บทที่ 2

ภาคส่ง

2.1 บทนำ

หลักการพื้นฐานของ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) คือการแบ่งกระแสข้อมูลความเร็วสูงเป็นกระแสที่มีความเร็วต่ำกว่าหลาย ๆ อัน โดยกระแสข้อมูลความเร็วต่ำนี้จะถูกส่งไปกับคลื่นพาห์ย่อยหลาย ๆ ตัวในแบบที่ขนานกัน เนื่องจากการส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่ต่ำลงทำให้ช่วงคาบของสัญลักษณ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดทอนของสัญญาณทางเวลาซึ่งเกิดจากเวลาประวิงของคลื่นพหุวิถี (multipath delay spread) จึงลดลง และการใส่เวลาคุม (guard time) เข้าไปทำให้ลดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (intersymbol interference) ได้ ในช่วงเวลาคุมของแต่ละสัญลักษณ์ OFDM นั้นจะใช้วิธี cyclically extended เพื่อป้องกันการรบกวนกันของคลื่นพาห์ย่อยในสัญลักษณ์ OFDM นั้น ๆ

ในระบบ OFDM นั้นถ้ากำหนดให้แบนด์วิดท์โดยรวมมีค่าคงที่ การแบ่งแบนด์วิดท์เหล่านั้นเป็นคลื่นพาห์ย่อยจำนวน n ชุดก็จะทำให้คาบสัญลักษณ์เพิ่มเป็น n เท่าด้วย ซึ่งส่งผลให้ระบบสามารถทนกับเวลาประวิงของคลื่นหลายวิถีได้ดีขึ้น แต่การที่จำนวนคลื่นพาห์ย่อยเพิ่มขึ้นก็ทำให้แถบความถี่ในแต่ละคลื่นพาห์ย่อยมีขนาดเล็กลง ซึ่งจะทำให้เกิด Doppler spread และการรบกวนทางเฟส (phase noise) ได้ง่ายขึ้น

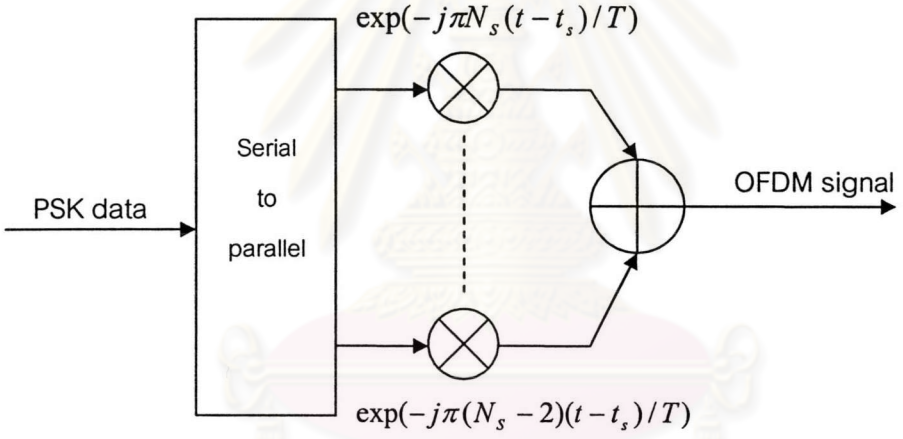
2.2 การสร้างคลื่นพาห์ย่อยโดยใช้ IFFT

สัญญาณ OFDM นั้นประกอบไปด้วยผลรวมของคลื่นพาห์ย่อยจำนวนหนึ่งซึ่งถูกมอดูเลตโดยวิธี PSK (phase shift keying) หรือ QAM (quadrature amplitude modulation) ก็ได้ โดยถ้ากำหนดให้ d_i เป็นสัญลักษณ์เชิงซ้อนแบบ QAM มี N_s เป็นจำนวนของคลื่นพาห์ย่อย มี T เป็นคาบของสัญลักษณ์ OFDM และ f_c เป็นความถี่คลื่นพาห์หลัก สัญลักษณ์ OFDM ที่เริ่มต้นที่เวลา $t = t_s$ สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

