บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

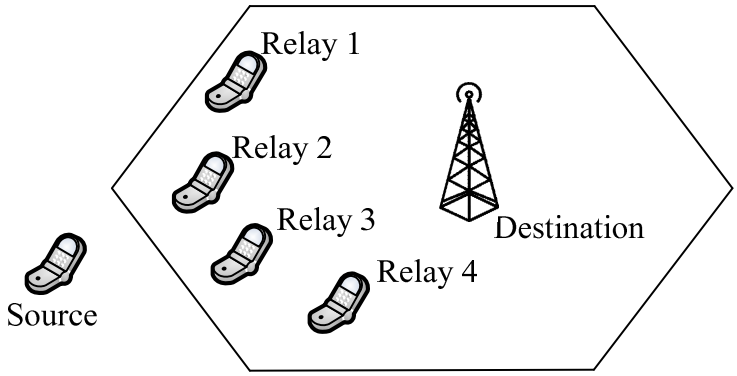
ในบทนี้จะเป็นการนำเสนองานวิจัย ซึ่งเป็นการพัฒนาเทคนิคการส่งต่อข้อมูล ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่บนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแนวราบแบบเรย์ลี (Rayleigh-Flat Fading) ที่มีการส่งผ่าน 2 ฮอฟ โดยใช้ วิธีการเข้าหรัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) และโพรโทคอลการส่งต่อสัญญาณแบบขยายและส่งต่อ (Amplify-and-Forward หรือ AF) การวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการเลือกเส้นทาง ด้วยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ของเส้นทางแต่ละโหนดส่งผ่าน เพื่อใช้ในการส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทางต่อไป

ซึ่งในที่นี้จะขออธิบายถึงเนื้อหางานวิจัย โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ หลักในการพิจารณาเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) และการทำงานของระบบที่นำเสนอ รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

3.1 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

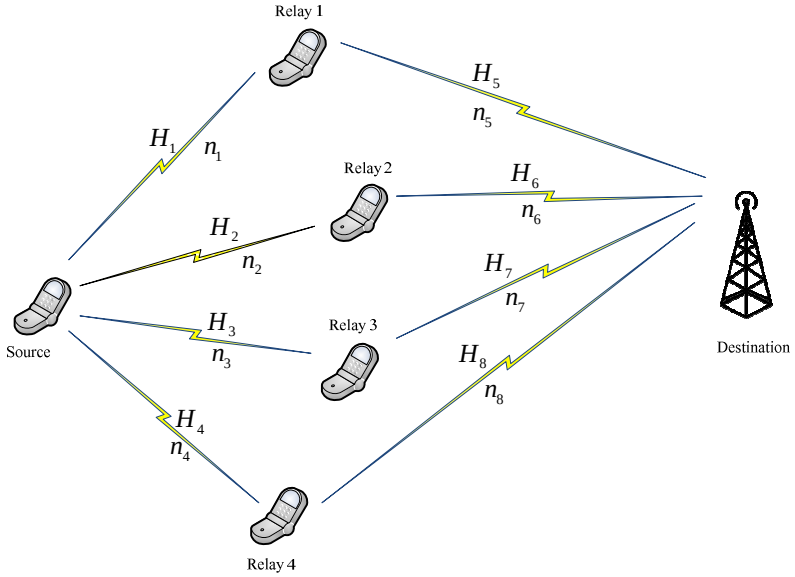
ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการสร้างแบบจำลองจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สายจำพวกโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในปัจจุบันซึ่งมีสายอากาศเพียงต้นเดียว (Single Antenna) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยโครงสร้างระบบกำหนดให้มีโหนดปลายทาง (Destination) หรือ Base Station(BS) , ผู้ใช้งาน (Source) ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทาง 1 เครื่อง และผู้ใช้งานที่เหลือ ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านซึ่งในวิธีที่นำเสนอกำหนดให้มี 4 โหนดส่งผ่าน โหนดต้นทางหรือผู้ส่งอยู่นอกพื้นที่ให้บริการจากโหนดปลายทางและไม่สามารถเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรงได้ (Non Line Of Sight หรือ NLOS) อีกทั้งด้วยพลังงานที่มีจำกัดจำเป็นที่จะต้องใช้ผู้ใช้งานอื่น (โหนดส่งผ่าน) ที่กระจายตัวอยู่ในเครือข่าย ทำการส่งต่อข้อมูลออกไป โดยตลอดช่วงเวลาที่ทำการเลือกเส้นทางและส่งต่อข้อมูลนั้น ทุกๆ โหนดเปรียบเสมือนไม่มีการเคลื่อนที่หรือไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดอปเปอร์ ซึ่งในการเลือกเส้นทางเพื่อส่งต่อข้อมูลจะพิจารณาจากค่าความจุของช่องสัญญาณในแต่ละเส้นทางของโหนดส่งผ่านทั้ง 4 และการส่งต่อข้อมูลของโหนดส่งผ่าน ทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนดแล้วใช้การส่งต่อสัญญาณไปยังโหนดปลายทางซึ่งเป็นการส่งสัญญาณแบบ Amplify-and-

Forward (AF) และในการส่งข้อมูลใช้วิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาในการส่งเปรียบเสมือนการส่งข้อมูลโดยการใช้หลายเสาอากาศส่ง หลายเสาอากาศรับ(MIMO) นั่นเอง ที่ปลายทางจะมีการรวมลำดับของบิต (Combine bit sequence) และจากหลายๆ โหนดส่งผ่านโดยใช้วิธี Maximum Likelihood Detector (ML) เนื่องจากลำดับการส่งผ่านในแต่ละเส้นทางเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งช่องสัญญาณจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่านและจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางได้รับผลกระทบจากการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1



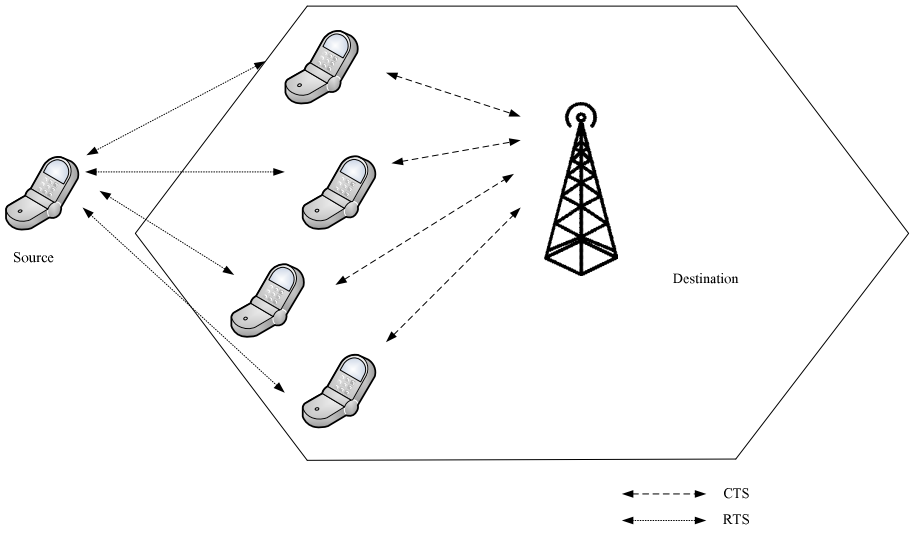
รูปที่ 3.1 ระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ

โดยรูปแบบช่องสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบช่องสัญญาณระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3.2 เป็นรูปแบบช่องสัญญาณระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ โดยกำหนดให้โหนดต้นทาง (Source) และโหนดส่งผ่าน (Relay) สามารถรู้ถึงข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ (Full Channel State Information หรือ CSI) ซึ่งเป็นการแจ้งสภาพของช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างภาครับและภาคส่ง โดยแต่ละเส้นทางในแต่ละโหนดส่งผ่านได้รับผลกระทบจากการจางหายที่เป็นอิสระต่อกัน ในเบื้องต้น โหนดส่งผ่านทั้งหมดในเครือข่ายจะรับสัญญาณคลื่นพาห์อ้างอิง Ready to Send (RTS) จากโหนดต้นทาง และรับสัญญาณคลื่นพาห์อ้างอิง Clear to Send (CTS) จากโหนดปลายทาง จากคลื่นพาห์อ้างอิง RTS จะส่งผลทำให้โหนดต้นทางสามารถที่จะรู้คุณลักษณะเบื้องต้นของช่องสัญญาณไปยังแต่ละโหนดส่งผ่านเพื่อเป็นข้อมูลของช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการเข้ารหัสล่วงหน้าล่วงหน้า (Precoding) และการวัดระดับสัญญาณอ้างอิง RTS จากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน และ CTS จากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง จะเป็นค่าที่โหนดปลายทางนำมาเป็นข้อมูลในการคำนวณหาค่าความจุของช่องสัญญาณ(Channel Capacity) ของแต่ละเส้นทาง และนำค่าความจุของช่องสัญญาณที่ได้นั้นมาวิเคราะห์เลือกเส้นทางที่ดีที่สุด 2 เส้นทางที่จะทำการส่ง โดยทำการแจ้งข้อมูลกลับไปยังโหนดต้นทางผ่าน 2 เส้นทางนั้น เมื่อโหนดต้นทางทราบเส้นทางที่ดีที่สุดแล้ว จะทำการส่งข้อมูลตามเส้นทางที่เลือกด้วยวิธีการ STBC-PC โดยตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการเลือกโหนดส่งผ่าน และช่วงระยะเวลาการส่งต่อข้อมูลทุกๆ โหนดไม่มีการเคลื่อนที่และได้รับผลกระทบจากการจางหาย (Fading) น้อยมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแจ้งสภาพของช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างภาครับและภาคส่ง

3.2 หลักการพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูล (Channel Capacity-Based Path Selection)

การพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งต่อข้อมูล (Path Selection) ด้วยการพิจาณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (*C*) ที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ จะเริ่มต้นจากการสุ่มระยะทาง (*d*) ระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) และพิจารณาโหนดส่งผ่านในโครงข่ายไร้สายมีจำนวน k ตัว โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าความจุของช่องสัญญาณจะเป็นไปตาม Shannon Theorem ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$C = \frac{1}{2}\log_2\left(1+SNR\right) \tag{3.1}$$

เมื่อ C คือ Channel Capacity

h คือ Channel Coefficient

SNR คือ Instantaneous Signal-to-Noise Ratio

โดยค่า *SNR* ในสมการที่ (3.1) มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ $\left(|h|^2\right)$, กำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด (*P*), ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ของสัญญาณรบกวน (N_0) , แบนด์วิดธ์การส่งสัญญาณ (*W*), และ Path Loss $\left(d^{-\alpha}\right)$, ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$SNR = \frac{|h|^2 P}{N_0 W} = \frac{d^{-\alpha} P}{N_0 W} \tag{3.2}$$

โดยวิธีที่นำเสนอจะทำการหาค่าต่ำที่สุดของค่าความจุของช่องสัญญาณหรือ Mutual Information[1] ในแต่ละเส้นทาง โดยวิเคราะห์จากค่าความจุของช่องสัญญาณจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่านตัวที่ i เปรียบเทียบกับความจุของช่องสัญญาณจากโหนดส่งผ่านตัวที่ i ไปยังโหนดปลายทาง ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$C_{\min}^{i} = \min_{i}\left(C_{S\rightarrow R_i}, C_{R_i\rightarrow D}\right) \tag{3.3}$$

---

[1] Kampol Woradit, W. Suwansantisuk, and et. Al. (2009, August). "Outage Behavior of Selective Relaying Schemes" IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, NO.8, pp.3890-3895

หลังจากนั้น จะนำค่าความจุช่องสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่หาได้ในแต่ละเส้นทางจากสมการที่ (3.3) มาทำการเปรียบเทียบเส้นทางที่มีค่าความจุช่องสัญญาณมากที่สุดและค่ารองลงไปตามลำดับ กล่าวคือ ในเส้นทางของโหนดส่งผ่านที่มีค่าค่าความจุช่องสัญญาณมากที่สุดจะถูกกำหนดเป็น R_{sel1} ส่วนส่งผ่านที่มีค่าความจุช่องสัญญาณรองลงไปจะถูกกำหนดเป็น R_{sel2} ดังแสดงในสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ ดังนั้น 2 เส้นทางที่ส่งผ่าน R_{sel1} และ R_{sel2} (2 Selected Paths) จะถูกเลือกออกมาท่ามกลางโหนดส่งผ่านจำนวน *k* ตัว ซึ่งกระบวนการเลือกเส้นทางในการส่งโดยการพิจารณาจากเส้นทางของโหนดส่งผ่านที่มีค่าความจุช่องสัญญาณที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นช่วงเริ่มต้นก่อนการส่งข้อมูลจริง (Pre-Transmission Phase) หรือ กระบวนการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดก่อนที่จะส่งข้อมูลออกไปเพื่อให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลน้อยที่สุดนั่นเอง

$$R_{sel1} = \max_1 \left\{ C_{\min}^1, C_{\min}^2, \ldots, C_{\min}^k \right\} \tag{3.4}$$

$$R_{sel2} = \max_2 \left\{ C_{\min}^1, C_{\min}^2, \ldots, C_{\min}^k \right\} \tag{3.5}$$

3.3 หลักการส่งข้อมูลที่เข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ด้วยวิธีการเข้าสรหัสล่วงหน้า

โดยแนวความคิดของหลักการส่งข้อมูลที่เข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) โดยในที่นี้จะเขียนสัญญลักษณ์ย่อว่า STBC-PC นี้ได้นำมาจาก Ho-Jung An *et.al.* [2] โดย Ho-Jung An *et.al.* ได้นำเสนอการรับส่งสัญญาณแบบร่วมมือที่มีการส่งต่อข้อมูลจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางแบบ AF โดยให้มีผู้ใช้งานในโครงข่าย มีจำนวน 2 คน และมีโหนดปลายทาง 1 เครื่อง กำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทาง ผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน และยังคงมีเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (Line Of- Sight หรือ LOS) โดยสมการต่างๆ ที่ใช้ในการรับส่งสัญลักษณ์ข้อมูลทั้งแบบมีเส้นทางตรงจากต้นทางไปยังปลายทาง (Direct Link) และแบบที่ส่งผ่านโหนดส่งผ่าน 1 ตัวจะไม่ขอแสดงในหัวข้อนี้ ซึ่งสามารถพิจารณาและดูสมการต่างๆ ได้ใน Ho-Jung An *et.al.* แต่ทั้งนี้การคำนวณและแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ของ Ho-Jung An *et.al* จะเหมือนกับงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งหลักการส่งข้อมูลมีดังนี้

รูปแบบการส่งสัญญาณของการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti สามารถเขียนแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

---

[2] Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, (2007) “แหล่งเดิม”

$$\begin{bmatrix} c_1 & -c_2^* \\ c_2 & c_1^* \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

ในรูปแบบที่นำเสนอจะแบ่งรูปแบบการส่งเป็น 2 ช่วงเวลา โดยในคอลัมแรกเป็นทำการส่งในช่วงเวลาที่ 1 คอลัมที่สองทำการส่งในช่วงเวลาที่ 2 ตามลำดับ ทำการมอดูเลตแบบ BPSK จากนั้นเป็นกระบวนการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) จากรูปที่ 3.2 รูปแบบช่องสัญญาณที่นำเสนอทำการนำสัญลักษณ์เข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti คูณด้วยส่วนกลับของช่องสัญญาณ ซึ่งจะได้รูปแบบในการส่งในแต่ละสัญลักษณ์ เมื่อผ่านวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ดังนี้

$$s_1 = H_1^+ c_1 + H_2^+ c_2 \tag{3.7}$$

$$s_2 = -H_1^+ c_2^* + H_2^+ c_1^* \tag{3.8}$$

$$s_3 = H_3^+ c_1 + H_4^+ c_2 \tag{3.9}$$

$$s_4 = -H_3^+ c_2^* + H_4^+ c_1^* \tag{3.10}$$

เมื่อ H_i^+ เป็นส่วนกลับของช่องสัญญาณ H_i หรือ เป็น Pseudo inverse โดยที่ $H^+ = (H^H H)^{-1} H^H$ และ $(.)^*$ เป็น การสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน

วิธีการส่งต่อข้อมูลจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง โดยโหนดส่งผ่านจะรับข้อมูลสัญลักษณ์ที่ผ่านการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ตามลำดับจากโหนดต้นทาง แล้วทำการขยายสัญญาณให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมที่โหนดส่งผ่านได้รับเพื่อให้เกิดความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด จากนั้นทำการส่งต่อข้อมูลไปยังปลายทาง ที่โหนดปลายทางจะทำการรวมข้อมูลที่ได้รับตามลำดับจากโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน ซึ่งโหนดปลายทางจะตรวจจับและตัดสินใจรับสัญลักษณ์ได้ดีเพราะมีลำดับการส่งที่เป็นอิสระต่อกัน โดยค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการจะแทนได้ดังต่อไปนี้

$r_{S,R_i}[s_i]$ และ $r_{R_i,D}[s_i]$ แสดงถึง การรับข้อมูลบิตแต่ละลำดับจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่านแต่ละตัวใน เครือข่าย (R_i) และจากโหนดส่งผ่านนั้นๆ(R_i) ไปยังโหนดปลายทางตามลำดับ

$n_1 - n_8$ คือ AWGN เชิงซ้อน ที่เกิดจากผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณ

$n_5' - n_8'$ คือ สัญญาณรบกวนเมื่อผ่านการขยาย

β_{R_i} คือ อัตราการขยายของแต่ละโหนดส่งผ่าน(R_i)

ช่วงเวลาที่ 1 $\left(0-\frac{T}{2}\right)$ เป็นสมการที่โหนดส่งผ่าน R_1, R_2 สามารถรับสัญลักษณ์ s_1 และโหนดส่งผ่าน R_3, R_4 สามารถรับสัญลักษณ์ s_3 จากโหนดต้นทางได้ ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ในแต่ละโหนดส่งผ่านรับได้แสดงได้ ดังนี้

สัญลักษณ์ s_1 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_1

$$r_{S,R_1}(s_1) = H_1 s_1 + n_1 \tag{3.11}$$

$$r_{R_1,D}(s_1) = H_5 \beta_{R_1} r_{S,R_1}(s_1) + n_5 \tag{3.12}$$

สัญลักษณ์ s_1 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_2

$$r_{S,R_2}(s_1) = H_2 s_1 + n_2 \tag{3.13}$$

$$r_{R_2,D}(s_1) = H_6 \beta_{R_2} r_{S,R_2}(s_1) + n_6 \tag{3.14}$$

สัญลักษณ์ s_3 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_3

$$r_{S,R_3}(s_3) = H_3 s_3 + n_3 \tag{3.15}$$

$$r_{R_3,D}(s_3) = H_7 \beta_{R_3} r_{S,R_3}(s_3) + n_7 \tag{3.16}$$

สัญลักษณ์ s_3 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_4

$$r_{S,R_4}(s_3) = H_4 s_3 + n_4 \tag{3.17}$$

$$r_{R_4,D}(s_3) = H_8 \beta_{R_4} r_{S,R_4}(s_3) + n_8 \tag{3.18}$$

ช่วงเวลาที่ 2 $\left(\frac{T}{2}-T\right)$ เป็นสมการที่โหนดส่งผ่าน R_1, R_2 สามารถรับสัญลักษณ์ s_2 และโหนดส่งผ่าน R_3, R_4 สามารถรับสัญลักษณ์ s_4 จากโหนดต้นทางได้ ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ในแต่ละโหนดส่งผ่านรับได้แสดงได้ ดังนี้

สัญลักษณ์ s_2 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_1

$$r_{S,R_1}(s_2) = H_1 s_2 + n_1 \tag{3.19}$$

$$r_{R_1,D}(s_2) = H_5 \beta_{R_1} r_{S,R_1}(s_2) + n_5 \tag{3.20}$$

สัญลักษณ์ s_2 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_2

$$r_{S,R_2}(s_2) = H_2 s_2 + n_2 \tag{3.21}$$

$$r_{R_2,D}(s_2) = H_6 \beta_{R_2} r_{S,R_2}(s_2) + n_6 \tag{3.22}$$

สัญลักษณ์ s_4 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_3

$$r_{S,R_3}(s_4) = H_3 s_4 + n_3 \tag{3.23}$$

$$r_{R_3,D}(s_4) = H_7 \beta_{R_3} r_{S,R_3}(s_4) + n_7 \tag{3.24}$$

สัญลักษณ์ s_4 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_4

$$r_{S,R_4}(s_4) = H_4 s_4 + n_4 \tag{3.25}$$

$$r_{R_4,D}(s_4) = H_8 \beta_{R_4} r_{S,R_4}(s_4) + n_8 \tag{3.26}$$

ผลจากสมการที่ (3.11) - (3.26) ในการส่งข้อมูลทั้ง 2 ช่วงเวลา สามารถแทนค่าสัญลักษณ์ s_i ที่ผ่านกระบวนการเข้ารหัสล่วงหน้าแล้ว ตามสมการที่ (3.7) - (3.10) ได้ดังนี้

