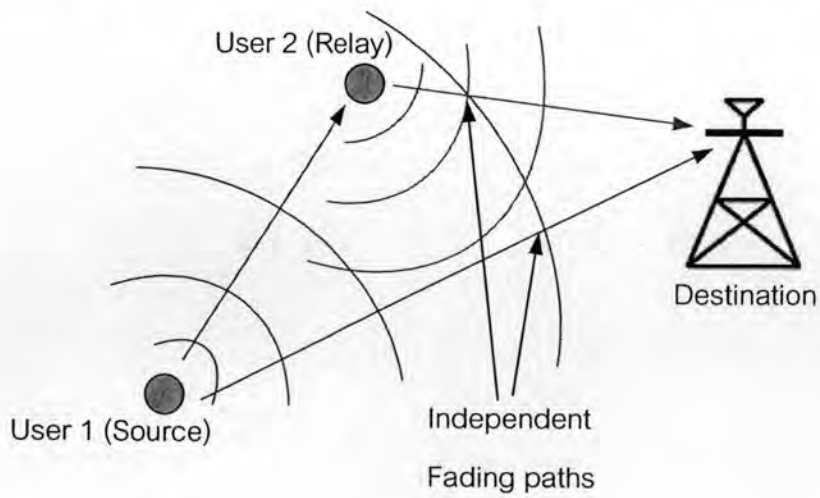
หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่จำเป็นสำหรับวิทยานิพนธ์ โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 หัวข้อหลักๆ ด้วยกันคือ ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสายไร้สายแบบร่วมมือ เทคนิคการรวมสัญญาณ การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ช่องสัญญาณ และส่วนสุดท้ายจะอธิบายถึงพารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบและความหมายของค่าต่าง ๆ

2.1 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

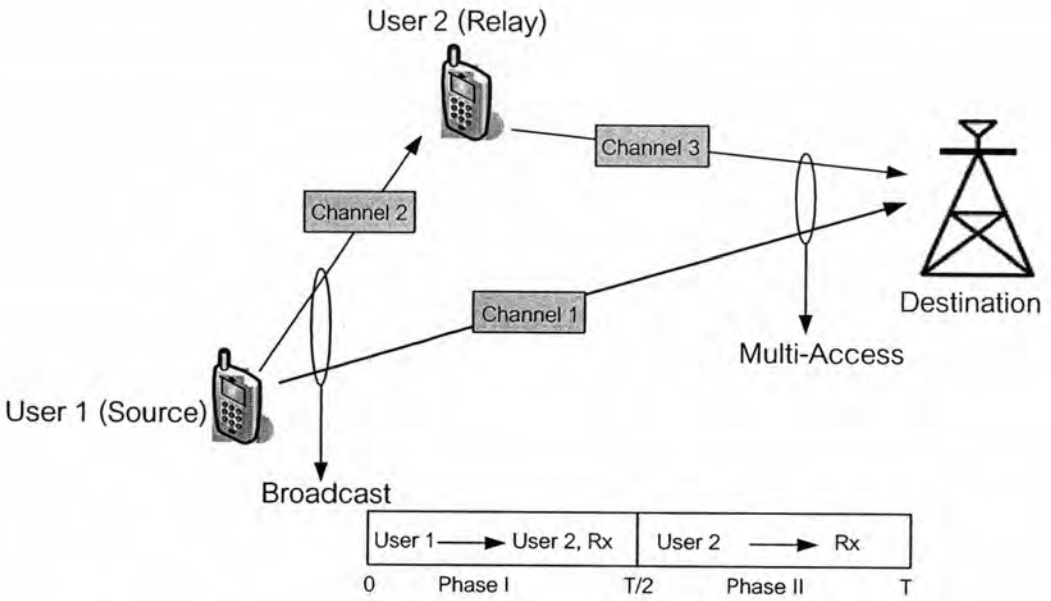
ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือคือ ระบบสื่อสารไร้สายที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Network) ทำหน้าที่รับสัญญาณและช่วยส่งต่อสัญญาณที่รับได้ไปยังเครื่องรับปลายทางร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า "เครื่องส่ง (Source) " และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณ เรียกว่า "Relay" [4] - [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งการช่วยส่งต่อสัญญาณจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (diversity gain) ขึ้น เหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออกและส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือการช่วยเพิ่มพิสัย (range) ในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้เครื่องรับปลายทางสามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมาก ๆ ได้ ซึ่งทำให้การใช้งานพลังงานไฟฟ้าอันจำกัดจากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบลดลงได้ สามารถทำให้การสื่อสารได้นานขึ้น



