

## บทที่ 3

### ช่องสัญญาณ

#### 3.1 บทนำ

สัญญาณที่ออกจากภาคส่งผ่านไปตามช่องสัญญาณนั้น อาจจะต้องเดินทางผ่านสิ่งกีดขวางมากมายและสัญญาณก็อาจจะถูกลดทอนก่อนจะไปถึงที่ภาครับ ช่องสัญญาณลักษณะเช่นนี้จะทำให้สัญญาณที่ได้รับมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากเดิม ทั้งนี้รูปแบบการของการลดทอนและผิดเพี้ยนไปของสัญญาณขึ้นกับลักษณะของช่องสัญญาณที่ส่งผ่าน โดยในงานวิจัยนี้จะมีการพิจารณาถึงผลกระทบของช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบพหุวิถี (multipath) โดยช่องสัญญาณในแต่ละวิถีมีการแจกแจงแบบเรย์ลี นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาถึงช่องสัญญาณแบบคงที่ด้วย เพื่อที่จะให้เห็นถึงคุณลักษณะบางประการของช่องสัญญาณ และสามารถนำไปเพิ่มสมรรถนะของอีควอลไลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

#### 3.2 เฟดดิ้ง (fading)

ปรากฏการณ์ที่สัญญาณตั้งแต่ 2 วิถีขึ้นไปมาถึงที่ภาครับในเวลาไล่เลี่ยกันเรียกว่าสัญญาณแบบพหุวิถี (multipath waves) สัญญาณของภาครับซึ่งเป็นผลรวมของสัญญาณแบบพหุวิถีเหล่านี้จะเกิดการผิดเพี้ยนไปทั้งในเชิงแอมพลิจูดและเฟส ปรากฏการณ์ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการเกิดเฟดดิ้ง รูปแบบของเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับการแจกแจงผลตอบสนองของช่องสัญญาณ เวลาที่ประวิงไปของสัญญาณแต่ละวิถีและแบนด์วิดท์ของสัญญาณเป็นสำคัญ นอกจากนี้ภาคส่งและภาครับที่มีการเคลื่อนที่ยังสามารถทำให้เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นได้ทั้งในเชิงขนาดและเชิงความถี่ เนื่องจากความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเลื่อนความถี่ (Doppler shift)

#### 3.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดเฟดดิ้ง

ปัจจัยที่ทำให้เกิดเฟดดิ้งมี 2 อย่างคือการแผ่แบบประวิงเวลา (delay spread) และการแผ่แบบดอปเปลอร์ (Doppler spread)

##### 3.3.1 การแผ่แบบประวิงเวลา (delay spread)

ภาวะของช่องสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับอาจมีสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ซึ่งเมื่อสัญญาณไป

กระทบกับสิ่งกีดขวางเหล่านี้ จะทำให้สัญญาณที่ภาครับประกอบไปด้วยสัญญาณจากหลายเส้นทางที่ต่าง ๆ กัน สัญญาณรวมที่ประกอบไปด้วยสัญญาณซึ่งมีการประวิงเวลาไปนั้นเรียกว่าสัญญาณนั้นมีการแผ่ทางเวลา (time spread) การแผ่ทางเวลานี้ทำให้ช่วงเวลาในการส่งแต่ละสัญลักษณ์นานขึ้น จึงทำให้รูปแบบสัญญาณที่รับได้มีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม นอกจากนี้หากระยะห่างระหว่างสัญลักษณ์มีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของแต่ละสัญลักษณ์ที่ผิดเพี้ยนไป ก็จะทำให้เกิดการรบกวนในแบบที่เรียกว่าการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์หรือ ISI (intersymbol interference) ขึ้นอีกด้วย การเกิดเฟดดิ้งอันเนื่องมาจากการแผ่แบบเวลาประวิงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบคือเฟดดิ้งแบบเรียบ (flat fading) และเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ (frequency selective fading)

