าการแกว่งไกวของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในแกนเวลา สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PAPR(dB) = 10\log_{10}\left[\frac{\max\limits_{k=0\square N-1}\left[\left|y_{(l,k)}\right|^2\right]}{E\left[\left|y_{(l,k)}\right|^2\right]}\right] \tag{3.3}$$

เมื่อ $E$ เป็นค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณ

เมื่อสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในทางแกนเวลาที่แสดงในสมการที่ (3.1) หลังจากที่เพิ่มช่วงเวลาป้องกัน (GI: Guard interval ) สัญญาณโอเอฟดีเอ็มจะเปลี่ยนสัญญาณจากดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อกโดยใช้วงจร D/A (Digital-to-Analog convertor) และเพิ่มความถี่ของสัญญาณไปยังย่านความถี่ใช้งานด้วยวงจร U/C (Up convertor) ภาคสุดท้ายทางด้านเครื่องส่งเป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear amplifier) ซึ่งจำเป็นจะต้องมีอยู่เป็นภาคสุดท้ายของทุกๆเครื่องส่งเพื่อขยายสัญญาณได้มีกำลังส่งเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นทรานซิสเตอร์

(Transistor) จากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ หรือ Solid State Power Amplifer (SSPA) ได้มีนักวิจัยแสดงจำลองการทำงานของวงจรขยายชนิดในรูปของโมเดลทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.4) ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทสามารถแสดงได้ดังนี้

$$s_{(l,k)} = F\left[\left|y_{(l,k)}\right|\right] e^{j\left\{\arg\left(y_{(l,k)}\right)\right\}} \tag{3.4}$$

เมื่อ $F[\ ]$ แสดงคุณสมบัติ AM/AM ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบ SSPA ซึ่งมีคุณลักษณ์การขยายสัญญาณแสดงได้ดังนี้

$$F[\rho] = \frac{\rho}{\left[1+\left(\rho / A\right)^{2r}\right]^{1/2r}} \tag{3.5}$$

$$\Phi[\rho] = \alpha_{\phi}\left(\frac{\rho}{A}\right)^{4} \tag{3.6}$$

เมื่อ $\rho$ เป็นขนาดของสัญญาณอินพุท

$A$ เป็นระดับจุดการขยายอิ่มตัวของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น

$r$ เป็นพารามิเตอร์กำหนดความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น

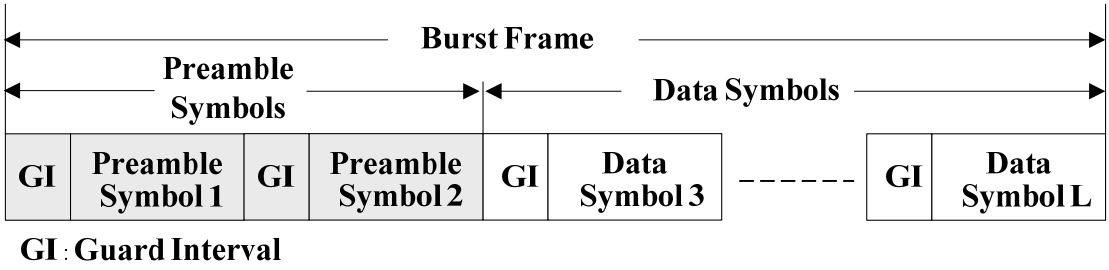
$\Phi[\ ]$ เป็นคุณสมบัติ AM/PM ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น

โดยทั่วไปคุณสมบัติ AM/PM ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด SSPA ถือว่าน้อยมากจนไม่จำเป็นต้องนำมาคิด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้กำหนดให้คุณสมบัติAM/PM ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับศูนย์