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2.1.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสายไร้สายแบบร่วมมือจะพิจารณาการส่งสัญญาณแบบทิศทางเดียว [5], [6] คือ การสื่อสารในทิศทางจากผู้ใช้งานไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลายๆ ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน และมีการเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ใช้หลายคนได้ 3 แบบคือ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA) การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) และ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และเวลาสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานทั้งหมดไปยังเครื่องรับมีการซิงโครไนซ์ (Synchronization) อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.2 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือสำหรับระบบสื่อสายไร้สายในรูปที่ 2.2 ซึ่งกำหนด ให้ผู้ใช้คนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay ดังนั้นจึงสามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟสดังนี้

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>เฟสที่ 1</u> $(0-\frac{T}{2})$: เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง กระจายสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทางและผู้ใช้คนที่ 2 พร้อม ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สาย ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$Y_{SD}(n) = \sqrt{P_1}\, a_{SD}\, x_S(n) + n_{SD}(n) \quad (2.1)$$

$$Y_{SR}(n) = \sqrt{P_1}\, a_{SR}\, x_S(n) + n_{SR}(n) \quad (2.2)$$

เมื่อ $x_S(n)$ คือ ข้อมูลที่ส่งออกจากเครื่องส่ง

a_{SD} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

a_{SR} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและ Relay

$n_{SD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

$n_{SR}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและ Relay

P_1 คือ กำลังส่งสัญญาณจากเครื่องส่ง

<u>เฟสที่ 2</u> $(\frac{T}{2}-T)$: เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Relay ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังสมการที่ (2.3)

$$Y_{DR}(n) = \sqrt{P_2}\, a_{RD}\, Y_{SR}(n) + n_{RD}(n) \quad (2.3)$$

เมื่อ a_{RD} คือ ช่องสัญญาณระหว่าง Relay และเครื่องรับ

$n_{RD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่าง Relay และเครื่องรับ

P_2 คือ กำลังส่งสัญญาณจาก Relay

2.1.2 โพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ในปัจจุบันได้มีการเสนอโพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ 3 รูปแบบ [5] ดังนี้

1. โพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้มีหลักการคือมีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay ที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โพรโทคอลแบบนี้มีความซับซ้อนน้อยที่สุด

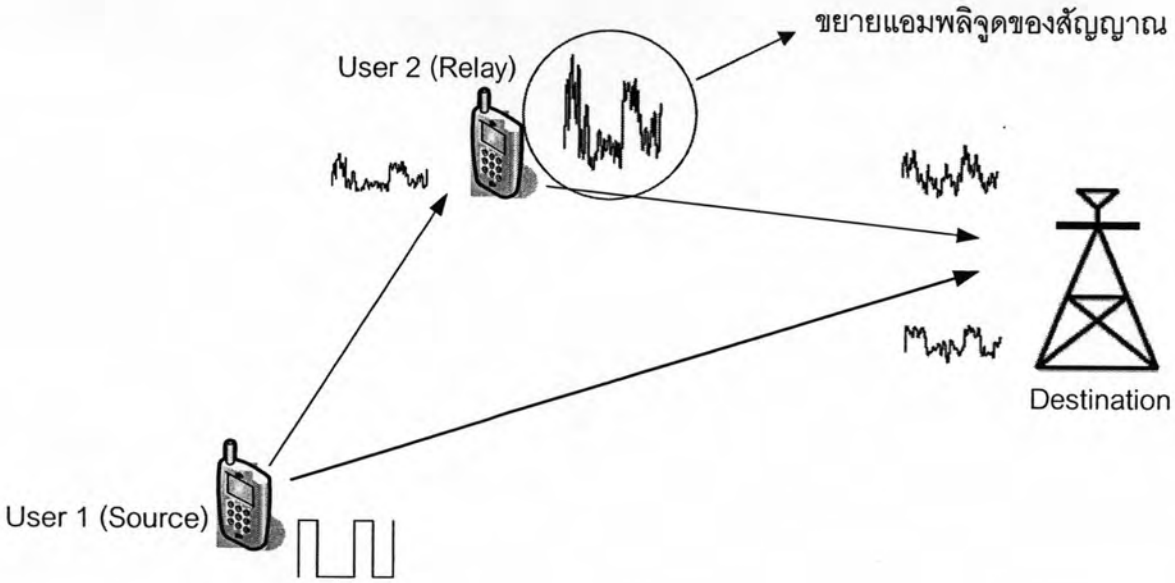
2. โพรโทคอลแบบเลือก (Selecting Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้มีหลักการคือ ไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay ที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay จากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็น Relay ที่มีค่ามากที่สุด โพรโทคอลแบบนี้มีความซับซ้อนมากกว่าโพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง

3. โพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายๆกับโพรโทคอลแบบเลือก Relay เพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไขการเลือกผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay มากขึ้น และจุดเด่นของโพรโทคอลนี้ก็คือ เครื่องรับจะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลไม่มีความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้รับทราบสถานะของการส่งที่สมบูรณ์ จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay ไม่ต้องส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ แต่ถ้าหากการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay โพรโทคอลแบบนี้มีความซับซ้อนสูงที่สุด

การหาประสิทธิภาพของโพรโทคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดย การหาความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหาย (Outage probability) [5] และจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลแต่ละแบบมีความซับซ้อนต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับมีประสิทธิภาพสูงสุด และโพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลงมีประสิทธิภาพต่ำสุด

การส่งต่อสัญญาณจาก Relay ไปยังเครื่องรับสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ Amplify-and-Forward (AF) และ Decode-and-Forward (DF) [5] - [6]

Amplify-and-Forward: ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังเครื่องรับปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในสมการที่ (2.3) Relay จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนดและส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับดังสมการที่ (2.4)

$$x_R(n) = \beta Y_{SR}(n) \qquad ;n = \frac{\mathrm{T}}{2} + 1 \cdots \mathrm{T} \tag{2.4}$$

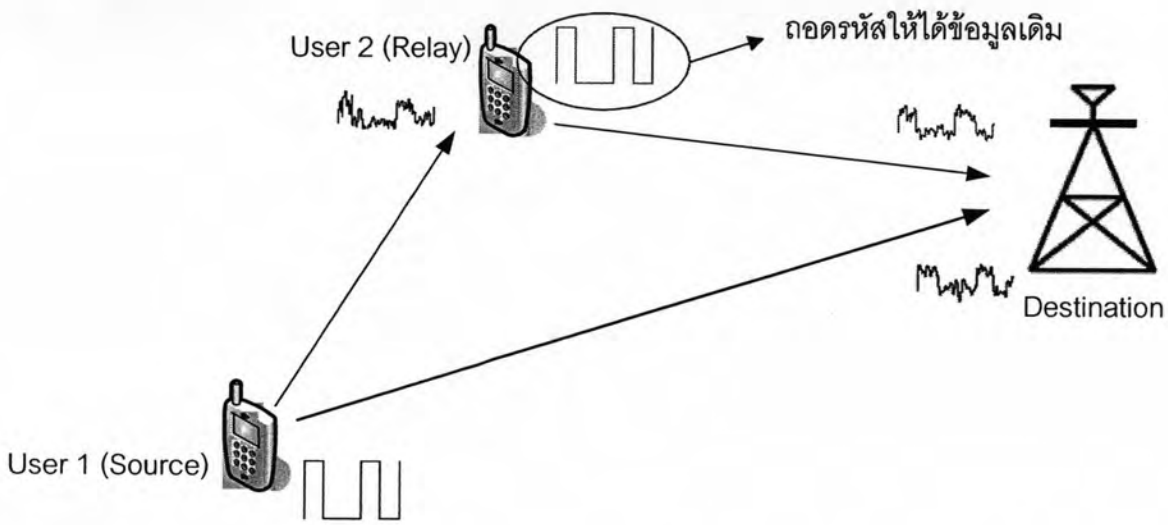
เมื่อ $Y_{SR}(n)$ คือ สัญญาณที่ Relay รับได้จากเครื่องส่ง

β คือ อัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ $\beta \le \sqrt{\dfrac{1}{|a_{SR}|^2 P_1 + N_0}}$

a_{SR} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและ Relay

N_0 คือ แวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

Decode-and-Forward: ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การส่งต่อสัญญาณ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในสมการที่ (2.3) Relay จะทำการถอดรหัสสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังสมการที่ (2.5)

$$x_R[n] = \hat{x}_S[n] \qquad ;n = \frac{\mathrm{T}}{2} + 1 \cdots \mathrm{T} \tag{2.5}$$

เมื่อ $\hat{x}_S(n)$ คือ ข้อมูลเดิมจากเครื่องส่งซึ่งถูกถอดรหัสจาก Relay

2.2 เทคนิคการรวมสัญญาณ

เนื่องจากเครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันจากเครื่องส่งและ Relay ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับ เพื่อให้ได้สัญญาณรวมที่ดีที่สุดไปใช้งาน [13] พิจารณาระบบสื่อสารไร้สายที่มีการรับสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจำนวน N ช่อง สัญญาณทั้งหมดนี้สามารถนำมารวมกันแบบเชิงเส้น (Linear combination) เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมแต่ละช่องสัญญาณคือ a_j แสดงได้ดังสมการที่ (2.8)

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + \cdots\cdots + a_N f_N(t) = \sum_{j=1}^{N} a_j f_j(t) \tag{2.6}$$

