

บทที่ 5

การวิเคราะห์สมรรถนะของการควบคุมความผิดพลาด

5.1 บทนำ

การควบคุมความผิดพลาดมีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบสื่อสาร ทั้งระบบสื่อสารทางเดียวและสองทาง สำหรับระบบสื่อสารที่มีช่องสื่อสารสองทาง รหัสตรวจสอบความผิดพลาดสามารถใช้ร่วมกับการส่งซ้ำได้ โดยเมื่อมีความผิดพลาดของข้อมูลเกิดขึ้น ตัวรับสามารถร้องขอให้ตัวส่งส่งซ้ำข้อมูลที่ผิดพลาดนั้นจนกว่าจะได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง ซึ่งลักษณะการควบคุมความผิดพลาดดังกล่าวนี้เรียกว่า การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ (Automatic Repeat Request, ARQ) ขณะเดียวกันหากระบบสื่อสารมีช่องสื่อสารเพียงทางเดียว การใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้า (Forward Error-correcting Codes) จะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาด

รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้านั้นมีสองชนิด คือ รหัสแบบบล็อกซึ่งเป็นการเข้ารหัสเชิงเส้น (Linear Code) โดยการเพิ่มบิตพาริตี (Parity Bits) จำนวน $n-k$ บิต เข้ารวมกับบล็อกข้อมูลจำนวน k บิต และเรียกว่ารหัส (n, k) ส่วนรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าอีกชนิด คือ รหัสคอนโวลูชันนอล (Convolutional codes) ซึ่งเป็นซับเซตของรหัสต้นไม้ (Tree Codes) เป็นรหัสที่ไม่มีขอบเขตจะถูกสร้างจากขบวนข้อมูล และเป็นรหัสที่ไม่เหมาะกับการส่งข้อมูลแบบบล็อม (Packet) [1] เพราะมีส่วนหัว (Overheads) เนื่องจากขั้นตอนการถอดรหัสจะต้องเริ่มใหม่ สำหรับทุก ๆ กลุ่มข้อมูล เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงไม่พิจารณาถึงการใช้รหัสคอนโวลูชันนอลสำหรับระบบสื่อสารที่กำลังพิจารณา เพราะรหัสแบบบล็อกจะเป็นทางแก้ปัญหาของระบบสื่อสารแบบกลุ่มข้อมูลได้อย่างเป็นธรรมชาติมากกว่า ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะกรณีรหัสแบบบล็อกในแบบจำลองช่องสื่อสารที่กำลังวิจัย

5.2 สมรรถนะของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบบล็อก

สำหรับกรณีรหัสสมบูรณ์ (Perfect Code) [19] ซึ่งมีความน่าจะเป็นของการถอดรหัสถูกต้อง (P_{cod}) ของรหัสสมบูรณ์ (n, k) คือ

$$P_{cd} = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} p^i q^{n-i} \quad (5.1)$$

โดยที่ p คือ อัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ย

q คือ $1-p$

n คือ ความยาวรหัส

k คือ ความยาวข้อมูล

t คือ ความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดของรหัสหรือจำนวนบิตผิดพลาดมากที่สุดที่รหัสสามารถแก้ไขได้

และความน่าจะเป็นของบล็อกข้อมูลถอดรหัสผิดพลาด (P_{ed}) คือ

$$P_{ed} = 1 - P_{cd} \quad (5.2)$$

และจากนิยามของค่าสถิติความผิดพลาดแบบบล็อกข้อมูล $P(m,n)$ ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 ค่าความน่าจะเป็นของการถอดรหัสถูกต้องสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_{cd} = \sum_{m=0}^t P(m,n) \quad (5.3)$$

ดังนั้น

$$P_{ed} = 1 - \sum_{m=0}^t P(m,n) \quad (5.4)$$

กรณีช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิสต์ที่สามารถจำลองแบบการเกิดความผิดพลาดได้ด้วยแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ ซึ่งก็คือลักษณะของช่องสื่อสารสมมาตรสองสถานะ โดยที่แต่ละสถานะจะมีค่าอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ยไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์สมรรถนะของรหัสแก้ไขความผิดพลาดที่นำมาใช้งาน ณ แต่ละสถานะได้

กรณีที่ขบวนข้อมูลไม่ได้เข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาด ความน่าจะเป็นของบล็อกข้อมูลที่ได้รับได้จะมีบิตผิดพลาดหนึ่งบิตขึ้นไป หรือบล็อกข้อมูลผิดพลาด (P_{err}) คือ

$$P_{err} = 1 - P(0,n) \quad (5.5)$$

และกรณีที่ขบวนข้อมูลได้รับการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาด ความน่าจะเป็นของบล็อกข้อมูลถูกรหัสผิดพลาด ดังสมการ (5.4) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_{ed} = 1 - P(0, n) - \sum_{m=1}^t P(m, n) \quad (5.6)$$

ดังนั้นจากสมการ (5.5) และ (5.6) สรุปได้ว่าค่าความน่าจะเป็นของบล็อกข้อมูลที่ได้รับผิดพลาดในการใช้การเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดจะน้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ ซึ่งเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้า (Forward Error-correcting codes)

5.3 สมรรถนะของวิธีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ

กรณีช่องสื่อสารสามารถกระทำได้ทั้งสองทางหรือมีช่องสื่อสารป้อนกลับ (Feedback Channel) วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้คือการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ (Automatic Repeat Request, ARQ) หากว่าผลกระทบจากเวลาหน่วงเนื่องจากต้องรอข้อมูลที่ขอส่งซ้ำมีไม่มากนัก การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติมีสามแบบพื้นฐาน [10] คือการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบหยุดและคอย (Stop and Wait ARQ) การร้องขอส่งซ้ำแบบกลับไปบล็อกที่ N ของข่าวสาร (Go-Back-N ARQ) และการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบเลือกส่งซ้ำ (Selective-Repeat ARQ) และสมรรถนะของการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ นิยมวัดกันในค่าของทราฟฟิค (Throughput) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของจำนวนบิต ข้อมูลที่ตัวรับได้รับ กับจำนวนบิตทั้งหมดที่ส่งผ่านช่องสื่อสาร โดยแต่ละแบบมีประสิทธิภาพทราฟฟิค (Throughput) ดังนี้

กรณีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบหยุดและคอย มีทราฟฟิค (η_{sw}) คือ

$$\eta_{sw} = [P_{acc} / (1 + D\tau/n)](k/n) \quad (5.7)$$

- โดยที่ P_{acc} คือ ความน่าจะเป็นของการยอมรับรหัสที่ตัวรับได้รับ
- D คือ เวลาที่ตัวส่งเสียไปกับการรอสัญญาณตอบกลับจากตัวรับหลังจากส่งรหัสก่อนหน้าและคอยที่จะส่งรหัสต่อไป หรือส่งซ้ำรหัสเดิม หากพบว่าการส่งรหัสนั้นผิดพลาด
- τ คือ อัตราการส่งข้อมูล
- k คือ ความยาวข้อมูล
- n คือ ความยาวรหัส

อนึ่ง ความน่าจะเป็นของการยอมรับรหัสที่ตัวรับได้รับ (P_{acc}) คือ

$$P_{acc} = P_c + P_e \quad (5.8)$$

โดยที่ P_c คือ ความน่าจะเป็นที่รหัสที่รับได้ไม่มีความผิดพลาด

P_e คือ ความน่าจะเป็นที่รหัสที่รับได้มีรูปแบบความผิดพลาดที่ตรวจจับไม่ได้

และถ้า P_d คือ ความน่าจะเป็นที่รหัสที่รับได้มีรูปแบบความผิดพลาดที่ตรวจจับได้

ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นทั้งสามค่า คือ

$$P_c + P_d + P_e = 1 \quad (5.9)$$

โดยปกติแล้วค่า P_c จะมีค่ามากกว่าค่า P_e มาก จึงทำให้สมการ (5.8) เป็น

$$P_{dacc} \approx P_c \quad (5.10)$$

และได้ว่า

$$P_d = 1 - P_c \approx 1 - P_{acc} \quad (5.11)$$

กรณีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบกลับไปบล็อกที่ N ของข่าวสาร ค่าทฤษฎี (η_{GBN})

คือ

$$\eta_{GBN} = [P_{acc} / \{P_{acc} + (1 - P_{acc})N\}](k/n) \quad (5.12)$$

โดยที่ N คือ จำนวนรหัสที่ส่งในหนึ่งรอบเวลาหนึ่งซึ่งเป็นช่วงเวลาที่นับตั้งแต่ส่งรหัสจนถึงเวลาที่รับสัญญาณตอบกลับจากตัวส่ง