## 3.2 โครงสร้างของเบริสต์เฟรมระบบโอเอฟดีเอ็ม

กำหนดให้รูปแบบของเบิรสต์เฟรม (Burst Frame)ของระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่วไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบไปด้วย สัญลักษณ์ปรีเอมเบิล (Preamble Symbol) จำนวน 2 สัญลักษณ์ และ สัญลักษณ์ข้อมูลจำนวน L-2 สัญลักษณ์ รวมเป็นหนึ่งเฟรมข้อมูลโดยสัญลักษณ์ปรีเอมเบิลจะต้องเป็นส่วนแรกของเฟรมข้อมูลเสมอซึ่งสัญลักษณ์ปรีเอมเบิลนี้โดยทั่วไปจะมีหน้าที่หลักสองอย่าง คือ อย่างแรกเพื่อใช้สำหรับการซิงโครไนซ์ (Synchronization)และอย่างที่สองใช้เพื่อการประมาณค่าการตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ (Channel Frequency Response Estimation) ทั้งสองอย่างนี้จะสามารถทำได้โดยกำหนดให้ทางด้านเครื่องรับรู้ค่าข้อมูลที่ส่งในสัญลักษณ์ปรีเอมเบิล

(Preamble Symbol) สามารถอธิบายโดยใช้สมการคณิตศาสตร์อย่างละเอียดทางด้านเครื่องรับของระบบโอเอฟดีเอ็มในหัวข้อต่อไป




**รูปที่ 3.3** โครงสร้างของเบริสต์เฟรมที่ใช้ในการจำลองระบบของระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่วไป

จากรูปที่ 3.3 แสดงรูปของเบริสต์โหมดที่ใช้ในระบบโอเอฟดีเอ็มของวิธีการที่นำเสนอจะมีรูปแบบทางกายภาพเช่นเดียวกัน คือ สัญลักษณ์ปรีเอมเบิล (Preamble Symbol) จำนวน 2 สัญลักษณ์ และ สัญลักษณ์ข้อมูลจำนวน L-2 สัญลักษณ์ รวมเป็นหนึ่งเฟรมข้อมูล แต่วิธีการที่นำเสนอนี้จะมีข้อมูลแฝงเพิ่มเติมเข้าไปคือ ค่าสัมประสิทธิเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถลดค่าพีเอพีอาร์ได้จากค่าสัมประสิทธิที่เหมาะสมซึ่งเป็นข้อมูลแฝงในเฟรมข้อมูลทำให้อัตราการส่งรับข้อมูลในระบบไม่เปลี่ยนแปลง สิ่งที่สำคัญคือการคูณสัมประสิทธิ์มุมจำเป็นต้องคูณทุกๆสัญญลักษณ์ตลอดเฟรมข้อมูลเพื่อให้ทางด้านเครื่องรับสามารถนำข้อมูลเดิมกับมาได้โดยไม่มีผลกระทบจากค่าสัมประสิทธิที่คูณเข้า สัญญาณโอเอฟดีเอ็มจากสมการที่ 3.1 เมื่อคูณกับค่าสัมประสิทธิที่เหมาะสมเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์ของสัญญานโอเอฟดีเอ็มในแกนเวลา สามารถแสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\overline{y}_{(l,k)}^{(i)} &= \frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{n=0}^{N-1}\left(X_{(l,n)}^{(i-1)}\cdot e^{j\theta_n^{(i)}}\right)e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{n=0}^{N-1}X_{(l,n)}^{(i)}\cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N}}\end{aligned} \tag{3.7}$$

เมื่อ $e^{j\theta_n^{(i)}}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์มุมสำหรับ $n$ คลื่นพาห์ย่อยที่ $i$ รอบการหาค่าพีเอพีอาร์และค่าสัมประสิทธิ์มุมที่ใช้คูณในแต่ละเฟรมของจะเป็นค่าเดียวกันตลอดทั้งเฟรม ในความเป็นจริงของขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธินี้จะต้องหาทีละสัญลักษณ์ จากนั้นนำค่าที่ได้ของแต่ละสัญลักษณ์นั้นมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิที่เหมาะสมเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์ให้ได้มากที่สุดตลอดทั้งเฟรม นอกจากนี้วิธีการคำนวนหาค่าสัมประสิทธิที่นำเสนอนี้จำเป็นจะต้องใช้การวนรอบเพื่อให้ได้

ประสิทธิภาพการลดค่าพีเอพีอาร์ดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองการทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์ในบทต่อไป

