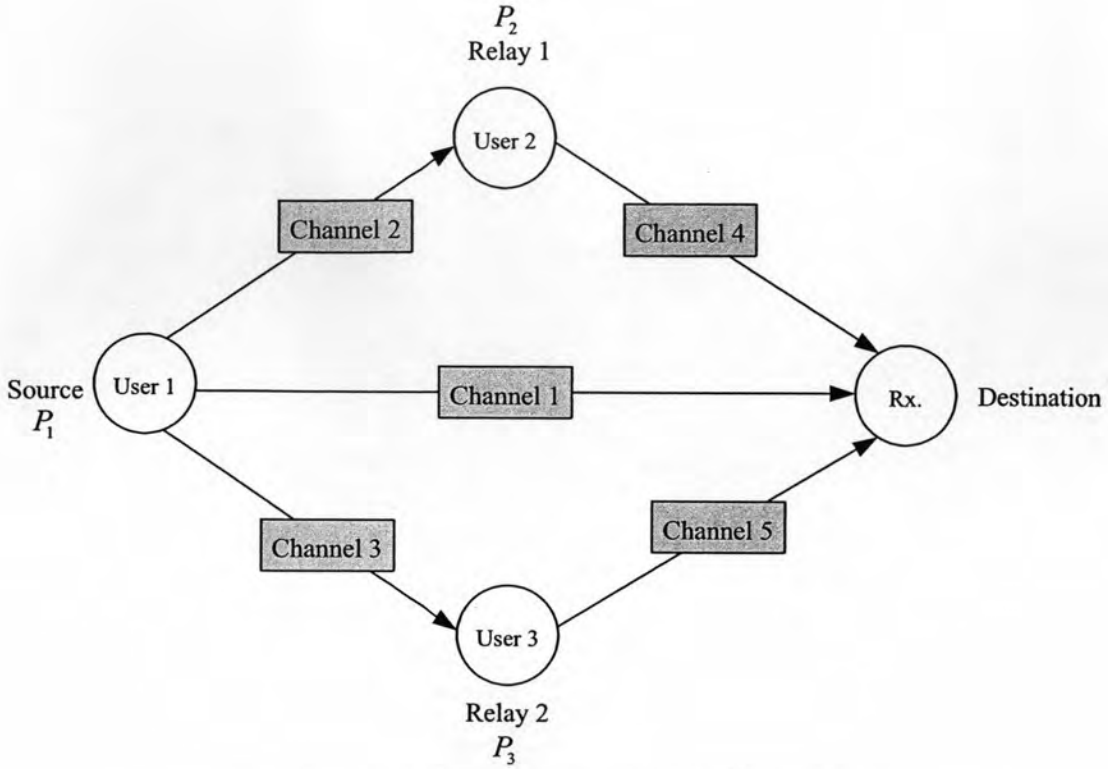
บทที่ 3
ระบบที่นำเสนอ

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือในกรณีที่ระบบมีจำนวนผู้ใช้งานทั้งหมดเพียง 2 คนช่วยร่วมส่งสัญญาณเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วหากระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือมีจำนวนผู้ใช้งานในระบบมากกว่า 2 คนขึ้นไป การเลือกจำนวนและการระบุผู้ใช้งานภายในระบบ เพื่อทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำโพรโทคอลแบบปรับตัวมาใช้สำหรับการเลือกจำนวนและการระบุผู้ใช้งานภายในระบบให้ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณ ซึ่งส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่ได้มีค่าต่ำที่สุด ภายใต้สภาวะช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเฟดดิง

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกจะอธิบายถึงโครงสร้างของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ ส่วนที่สองจะอธิบายถึงการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ ส่วนที่สามจะอธิบายถึงการทำงานของโพรโทคอลแบบปรับตัว และส่วนที่สี่จะอธิบายถึงการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

3.1 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

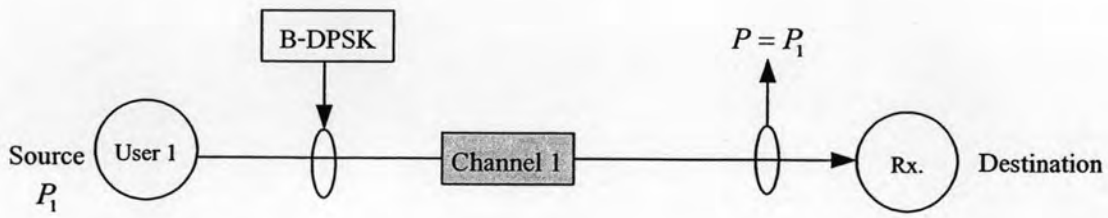
ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยจำนวนผู้ใช้งานในโครงข่าย ทั้งหมด 3 คน และมีเครื่องรับปลายทาง 1 เครื่อง โดยกำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง ผู้ใช้งานคนที่ 2 และ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay 1 และ Relay 2 ตามลำดับ ในการส่งต่อสัญญาณจาก Relay ไปยังเครื่องรับ พิจารณาการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเกิดเฟดดิงราบแบบเรย์ลี ในการสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย ซึ่งใช้การมอดูเลตแบบ ดีพีเอสเค (DPSK) สำหรับการส่งสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

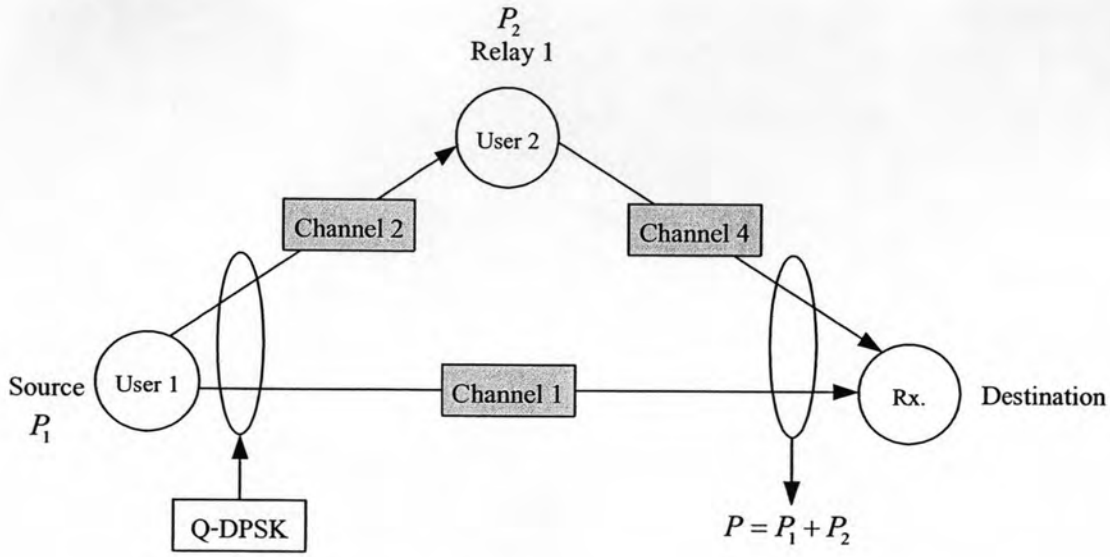
จากรูปที่ 3.1 การส่งสัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง เพื่อส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทาง กำหนดให้อัตราการมอดูเลตแบบเต็มอัตรา และพิจารณาผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 1 ($P=1$) ซึ่งสามารถแบ่งการส่งสัญญาณและการมอดูเลตออกได้ 3 แบบ ดังนี้คือ