โดยทั่วไปแล้วในการทำซิมูเลชันจะมีการปรับรูปสมการที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.2 ซึ่งแสดงส่วนจริงและส่วนจินตภาพโดยตัดตัวแปรความถี่คลื่นพาห์หลักที่ใช้ออกไป

$$S(t)=\begin{cases}\mathrm{Re}\left(\sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2}\exp(j2\pi(f_c-\frac{i+0.5}{T})(t-t_s))\right) & ,t_s\le t\le t_s+T\\ 0 \qquad t<t_s\wedge t>t_s+T\end{cases} \tag{2.1}$$

$$S(t)=\begin{cases}\sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2}\exp(j2\pi\frac{i}{T}(t-t_s)) & ,\ t_s\le t\le t_s+T\\ 0 \qquad t<t_s\wedge t>t_s+T\end{cases} \tag{2.2}$$

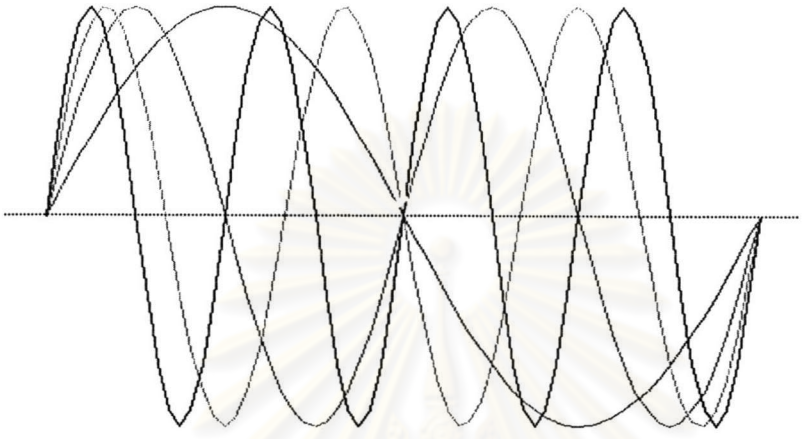


รูปที่ 2.1 วิธีการสร้างสัญญาณ OFDM

ในรูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างสัญญาณ OFDM ที่ประกอบด้วยคลื่นพาห์ย่อยจำนวน 4 ชุด โดยที่แต่ละตัวแสดงขนาดและเฟสเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วแต่ละตัวจะมีขนาดและเฟสต่างกันไปขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ถูกนำมามอดูเลตด้วย จากตัวอย่างนี้จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 1 คาบของสัญลักษณ์ OFDM คลื่นพาห์ย่อยแต่ละตัวจะมีจำนวนคาบคลื่นต่างกันเป็นจำนวนเต็มเสมอ

การที่คลื่นพาห์ย่อยแต่ละตัวมีจำนวนคาบคลื่นในช่วงเวลา T ต่างกันเป็นจำนวนเต็มส่งผลให้คลื่นพาห์ย่อยแต่ละตัวมีคุณสมบัติตั้งฉาก (orthogonal) ซึ่งกันและกัน อย่างเช่นถ้าคลื่นพาห์ย่อยที่ j

จากสมการที่ 2.2 ถูกดีมอดูเลตด้วยความถี่ j/T และถูกอินทิเกรตในช่วงคาบ T ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นดังสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสัญญาณ OFDM แยกให้เห็นเป็นคลื่นพาห์ย่อยจำนวน 4 ชุด

$$\begin{aligned}
&\int_{t_s}^{t_s+T} \exp(-j2\pi\frac{j}{T}(t-t_s)) \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp(j2\pi\frac{i}{T}(t-t_s))dt \\
&= \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \int_{t_s}^{t_s+T} \exp(j2\pi\frac{i-j}{T}(t-t_s))dt \\
&= d_{j+N_s/2}T
\end{aligned} \tag{2.3}$$

จากสมการที่ 2.3 ผลลัพธ์คือ $d_{j+N_s/2T}$ เป็นสัญลักษณ์ QAM หรือ PSK ที่ถูกมอดูเลตในคลื่นพาห์ย่อยที่ j ส่วนคลื่นพาห์ย่อยอื่น ๆ จะถูกอินทิเกรตแล้วได้เป็นค่า 0 เนื่องจากผลต่างของความถี่ $(i-j)/T$ มีค่าเป็นจำนวนเต็มคาบในช่วงเวลา T เสมอ จึงส่งผลให้การอินทิเกรตในช่วงเวลา T มีค่าเป็น 0 ด้วย

สัญญาณเบสแบนด์ OFDM ตามสมการที่ 2.2 นั้น เมื่อดูตามรูปสมการจะเห็นว่า เป็นเพียงการแปลงฟูริเยร์ผกผันของสัญลักษณ์ QAM หรือ PSK จำนวน N_s ตัว ซึ่งในกรณีที่เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องจะใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบไม่ต่อเนื่อง (IDFT) ดังในสมการที่ 2.4 โดยเวลา t แทนด้วยจำนวนการสุ่ม n ซึ่งในทางปฏิบัติการแปลงนี้สามารถใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (IFFT) แทนได้

$$S(n) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp(j2\pi \frac{in}{T}) \tag{2.4}$$

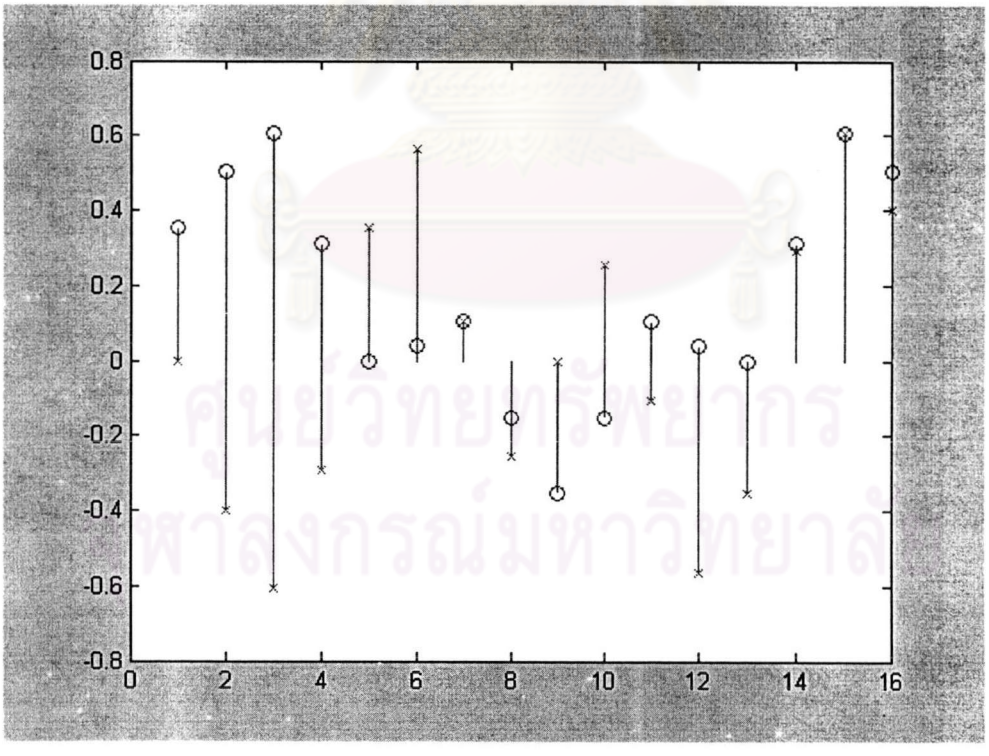
ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการส่งข้อมูล [1 1 -1 -1 -1 1 1 1] ซึ่งมีการเข้ารหัสแบบ BPSK จำนวน 8 บิต หลังจากนำบิตข้อมูลชุดนี้ไปผ่านกระบวนการดังกล่าวในข้างต้น ก็จะได้สัญญาณทางเวลาที่หลังจากทำการปรับระดับพลังงานให้เท่าเดิมแล้วจะมีค่าดังในตารางที่ 2.1 แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้น เมื่อมีการนำสัญญาณดิจิทัลไปผ่าน DAC ก็จำเป็นที่จะต้องทำ over sampling ให้กับสัญญาณก่อน โดยในกรณีนี้อาจมีการเติม 0 เข้าไปตรงกลางระหว่างบิตข้อมูล [1 1 -1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 1] ซึ่งรูปร่างของสัญญาณทางเวลาของบิตข้อมูลที่มีการทำ over sampling แล้วจะเป็นดังในรูปที่ 2.3 โดยจุดวงกลมแทนสัญญาณอินเฟส และจุดกากบาทแทนสัญญาณควอเดรเจอร์เฟส

ตารางที่ 2.1 ค่าสัญญาณ OFDM ในโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

โดเมนความถี่	โดเมนเวลา
1	0.7071
1	1.2071 - 1.2071i
-1	0 + 0.7071i
-1	0.2071 + 0.2071i
-1	-0.7071
1	0.2071 - 0.2071i
1	0 - 0.7071i
1	1.2071 + 1.2071i