### 3.3 แบบจำลองเครื่องของระบบโอเอฟดีเอ็มแบบที่นำเสนอ

การที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่า วิธีการที่นำเสนอไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเฟรมข้อมูลแต่อย่างใด ซึ่งจะทำให้วิธีการที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในส่วนของเครื่องส่งเท่านั้น ทางด้านเครื่องรับยังเป็นเครื่องรับแบบทั่วไปที่มีวงจรปรับระดับเท่า (Equalization) ส่วนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวิธีการที่นำเสนอคือ วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์มุมที่เหมาะสมของแต่ละสัญลักษณ์เพื่อลดค่าพีเอพีอาร์ให้ได้มากที่สุด ในงานวิจัยนี้จะใช้พื้นฐานของการแปลงสัญญาณสลับไปมาระหว่างทางแกนเวลากับทางความถี่ (Time frequency swapping) [7] เริ่มต้นจากสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่ได้จากเอาพุทของวงจร IFFT จากสมการที่ (3.1) มาคำนวนหาค่าสัญญาณเออร์เลอร์ (Error signal) ได้จากสมการการสุ่มตัวอย่างสัญญาณทางด้านแกนเวลา

โดยการหาค่าขนาดของสัญญาณเออร์เลอร์ได้จากสัญญาณที่มากกว่าระดับที่ใช้อ้างอิงตัวแปร S โดยเมื่อสัญญาณมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับก็จะกำหนดให้สัญญาณเอาท์พุทเท่ากับสัญญาณอินพุทและถ้าสัญญาณมีค่าน้อยกว่าก็จะให้สัญญาณเอาท์พุทเท่ากับศูนย์จากนิยามที่กล่าวมานี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$e_{(l,k)}^{(i)} = \begin{cases} \overline{y}_{(l,k)}^{(i)} & if \quad \left|\overline{y}_{(l,k)}^{(i)}\right| \geq S \\ 0 & if \quad \left|\overline{y}_{(l,k)}^{(i)}\right| < S \end{cases} \tag{3.8}$$

เมื่อระดับ **S** ที่ใช้อ้างอิงนี้เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มใดๆทางด้านแกนเวลาและ $e_{(l,k)}^{(i)}$ ค่าสัญญาณผิดพลาดที่นำมาสร้างสัมประสิทธิ์มุมนี้ประกอบไปด้วยสัญญาณที่มีค่ามากกว่าระดับอ้างอิงทางด้านแกนเวลาที่รอบการคำนวน $i$ สัญลักษณ์ที่ $l$ และ แซมปลิ้งที่ $k$ ค่าสัญญาณเออร์เลอร์ที่ได้จากสมการที่ (3.8) เป็นให้ไปอยู่ในแกนความถี่โดยใช้กระบวนการของ FFT จะแสดงสมการได้ดังนี้

$$E_{(l,n)}^{(i)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} e_{(l,k)}^{i} \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \tag{3.9}$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์มุมของ $l$ ในแต่ละสัญลักษณ์ที่ $n$ คลื่นพาห์ย่อยหาได้จากมุมของสัญญาณเออร์เลอร์ใน (3.9) นำมาลบกับมุมของสัญญาณเดิมในแกนความถี่ จากนั้นสัญญาณผลลัพท์ที่

ได้ในแกนความถี่นี้นำมาใช้เป็นสัญญาณเริ่มต้นใหม่เพื่อค่าสัญญาณเออร์เลอร์ในรอบต่อไป ($i$+1) รอบของการวนซ้ำเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์นี้ที่ลำดับต่อไป คือที่ลำดับ $i$+1 สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$X_{(l,n)}^{(i+1)} = \left| X_{(l,n)}^{(i)} \right| e^{j\arg\left\{X_{(l,n)}^{i} - E_{(l,n)}^{i}\right\}} \tag{3.10}$$

จากสมการที่ (3.10) จะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในส่วนของมุมของค่าสัมประสิทธิ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์มุมของแต่ละคลื่นพาห์ย่อยในแต่ละสัญลักษณ์ สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\theta_{(l,n)}^{(i+1)} = \arg\left\{X_{(l,n)}^{(i+1)}\right\} - \arg\left\{X_{(l,n)}^{i}\right\} \tag{3.11}$$