1.การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ (Noncooperation Strategy) ใช้การมอดูเลตแบบ B-DPSK สำหรับการส่งสัญญาณ และผมรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ $P=P_1$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

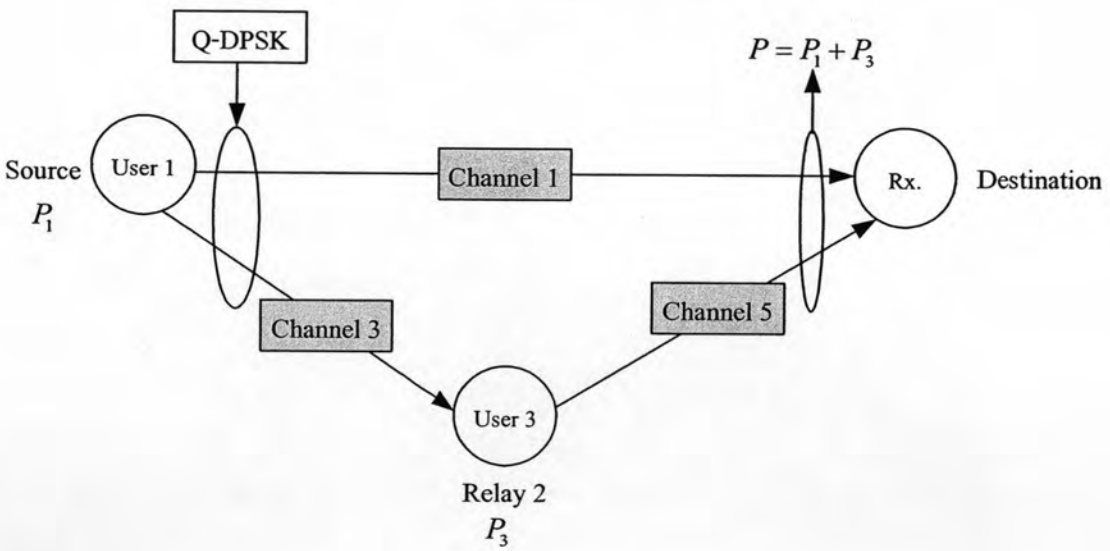


รูปที่ 3.2 การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ

2. การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน (1-Relay Cooperation Strategy) ซึ่งสามารถเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 หรือ 3 สำหรับการส่งสัญญาณแบบนี้จะใช้การมอดูเลตแบบ Q-DPSK และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ $P = P_1 + P_2$ หรือ $P = P_1 + P_3$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



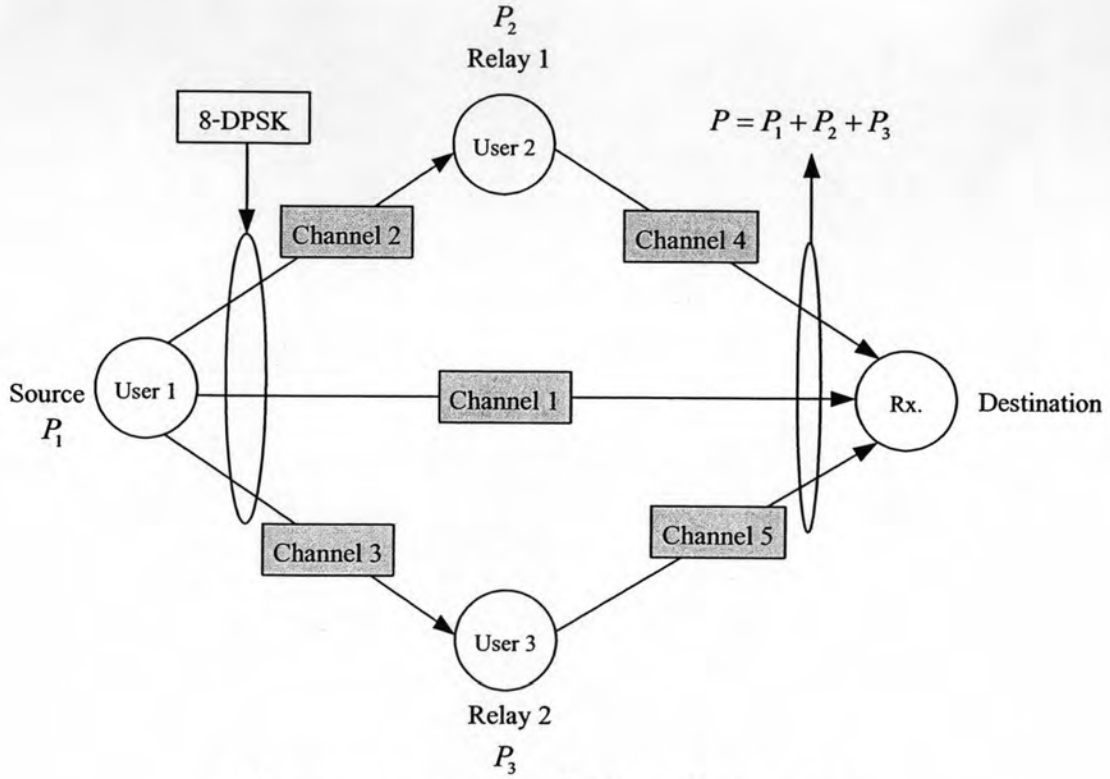
ก) แบบเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) ช่วยส่งต่อสัญญาณ



ข) แบบเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ช่วยส่งต่อสัญญาณ

รูปที่ 3.3 การส่งสัญญาณ โดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน

3. การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน (2-Relay Cooperation Strategy) สำหรับการส่งสัญญาณแบบนี้จะใช้การมอดูเลตแบบ 8-DPSK และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ $P = P_1 + P_2 + P_3$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน

ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอใช้วิธีการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค สำหรับการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเกิดเฟดดิงราบแบบเรย์ลี ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของสัญญาณที่ผ่าน การมอดูเลต [14], [15] ดังสมการที่ (3.1)

$$S(n) = e^{j\phi_i} S(n-1) \tag{3.1}$$

โดยที่ $S(n)$ คือ ข้อมูลสำหรับการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ณ เวลา ใดๆ