### 3.3.1.1 เฟดดิ้งแบบเรียบ (flat fading)

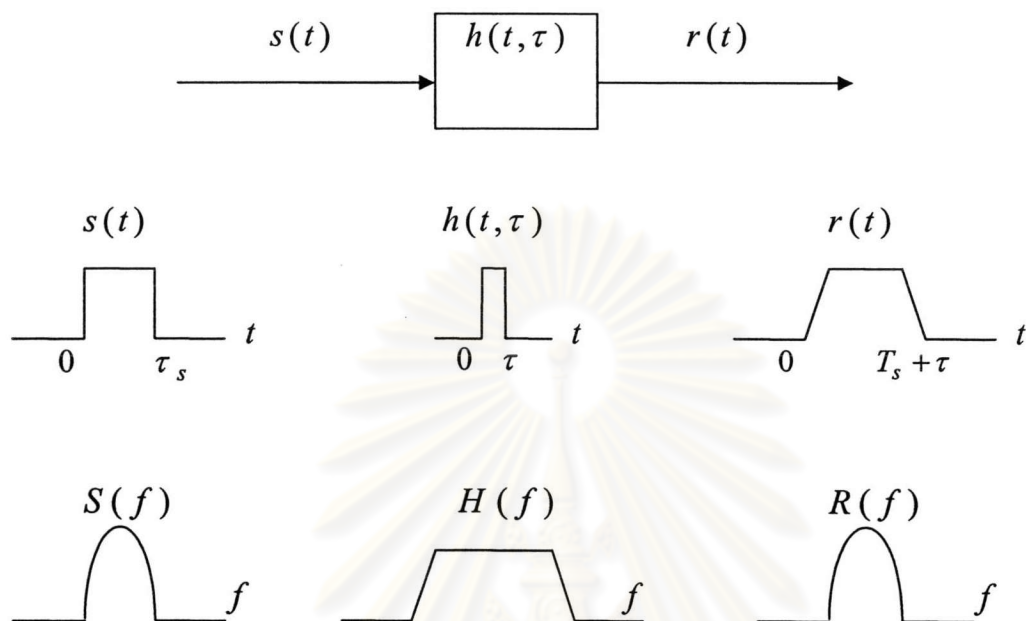
เมื่อพิจารณาช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณไปยังภาครับ ถ้าสัญญาณที่ส่งไปนั้นมีแบนด์วิดท์แคบกว่าโคฮีเรนซ์แบนด์วิดท์ (coherence bandwidth) ของช่องสัญญาณแล้ว เฟดดิ้งที่เกิดขึ้นจะเป็นเฟดดิ้งแบบเรียบ เฟดดิ้งแบบเรียบนี้จะไม่ทำให้คุณลักษณะเชิงสเปกตรัมของสัญญาณที่ส่ง (spectral characteristic) เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณรวมที่รับได้ในภาครับจะมีขนาดแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ทั้งนี้เนื่องจากผลของพหุวิถีซึ่งสัญญาณมีอัตราขยายที่แตกต่างกันในแต่ละเส้นทาง ลักษณะของการเกิดเฟดดิ้งแบบเรียบนี้เป็นดังในรูปที่ 3.1 ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรียบนี้มีอีกชื่อว่า ช่องสัญญาณแอมพลิจูดแบบผันแปร (amplitude varying channels) หรือ ช่องสัญญาณแถบแคบ (narrowband channels) เพราะว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณนั้นแคบเมื่อเทียบกับแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรียบ โดยทั่วไปเฟดดิ้งแบบเรียบจะทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณที่ค่อนข้างรุนแรง เมื่อเทียบกับช่องสัญญาณที่ไม่เกิดเฟดดิ้ง คุณลักษณะของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรียบนั้น ขึ้นอยู่กับรูปแบบการแจกแจงของผลตอบสนองของช่องสัญญาณเป็นสำคัญ โดยทั่วไปจะเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution) ที่ซึ่งแอมพลิจูดทางเวลาของช่องสัญญาณจะมีการแจกแจงแบบเรย์ลี จากที่กล่าวมาในข้างต้นสามารถสรุปลักษณะของการเกิดเฟดดิ้งแบบเรียบได้ดังสมการที่ 3.1

$$\begin{aligned} B_S &\ll B_C \\ T_S &\gg \sigma_\tau \end{aligned}$$

(3.1)

โดย  $B_S, B_C$  แทนแบนด์วิดท์ของสัญญาณและโคฮีเรนซ์แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณตามลำดับ ส่วน

$T_S$  แทนคาบสัญญาณลักษณะของสัญญาณและ  $\sigma_\tau$  แทนการแผ่ทางเวลาของช่องสัญญาณ



รูปที่ 3.1 ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรียบ

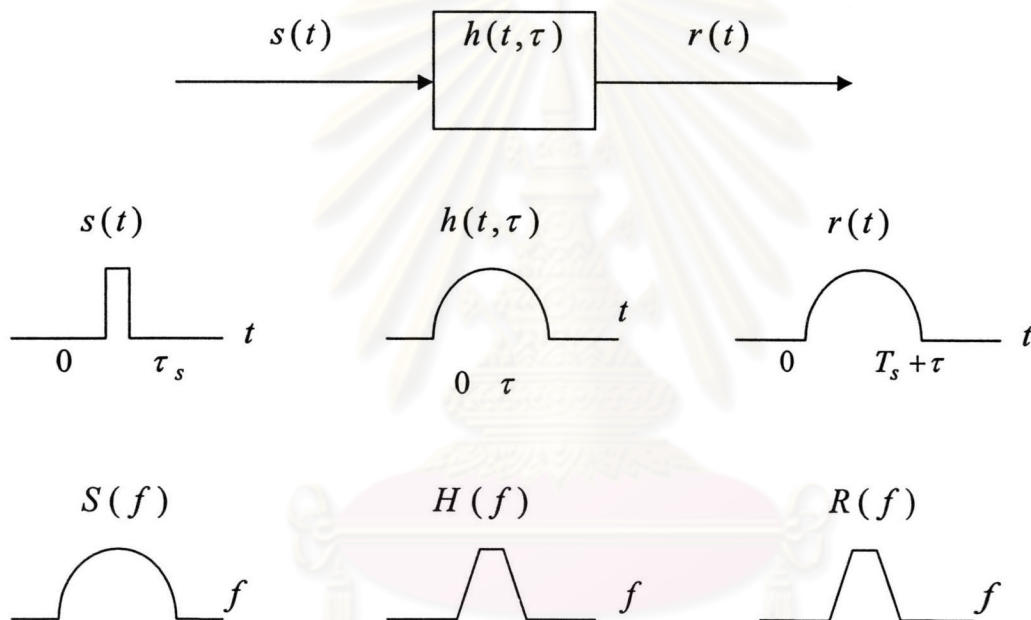
### 3.3.1.2 เฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ (frequency selective fading)

เมื่อพิจารณาช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณไปยังภาครับ ถ้าสัญญาณที่ส่งไปนั้นมีแบนด์วิดท์กว้างกว่าโคฮีเรนซ์แบนด์วิดท์ (coherence bandwidth) ของช่องสัญญาณแล้ว เฟดดิ้งที่เกิดขึ้นจะเป็นเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ เฟดดิ้งแบบเลือกความถี่นี้จะทำให้รูปร่างของสัญญาณในทางเวลาผิดเพี้ยนไปดังในรูปที่ 3.2 ช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่เรียกอีกชื่อได้ว่า ช่องสัญญาณแถบกว้าง (wideband channels) ทั้งนี้เพราะว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่งกว้างกว่าโคฮีเรนซ์แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ การจำลองการเกิดเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่นั้นยากกว่าการจำลองเฟดดิ้งแบบเรียบเพราะว่าต้องมีการจำลองสัญญาณในแต่ละเส้นทาง แต่โดยทั่วไปอาจใช้การจำลองการเกิดเฟดดิ้งเรย์ลีแบบเรียบ 2 เส้นทางซึ่งเป็นอิสระต่อกันและมีเวลาประวิงห่างกันเพียงพอแทนการจำลองการเกิดเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ได้ การเกิดเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่นี้จะทำให้สัญญาณที่ภาครับเกิดการแผ่ออกทางโดเมนเวลายาวกว่าคาบของสัญญาณลักษณะ โดยถ้าการแผ่ออกทางโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นมีค่ามากถึงระดับหนึ่งก็จะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณลักษณะหรือ ISI จาก

ที่กล่าวมาในข้างต้นสามารถสรุปลักษณะของการเกิดเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ได้ดังในสมการที่ 3.2

$$\begin{aligned} B_S &> B_C \\ T_S &< \sigma_\tau \end{aligned} \quad (3.2)$$

โดย  $B_S, B_C$  แทนแบนด์วิดท์ของสัญญาณและโคฮีเรนซ์แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณตามลำดับ ส่วน  $T_S$  แทนคาบสัญลักษณ์ของสัญญาณและ  $\sigma_\tau$  แทนการแผ่ทางเวลาของช่องสัญญาณ



รูปที่ 3.2 ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่

### 3.3.2 การแผ่แบบดอปเปลอร์ (Doppler spread)

ถ้าระหว่างภาคส่งและภาครับมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างกัน จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่รับได้มีการผิดเพี้ยนไปจากเดิมโดยจะเกิดการเลื่อนทางความถี่ขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าดอปเปลอร์ชิฟต์ (Doppler shift) และการเคลื่อนที่ของวัตถุในช่องสัญญาณจะทำให้ดอปเปลอร์ชิฟต์ที่เกิดขึ้นมีการผันแปรทางเวลาร่วมด้วย ทั้งนี้เนื่องจากทิศทางของสัญญาณจากภาคส่งที่ส่งไปยังภาครับจะมีการ

เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ในช่องสัญญาณ ค่าความถี่ที่เลื่อนไป ( $f_d$ ) จะมีค่าเท่าไรหรือนั้น ขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็ว ( $v$ ) ของภาครับตั้งในสมการที่ 3.3

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos \theta \quad (3.3)$$

การที่ผลของดอปเปลอร์ซีฟต์ขึ้นกับการเคลื่อนที่เป็นสำคัญนั้น ทำให้สามารถมองได้ว่าการแผ่แบบดอปเปลอร์นี้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying channel) โดยค่าดอปเปลอร์ซีฟต์นี้ส่งผลต่อความเร็วของเฟดดิ้งด้วย เฟดดิ้งที่เกิดจากการแผ่ดอปเปลอร์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ

### 3.3.2.1 เฟดดิ้งแบบเร็ว (fast fading)

การพิจารณาว่าเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบเร็วหรือช้า นั้น จะใช้พารามิเตอร์คือเวลาโคฮีเรนต์ (coherent time) เป็นเกณฑ์ในการตัดสิน เวลาโคฮีเรนต์คือช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือผลตอบสนองอาจจะแตกต่างกันเล็กน้อยแต่ความต่างนั้นไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของสัญญาณในช่วงเวลานั้น กล่าวคือสัญญาณใด ๆ ก็ตามที่มาถึงในช่วงเวลาโคฮีเรนต์จะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณเหมือนกัน

จากนิยามข้างต้นเฟดดิ้งแบบเร็วจึงหมายถึง สัญญาณที่คาบของสัญลักษณ์มีค่ามากกว่าเวลาโคฮีเรนต์ของช่องสัญญาณดังในสมการที่ 3.4 การที่คาบของสัญลักษณ์มีค่ามากกว่าเวลาโคฮีเรนต์นั้น ทำให้ภายใน 1 สัญลักษณ์ของสัญญาณต้องเจอกับผลตอบสนองของช่องสัญญาณหลายค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งผลตอบสนองที่แตกต่างกันของช่องสัญญาณ จะทำให้รูปร่างของสัญญาณเบสแบนด์เกิดการบิดเบี้ยวไป

$$\begin{aligned} T_S &> T_C \\ B_S &< f_d \end{aligned} \quad (3.4)$$

$T_S, T_C$  แทนคาบของสัญญาณและเวลาโคฮีเรนต์ของช่องสัญญาณตามลำดับ ส่วน  $B_S$  แทนแบนด์วิดท์ของสัญญาณและ  $f_d$  แทนดอปเปลอร์ซีฟต์

### 3.3.2.2 เฟดดิ้งแบบช้า (slow fading)

เมื่อใช้เวลาโคฮีเรนซ์เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ เฟดดิ้งแบบช้าหมายถึงสัญญาณที่คาบของสัญญาณลักษณะมีค่าน้อยกว่าเวลาโคฮีเรนซ์ของช่องสัญญาณมาก ๆ ดังในสมการที่ 3.5 ผลของเฟดดิ้งแบบช้าทำให้ในแต่ละคาบสัญญาณของสัญญาณได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณเหมือน ๆ กัน หรือกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองของช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง

$$\begin{aligned} T_S &\ll T_C \\ B_S &\gg f_d \end{aligned}$$

(3.5)

จากรูปแบบของเฟดดิ้งที่กล่าวมาทั้งหมดทั้งที่เกิดจากการแผ่แบบประวิงเวลาและการแผ่แบบดอปเปลอร์ สามารถสรุปเป็นรูปแบบของช่องสัญญาณรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังในรูปที่ 3.3

## 3.4 แบบจำลองต่าง ๆ ของช่องสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัย

แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดจะมีพื้นฐานอยู่บนเฟดดิ้งแบบช้า โดยแบ่งเป็น 2 รูปแบบหลัก ๆ คือช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองคงที่ และช่องสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี โดยในกรณีแบบเส้นทางเดียวกันนั้นจะได้ช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรียบ และในกรณีที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี 2 เส้นทางซึ่งเป็นอิสระต่อกันนั้น จะได้ช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่

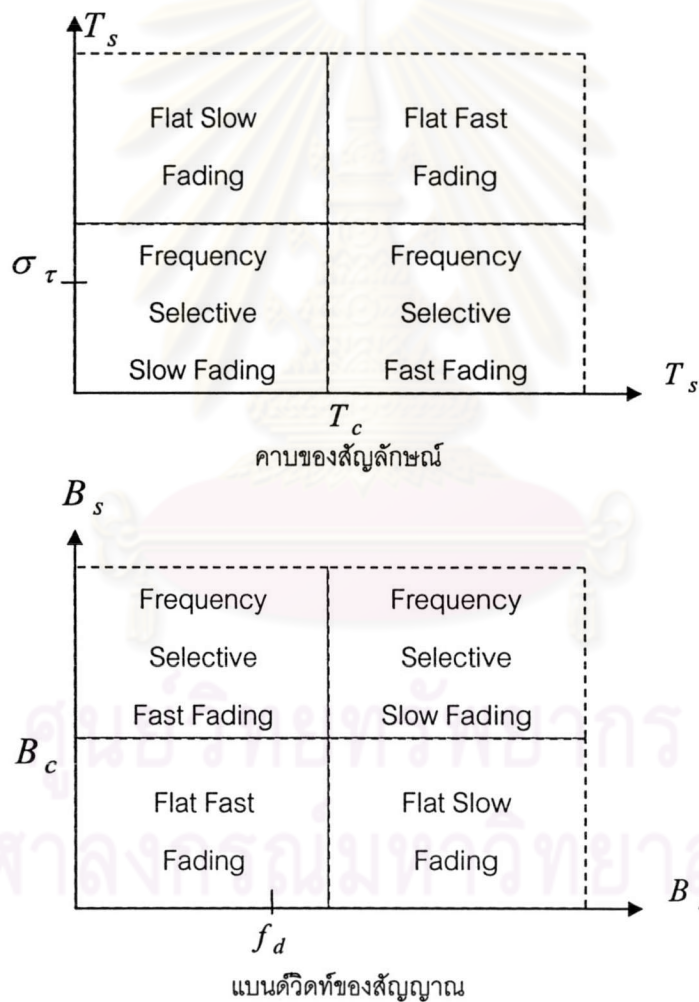
### 3.4.1 ช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองคงที่

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีแบบจำลองซึ่งมีผลตอบสนองคงที่ เพื่อที่จะสามารถพิจารณาถึงผลกระทบของช่องสัญญาณที่ส่งผลต่อสัญญาณที่ภาครับ โดยสัญญาณจากภาคส่งจะผ่านช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองแบบในรูปแบบต่าง ๆ พร้อมทั้งเกิดพหุวิถีขึ้น ในสภาพแวดล้อมที่เกิดพหุวิถีนั้นซึ่งสัญญาณแต่ละวิถีจะผ่านช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองที่แตกต่างกัน และมาอยู่ที่ภาครับในเวลาที่แตกต่างกันดังตัวอย่างในรูปที่ 3.4

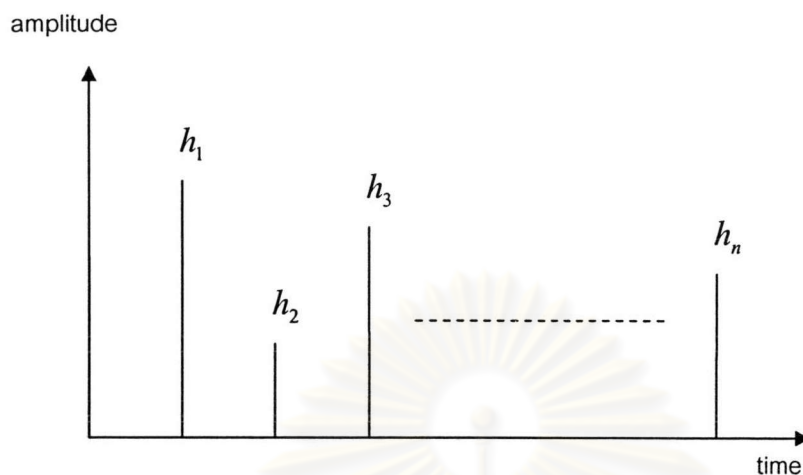
ในรูปที่ 3.4 แสดงถึงแอมพลิจูดของผลตอบสนองของช่องสัญญาณซึ่งเป็นค่าเชิงซ้อน  $n$  ชุด โดยสัญญาณที่ผ่านช่องสัญญาณแต่ละชุดมานั้นมาอยู่ที่ภาครับในเวลาที่แตกต่างกันไป และเมื่อพิจารณาที่ภาครับตามกฎทรงพลังงาน พลังงานรวมของสัญญาณในทุกเส้นทางรวมกันจะต้องมีค่าเท่ากับ

พลังงานรวมของสัญญาณที่ส่งออกมาจากภาคส่ง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้พลังงานจากภาคส่งมีค่าคงที่เท่ากับ 1 เสมอ ดังนั้นคุณสมบัติของผลตอบสนองของช่องสัญญาณในรูปที่ 3.4 จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ 3.6 โดยตัวแปร  $|h_n|$  ในสมการแทนค่าสัมบูรณ์ของผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่  $n$

$$|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + \dots + |h_n|^2 = 1 \quad (3.6)$$



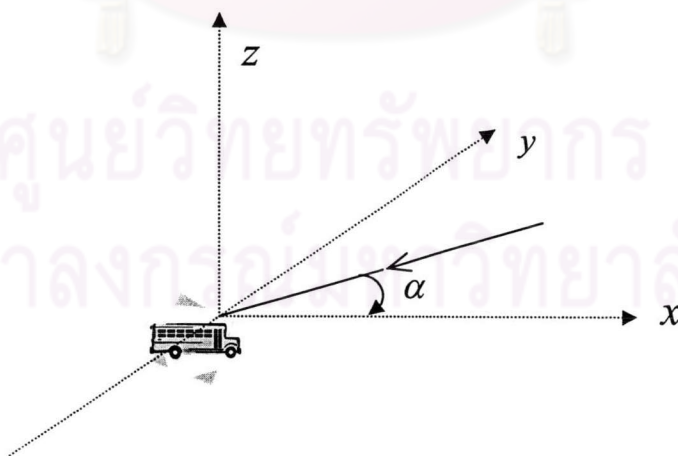
รูปที่ 3.3 รูปแบบของคุณลักษณะของเฟดดิ้งแบบต่าง ๆ



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองของช่องสัญญาณแบบคงที่

### 3.4.2 ช่องสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี

แบบจำลองของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรียบที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลีนั้น พิจารณาจากรูปประกอบที่ 3.5 ซึ่งภาครับเคลื่อนที่ไปในทิศทาง  $x$  ด้วยความเร็วคงที่  $v$  สัญญาณจากหลายเส้นทางมาถึงที่ภาครับในเวลาพร้อมกัน โดยคิดว่าสัญญาณที่รับได้ในเวลาหนึ่ง ๆ ไม่มีส่วนที่เกิดการประวิงไปของสัญญาณ ทั้งนี้เพราะการจำลองนี้อยู่บนเงื่อนไขของเฟดดิ้งแบบเรียบ



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการคำนวณเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



ค่าดอปเปลอร์ชีพต์ของสัญญาณใด ๆ ที่ทำมุม  $\alpha$  ในระนาบ  $x-y$  มีค่าเป็นดังในสมการที่ 3.7

$$f_n = \frac{v}{\lambda} \cos \alpha_n \quad (3.7)$$

ดังนั้นสัญญาณในแนวแกน  $z$  จะมีค่าดังในสมการที่ 3.8

$$\begin{aligned} E_z &= E_0 \sum_{n=1}^N C_n \cos(2\pi f_c t + \theta_n) \\ \theta_n &= 2\pi f_n t + \phi_n \end{aligned} \quad (3.8)$$

โดยที่  $E_0$  คือแอมพลิจูดของพลังงานเฉลี่ย  
 $C_n$  คืออัตราขยายแอมพลิจูดของสัญญาณเส้นทางที่  $n$   
 $f_c$  คือความถี่ของคลื่นพาห်  
 $\phi_n$  คือเฟสของสัญญาณเส้นทางที่  $n$

และเพื่อให้พลังงานรวมของสัญญาณที่ภาครับมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นค่า  $C_n$  ในสมการที่ 3.8 นั้นต้องมีคุณสมบัติดังในสมการที่ 3.9

$$\sum_{n=1}^N C_n^2 = 1 \quad (3.9)$$

ค่า  $E_z$  ในสมการที่ 3.8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปตัวแปร  $T_c(t)$  และ  $T_s(t)$  ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์และเป็นอิสระต่อกัน ได้ดังสมการที่ 3.10 [16]

$$\begin{aligned} E_z(t) &= T_c(t) \cos(2\pi f_c t) - T_s(t) \sin(2\pi f_c t) \\ T_c(t) &= E_0 \sum_{n=1}^N C_n \cos(2\pi f_n t + \phi_n) \\ T_s(t) &= E_0 \sum_{n=1}^N C_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \end{aligned} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.10 ทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ  $E_z(t)$  เป็นดังสมการที่ 3.11

$$|E_z(t)| = \sqrt{T_c^2(t) + T_s^2(t)} = r(t) \quad (3.11)$$

รูปแบบการแจกแจงของ  $r(t)$  ในสมการที่ 3.11 จะเหมือนกับการแจกแจงแบบเรย์ลีซึ่งมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นดังในสมการที่ 3.12

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & (r < 0) \end{cases}$$

$$\sigma^2 = E_0^2/2 \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.11 และ 3.12 สรุปได้ว่า ช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรียบจะมีการแจกแจงเชิงแอมพลิจูดของสัญญาณรวมที่ภาครับเป็นแบบเรย์ลี และถ้าต้องการช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ ก็สามารถทำได้โดยการนำช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรียบ 2 อันมารวมกันโดยมีเวลาที่ประวิงไป

### 3.5 การจำลองช่องสัญญาณโดยใช้แบบจำลองของ Jakes

ช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรียบในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองของ Jakes ซึ่งประกอบไปด้วยออสซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำ (low frequency oscillator) จำนวน  $N_0$  ตัว แต่ละตัวมีความถี่  $\omega_n = \omega_m \cos(2\pi n/N)$  โดย  $n = 1, 2, \dots, N_0$  และออสซิลเลเตอร์อีก 1 ตัวที่มีความถี่เท่ากับดอปเปลอร์ชิฟต์  $\omega_m$  ออสซิลเลเตอร์ทั้ง  $N_0 + 1$  ตัวจะนำมาประกอบกันมีลักษณะดังในรูปที่ 3.6

จากแบบจำลองของ Jakes ในรูปที่ 3.6 จะได้เอาต์พุตเป็นอัตราขยายของช่องสัญญาณในแกน in-phase และ quadrature-phase ซึ่งแทนด้วย  $x_c$  และ  $x_s$  ตามลำดับดังนี้

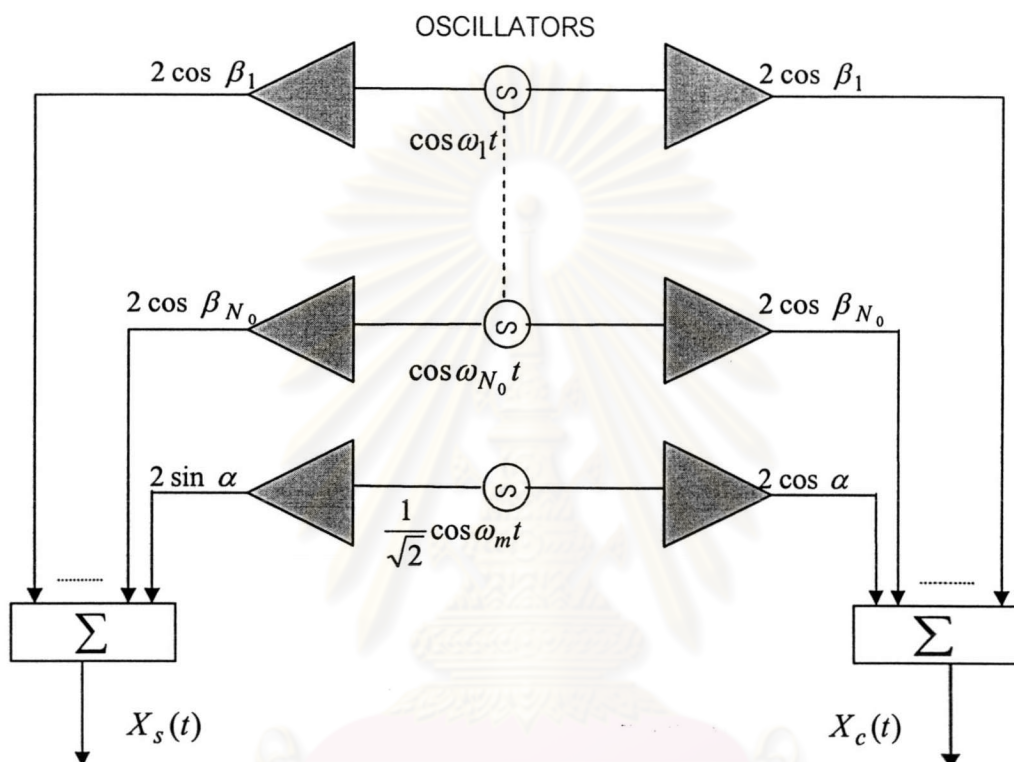
$$x_c(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \cos \beta_n \cos \omega_n t + \sqrt{2} \cos \alpha \cos \omega_m t$$

$$x_s(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin \beta_n \cos \omega_n t + \sqrt{2} \sin \alpha \cos \omega_m t \quad (3.13)$$

โดยที่

$$\alpha = \frac{\pi}{4}, \beta_n = \frac{\pi n}{N_0}$$

$$N_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{N}{2} - 1 \right) \text{ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ } N_0 = 8$$



รูปที่ 3.6 แบบจำลองช่องสัญญาณของ Jakes

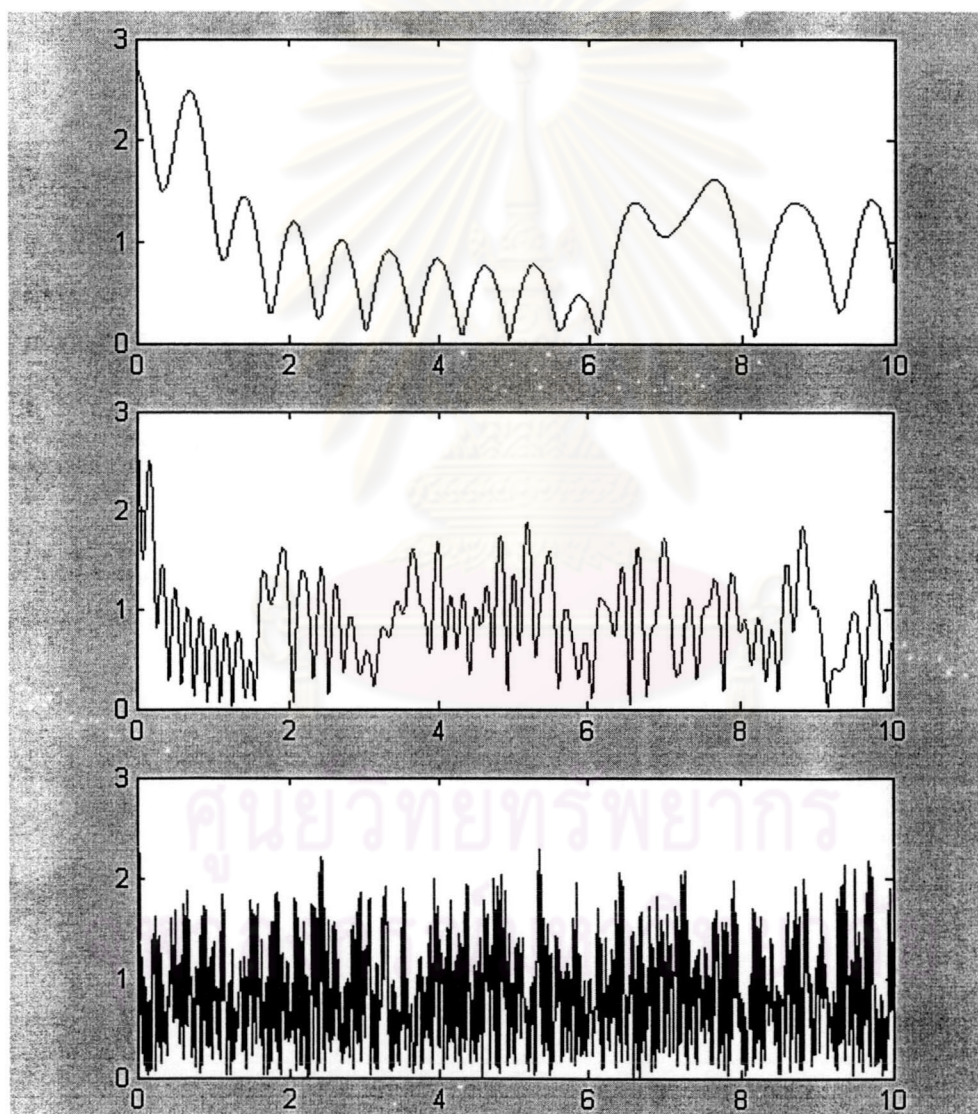
สัญญาณ  $x_c$  และ  $x_s$  ในสมการที่ 3.13 จะเป็นกระบวนการสุ่มแบบเกาส์เซียน (Gaussian random process) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนเท่ากับหนึ่ง สำหรับอัตราขยายของช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรียบจะเป็นดังต่อไปนี้

$$y(t) = x_c(t) + jx_s(t) \quad (3.14)$$

ค่าของตัวแปร  $y(t)$  ในสมการที่ 3.14 จะเป็นสัญญาณเชิงซ้อนซึ่งเกิดจากกระบวนการสุ่มแบบเกาส์เซียน 2 ชุด โดย  $|y|$  จะมีการแจกแจงแบบเรย์ลี และเฟสของ  $y(t)$  มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มตั้งแต่ค่า 0 ถึง  $2\pi$

### 3.6 ผลที่ได้จากการจำลองช่องสัญญาณแบบ Jakes

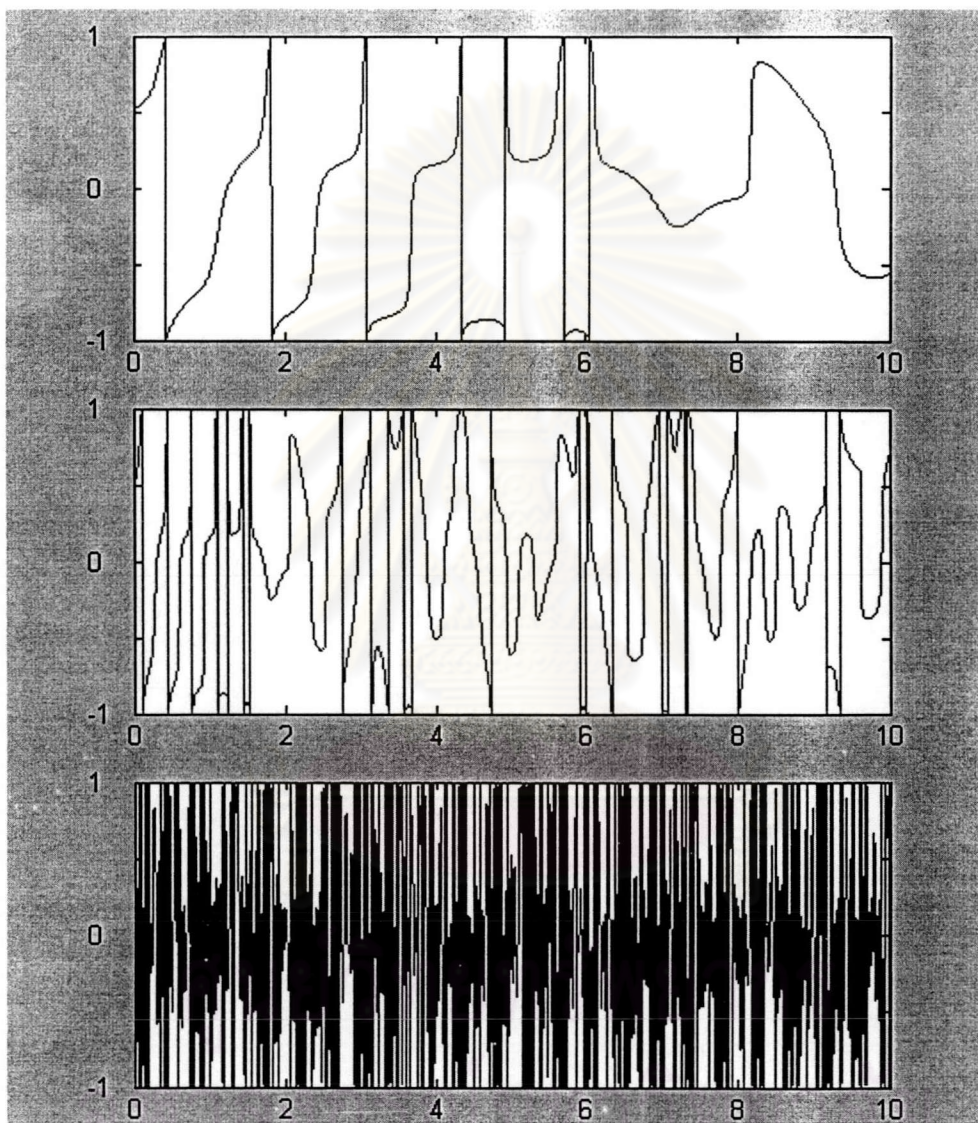
แบบจำลองช่องสัญญาณของ Jakes ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อัตราขยายของช่องสัญญาณที่ได้จะมีเฟดดิ้งแบบเรียบและมีการแจกแจงแบบเรย์ลี นอกจากนี้แอมพลิจูดของอัตราขยายยังมีสหสัมพันธ์กันอีกด้วย โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงแอมพลิจูดจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับค่าดอปเปลอร์ชีพต์มากที่สุด  $f_{d \max} = \frac{v}{\lambda}$  โดยค่าดอปเปลอร์ชีพต์ยิ่งมากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้อัตราขยายของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น



รูปที่ 3.7 อัตราขยายของเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ

(ก) 10 (ข) 40 (ค) 320

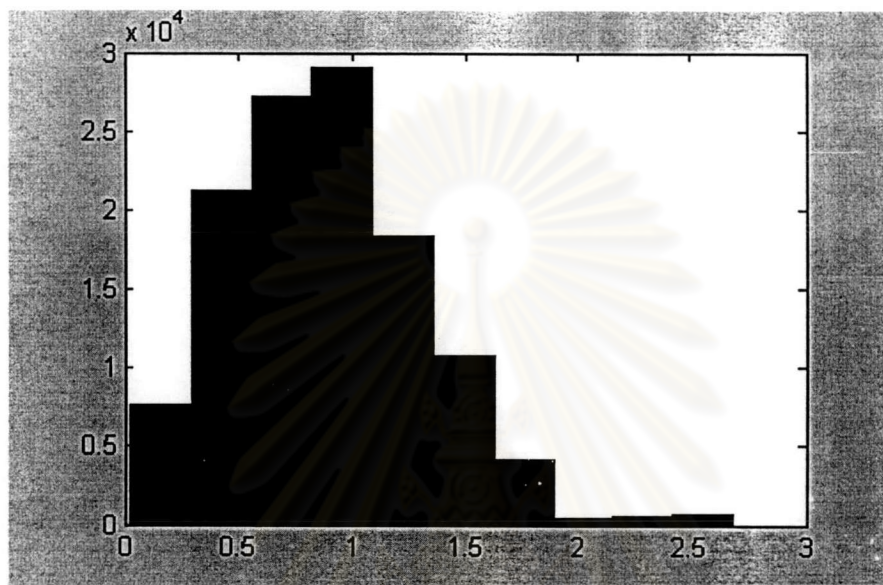
ลักษณะของเฟดดิ้งแบบเรียบซึ่งกำหนดให้ค่าดอปเปลอร์ชีพต์มากที่สุดมีค่าเป็น 10 40 และ 320 มีค่าแอมพลิจูดซึ่งแจกแจงแบบเรย์ลี และค่าเฟสซึ่งแจกแจงแบบยูนิฟอร์มตั้งแต่ค่า 0 ถึง  $2\pi$  เป็นดังในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้สัญญาณมีความถี่กลางอยู่ที่ 900 MHz



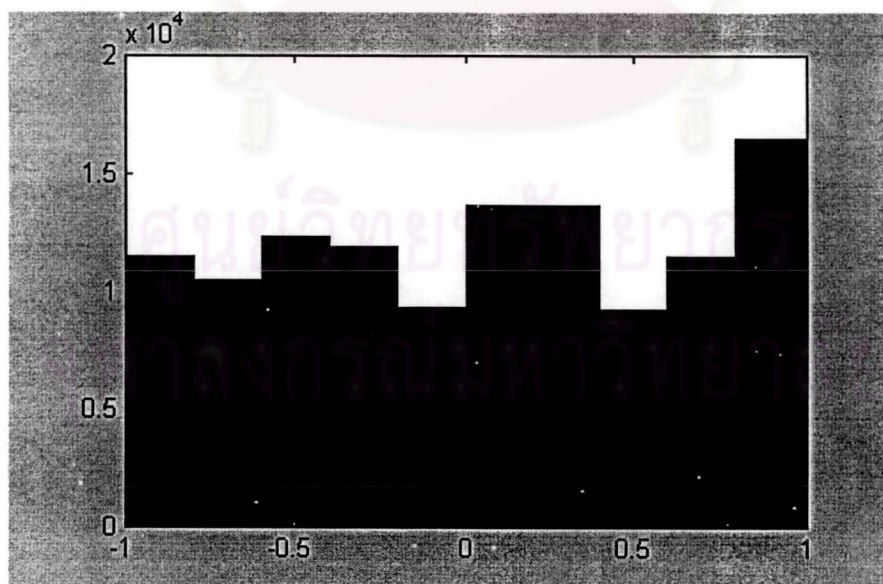
รูปที่ 3.8 เฟสของอัตราขยายเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ

(ก) 10 (ข) 40 (ค) 320

สำหรับในรูปที่ 3.9 และ 3.10 เป็นภาพฮิสโตแกรมที่แสดงให้เห็นว่าอัตราขยายและเฟสที่คำนวณจากแบบจำลองของช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรียบนั้น มีการแจกแจงเป็นแบบเรย์ลีและยูนิฟอร์มตามลำดับ ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 3.9 ฮิสโตแกรมของอัตราขยายของเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ 40



รูปที่ 3.10 ฮิสโตแกรมของเฟสของเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ 40