เมื่อผ่านกระบวนการข้างต้นทั้งหมดทุกสัญลักษณ์จะได้ค่าสัมประสิทธิ์มุมสำหรับแต่ละคลื่นพาห์ย่อยที่ทุกๆ เพื่อใช้ลดค่าพีเอพีอาร์ แต่วิธีการที่นำเสนอจำเป็นจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิรวมสำหรับทุกๆสัญลักษณ์ ดังนั้นรอบการวนซ้ำเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์ที่ลำดับ $i+1$ รอบจะหาได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์มุมทั้งหมดสำหรับทุกสัญญาณลักษณ์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\theta_{n}^{(i+1)} = \arg\left\{\sum_{l=1}^{L} e^{j\theta_{(l,n)}^{(i+1)}}\right\} \tag{3.12}$$

เมื่อ L เป็นจำนวนของสัญลักษณ์ในหนึ่งเฟรมข้อมูล

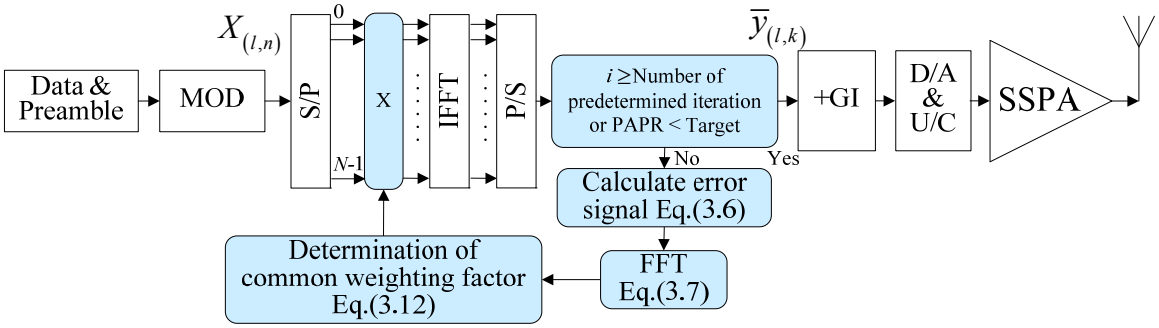
หรือ L= ปรีแอมเบิล + สัญลักษณ์ของข้อมูล

เมื่อนำสมการที่ (3.12) มาพิจารณาเพื่อหาค่าสัญญาณทางเวลาที่ส่งผ่านที่ $i+1$ รอบของการวนเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์จะสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \overline{y}_{(l,k)}^{(i+1)} &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ X_{(l,n)}^{(i)} \cdot e^{j\theta_{n}^{(i+1)}} \right\} \cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_{(l,n)}^{(i+1)} \cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \end{aligned} \tag{3.13}$$

วิธีการที่นำเสนอจากที่ได้อธิบายมาจะมีกระบวนการเริ่มจากสมการที่ (3.7) จนกระทั่งถึงสมการที่ (3.13) เท่ากับจำนวนหนึ่งรอบของการคำนวน ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้ต้องการกระบวนการทำซ้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดค่าพีเอพีอาร์ของสัมประสิทธิ โดยการวนซ้ำจะทำจนกระทั่งค่าพีเอพีอาร์จะลดถึงค่าที่กำหนดหรือจำนวนของการวนซ้ำที่กำหนดไว้อย่างใดอย่างหนึ่ง

ในรูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของเครื่องส่งระบบโอเอฟดีเอ็มแบบที่นำเสนอ เพื่อให้เห็นส่วนที่แตกต่างชัดเจนยิ่งขึ้นระหว่างเครื่องส่งของระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่วไปกับเครื่องส่งของระบบโอเอฟดีเอ็มแบบที่นำเสนอแตกต่างในอย่างไร ส่วนที่เพิ่มเติมของวิธีการที่นำเสนอจะเป็นส่วนที่แรเงาดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทั้งหมดเป็นขั้นตอนการคำนวนหาค่าสัมประสิทธิที่เหมาะสมเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์ทางด้านเครื่องส่งในระบบโอเอฟดีเอ็ม