$\phi = \frac{2\pi i}{M}, i = 0,1,2 \cdots M-1$ คือ มุมเฟสของสัญญาณอ้างอิง

M คือ จำนวนคอนสเตลเลชันของการมอดูเลต

จากสมการที่ (3.1) การเข้ารหัสโดยจะอาศัยมุมเฟสของคลื่นพาห์ก่อนหน้านั้นเป็นมุมเฟสอ้างอิงสำหรับการเปลี่ยนมุมเฟสของคลื่นพาห์ในการเข้ารหัสการส่งข้อมูลปัจจุบัน ซึ่งสามารถกำหนดค่า $e^{j\phi_i}$ ได้ดังนี้

1. การมอดูเลตแบบ B-DPSK สามารถเข้ารหัสโดยการเปลี่ยนเฟสของคลื่นพาห์ได้ดังนี้คือ

ข้อมูลบิต 0 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_0} = e^{j\cdot 0}$

ข้อมูลบิต 1 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_1} = e^{j\cdot \pi}$

2. การมอดูเลตแบบ Q-DPSK สามารถเข้ารหัสโดยการเปลี่ยนเฟสของคลื่นพาห์ได้ดังนี้คือ

ข้อมูลบิต 00 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_0} = e^{j\cdot 0}$

ข้อมูลบิต 01 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_1} = e^{j\cdot \frac{\pi}{2}}$

ข้อมูลบิต 11 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_2} = e^{j\cdot \pi}$

ข้อมูลบิต 10 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_3} = e^{j\cdot \frac{3\pi}{2}}$

3. การมอดูเลตแบบ Q-DPSK สามารถเข้ารหัสโดยการเปลี่ยนเฟสของคลื่นพาห์ได้ดังนี้คือ

ข้อมูลบิต 000 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_0} = e^{j\cdot 0}$

ข้อมูลบิต 001 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_1} = e^{j\cdot \frac{\pi}{4}}$

ข้อมูลบิต 011 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_2} = e^{j\cdot \frac{\pi}{2}}$

ข้อมูลบิต 010 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_3} = e^{j\cdot \frac{3\pi}{4}}$

ข้อมูลบิต 110 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_4} = e^{j\cdot \pi}$

ข้อมูลบิต 111 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_5} = e^{j\frac{5\pi}{4}}$

ข้อมูลบิต 110 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_6} = e^{j\frac{3\pi}{2}}$

ข้อมูลบิต 100 มุมเฟสเท่ากับ $e^{j\phi_7} = e^{j\frac{7\pi}{4}}$

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือในระบบสื่อสายไร้สายที่เสนอในรูปที่ 3.1 สามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟส [5], [6] ดังนี้

<u>เฟสที่ 1</u> $(0-\frac{T}{2})$: เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง กระจายสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทางและผู้ใช้งานทั้ง 2 คน พร้อม ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทาง ของช่องสัญญาณไร้สายสัญญาณที่มีการเกิดเฟดดิงราบแบบเรย์ลี ซึ่งสามารถแทนสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับ, Relay 1 และ Relay 2 แทนด้วย Y_{SD} , Y_{SR_1} และ Y_{SR_2} ตามลำดับ ดังสมการที่ (3.2) - (3.4)

$$Y_{SD} = \sqrt{P_1}h_{SD} + n_{SD} \tag{3.2}$$

$$Y_{SR_1} = \sqrt{P_1}h_{SR_1} + n_{SR_1} \tag{3.3}$$

$$Y_{SR_2} = \sqrt{P_1}h_{SR_2} + n_{SR_2} \tag{3.4}$$

โดยที่ h_{SD} h_{SR_1} และ h_{SR_2} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 (เครื่องส่ง) ไปยังเครื่องรับ ไปยังผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) และ ไปยังผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ตามลำดับ

n_{SD} n_{SR_1} และ n_{SR_2} คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 (เครื่องส่ง) ไปยังเครื่องรับ ไปยังผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) และไปยังผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ตามลำดับ

P_1 คือ กำลังส่งสัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 (เครื่องส่ง)

<u>เฟสที่ 2</u>$(0-\frac{T}{2})$: ผู้ใช้งานคนที่ 2 และ 3 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Relay ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ซึ่งสามารถแทนสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับแทนด้วย Y_{R_1D} และ Y_{R_2D} ตามลำดับ ดังสมการที่ (3.5) ถึง (3.6)

$$Y_{R_1D} = \sqrt{\widetilde{P}_2}h_{R_1D} + n_{R_1D} \tag{3.5}$$

$$Y_{R_2D} = \sqrt{\widetilde{P}_3}h_{R_2D} + n_{R_2D} \tag{3.6}$$

$$\widetilde{P}_2 = \begin{cases} \dfrac{P_2}{P_1\delta^2_{SR_1} + N_0} & ; \quad \text{If relay 1 is selected} \\ 0 & ; \quad \text{Other} \end{cases} \tag{3.7}$$

$$\widetilde{P}_3 = \begin{cases} \dfrac{P_3}{P_1\delta^2_{SR_2} + N_0} & ; \quad \text{If relay 2 is selected} \\ 0 & ; \quad \text{Other} \end{cases} \tag{3.8}$$

โดยที่ h_{R_1D} และ h_{SR_2} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) และผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ไปยังเครื่องรับ ตามลำดับ

n_{R_1D} และ n_{R_2D} คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) และ ผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ไปยังเครื่องรับ ตามลำดับ

P_2 คือ กำลังส่งสัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1)

P_3 คือ กำลังส่งสัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2)

$\delta^2_{SR_1}$ และ $\delta^2_{SR_2}$ คือ แวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 (เครื่องส่ง) ไปยังผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) และไปยังผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ตามลำดับ

N_0 คือ แวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

เนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่เสนอ มีการส่งข้อมูลชุดเดียวกันมากกว่า 1 สัญญาณ ไปยังเครื่องรับเดียวกัน เพื่อทำให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีที่สุดนำไปใช้งาน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด (MRC) [13] เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ทำให้สัญญาณรวมทางด้านเครื่องรับมี ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงที่สุด สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (3.9)

$$Z = a_1 Y_{SD} + a_2 Y_{R_1 D} + a_3 Y_{R_2 D} \tag{3.9}$$

เมื่อ a_1, a_2 และ a_3 คือ สัมประสิทธิ์ของการรวมสัญญาณ

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุดนี้ หากต้องการทำให้ ระบบมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงที่สุดในทุกๆกรณี จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมสัญญาณ a_1, a_2 และ a_3 โดยใช้กฎของ Schwarz [13] ได้ดังนี้

$$a_1 = \frac{P_1 |h_{SD}|^2}{N_0} \tag{3.10}$$

$$a_2 = \frac{P_1 P_2 |h_{SR_1}|^2 |h_{R_1 D}|^2}{N_0 \left[P_1 |h_{SR_1}|^2 + P_2 |h_{R_1 D}|^2 + N_0 \right]} \tag{3.11}$$

และ

$$a_3 = \frac{P_1 P_3 |h_{SR_2}|^2 |h_{R_2 D}|^2}{N_0 \left[P_1 |h_{SR_2}|^2 + P_3 |h_{R_2 D}|^2 + N_0 \right]} \tag{3.12}$$

เนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอใช้วิธีการมอดูเลตแบบ ดีพีเอสเค ซึ่งไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำการประมาณช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการข้อมูลทางด้านเครื่องรับ ด้วยเหตุผลนี้จึงพิจารณาขนาดของสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณ $|h_{SD}|^2$ $|h_{SR_1}|^2$ $|h_{SR_2}|^2$ $|h_{R_1 D}|^2$ และ $|h_{R_2 D}|^2$ มีค่าเท่ากับ ค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณดังนี้ δ_{SD}^2 $\delta_{SR_1}^2$ $\delta_{SR_2}^2$ $\delta_{R_1 D}^2$ และ $\delta_{R_2 D}^2$ ตามลำดับ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมสัญญาณเท่ากับ

$$a_1 = \frac{P_1 \delta_{SD}^2}{N_0} \tag{3.13}$$

$$a_2 = \frac{P_1 P_2 \delta_{SR_1}^2 \delta_{R_1 D}^2}{N_0 \left[P_1 \delta_{SR_1}^2 + P_2 \delta_{R_1 D}^2 + N_0 \right]} \tag{3.14}$$

และ

$$a_3 = \frac{P_1 P_3 \delta_{SR_2}^2 \delta_{R_2 D}^2}{N_0 \left[P_1 \delta_{SR_2}^2 + P_3 \delta_{R_2 D}^2 + N_0 \right]} \tag{3.15}$$

การถอดรหัสสัญญาณทางด้านเครื่องรับสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (3.16)

$$\hat{S}(n) = arg_{m=0,1,2\cdots M-1}\ max\ Re\left[e^{-j\phi_i} \cdot Z\right] \tag{3.16}$$

โดยที่ $\hat{S}(n)$ คือ ข้อมูลที่ได้จากการถอดรหัสทางด้านเครื่องรับ

$Re[\ ]$ คือ ตัวปฏิบัติการจำนวนจริง

3.2 การวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดบิตสำหรับช่องสัญญาณที่มีการเกิดเฟดดิงราบแบบเรย์ลี

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยจะวิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล และเนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอศึกษาในระบบการสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย ซึ่งใช้วิธีการมอดูเลตแบบ ดีพีเอสเค สำหรับการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีการเกิดเฟดดิงราบแบบเรย์ลี [5], [17], [18] และใช้เทคนิคการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด [13] ดังนั้นจึงสามารถหาค่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน รวมของระบบที่นำเสนอ ดังสมการที่ (3.17)

$$\gamma \approx \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \tag{3.17}$$

เมื่อ
$$\gamma_1 = \frac{P_1|h_{SD}|^2}{N_0} \tag{3.18}$$

$$\gamma_2 = \frac{P_1 P_2 \left|h_{SR_1}\right|^2 \left|h_{R_1D}\right|^2}{N_0\left[P_1\left|h_{SR_1}\right|^2 + P_2\left|h_{R_1D}\right|^2 + N_0\right]} \tag{3.19}$$

และ
$$\gamma_3 = \frac{P_1 P_3 \left|h_{SR_2}\right|^2 \left|h_{R_2D}\right|^2}{N_0\left[P_1\left|h_{SR_2}\right|^2 + P_3\left|h_{R_2D}\right|^2 + N_0\right]} \tag{3.20}$$

โดยที่ γ_1 คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ

γ_2 คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) ช่วยส่งต่อสัญญาณ

γ_3 คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ช่วยส่งต่อสัญญาณ

สมการโดยทั่วไปในการหาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในระบบสื่อสารไร้สายที่มีการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค[17] - [18] สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (3.21)

$$P_{(DPSK)} = \frac{\xi}{2^{2L}\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)\, exp[-\gamma\alpha(\theta)]\, d\theta \qquad (3.21)$$

โดยที่

$\xi = 1$ สำหรับกรณีที่พิจารณาการมอดูเลตแบบ B-DPSK

หรือ $\xi = \frac{4}{log_2 M}$ สำหรับกรณีที่พิจารณาการมอดูเลตตั้งแต่ M มากกว่า 2 ขึ้นไป เช่น Q-DPSK, 8-DPSK เป็นต้น

$$\alpha(\theta) = \frac{b^2(1 + 2\beta\, sin\,\theta + \beta^2)}{2} \quad \text{โดย} \quad 0 < \beta = \frac{a}{b} \leq 1$$

a, b คือ ค่าคงที่สำหรับการมอดูเลตแบบต่างๆ

L คือ จำนวนของช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

γ คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนรวมของระบบ

$f(\theta)$ คือ ฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการมอดูเลตแบบต่างๆ

ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ สามารถแบ่งการส่งสัญญาณและวิธีการมอดูเลตออกได้ 3 แบบ ดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 ดังนั้น สามารถหาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลในแต่ละแบบ ดังนี้คือ

1. ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ ซึ่งใช้การมอดูเลตแบบ B-DPSK สำหรับการส่งสัญญาณ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.22)

$$P_{B-DPSK}^{Noncoop} = \frac{1}{4\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)\, exp[-\gamma_1 \alpha(\theta)]\, d\theta \qquad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.22) ใช้ Moment Generating Function (MGF) [9], [17] เพื่อช่วยหาผลลัพธ์ของสมการในเทอมเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$P_{B-DPSK}^{Noncoop} = \frac{1}{4\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) M\gamma_1(\theta)\, d\theta \qquad (3.23)$$

โดยที่ $$f(\theta) = \frac{b^2(1-\beta^2)}{2\alpha(\theta)} \qquad (3.24)$$

$$M\gamma_1(\theta) = \frac{1}{1+k_{SD}(\theta)} \quad [9] \qquad (3.25)$$

และ $$k_{SD}(\theta) = \alpha(\theta)\frac{P_1\delta_{SD}^2}{N_0} \quad [9] \qquad (3.26)$$

จากสมการที่ (3.23) เมื่อค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงขึ้นจะพบว่าจำนวนเลข 1 ของผลหารในเทอม MGF ($M\gamma_1(\theta)$) ส่งผลต่อการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลน้อยมาก และเพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณ จึงไม่พิจารณาจำนวนเลข 1 ดังกล่าว ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ ความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูลได้ดังนี้

$$P_{B-DPSK}^{Noncoop} \approx \frac{N_0}{P_1\delta_{SD}^2} I(\beta,\theta) \qquad (3.27)$$

เมื่อ $$I(\beta,\theta) = \frac{1}{2\pi b^2}\int_{-\pi}^{\pi} \frac{f_B(\theta)}{(1+2\beta\, sin\,\theta+\beta^2)^2}\, d(\theta) \qquad (3.28)$$

และ $f_B(\theta) = (1-\beta^2)$ ในกรณีการมอดูเลตแบบ B-DPSK จะใช้ค่าคงที่ $a = 10^{-3}$, $b = \sqrt{2}$ [14] และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ $P = P_1 = 1$

2. ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน ซึ่งสามารถเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 หรือ 3 ได้เพียงหนึ่งคนเท่านั้น สำหรับการส่งสัญญาณแบบนี้จะใช้การมอดูเลตแบบ Q-DPSK ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.29)

I23505849

$$P_{Q-DPSK}^{1-Relay} = \frac{1}{8\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)\exp[-(\gamma_1+\gamma_2)\alpha(\theta)]\,d\theta \qquad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.29) ใช้ Moment Generating Function (MGF) [9], [18] เพื่อช่วยหาผลลัพธ์ของสมการในเทอมเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$P_{Q-DPSK}^{1-Relay} = \frac{1}{8\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)M\gamma_1(\theta)M\gamma_2(\theta)\,d\theta \qquad (3.30)$$

โดยที่ $$f(\theta) = \frac{b^2\left[(1-\beta^2)(3+\cos(2\theta)) - (\beta^{-1}-\beta^3)\sin(\theta)\right]}{2\alpha(\theta)} \qquad (3.31)$$

ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน โดยที่ระบบเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) ช่วยส่งต่อสัญญาณ ซึ่งกำหนดให้ค่าของ $M\gamma_1(\theta)$ มีค่าดังสมการที่ (3.25) และ ค่า $M\gamma_2(\theta)$ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$M\gamma_2(\theta) = \frac{1}{1+k_{SR_1}(\theta)}\left[1+\frac{P_1\delta_{SR_1}^2}{P_2\delta_{R_1D}^2}\frac{k_{SR_1}(\theta)}{1+k_{SR_1}(\theta)}Z\gamma_2\right] \text{ [9]} \qquad (3.32)$$

โดยที่ $$k_{SR_1}(\theta) = \alpha(\theta)\frac{P_1\delta_{SR_1}^2}{N_0}\text{ , [9]} \qquad (3.33)$$

$$Z\gamma_2 = \int_0^{\infty}\exp(-\frac{u}{\delta_{R_1D}^2})\left[u+R\gamma_2(\theta)\right]^{-1} \text{ [9]} \qquad (3.34)$$

และ $$R\gamma_2(\theta) = \frac{P_1\delta_{SR_1}^2+N_0}{P_2}\left[1+\frac{P_1\delta_{SR_1}^2 b^2(1+2\beta\sin(\theta)+\beta^2)}{2N_0}\right]^{-1} \text{ [9]} \qquad (3.35)$$

จากสมการที่ (3.30) เมื่อค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงขึ้น จะพบว่าจำนวนเลข 1 ของผลหารในเทอม MGF ($M\gamma_1(\theta)$ และ $M\gamma_2(\theta)$) ส่งผลต่อการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลน้อยมาก และเพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณ จึงไม่พิจารณาจำนวนเลข 1 ดังกล่าว ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลโดยประมาณของการส่งข้อมูลได้ดังนี้

$$P_{Q-DPSK}^{1-Relay(1)} \approx \frac{P_2\delta_{R_1D}^2 + (P_1\delta_{SR_1}^2 + 1)Z\gamma_2}{P_1^2 P_2 \delta_{SD}^2 \delta_{SR_1}^2 \delta_{R_1D}^2} N_0^2 I(\beta,\theta) \tag{3.36}$$

เมื่อ $I(\beta,\theta) = \frac{1}{2\pi b^4} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f_Q(\theta)}{(1+2\beta\, sin\,\theta + \beta^2)^3}\, d(\theta)$ (3.37)

$f_Q(\theta) = (1-\beta^2)(3+cos(2\theta)) - (\beta^{-1} - \beta^3)\, sin(\theta)$ ในกรณีการมอดูเลตแบบ Q-DPSK จะใช้ค่าคงที่ $a = \sqrt{2-\sqrt{2}}$, $b = \sqrt{2+\sqrt{2}}$ [14] และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ $P = P_1 + P_2 = 1$

จากสมการที่ (3.30) และ (3.36) สามารถหาค่าขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound) ของค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล โดยการแทนค่า $\theta = \frac{\pi}{2}$ และ $\theta = -\frac{\pi}{2}$ [18] ตามลำดับ ในสมการที่ (3.35) ซึ่งสามารถเขียนสมการ $R\gamma_2(\theta)$ สำหรับขอบเขตบนและขอบเขต ได้ดังต่อไปนี้

ขอบเขตบน: $R\gamma_2(min) = \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 + N_0}{P_2}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 b^2(1+\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1}$ [9] (3.38)

ขอบเขตล่าง: $R\gamma_2(max) = \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 + N_0}{P_2}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 b^2(1-\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1}$ [9] (3.39)

ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน โดยที่ระบบเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 (Relay 2) ช่วยส่งต่อสัญญาณ ซึ่งกำหนดให้ค่าของ $M\gamma_1(\theta)$ มีค่าดังสมการที่ (3.25) และ ค่า $M\gamma_2(\theta)$ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$M\gamma_2(\theta) = \frac{1}{1+k_{SR_2}(\theta)}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2}{P_3\delta_{R_2D}^2}\frac{k_{SR_2}(\theta)}{1+k_{SR_2}(\theta)} Z\gamma_2\right] \tag{3.40}$$

โดยที่ $$k_{SR_2}(\theta) = \alpha(\theta)\frac{P_1\delta_{SR_2}^2}{N_0} \tag{3.41}$$

$$Z\gamma_2 = \int_0^{\infty} exp(-\frac{u}{\delta_{R_2D}^2})[u + R\gamma_2(\theta)]^{-1} \tag{3.42}$$

และ

$$R\gamma_2(\theta) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1 + 2\beta sin(\theta) + \beta^2)}{2N_0}\right]^{-1} \tag{3.43}$$

จากสมการที่ (3.30) เมื่อค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงขึ้น จะพบว่าจำนวนเลข 1 ของผลหารในเทอม MGF ($M\gamma_1(\theta)$ และ $M\gamma_2(\theta)$) ส่งผลต่อการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลน้อยมาก และเพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณ จึงไม่พิจารณาจำนวนเลข 1 ดังกล่าว ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูลได้ดังนี้

$$P_{Q-DPSK}^{1-Relay(2)} \approx \frac{P_3\delta_{R_2D}^2 + (P_1\delta_{SR_2}^2 + 1)Z\gamma_2}{P_1^2 P_3\delta_{SD}^2\delta_{SR_2}^2\delta_{R_2D}^2} N_0^2 I(\beta,\theta) \tag{3.44}$$

เมื่อ $$I(\beta,\theta) = \frac{1}{2\pi b^4}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{f_Q(\theta)}{(1 + 2\beta\, sin\,\theta + \beta^2)^3}\, d(\theta) \tag{3.45}$$

$f_Q(\theta) = (1-\beta^2)(3 + cos(2\theta)) - (\beta^{-1} - \beta^3)\, sin(\theta)$ ในกรณีการมอดูเลตแบบ Q-DPSK จะใช้ค่าคงที่ $a = \sqrt{2-\sqrt{2}}$, $b = \sqrt{2+\sqrt{2}}$ [14] และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ $P = P_1 + P_3 = 1$

จากสมการที่ (3.30) และ (3.44) สามารถหาค่าขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound) ของค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล โดยการแทนค่า $\theta = \frac{\pi}{2}$ และ $\theta = -\frac{\pi}{2}$ [18] ตามลำดับ ในสมการที่ (3.43) ซึ่งสามารถเขียนสมการ $R\gamma_2(\theta)$ สำหรับขอบเขตบนและขอบเขต ได้ดังต่อไปนี้

ขอบเขตบน: $$R\gamma_2(min) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1+\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.46)$$

ขอบเขตล่าง: $$R\gamma_2(max) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1-\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.47)$$

3. ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน สำหรับการส่งสัญญาณแบบนี้จะใช้การมอดูเลตแบบ 8-DPSK ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.48)

$$P_{8-DPSK}^{2-Relay} = \frac{1}{48\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)\exp\left[-(\gamma_1+\gamma_2+\gamma_3)\alpha(\theta)\right] d\theta \quad (3.48)$$

จากสมการที่ (3.48) ใช้ Moment Generating Function (MGF) [9], [18] เพื่อช่วยหาผลลัพธ์ของสมการในเทอม เอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$P_{8-DPSK}^{2-Relay} = \frac{1}{48\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)M\gamma_1(\theta)M\gamma_2(\theta)\,M\gamma_3(\theta)\,d\theta \quad (3.49)$$

โดยที่

$$f(\theta) = \frac{b^2\left[10(1-\beta^2)+(5-5\beta^2-\beta^{-2}+\beta^4)cos(2\theta)-5(\beta^{-1}-\beta^3)sin(\theta)-(\beta^{-1}-\beta^3)sin(3\theta)\right]}{2\alpha(\theta)}, \quad (3.50)$$

ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน ซึ่งกำหนดค่าของ $M\gamma_1(\theta)$ มีค่าดังสมการที่ (3.25), ค่า $M\gamma_2(\theta)$ มีค่าดังสมการที่ (3.32) และค่า $M\gamma_3(\theta)$ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$M\gamma_3(\theta) = \frac{1}{1+k_{SR_2}(\theta)}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2}{P_3\delta_{R_2D}^2}\frac{k_{SR_2}(\theta)}{1+k_{SR_2}(\theta)}Z\gamma_3\right] \quad (3.51)$$

โดยที่ $$k_{SR_2}(\theta) = \alpha(\theta)\frac{P_1\delta_{SR_2}^2}{N_0} \quad (3.52)$$

$$Z\gamma_3 = \int_0^{\infty} exp(-\frac{u}{\delta_{R_2D}^2})[u + R\gamma_3(\theta)]^{-1} \quad (3.53)$$

และ $$R\gamma_3(\theta) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1 + 2\beta sin(\theta) + \beta^2)}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.54)$$

จากสมการที่ (3.49) เมื่อค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงขึ้น จะพบว่าจำนวนเลข 1 ของผลหารในเทอม MGF ($M\gamma_1(\theta)$, $M\gamma_2(\theta)$ และ $M\gamma_3(\theta)$) ส่งผลต่อการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลน้อยมาก และเพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณ จึงไม่พิจารณาจำนวนเลข 1 ดังกล่าว ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูลได้ดังนี้

$$P_{8-DPSK}^{2-Relay} \approx \frac{\left[P_3\delta_{R_2D}^2 + (P_1\delta_{SR_2}^2 + 1)Z\gamma_3\right]\cdot\left[P_2\delta_{R_1D}^2 + (P_1\delta_{SR_1}^2 + 1)Z\gamma_2\right]}{P_1^3P_2P_3\delta_{SD}^2\delta_{SR_1}^2\delta_{R_1D}^2\delta_{SR_2}^2\delta_{R_2D}^2}N_0^3 I(\beta,\theta) \quad (3.55)$$

เมื่อ $$I(\beta,\theta) = \frac{1}{6\pi b^6}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{f_8(\theta)}{(1 + 2\beta sin\theta + \beta^2)^4}\,d(\theta) \quad (3.56)$$

และ

$f_8(\theta) = 10(1-\beta^2) + (5 - 5\beta^2 - \beta^{-2} + \beta^4)cos(2\theta) - 5(\beta^{-1} - \beta^3)sin(\theta) - (\beta^{-1} - \beta^3)sin(3\theta)$

ในกรณีการมอดูเลตแบบ 8-DPSK ใช้ค่าคงที่ $a = \sqrt{2 - \sqrt{2 - \sqrt{2}}}$ $b = \sqrt{2 + \sqrt{2 - \sqrt{2}}}$ [18] และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ $P = P_1 + P_2 + P_3 = 1$

จากสมการที่ (3.49) และ (3.55) สามารถหาค่าขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound) ของค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล โดยการแทนค่า $\theta = \frac{\pi}{2}$ และ $\theta = -\frac{\pi}{2}$ [18] ตามลำดับ ในสมการที่ (3.43) และ (3.54) ซึ่งสามารถเขียนสมการ $R\gamma_2(\theta)$ และ $R\gamma_3(\theta)$ สำหรับขอบเขตบนและขอบเขต ได้ดังต่อไปนี้

ขอบเขตบนชนิดที่ 1 : แทนค่า $\theta = \frac{\pi}{2}$ ในสมการ $R\gamma_2(\theta)$ และ $R\gamma_3(\theta)$ ตามลำดับ

$$R\gamma_2(min) = \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 + N_0}{P_2}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 b^2(1+\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.57)$$

$$R\gamma_3(min) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1+\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.58)$$

ขอบเขตบนชนิดที่ 2 : แทนค่า $\theta = \frac{\pi}{2}$ ในสมการ $R\gamma_2(\theta)$ และแทนค่า $\theta = -\frac{\pi}{2}$ ในสมการ $R\gamma_3(\theta)$

$$R\gamma_2(min) = \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 + N_0}{P_2}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 b^2(1+\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.59)$$

$$R\gamma_3(max) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1-\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.60)$$

หรือ แทนค่า $\theta = -\frac{\pi}{2}$ ในสมการ $R\gamma_2(\theta)$ และแทนค่า $\theta = \frac{\pi}{2}$ ในสมการ $R\gamma_3(\theta)$

$$R\gamma_2(max) = \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 + N_0}{P_2}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 b^2(1-\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.61)$$

$$R\gamma_3(min) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1+\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.62)$$

