

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คำว่าช่องสื่อสาร (Channel) ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารใช้เรียกตัวกลางที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเช่น สายทองแดง หรือเรียกตัวกลางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านเช่น อากาศ หรือ เส้นใยแสง เป็นต้น และคำว่าช่องสื่อสารเข้ารหัส (Coding Channel) มีความหมายรวมถึงส่วนประกอบย่อยของระบบสื่อสารแบบดิจิทัลที่ทำหน้าที่เข้ารหัส (Encode) ให้กับข้อมูลดิจิทัลเพื่อป้องกันความผิดพลาด (Error) ที่จะเกิดขึ้นซึ่งจะประกอบไปด้วย เครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Encoder) เครื่องมอดูเลเตอร์ (Modulator) เครื่องส่ง (Transmitter) ตัวกลางกายภาพ (Physical Media) เครื่องรับ (Receiver) เครื่องดีมอดูเลเตอร์ (Demodulator) และสัญญาณที่ปรากฏในช่องสื่อสารเข้ารหัสอยู่ในลักษณะของสัญญาณดิจิทัล

รูปแบบความผิดพลาด (Error Patterns) ที่เกิดขึ้นในช่องสื่อสารเข้ารหัสนั้นสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภทคือ ความผิดพลาดแบบคาบเวลา (Periodic Errors) ความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Errors) ความผิดพลาดแบบเบิสต์ (Burst Errors) สำหรับความผิดพลาดสองแบบแรกสามารถป้องกันและแก้ไขได้ด้วยการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้า (Forward Error Coding, FEC) แบบธรรมดาหรือใช้เทคนิคของการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ (Automatic Repeat Request, ARQ) แต่สำหรับช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิสต์นั้นเป็นช่องสื่อสารแบบมีความจำ (Channel With Memory) ซึ่งลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความผิดพลาดที่ผ่านมาและมักจะเกิดติดกันเป็นกลุ่ม (Cluster) โดยมักเกิดกับการสื่อสารแบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนจางของสัญญาณตามความถี่ (Frequency Selective Fading) อันเนื่องมาจากการแพร่กระจายหลายทาง (Multipath Propagation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางกายภาพ ตัวอย่างของช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิสต์ อาทิเช่นช่องสื่อสารความถี่สูง (High Frequency Channel) และช่องสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่ภาคพื้นดิน (Land Mobile Satellite Channel) เป็นต้น การใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าหรือการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบธรรมดากับช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิสต์มักจะไม่ได้ผลหรือมีประสิทธิภาพน้อยลง

เพราะรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าหรือการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาสำหรับใช้งานในช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบสุ่ม และเรียกกันโดยทั่วไปว่า ช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะ (Binary Symmetric Channel, BSC) ดังนั้นสำหรับช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์นี้ จึงต้องมีรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าชนิดพิเศษที่สามารถป้องกันและแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดเป็นกลุ่มได้ ซึ่งจะเป็นรหัสที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนในการใช้งาน

ปัจจุบันการนำเอาแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟมาประยุกต์กับช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์นั้นพบว่ายังไม่สามารถใช้แบบจำลองง่ายๆ ได้ซึ่งจะทำให้ระบบการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าและการควบคุมความผิดพลาดมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าปกติ อาทิเช่น ในช่องสื่อสารความถี่สูงต้องใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟที่มีสถานะถึงสามสถานะ (Tsai, S., [24]) และในช่องสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่ภาคพื้นดินต้องใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟที่มีสถานะถึงสี่สถานะ (Rahman, M. and Bulmer, M., [21]) จึงจะสามารถจำลองการเกิดความผิดพลาดในการส่งข้อมูลได้ใกล้เคียงกับช่องสื่อสารจริง ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาค้นคว้าเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ง่ายขึ้นในการนำมาประยุกต์กับช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์ เพื่อที่จะทำให้การเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าและการควบคุมความผิดพลาดเป็นไปได้โดยสะดวกและมีประสิทธิภาพ

1.2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

1.2.1 ทฤษฎีลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain Theory)

ทฤษฎีลูกโซ่มาร์คอฟได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Markov, A.A. ในปี ค.ศ. 1907 (Kemeny, G.J. and Snell, J.L., [9]) ซึ่งก็มีพัฒนาการเรื่อยมาและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อาทิเช่น ความน่าจะเป็นของชัยชนะในการเล่นกีฬา ความน่าจะเป็นของการแพร่กระจายของโมเลกุลของก๊าซ ความน่าจะเป็นของสัดส่วนในการประกอบกันของยีนส์ ความน่าจะเป็นของการย้ายถิ่นฐานที่อยู่อาศัย แบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์ และการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่องสื่อสารเข้ารหัส เป็นต้น

นิยามของกระบวนการมาร์คอฟและลูกโซ่มาร์คอฟ ที่น่าสนใจมีดังนี้

(1) นิยาม 1 : กระบวนการสุ่มตาคาสติก (Stochastic Process) คือเหตุการณ์ที่มีตัวแปรเป็นแบบสุ่มโดยมีเวลาเป็นปัจจัยบังคับและผลที่ได้ (Outcome) ณ ขั้นที่ n จะขึ้นกับผลที่ได้ของขั้นที่ผ่านมา มักแสดงผลที่เป็นไปได้ (Possible Outcomes) ให้อยู่ในรูปของต้นไม้ (Tree) โดยมีความน่าจะเป็นสาขา (Branch Probabilities) ที่จะเกิดเหตุการณ์จากขั้นที่ $n-1$ ไปสู่เหตุการณ์ขั้นที่ n และ

กระบวนการสุ่มสุ่มที่มีฟังก์ชันของผลที่ได้ทั้งหมดเป็นขอบเขตของเซตของจำนวนจำกัดที่กำหนดเรียกว่า กระบวนการสุ่มสุ่มแบบจำกัด (Finite Stochastic Process)

(2) นิยาม 2 : พิจารณาความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข ($Pr(q|p)$) เมื่อมี q เป็นเหตุการณ์ที่จะเกิดและ p เป็นเงื่อนไขของการเกิดเหตุการณ์และนิยามของกระบวนการมาร์คอฟแบบจำกัด (Finite Markov Process) ก็คือ กระบวนการสุ่มสุ่มแบบจำกัด ที่มี p ซึ่งเป็นค่าที่เป็นจริงขึ้นกับผลที่ได้จากเหตุการณ์ที่ผ่านมาเท่านั้น ซึ่งเรียกว่าคุณสมบัติมาร์คอฟ (Markov Property) โดยที่ $Pr[f_n = s_j | (f_{n-1} = s_i) \wedge P]$ เท่ากับ $Pr[f_n = s_j | f_{n-1} = s_i]$

(3) นิยาม 3 : ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยน (Transition Probabilities) ของขั้นที่ n สำหรับกระบวนการมาร์คอฟคือ $P_{ij}(n)$ เท่ากับ $Pr[f_n = s_j | f_{n-1} = s_i]$

(4) นิยาม 4 : ถ้า U_n คือเซตของผลที่ได้จากเหตุการณ์ n ครั้ง สมาชิกของ U_n จะเรียกว่าสถานะ(States) และ นิยามของลูกโซ่มาร์คอฟแบบจำกัด (Finite Markov Chain) คือ กระบวนการมาร์คอฟแบบจำกัดที่มีสถานะจำนวนจำกัดและความน่าจะเป็นของการเปลี่ยน $p_{ij}(n)$ ไม่ขึ้นกับ n

(5) นิยาม 5 : เมตริกซ์ส่งผ่าน (Transition Matrix) สำหรับลูกโซ่มาร์คอฟคือเมตริกซ์ (Matrix) P โดยมีส่วนต่อเข้า (Entries) คือ p_{ij} และเวกเตอร์เริ่มต้นของความน่าจะเป็น คือ Π_0 เท่ากับ $\{P_j^{(0)}\}$ เท่ากับ $\{Pr[f_0 = s_j]\}$

(6) นิยาม 6 : เซตของสถานะแบบเออร์โกดิก (Ergodic Set of States) คือ เซตของสถานะที่ทุกๆสถานะสามารถจะเข้าถึงได้จากทุกๆสถานะอื่นๆ และเมื่อเข้าไปในเซตแล้วไม่สามารถออกไปยังเซตของสถานะอื่นได้อีก สถานะแบบเออร์โกดิก (Ergodic State) เป็นสมาชิกของเซตแบบเออร์โกดิก (Ergodic Set)

(7) นิยาม 7 : เซตของสถานะแบบชั่วคราว (Transient Set of States) คือ เซตของสถานะที่ทุกๆสถานะสามารถจะเข้าถึงได้จากทุกๆสถานะอื่นๆ และเมื่อเข้าไปแล้วสามารถออกไปยังเซตของสถานะอื่นได้อีก สถานะแบบชั่วคราว (Transient State) เป็นสมาชิกของเซตแบบชั่วคราว (Transient Set)

(8) นิยาม 8 : สถานะดูดกลืน (Absorbing State) คือสถานะที่เมื่อเข้าไปแล้วไม่สามารถออกไปยังสถานะอื่นได้อีกนั่นคือเป็นสมาชิกของเซตแบบเออร์โกดิกที่มีสมาชิกเพียงหนึ่งเดียว

(9) นิยาม 9 : ลูกโซ่แบบเออร์โกดิก (Ergodic Chain) คือลูกโซ่สถานะที่ประกอบกันเป็นเซตของสถานะแบบเออร์โกดิกเซตเดียว

(10) นิยาม 10 : ลูกโซ่วน (Cyclic Chain) คือ ลูกโซ่แบบเออร์โกดิกที่จะมีการเคลื่อนที่จากสถานะที่มีการจัดลำดับไว้ก่อนแล้วและมีคาบเท่ากับ d ซึ่งมีค่ามากกว่าหนึ่ง โดยสถานะทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นเซตวน (Cyclic Sets) จำนวน d เซต

(11) นิยาม 11 : ลูกโซ่ปกติ (Regular Chain) คือ ลูกโซ่แบบเออร์โกดิกที่ไม่ใช่ ลูกโซ่วน

1.2.2 วิธีการควบคุมความผิดพลาด

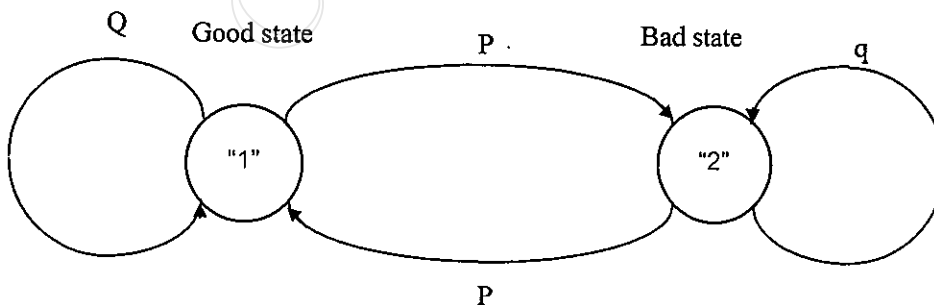
Shannon, C.E. [23] ได้บุกเบิกงานทางด้านทฤษฎีสารสนเทศ (Information Theory) ซึ่งกล่าวถึงการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน (Noisy Channel) ว่าจะเกิดความน่าเชื่อถือในการสื่อสารขึ้นในกรณีอัตราการส่งสัญญาณน้อยกว่าความจุของช่องสื่อสาร (Channel Capacity) ถ้ามีการเข้ารหัส (Encoding) และถอดรหัส (Decoding) ที่เหมาะสม หลังจากนั้นก็ได้มีการค้นคว้าหาวิธีการเข้ารหัสและการถอดรหัสที่มีประสิทธิภาพ ในการส่งผ่านข้อมูลที่เป็นลักษณะส่งทางเดียวจากเครื่องส่งถึงเครื่องรับการที่จะควบคุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นต้องมีการแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้า ซึ่งจะต้องใช้รหัสที่สามารถแก้ไขความผิดพลาดที่ตรวจจับได้ที่เครื่องรับและเป็นไปได้โดยอัตโนมัติ รหัสที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันนี้แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ รหัสแบบบล็อก (Block Codes) และ รหัสแบบคอนโวลูชันนอล (Convolutional Codes) เครื่องเข้ารหัสสำหรับรหัสแบบบล็อกนั้นจะทำหน้าที่แบ่งข่าวสารที่รับเข้ามาออกเป็นส่วนๆ เรียกว่าบล็อกของข่าวสาร (Message Block) แต่ละบล็อกมีความยาว k บิต แล้วทำการแปลงรูปไปให้บล็อกของข่าวสารนี้ให้มีความยาว n บิต โดยที่ n มีค่ามากกว่า k ซึ่งจะมีวิธีการแปลงรูปหลายลักษณะขึ้นกับวิธีการแปลงและลักษณะของรหัสนั้นๆ บล็อกของข่าวสารที่มีความยาว n บิต นี้เรียกว่าคำรหัส (Code Words) และรหัสที่ได้เรียกว่า “ (n, k) Block Code” วิธีการเข้ารหัสแบบบล็อกนี้แต่ละบล็อกของข่าวสารจะถูกประมวลแยกอิสระจากกัน แต่ในเครื่องเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนอลนั้นแม้ข่าวสารจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกแล้วก็ตามแต่การเข้ารหัสนอกจากจะขึ้นกับจำนวน k บิตของข่าวสารแล้วยังต้องขึ้นกับจำนวน m บล็อกของข่าวสารที่ผ่านมา นั่นคือเครื่องเข้ารหัสมีลำดับความจำ (Memory Order) และรหัสที่ได้เรียกว่า “ (n, k, m) Convolutional Code” อัตราส่วนระหว่าง k ต่อ n จะเรียกว่าอัตรารหัส (Code Rate, R)

ในการสื่อสารข้อมูลถ้าหากสามารถทำได้ในแบบส่งได้ทั้งสองทาง กล่าวคือแต่ละฝ่ายสามารถส่งและรับข้อมูลได้ทั้งสองฝ่ายในเวลาเดียวกันก็อาจจะมีการควบคุมความผิดพลาดได้อีกแบบคือใช้วิธีการตรวจจับความผิดพลาดแล้วก็ส่งซ้ำบล็อกของข่าวสารที่มีความผิดพลาดนั้น ซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่าการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ ซึ่งเครื่องรับจะทำการตรวจจับว่าข่าวสารที่ได้รับนั้นมีความผิดพลาดของข้อมูลเกิดขึ้นหรือไม่ โดยอาจจะใช้รหัสตามที่กล่าวมาเป็นเครื่องมือก็ได้ ซึ่งโดยปกติความสามารถของรหัสในการตรวจจับความผิดพลาดจะสูงกว่าความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาด หากเครื่องรับตรวจพบมีความผิดพลาดเกิดขึ้นก็จะส่งสัญญาณร้องขอให้เครื่องส่งทำการส่งบล็อกของข่าวสารที่ผิดพลาดนั้นซ้ำมาอีกครั้งหนึ่ง ระบบการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติมีสองลักษณะคือการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบหยุดและคอย (Stop and Wait ARQ) และการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง (Continuous ARQ) ในกรณีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบหยุดและคอยนั้น

เครื่องส่งจะส่งคำรหัสให้เครื่องรับแล้วรอสัญญาณตอบกลับซึ่งอาจเป็นสัญญาณตอบกลับแบบบวก (Positive Acknowledgment, ACK) หรือสัญญาณตอบกลับแบบลบ (Negative Acknowledgment, NAK) จากเครื่องรับซึ่งสัญญาณตอบกลับแบบบวกหมายถึงไม่มีความผิดพลาด เครื่องส่งก็จะส่งคำรหัสต่อไป และสัญญาณตอบกลับแบบลบหมายถึงมีความผิดพลาด เครื่องส่งก็จะส่งคำรหัสที่ส่งมาก่อนและผิดพลาดนั้นซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ในกรณีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบต่อเนื่องนั้น เครื่องส่งจะส่งคำรหัสไปอย่างต่อเนื่องยังเครื่องรับและรับสัญญาณตอบกลับอย่างต่อเนื่องเช่นกันแต่เมื่อใดที่ได้รับสัญญาณตอบกลับแบบลบเครื่องส่งจะเริ่มการส่งซ้ำคำรหัสเดิม โดยการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบต่อเนื่องนี้มีสองวิธีคือการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบกลับไปบล็อกที่ N ของข่าวสาร (Go-Back-N ARQ) วิธีนี้เครื่องส่งจะย้อนหลังไปส่งคำรหัสเดิมที่ส่งมาแล้วล่าสุดเป็นจำนวน N คำรหัส อีกวิธีหนึ่งคือการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบเลือกส่งซ้ำ (Selective-Repeat ARQ) โดยเครื่องส่งจะเลือกส่งเฉพาะคำรหัสที่ผิดพลาดเท่านั้นวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบกลับไปบล็อกที่ N ของข่าวสาร แต่ระบบต้องการวงจร ตรรกและบัฟเฟอร์ (Buffer) มากขึ้น การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบต่อเนื่องจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบหยุดและคอย แต่จะมีราคาแพงกว่าและข้อได้เปรียบของการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติต่อการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าก็คือ ระบบการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติเป็นระบบที่ปรับตัวได้ (Adaptive System) กล่าวคือข้อมูลถูกส่งซ้ำเฉพาะกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นเท่านั้น แต่ในบางกรณีของช่องสื่อสารก็พบว่าการผสมกันระหว่างการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติและการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าก็ให้ประสิทธิภาพมากขึ้นในแง่ของ throughput ของระบบที่เป็นการสื่อสารแบบสองทางซึ่งเรียกว่า การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบผสม (Hybrid ARQ)

1.2.3 วรรณกรรมปริทัศน์

Gilbert, E.N. [8] ได้เสนอแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเบิร์สต์ (Burst Noise) ดังแสดงในรูป 1



รูป 1.1 แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ

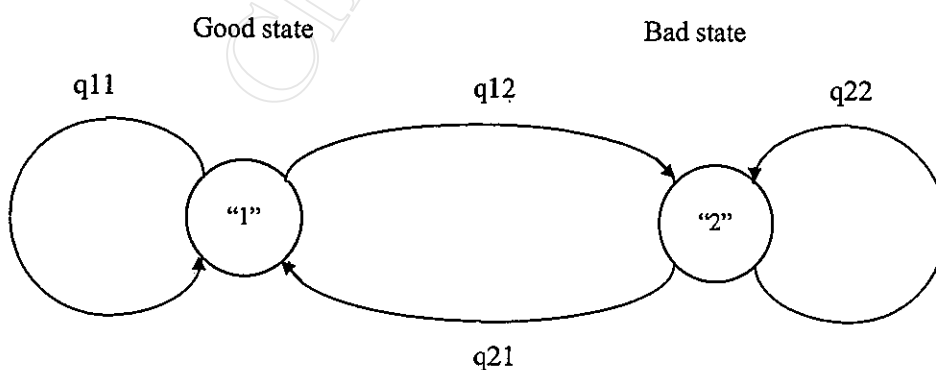
แบบจำลองนี้ สถานะ “1” เป็นสถานะที่ไม่มีบิตผิดพลาดเรียกว่า “Good State” มีความน่าจะเป็นที่จะคงอยู่สถานะนี้คือ Q ความน่าจะเป็นที่จะเปลี่ยนสถานะจาก “1” ไปเป็น สถานะ “2” คือ P และ ณ ที่สถานะ “2” มีความน่าจะเป็นที่จะคงอยู่สถานะเดิมคือ q ความน่าจะเป็นที่จะเปลี่ยนสถานะจาก “2” ไปเป็น “1” คือ p สถานะ “2” นี้เป็นสถานะที่เกิดบิตผิดพลาดเรียกว่า “Bad State” โดยการเปลี่ยนสถานะจะสามารถเป็นไปได้ ณ ทุกบิต

ต่อมา Elliott, E.O. [6] ได้ดัดแปลงแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะแบบของ Gilbert เพื่อนำมาประยุกต์กับช่องสื่อสารระบบโทรศัพท์โดยกำหนดให้ทั้งสองสถานะต่างก็มีโอกาสที่จะเกิดบิตผิดพลาดขึ้นได้แต่ด้วยค่าความน่าจะเป็นที่ต่างกัน

Fritchman, B.D. [7] เสนอแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟแบบแยกส่วน (Partitioned Markov Chain Model) โดยแบ่งกลุ่มสถานะของบิตออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นสถานะที่บิตไม่ผิดพลาด (Error-free States) มี k สถานะ ส่วนอีกกลุ่มเป็นสถานะที่บิตผิดพลาด (Error States) มี n สถานะ โดยที่แบบจำลองของ Gilbert ก็คือแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟแบบแยกส่วน (2, 1) นั่นเอง

Brayer, K. and Cardinale, O. [2] ได้นิยามค่าสถิติต่างๆ เพื่อที่จะอธิบายลักษณะของการเกิดบิตผิดพลาดเช่น ค่าการกระจายของช่วงข้อมูลระหว่างบิตผิดพลาด (Gap Distribution) ค่าการกระจายของเบิสต์ (Burst Distribution) ค่าการกระจายของช่วงห่างของเบิสต์ (Burst Interval Distribution) รวมทั้งกล่าวถึงการใช้วิธีการวางสลับ (Interleaving) ในการทำให้ขบวนข้อมูลที่มีลักษณะการเกิดความผิดพลาดแบบเบิสต์กลายเป็นแบบสุ่ม