**รูปที่ 3.4** โครงสร้างเครื่องส่งของวิธีการที่เสนอ

### 3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์นี้ในการจำลองระบบจะกำหนดให้เป็นการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเป็นแบบมัลติพาธเฟดดิง ที่มีการมีการประวิงเวลาของสัญญาณในแต่ละเส้นทาง $\tau_p$ ที่ต่างกัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของเฟส $\theta_p$ เป็นกระบวนการสุ่ม (random process) ที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform distribution) ในช่วง $[0,2\pi]$ และสัญญาณในแต่ละเส้นทางจะเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) โดยระดับสัญญาณจะลดลงเป็นแบบคงที่ (Constant Decayed)โดยที่ ผลการตอบสนองสัญญาณอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ $h_k(l)$ ของช่องสัญญาณย่อยสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (3.14)

$$h_k(l) = \sum_{p=1}^{P} \rho_p e^{j\theta_p} \delta(k - \tau_p) \tag{3.14}$$

เมื่อ $P$ เป็นจำนวนของเส้นทางเดินของสัญญาณ

$\tau_p$ เป็นค่าของการประวิงเวลาในเส้นทางที่ $p$

$\theta_p$ เป็นเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงในเส้นทางที่ $p$

$\rho_p$ เป็นค่ากำลังงานสัมพัทธ์ของเส้นทางที่ $p$

จากสมการ (3.14) เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในแกนความถี่โดยกระบวนการ FFT ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ $H_n(l)$ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.15)

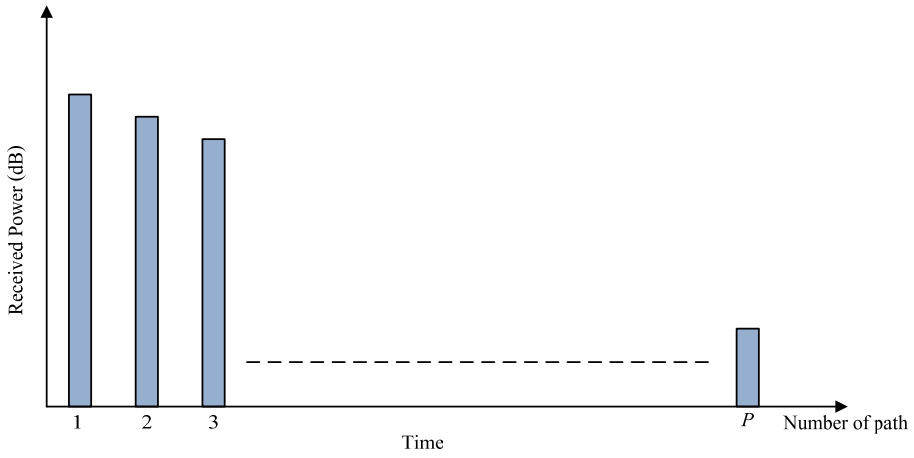
$$H_n(l) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k(l) e^{-j2\pi nk/N} \tag{3.15}$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{p=1}^{P} \rho_p e^{j\theta_p} \delta(k-\tau_p) e^{-j2\pi nk/N}$$

$$= \sum_{p=1}^{P} \rho_p e^{j\theta_p} \sum_{k=0}^{N-1} \delta(k-\tau_p) e^{-j2\pi nk/N}$$

$$= \sum_{p=1}^{P} \rho_p e^{j\theta_p} e^{-j2\pi n(k-\tau_p)/N}$$

ผลรวมจากกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ทางด้านเครื่องรับในเวลาต่างๆ สามารถเขียนในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 3.15 จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถ แสดงเป็นรูปของดีเลย์โปรไฟล์ (Delay profile) ของช่องสัญญาณแบบมัลติพาทได้ดังรูปที่ 3.5

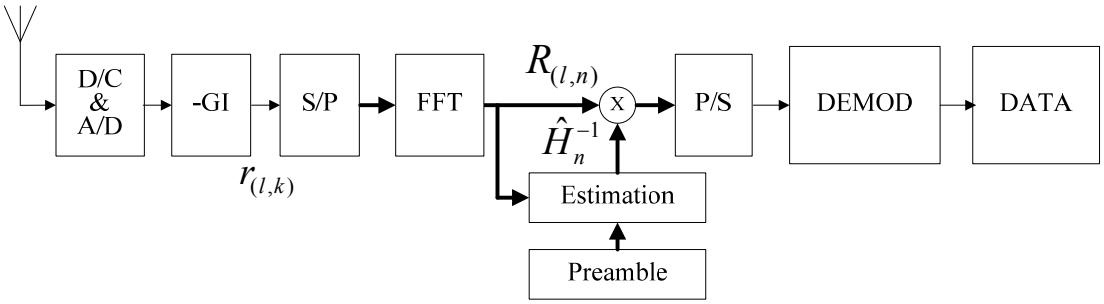



**รูปที่ 3.5** ดีเลย์โปรไฟล์ของช่องสัญญาณมัลติพาท

## 3.5 แบบจำลองเครื่องรับโดยมีการปรับเท่าระดับสัญญาณ

การสื่อสารโดยระบบโอเอฟดีเอ็มมีข้อดีคือ การทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากการแทรกสอดของช่องสัญญาณแบบหลายวิถี เนื่องจากในระบบโอเอฟดีเอ็มมีการ์ดไทม์ที่สามารถป้องกันการเกิด Inter-Symbol Interference (ISI) นอกจากนี้ในระบบโอเอฟดีเอ็มยังสามารถทำชดเชยสัญญาณ

รบกวนนี้ได้โดยใช้วงจรปรับเท่าระดับสัญญาณหรือที่เรียกว่าการทำอีควอร์ไลซ์เซชั่น (Equalization) ซึ่งสามารถทำได้ง่ายในแกนของความถี่ทางด้านเครื่องรับของระบบโอเอฟดีเอ็ม บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีวงจรปรับเท่าระดับสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6




**รูปที่ 3.6** โครงสร้างเครื่องรับในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยมีการปรับเท่าระดับสัญญาณ

ขั้นตอนการทำงานทางด้านเครื่องรับของระบบโอเอฟดีเอ็ม คือ เมื่อสัญญาณที่ทางรับได้ทางด้านเครื่องรับ จะต้องผ่านกระบวนการลดระดับความถี่ลง (D/C: down converter) จากนั้นสัญญาณจะส่งต่อไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกที่รับได้มานี้เป็นสัญญาณดิจิตอล (A/D:Analog to Digital converter) จากนั้นจะเป็นส่วนของสัญญาณดิจิตอลโปรเซสซิ้ง (Digital Processing) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่ง สัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่รับได้ทางด้านเครื่องรับสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$r_{(l,k)} = \overline{s}_{(l,k)} \otimes h_{(l,k)} + n_{(l,k)} \tag{3.16}$$

เมื่อ $r_{(l,k)}$ เป็นสัญญาณที่รับได้ทางเครื่องรับ $l$ สัญลักษณ์ที่ $k$ แซมปลิ้ง

$\overline{s}_{(l,k)}$ เป็นสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่เสมือนส่งมาจากทางเครื่องส่ง

$h_{(l,k)}$ เป็นผลการตอบสนองอิมพัลซ์ในช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบหลายวิถี

$n_{(l,k)}$ เป็นสัญญาณรบกวนขาว $l$ สัญญาลักษณ์ที่ $k$

จากสมการที่ 3.16 เป็นสมการของสัญญาณที่รับได้ทางด้านเครื่องรับระบบโอเอฟดีเอ็มแบบทั่วไป สัญญาณที่รับได้ทางด้านเครื่องรับของวิธีการที่นำเสนอจะมีส่วนของข้อมูลแฝงที่ใช้ในการลดค่าพีเอพีอาร์ติดมากับสัญญาณที่รับเข้ามาด้วย สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$r_{(l,k)} = \overline{s}^{P}_{(l,k)} \otimes h_{(l,k)} + n_{(l,k)} \tag{3.17}$$

เมื่อ $P$ เป็นจำนวนการวนซ้ำเพื่อลดค่าพีเอพีอาร์จากทางเครื่องส่ง จากสมการที่ 3.17 แสดงคุณลักษณ์ของสัญญาณในทางแกนเวลาเมื่อนำช่วงเวลาป้องกันออกและผ่านการแปลงขบวนสัญญาณจากอนุกรมเป็นขบวนขนานเพื่อส่งให้กลับ FFT ซึ่งสัญญาณจะอยู่ในแกนความถี่ดังแสดงได้ดังนี้

$$R_{(l,k)} = X^{(P)}_{(l,k)} \cdot H_{(l,k)} + N_{(l,k)} \tag{3.18}$$

เมื่อ $R_{(l,n)}$ เป็นสัญญาณที่รับได้ทางเครื่องรับในแกนความถี่

$X^{(P)}_{(l,n)}$ เป็นสัญญาณทีออกมาจากทางเครื่องส่งในแกนความถี่

$H_{(l,n)}$ เป็นผลตอบสนองทางความถี่จากช่องสัญญาณในแกนความถี่

$N_{(l,n)}$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทางความถี่

เมื่อตั้งสมมุติฐานให้อยู่ในสภาวะแวดล้อมคลื่นความถี่วิทยุบริเวณแคบ (Radio LAN system) ค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองความถี่จากช่องสัญญาณจะกำหนดให้เสมือนว่าเครื่องรับมีการเคลื่อนที่ช้ามากหรือไม่มีการเคลื่อนที่เลย จึงพิจารณาได้ว่าผลตอบสนองความถี่จากช่องสัญญาณนี้คงที่ในตลอดทั้งเฟรมและการประมาณผลการตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณในแต่ละสัญลักษณ์เหมือนกัน การใช้การแทรกช่วงเวลาป้องกันสองปรีเอมเบิลที่ทุกๆส่วนหน้าของเฟรมและใช้การประมาณช่องสัญญาณร่วมในทุกๆเฟรม ซึ่งผลการประมาณช่องสัญญาณจากสองพรีแอมเบิลช่วยให้การประมาณช่องสัญญาณ (Estimation) ทำได้อย่างแม่นยำดัง ค่าเฉลี่ยนของการประมาณช่องสัญญาณจากสองพรีแอมเบิลสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \hat{H}_n &= \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{2}\left\{X^{P}_{(l,n)} \cdot H_n + N_{(l,n)}\right\} / X_{(l,n)} \\ &= H_n \cdot e^{j\Psi_n} + N_{(l,n)} / X_{(l,n)} \end{aligned} \tag{3.19}$$

เมื่อ $H_n$ เป็นผลตอบสนองความถี่จากการประมาณช่องสัญญาณ

เมื่อผลตอบสนองช่องสัญญาณรวมกับค่าสัมประสิทธิ์มุมที่คูณร่วมมาจากทางเครื่องส่ง ที่เป็นข้อมูลแฝงมาจากทางด้านเครื่องส่งสามารถหักล้างออกไปได้ด้วยวิธีการของปรับเท่าระดับสัญญาณไปพร้อมกันในเวลาเดี่ยวกัน ด้วยทางเครื่องรับจะต้องสร้างกระบวนการคูณด้วยค่าสัมประสิทธิมุมเพื่อให้คืนสัญญาณเดิมกลับมา ค่าสัมประสิทธิมุมที่ได้ทางด้านเครื่องรับสามารถเขียนอยู่ในรูปของสัญญาณ $e^{j\Psi_n}$ โดยค่ามุมนี้จะมีค่าเดียวกับทางด้านเครื่องส่ง ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์จากสมการที่ 3.12 กับค่ามุมทางด้านเครื่องรับโดยสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\psi_n = \sum_{i=1}^{P} \theta_n^{(i)} \tag{3.20}$$

จากสมการที่ (3.19) สังเกตุได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์มุมที่คูณร่วมมาทางเครื่องส่งนั้นทางเครื่องรับจะสามารถประมาณค่ากลับได้ทางแกนความถี่โดยการใช้ ค่าปรีเอมเบิลสัญญาลักษณ์ และเมื่อผ่านกระบวนการประมาณช่องสัญญาณเมื่อคูณมุมกลับออกจากสัญญาณแล้วสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณข้อมูลเดิมที่เราต้องการเพื่อทำการดีมอดูเลตนำข้อมูลออกมา และกระบวนการนี้จะใช้วิธีการ frequency domain equalization method ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์มุมที่คูณมาจากทางด้านเครื่องส่งนั้นจะได้รับผลจากการจางหายของช่องสัญญาณซึ่งเรามีกระบวนการแก้ไขและป้องกันผลกระทบนี้จากกระบวนการทั้งหมดดังที่กล่าวไปทั้งหมดข้างต้นและผลลัพธ์ของประสิทธิภาพจากการใช้คอมพิวเตอร์จำลองการทำงานของระบบจะแสดงในบทที่ 4