ในขณะที่กรณีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบเลือกส่งซ้ำ ค่าทรูพุต (η_{SR}) คือ

$$\eta_{SR} = P_{acc}(k/n) \quad (5.13)$$

จากสมการ (5.7) (5.12) และ (5.13) ซึ่งเป็นการหาค่าทรูพุตของการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบต่าง ๆ นั้น จะมีค่าของความน่าจะเป็นของการยอมรับรหัสที่ตัวรับได้รับ (P_{acc}) ซึ่งประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นที่รหัสที่รับได้ไม่มีความผิดพลาด ซึ่งก็คือค่าสถิติความผิดพลาดแบบบล็อกข้อมูลที่มีความยาว n บิต และมีบิตผิดพลาด m บิต โดยที่ m มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือเขียนเป็นสมการได้

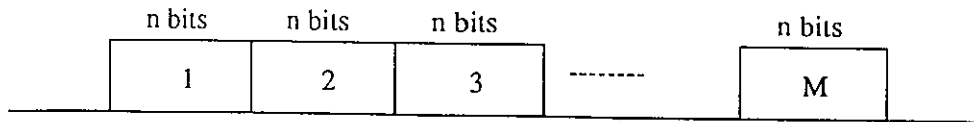
$$P_{acc} = P(0, n) \quad (5.14)$$

นั่นคือ หากใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะในการจำลองการเกิดความผิดพลาดในช่องสื่อสารที่มีการควบคุมความผิดพลาดแบบการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแล้วค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองก็สามารถใช้หาสมรรถนะของการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติได้

5.4 สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำ

วิธีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ นั้นใช้กับระบบสื่อสารที่มีระบบสื่อสารสองทางกล่าวคือ อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่จะต้องมีการสื่อสารป้อนกลับ แต่ถ้าในกรณีระบบสื่อสารเป็นแบบระบบสื่อสารทางเดียวโดยไม่มีช่องสื่อสารป้อนกลับ วิธีการส่งซ้ำ (Retransmission) ก็เป็นการควบคุมความผิดพลาดที่สามารถทำได้เช่นกัน โดยจะเป็นการส่งกลุ่มข้อมูลด้วยจำนวนครั้งที่มากพอที่จะทำให้ความน่าจะเป็นของกลุ่มข้อมูลที่รับได้มีความผิดพลาดต่ำและยอมรับได้ค่าหนึ่ง หัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอแนวความคิดที่ส่งกลุ่มข้อมูลซ้ำด้วยจำนวนครั้งที่เหมาะสม โดยอาศัยการใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ ในการจำลองการเกิดความผิดพลาดในช่องสื่อสารด้วย

พิจารณาระบบสื่อสารที่มีการส่งข้อมูลในลักษณะเป็นกลุ่มข้อมูล (Packet) ขนาด n บิต โดยแต่ละกลุ่มข้อมูลถูกส่งซ้ำกัน M ครั้ง ดังในรูป 5.1



รูป 5.1 ลักษณะการส่งกลุ่มข้อมูลขนาด n บิต จำนวน m ครั้ง

กำหนดให้ P_{cb} คือ ความน่าจะเป็นของการได้รับกลุ่มข้อมูลอย่างถูกต้อง
 P_{eb} คือ ความน่าจะเป็นของการได้รับกลุ่มข้อมูลผิดพลาด

$$\text{ดังนั้น } P_{eb} = 1 - P_{cb} \quad (5.15)$$

หลังจากส่งกลุ่มข้อมูล n บิต จำนวน m ครั้ง ได้ว่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลว (P_{tf}) คือ

$$P_{tf} = (1 - P_{cb})^M \quad (5.16)$$

และความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จ (P_{ts}) คือ

$$\begin{aligned} P_{ts} &= 1 - P_{tf} \\ &= 1 - (1 - P_{cb})^M \end{aligned} \quad (5.17)$$

จากนิยามของทฤษฎีที่ใช้วัดสมรรถนะของการร้องขอส่งข้อมูลซ้ำอัตโนมัติ ทำนองเดียวกัน ในกรณีนี้ค่าทฤษฎีกลุ่มข้อมูลเฉลี่ย (Average Packet Throughput, η_{MT}) คือ

$$\eta_{MT} = \frac{\text{จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ได้รับสำเร็จ}}{\text{จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ถูกส่งทั้งหมด}}$$

ดังนั้น หากพิจารณาการส่งกลุ่มข้อมูลจำนวน K ชุด แล้วค่าทรูพุตกลุ่มข้อมูลเฉลี่ยคือ

$$\begin{aligned}\eta_{MT} &= (KP_s)/(MK) \\ &= [1 - (1 - P_{cb})^M]/M\end{aligned}\quad (5.16)$$

และค่าทรูพุตบิตเฉลี่ย (Average Bit Throughput, r_{bt}) คือ

$$r_{bt} = \eta_{MT} R \quad (5.19)$$

โดยที่ R คือ อัตรารหัสที่ใช้สำหรับการตรวจจับหรือแก้ไขความผิดพลาด

จากสมการ (5.16) สามารถหาจำนวนครั้งที่ส่งได้จาก

$$M = \log[P_{cf}]/\log[1 - P_{cb}] \quad (5.20)$$

สมการที่ (5.20) แสดงถึงการหาค่าจำนวนครั้งในการส่งกลุ่มข้อมูลที่ทำให้การส่งข้อมูลมีความผิดพลาดในอัตราของความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลล้มเหลว (P_{cf}) ซึ่งหมายถึงค่าอัตราการสูญหายของบิตข้อมูล (Lost Bit Rate) ด้วย

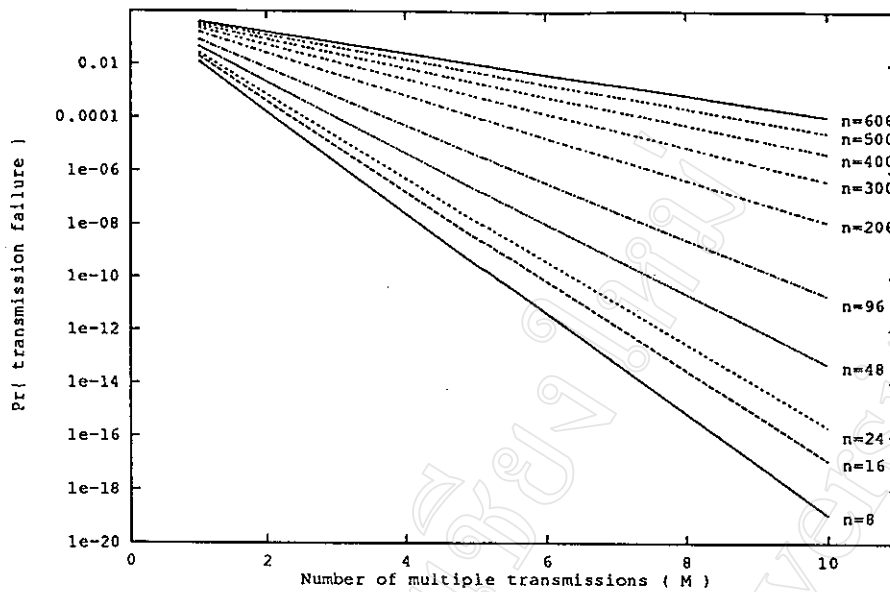
5.4.1 สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำวิเคราะห์ร่วมกับพารามิเตอร์ของแบบจำลองลูกโซ่

มาร์คอฟสองสถานะ

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำร่วมกับพารามิเตอร์ของแบบจำลองลูกโซ่ มาร์คอฟสองสถานะนั้น ค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลว (P_{cf}) ก็คือ

$$P_{cf} = (1 - P(0,n))^M \quad (5.21)$$

ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูล “data 1” เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์และใช้ค่า $P(0,n)$ ของแบบจำลองคำนวณหาจำนวนครั้งในการส่งข้อมูลจะได้ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งในการส่งข้อมูล และความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลว ดังแสดงในรูป 5.2 โดยมีค่าความยาวของกลุ่มข้อมูล (n) ต่าง ๆ กัน



รูป 5.2 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งในการส่งข้อมูลและความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลวด้วยขนาดของกลุ่มข้อมูลต่าง ๆ กัน

จากกราฟแสดงในรูป 5.2 จะเห็นว่าถ้าต้องการให้ได้ค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลวมีค่าน้อยลงก็จำเป็นต้องกำหนดให้ขนาดของกลุ่มข้อมูลที่ส่งเล็กลงด้วย

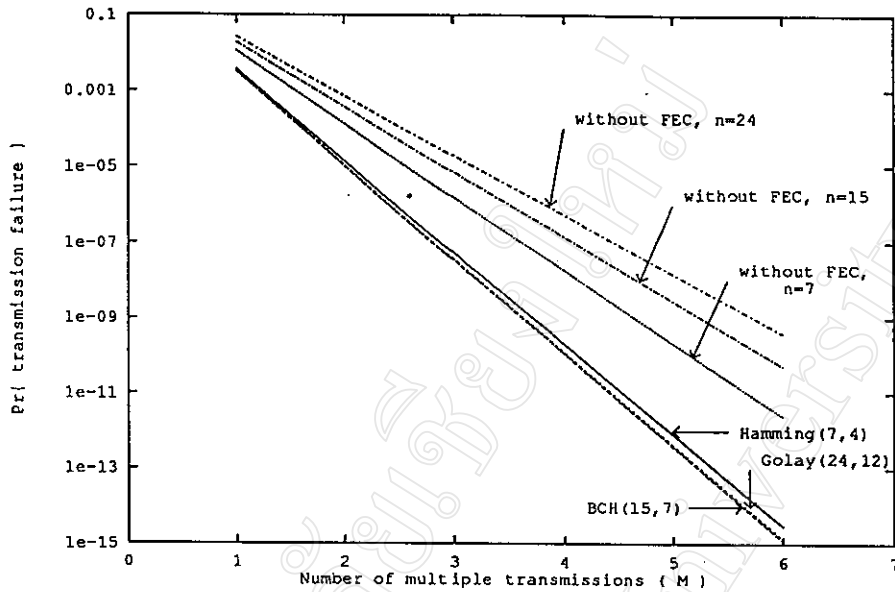
เพื่อให้การวิเคราะห์สมรรถนะของการส่งซ้ำที่ใช้ร่วมกับรหัสแก้ไขความผิดพลาดมีขอบเขตที่แน่นอนและสามารถเลือกใช้รหัสที่มีสมรรถนะสูงสุดจึงเลือกจะวิเคราะห์รหัสแก้ไขความผิดพลาดสามแบบที่มีขนาดรหัสสั้นที่สุดสำหรับความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดหนึ่งและสองและสามบิต [19] นั่นคือ รหัส Hamming (7, 4) รหัส BCH (15, 7) และ รหัส Golay (24, 12) ตามลำดับ และรหัสแก้ไขความผิดพลาดที่เลือกวิเคราะห์ทั้งสามแบบเป็นรหัสแบบกึ่งสมบูรณ์ (Quasi-Perfect Codes) ดังนั้น ความน่าจะเป็นของการถอดรหัสถูกต้อง (P_{cd}) คือ

$$P_{cd} = \sum_{m=0}^t P(m, n) + [\alpha_{t+1} P(t+1, n)] / \binom{n}{t+1} \quad (5.22)$$

เมื่อ t คือ ความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดของรหัส

$$\text{และ } \alpha_{t+1} = 2^{n-k} - \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} \quad (5.23)$$

ดังนั้น วิธีการส่งซ้ำใช้ร่วมกับรหัสแก้ไขความผิดพลาดจึงมีความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งในการส่งข้อมูล และความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลว ดังแสดงในรูป 5.3



รูป 5.3 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งในการส่งข้อมูลและความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลวเมื่อใช้รหัสกึ่งสมบูรณ์ที่มี $t = 1, 2, 3$

จากรูป 5.3 จะเห็นว่าสมรรถนะของการส่งซ้ำจะดีขึ้นหากใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าร่วมด้วย โดยที่จะได้ค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลวลดลง

จากสมการ (5.20) ในการหาจำนวนครั้งของการส่งกลุ่มข้อมูลนั้น ค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลว จะเป็นค่าที่เป็นข้อกำหนด ตัวอย่างเช่น ในข้อกำหนดมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา [15] กำหนดไว้ว่าค่าอัตราการสูญหายของบิตข้อมูลไม่ควรมากกว่า 1×10^{-5} สำหรับโมเด็มข้อมูล นั้นหมายถึงค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลว คือ 1×10^{-5} ดังนั้นผลจากการคำนวณค่าต่าง ๆ ในการวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำสามารถสรุปได้ดังแสดงในตาราง 5.1

ตาราง 5.1 สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำเมื่อใช้ร่วมกับรหัสแก้ไขความผิดพลาด

Coding Schemes	P_{tf}	M	η_{MT}	r_{bt}
without FEC, n=7	1.575353×10^{-6}	3	0.3333328	0.3333328
Hamming(7,4)	5.520326×10^{-8}	3	0.3333333	0.1904762
without FEC, n=15	7.357745×10^{-6}	3	0.3333309	0.3333309
BCH(15,7)	3.517488×10^{-8}	3	0.3333333	0.1555555
without FEC, n=24	5.368650×10^{-7}	4	0.2499999	0.2499999
Golay(24,12)	3.761985×10^{-8}	3	0.3333333	0.1666667

5.4.2 สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำแบบปรับค่าได้

จากการที่แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะที่ใช้อยู่มีสถานะของช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะอยู่สองสถานะ นั้นหมายถึงหากกำหนดให้ระบบสื่อสารสามารถปรับตัวได้ในการส่งข้อมูลตามจำนวนครั้งที่เหมาะสมกับช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะ แต่ละสถานะหรือเรียกว่าวิธีการส่งซ้ำแบบปรับค่าได้ (Adaptive Retransmission Scheme) ดังนั้นจะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$M_1 = \log[P_{tf}] / \log[1 - P_{cb1}] \quad (5.24)$$

$$M_2 = \log[P_{tf}] / \log[1 - P_{cb2}] \quad (5.25)$$

$$\eta_{MT1} = [1 - (1 - P_{cb1})^{M_1}] / M_1 \quad (5.26)$$

$$\eta_{MT2} = [1 - (1 - P_{cb2})^{M_2}] / M_2 \quad (5.27)$$

โดยที่ตัวเลขท้ายตัวแปรนั้นมีความหมาย คือ “1” หมายถึงพารามิเตอร์ของ “good state” และ “2” หมายถึง พารามิเตอร์ของ “bad state” และได้ว่าค่าทรูพุดกลุ่มข้อมูลเฉลี่ย (η_{MT}) คือ

$$\eta_{MT} = R_1 \eta_{MT1} + R_2 \eta_{MT2} \quad (5.28)$$

โดยที่ R_1 คือ ความน่าจะเป็นของการอยู่ในสถานะที่มีบิตผิดพลาดน้อย

R_2 คือ ความน่าจะเป็นของการอยู่ในสถานะที่มีบิตผิดพลาดมาก

และค่าทรูพุดบิตเฉลี่ย (r_{bt}) คือ

$$r_{bt} = [R_1 \eta_{MT1} + R_2 \eta_{MT2}] R \quad (5.29)$$

ดังนั้นสำหรับขบวนข้อมูล “data 1” ที่ต้องการให้มีความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลล้มเหลวไม่เกิน 1×10^{-5} โดยการใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะจำลองแบบช่องสื่อสารและใช้วิธีการควบคุมความผิดพลาดด้วยวิธีการส่งซ้ำแบบปรับค่าได้ สามารถคำนวณสมรรถนะได้ดังแสดงในตาราง 5.2 สำหรับกรณีไม่ได้ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด และในตาราง 5.3 สำหรับกรณีใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด

ตาราง 5.2 สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำแบบปรับค่าได้ กรณีไม่ได้ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด

Parameters	Packet lengths		
	n = 7	n = 15	n = 24
P_{cb1}	0.994093217	0.987385320	0.979893023
P_{cb2}	0.190510328	0.028639687	0.003397420
M_1	3	3	3
M_2	55	397	3383
η_{MT1}	0.333333264	0.333332664	0.333330623
η_{MT2}	0.018181655	0.002518867	0.000295593
η_{MT}	0.331086488	0.330974229	0.330956353
r_{bt}	0.331086488	0.330974229	0.330956353

ตาราง 5.3 สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำแบบปรับค่าได้กรณีใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด

Parameters	Coding schemes		
	Hamming(7,4)	BCH(15,7)	Golay(24,12)
P_{cb1}	0.999985012	0.999999806	0.999999994
P_{cb2}	0.546932748	0.432082613	0.254155176
M_1	2	1	1
M_2	15	21	40
η_{MT1}	0.499999999	0.999999806	0.999999994
η_{MT2}	0.066666202	0.047618718	0.024999798
η_{MT}	0.496910680	0.993210100	0.993049032
r_{bt}	0.283948960	0.463498046	0.496524516

จากการสังเกตผลที่ได้จากการคำนวณสมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำแบบปรับค่าได้พบว่า เมื่อใช้ร่วมกับรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าจะให้ค่าทรูพุดกลุ่มข้อมูลเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แต่สำหรับค่าทรูพุดบิตเฉลี่ยแล้วไม่เป็นเช่นนั้นเพราะสำหรับรหัส Hamming (7, 4) แล้วค่าทรูพุดบิตเฉลี่ยจะลดลงจากที่ไม่ได้ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด นั่นแสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องมีการเลือกใช้รหัสที่เหมาะสมด้วยจึงจะได้สมรรถนะของวิธีการส่งซ้ำแบบปรับค่าได้ที่ดีขึ้น