McCullough, R.H. [13] ได้เสนอแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟที่ดัดแปลงจากแบบของ Gilbert และแบบของ Elliott แต่ลักษณะของสถานะ “1” และ “2” ต่างก็เป็นช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะซึ่งต่างก็มีความน่าจะเป็นของการเกิดบิตผิดพลาด โดยมีเงื่อนไขที่จะเปลี่ยนสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่งหลังจากเกิดบิตผิดพลาดขึ้นเท่านั้น ลักษณะของแบบจำลองดังแสดงในรูป 2



รูป 1.2 แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ

และได้เสนอวิธีการหาค่าการกระจายของช่วงปราศจากความผิดพลาด (Error-free Run Distribution) และค่าสถิติความผิดพลาดแบบบล็อกข้อมูล (Block Error Statistics) ของแบบจำลองที่เสนอด้วย

McManamon, P. [14] ได้เสนอเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นต่างๆ ในแบบจำลองแบบของ McCullough โดยได้ให้ความสัมพันธ์ของค่าอัตราผิดพลาดเฉลี่ยและค่าความยาวของช่วงข้อมูลระหว่างบิตผิดพลาดเฉลี่ย

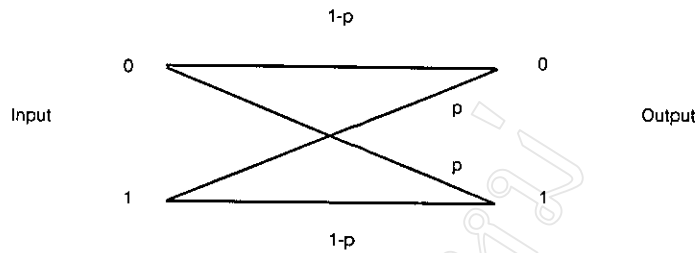
Tsai, S. [24] ได้นำเอาแบบจำลองของ Fritchman มาประยุกต์กับช่องสื่อสารความถี่สูง โดยเป็นแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟแบบแยกส่วนสามสถานะ (3-State Partitioned Markov Chain Model) และผลปรากฏว่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงค่าสถิติต่างๆตามที่ได้นิยามไว้ (Brayer, K. and Cardinale, O. [2]) ได้ใกล้เคียงกับค่าสถิติของข้อมูลจริงมาก

Rahman, M. and Bulmer, M. [21] ได้นำเอาแบบจำลองแบบของ McCullough มาประยุกต์ใช้กับช่องสื่อสารความถี่เคลื่อนที่ภาคพื้นดิน ซึ่งมีลักษณะของความผิดพลาดเป็นแบบบิรสต์ เนื่องมาจากการเลือนจางของสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณหลายทาง (Multipath Channels) ปรากฏว่าต้องใช้จำนวนสถานะถึงสี่สถานะจึงจะสามารถได้ค่าสถิติต่างๆจากแบบจำลองได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง

Tsai, S. and Schmied, P.S. [25] ได้ใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟแบบแยกส่วนสามสถานะ เป็นแบบจำลองของการเกิดความผิดพลาดในช่องสื่อสารความถี่และแสดงให้เห็นว่า ระดับขึ้นของการวางสลับ (Degree of Interleaving) มีความสัมพันธ์กับเมตริกซ์ส่งผ่าน โดยพบว่าหลังจากวางสลับข้อมูลด้วยความลึก N หรือสลับข้อมูล N ครั้งแล้ว ข้อมูลที่ได้ใหม่มีเมตริกซ์ส่งผ่านที่สามารถแสดงได้ด้วยเมตริกซ์ส่งผ่านเดิมยกกำลัง N

ในรายงานฉบับย่อยของ CCIR [4] สรุปถึงเอกสารหลายฉบับที่กล่าวถึงความเห็นเกี่ยวกับสถิติที่ใช้อธิบายความผิดพลาดและการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อควบคุมความผิดพลาดในการส่งข้อมูลผ่านช่องสื่อสารความถี่สูงและกล่าวอีกว่าสถิติที่ใช้อาจจะไม่สามารถครอบคลุมคุณลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดได้อย่างแท้จริงจึงเสนอให้มีการตีพิมพ์ข้อมูลดิบแก่สาธารณะชน แต่ข้อมูลส่วนใหญ่ยังคงเป็นความลับในทางทหารและไม่สามารถทำได้ตามเสนอ

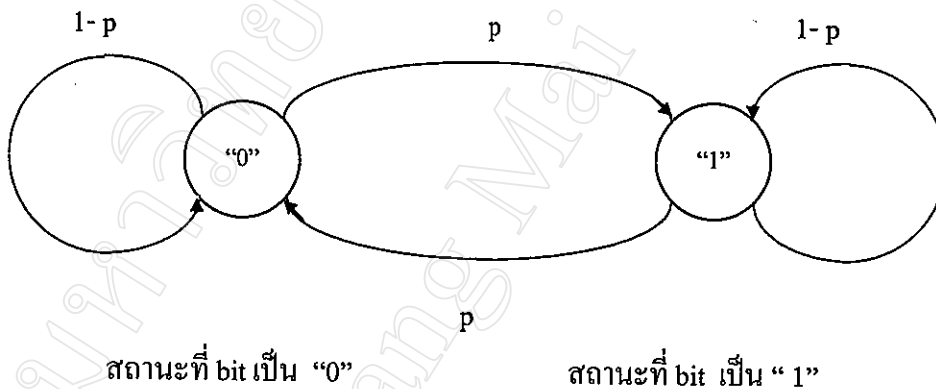
Proakis, J.G. [20] ได้อธิบายเกี่ยวกับช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะ (Binary Symmetric Channel, BSC) ว่าช่องสื่อสารชนิดนี้มีลักษณะข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกเป็นเลขฐานสอง (Binary) ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสัญลักษณ์ (Transition Probabilities) จาก “0” เป็น “1” หรือจาก “1” เป็น “0” คือ p และความน่าจะเป็นของการคงสัญลักษณ์เดิมคือ $1-p$ ดังรูป 3



รูป 1.3 ช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะ

ช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Noisy Binary Channel” เป็นช่องสื่อสารแบบไม่มีความจำ (Memoryless Channel) และใช้จำลองแบบช่องสื่อสารชนิดความผิดพลาดแบบสุ่มที่มีอัตราบิดผิดพลาด (Bit Error Rate, BER) เท่ากับ p

ถ้าแสดงในรูปแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟก็ได้ลักษณะรูปแบบจำลองดังรูป 4



รูป 1.4 ช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะ

Berlekamp, E.R. [1] กล่าวสรุปความสัมพันธ์ของรหัสที่ใช้ กับพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบสื่อสารอาทิเช่น ความเร็วในการส่งข้อมูล (Speed) และความล่าช้า (Delay) แนวความคิดที่สำคัญพอจะสรุปได้ดังนี้ วิธีการถอดรหัสดของรหัสแบบคอนโวลูชันนอลที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือใช้ “Viterbi Algorithm” สำหรับกรณีการสื่อสารที่ต้องแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงเช่น เครือข่ายสวิตช์กลุ่มข้อมูล(Packet Switched Network) แต่ละช่วงข้อมูลจะขาดความต่อเนื่อง จึงทำให้การใช้รหัสแบบบล็อกจะมีความเหมาะสมกว่ารหัสแบบคอนโวลูชันนอล สำหรับการวางสลับนั้นจริงอยู่ที่เป็นการกระจายข้อมูลที่มีลักษณะความผิดพลาดเป็นแบบเบิร์ตให้เป็นความผิดพลาดแบบสุ่มแต่บางที่

อาจจะทำให้เกิดเบิร์สต์ของความผิดพลาดขึ้นใหม่ก็ได้ถ้าเลือกความลึกของการวางสลับ (Depth of Interleaving) ที่ไม่เหมาะสม ในกรณีการส่งข้อมูลแบบกลุ่ม (Packet Transmission) การวางสลับอาจทำให้เกิดการล่าช้าซึ่งยอมรับไม่ได้ อาทิเช่นการประมวลผลสัญญาณเสียงพูด เป็นต้น

Lin, S. and Costello Jr., D.J. [10] กล่าวว่าในการถอดรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไบนารีนั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าระบบการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติ กล่าวคือเครื่องถอดรหัสของรหัสแบบบล็อกต้องมีการเข้าจังหวะ (Synchronization) เพื่อรู้ถึงขอบเขตระหว่างคำรหัสแต่ละคำ และกรณีเครื่องถอดรหัสของรหัสแบบคอนวูลูชันนอลต้องรู้ถึงลักษณะของข้อมูลที่ถอดรหัสผ่านมาก่อนจึงจะสามารถถอดรหัสของคำรหัสปัจจุบัน เหตุนี้จึงอาจทำให้เกิดการแพร่ของความผิดพลาด (Error Propagation) และเกิดการล่าช้าของข้อมูลเนื่องจากเครื่องถอดรหัสต้องทำงานกับจำนวนบิตที่ถอดรหัสมากเกินไป

Miller, M.J. and Lin, S. [17] เสนอวิธีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบโหมดผสม (Mixed Mode ARQ) คือวิธีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบเลือกส่งซ้ำกับการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบกลับไประหว่างที่ N คำรหัส (SR+GBN) และวิธีการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบเลือกส่งซ้ำกับการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบกลับไประหว่างที่ N คำรหัสชนิด STUTTER (SR+ST) ซึ่งมีการวิเคราะห์สมรรถนะของการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติทั้งสองแบบ โดยที่ทั้งสองแบบมีข้อดีคือสมรรถนะไม่ขึ้นกับเวลาเดินทางของสัญญาณและใช้ขนาดของบัฟเฟอร์ที่เครื่องรับอย่างจำกัด

Lin, S. *et al.* [11] อธิบายรูปแบบต่างๆของการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติที่ใช้หลักการส่งข้อมูลซ้ำโดยอัตโนมัติรวมกับการใช้รหัสตรวจจับความผิดพลาดที่มีอัตรารหัสสูง การวิเคราะห์การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติจะอยู่ภายใต้ข้อสมมุติฐานว่าช่องสื่อสารป้อนกลับ (Feedback Channel) นั้นเป็นช่องสื่อสารที่ไม่มีสัญญาณรบกวน (Noiseless Channel) ซึ่งบางครั้งไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัตินั้นทำได้ง่ายและทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ แต่ประสิทธิภาพของระบบก็ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตรวจจับความผิดพลาดของรหัส ฉะนั้นการที่จะทำให้การตรวจจับความผิดพลาดเกิดผิดพลาดน้อยลงก็ต้องเลือกใช้รหัสที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความน่าเชื่อถือของระบบสูงสุด รูปแบบการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติมีสามลักษณะคือ การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบหยุดและคอย การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบกลับไประหว่างที่ N คำรหัส และการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบเลือกส่งซ้ำ แม้ว่ารูปแบบหลังจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าสองแบบแรกแต่ก็มีความยุ่งยากที่ต้องมีบัฟเฟอร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามก็ยังเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป เพื่อลดปัญหาข้อด้อยดังกล่าวจึงมีการเสนอให้ใช้การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบโหมดผสม

Miller, M.J. [16] กล่าวว่าการใช้การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติรวมกับรหัสตรวจจับความผิดพลาดที่เชื่อถือได้จะเป็นทางปฏิบัติที่น่าไปสู่ความเชื่อถือได้ของการควบคุมความผิดพลาดในระบบ

เครือข่ายบริการแบบประมวล (Integrated Services Networks) ทั้งนี้การร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติใช้ได้กับระบบสื่อสารที่มีช่องสื่อสารป้อนกลับเท่านั้น กรณีที่ระบบสื่อสารมีการสื่อสารทางเดียว การเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าก็ยังคงมีความสำคัญอย่างมากและเป็นทางเลือกทางเดียวที่จะทำได้ในการควบคุมความผิดพลาด

Nourry, G.R. and Mackie, A.J. [18] เสนอรูปแบบการควบคุมความผิดพลาดที่ต่างออกไปกล่าวคือเป็นระบบที่ปรับตัวได้ (Adaptive Systems) ในการที่จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขของการแพร่คลื่น วิธีนี้เป็นการเสนอแนวทางที่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางการสื่อสารให้ดีขึ้น อาทิเช่นการเชื่อมต่อของระบบ ความเร็วในการส่งข้อมูล วิสัยความสามารถ ความเชื่อถือได้ และการคงตัวของระบบ อย่างไรก็ตามการจัดการกับปัจจัยเหล่านี้ค่อนข้างซับซ้อนและกำลังอยู่ระหว่างการค้นคว้าเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง

Cook, S.C. *et al* [5] เสนอวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของระบบวิทยุดิจิทัลโดยพิจารณาความพร้อมทำงานของระบบ (System Availability) และวิสัยความสามารถของระบบด้วยเทคนิคสองประการคือใช้การตรวจจับที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Detection) และใช้การปรับตัวแบบป้อนกลับอย่างรวดเร็ว (Fast Feedback Adaptive Schemes) โดยประยุกต์ใช้กับการสื่อสารวิทยุทหาร

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

แนวทางในการแก้ปัญหาในเรื่องความยุ่งยากซับซ้อนดังกล่าวมาแล้วนั้นก็ก็ต้องศึกษาและค้นหาวิธีการที่จะทำให้การควบคุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์ให้มีความสะดวกในการใช้งานและมีประสิทธิภาพโดยนำเสนอแบบจำลองของลักษณะการเกิดความผิดพลาดในช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์ด้วยแบบจำลองที่ง่ายและสะดวกในการที่จะใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของการเกิดความผิดพลาดซึ่งจะสามารถใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าและการร้องขอส่งซ้ำอัตโนมัติแบบง่าย ๆ ในการควบคุมความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้ พร้อมทั้งเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองที่ใช้ด้วย รวมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะของการควบคุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์โดยอาศัยแบบจำลองที่นำเสนอเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์วิธีการต่างๆในการควบคุมความผิดพลาดของข้อมูลที่ส่ง อาทิเช่น การวางสลับ (Interleaving) เพื่อทำให้ช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์กลายสภาพเป็นช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะซึ่งมีลักษณะของความผิดพลาดแบบสุ่ม รวมทั้งการใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าแบบง่าย ๆ ประกอบกับวิธีอื่นๆในการ

ควบคุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นหรือการใช้เทคนิคของการส่งซ้ำ เพื่อจะป้องกันปัญหาของการเกิดความผิดพลาดในการรับข้อมูลที่ปลายทางเมื่อต้นทางส่งมาให้

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ก็คือ

1.3.1 เพื่อค้นหาแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟอย่างง่าย ในการจำลองแบบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์และวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟที่น่าเสนอ

1.3.2 เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ของ อันดับยกกำลังของเมตริกซ์ส่งผ่านของแบบจำลอง ลูกโซ่มาร์คอฟที่น่าเสนอกับความถี่ของการวางสลับ

1.3.3 เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถของรหัสแบบบล็อก ในการที่จะตรวจจับหรือแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟที่น่าเสนอเป็นเครื่องมือ

1.3.4 เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถของระบบส่งข้อมูลซ้ำ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือของระบบสื่อสารโดยใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟที่น่าเสนอเป็นเครื่องมือ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้มีขอบเขต และวิธีการวิจัยดังนี้

1.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ

เนื่องจากงานวิจัยมีข้อจำกัดในด้านเครื่องมือทดลอง ดังนั้นเพื่อให้ได้ขอบวนข้อมูลของช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์ตส์ จึงจะอาศัยแบบจำลองที่ Tsai, S. [24] เสนอนำเสนอไว้ในการจำลองแบบช่องสื่อสารความถี่สูงมาผลิตข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการวิจัยนี้โดยลักษณะของข้อมูลจะมีสองลักษณะคือสัญลักษณ์ “0” แทนบิตที่ถูกต้องที่เครื่องรับและสัญลักษณ์ “1” แทนบิตที่เกิดความผิดพลาดในการรับข้อมูลที่เครื่องรับ จำนวนบิตที่ใช้ทดสอบมี 4,000,000 บิตซึ่งยาวเพียงพอที่จะเกิดความผิดพลาดจำนวนมากและเพิ่มความน่าเชื่อถือในการวิเคราะห์ ข้อมูลต้นแบบจะถูกผลิตขึ้นมา 4 ชุดเพื่อตรวจสอบความแน่นอนถูกต้องของวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ในวิธีการหาค่าพารามิเตอร์นี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่าเทคนิคการสืบค้นแบบไบนารี (Binary Search Technique)

ในการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยการเทียบผลรวมของผลต่างยกกำลังสองของค่าการกระจายของช่วงปราศจากความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะที่กำลังหาพารามิเตอร์อยู่กับข้อมูลต้นแบบและจะมีการเทียบค่าสถิติต่างๆของข้อมูลทั้งสองแหล่งสถิติที่ใช้เช่น ค่าการกระจายช่วงข้อมูลระหว่างบิตผิดพลาด (Gap Distribution) ค่าการกระจายของช่วงปราศจากความผิดพลาด (Error-Free Run Distribution) ค่าการกระจายของเบิสต์ (Burst Distribution) ค่าการกระจายของช่วงห่างของเบิสต์ (Burst Interval Distribution) ค่าสถิติความผิดพลาดแบบบล็อกข้อมูล (Block Error Statistics) เป็นต้น ในการดำเนินการนี้ใช้โปรแกรมภาษา C และโปรแกรม MATLAB ในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดและการวาดรูปกราฟสถิติต่างๆตามลำดับ

1.4.2 การหาความลึกของการวางสลับตำแหน่งข้อมูล

ดังทราบแล้วว่าความลึกของการวางสลับตำแหน่งข้อมูลจะทำให้ความผิดพลาดแบบเบิสต์ ที่เกิดในขบวนข้อมูลเปลี่ยนไปคล้ายคลึงกับความผิดพลาดแบบสุ่ม อีกทั้งความลึกของการวางสลับตำแหน่งข้อมูลยังมีความสัมพันธ์กับอันดับยกกำลังของเมตริกซ์ส่งผ่านของแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟ ในการวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาถึงแนวคิดนี้ว่าใช้ได้กับแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะที่น่าเสนอหรือไม่ โดยในการดำเนินการวางสลับตำแหน่งข้อมูลนั้นจะเลือกความยาวของช่วงข้อมูลที่จะนำเข้าเครื่องสลับตำแหน่งจำกัดจำนวนและความยาวช่วงข้อมูลไม่เกิน 500 บิตซึ่งเป็นความยาวของรหัสแบบบล็อกอย่างง่ายส่วนใหญ่ โดยจะเลือกวิเคราะห์ที่ความยาวรหัสที่ 6, 12, 24, 48, 384 บิต ซึ่งเพียงพอที่จะพิสูจน์และสรุปแนวความคิดดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

1.4.3 การวิเคราะห์ความสามารถของรหัสแบบบล็อก

ในการวิเคราะห์นี้จะทำการเปรียบเทียบความสามารถของรหัสแบบบล็อกที่สมบูรณ์ (Perfect Block Code) อย่างง่าย เมื่อถูกนำมาใช้งานกับช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิสต์ และช่องสื่อสารแบบสมมาตรสองสถานะ และจำกัดจำนวนบิตที่รหัสจะสามารถแก้ไขได้คือไม่เกิน 3 บิตต่อหนึ่งคำรหัส ซึ่งจะทำให้ทราบว่าจะต้องมีเทคนิคการควบคุมความผิดพลาดแบบอื่นเข้ามาประกอบจึงจะทำให้การใช้นิรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้า กับช่องสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิสต์มีประสิทธิภาพขึ้น และจะจำกัดจำนวนรหัสที่จะใช้โดยเลือกที่จะวิเคราะห์รหัสต่อไปนี้ Hamming(7, 4), BCH(15, 7), Golay(24, 12) ซึ่งถือเป็นรหัสแบบบล็อกที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

1.4.4 การวิเคราะห์ความสามารถของวิธีการส่งซ้ำ

ในการวิเคราะห์นี้จะทำการเปรียบเทียบความสามารถของวิธีการส่งซ้ำแบบง่าย ๆ อย่าง ลำพังและใช้ร่วมกับการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบไปหน้าว่าต้องการจำนวนการส่งซ้ำเท่าไร และมีประสิทธิภาพเพิ่มเท่าใดในแง่ของสมรรถนะที่ได้โดยอาศัยพารามิเตอร์ของแบบจำลองลูกโซ่ มาร์คอฟที่หาได้ข้างต้นมาประกอบการวิเคราะห์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลของงานวิจัยนี้คาดว่าจะได้รับประโยชน์ดังนี้

1.5.1 ได้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ ซึ่งสามารถจำลองการเกิดความผิดพลาดในช่องสื่อสารแบบเบิสต์ได้

1.5.2 ได้วิธีการหาค่าความลึกที่เหมาะสมของการวางสลับตำแหน่งข้อมูลในการทำให้ความผิดพลาดในช่องสื่อสารแบบเบิสต์กลายเป็นแบบสุ่ม

1.5.3 สามารถวิเคราะห์ความสามารถของรหัสแบบบล็อกในการควบคุมความผิดพลาดของการส่งข้อมูลผ่านช่องสื่อสารโดยใช้พารามิเตอร์ของแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ

1.5.4 สามารถวิเคราะห์ความสามารถของวิธีการส่งซ้ำ โดยใช้ พารามิเตอร์ของแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสองสถานะ