บทที่ 4
ผลการจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและการวิจารณ์สมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอในการสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย พร้อมทั้งนำโพรโทคอลแบบปรับตัวมาใช้สำหรับ การเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณ การเลือกจำนวนและการระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังที่นำเสนอมาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ โดยเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ คือ ในหัวข้อที่หนึ่งจะกล่าวถึง พารามิเตอร์และสมมติฐานต่างๆที่ใช้ในการจำลองระบบ หัวข้อที่สองจะกล่าวถึงผลการจำลองค่าสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอภายใต้เงื่อนไขต่างๆ หัวข้อที่สามจะกล่าวถึงค่าสมรรถนะของระบบที่นำเสนอจากการใช้โพรโทคอลแบบปรับตัวภายใต้เงื่อนไขต่างๆ และหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงขีดจำกัดของสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

4.1 วิธีการจำลองระบบ

4.1.1 การมอดูเลต

การมอดูเลตที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 เนื่องจากในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอมีเส้นทางการส่งสัญญาณได้หลายเส้นทาง ดังนั้นจึงกำหนดอัตราการมอดูเลตแบบเต็มอัตราในแต่ละเส้นทางมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถแบ่งการมอดูเลตออกได้ 3 แบบ ดังนี้คือ

1.การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ (Noncooperation Strategy) ใช้วิธีการมอดูเลตแบบ B-DPSK

2.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน (1-Relay cooperation Strategy) ซึ่งสามารถเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 หรือเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 เพียง 1 คนเท่านั้น สำหรับทำหน้าที่เป็น Relay ใช้วิธีการมอดูเลตแบบ Q-DPSK

3.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน (2-Relay cooperation Strategy) ใช้วิธีการมอดูเลตแบบ 8-DPSK

4.1.2 สัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ

สัญญาณรบกวน (Noise) ที่ใช้ในการจำลองระบบนี้จะใช้สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของขนาดของสัญญาณเป็นศูนย์ และมีค่าแวเรียนซ์ที่เปลี่ยนตามกำลังของสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการจำลองระบบ ซึ่งจะขึ้นกับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่กำหนดนั่นเอง นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่ใช้นี้นั้นจะเป็นค่าเชิงซ้อนมีทั้งองค์ประกอบทั้งในส่วนจริง และส่วนจินตภาพ

4.1.3 เฟดดิงจากช่องสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการจำลองระบบที่มีผลของเฟดดิงตลอดทั้งผลการวิจัย โดยเฟดดิงนี้จะเป็นผลที่เกิดจากการเกิดพหุวิถีของสัญญาณซึ่งจะส่งผลกระทบทั้งต่อขนาด (Amplitude) ของคลื่นสัญญาณและเฟส (Phase) ของสัญญาณ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 โดยที่ค่าขนาดของสัญญาณแต่ละวิถีที่เกิดขึ้นนั้น จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh) และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จำลองการเกิดเฟดดิงโดยใช้รูปแบบ Jake's Model [19] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4.1)

$$h_m(k) = \sum_{n=1}^{M} c_n^{(m)} e^{j(\Omega_m k \cos\alpha_n^{(m)} + \phi_n^{(m)})} \tag{4.1}$$

เมื่อกำหนดให้ $\Omega_m = \dfrac{2\pi f_m}{f_s}$

f_m คือ Doppler shift

f_s คือ ความถี่สำหรับชักตัวอย่าง

$\alpha_{\mathrm{n}}^{(\mathrm{m})} = \dfrac{2\pi n}{M} + \theta_n^{(m)}$

$\theta_n^{(m)}$ คือ มุมเฟสมีค่าอยู่ในช่วง $[-\delta, \delta]$; $\delta = 0.005$

$\phi_n^{(m)}$ คือ มุมเฟสแบบสุ่มมีค่าอยู่ในช่วง $[-\pi, \pi]$

$C_{\mathrm{n}}^{(\mathrm{m})} = \dfrac{1}{\sqrt{M}}$; $M = 14$ คือ จำนวนช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการประมาณค่าในการเกิดเฟดดิงแบบเรย์ลี

4.1.4 ความถี่ดอปเพลอร์

ความถี่ดอปเพลอร์เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นความถี่ดอปเพลอร์จึงเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งต้องคำนึงถึงสำหรับการจำลองระบบ โดยความถี่ดอปเพลอร์นั้นมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเลื่อนทางความถี่ของสัญญาณขึ้น นอกจากนี้ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดยังเป็นตัวกำหนดค่าสหสัมพันธ์ทางเวลาของการลดทอนที่เกิดขึ้นด้วย โดยเมื่อค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่าสหสัมพันธ์ทางเวลาของการลดทอนมีค่าลดลงทำให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเร็วมากยิ่งขึ้นซึ่งจะส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการประมาณช่องสัญญาณสูงมากยิ่งขึ้น อนึ่งผลกระทบของความถี่ดอปเพลอร์นั้นยังขึ้นอยู่กับค่าความถี่กลางที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณอีกด้วย เนื่องจากค่าความถี่ดอปเพลอร์เป็นค่าที่คิดเทียบกับค่าความถี่กลางที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณ

ในการจำลองระบบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาผลของความถี่ดอปเพลอร์แบบบรรทัดฐาน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (4.1)

$$\text{Doppler shift} = f_D \cdot T_s \tag{4.2}$$

โดยที่ f_D คือความถี่ดอบเพลอร์ มีหน่วยเป็น Hz

T_s คือคาบเวลาของสัญญาณ 1 สัญลักษณ์ มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที

ในการเกิดเฟดดิงของสัญญาณนั้นสามารถหาค่าของช่วงห่างคาบเวลาของการเกิดเฟดดิงได้ ซึ่งเรียกว่า คาบเวลาร่วมนัย (Time Coherent: T_C) และสามารถหาได้จากสมาการที่ (4.3)

$$T_C \approx \frac{1}{f_D} \tag{4.3}$$

4.1.5 สัญญาณแถบแคบ (Narrowband Signal)

สัญญาณแถบแคบ เป็นสัญญาณที่เกิดในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร โดยการสื่อสารแถบแคบมีลักษณะทนทานต่อการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์เนื่องจากช่วงเวลาของสัญลักษณ์แต่ละตัวมีค่ามากกว่าการแผ่เวลาประวิง แต่ในทางกลับกันจะหมายความว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณมีค่าน้อยกว่าแบนด์วิดท์ร่วมนัย เป็นผลให้สัญญาณแถบแคบได้รับผลของการ

ลดทอนแบบราบ (Flat Fading) ซึ่งจะทำให้สัญญาณหายไปทั้งหมด ถ้าการลดทอนมีผลมาก ดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของสัญญาณแถบแคบ

4.1.6 สมมติฐานต่าง ๆที่ใช้ในการจำลองระบบ

การจำลองระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีการกำหนดสมมติฐานเพิ่มเติมดังนี้

- พิจารณาระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ ในการสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย โดยกำหนดให้ ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง ผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay 1 และผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay 2
- เครื่องรับสามารถทำการซิงโครไนซ์(Synchronize) สัญญาณที่รับได้ของทุกผู้ใช้งาน(เครื่องส่งและRelay) ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์
- ผู้ใช้งานที่ทำหน้าเป็น Relay จะทำการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward
- ในการจำลองระบบที่นำเสนอนี้นั้นจะทำกำหนดอัตราการส่งข้อมูลแบบเต็มอัตราในแต่ละเส้นทางเท่ากับ 1 โดยใช้วิธีการมอดูเลตแบบ B-DPSK Q-DPSK 8-DPSK ตามลำดับขึ้นอยู่กับการเลือกเส้นทางและรูปแบบการส่งสัญญาณ
- ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กำหนดให้ค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในแต่ละช่องสามารถหาค่าได้จากเครื่องส่ง
- พิจารณาผลรวมของกำลังส่งสัญญาณมีค่าเท่ากับ 1 W
- พิจารณาการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมในระบบที่นำเสนอ โดยใช้กรรมวิธีการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่มีผู้ใช้งานทั้งหมด 3 คน ในการสื่อสารแบบร่วมนัยเป็นบรรทัดฐาน
- พิจารณาค่าแวเรียนซ์ของของสัญญาณรบกวนในระบบมีค่าเท่ากับ 1
- พิจารณาสัญญาณแถบแคบที่มีการเกิดเฟดดิงราบแบบเรย์ลีอย่างช้า ๆ

4.2 สมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ โดยการจำลองระบบเพื่อหาค่าอัตราส่วนความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทาง ซึ่งแบ่งได้ดังนี้คือ การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน และการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของการส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทางในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอและทำการเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการจำลองระบบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.2 เพื่อแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการจำลองระบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณ เพื่อนำค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดนำไปใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับการทำงานของโพรโทคอลแบบปรับตัวต่อไป และเนื่องจากค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลนั้นมีการคำนวณที่ยุ่งยากและซับซ้อนในการคำนวณหาค่าแบบแม่นตรง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบของเขตบนและแบบขอบเขตล่างซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 เพื่อทำให้สามารถบ่งบอกถึงช่วงขอบเขตของค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่เป็นไปได้จากการจำลองระบบ

4.2.1 สมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ โดยการเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาด

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอภายใต้เงื่อนไขต่างๆ โดยจะเริ่มต้นด้วยการนำเสนอค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูล ในแต่ละเส้นทางของการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือสามารถแบ่งออกได้ดังนี้คือ

1.การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบแม่นตรง

2.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนและขอบเขตล่าง

3.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนชนิดที่ 1 ชนิดที่ 2 และขอบเขตล่าง

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตในการจำลองระบบที่นำเสนอเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณในแต่ละกรณี และในการจำลองระบบจะพิจาณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 3.5KHz ค่าอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 1 Mbps และกำลังส่งสัญญาณรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบเท่ากับ 1 โดยกำหนดให้ผู้ใช้งานแต่ละคนใช้กำลังส่งเท่ากันซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้คือ

1.การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ กำหนดให้ผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ $P = P_1 = 1\ W$

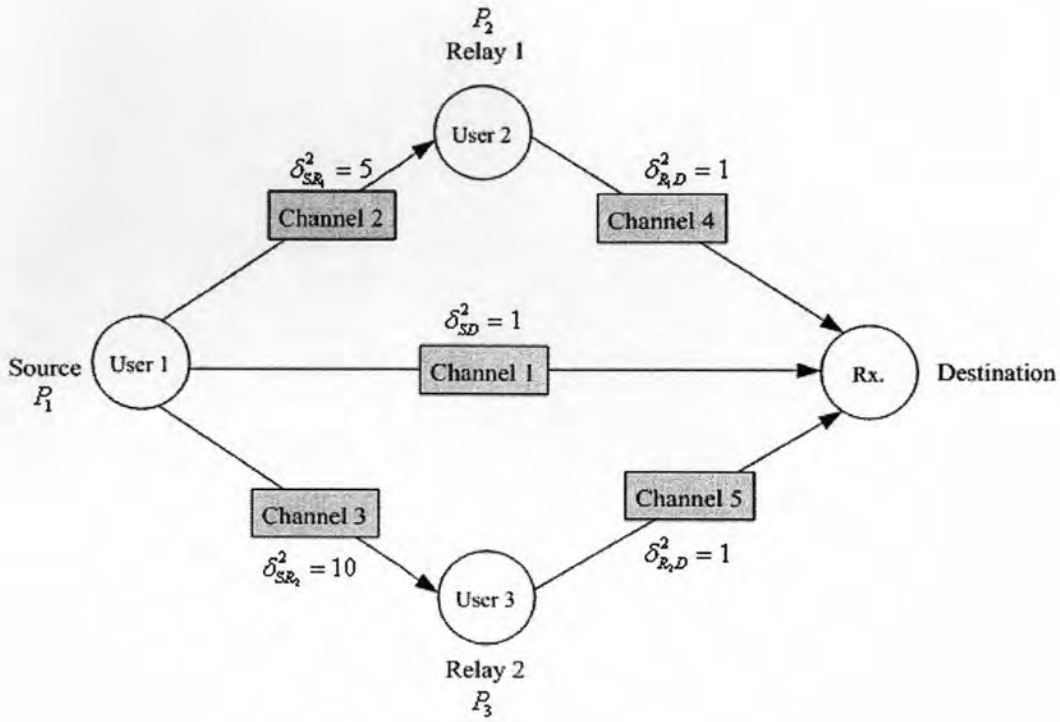
2.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1คน กำหนดให้ผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ

$P = P_1 + P_2 = 1\ W \quad ; P_1 = P_2 = 0.5$ W สำหรับกรณีที่เลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay

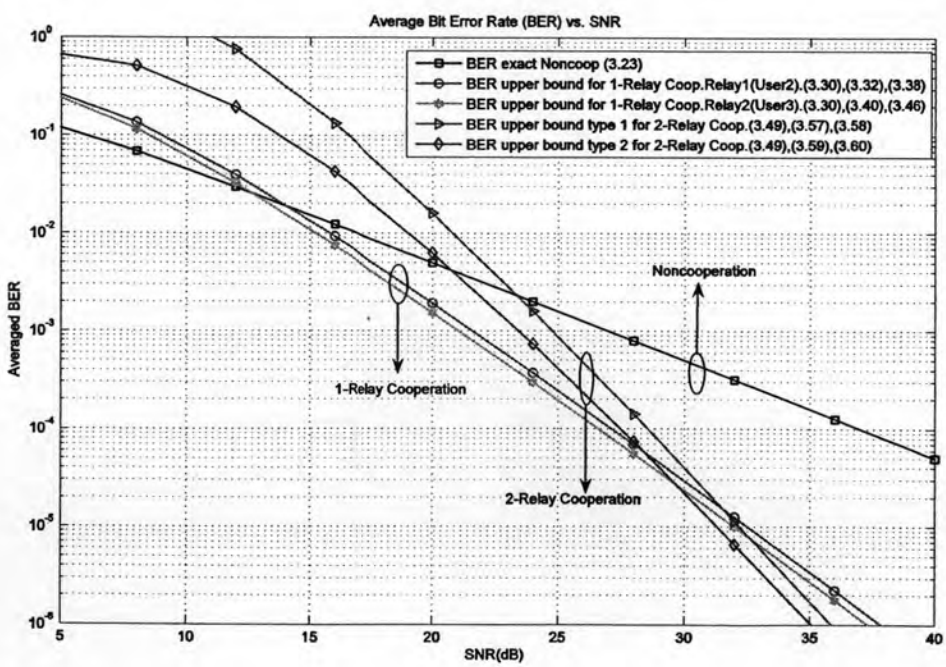
$P = P_1 + P_3 = 1\ W \quad ; P_1 = P_3 = 0.5$ W สำหรับกรณีที่เลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay

3.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน กำหนดให้ผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ $P = P_1 + P_2 + P_3 = 1\ W \quad ; P_1 = P_2 = P_3 = 0.333\ W$

ในการจำลองระบบในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่าแวเรียนซ์ระหว่างช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 แสดงการกำหนดค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่องสำหรับการจำลองระบบที่นำเสนอ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนของการส่งสัญญาณในเส้นทางต่างๆ ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

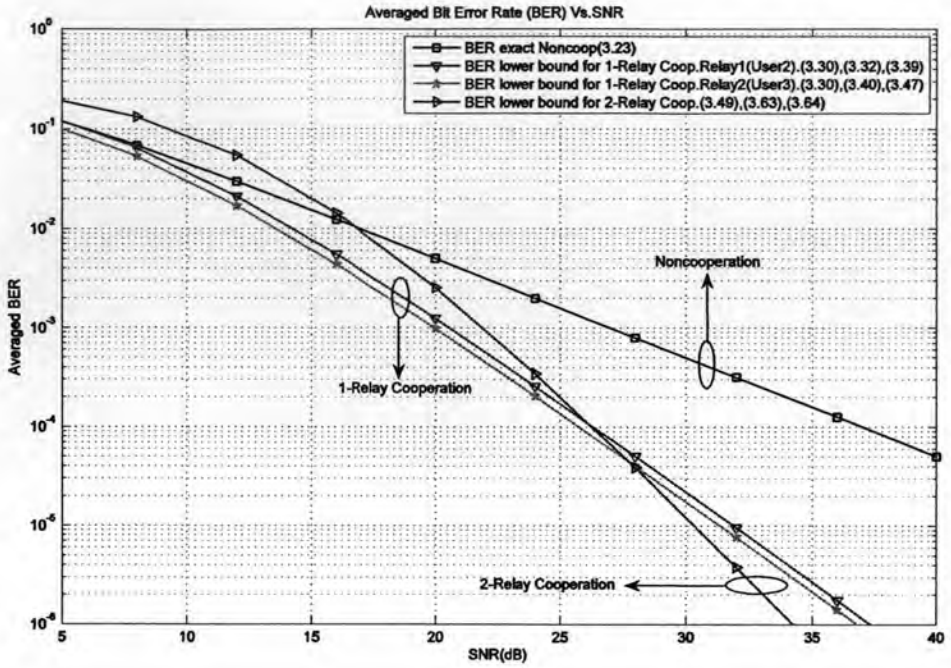
จากรูปที่ 4.3 จะแสดงถึงค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดสำหรับการส่งสัญญาณในแต่ละเส้นทาง ซึ่งคำนวณได้จากสมการในหัวข้อที่ 3.2 สามารถอธิบายได้ดังนี้ การส่งสัญญาญโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบแม่นตรง(3.23) และในส่วนของการส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบน ซึ่งจะพิจารณาด้วยกัน 2 กรณี คือ กรณีแรกเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay(3.30), (3.32),(3.38) และกรณีที่สองเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay (3.30),(3.40),(3.46) จากรูปพบว่าค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดในการเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 มีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้งานคนที่3 มีค่ามากกว่านั่นเอง และสำหรับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนทั้ง 2 ชนิด และพบว่าค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดขอบเขตบนชนิดที่ 2 (3.49),(3.59),(3.60) มีค่าต่ำกว่าชนิดที่ 1 (3.30),(3.57),(3.58) ซึ่งในรายละเอียดการคำนวณได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2

จากรูปเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดในแต่ละเส้นทางของการส่งสัญญาณทั้ง 3 เส้นทาง พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบมีอัตราขยายไดเวอร์ซิตีเพิ่มขึ้น และจำนวนผู้ใช้งานที่จะช่วยส่งสัญญาณก็มีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลทำให้ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดลดลง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1.การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือจะมีสมรรถนะการส่งสัญญาณสูงกว่าเส้นทางอื่นๆ ในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีค่าน้อยกว่า 14 เดซิเบล

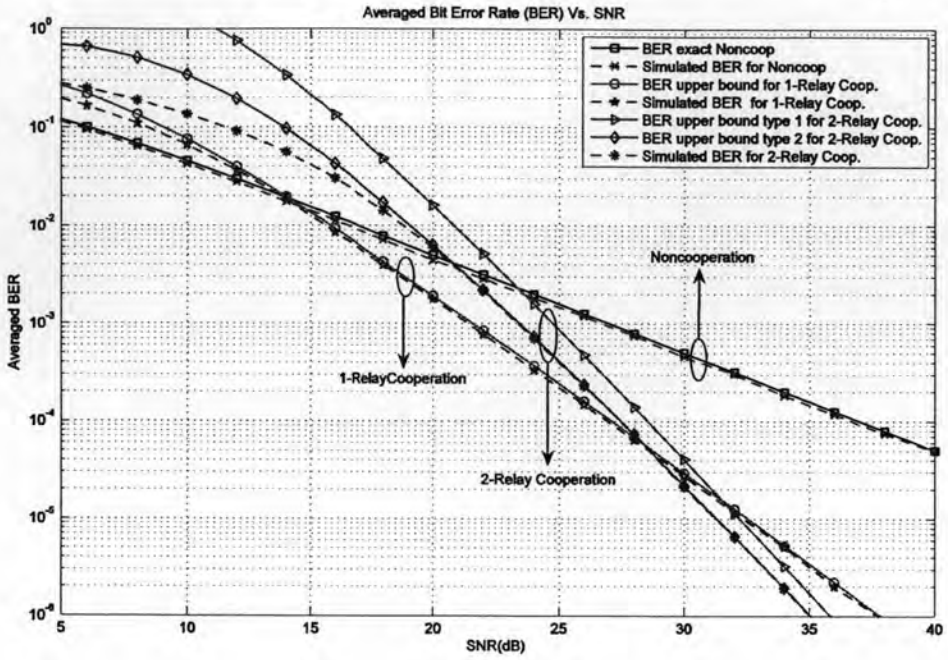
2.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน จะมีสมรรถนะการส่งสัญญาณสูงกว่าเส้นทางอื่นๆ ในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีค่ามากกว่า 14 เดซิเบล จนถึง 27.5 เดซิเบล

3.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน จะมีสมรรถนะการส่งสัญญาณสูงกว่าเส้นทางอื่นๆ ในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงกว่า 27.5 เดซิเบล ขึ้นไป



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตล่างของการส่งสัญญาณในเส้นทางต่างๆ ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

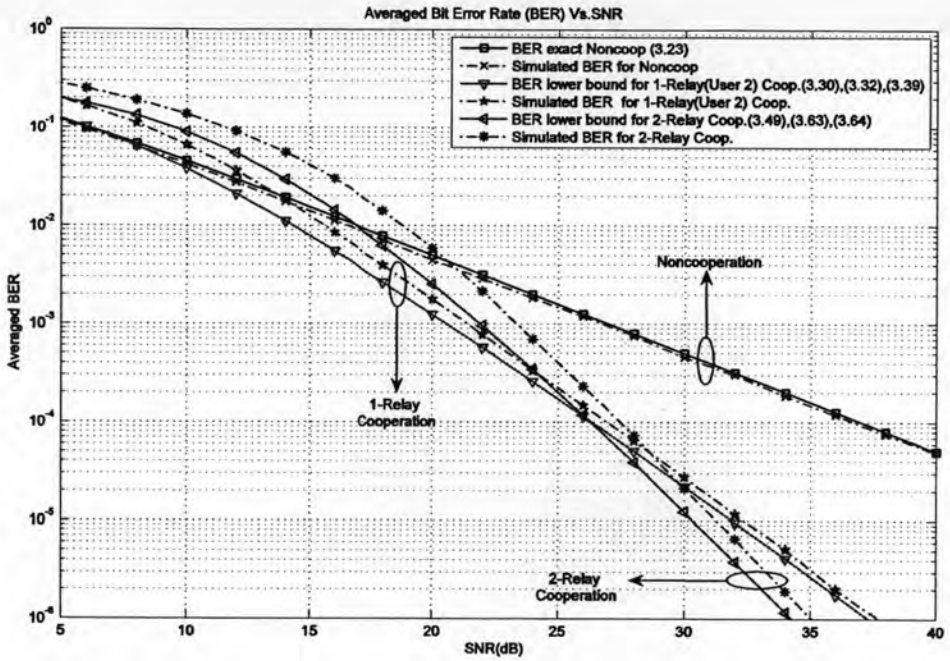
จากรูปที่ 4.4 จะแสดงถึงค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดสำหรับการส่งสัญญาณในแต่ละเส้นทาง สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบแม่นตรง(3.23) และในส่วนของการส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของอัตราความผิด พลาดบิตแบบขอบเขตล่าง และจากรูปพบว่าค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดในการเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 (3.30),(3.40),(3.47) มีค่าต่ำกว่ากรณีเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 (3.30),(3.32),(3.39) เนื่องมาจากค่าแวเรียนซ์ของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้งานคนที่ 3 มีค่ามากกว่าเช่นเดียวกับการพิจารณาในกรณีขอบเขตบน สำหรับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตล่าง(3.49),(3.63),(3.64) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดในแต่ละเส้นทางของการส่งสัญญาณทั้ง 3 เส้นทาง พบว่ามีลักษณะคุณสมบัติของระบบเช่นเดียวกันกับการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนและค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบของการส่งสัญญาณในเส้นทางต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 จะแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนที่ได้จากการคำนวณและค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบของการส่งสัญญาณในเส้นทางต่างๆ ในระบบสื่อสารไร้สายแบบที่นำเสนอ สำหรับกรณีการส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน นั้นจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ระบบเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay กรณีเดียวเท่านั้น จากรูปพบว่าค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบแม่นตรง(3.23) สำหรับการส่งสัญญาญโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ และค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบน (3.30),(3.32),(3.38) สำหรับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน มีค่าใกล้เคียงในเชิงมากกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบ แต่สำหรับการส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คนพบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการจำลองระบบนั้น เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบลจะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนชนิดที่ 2

(3.49),(3.59),(3.60) มากว่าชนิดที่ 1 (3.49),(3.57),(3.58) ยกตัวอย่างเช่น ณ ตำแหน่งที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-4} ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนชนิดที่ 1 จะมีค่าขนานกับอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการจำลองระบบโดยมีช่วงห่างประมาณ 1.2 เดซิเบล ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตบนชนิดที่ 2 สำหรับจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตล่างและค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบของการส่งสัญญาณในเส้นทางต่างๆ

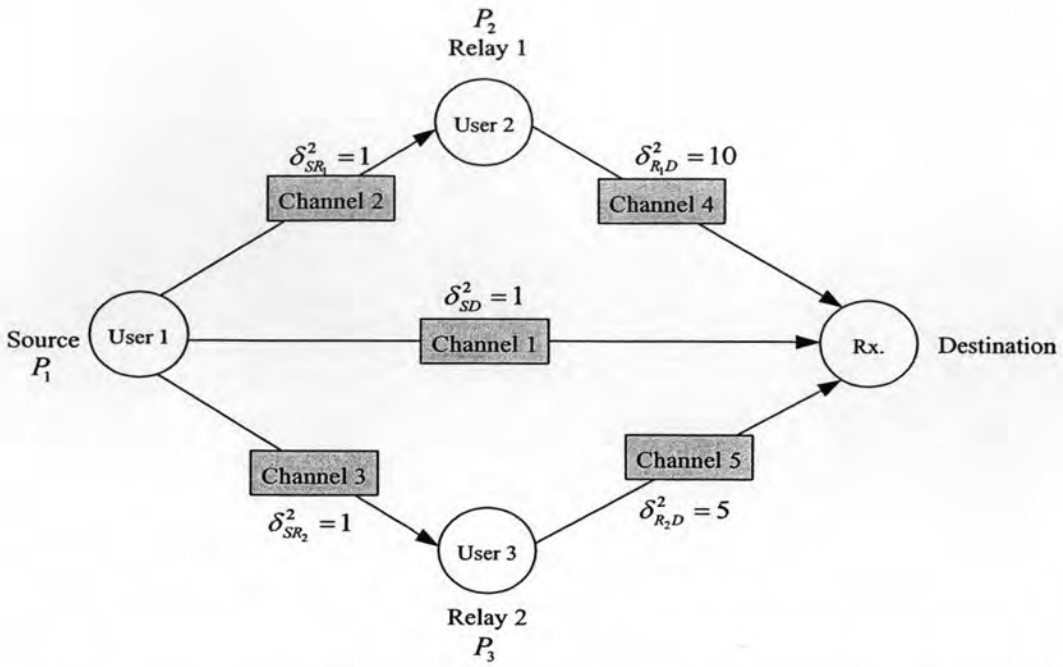
จากรูปที่ 4.6 จะแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตล่างที่ได้จากการคำนวณและค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบของการส่งสัญญาณในเส้นทางต่างๆ ในระบบสื่อสารไร้สายแบบที่นำเสนอ สำหรับกรณีการส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน นั้นจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ระบบเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay กรณีเดียวเท่านั้น จากรูปพบว่าค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตล่าง(3.30),(3.32),(3.39) สำหรับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่น

ช่วยเหลือ 1 คน มีค่าใกล้เคียงในเชิงน้อยกว่า เมื่อเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบเช่นกัน แต่สำหรับการส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน พบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการจำลองระบบนั้นจะมีค่ามากกว่าและขนานกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดแบบขอบเขตล่าง(3.49),(3.63),(3.64) โดยมีช่วงห่างประมาณ 0.8 เดซิเบล ณ ตำแหน่งที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-4}

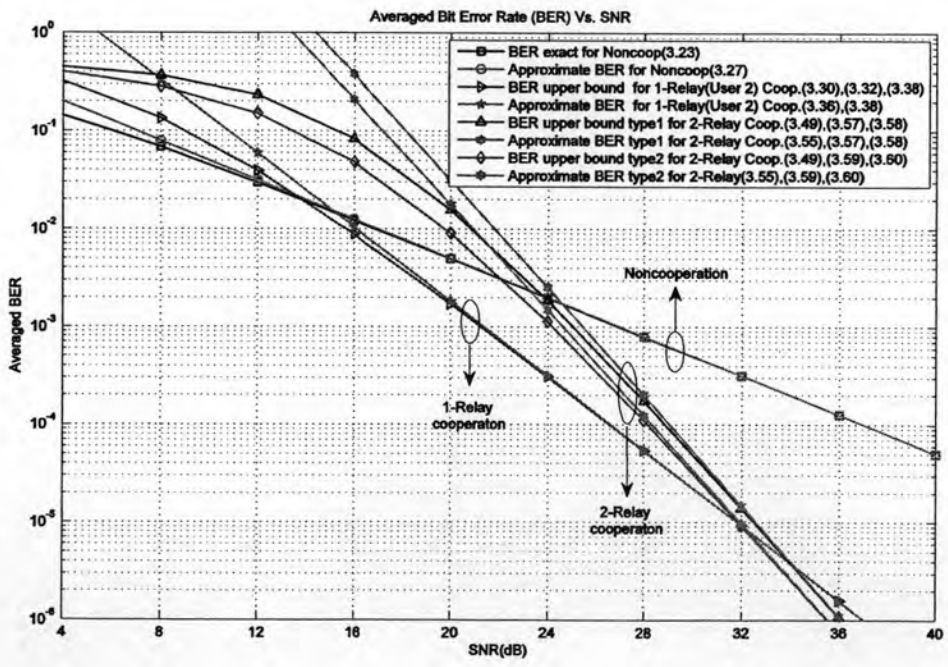
4.2.2 สมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ โดยการเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณ

เนื่องจากสมการในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลในหัวข้อที่ผ่านมานั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอสมการที่สามารถช่วยลดความยุ่งยากและลดความซับซ้อนของการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาด ให้มีการคำนวณที่ง่ายขึ้น ซึ่งเรียกว่า ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณ และได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 3.2

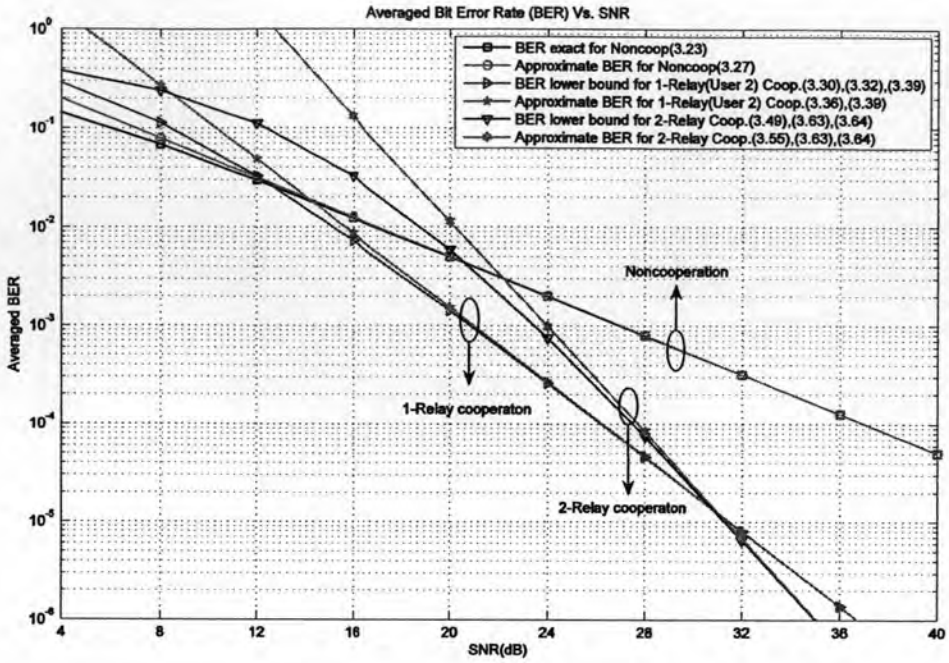
ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตในการจำลองระบบที่นำเสนอเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดและเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณ ของการส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทาง สำหรับในการจำลองระบบจะพิจาณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 3.5KHz ค่าอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 1 Mbps และกำลังส่งสัญญาณรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบเท่ากับ 1 สำหรับในหัวข้อนี้จะพิจารณากำลังส่งสัญญาณของผู้ใช้งานแต่ละคนทั้งหมด 2 แบบ คือ แบบแรกจะกำหนดให้ผู้ใช้งานแต่ละคนมีกำลังส่งเท่ากัน และแบบที่สองจะมีการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคน การจำลองระบบในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่าแวเรียนซ์ระหว่างช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 แสดงการกำหนดค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่องสำหรับการจำลองระบบที่นำเสนอ

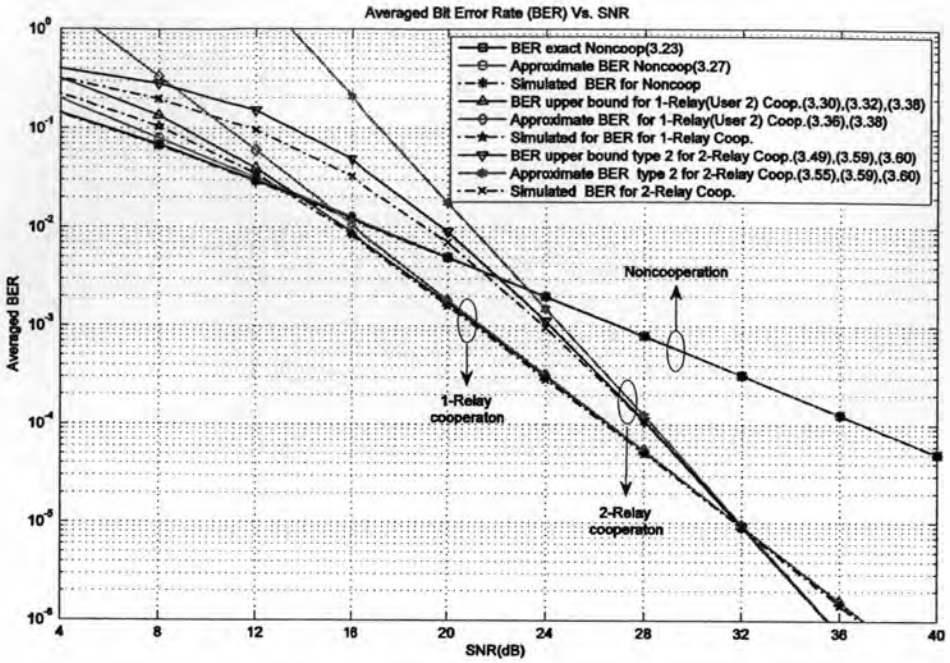


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณแบบขอบเขตบน

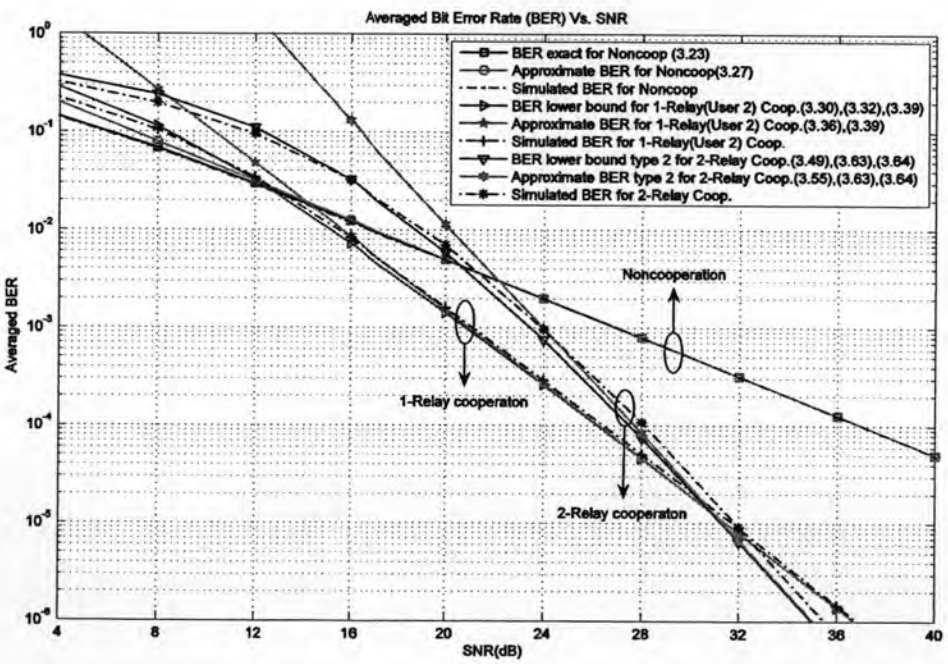


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดเทียบกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณแบบขอบเขตล่าง

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดและค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณ ทั้งแบบขอบเขตบนและแบบเขตล่าง ตามลำดับ จากรูปพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณมีค่าใกล้เคียงและเท่ากับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาด ณ ตำแหน่งที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน มีค่าเท่ากับ 16 เดซิเบล 24 เดซิเบล และ 32 เดซิเบล สำหรับการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน และ การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาด โดยประมาณแบบขอบเขตบนเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบ



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาด โดยประมาณ แบบขอบเขตล่างเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบ

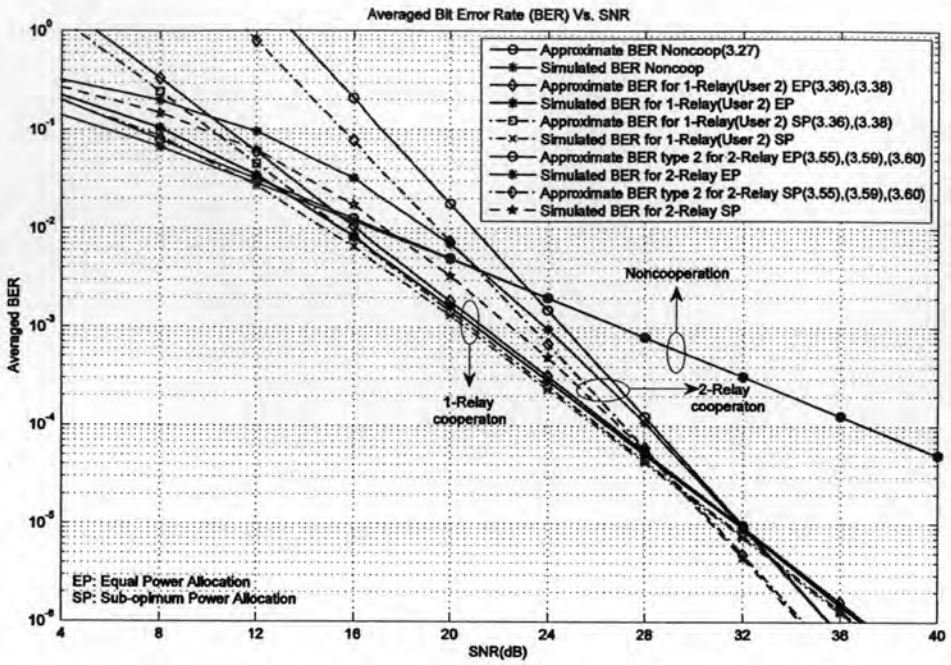
จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดและค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบของการส่งสัญญาณในเส้นทางต่างๆ โดยพิจารณาทั้งแบบขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ตามลำดับ จากรูปพบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการจำลองระบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณ เช่นเดียวกับการทำลองในหัวข้อ 4.2.1 ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณแบบขอบเขตบน เพื่อนำไปใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณ การเลือกจำนวนและการระบุผู้ใช้งานที่จะทำหน้าที่เป็น Relay ในโพรโทคอลแบบปรับตัว สำหรับการทดลองหัวข้อต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดโดยประมาณ มีสมการการคำนวณที่ไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูล ดังนั้นหากมีการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมก็จะส่งผลทำให้สมรรถนะโดยรวมของระบบดีขึ้น สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาระบบการสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย ทำให้กรรมวิธีการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้ศึกษากรรมวิธีการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมของระบบสื่อสารแบบร่วมนัยเป็นบรรทัดฐาน ซึ่งเรียกการจัดสรรกำลังส่งแบบนี้ว่า การจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสม ซึ่งได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 3.4 และจากการทดลองในหัวข้อนี้ กำหนดให้การจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานทั้งหมดในระบบที่นำเสนอ สามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

1.การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ กำหนดให้มีการจัดสรรกำลังส่งย่อย เท่ากับ $P = P_1 = 1\ W$

2.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1คน กำหนดให้มีการจัดสรรกำลังส่งย่อยเท่ากับ $P = P_1 + P_2 = 1\ W$ โดยที่ P_1=0.65 W และ P_2=0.35 W ตามลำดับ

3.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน กำหนดให้มีการจัดสรรกำลังส่งย่อยเท่ากับ $P = P_1 + P_2 + P_3 = 1\ W$ โดยที่ P_1=0.6 W , P_2=0.15 W และ $P_3 = 0.25\ W$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาด โดยประมาณเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการจำลองระบบ สำหรับกรณีการจัดสรรกำลังส่งเท่ากันและการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.12 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือแล้ว ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลจะมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลทำให้สมรรถนะโดยรวมของระบบที่นำเสนอดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ณ ตำแหน่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-4} จะพบว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการส่งสัญญาณแบบมีการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมนั้นมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการส่งสัญญาณแบบกำหนดกำลังส่งเท่ากัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 0.6 เดซิเบล สำหรับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1คน และน้อยกว่าเท่ากับ 1.3 เดซิเบล สำหรับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน

จากการทดลองในหัวข้อนี้พบว่าการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบสื่อสารแบบร่วมมือนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในแต่ละช่องสามารถสรุปได้ดังคือ ช่องสัญญาณใดที่มีค่าแวเรียนซ์น้อย ระบบจะจัดสรรกำลังส่งให้กับผู้ใช้งานเพื่อส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณนั้นมีค่ามาก ในทางกลับกันหากช่องสัญญาณใดมีค่าแว

เรียนซ์มากระบบก็จะจัดสรรกำลังส่งให้กับผู้ใช้งานเพื่อส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณนั้นให้มีค่าน้อย ดังเช่นการทดลองในหัวข้อนี้

1.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1คน

- ค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าเป็น Relay มีค่าเท่ากับ $\delta_{SR}^2=1$ ระบบได้จัดสรรกำลังส่งสำหรับผู้ใช้คนที่ 1 เท่ากับ $P_1=0.65\ W$

- ค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นRelay และเครื่องรับปลายทางมีค่าเท่ากับ $\delta_{RD}^2=10$ ระบบได้จัดสรรกำลังส่งสำหรับผู้ใช้คนที่ 2 เท่ากับ $P_2=0.35\ W$

2.การส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน

- ค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าเป็น Relay มีค่าเท่ากับ $\delta_{SR}^2=1$ ระบบได้จัดสรรกำลังส่งสำหรับผู้ใช้คนที่ 1 เท่ากับ $P_1=0.6\ W$

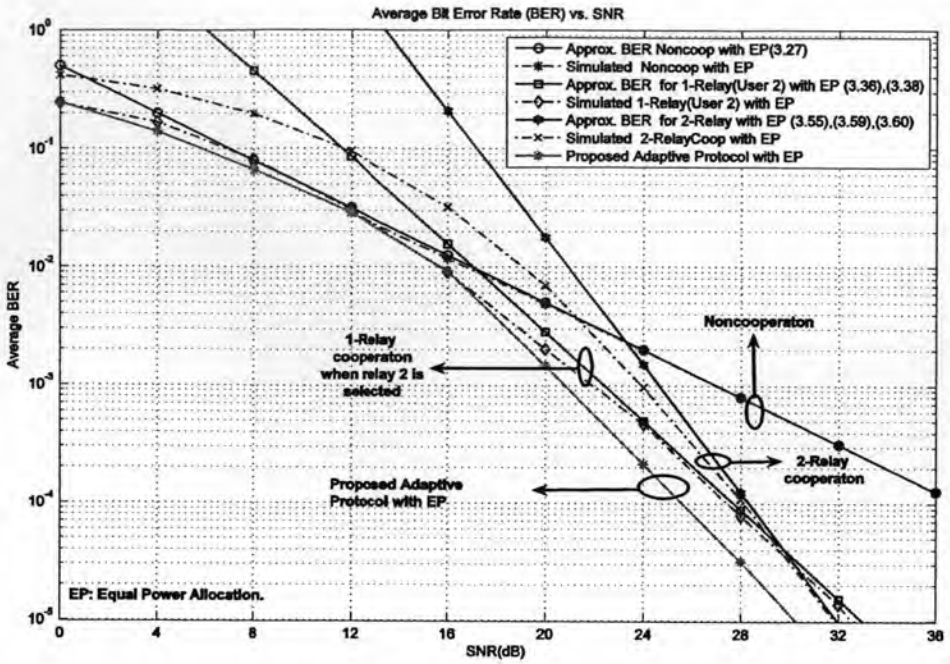
- ค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay 1 และเครื่องรับปลายทางมีค่าเท่ากับ $\delta_{R_1D}^2=10$ ระบบได้จัดสรรกำลังส่งสำหรับผู้ใช้คนที่ 2 เท่ากับ $P_2=0.15\ W$

- ค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay 2 และเครื่องรับปลายทางมีค่าเท่ากับ $\delta_{R_2D}^2=5$ ระบบได้จัดสรรกำลังส่งสำหรับผู้ใช้คนที่ 3 เท่ากับ $P_3=0.25\ W$

4.3 สมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอจากการใช้โพรโทคอลแบบปรับตัว

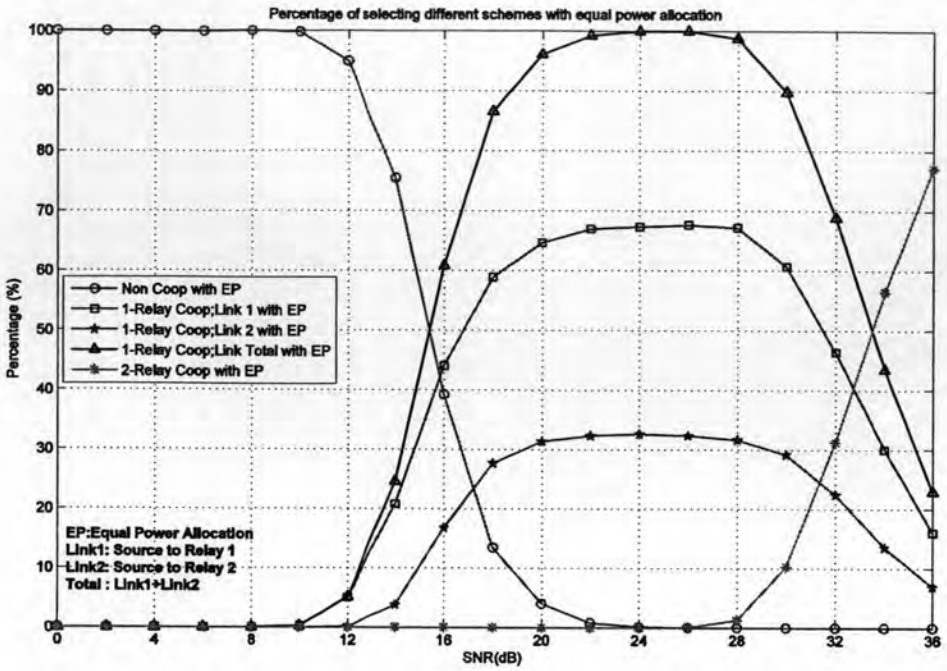
ในหัวข้อนี้จะพิจารณาสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอโดยการจำลองระบบเพื่อหาค่าอัตราส่วนความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลจากการนำโพรโทคอลแบบปรับตัวมาใช้งาน เพื่อทำหน้าที่เลือกเส้นทางการส่งสัญญาณข้อมูล เลือกจำนวนและระบุผู้ใช้งานที่จะทำหน้าที่เป็น Relay ในการช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ภายใต้ช่องสัญญาณที่มีการเกิดเฟดดิงราบแบบเรย์ลี เทียบกับค่าอัตราส่วนความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลที่ได้จากระบบที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางการส่งสัญญาณในหัวข้อที่ 4.2

การจำลองระบบในหัวข้อนี้จะพิจาณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์แบบบรรทัดฐานมีค่าเท่ากับ 0.0035 ค่าอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 30,000 bps ค่าความถี่ดอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 105 Hz จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำหรับการปรับตัวในแต่ละช่วงเวลามีค่าเท่ากับ $R_B \cdot n$ โดยที่ R_B คือจำนวนบิตข้อมูลใน 1 คาบเวลาร่วมนัย ซึ่งจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังข้างต้น $R_B = 288$ และค่า n คือจำนวนค่าคงที่เต็มบวกสำหรับการปรับตัว การจำลองระบบในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่า $n = 1$ และพิจารณากำลังส่งสัญญาณของผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแรกจะจัดสรรให้ผู้ใช้งานแต่ละคนมีกำลังส่งเท่ากัน และแบบที่สองจะมีการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคน สำหรับค่าแวเรียนซ์ระหว่างช่องสัญญาณแต่ละช่องในการจำลองระบบในหัวข้อนี้จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับตัว

จากรูปที่ 4.13 จะแสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับตัวเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 จะเห็นว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งนั่นก็หมายความโพรโทคอลแบบปรับสามารถทำให้สมรรถนะของระบบที่นำเสนอดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ณ ตำแหน่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-4} จะพบว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ใช้ในโพรโทคอลแบบปรับตัวมีค่าน้อยกว่า 11 เดซิเบล เมื่อเทียบกับการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ มีค่าน้อยกว่า 2 เดซิเบล เมื่อเทียบกับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1คน และน้อยกว่า 3 เดซิเบล เมื่อเทียบกับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำงานของโพรโทรคอลแบบปรับตัวจะทำการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดของการส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทาง โดยจะเลือกเส้นทางที่มีค่าความน่าจะเป็นของการตัดสินบิตข้อมูลผิดพลาดที่มีค่าน้อยที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งการเลือกเส้นทางดังกล่าวจะทำให้ระบบมีอัตราขยายไดเวอร์ซิตีเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับตัวนี้มีค่าลดลง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางสำหรับการส่งสัญญาณของโพรโทคอลแบบปรับตัว

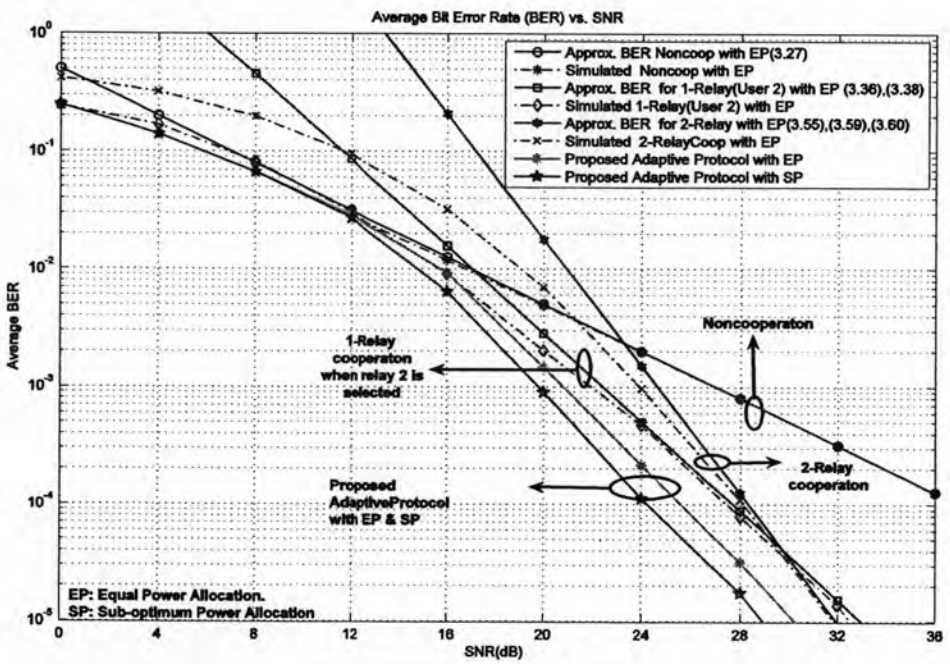
จากรูปที่ 4.14 จะแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทาง การเลือกจำนวนและระบุผู้ใช้งานที่จะทำหน้าที่เป็น Relay เพื่อช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับในโพรโทคอลแบบปรับตัว จะสังเกตุว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการทำงานของโพรโทรคอลแบบปรับตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยกว่า 10 เดซิเบล โพรโทคอลแบบปรับตัวจะเลือกการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ เพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น

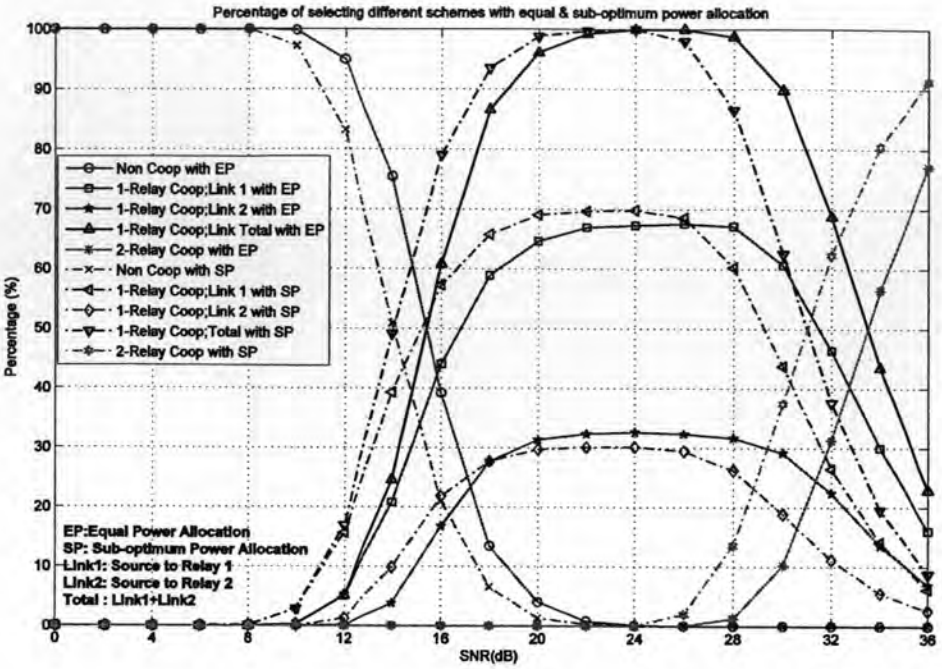
2. เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากว่า 10 เดซิเบล จะพบว่าการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คนจะถูกเลือกใช้งานร่วมกับการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือและเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราร้อยละของจำนวนการเลือกการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือมีค่าลดลงจนกระทั่งค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่า 26 เดซิเบล จะพบว่าโพรโทคอลแบบปรับตัวจะเลือกการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน เพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น

3. เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากกว่า 26 เดซิเบล จะพบว่าการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คนจะถูกเลือกใช้งานร่วมกับการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คนและเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราร้อยละของจำนวนการเลือกการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน มีค่าลดลง ในขณะเดียวกันอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน จะมีค่าสูงขึ้น

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูล



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทรคอลแบบปรับตัว ในกรณีที่มีการจัดสรรกำลังส่งเท่ากันและการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมให้กับผู้ใช้งานในระบบ

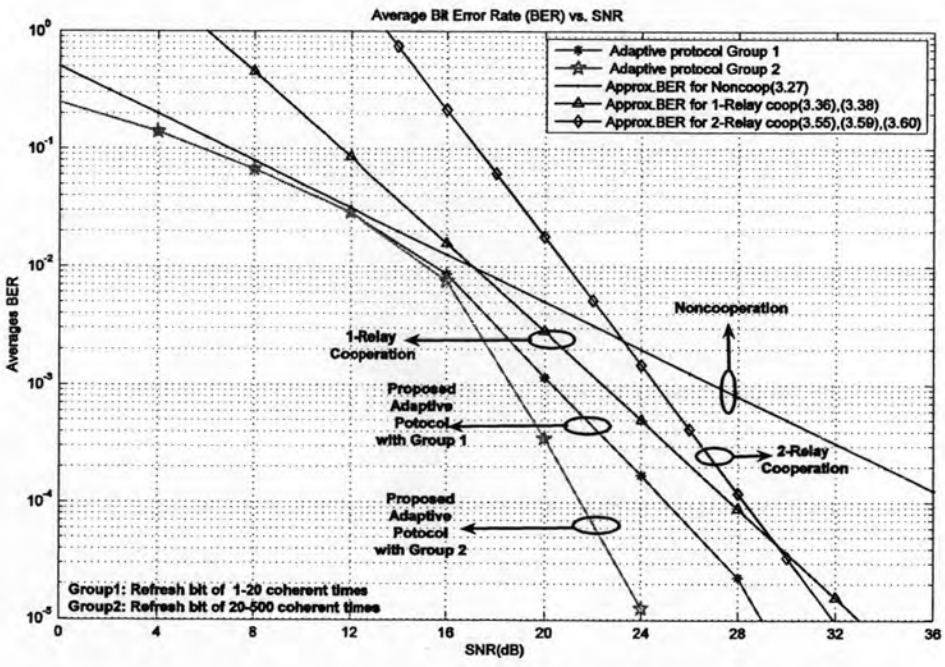


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางสำหรับการส่งสัญญาณในโพรโทคอลแบบปรับตัวในกรณีที่มีการจัดสรรกำลังส่งเท่ากันและการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมให้กับผู้ใช้งานในระบบ

จากรูปที่ 4.15 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือแล้ว ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลจะมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลทำให้สมรรถนะโดยรวมของระบบที่นำเสนอดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ณ ตำแหน่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-4} จะพบว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการส่งสัญญาณแบบมีการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมนั้นมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการส่งสัญญาณแบบกำหนดกำลังส่งเท่ากัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 1.5 เดซิเบล

จากรูปที่ 4.16 จะแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทาง เลือกจำนวนและระบุผู้ใช้งานที่จะทำหน้าที่เป็น Relay เพื่อช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับในโพรโทคอลแบบปรับตัว ในกรณีที่มีการจัดสรรกำลังส่งเท่ากันและการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมให้กับผู้ใช้งานในระบบจะสังเกตุได้ว่าอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางในกรณีการจัดสรรกำลังส่งย่อยที่เหมาะสมจะเลือกใช้งานในช่วงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยกว่าประมาณ 2 เดซิเบล เมื่อเทียบกับการเลือกใช้งานในกรณีที่มีการจัดสรรกำลังส่งเท่ากัน สำหรับการส่งสัญญาณในทุกเส้นทาง

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอโดยการนำโพรโทคอลแบบปรับตัวมาใช้งาน สามารถแบ่งการพิจาณาค่า n ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 มีค่าเท่ากับ $1 \le n < 20$ และ กลุ่มที่ 2 มีค่าเท่ากับ $20 \le n < 500$ ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะพิจารณาค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มและพิจาณาในกรณีที่มีการจัดสรรกำลังส่งเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งค่า 12 เดซิเบล และจะเห็นได้ว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตในการส่งข้อมูลของจำนวน n ในกลุ่มที่ 2 ($20 \le n < 500$) จะมีค่าต่ำกว่า จำนวนของ n ในกลุ่มที่ 1 ($1 \le n < 20$) ทั้งนี้เนื่องจากโพรโทคอลแบบปรับตัวใช้จำนวนครั้งของการปรับตัวในการส่งข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่าจึงส่งผลให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้มีค่าต่ำกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทรคอลแบบปรับตัว ในกรณีพิจารณาแบ่งค่า n ออกเป็น 2 กลุ่ม

4.4 ขีดจำกัดสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงขีดจำกัดของสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ โดยการจำลองระบบเพื่อหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูล จากการนำโพรโทคอลแบบปรับตัวมาใช้งาน โดยจะกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้มีค่าคงที่และทำการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่องให้มีค่ามากขึ้น เพื่อศึกษาถึงขีดจำกัดและเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่ได้จากการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในแต่ละช่อง ซึ่งในทางปฏิบัติการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณก็หมายถึงการลดระยะทางระหว่างผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบนั่นเอง

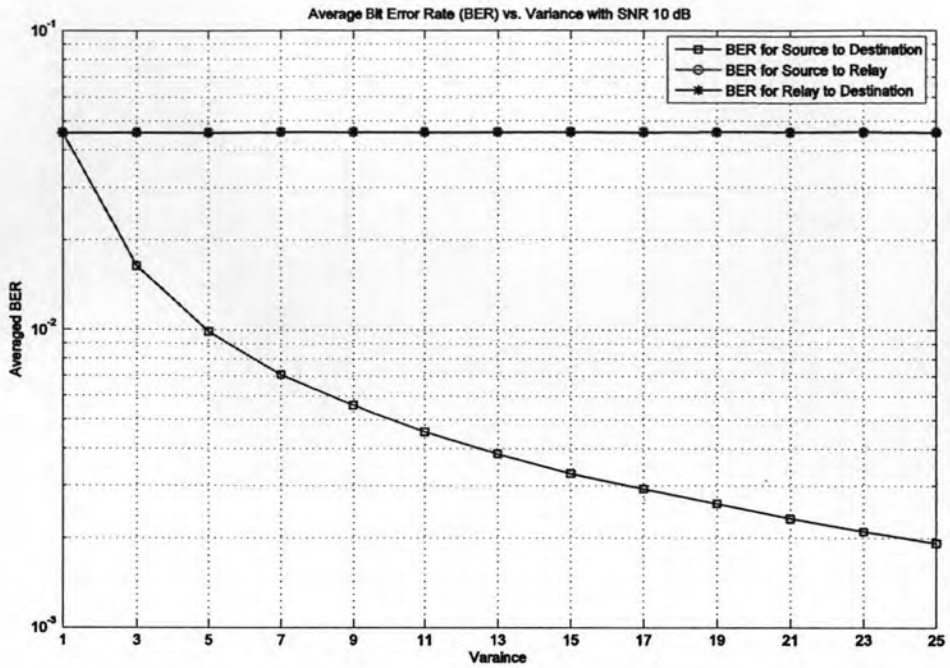
การจำลองระบบในหัวข้อนี้จะกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าคงที่เท่ากับ 10 เดซิเบล 20 เดซิเบล 30 เดซิเบล และ 40 เดซิเบล ตามลำดับ และเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่องมีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง 25 และพิจาณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์แบบบรรทัดฐานมีค่าเท่ากับ 0.0025 ค่าอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 30,000 bps ค่าความถี่ดอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 75 Hz จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำหรับการปรับตัวในแต่ละช่วงเวลามีค่าเท่ากับ $R_B \cdot n$ โดยที่ R_B คือจำนวนบิตข้อมูลใน 1 คาบเวลาร่วมนัย ซึ่งจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังข้างต้น $R_B = 396$ และค่า n คือค่าคงที่จำนวนเต็มบวกสำหรับการปรับตัว การจำลองระบบในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่า $n = 2$ และพิจารณาการจัดสรรกำลังส่งสัญญาณของผู้ใช้งานแต่ละคนในระบบเท่ากัน

จากการจำลองระบบในหัวข้อนี้จะทำการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่องซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

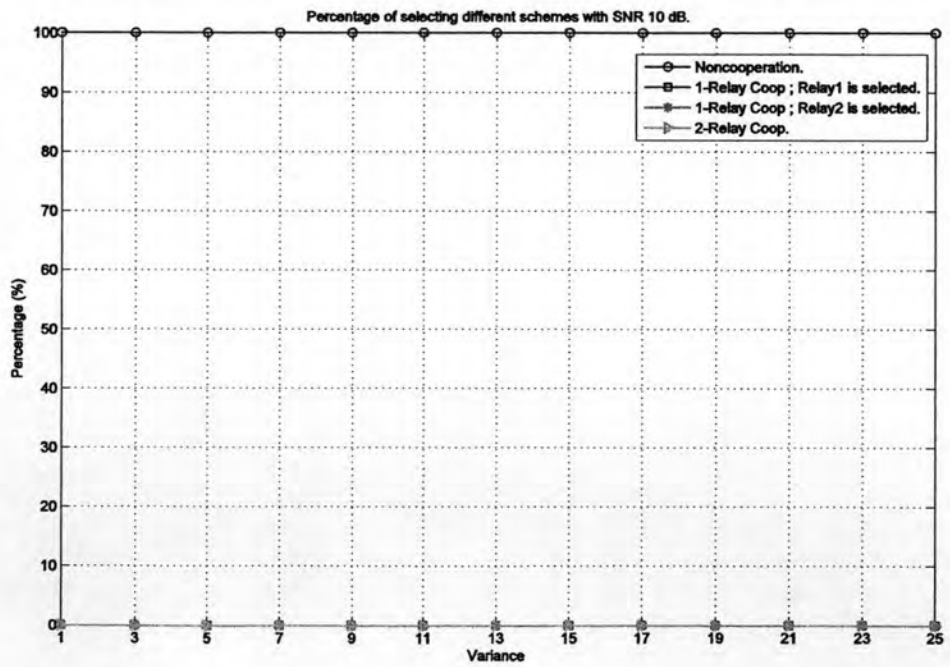
1. การเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1(เครื่องส่ง) กับเครื่องรับ สำหรับค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณอื่นๆ นั้น กำหนดให้มีค่าเท่ากับ1

2. การเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 (เครื่องส่ง) กับผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay 1) สำหรับค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณอื่นๆ นั้น กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

3. การเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 (Relay1) กับเครื่องรับ สำหรับค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณอื่นๆ นั้น กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

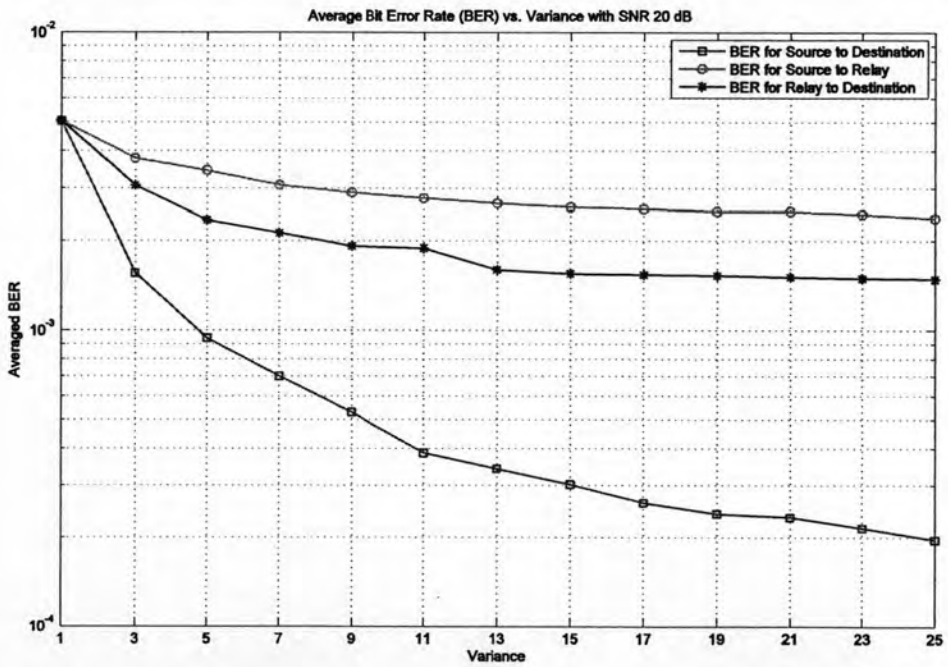


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่นำเสนอ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 10 เดซิเบล



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 10 เดซิเบล

จากรูปที่ 4.18 จะแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีคงที่มีค่าเท่ากับ 10 เดซิเบล และจากการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่อง จะเห็นได้ว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่มีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่1 กับเครื่องรับให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นเพียงกรณีเดียวเท่านั้น สำหรับในส่วนของกรณีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1กับผู้ใช้งานคนที่ 2 และระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 กับเครื่องรับนั้น ค่าอัตราความผิดพลาดบิตไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยจึงส่งผลทำให้โพรโทคอล แบบปรับตัวทำการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ ใช้งานเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในเส้นทางอื่นๆ จึงไม่มีผลต่อค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบ



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่นำเสนอ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 20 เดซิเบล

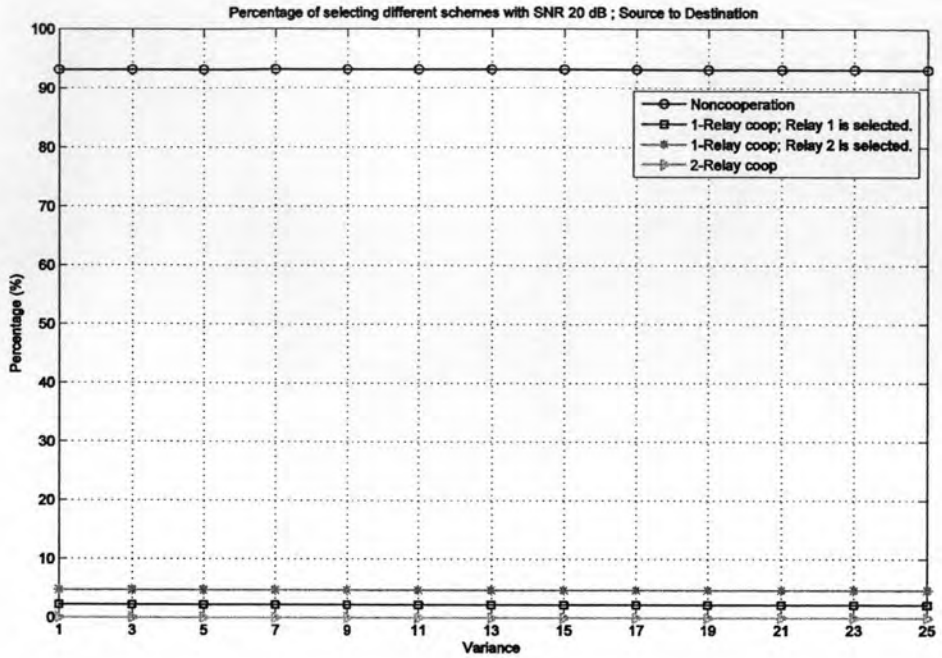
จากรูปที่ 4.20 จะแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีคงที่มีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบล และจากการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่อง สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่1 กับเครื่องรับให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในเส้นทางอื่นๆ

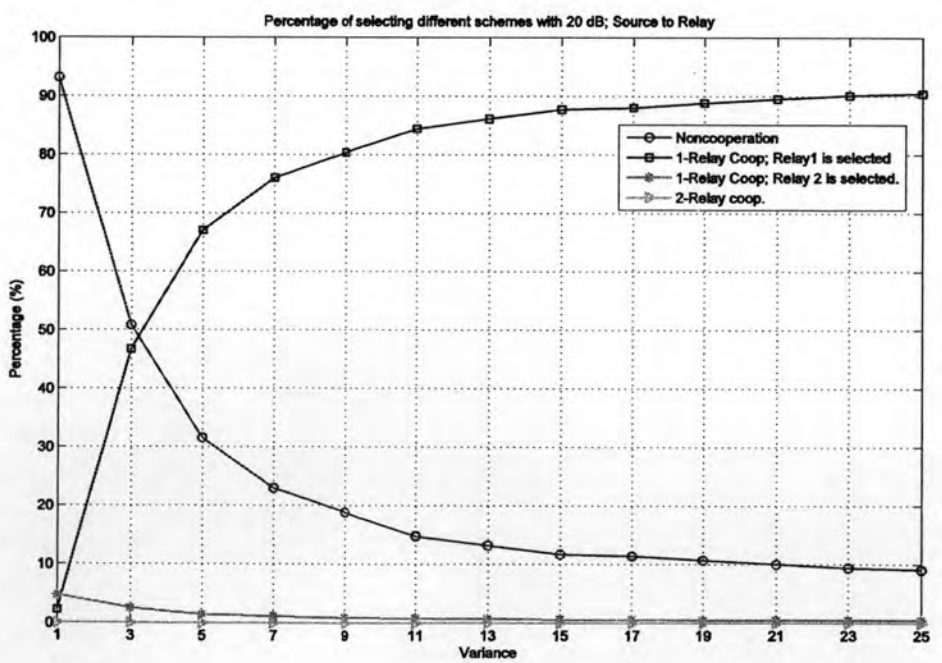
2. เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่1 กับผู้ใช้งานคนที่ 2 ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบมีค่าลดลง ซึ่งมีอัตราปริมาณการลดลงน้อยและเมื่อค่าแวเรียนซ์มีค่าเท่ากับ 15 จะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในกรณีนี้จะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณในเส้นทางอื่นๆ

3. เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 กับเครื่องรับให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบมีค่าลดลงเช่นกันและมีอัตราการลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1กับผู้ใช้งานคนที่ 2 และเมื่อค่าแวเรียนซ์มีค่าเท่ากับ 13 จะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณจะส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าลดลง ซึ่งเสมือนกับว่าเป็นการลดระยะทางระหว่างผู้ใช้งานให้มีระยะทางลดลง จากผลการทดลองพบว่า ถ้าระยะทางระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับเครื่องรับมีระยะทางใกล้กันก็จะส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าลดลง และการส่งสัญญาณก็ไม่จำเป็นต้องมีการส่งสัญญาณโดยให้ผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ

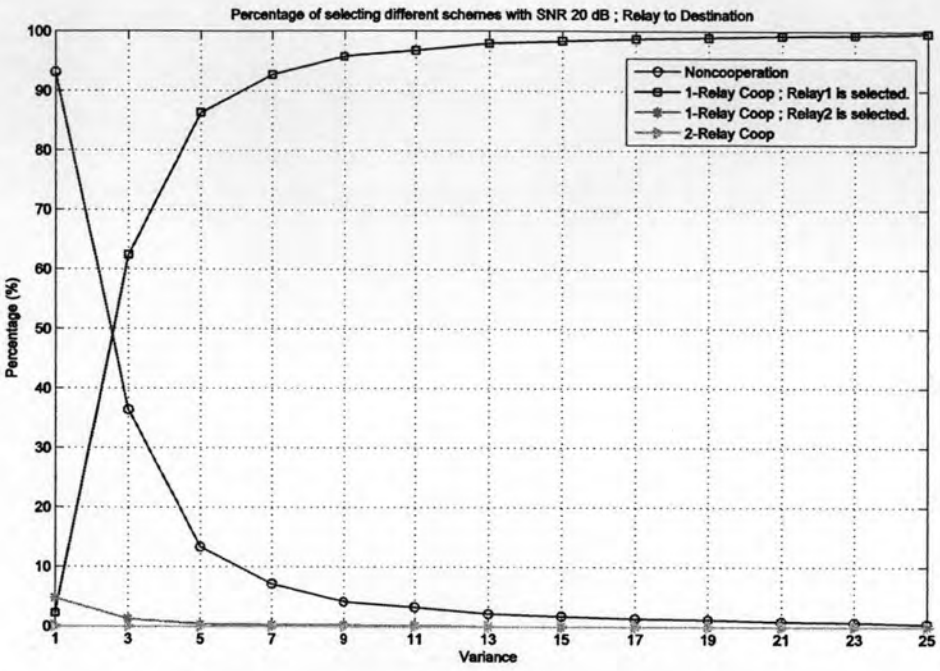


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับเครื่องรับ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว

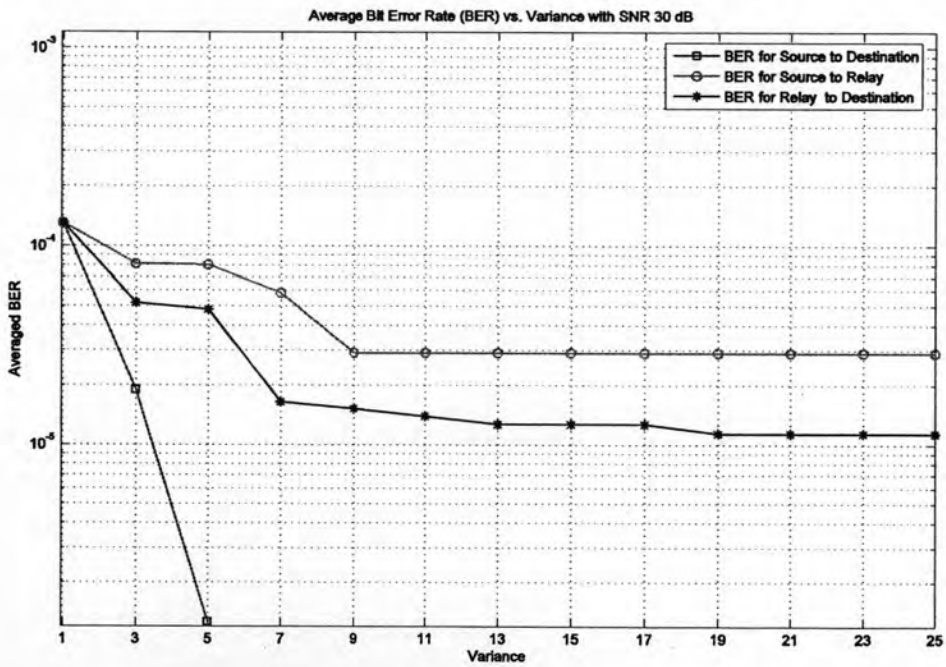
เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้งานคนที่ 2



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 กับเครื่องรับ

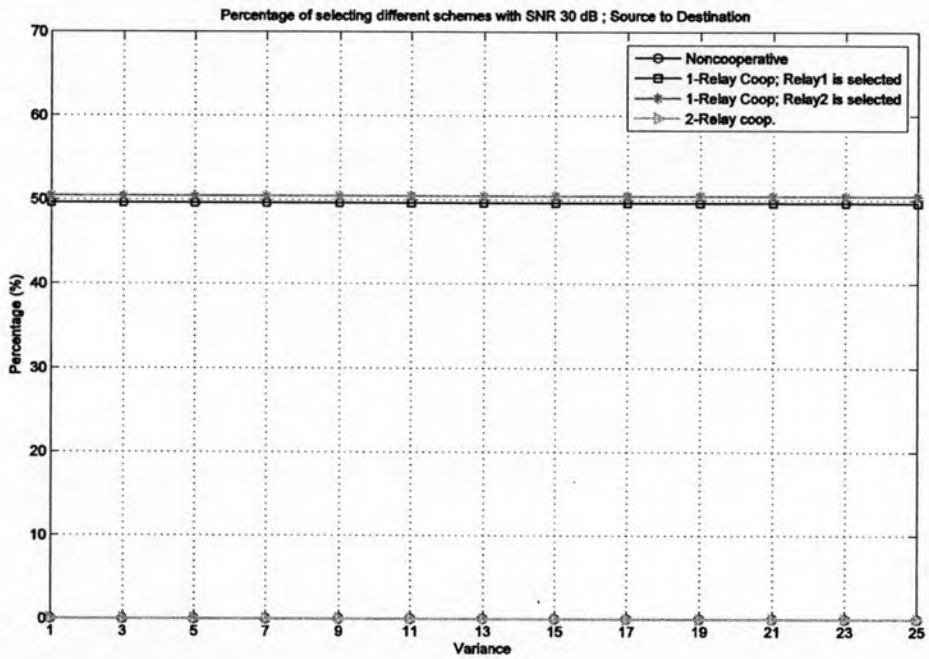
จากรูปที่ 4.21 จะแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณของโพรโทคอลแบบปรับตัว สำหรับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่1 กับเครื่องรับ จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลแบบปรับตัวจะเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือในอัตราร้อยละ 93 เลือกการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน กรณีเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay ในอัตราร้อยละ 5 และเลือกการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน กรณีเลือกผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay ในอัตราร้อยละ 2 และเมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณให้มีค่าสูงขึ้นก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณ

จากรูปที่ 4.22 - 4.23 จะแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณของโพรโทคอลแบบปรับตัว สำหรับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้คนที่ 2 และผู้ใช้คนที่ 1 กับเครื่องรับ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น โพรโทคอลแบบปรับตัวจะมีอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน มากกว่า การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ และในทางกลับกัน อัตราร้อยละของจำนวนการเลือกการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือจะมีค่าลดลง สำหรับในกรณีที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบลนี้ โพรโทคอลแบบปรับตัวจะไม่เลือกการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน ในการใช้งานเนื่องจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยจึงไม่เหมาะสมในการส่งสัญญาณในเส้นทางนี้

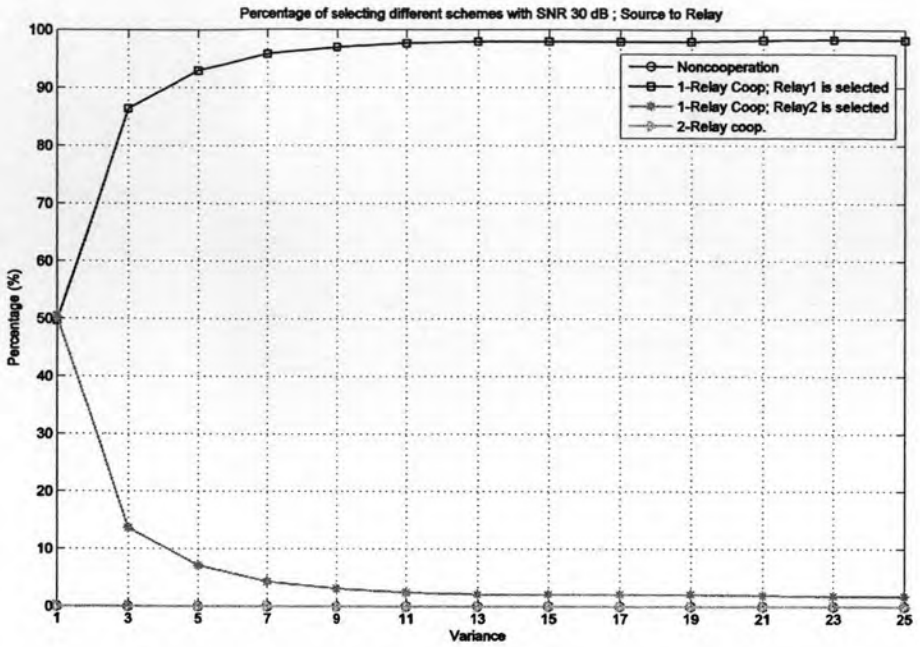


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่นำเสนอ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 30 เดซิเบล

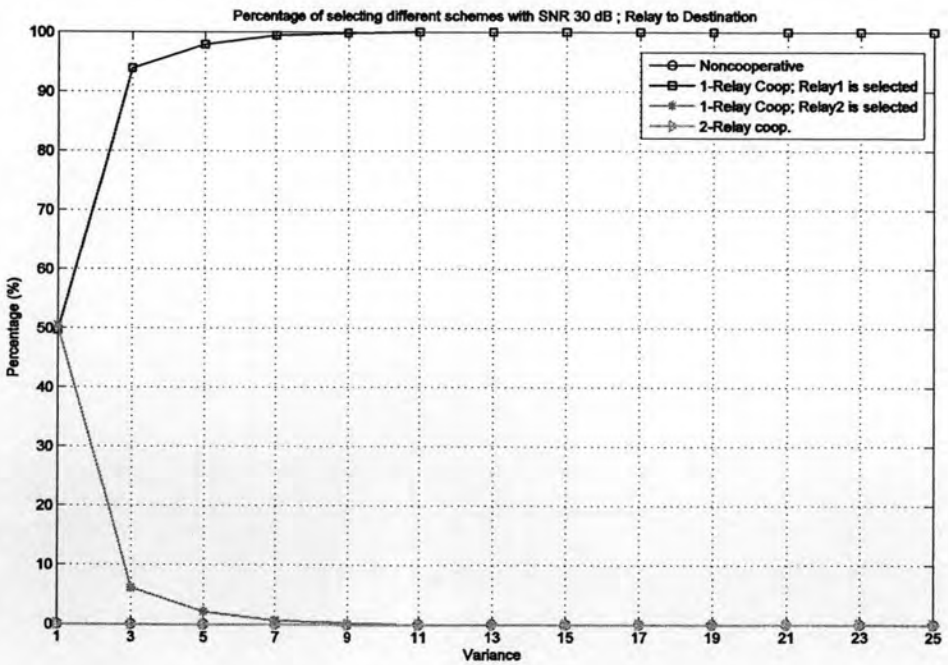
จากรูปที่ 4.24 จะแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีคงที่มีค่าเท่ากับ 30 เดซิเบล และจากการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่อง จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคุณสมบัติทั่วไปคล้ายกับการทดลองในกรณีที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบล เพียงแต่การทดลองนี้จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า และมีขีดจำกัดของการเพิ่มค่าแวเรียนซ์น้อยกว่า ดังเช่น มีขีดจำกัดของการเพิ่มค่าแวเรียนซ์มีค่าเท่ากับ 9 สำหรับช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้งานคนที่ 2 และมีขีดจำกัดของการเพิ่มค่าแวเรียนซ์มีค่าเท่ากับ 13 สำหรับช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 กับเครื่องรับ



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 30 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับเครื่องรับ



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 30 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้งานคนที่ 2

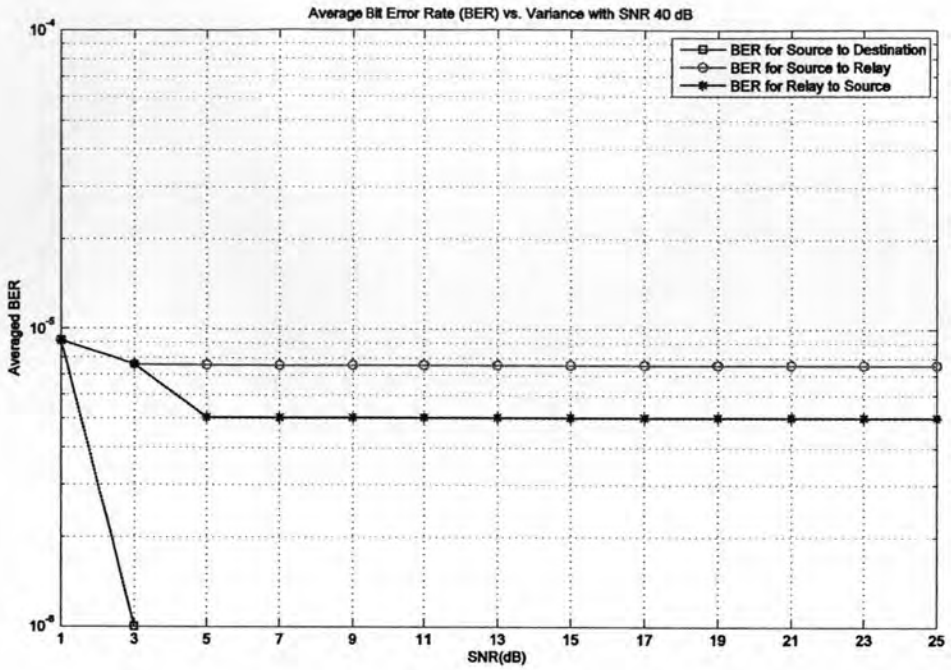


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว

เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 30 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 กับ เครื่องรับ

จากรูปที่ 4.25 จะแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณของโพรโทคอลแบบปรับตัว สำหรับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่1 กับเครื่องรับ จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลแบบปรับตัวจะเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน เท่านั้น โดยเลือกกรณีผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay ในอัตราร้อยละ 49 และเลือกกรณีผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay ในอัตราร้อยละ 51 และเมื่อค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณเพิ่มสูงขึ้นก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณ

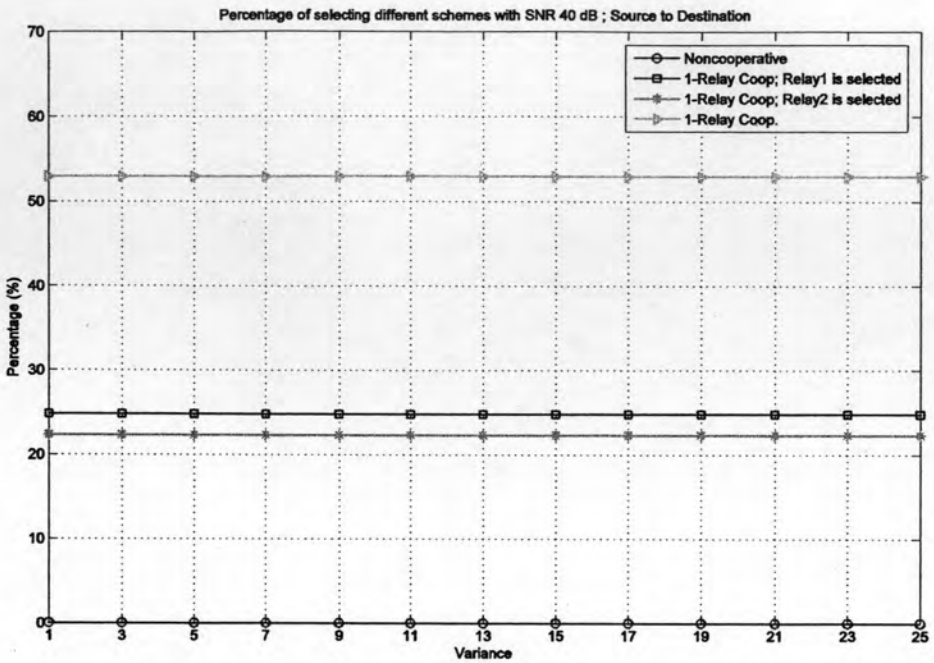
จากรูปที่ 4.26- 4.27 จะแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณของโพรโทคอลแบบปรับตัว สำหรับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้คนที่ 2 และผู้ใช้คนที่ 1 กับเครื่องรับ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น โพรโทคอลแบบปรับตัวจะทำการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน ในเลือกกรณีผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay มากกว่า เลือกกรณีผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay ในมีอัตราร้อยละ 98 ดังรูปที่ 4.26 และในรูปที่ 4.27 เมื่อค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณมีค่ามากกว่า 9 ขึ้นไป โพรโทคอลแบบปรับจะเลือกกรณีผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay ใช้งานเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น สำหรับในกรณีที่กำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 30 เดซิเบลนี้ โพรโทคอลแบบปรับตัวจะไม่เลือกการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือและการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คนใช้งาน เนื่องจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในช่วงนี้มีค่าไม่เหมาะสมสำหรับการส่งสัญญาณในเส้นทางทั้ง 2 รูปแบบนี้



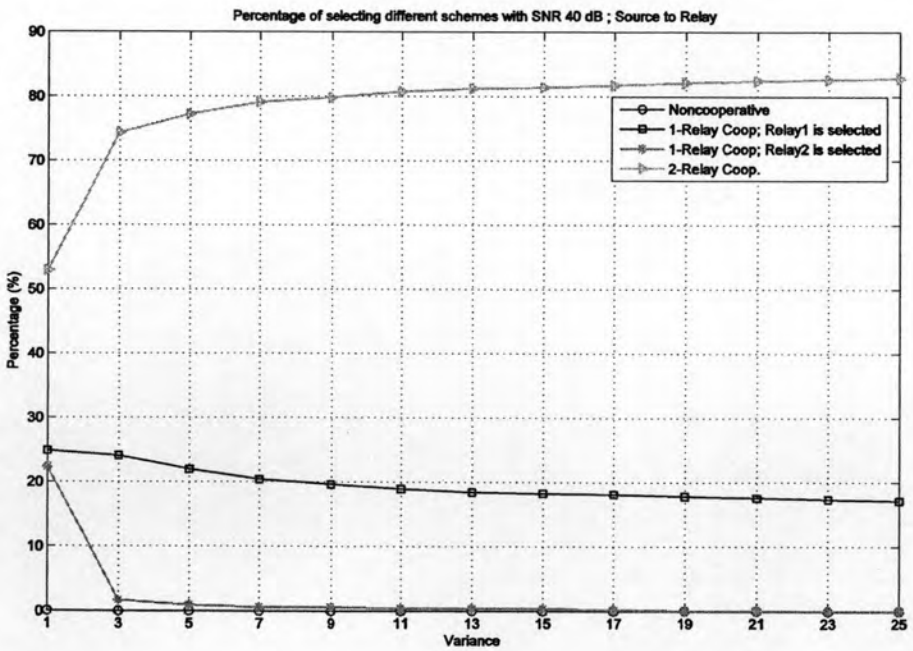
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่นำเสนอ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 40 เดซิเบล

จากรูปที่ 4.28 จะแสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีคงที่มีค่าเท่ากับ 40 เดซิเบล และจากการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณแต่ละช่อง จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคุณสมบัติทั่วไปคล้ายกับการทดลองในกรณีที่กำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 20 เดซิเบล และ 30 เดซิเบล เพียงแต่การทดลองนี้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า และมีขีดจำกัดของการเพิ่มค่าแวเรียนซ์น้อยกว่า ดังเช่น มีขีดจำกัดของการเพิ่มค่าแวเรียนซ์มีค่าเท่ากับ 3 สำหรับช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้งานคนที่ 2 และ มีขีดจำกัดของการเพิ่มค่าแวเรียนซ์มีค่าเท่ากับ 5 สำหรับช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 กับเครื่องรับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

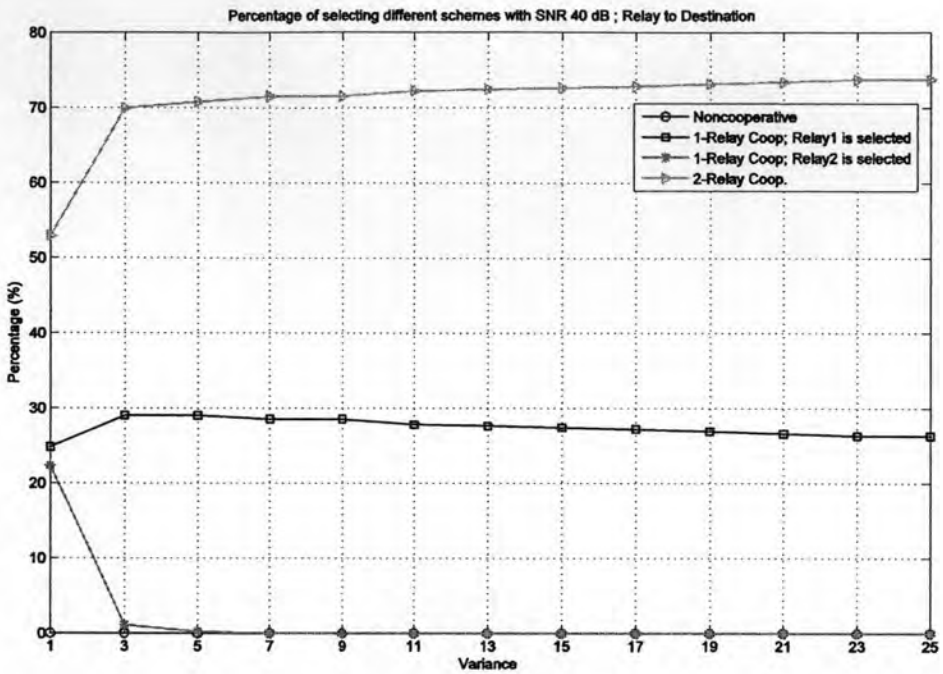


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 40 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับ เครื่องรับ



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว

เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 40 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้งานคนที่ 2



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลแบบปรับตัว เมื่อกำหนดให้ค่าอัตารส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 40 เดซิเบล เมื่อมีการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 2 กับเครื่องรับ

จากรูปที่ 4.29 จะแสดงอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณของโพรโทคอลแบบปรับตัว สำหรับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่1 กับเครื่องรับ จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลแบบปรับตัวจะเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน โดยเลือกกรณีผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay ในอัตราร้อยละ 25 และเลือกกรณีผู้ใช้งานคนที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Relay ในอัตราร้อยละ 22 และเลือกการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ คน ในอัตราร้อยละ 53 และเมื่อค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณเพิ่มสูงขึ้นก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณ

จากรูปที่ 4.30- 4.31 จะแสดงจำนวนอัตราร้อยละของการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณของโพรโทคอลแบบปรับตัว สำหรับการเพิ่มค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานคนที่ 1 กับผู้ใช้คนที่ 2 และผู้ใช้คนที่ 1 กับเครื่องรับ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าแวเรียนซ์ของช่องสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น โพรโทคอลแบบปรับตัวจะมีอัตราร้อยละของจำนวนการเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 2 คน มากกว่า การเลือกเส้นทางการส่งสัญญาณโดยที่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คนในกรณีเลือกผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay สำหรับในกรณีที่กำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 30 เดซิเบลนี้ โพรโทคอลแบบปรับตัวจะไม่เลือกการส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือใช้งาน เนื่องจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงจึงไม่เหมาะสมในการส่งสัญญาณในเส้นทางนี้