แทนค่า s_1 จากสมการ (3.7) ลงในสมการที่ (3.11) - (3.14) จะได้

$$r_{S,R_1}(s_1) = c_1 + H_1 H_2^+ + n_1 \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned} r_{R_1,D}(s_1) &= \beta_{R_1} H_5 (c_1 + H_1 H_2^+ c_2 + n_1) + n_5 \\ &= \beta_{R_1} H_5 c_1 + \beta_{R_1} H_5 H_1 H_2^+ c_2 + n_5^{'} \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$r_{S,R_2}(s_1) = H_1^+ H_2 c_1 + c_2 + n_2 \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned} r_{R_2,D}(s_1) &= \beta_{R_2} H_6 (H_1^+ H_2 c_1 + c_2 + n_2) + n_6 \\ &= \beta_{R_2} H_6 H_1^+ H_2 c_1 + \beta_{R_2} H_6 c_2 + n_6^{'} \end{aligned} \tag{3.30}$$

แทนค่า s_3 จากสมการ (3.9) ลงในสมการที่ (3.15) - (3.18) จะได้

$$r_{S,R_3}(s_3) = c_1 + H_3 H_4^+ + n_3 \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned} r_{R_3,D}(s_3) &= \beta_{R_3} H_7 (c_1 + H_3 H_4^+ c_2 + n_3) + n_7 \\ &= \beta_{R_3} H_7 c_1 + \beta_{R_3} H_7 H_3 H_4^+ c_2 + n_7^{'} \end{aligned} \tag{3.32}$$

$$r_{S,R_4}(s_3) = H_3^+ H_4 c_1 + c_2 + n_4 \tag{3.33}$$

$$\begin{aligned} r_{R_4,D}(s_3) &= \beta_{R_4} H_8 (H_3^+ H_4 c_1 + c_2 + n_4) + n_8 \\ &= \beta_{R_4} H_8 H_3^+ H_4 c_1 + \beta_{R_4} H_8 c_2 + n_8^{'} \end{aligned} \tag{3.34}$$

แทนค่า s_2 จากสมการ (3.8) ลงในสมการที่ (3.19) - (3.22) จะได้

$$r_{S,R_1}(s_2) = -c_2^* + H_1 H_2^+ c_1^* + n_1 \tag{3.35}$$

$$r_{R_1,D}(s_2) = \beta_{R_1} H_5(-c_2^* + H_1 H_2^+ c_1^* + n_1) + n_5$$
$$= \beta_{R_1} H_5 . - c_2^* + \beta_{R_1} H_5 H_1 H_2^+ c_1^* + n_5^{'} \quad (3.36)$$

$$r_{S,R_2}(s_2) = -H_1^+ H_2 c_2^* + c_1^* + n_2 \quad (3.37)$$

$$r_{R_2,D}(s_2) = \beta_{R_2} H_6(-H_1^+ H_2 c_2^* + c_1^* + n_2) + n_6$$
$$= -\beta_{R_2} H_6 H_1^+ H_2 c_2^* + \beta_{R_2} H_6 c_1^* + n_6^{'} \quad (3.38)$$

แทนค่า s_4 จากสมการ (3.10) ลงในสมการที่ (3.23) - (3.26) จะได้

$$r_{S,R_3}(s_4) = -c_2^* + H_3 H_4^+ c_1^* + n_3 \quad (3.39)$$

$$r_{R_3,D}(s_4) = \beta_{R_3} H_7(-C_2^* + H_3 H_4^+ C_1^* + n_3) + n_8$$
$$= \beta_{R_3} H_7 - C_2^* + \beta_{R_3} H_7 H_3 H_4^+ C_1^* + n_8^{'} \quad (3.40)$$

$$r_{S,R_4}(s_4) = -H_3^+ H_4 c_2^* + c_1^* + n_4 \quad (3.41)$$

$$r_{R_4,D}(s_4) = \beta_{R_4} H_8(-H_3^+ H_4 c_2^* + c_1^* + n_4) + n_8$$
$$= -\beta_{R_4} H_8 H_3^+ H_4 c_2^* + \beta_{R_4} H_8 c_1^* + n_8^{'} \quad (3.42)$$

โดยที่

$$G = H_1 H_2^+$$
$$K = H_2 H_1^+$$
$$W = H_3 H_4^+$$
$$Y = H_4 H_3^+$$

สมการที่โหนดปลายทาง (Destination) เกิดจากการรวมบิตข้อมูลที่รับได้ตามลำดับ (Combined bit sequence) จากทั้ง 4 เส้นทางของแต่ละโหนดส่งผ่าน ด้วยกระบวนการตัดสินใจที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด (Maximum Likeli-hood หรือ ML) แสดงได้ดังนี้

บิตข้อมูลที่รับได้จากการส่งต่อผ่านโหนดส่งผ่านที่ 1 (R_1) โดยที่บิตข้อมูล $\tilde{c}_1$ และ $\tilde{c}_2$ ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญลักษณ์ s_1 กับ s_2 จากสมการที่ 3.28 และ 3.36

$$\tilde{c}_1 = H_5^* . r_{R_1,D}(s_1) + H_5 . G . r_{R_1,D}^*(s_2)$$
$$= H_5^*(H_5 c_1 + H_5 G c_2 + n_5^{'}) + H_5 . G(-H_5 c_2^* + H_5 G c_1^* + n_5^{'})^* \quad (3.43)$$
$$= c_1(H_5^* H_5 + H_5 G . H_5^* G^*) + N_5$$

$$\tilde{c}_2 = (H_5 . G)^* r_{R_1,D}(s_1) - H_5 . r_{R_1,D}^*(s_2)$$
$$= (H_5 . G)^*(H_5 c_1 + H_5 G c_2 + n_5^{'}) - H_5(-H_5 c_2^* + H_5 G c_1^* + n_5^{'})^* \quad (3.44)$$
$$= c_2(H_5^* G^* . H_5 G + H_5^* H_5) + N_5^{'}$$

บิตข้อมูลที่รับได้จากการส่งต่อผ่านโหนดส่งผ่านที่ 2 (R_2) โดยที่บิตข้อมูล $\tilde{c}_1$ และ $\tilde{c}_2$ ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญลักษณ์ s_1 กับ s_2 จากสมการที่ 3.30 และ 3.37

$$\begin{aligned}\tilde{c}_1 &= (H_6.K)^* r_{R_2,D}(s_1) + H_6.r^*_{R_2,D}(s_2) \\ &= (H_6.K)^*(H_6Kc_1 + H_6c_2 + n_6^{'}) + H_6(-H_6Kc_2^* + H_6c_1^* + n_6^{'})^* \qquad (3.45) \\ &= c_1(H_6^*K^*.H_6K + H_6H_6^*) + N_6 \\ \tilde{c}_2 &= H_6^* r_{R_2,D}(s_1) - (H_6.K) r^*_{R_2,D}(s_2) \\ &= H_6^*(H_6Kc_1 + H_6c_2 + n_6^{'}) - (H_6.K)(-H_6Kc_2^* + H_6c_1^* + n_6^{'})^* \qquad (3.46) \\ &= c_2(H_6H_6^* + H_6K.H_6^*K^*) + N_6^{'}\end{aligned}$$

บิตข้อมูลที่รับได้จากการส่งต่อผ่านโหนดส่งผ่านที่ 3 (R_3) โดยที่บิตข้อมูล $\tilde{c}_1$ และ $\tilde{c}_2$ ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญลักษณ์ s_3 กับ s_4 จากสมการที่ 3.32 และ 3.40

$$\begin{aligned}\tilde{c}_1 &= H_7^* r_{R_3,D}(s_3) + (H_7.W) r^*_{R_2,D}(s_4) \\ &= H_7^*(H_7c_1 + H_7Wc_2 + n_7^{'}) + (H_7.W)(-H_7c_2^* + H_7Wc_1^* + n_7^{'})^* \qquad (3.47) \\ &= c_1(H_7H_7^* + H_7W.H_7^*W^*) + N_7 \\ \tilde{c}_2 &= (H_7.W)^* r_{R_3,D}(s_3) - H_7 r^*_{R_3,D}(s_4) \\ &= (H_7.W)^*(H_7c_1 + H_7Wc_2 + n_7^{'}) - H_7(H_7c_2^* + H_7Wc_1 + n_7^{'})^* \qquad (3.48) \\ &= c_2(H_7W.H_7^*W^* + H_7H_7^*) + N_7^{'}\end{aligned}$$