โดยกำหนดให้

$$f_j(t) = x_j(t) \cdot m(t) + n_j(t)$$

$x_j(t)$ คือ ช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล

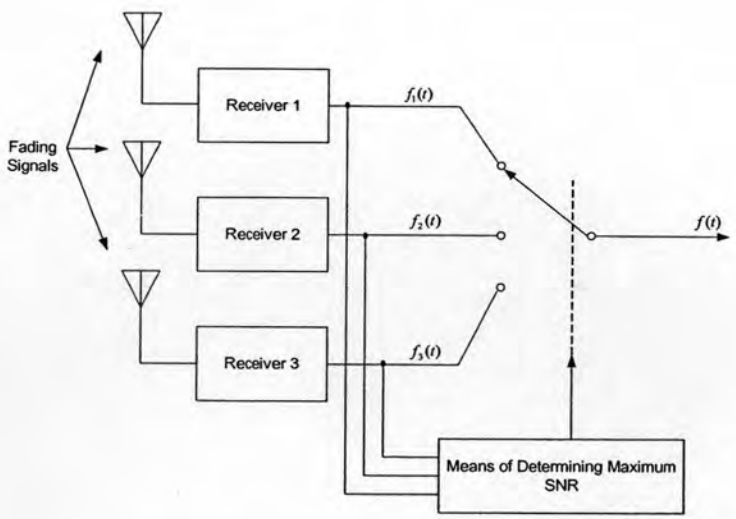
$m(t)$ คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรวมของแต่ละช่องสัญญาณ

$n_j(t)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

ในปี 1958 D.G. Brennan [13] ได้นำเสนอเทคนิคการรวมสัญญาณไว้ทั้งหมด 3 เทคนิค ดังนี้

2.2.1 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Combining: SC)



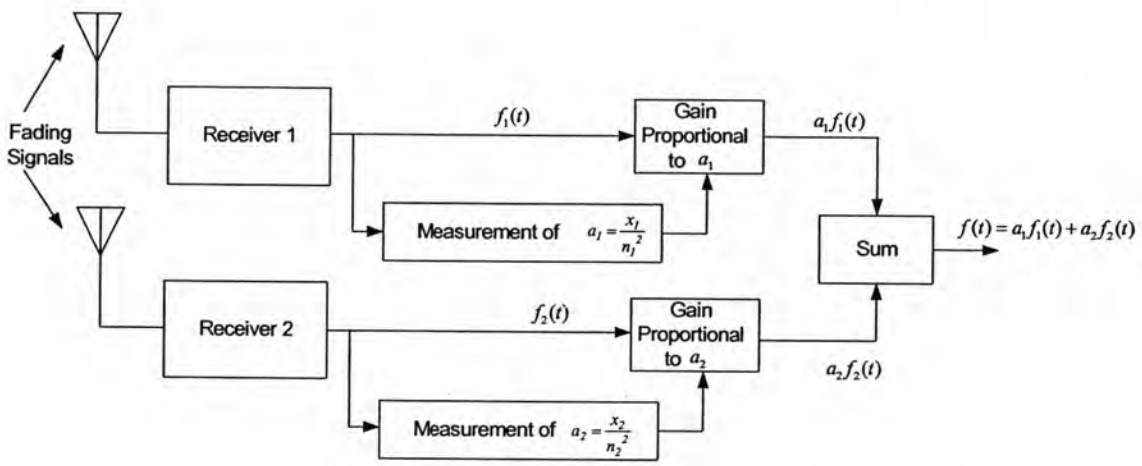
รูปที่ 2.5 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก

สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ โดยเลือกสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุดของสัญญาณที่รับมาทั้งหมด และจากสมการที่ (2.8) กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \begin{cases} 1 & ,for \quad j = k \\ 0 & ,for \quad j \neq k \end{cases} \tag{2.7}$$

เมื่อกำหนดให้ k คือ ดัชนีชี้สำหรับสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

2.2.2 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด (Maximal-Radio Combining: MRC)



รูปที่ 2.6 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณสูงสุด

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณสูงสุด จะเป็นการรวมสัญญาณ โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ทั้งหมดบวกกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมทั้งหมดมีค่าสูงที่สุด และสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ ได้ดังนี้

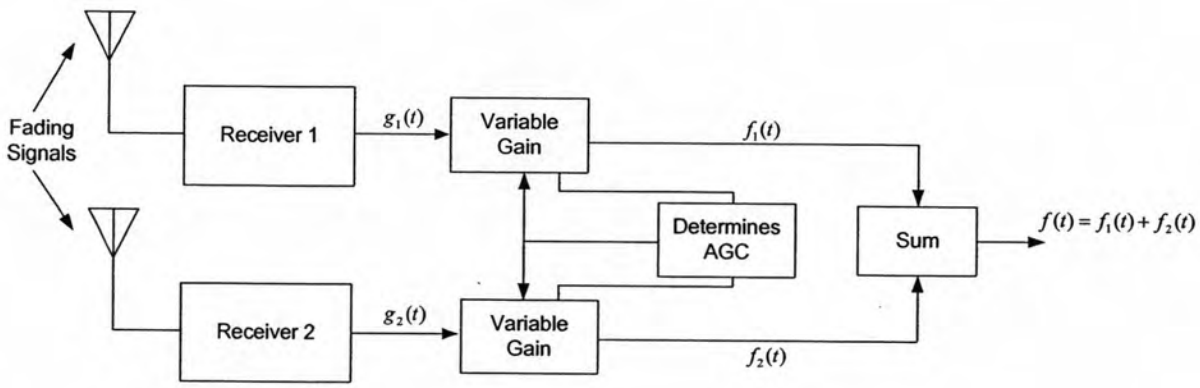
$$a_j(t) = \frac{x_j}{n_j^2} \tag{2.8}$$

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด จะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย $\bar{\gamma}_t$ เท่ากับ

$$\bar{\gamma}_t = \sum_{j=1}^{N} \gamma_j \tag{2.9}$$

เมื่อ γ_j คือ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณ

2.2.3 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (Equal Gain Combining: EGC)



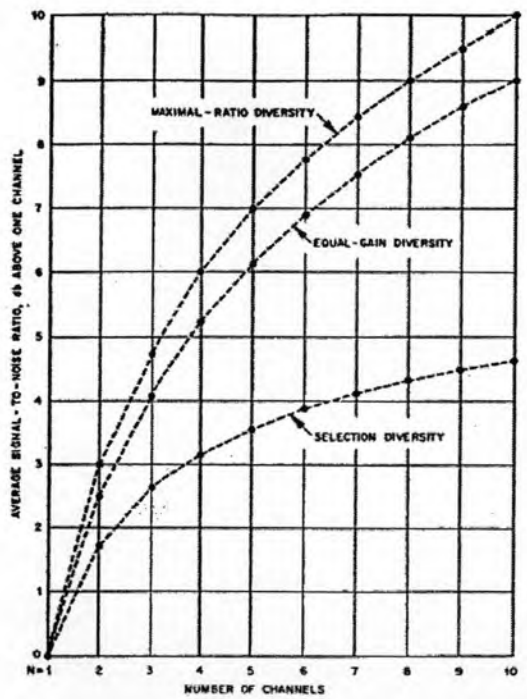
รูปที่ 2.7 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน จะทำการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าของอัตราการขยาย (Gain) ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทุกช่องสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นนำสัญญาณทั้งหมดรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากันนี้สามารถหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน $\bar{\gamma}_t$ ดังนี้ คือ

$$\bar{\gamma}_t = \frac{1}{N} \cdot \frac{\left[\sum_{j=1}^{N} x_j\right]^2}{\sum_{j=1}^{N} \bar{n}_j^2} \tag{2.10}$$

จากเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิคที่กล่าวถึงดังข้างต้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับจำนวนของช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

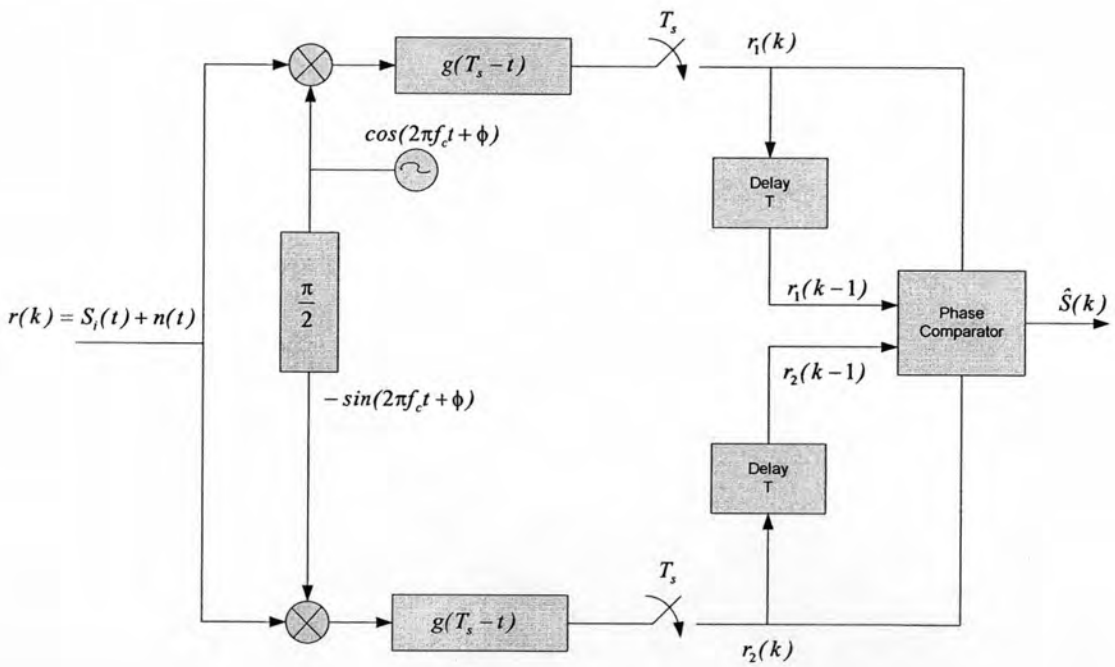


รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค [13]

จากการเปรียบเทียบเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค ดังรูปที่ 2.8 สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด เป็นเทคนิคที่ทำให้ผลรวมของสัญญาณดีที่สุด เมื่อเทียบกับการรวมสัญญาณแบบเลือกและการรวมสัญญาณแบบให้อัตราขยายเท่ากัน

2.3 การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค

การมอดูเลตแบบดีพีเอสเคเป็นการมอดูเลตโดยอาศัยมุมเฟสของคลื่นพาห์ก่อนหน้านั้นเป็นมุมเฟสอ้างอิง สำหรับการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของคลื่นพาห์ในการส่งข้อมูลปัจจุบัน การมอดูเลตแบบนี้จะทำการแปลงข้อมูล K บิต โดยใช้คลื่นพาห์ที่มีพลังงานเท่ากัน แต่มีมุมเฟสต่างกันเป็นจำนวน $M = 2^K$ ในกรณีที่ $M = 2$ เรียกว่า สัญญาณ B-DPSK (Binary Differential Phase Shift Keying) จะทำการเปลี่ยนมุมเฟสของคลื่นพาหะให้มีค่าต่างจากมุมเฟสของคลื่นพาห์ก่อนหน้านั้นเท่ากับ $e^{j\theta_i}$; $\theta_i = 0, \pi$ เมื่อบิตข้อมูลเป็นลอจิก 0 จะไม่มีการเปลี่ยนมุมเฟสของคลื่นพาห์ซึ่งทำให้เฟสเท่ากับ $e^{j\theta_i}$, $\theta_i = 0$ แต่ถ้าหากบิตข้อมูลเป็นลอจิก 1 จะทำการเปลี่ยนมุมเฟสของคลื่นพาห์ให้มีค่าต่างจากมุมเฟสของคลื่นพาห์ก่อนหน้านั้นเท่ากับ $e^{j(\theta_i)}$, $\theta_i = \pi$ [14] , [15] สามารถอธิบายการถอดรหัสข้อมูล ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องถอดรหัสของการมอดูเลตแบบ B-DPSK

จากรูปที่ 2.9 สมมติให้มีการมอดูเลตที่เวลา ณ. k ใดๆ โดยข้อมูลที่ใช้สำหรับการมอดูเลต คือ $S(k) = Ae^{j(\theta(k)+\phi)}$ และสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.12)

$$r(k) = r_1(k) + jr_2(k) = Ae^{j(\theta(k)+\phi)} + n(k) \tag{2.11}$$

เมื่อ $n(k)$ คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก

$\theta(k)$ คือ มุมเฟสของข้อมูลที่ k^{th} ใดๆ

ϕ คือ มุมเฟสของคลื่นพาห์

สัญญาณที่ได้จากเครื่องรับสามารถถอดรหัสข้อมูลได้ ดังสมการที่ (2.12)

$$\begin{aligned}\hat{S}(k) = r(k)r^*(k-1) = A^2e^{j(\theta(k)-\theta(k-1))} + Ae^{j(\theta(k)-\phi)}n^*(k-1) \\ + Ae^{-j(\theta(k)-\phi)}n(k) + n(k)n^*(k-1)\end{aligned} \tag{2.12}$$

จากสมการที่ (2.12) เมื่อพิจารณาที่ $n(k) = n(k-1) = 0$ จึงทำให้เหลือเฉพาะพจน์ที่ 1 ซึ่งเป็นพจน์ที่มีแต่เฉพาะข้อมูลเท่านั้น มีเฟสของสัญญาณเท่ากับ $\theta(k) - \theta(k-1)$ ดังสมการที่ (2.13)

$$\hat{S}(k) = r(k)r^*(k-1) = A^2e^{j(\theta(k)-\theta(k-1))} \tag{2.13}$$

โดยจะเลือกค่าที่มีค่าขนาดของสัญญาณที่มีค่าสูงที่สุด สำหรับการถอดรหัสข้อมูลดังสมการที่ (2.14)

$$\hat{S}(k) = \arg_{k=0,1\ldots M-1} \max Re[(e^{-j\phi_k}) \cdot (A^2e^{j(\theta(k)-\theta(k-1))})] \tag{2.14}$$

เมื่อ $Re[\,]$ คือ ตัวดำเนินการส่วนค่าจริง

ในกรณีที่ต้องการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้นสามารถเพิ่มจำนวนมุมเฟสของคลื่นพาหะให้มากขึ้น โดยที่ M คือ จำนวนมุมเฟสแต่ละเฟสสามารถแทนจำนวนบิตข้อมูลได้มากกว่า 1 บิต เนื่องจากมีมุมเฟสทั้งหมดมี 360 องศา การเพิ่มจำนวนมุมเฟสจะทำให้แต่ละมุมเฟสใกล้กัน มีโอกาศที่จะทำให้เกิดการรับผิดพลาดง่ายขึ้น ในกรณี $M = 4$ เรียกว่า สัญญาณ Q-DPSK (Quadrature Differential Phase Shift Keying) และเมื่อ $M = 8$ เรียกว่า สัญญาณ 8-DPSK (8 Differential Phase Shift Keying) สำหรับการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคนี้ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบิตของข้อมูลน้อยที่สุดจึงใช้การเข้ารหัสแบบเกรย์ (Gray Code) กำหนดตำแหน่งของมุมเฟสของคลื่นพาห์

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับช่องสัญญาณ

2.4.1 ช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณ หมายถึง เป็นตัวกลางเพื่อให้สัญญาณผ่านไปจากสายอากาศเครื่องส่งไปยังสายอากาศเครื่องรับ ซึ่งมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบทั้งที่เป็นอากาศปกติ เป็นสายทองแดง เป็นใยแก้วนำแสง โดยที่ช่องสัญญาณนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอินพุตชุดหนึ่งให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตชุดหนึ่งและในระบบการสื่อสารไร้สายคลื่นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาทางเครื่องส่งจะไม่ได้เดินทางมาถึงยังทางเครื่องรับปลายทางเป็นแนวเส้นตรง เพราะจะต้องพบกับสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่สัญญาณจะต้องเคลื่อนที่ผ่าน โดยที่คลื่นสัญญาณที่มาถึงทางเครื่องรับจะเกิดขึ้นจากการรวมกันของคลื่นหลายวิถีที่มาถึงจากหลายทิศทางซึ่งเกิดจากการสะท้อน (reflection) การเลี้ยวเบน (diffraction) และการกระเจิง (scattering) ผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง ต้นไม้ ยานพาหนะ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดพหุวิถี (multipath) และผลจากการเกิดพหุวิถีนี้เองทำให้สัญญาณที่มาถึงทางเครื่องรับนั้นมีผลมาจากสัญญาณมากกว่าหนึ่งวิถี ซึ่งแต่ละวิถีนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกันออกไป ทั้งในเชิงแอมพลิจูด และเฟส สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยผลจากวิถีต่าง ๆ สัญญาณในแต่ละวิถีอาจเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของแอมพลิจูด และเฟสได้ ถ้าอุปกรณ์ปลายทางกำลังเคลื่อนที่หรือสภาพแวดล้อมรอบ ๆ มีการเปลี่ยนแปลง ผลกระทบจากช่องสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มไปตามเวลา ดังนั้น ณ ขณะหนึ่ง สัญญาณในวิถีอาจรวมกันแบบหักล้าง และในอีกขณะหนึ่งอาจรวมกันแบบเสริม รูปแบบของการกระจายตัวที่ใช้กันทั่วไปในการบอกลักษณะของแอมพลิจูดสุ่มที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณพหุวิถีมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ การกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh) และการกระจายตัวแบบไรเชียน (Ricean)

ถ้าในสัญญาณที่ได้รับไม่มีองค์ประกอบตามเส้นแนวสายตา (Line-of-Sight : LOS) ซึ่งก็คือเมื่อวิถีตรงถูกบดบัง ดังเช่น การแพร่กระจายสัญญาณระยะไกลในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง (Outdoor) สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระเจิง (Scattered) อันเนื่องมาจากการสะท้อนที่ไม่มีวิถีหลัก ซึ่งจะสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบร่วมเฟส (in-phase) และองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature) ซึ่งวิถีแต่ละวิถีมีผลต่อทั้งสองส่วนนี้ด้วย จากทฤษฎีขีดจำกัดกลาง (Central Limit Theorem) เมื่อมีวิถีจำนวนมาก จะทำให้สามารถอนุมานได้ว่าองค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นแอมพลิจูดทั้งหมดของสัญญาณที่ได้มาจากการบวกเวกเตอร์องค์ประกอบทั้งหมดจึงเป็นไปตาม

นิยามของการกระจายตัวแบบเรย์ลี นอกจากนี้เฟสก็มีการกระจายตัวแบบเอกรูปในช่วง $[0,2\pi]$ การกระจายตัวแบบเรย์ลีของแอมพลิจูดของสัญญาณ ρ มีนิยามดังนี้

$$f_\rho(\rho)=\frac{\rho}{\sigma^2}e^{-\left(\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{2.15}$$

โดยที่ σ^2 คือ แวเรียนซ์ขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉาก ซึ่งปริมาณทางสถิติสองค่าที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยและโมเมนต์ที่สองของตัวแปรสุ่มแบบเรย์ลี ซึ่งมีค่าเป็น

$$E\{\rho\}=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \tag{2.16}$$

$$E\{\rho^2\}=2\sigma^2 \tag{2.17}$$

ถ้ามีองค์ประกอบ LOS แนวตรงดังในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor) สัญญาณที่ได้รับจะมีองค์ประกอบตาม LOS หลัก และองค์ประกอบกระเจิงอันเนื่องมาจากการสะท้อน เมื่อกำหนดให้องค์ประกอบ LOS อยู่ในแนวร่วมเฟส โดยแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้รับ ρ จะมีการกระจายตัวแบบไรเซียนดังนี้

$$f_\rho(\rho)=\frac{\rho}{\sigma^2}e^{-\left(\frac{\rho^2+a_0^2}{2\sigma^2}\right)}\mathrm{I}_0\left(\frac{a_0\rho}{\sigma^2}\right) \tag{2.18}$$

โดยที่ σ^2 แทนกำลังขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉากกระเจิง a_0 คือแอมพลิจูดขององค์ประกอบ LOS และ $\mathrm{I}_0(\rho)$ เป็นฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับศูนย์ (Zero Order Modified Bessel Function) การกระจายตัวแบบไรเซียนนี้มักจะใช้ตัวประกอบ K ของไรเซียนเป็นตัวกำหนดลักษณะ ดังนี้

$$K=\frac{a_0^2}{2\sigma^2} \tag{2.19}$$

จากการวัดในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารต่าง ๆ พบว่าโดยทั่วไปค่าของ K จะมีค่าเป็น 10 ปริมาณทางสถิติที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวแบบไรเซียนซึ่งมีค่าเป็น

$$E\{\rho\}=e^{-K/2}\sqrt{\frac{\pi}{2(K+1)}}\overline{p}\left[(1+K)\mathrm{I}_0\left(\frac{K}{2}\right)+K\mathrm{I}_1\left(\frac{K}{2}\right)\right] \tag{2.20}$$

โดยที่ $\mathrm{I}_1(K)$ แทนฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับหนึ่ง (First Order Modified Bessel Function)

2.4.2 **ดอปเพลอร์** (Doppler)

นอกจากการเกิดพหุวิถีแล้ว การเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นั้นก็จะส่งผลกระทบต่อการสื่อสารของระบบสื่อสารไร้สายด้วย เนื่องจากผลที่ผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่จึงทำให้คลื่นสัญญาณที่มาถึงนั้นมีความถี่ที่เปลี่ยนไป โดยมุมของสัญญาณที่มาถึง (angle of arrival α_n) ที่ถูกนิยามให้เป็นมุมระหว่างคลื่นสัญญาณที่มาถึงวิถีที่ n และทิศทางเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และค่า ความถี่ดอปเพลอร์ของคลื่นสัญญาณวิถีที่ n จะมีค่าดังนี้

$$f_n = f_{\max} \cos \alpha_n \tag{2.21}$$

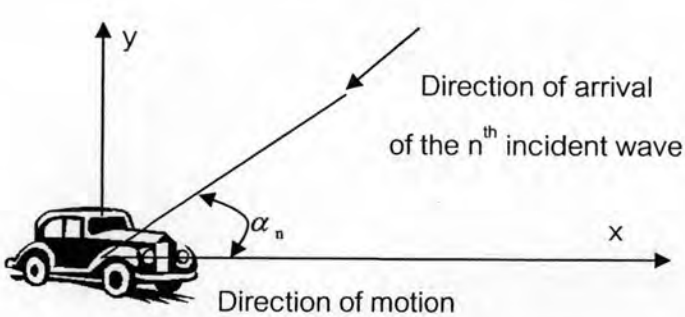
โดยที่ $f_{\max}$ คือค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของผู้ใช้งาน (v) และค่าความถี่กลางที่ใช้ในการส่งข้อมูลดังสมการที่ (2.22)

$$f_{\max} = \frac{v}{c_0} f_0 \tag{2.22}$$

เมื่อ f_0 คือ ความถี่คลื่นสัญญาณพาห์

c_0 คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นี้เอง จะทำให้สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่ถูกส่งนั้นกระจายออกระหว่างการส่งข้อมูล เมื่อพิจารณาเชิงเวลาผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นี้จะทำให้ผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา [16]



รูปที่ 2.10 แสดงมุม α_n ของคลื่นสัญญาณที่มาถึงของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

2.5 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบ และความหมายของค่าต่าง ๆ

2.5.1 อัตราความผิดพลาดบิต

อัตราความผิดพลาดบิต หรือความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Bit Error Probability: BEP) คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตที่ทางภาครับตัดสินผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่ง เป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบ เป็นค่าที่แสดงถึงค่าความถูกต้องของการรับส่งข้อมูลโดยตรง อัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสภาวะต่าง ๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไปเป็นต้น

2.5.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คือ อัตราส่วนกำลังของสัญญาณเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวน ส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวนดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจึงนิยมวัดกันในหน่วยเดซิเบล (Decibel: dB) โดย ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้คนที่ k ในค่าหน่วยเดซิเบล สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.16)

$$SNR_k = 10\log\left(\frac{A_k^2}{\sigma^2}\right) \tag{2.16}$$

เมื่อ A_k คือขนาดของสัญญาณของผู้ใช้คนที่ k และ σ^2 คือ ค่าแวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนซึ่งก็คือกำลังของสัญญาณรบกวนนั่นเอง