การวิเคราะห์ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การส่งผ่านสัญญาณแบบถอดรหัสและส่งต่อด้วยการเฟดแบบรายย์เลย์

Analysis of Decode-and-Forward Cooperative Communications with Rayleigh Fading

จิณห์วรา กรัณย์วิทยาการ สุวิพล สิทธิชีวภาค

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การส่งผ่านแบบถอดรหัสและส่งต่อในช่องสัญญาณที่มีการเฟดแบบรายย์เลย์ โดยในการทดลองนี้จะกำหนดให้ช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นอิสระต่อกัน และการรับ-ส่งข้อมูลจะกำหนดให้ไม่มีการรบกวนกันระหว่างรีเลย์ ซึ่งจะเห็นว่าการส่งสัญญาณในแต่ละช่วงมีความเป็นออร์โทกอนัลกัน นอกจากนี้ยังมีการหาค่าอัตราการผิดพลาดสัญลักษณ์ของการสื่อสารแบบร่วมมือโดยใช้การมอดูเลตแบบ MPSK และความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายในช่องสัญญาณที่มีการเฟดแบบรายย์เลย์ รวมถึงการหาค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ปลายทาง

คำสำคัญ : การสื่อสารแบบร่วมมือ , โปรโตคอลแบบถอดรหัสและส่งต่อ, อัตราความผิดพลาดสัญลักษณ์, การจางหายแบบรายย์เลย์

Abstract

This paper presents the analysis of decode and forward (DF) cooperative communications with rayleigh fading channel. In this simulation, we also fix the channel links to be totally independent and no inter-relay interference is considered in the system. From the result, we found that transmission in every parts is orthogonal. Besides, we also derived the symbol error rate (SER) of M-ary phase shift keying (MPSK) and outage probability of lose signal in Rayleigh fading. Analysis results show the probability of end-to-end signal to noise ratio (SNR)

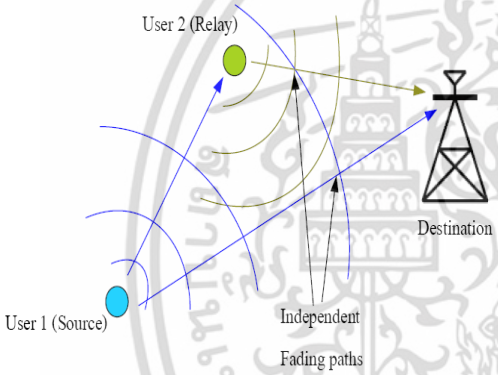
Keywords : Cooperative Communication, Decode And Forward Protocol, Symbol Error Rate, Rayleigh Fading

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีของระบบสื่อสาร ได้มีการพัฒนาออกมาหลากหลายรูปแบบเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เรื่องของความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ได้ หรือจะเป็นเรื่องของคุณภาพ ความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีในระบบ ทั้งนี้ก็เพื่อรองรับกับความต้องการในการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียงและข้อมูลสื่อสารอื่นๆในอนาคต ในบทความนี้ได้นำเสนอหลักการของระบบการสื่อสารแบบร่วมมือ (Cooperative Communications) ซึ่งเป็นเทคนิคการส่งต่อข้อมูลหรือรีเลย์(Relaying) โดยให้ผู้ใช้งานคนอื่นๆในระบบ ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง ซึ่งจะทำให้เกิดระบบการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบหลายทางเข้า-ออกเสมือน (Virtual MIMO) ขึ้นมา เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณหรือไดเวอร์ซิตี้ในระบบ (Diversity Gain) ให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราความผิดพลาดของการตัดสินบิตข้อมูล (Bit Error Rate : BER) ของระบบโดยรวมลดลง และรีเลย์โหนดจะใช้โปรโตคอลถอดรหัสและส่งต่อ (Decode And Forward : DF) เพื่อส่งข้อมูลไปที่โหนดปลายทาง และในบทความนี้ยังแสดงค่าอัตราความผิดพลาดสัญลักษณ์ (Symbol Error Rate; SER) ของการสื่อสารแบบร่วมมือโดยใช้การมอดูเลตแบบ MPSK , ค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายในช่องสัญญาณที่มีการเฟดแบบรายเลย์และค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ปลายทาง [2]