บิตข้อมูลที่รับได้จากการส่งต่อผ่านโหนดส่งผ่านที่ 4 (R_4) โดยที่บิตข้อมูล $\tilde{c}_1$ และ $\tilde{c}_2$ ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญลักษณ์ s_3 กับ s_4 จากสมการที่ 3.34 และ 3.42

$$\begin{aligned}\tilde{c}_1 &= (H_8.Y)^* r_{R_4,D}(s_3) + H_8.r^*_{R_4,D}(s_4) \\ &= (H_8.Y)^*(H_8Yc_1 + H_8c_2 + n_8^{'}) + H_8(-H_8Yc_2^* + H_8c_1^* + n_8^{'})^* \qquad (3.49) \\ &= c_1(H_8Y.H_8^*Y^* + H_8H_8^*) + N_8 \\ \tilde{c}_2 &= H_8^* r_{R_4,D}(s_3) - (H_8.Y) r^*_{R_4,D}(s_4) \\ &= H_8^*(H_8Yc_1 + H_8c_2 + n_8^{'}) - (H_8.Y)(-H_8Yc_2^* + H_8c_1^* + n_8^{'})^* \qquad (3.50) \\ &= c_2(H_8H_8^* + H_8Y.H_8^*Y^*) + N_8^{'}\end{aligned}$$

เมื่อ $N_5, N_5^{'} - N_8, N_8^{'}$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการรวมตัวกันเมื่อผ่านแต่ละโหนดส่งผ่าน (R_i) ซึ่งมีค่าน้อยมากทำให้ไม่เกิดผลต่อระบบ หรือระบบสามารถขจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวได้นั่นเอง

3.4 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานวิจัยในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นไปตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

งาน \ เดือน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ศึกษาหลักการของระบบสื่อสารแบบร่วมมือการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และ Precoding										
ศึกษาหลักการทำงานของโปรแกรม ที่ใช้จำลองระบบ										
ศึกษาความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณและการพิจารณาการเลือกส่งต่อข้อมูล(Path Selection)										
ออกแบบและพัฒนาระบบที่ทำการนำเสนอ										
สร้างแบบจำลองระบบที่ทำการนำเสนอ										
เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้ และสรุป										
รวบรวมข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจัดทำวิทยานิพนธ์										

3.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.5.1 ศึกษาหลักการของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ การเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และหลักการของวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาทฤษฎีวิธีการทำงานของระบบการสื่อสารแบบร่วมมือ และวิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti พร้อมทั้งวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า ให้เป็นไปตามรูปแบบที่ทำการนำเสนอ

3.5.2 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้ทำการจำลองระบบ

ทำการศึกษาค้นหาและรวบรวมโปรแกรมที่จะทำการจำลองระบบเพื่อที่จะสามารถประยุกต์ใช้ในการจำลองการระบบที่นำเสนอได้อย่างถูกต้อง

3.5.3 ศึกษาความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณและการพิจารณาการเลือกส่งผ่านข้อมูล (Path Selection)

ศึกษาทฤษฎีและหลักการของการจางหายของช่องสัญญาณ เพื่อที่จะนำรูปแบบการจางหายของช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้ให้แสดงถึงสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการจำลอง และการพิจารณาการเลือกเส้นทางส่งผ่านข้อมูล

3.5.4 ออกแบบและพัฒนาระบบที่ทำการนำเสนอ

ออกแบบระบบการพิจารณาเลือกเส้นทางส่งผ่านข้อมูล โดยใช้โปรแกรมที่ทำการศึกษาจากข้างต้น พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลในการออกแบบระบบ เพื่อที่จะทำการทดสอบระบบที่นำเสนอในการวัดประสิทธิภาพของระบบ

3.5.5 สร้างจำลองระบบที่นำเสนอ

หลังจากทำการออกแบบระบบและรวบรวมข้อมูลที่จะใช้ในการออกแบบ นำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการจำลองระบบเพื่อแสดงในเห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่ทำการนำเสนอ

3.5.6 เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้ และสรุป

เมื่อทำการจำลองระบบที่ทำการนำเสนอเสร็จแล้ว และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของระบบที่ทำการนำเสนอ เพื่อที่จะสรุปผลการจำลองระบบว่าประสิทธิภาพของระบบนั้นเป็นอย่างไร

3.5.7 รวบรวมข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจัดทำวิทยานิพนธ์

ทำการรวบรวมข้อมูลของระบบที่ทำการนำเสนอ ที่ได้ทำมาตั้งแต่ต้น เพื่อจัดทำเป็นวิทยานิพนธ์