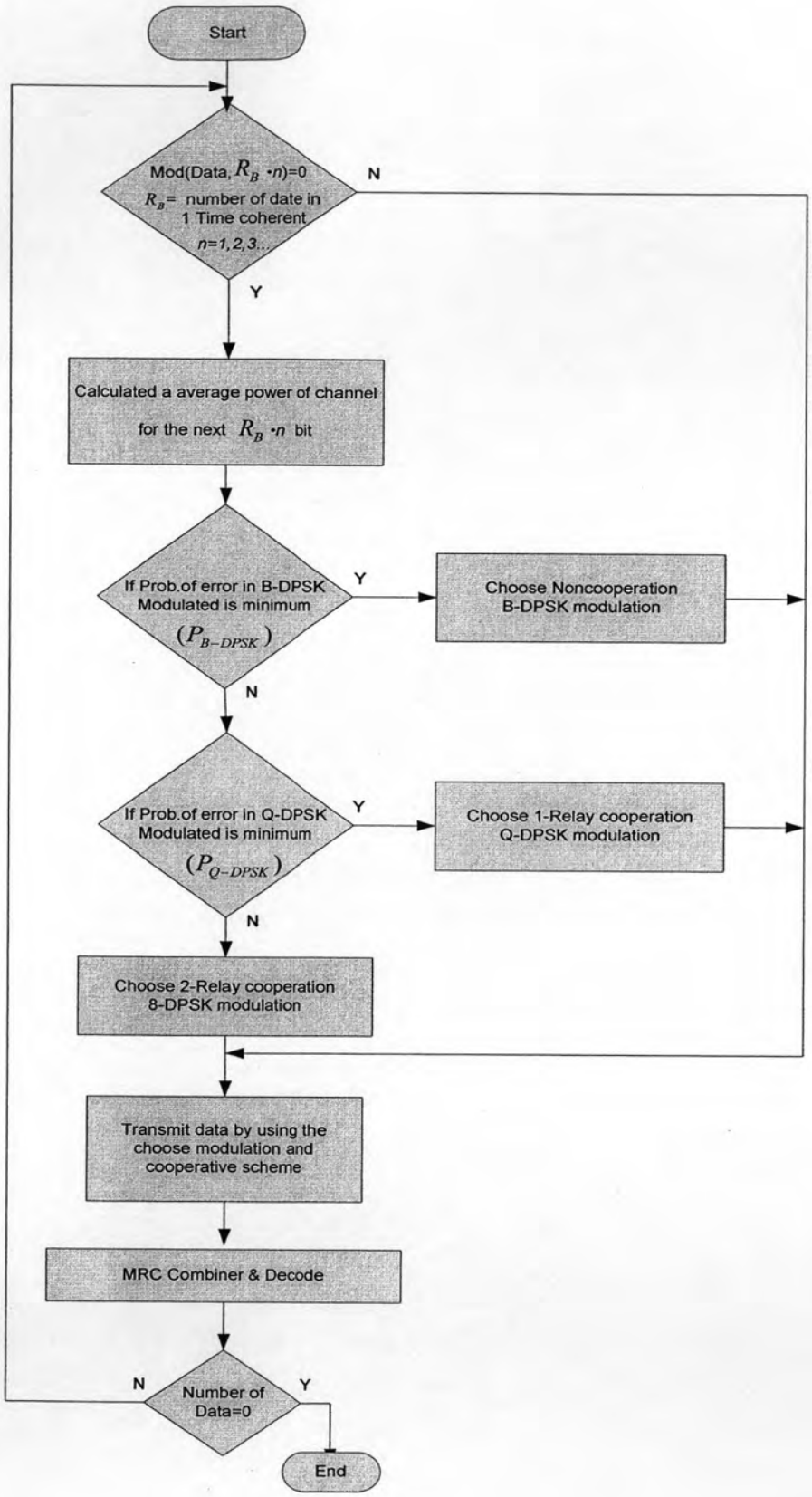
ขอบเขตล่าง : แทนค่า $\theta = -\frac{\pi}{2}$ ในสมการ $R\gamma_2(\theta)$ และ $R\gamma_3(\theta)$ ตามลำดับ

$$R\gamma_2(max) = \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 + N_0}{P_2}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_1}^2 b^2(1-\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.63)$$

$$R\gamma_3(max) = \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 + N_0}{P_3}\left[1 + \frac{P_1\delta_{SR_2}^2 b^2(1-\beta)^2}{2N_0}\right]^{-1} \quad (3.64)$$

3.3 **โพรโทคอลแบบปรับตัว** (Adaptive Protocol)

โพรโทคอลแบบปรับตัว [12] เป็นโพรโทคอลที่ทำหน้าที่เลือกเส้นทางการส่งสัญญาณ เลือกจำนวนและระบุผู้ใช้งานที่จะทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับได้อย่างเหมาะสม เพื่อทำให้สมรรถนะของระบบมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุด ภายใต้การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเกิดเฟดดิงแบบเรย์ลี โดยมีหลักการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผังงานแสดงการทำงานของโพรโทคอลแบบปรับตัว

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลที่มีการเกิดเฟดดิงอย่างช้าๆอยู่ตลอดเวลา โดยการเกิดเฟดดิงนี้จะส่งผลทำให้ขนาดและเฟสของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและในช่วงคาบเวลาของการเกิดเฟดดิงนั้นเรียกว่าคาบเวลาร่วมนัย เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาขนาดของสัญญาณที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลมีค่าเท่ากับค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณ ดังนั้นในแต่ละคาบเวลาร่วมนัยจึงมีค่าแวเรียนซ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าแวเรียนซ์นี้จะส่งผลกระทบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูล ถ้าหากค่าแวเรียนซ์มีค่ามากก็จะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลมีค่าลดลง ดังนั้นหากมีการคำนวณหาค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในทุกๆ ช่วงเวลาของการส่งข้อมูลก็จะทำให้สามารถเลือกช่องสัญญาณที่มีเหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้โดยรวมของระบบมีค่าต่ำที่สุด ณ เวลาการส่งข้อมูลในช่วงเวลานั้น สำหรับขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอลแบบปรับตัว ในรูปที่ 3.5 สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

1. คำนวณค่าแวเรียนซ์ของแต่ละช่องสัญญาณทุกๆ $R_B \cdot n$ คาบ โดยที่ R_B คือจำนวนบิตข้อมูลใน 1 คาบเวลาร่วมนัยและเป็นจำนวนที่หารด้วยจำนวนเลข 6 ลงตัวเนื่องจากจำนวนเลข 6 นั้นเป็นจำนวนบิตของข้อมูลที่ใช้ในการมอดูเลตแบบ B-DPSK Q-DPSK และ 8-DPSK ร่วมกันอย่างลงตัว ส่วน n คือ ค่าคงที่จำนวนเต็มบวกสำหรับการปรับตัว มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3...

2. คำนวณค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูล สำหรับการส่งสัญญาณทั้ง 3 แบบ คือการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน และการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน ตามลำดับ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2

3. เปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูล ทั้ง 3 แบบ โดยเลือกค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลที่มีค่าน้อยที่สุด เพื่อเป็นเงื่อนไขในการเลือก รูปแบบและเส้นทางการส่งสัญญาณ เพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น

3.1. เมื่อค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูลในกรณีการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้อื่นช่วยเหลือมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นระบบจะเลือกรูปแบบการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้อื่นช่วยเหลือ ซึ่งใช้วิธีการมอดูเลตแบบ B-DPSK

3.2. เมื่อค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูลในกรณีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน กรณีที่เลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ช่วยส่งต่อสัญญาณมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นระบบจะเลือกรูปแบบการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้อื่นช่วยเหลือ 1 คน และเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ช่วยส่งต่อสัญญาณ ซึ่งใช้วิธีการมอดูเลตแบบ Q-DPSK

3.3. เมื่อค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูลในกรณีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน กรณีที่เลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 ช่วยส่งต่อสัญญาณมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นระบบจะเลือกรูปแบบการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้อื่นช่วยเหลือ 1 คน และเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 ช่วยส่งต่อสัญญาณ ซึ่งใช้วิธีการมอดูเลตแบบ Q-DPSK

3.4. เมื่อค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณของการส่งข้อมูลในกรณีการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คนมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นระบบจะเลือกรูปแบบการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้อื่นช่วยเหลือ 2 คน ใช้วิธีการมอดูเลตแบบ 8-DPSK

4. ระบบจะกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 1 ใหม่ เมื่อตรวจเช็คจำนวนของข้อมูลพบว่ายังมีข้อมูลที่ต้องการส่งอีกและหากไม่มีข้อมูลจึงจบการทำงานของโพรโทคอลแบบปรับตัว

3.4 **การจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสม** (Sub-Optimum Power Allocation)

ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการข้อมูล คือ การจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสม ในปัจจุบันได้มีการศึกษากรรมวิธีการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่มีผู้ใช้งานทั้งหมด 3 คน ซึ่งได้ศึกษาในระบบการสื่อสารแบบร่วมนัย [12] และมีเส้นทางการส่งสัญญาณได้ทั้งหมด 3 แบบ โดยแต่ละแบบมีจำนวนผู้ใช้งานที่ร่วมมือกันไม่เท่ากัน ดังนั้นการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานที่ร่วมกันส่งสัญญาณนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง และต้องสอดคล้องกับสภาวะของช่องสัญญาณไร้สาย ณ ขณะนั้นด้วย ซึ่งการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมนั้นจะส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบโดยรวมดีขึ้น สำหรับการหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมนี้จะต้องอยู่บนเงื่อนไข 2 ประการ ประการแรก คือ กำลังส่งรวมทั้งหมดต้องคงที่ และประการที่สองคือ อัตราการส่งข้อมูลต้องคงที่

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่มีผู้ใช้งาน 3 คน ในการสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย ซึ่งจากสมการค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณ ของการส่งข้อมูลทั้ง 3 แบบ ดังสมการที่ (3.36) (3.44) และ (3.55) พบว่าค่าของกำลังส่งมีความสัมพันธ์อย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณ จึงส่งผลทำให้สมการเพื่อใช้คำนวณหาค่าการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมนั้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมในระบบสื่อสารไร้สายที่เสนอนั้นจึงได้เอานำหลักการ การจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือในการสื่อสารแบบร่วมนัย [12] เป็นบรรทัดฐาน เมื่อหาค่าการจัดสรรกำลังส่งจากสมการ [12] ได้แล้วจะต้องทำการค้นหาค่าที่เหมาะสมอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเรียกการจัดสรรกำลังส่งในกรณีนี้ว่า การจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสม สามารถเขียนสมการ การจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสม ดังนี้คือ

1. การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ

$$P_1 = 1 \tag{3.65}$$

2. การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน โดยที่เลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ช่วยส่งต่อสัญญาณ เมื่อกำหนดให้ผลรวมของกำลังงานส่งข้อมูลเท่ากับ 1 ($P_1 + P_2 = 1$) สามารถเขียนสมการการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมได้ดังนี้ [12]

$$\arg \min_{P_1, P_2} \ln \left(\frac{P_1 \delta_{SR_1}^2 + P_2 \delta_{R_1 D}^2}{P_1^2 P_2} \right) \tag{3.66}$$

$$P_1 = \frac{4\delta_{R_1 D}^2}{(4\delta_{R_1 D}^2 - \delta_{SR_1}^2) + \delta_{SR_1}^2 \sqrt{8\delta_{R_1 D}^2 + \delta_{SR_1}^2}} \quad ; \quad P_2 = 1 - P_1 \tag{3.67}$$

3. การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน โดยที่เลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 ช่วยส่งต่อสัญญาณ เมื่อกำหนดให้ผลรวมของกำลังงานส่งข้อมูลเท่ากับ 1 ($P_1 + P_3 = 1$) สามารถเขียนสมการการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมได้ดังนี้ [12]

$$\arg \min_{P_1, P_3} \ln \left(\frac{P_1 \delta_{SR_2}^2 + P_3 \delta_{R_2 D}^2}{P_1^2 P_3} \right) \tag{3.68}$$

พอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$P_1 = \frac{4\delta_{R_2D}^2}{(4\delta_{R_2D}^2 - \delta_{SR_2}^2) + \delta_{SR_2}^2\sqrt{8\delta_{R_2D}^2 + \delta_{SR_2}^2}} \quad ; \quad P_3 = 1 - P_1 \tag{3.69}$$

4. การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน เมื่อกำหนดให้ผลรวมของกำลังงานส่งข้อมูลเท่ากับ 1 ($P_1 + P_2 + P_3 = 1$) สามารถเขียนสมการการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมได้ดังนี้ [12]

$$\arg \min_{P_1,P_2,P_3} \ln\left(\frac{(P_1\delta_{SR_1}^2 + P_1\delta_{R_1D}^2)(P_1\delta_{SR_2}^2 + P_3\delta_{R_2D}^2)}{P_1^3 P_2 P_3}\right) \tag{3.70}$$

$$P_1 = \frac{3P_2^2\delta_{R_1D}^2}{(1-3P_2)\delta_{SR_1}^2} \quad , \quad P_3 = 1 - P_1 - P_2 \tag{3.71}$$

สำหรับการจัดสรรค่า P_2 สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.72) โดยเลือกค่าที่น้อยที่สุดในช่วงค่า 0 ถึง 1 [12]

$$\begin{aligned}&\left[C_1^2 A - 3C_1C_2 + 9C_4\right]P_2^4 + \left[C_1\left(-3C_3 + C_2\right) - 24C_4\right]P_2^3 + \left[C_1C_3 + 22C_4\right]P_2^2 \\ &-8C_4P_2 + C_4 = 0\end{aligned} \tag{3.72}$$

โดยที่ $C_1 = \frac{3\delta_{R_1D}^2}{\delta_{SR_1}^2}$, $C_2 = 6\delta_{R_2D}^2 - 3\delta_{SR_2}^2$, $C_3 = 2\delta_{SR_2}^2 - 6\delta_{R_2D}^2$, $C_4 = 3\delta_{R_2D}^2$,

และ $A = 3(\delta_{R_2D}^2 - \delta_{SR_2}^2)$