รูปที่ 1 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ (Cooperative Communications)

เป็นการส่งข้อมูลจากต้นทาง ผ่านโหนดรีเลย์ไปยังปลายทาง ซึ่งการช่วยส่งต่อสัญญาณจะทำให้เพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี้(Diversity Gain) ขึ้นเหมือนในระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple Input Multiple Output : MIMO) และส่งผลให้ค่าอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มพิสัย (Range)ในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสาร เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้เครื่องรับปลายทางสามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลมากๆได้

ในบทความนี้ การส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยตรงแทนด้วย $S \rightarrow D$ เรียกว่าเส้นทางโดยตรง (Direct Link) มีค่าสมการดังนี้ [3]

$$y_{SD} = h_{SD}x_s + z_{SD} \quad (1)$$

โดย x_sแทนบิตข้อมูลที่ส่งจากต้นทาง, h_{SD} แทนโหนดปลายทาง และ z_{SD}เป็นตัวแปรสุ่มแทนสัญญาณรบกวนสีขาวแบบบวก (Additive White Gaussian Noise : AWGN) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังมีค่า N_0 แทนด้วย $z_{SD} \sim G(0, N_0)$ และกำหนดให้สัญญาณรบกวนเป็นตัวแปรสุ่มแบบอิสระและไม่ขึ้นแก่กัน , ε_b คือ พลังงานการส่งสัญลักษณ์หรือบิต (Signal Energy) และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal To Noise Ratio : SNR) หรือ $\overline{\gamma_0}$ มีค่าดังนี้

$$\overline{\gamma_0} = E[\gamma_0] = \frac{\varepsilon_b \lambda_0}{N_0} \quad (2)$$

โดย $\gamma_0 = \frac{|h_0|^2 \varepsilon_b}{N_0}$ ดังนั้น ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ γ_0มีค่าเท่ากับ

$$f_{\gamma_0} = \frac{1}{\overline{\gamma_0}} \exp\left(-\frac{\gamma_0}{\overline{\gamma_0}}\right) \quad (3)$$

ซึ่ง f_{γ_0} คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ γ_0 เนื่องจาก $f_{\gamma_0}(\gamma)$ มีการกระจายแบบเอกซ์โปเนนเชียลด้วยพารามิเตอร์ λ_0โดยการใช้ฟังก์ชันของโมเมนต์กำเนิด(Moment Generating Function :MGF) จะได้ [2]

$$\overline{P_e} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} M_\gamma\left[-\frac{1}{\sin^2\theta}\right]d\theta$$

$$\overline{P_e} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{1+\frac{\overline{\gamma_0}}{\sin^2\theta}}d\theta = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\overline{\gamma_0}}{1+\overline{\gamma_0}}}\right) \quad (4)$$

ซึ่งในสมการที่ (4) นั้นเป็นสมการหาค่าอัตราเฉลี่ยความผิดพลาดบิตแบบไม่มีเงื่อนไข ดังนั้น การหาค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายในการสื่อสารแบบร่วมมือ ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดให้มีรีเลย์ทั้งหมด N โหนด ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีการส่งข้อมูลทั้งหมด N ครั้ง โดยให้ j แทนลำดับการส่งข้อมูลทำให้ $j = 1,\ldots, N$ ซึ่งสามารถแทนสัญญาณการส่งครั้งที่ j ได้ดังนี้

$$y_j = h_j x_j + z_j; j = 1,...,N \quad (5)$$

ซึ่ง y_j คือ ค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายในการสื่อสารแบบร่วมมือ ดังนั้น การหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณ (Signal To Noise Ratio: SNR) ของการส่งมีค่า $\overline{\gamma_j} = \rho_j \lambda_j$ ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ γ_j แทนด้วย

$$f_{\gamma_j} = \frac{1}{\overline{\gamma_j}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma_j}} \right) \quad (6)$$

ซึ่งทำให้สามารถหาค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสมมูลย์แทนด้วย y_{eq} โดยกำหนดด้วยค่า SNR ของการส่งที่น้อยที่สุด [2]

เมื่อ $\gamma_{eq} = \min\left(\gamma_{SR}, \gamma_{RD}\right)$ ภายใต้สมมติฐาน ค่า SNR ต่ำสุดของช่องสัญญาณ ดังสมการต่อไปนี้

$$\gamma_{eq} = \min_{j=1,\ldots,N} \gamma_j \quad (7)$$

และกำหนดให้การส่งข้อมูลแต่ละครั้งเป็นอิสระต่อกัน ในช่องสัญญาณที่มีการเฟดแบบราย์เลย์ แทนด้วย

$$F_{\gamma_{eq}}(\gamma) = 1 - \Pr\left[\gamma_1 > \gamma, ..., \gamma_N > \gamma\right]$$
$$= 1 - \prod_{j=1}^{N} \left[1 - F_{\gamma_j}(\gamma) \right] \quad (8)$$

จากสมการ (8) นำมาหาค่าอนุพันธ์เทียบกับ γ จะได้ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นร่วม (Joint pdf) ดังสมการนี้

$$f_{\gamma_{eq}}(\gamma) = \sum_{j=1}^{N} f_{\gamma_j}(\gamma) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N} \left[1 - F_{\gamma_i}(\gamma) \right] \quad (9)$$

แทนค่า สมการที่ (6) ลงใน (9) ได้

$$f_{\gamma_{eq}}(\gamma) = \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{\overline{\gamma_j}} \exp\left(-\gamma \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{\overline{\gamma_j}} \right) \quad (10)$$

โดยให้ $\chi = \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{\overline{\gamma_j}}$ จะได้

$$f_{\gamma_{eq}}(\gamma) = \chi \exp(-\gamma\chi) \quad (11)$$

2.2 การสื่อสารแบบร่วมมือด้วยโปรโตคอล DF (Decode and forward protocol)

ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์(Relay) จะถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อไปยังเครื่องรับ ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงการหาค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดสัญลักษณ์ (Symbol Error Rate : SER) โดยการมอดูเลตแบบ MPSK ซึ่ง $M = 2^k$ เมื่อ k คือ จำนวนบิตต่อการส่งข้อมูล 1 สัญลักษณ์ ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดสัญลักษณ์สำหรับการมอดูเลตแบบ MPSK ในช่องสัญญาณรบกวนสีขาวแบบบวก แทนด้วยความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขที่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน มีค่าดังนี้ [5]

$$P_s(\gamma) = 2Q\left(\sqrt{2\gamma} \sin\frac{\pi}{M} \right) \quad (12)$$

ซึ่ง P_s คือ อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดย γ คือ อัตราส่วนกำลังต่อสัญญาณรบกวนต่อสัญลักษณ์ ทำให้สามารถหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดสัญลักษณ์ที่แท้จริง (Exact Solution) ได้ ดังนี้ [2]

$$P_s(\gamma) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{(M-1)\pi}{M}} \exp\left(-\frac{g\gamma}{\sin^2\theta} \right) d\theta \quad (13)$$

โดยให้ $g = \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)$ ทำให้การหาค่าอัตราการผิดพลาดสัญลักษณ์ ทำได้โดยนำสมการที่ (13) มาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ SNR ที่เอาต์พุตในสมการที่ (11) จะได้

$$\overline{P_s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{(M-1)\pi}{M}} \exp\left(-\frac{g\gamma}{\sin^2\theta} \right) f_{\gamma_{eq}}(\gamma) d\gamma d\theta \quad (14)$$

จากนั้น นำฟังก์ชัน MGF (Moment Generating Function) นิยามด้วย [4]

$$M_{\gamma_{eq}}(s) = \int_0^{\infty} \chi \exp(-\gamma\chi) \exp(s\gamma) d\gamma = \frac{\chi}{\chi - s} \quad (15)$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\overline{P_s}=\frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{(M-1)\pi}{M}} M_{\gamma_{eq}}\left(\frac{g}{\sin^2\theta}\right)d\theta=\frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{(M-1)\pi}{M}}\frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta+\frac{g}{\chi}}d\theta \quad (16)$$

เนื่องจาก

$$\frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{(M-1)\pi}{M}}\frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta+c}d\theta=\left(\frac{M-1}{M}\right)\left[1-\sqrt{\frac{c}{1+c}}\frac{M}{(M-1)\pi}\left[\frac{\pi}{2}+\tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{c}{1+c}}\cot\frac{\pi}{M}\right)\right]\right]$$

ดังนั้น อัตราการผิดพลาดสัญลักษณ์สำหรับการมอดูเลตแบบ MPSK [5] จะแทนด้วย $\overline{P_s}$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\overline{P_s}=\left(\frac{M-1}{M}\right)\left[1-\sqrt{\frac{\frac{g}{\chi}}{1+\frac{g}{\chi}}}\frac{M}{(M-1)\pi}\left[\frac{\pi}{2}+\tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{\frac{g}{\chi}}{1+\frac{g}{\chi}}}\cot\frac{\pi}{M}\right)\right]\right]$$

ซึ่ง $\overline{P_s}$ คือ อัตราการผิดพลาดสัญลักษณ์

ดังนั้น การมอดูเลตแบบ BPSK ซึ่ง $M=2$ และ $g=\sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right)=1$ จะได้

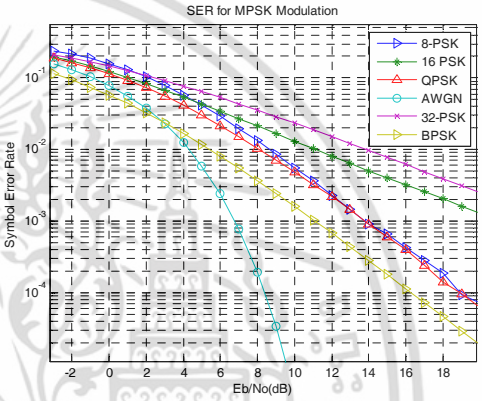
$$\overline{P_b}=\frac{1}{2}\left[1-\sqrt{\frac{1}{1+\chi}}\right] \quad (17)$$

โดย $\overline{P_b}$ คืออัตราการผิดพลาดสัญลักษณ์สำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK ดังนั้น ในการหาค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายของระบบการสื่อสารแบบร่วมมือ จะแทนลงในเทอมของความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหาย (Outage Probability) คือ ความน่าจะเป็นที่อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเอาต์พุต (γ_{eq}) มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนกำลังต่อสัญญาณรบกวนตอนเริ่ม (Threshold SNR) (γ_{th}) จะได้

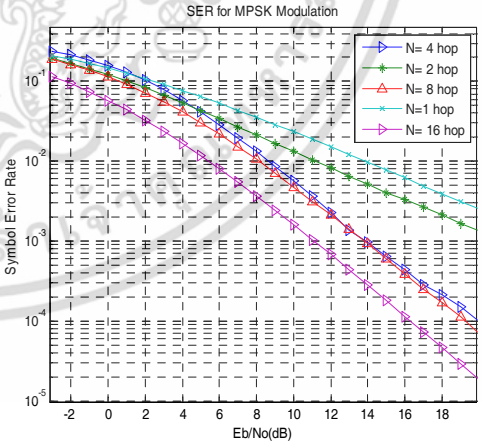
$$P_{out}=\Pr\{\gamma_{eq}<\gamma_{th}\}$$
$$=\int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_{eq}}(\gamma)d\gamma=1-\exp(-\gamma_{th}\chi) \quad (18)$$

3. ผลที่ได้จากการ Simulation

ในการทดลองนี้เราได้ใช้เสาอากาศรับ-ส่ง อย่างละ 2 ต้นที่โหนดต้นทาง, โหนดรีเลย์ และโหนดปลายทาง โดยมีการส่งแบบหลายฮ็อบ (Multi Hop) โดยให้ผู้ใช้งานในระบบทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ จึงได้ทำการจำลองโดยการใช้โปรแกรม Matlab สร้างสัญญาณรบกวน (AWGN) และช่องสัญญาณแบบ Rayleigh Fading Channel เพื่อส่งผ่านข้อมูลที่มีการมอดูเลตแบบ MPSK ทำให้ได้ผลการทดลองดังรูปกราฟ ต่อไปนี้

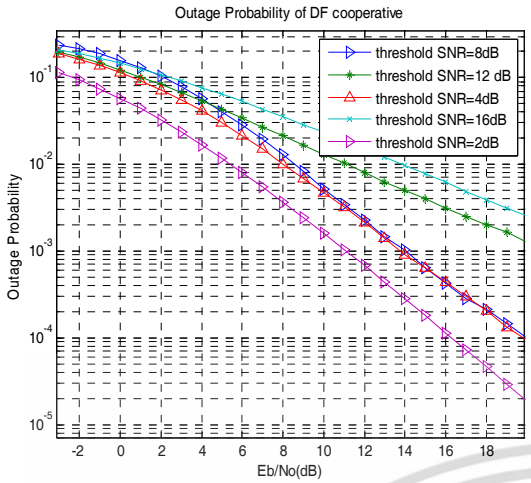


รูปที่ 2 แสดงค่า SER ของการมอดูเลตแบบต่างๆ

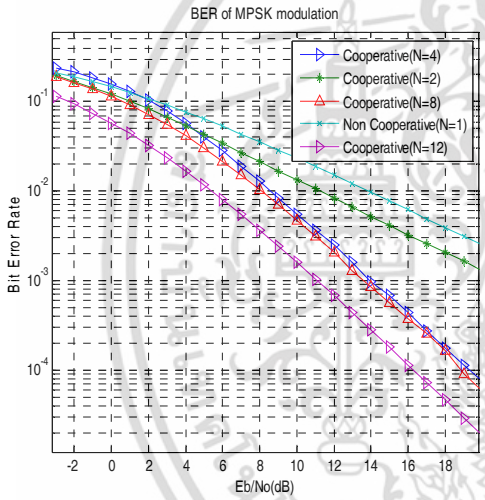


รูปที่ 3 แสดงค่า SER ของการมอดูเลตแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จางหายในการส่งของระบบ



รูปที่ 5 แสดงค่า Bit Error Rate

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า จากกราฟรูปที่ 2 ได้แสดงอัตราความผิดพลาดของสัญลักษณ์ของการมอดูเลตแบบ MPSK จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนรีเลย์ทำให้อัตราความผิดพลาดสัญลักษณ์ลดลง เช่น ที่ 11 dB การมอดูเลตแบบ BPSK ให้ค่าอัตราความผิดพลาดสัญลักษณ์ (SER) เท่ากับ 10^{-3} ในขณะเดียวกันการมอดูเลตแบบ 16 PSK ให้ค่าอัตราความผิดพลาดสัญลักษณ์ (SER) เท่ากับ 10^{-2} และส่วนในกราฟรูปที่ 3 แสดงอัตราความผิดพลาดของสัญลักษณ์ของการมอดูเลตแบบ MPSK จะพบว่าอัตราความผิดพลาดสัญลักษณ์ 10^{-3} การส่งโดยใช้รีเลย์ 3 โหนด หรือการส่งข้อมูล 4 ฮ็อบ (hop) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการสื่อสารแบบไม่ร่วมมือ และการสื่อสารที่มีการส่ง 2 ฮ็อบ (hop)

ส่วนในกราฟรูปที่ 4 ได้แสดงค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหาย ซึ่งได้กำหนดให้การถอดรหัสข้อมูลไม่มีความผิดพลาดและส่งต่อไปยังโหนดถัดไป ในกรณีนี้เราจะสังเกตที่ค่า threshold SNR ที่มีค่าน้อยจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายลดลง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาที่ Eb/No = 8 dB. จะพบว่า ที่ Threshold SNR = 16 dB มีค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายลดลง (Outage Probability) เท่ากับ $10^{-1.7}$ เมื่อเปรียบเทียบกับ ที่ Threshold SNR = 2 dB มีค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายลดลงเท่ากับ $10^{-2.7}$ ทำให้ทราบว่า ยิ่งค่า threshold SNR ที่มีค่าน้อยจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหายลดลง

ส่วนของกราฟรูปที่ 5 ได้แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราการผิดพลาดบิตของการมอดูเลตแบบ MPSK ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการสื่อสารแบบร่วมมือมีค่าอัตราการผิดพลาดบิต (BER) ที่ต่ำกว่าการสื่อสารแบบอื่นๆ เมื่อเรายิ่งเพิ่มจำนวนของรีเลย์ในระบบ ยกตัวอย่างเช่น ที่ N=1 เป็นการสื่อสารแบบ Non Cooperative Communication เปรียบเทียบกับ N=12 ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบ Cooperative Communication โดยจะพิจารณาที่ Eb/No = 8 dB จะพบว่าที่ N=1 จะมีค่า BER เท่ากับ $10^{-1.7}$ แต่ที่ N=12 จะมีค่า BER = $10^{-2.7}$ ทำให้เห็นว่าถ้ายิ่งเพิ่มจำนวนรีเลย์ในระบบการสื่อสาร ยิ่งทำให้ค่า BER ลดต่ำลง ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารก็จะดีขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

ในบทความนี้ ได้ทำการศึกษาระบบการสื่อสารแบบร่วมมือโดยใช้โปรโตคอลการส่งผ่านสัญญาณแบบถอดรหัสและส่งต่อในการรับ-ส่งสัญญาณ โดยการมอดูเลตแบบ MPSK รวมถึงการปรับปรุงสมรรถนะอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลให้ลดต่ำลง และยังได้นำเสนอความน่าจะเป็นที่สัญญาณจางหาย ทำให้ทราบว่า เนื่องจากระบบสื่อสารแบบร่วมมือ จะได้ประโยชน์จากไดเวอร์ซิตี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสมือนที่เกิดขึ้นจากการส่งต่อสัญญาณในระบบ ซึ่งการเพิ่มจำนวนของรีเลย์และการเพิ่มจำนวนครั้งในการส่งสัญญาณมากขึ้น ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดในการตัดสินสัญลักษณ์และค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

5. เอกสารอ้างอิง

[1] C. Pirak, Z. Jane Wang and K. J. Ray Liu, "Adaptive Protocol for Cooperative Communications Achieving asymptotic Minimum Symbol error rate," Proceeding of IEEE ICASSP06, MAY., 2006

[2] G. Goldsmith, Andrea. "Wireless Communications 1st ed. Singapore. : Cambridge University Press, 2005.

[3] K. J. Ray Liu , Ahmed K. Sadek , Weifeng Su, Andres Kwasinski "Cooperative Communications and Networking"

[4] F. Georges, and He'buterne Ge'rad. 2008. " Mathematics for Engineers 1st ed. Great Britain: John Wiley & Sons, Inc.

[5] J. Lu ., Letaief . K.B., Chung, C-I., Justin., And Liou. L. Ming. 1999. " M -PSK and M-QAM BER Computation using Signal –Space Concepts," IEEE Transactions on Communications.Vol. 47, No.2 :184-186.

[6] Y.W.- Peter Hong ,Wan-Jen Huang, C.-C. Jay Kuo "Cooperative Communications and Networking Technologies and System design," 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้