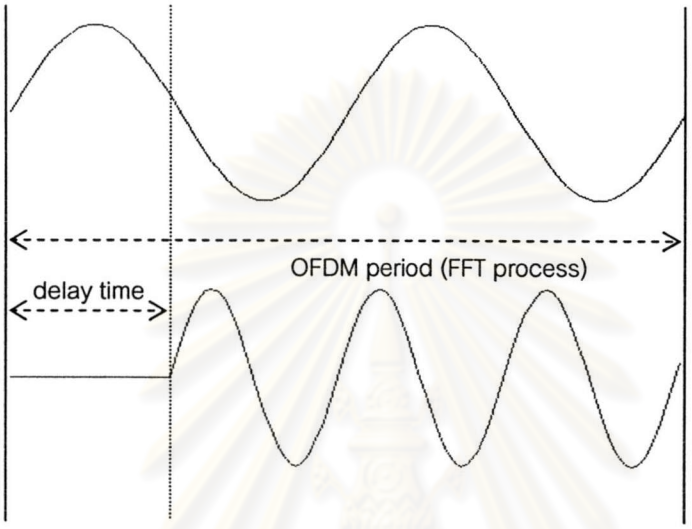
2.3 เวลาคุม (guard time) และ Cyclic Extension

ข้อดีที่สำคัญประการหนึ่งในการมอดูเลตด้วยวิธี OFDM ก็คือความสามารถในการแก้ไขปัญหาในเรื่องเวลาประวิงของคลื่นพหุวิถี ซึ่งการแบ่งกระแสข้อมูลด้านขาเข้าไปบนคลื่นพาห์ย่อย N_s ตัว จะทำให้คาบของสัญลักษณ์มีค่าเพิ่มเป็น N_s เท่าด้วย และเพื่อที่จะกำจัดผลของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์หรือ ISI โดยสมบูรณ์นั้น เวลาคุมต้องมีขนาดใหญ่กว่าเวลาประวิงที่เกิดขึ้นเพื่อไม่ให้คลื่นพหุวิธีจากสัญลักษณ์หนึ่งไปรบกวนสัญลักษณ์ถัดไป [14] รูปแบบของเวลาคุมมีได้หลายแบบซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณค่า 0 ก็ได้ แต่ว่าเวลาคุมลักษณะนี้จะไม่สามารถลดผลของการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณหรือ ICI ซึ่งเป็นการรบกวนที่เกิดจากการสูญเสียความตั้งฉากระหว่างคลื่นพาห์ย่อยแต่ละตัวได้ ในรูปที่ 2.4 แสดงถึงผลของการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณในคลื่นพาห์ย่อยตัวที่ 1 และ 2 โดยที่ด้านรับกำลังดีมอดูเลตสัญญาณเพื่อดึงข้อมูลที่อยู่ในคลื่นพาห์ย่อยตัวที่ 1 ออกมา จากตัวอย่างจะเห็นการรบกวนเกิดขึ้นเนื่องจากความตั้งฉากระหว่างคลื่นพาห์ย่อยตัวที่ 1 และ 2 ที่มีการประวิงไปนั้นได้เสียไป ทำนองเดียวกันก็จะมีการรบกวนเช่นนี้เมื่อจะทำการดีมอดูเลตสัญญาณในคลื่นพาห์ที่ 2 ด้วย

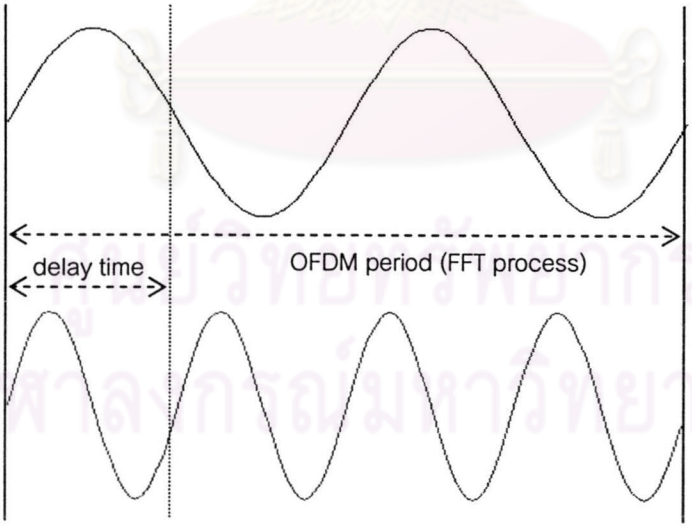


รูปที่ 2.3 สัญญาณ OFDM แบบอินเฟสและควอเดรเจอร์เฟสในโดเมนเวลา

เพื่อที่จะกำจัด ICI สัญลักษณ์ OFDM ต้องใช้เวลาคุมที่เป็นแบบ Cyclic Extension ดังในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะทำให้การประวิงของสัญลักษณ์ OFDM ไม่ส่งผลต่อจำนวนคาบคลื่นในช่วงการทำฟูริเยร์ นั่นคือตราบใดที่การประวิงนั้นน้อยกว่าเวลาคุมการประวิงนั้นจะไม่ทำให้เกิด ICI นั่นเอง

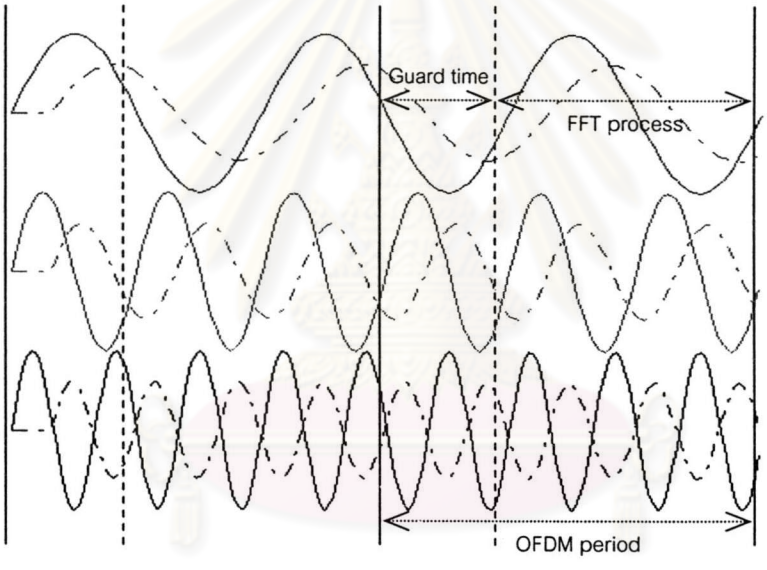


รูปที่ 2.4 การเกิดการรบกวนแบบ ICI ที่เกิดจากการประวิง



รูปที่ 2.5 การรบกวนแบบ ICI ถูกป้องกันได้ด้วยเวลาคุมแบบ Cyclic Extension

ตัวอย่างผลของเวลาประวิงของคลื่นพหุวิถีที่มีต่อสัญญาณ OFDM เป็นดังในรูปที่ 2.6 สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยสัญญาณจาก 2 วิถี โดยที่สัญญาณเส้นทึบแสดงเส้นทางหลัก และเส้นประแสดงสัญญาณซึ่งมีการประวิง ในรูปแสดงลักษณะของคลื่นพาห์ย่อยซึ่งแยกจากกัน แต่ในความเป็นจริงสัญญาณเหล่านี้จะรวมกันอยู่ เพื่อการอธิบายในที่นี้จึงได้แยกแต่ละส่วนออกจากกันเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของเวลาประวิงของคลื่นพหุวิถี จากตัวอย่างจะเห็นว่าคลื่นพาห์ย่อยของสัญญาณ OFDM ซึ่งมีการมอดูเลตแบบ BPSK นั้น สัญญาณที่เป็นเส้นประมีการประวิงเวลาไปไม่มากกว่าเวลาคุม โดยจะเห็นได้ว่าในช่วงการแปลงฟูริเยร์นั้น การประวิงที่เกิดขึ้นไม่ได้ทำลายความตั้งฉากกันของแต่ละพาห์ย่อย แต่หากว่าการประวิงนั้นนานกว่าช่วงเวลาคุมก็จะทำให้จุดที่เกิดการเลื่อนเฟสตกอยู่ภายในช่วงการแปลงฟูริเยร์ และเป็นสาเหตุให้ระบบสูญเสียความตั้งฉากกันของแต่ละคลื่นพาห์ย่อย

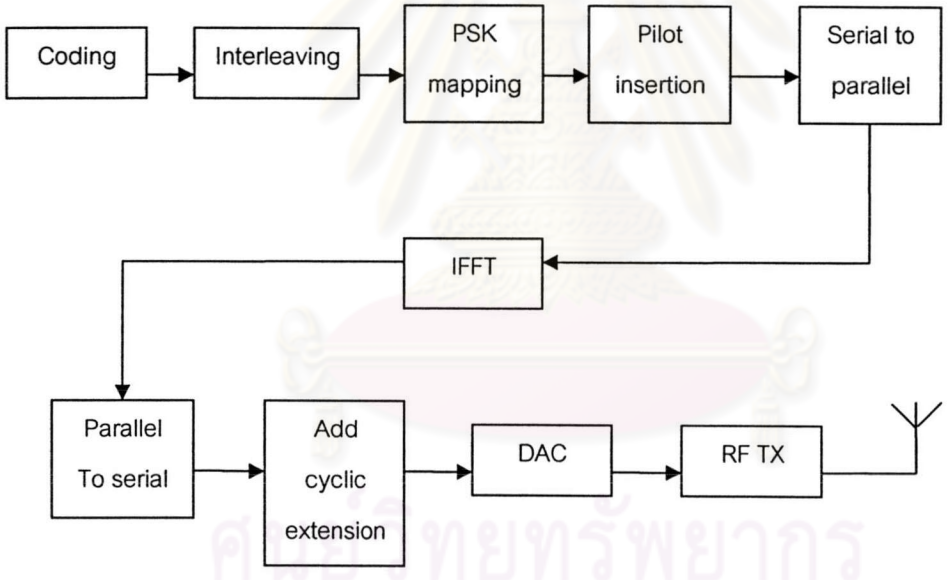


รูปที่ 2.6 วิธีการที่เวลาคุมป้องกันการเกิด ICI

2.4 กระบวนการสร้างสัญญาณ OFDM ที่ภาคส่ง

จากหลักการของระบบ OFDM ที่กล่าวมาในข้างต้น สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.7 โดยในขั้นแรกบิตข้อมูลขาเข้าซึ่งอยู่ในรูปไบนารี (binary input data) จะถูกทำการเข้ารหัส (coding) และทำการวางสลับ (interleaving) เพื่อป้องกันการเกิดเบิรสต์ (burst) หลังจากนั้นข้อมูลที่ทำการเข้ารหัสแล้วจะถูกนำไปจัดวางลงบนสัญลักษณ์ PSK หรือ QAM โดยมีการใส่สัญลักษณ์นำ

(pilot symbol) เข้าไปเพื่อใช้ในการประมาณคุณลักษณะช่องสัญญาณที่ด้านรับด้วย จากนั้นบิตข้อมูลขาเข้าซึ่งอยู่ในรูปอนุกรม (serial) จะถูกนำไปแปลงให้เป็นข้อมูลในรูปขนาน (parallel) โดยจำนวนบิตข้อมูลที่ขนานกันจะมีเท่ากับจำนวนคลื่นพาห์ย่อยที่ใช้ บิตข้อมูลที่อยู่ในรูปขนานแต่ละชุดจะถูกนำไปผ่านกระบวนการแปลงฟูริเยร์แบบผกผันเพื่อทำให้เป็นสัญญาณในโดเมนเวลา โดยจำนวนบิตข้อมูลที่ขนานกันชุดหนึ่ง ๆ จะเท่ากับจำนวนจุดที่ใช้ในการแปลงฟูริเยร์แบบผกผันเช่นกัน ซึ่งการแปลงฟูริเยร์แบบผกผันในที่นี้เปรียบเสมือนการนำข้อมูลเข้าไปมอดูเลตกับคลื่นพาห์ย่อยแต่ละตัว จากนั้นข้อมูลในโดเมนเวลาที่อยู่ในรูปขนานก็จะถูกแปลงเป็นข้อมูลในรูปอนุกรม ที่ส่วนหน้าของชุดบิตข้อมูลในโดเมนเวลารูปอนุกรมนี้จะถูกนำไปเติมเวลาคุม เพื่อป้องกันการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์และการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณ สุดท้ายข้อมูลที่ผ่านการเติมเวลาคุมแล้วก็จะถูกนำไปทำเป็นสัญญาณแอนะลอกเพื่อทำการส่งผ่านช่องสัญญาณไปยังด้านรับ



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างสัญญาณ OFDM

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย