บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

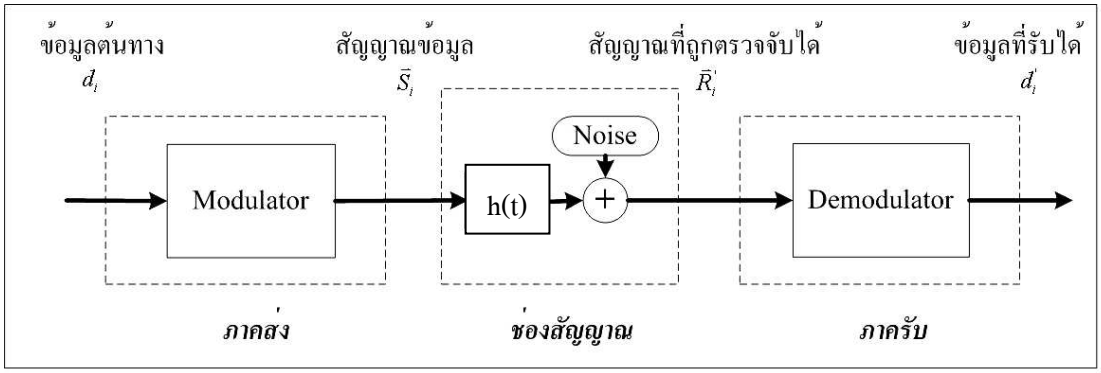
ระบบสื่อสารไร้สาย เป็นรูปแบบหนึ่งในหลายๆ วิธีของระบบสื่อสารที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลข่าวสารแบบอนาล็อกหรือดิจิทัล จากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ผ่านช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย ตัวอย่างเช่น การส่งข้อมูลแบบไมโครเวฟ (Microwave Communication) ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite System) และระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile System) เป็นต้น แต่เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ อย่างเช่น สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภาครับหรือส่ง รวมถึงอุณหภูมิ เป็นต้น เป็นผลให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ที่โหนดปลายทางมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม อีกทั้งในปัจจุบัน ความต้องการในการส่งข้อมูลในอัตราความเร็วสูง เพื่อรองรับการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียง และข้อมูลสื่อสารอื่นๆ จากผลกระทบดังกล่าวทำให้ผู้ใช้งานอาจจะไม่ได้รับการตอบสนองตามความต้องการในการติดต่อสื่อสาร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีและวิธีการต่างๆ ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ช่องสัญญาณและการจางหาย (Fading) ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity) ความรู้เกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก ความรู้เบื้องต้นกับระบบสื่อสายไร้สายแบบร่วมมือ การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา สุดท้ายจะอธิบายถึง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเหตุผลจำเป็นที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเอาหลักการของการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา วิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า(Precoding) หลักการเลือกเส้นทาง (Path Selection) และวิธีการของการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือมาใช้ ก็เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ดังกล่าวข้างต้น

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

การออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารเคลื่อนที่เพื่อส่งข้อมูลดิจิทัลนั้น มีความจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และสัดส่วนกำลังสัญญาณที่ได้รับต่อกำลังสัญญาณรบกวน เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารได้อย่าง

มีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ซึ่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณดิจิทัล d_i ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลต (Modulate) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสารเพื่อแปลงข้อมูลให้เป็นสัญลักษณ์ข้อมูล $\vec{S}_i$ ที่คุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อโหนดปลายทางสัญญาณตรวจจับสัญลักษณ์ดังกล่าวได้จะเรียกว่า $\vec{R}_i'$ สัญลักษณ์ดังกล่าวนั้นจะถูกนำมาผ่านกระบวนการดีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล d_i' เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยพบว่า ข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากทำงานของโหนดปลายทางนั้น อาจมีข้อมูลผิดพลาดไปเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากโหนดต้นทาง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่างๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่จะส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสารเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนและเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูล $\vec{S}_i$ สามารถเดินทางไปถึงโหนดปลายทางได้จากหลายทิศทางด้วยกัน โดยที่ในแต่ละวิถี อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดการรบกวนระหว่างกันได้และก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณขึ้น



รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

เพื่อแสดงถึงลักษณะของช่องสัญญาณแบบไร้สาย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงถูกนำมา ใช้สำหรับแสดงผลกระทบของสัญญาณรบกวนและการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ในกรณีที่มีการพิจารณาสัญญาณข้อมูลทุกๆ คาบเวลา T พบว่าลักษณะสัญลักษณ์ข้อมูล $\vec{R}_i'$ ที่ถูกตรวจจับได้ที่โหนดปลายทาง ณ เวลาใดๆ มีลักษณะความสัมพันธ์กับสัญลักษณ์ข้อมูล $\vec{S}_i$ ที่ถูกส่งออกไปจากต้นทางตามสมการ (2.1) [1]

---

[1] C. Douillard, M. Jezequel, C. Berrou, A. Picart, P.Didier, and A. Glavieux. (1995). “Iterative correction of intersymbol interference: Turbo-equalization.” European Transactions on Telecommunications. (Vol. 6, pp.507-511).

$$\vec{R}_i' = h(t)\vec{S}_i + \vec{n}$$
$$\vec{R}_i' = (Fading \times Pathloss)\vec{S}_i + \vec{n} \quad (2.1)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบไร้สาย พบว่าลักษณะของสัญลักษณ์ข้อมูล $\vec{R}_i'$ ที่ถูกตรวจจับได้ ณ โหนดปลายทาง อาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปได้จากสาเหตุต่างๆ จึงได้มีการพัฒนาวิธีการต่างๆ ขึ้นมาเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร

2.2 ช่องสัญญาณและการจางหาย (Channel and Fading)[2,3,4]

2.2.1 ช่องสัญญาณ (Channel)

ช่องสัญญาณ หมายถึง ตัวกลางที่ให้สัญญาณผ่าน จากสายอากาศโหนดต้นทางไปยังสายอากาศโหนดปลายทางซึ่งมีความเป็นไปได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นอากาศ เป็นสายทองแดง หรือใยแก้วนำแสงโดยที่ช่องสัญญาณนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณของข้อมูลอินพุตชุดหนึ่งให้เป็นสัญญาณของข้อมูลเอาต์พุตชุดหนึ่ง และในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ คลื่นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาทางโหนดต้นทางนั้น จะไม่ได้เดินทางมาถึงยังทางโหนดปลายทางเป็นแนวเส้นตรง เพราะจะต้องพบกับอุปสรรคและสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่สัญญาณจะต้องแพร่กระจายเคลื่อนที่ผ่านโดยที่คลื่นสัญญาณที่มาถึงทางโหนดปลายทางจะเกิดขึ้นจากการรวมกันของคลื่นหลายวิถีที่มาถึงจากหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการผ่านอุปสรรคและสิ่งกีดขว้างต่างๆ เช่นการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระจัดกระจาย (Scattering) ซึ่งมีตัวอย่างของการผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง ต้นไม้ยานพาหนะ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดพหุวิถี (Multipath) และผลจากการเกิดพหุวิถีนี้ทำให้สัญญาณที่มาถึงโหนดปลายทางนั้น มีผลมาจากสัญญาณมากกว่าหนึ่งทาง ซึ่งในแต่ละทางนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกันไปทั้งในเชิงแอมพลิจูด และเฟส สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยผลจากวิถีต่างๆ สัญญาณในแต่ละทางอาจเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของแอมพลิจูดและเฟสได้ ถ้าอุปกรณ์ที่โหนดปลายทางกำลังเคลื่อนที่หรือสภาพแวดล้อมรอบๆ มีการเปลี่ยนแปลงผลกระทบจากช่องสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มไปตามเวลา ดังนั้น ณ ขณะหนึ่ง สัญญาณที่รับได้อาจจะมีการรวมกันแบบหักล้าง และในอีกขณะหนึ่ง อาจจะรวมกันแบบเสริม ซึ่งรูปแบบของการกระจายตัวที่ใช้กันทั่วไป ในการบอก

---

[2] Marvin K. Simon and Mohamed-Slim Alouini. (September,1998). “Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis.” Proceesdings of the IEEE., Vol. 86, No. 9, (pp.1860 - 1877)

[3] Matthias Pätzold. (2002). “Mobile Fading Channel.” John Wiley & Sons, Ltd.

[4] Simon Haykin, Michael Moher. (2005). Modern Wireless Communication. Pearson Education, Inc.

ลักษณะของการสุ่มแอมพลิจูด ที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณพหุวิถี จะมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ การกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh) และการกระจายตัวแบบไรเชียน (Ricean)

ถ้าในสัญญาณที่ได้รับไม่มีองค์ประกอบตามเส้นแนวสายตา (Line-of-Sight หรือ LOS) ซึ่งก็คือเมื่อวิถีตรงถูกบดบัง เช่น การแพร่กระจายสัญญาณระยะไกล ในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง (Outdoor) สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบที่กระจัดกระจาย (Scattered) อันเนื่องมาจากการสะท้อนที่ไม่มีวิถีหลักซึ่งสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบร่วมเฟส(In-Phase) และองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature) ซึ่งวิถีแต่ละวิถีมีผลต่อทั้งสองส่วนนี้ด้วย จากทฤษฎีขีดจำกัดกลาง (Central - Limit Theorem) เมื่อวิถีมีจำนวนมาก จะทำให้สามารถอนุมานได้ว่าองค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นแอมพลิจูดทั้งหมดของสัญญาณที่ได้มาจากการบวกเวกเตอร์ขององค์ประกอบทั้งหมด จึงเป็นไปตามนิยามของการกระจายตัวแบบเรย์ลี นอกจากนี้เฟสก็มีการกระจายตัวแบบเอกรูปในช่วง $[0, 2\pi]$ การกระจายตัวแบบเรย์ลีของแอมพลิจูดของสัญญาณ ρ มีนิยามดังนี้

$$f_{\rho}(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} e^{-\left[\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right]} \tag{2.2}$$

โดยที่ σ^2 คือ แวเรียนซ์ขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉาก ซึ่งปริมาณทางสถิติสองค่าที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยและโมเมนต์ที่สองของตัวแปรสุ่มแบบเรย์ลี ซึ่งมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} E\{\rho\} &= \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \\ E\{\rho^2\} &= 2\sigma^2 \end{aligned} \tag{2.3}$$

2.2.2 การจางหาย (Fading)

ในระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ คุณลักษณะของช่องสัญญาณไม่อยู่ในสภาพคงที่ (Stationary) และสามารถคาดเดาได้เหมือนช่องสัญญาณในระบบสื่อสารที่เชื่อมต่อด้วยสาย (Wired Channel) กล่าวคือ ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายจะเป็นรูปแบบของช่องสัญญาณที่มีลักษณะเป็นเชิงสุ่ม (Random) และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายระหว่างโหนดปลายทางกับโหนดต้นทาง เกิดขึ้นสูงจากพื้นดินไม่มากนัก ดังนั้นสัญญาณที่ส่งอาจเกิดการสะท้อนกับสิ่งกีดขวาง ที่อยู่ในบริเวณนั้น เช่น อาคาร ต้นไม้ หรือ พื้นดิน ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับ ประกอบไปด้วย

สัญญาณที่สะท้อนจากหลากหลายวิถี ซึ่งมีขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของโหนดต้นทางขณะที่มีการส่งสัญญาณ หรือการที่สภาพแวดล้อมที่อยู่ระหว่างโหนดปลายทางส่งและเครื่องรับที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อย่างเช่น การเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่อยู่บริเวณรอบๆ โหนดต้นทาง ก็มีผลต่อสัญญาณที่ปลายทางจะได้รับด้วยเช่นกัน ปัจจัยต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับนั้น มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว ทั้งในแง่ของขนาดแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การจางหายของสัญญาณ (Small Scaled Fading) หรือ การจางหาย (Fading) ทั้งนี้ในกรณีที่ช่องสัญญาณไร้สายมีสัญญาณการสะท้อนจากทิศทางต่างๆจำนวนมาก แต่ไม่มีสัญญาณที่มาทิศทางใดเลยที่มาจากวิถีตรง (Line Of Sight หรือ LOS) ระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง จะเรียกการจางหายที่เกิดขึ้นนี้ว่าการจางหายเรย์ลี (Rayleigh-Fading) ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย และรูปแบบของการจางหายมีดังนี้

2.2.3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย

2.2.3.1 การแผ่การประวิงเวลา (Delay Spread)

เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทางไปถึงปลายทาง จะพบกับอุปสรรคระหว่างการเดินทาง จะทำให้เกิดการสะท้อนและหักเห ทำให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับประกอบด้วยสัญญาณสะท้อนจากหลายวิถี จึงทำให้สัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทางถึงปลายทางมาถึงในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณรวมได้ที่ปลายทาง จึงเป็นสัญญาณที่มีการประวิงเวลาไปหรืออาจเรียกได้ว่าสัญญาณเกิดการแผ่ทางเวลา (Time Spread) ผลของการประวิงเวลานั้นทำให้การเดินทางไปยังปลายทางของสัญญาณ ใช้เวลานานกว่าปกติ ก่อให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณในแต่ละสัญลักษณ์หรือการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ทั้งนี้การประวิงเวลาของสัญญาณจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของช่องสัญญาณจากต้นทางถึงปลายทาง

2.2.3.2 การแผ่ดอปเปลอร์ (Doppler Spread)

เมื่อเครื่องรับมีการเคลื่อนที่ จะส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางมาในแต่ละทิศทางเกิดการเลื่อนทางความถี่ เรียกว่า การเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler Shift) ซึ่งความถี่ที่เลื่อนไปจะมีค่าเป็นบวกหรือลบมากน้อยเพียงใด ก็ขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องรับด้วย และนอกจากนี้การเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่บริเวณรอบๆเครื่องรับก็ยังส่งผลให้มีเกิดการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเหมือนกัน จึงกล่าวได้ว่าในการแผ่ดอปเปลอร์นี้ ทำให้ช่องสัญญาณมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time Varying Channel) และอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของการเกิดการจางหายด้วย

2.2.4 รูปแบบของการจางหาย

การจางหายที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายนั้น มีอยู่หลายประเภท การที่จะพิจารณาว่าเป็นการจางหายแบบใดนั้น จะพิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่ส่งเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ (Channel Characteristic) เป็นหลักตัวแปรของช่องสัญญาณที่ใช้พิจารณาได้แก่ แบนด์วิดท์ (Bandwidth), ช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (Symbol Period) หรือ อัตราการส่งสัญญาณ (Transmission Rate) ส่วนปัจจัยที่จะส่งผลต่อลักษณะของการจางหายได้แก่ การแผ่การประวิงเวลา (Delay Spread) และการแผ่ดอปเปลอร์ (Doppler Spread) เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของการจางหายจากการแผ่การประวิงเวลา จะได้การจางหาย 2 ประเภทคือ การจางหายแบบแนวราบ (Flat Fading) และการจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency-Selective Fading) เมื่อพิจารณาถึงการแพร่ในขณะที่เป็นการแผ่ดอปเปลอร์ จะส่งผลกระทบทำให้เกิดปรากฏการณ์การจางหายอีก 2 ประเภท คือ การจางหายแบบเร็ว (Fast Fading) และการจางหายแบบช้า (Slow Fading) ซึ่งในการพิจารณารูปแบบของการจางหายจากการแผ่การประวิงเวลา และการแผ่ดอปเปลอร์ดังกล่าว เกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.2.4.1 การจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่การประวิงเวลา

การแผ่การประวิงเวลา อันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นหลายวิถีทาง(Multipath) ทำให้เกิดการจางหายอยู่ 2 ประเภทคือ การจางหายแบบราบและการจางหายแบบเลือกความถี่

2.2.4.1.1 การจางหายแบบราบ (Flat Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลการตอบสนองของอัตราขยายคงที่ และมีผลการตอบสนองของเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว จะทำให้การจางหายที่เกิดขึ้นเป็นแบบราบ กล่าวคือ สัญญาณที่ปลายทางได้รับจะมีลักษณะเชิงสเปกตรัม (Spectrum Characteristic)ที่เหมือนเดิม แต่ค่าของกำลังของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลของการเดินทางของคลื่นหลายวิถีทางที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ดังนั้นผลของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะเป็นการจางหายแบบราบ การจางหายแบบราบนี้ จึงสามารถเรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า ช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด (Amplitude Varying Channel) ซึ่งในการแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักพบโดยทั่วไปจะเป็นรูปแบบการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution)

2.2.4.1.2 การจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency-Selective Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลการตอบสนองของอัตราขยายคงที่ และมีผลการตอบสนองของเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว จะทำให้การจางหายที่จะได้รับผลกระทบที่แตกต่างออกไป ซึ่งช่วงพิสัยของความถี่ที่ช่องสัญญาณ จะส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบของสเปกตรัมโดยที่มีค่าที่เท่ากันเรียกว่า แบนด์วิดท์ร่วมนัย (Coherent Bandwidth)

เมื่อช่องสัญญาณเกิดการจางหายแบบเลือกความถี่ ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลา ซึ่งยาวกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้รับนั้นถูกลดทอนขนาด และจะมีการประวิงทางเวลา เป็นการส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference) เกิดขึ้น

2.2.4.2 การจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่ดอปเปลอร์

การเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ เกิดขึ้นจากการมีการเคลื่อนที่ระหว่างเครื่องรับกับโหนดต้นทางนั้นจะส่งผลต่อความเร็วในการจางหายและจะทำให้เกิดการจางหายขึ้นมา การจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่ดอปเปลอร์สามารถที่จะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การจางหายแบบเร็ว และการจางหายแบบช้า

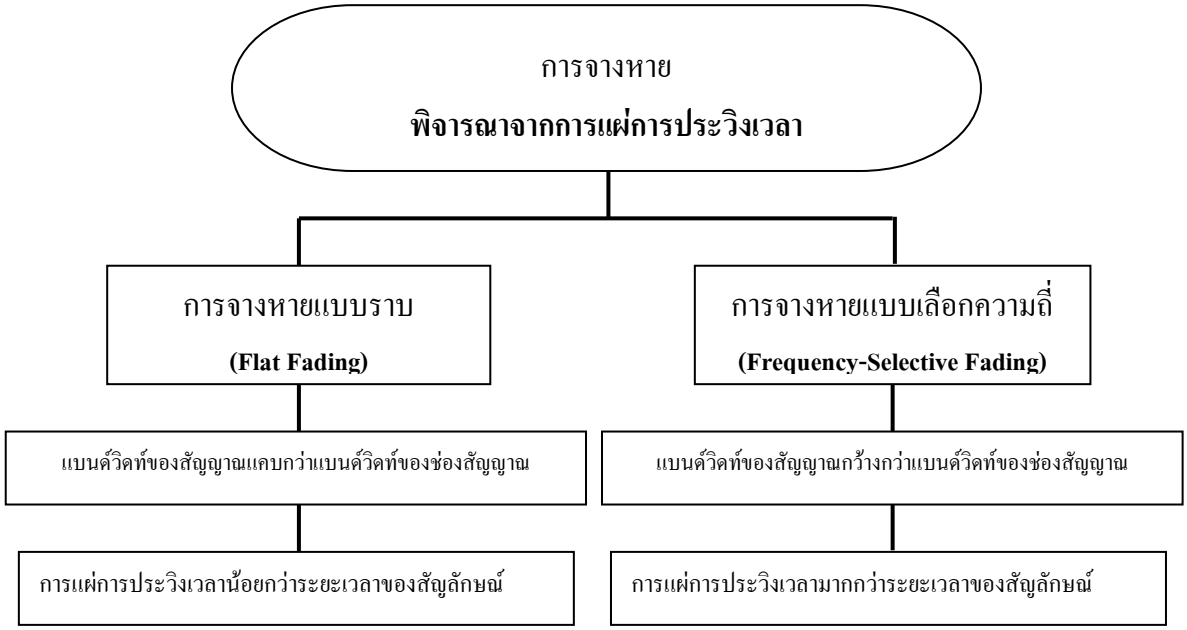
2.2.4.2.1 การจางหายแบบเร็ว (Fast Fading)

การแผ่ดอปเปลอร์ และเวลาร่วมนัย (Coherence Time) เป็นตัวแปรที่ใช้บ่งชี้บอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงที่ตามเวลาของช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องรับที่ เวลาร่วมนัยคือ เวลาทางสถิติที่เป็นของผลการตอบสนองที่มีต่อช่องสัญญาณที่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง และยังบอกให้ทราบถึง ความคล้ายกันของผลการตอบสนองของช่องสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งอีกด้วย ซึ่งคือ การที่สัญญาณที่มาถึงเครื่องรับในเวลาต่างกันแต่ไม่เกินเวลาร่วมนัย นั้นจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน

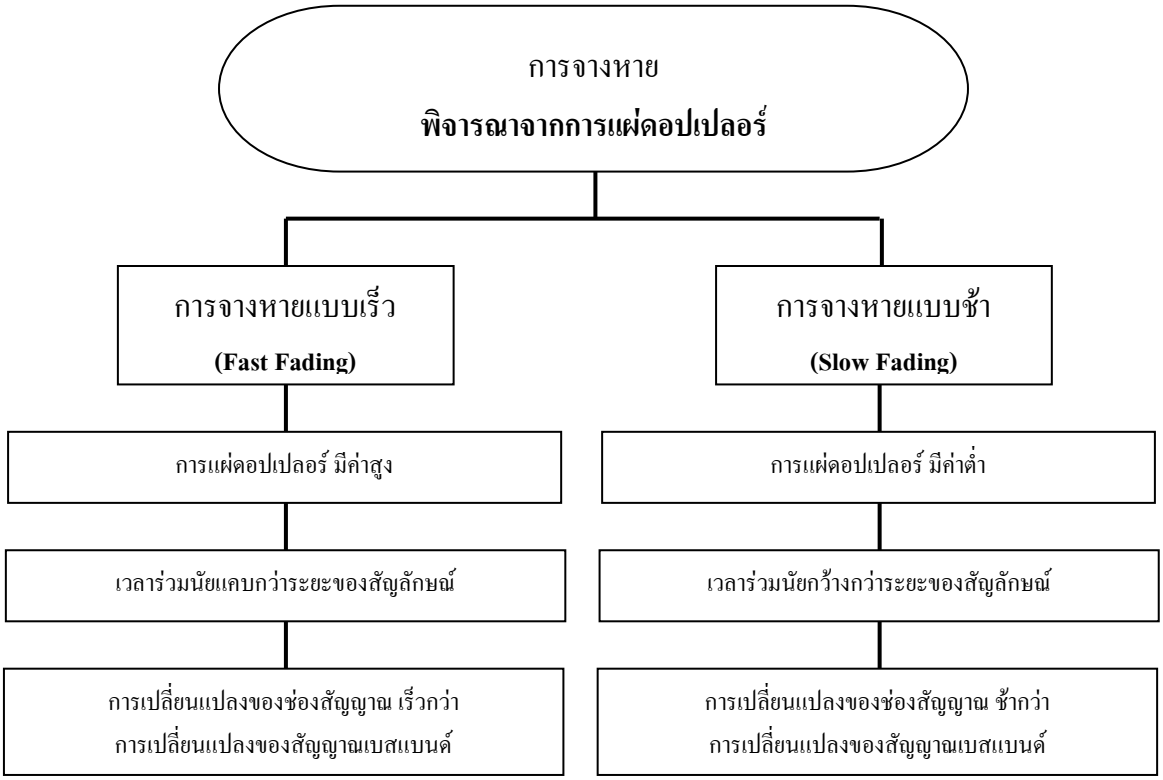
การจางหายแบบเร็ว ผลการตอบสนองของช่องสัญญาณนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเร็วภายในช่วงเวลาที่ทำการส่งสัญญาณ ดังนั้นเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ จะมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ และคุณลักษณะของการจางหายแบบนี้จะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายๆครั้งในขณะที่สัญลักษณ์หนึ่งๆ ถูกส่งไป ซึ่งจะส่งผลให้รูปร่างของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปในเบสแบนด์ผิดเพี้ยนไป

2.2.4.2.2 การจางหายแบบช้า (Slow Fading)

การจางหายแบบช้า เกิดขึ้นเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลการตอบสนองของช่องสัญญาณมีค่าที่น้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ หรือ เวลาร่วมนัยนั้นมีค่ามากกว่าเวลาของสัญลักษณ์ ซึ่งในกรณีนี้ ช่องสัญญาณจะมีผลการตอบสนองที่คงที่ภายในช่วงเวลาหลายสัญลักษณ์ที่ถูกส่งออกไปในเบสแบนด์ ซึ่งทำให้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณนั้นติดกันเป็นช่วงยาว



(1) เมื่อพิจารณาการแผ่การประวิงเวลา



(2) เมื่อพิจารณาการแผ่ดอปเลอร์

รูปที่ 2.2 รูปแบบของการจางหาย

2.2.5 สัญญาณรบกวนไวต์เกาส์เซียนแบบบวก (Additive White Gaussian Noise หรือ AWGN)

เป็นสัญญาณไม่พึงประสงค์ที่ปะปน กับสัญญาณที่ต้องการในลักษณะบวกทับสัญญาณที่ต้องการ ทำให้สัญญาณที่ผู้รับได้รับผิดเพี้ยนไป โดยขนาดของสัญญาณไม่พึงประสงค์นี้ มีการกระจายโอกาสแบบเกาส์เซียนและมีสเปกตรัมระดับความเข้มที่คงที่ซึ่งมาจากหลายแหล่งกำเนิดในธรรมชาติ จึงเป็นอุปสรรคที่มีอยู่ในทุกระบบการสื่อสาร โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในรูปของสมการ

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \varepsilon^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{(2\sigma^2)}} \tag{2.4}$$

และมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

$$\begin{aligned} F_x(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{(\lambda-\bar{x})^2}{(2\sigma^2)}} d\lambda \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\frac{(x-\bar{x})}{\sigma}} e^{\frac{-\lambda^2}{2}} d\lambda \end{aligned} \tag{2.5}$$

2.3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี้ (Diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (Code - bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (Data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Codes) และไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับ/ส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา สำหรับการทำไดเวอร์ซิตี้ ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตี้จึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของไดเวอร์ซิตี้ คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหายทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้น

โดยที่ทางภาครับสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยเลย ซึ่งวิธีการไดเวอร์ซิตี้ชนิดที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.3.1 ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา (Time Diversity)

ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา (Time Diversity) คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำ มากกว่าหนึ่งครั้งที่เวลาแตกต่างกัน โดยการส่งแต่ละครั้งจะต้องเว้นช่วงเวลาให้ห่างกันมากพอ คือ ต้องมากกว่าช่วง coherence time ของช่องสัญญาณ ผลที่ได้คือ ภาครับจะได้รับสัญญาณข้อมูลซ้ำหลายครั้ง โดยสัญญาณข้อมูลที่รับได้ในแต่ละครั้งนี้ จะได้รับผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณด้วยลักษณะที่แตกต่างกัน ค่าของ Coherence Time ขึ้นอยู่กับค่า Doppler Spread ของคลื่นสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่และความถี่ของคลื่นพาห์ ตัวอย่างเบื้องต้น ของการใช้งานเทคนิคไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา คือ วงจร RAKE Receiver ในระบบ CDMA

2.3.2 ไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่ (Frequency Diversity)

ไดเวอร์ซิตี้ชนิดนี้ จะใช้ความถี่ถึงสองช่องสัญญาณ ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ข้อมูลจะถูกส่งโดยโหนดต้นทางสองตัว ที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศเดียวกัน (แต่อาจมีโพลาไรเซชั่นต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา โหนดปลายทางแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของโหนดต้นทางสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีโอกาสน้อยมากๆที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อมๆกัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเพียงพอ และถ้ายิ่งห่างกัน 5 เปอร์เซ็นต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสีย ของไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ จำนวนช่องสัญญาณก็มีจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซ จากการคำนวณพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่าเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตี้

2.3.3 ไดเวอร์ซิตี้ทางสเปซ (Space-Diversity) หรือ ไดเวอร์ซิตี้ทางสายอากาศ (Antenna - Diversity)

ไดเวอร์ซิตี้ชนิดนี้ โหนดปลายทางจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไดเวอร์ซิตี้คอมไบเนอร์ (Diversity Combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือจะทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ

สัญญาณจากด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทางไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น และสัญญาณจากโหนดต้นทางอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดมัลติพาธเฟดดิงขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดมัลติพาธเฟดดิงที่เหมือนกัน เพราะระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกัน นั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับข้างใดข้างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่า การใช้ไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่า ซึ่งเป็นที่น่าพอใจมากและสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบล่าสุด การจัดสายอากาศไดเวอร์ซิตี้ที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ข้างๆ กัน นอกจากนี้ การใช้ไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซยังมีประสิทธิภาพดีกว่าฟรีเควนซี่ไดเวอร์ซิตี้ เพราะว่าไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซใช้ความถี่น้อยกว่าและใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่าด้วย อีกทั้งยังใช้ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณอีกด้วย

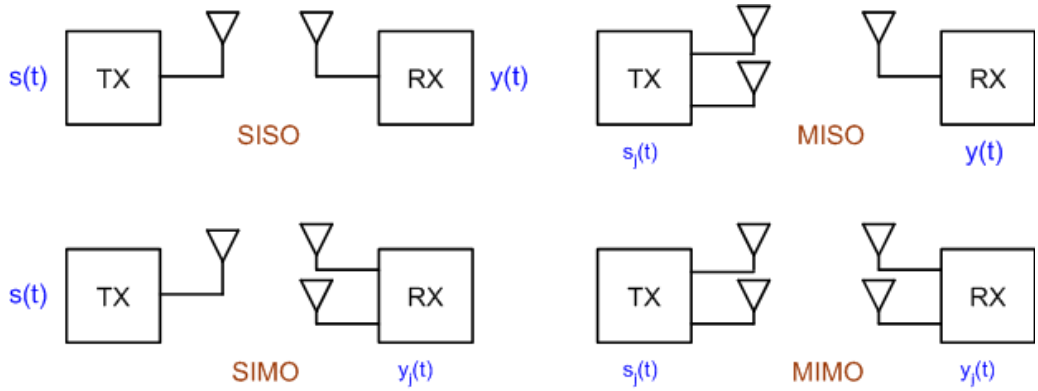
2.4 ระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก

ช่วงแรกๆ ของงานวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สาย จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่ต้นเดียว ที่เรียกว่า ระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (Single-Input Single-Output system หรือ SISO) ต่อมาได้มีการพัฒนางานวิจัยมาศึกษา ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ ทำให้ความจุช่องสัญญาณในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับ/ส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

2.4.1 ระบบหนึ่งทางเข้า หลายทางออก (Single-Input Multiple-Output system หรือ SIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหนึ่งสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ

2.4.2 ระบบหลายทางเข้า หนึ่งทางออก (Multiple-Input Single-Output system หรือ MISO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหนึ่งสายอากาศ

2.4.3 ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output system หรือ MIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ เช่นกัน



รูปที่ 2.3 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดียวและหลายสายอากาศ

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO) จะให้สมรรถนะทางด้านความจุช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัยและพัฒนารูปแบบ เพื่อนำมาใช้งานแทนระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (SISO) ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบ ดังนี้

1) อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain)

การใช้สายอากาศหลายๆเสา จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (Range) และพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่ไม่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งโหนดปลายทางลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากโหนดต่างๆ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่โหนดปลายทางนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่โหนดปลายทางรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2) อัตราการขยายไดเวอร์ซิตี้ (Diversity Gain)

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไดเวอร์ซิตี้จึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้นๆ (Fading) ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO) จึงมีการใช้สายอากาศภาคส่ง M_T เสา และสายอากาศภาครับ M_R เสา ที่มีการจางหายเป็นอิสระต่อกัน

เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก (SISO)

3) กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain)

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละเสา ภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (Rich Scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่างๆ ออกจากกันได้

4) การลดการแทรกสอด (Interference Reduction)

การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (Co-channel Interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency Reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลายๆ เสา จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

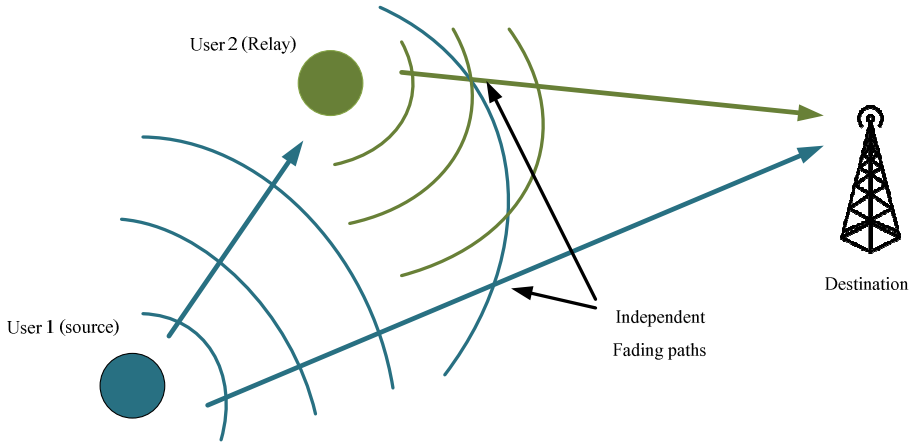
2.5 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ[5]

ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือคือระบบสื่อสารที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Network) ทำหน้าที่รับสัญญาณและช่วยส่งต่อข้อมูลที่รับได้ไปยังโหนดปลายทาง (Destination) ร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า “โหนดต้นทาง (Source)” และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อข้อมูล เรียกว่า “โหนดส่งผ่าน (Relay)” ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งการช่วยส่งต่อข้อมูลจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity Gain) ขึ้นเหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิต (BER) ลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มระยะทางในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้โหนดปลายทาง สามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมากๆ ได้

---

[5] Mischan Dohler and YonghuimLi (2010). Cooperative Communication Hardware,Channel&PHY.A John Wiley andSon,Ltd.Publication

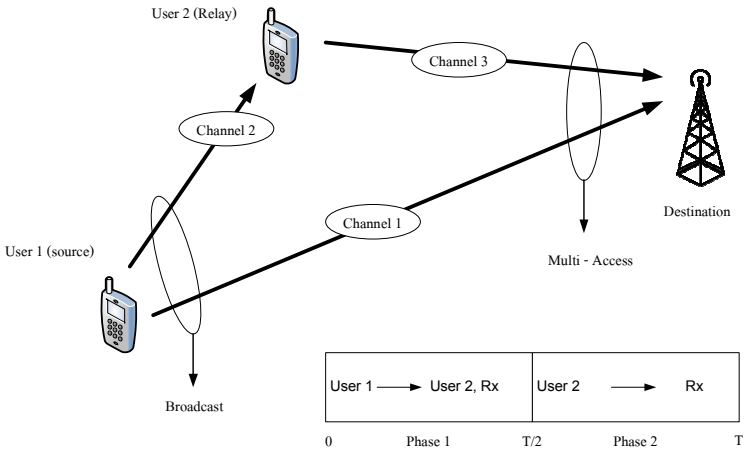
ซึ่งทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าอันจำกัดจากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบลดลงได้ ส่งผลให้สามารถสื่อสารได้นานขึ้นแม้อยู่ในสภาวะที่มีกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่ำ



รูปที่ 2.4 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2.5.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสายไร้สายแบบร่วมมือ จะพิจารณาการส่งสัญญาณในแบบทิศทางเดียว คือ การสื่อสารในทิศทางจากผู้ใช้งานไปยังโหนดปลายทาง โดยมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลายๆ ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน และมีการเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ใช้หลายคนได้ 3 แบบ คือ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access หรือ FDMA) การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access หรือ TDMA) และการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access หรือ CDMA) เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ในงานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณาการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และให้เวลาสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานทั้งหมดไปยังโหนดปลายทางมีกระบวนการซิงโครไนซ์ (Synchronization) อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.5 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือสำหรับระบบสื่อสายไร้สายในรูปที่ 2.6 ซึ่งกำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทางและผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน โดยมีช่วงเวลาของการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ทั้งหมด คือ T ซึ่งสามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟส ดังนี้

ช่วงเวลาที่ 1 ($0-\frac{T}{2}$) เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทางกระจายสัญญาณไปยังโหนดปลายทางและผู้ใช้คนที่ 2 พร้อมๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สาย ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$r_{SD}(n) = \sqrt{P_1} h_{SD} x_s(n) + n_{SD}(n) \tag{2.6}$$

$$r_{SR}(n) = \sqrt{P_1} h_{SR} x_s(n) + n_{SR}(n) \tag{2.7}$$

เมื่อ $x_S(n)$ คือ ข้อมูลที่ส่งออกจากโหนดต้นทาง

h_{SD} คือ ช่องสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง

h_{SR} คือ ช่องสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน

$n_{SD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง

$n_{SR}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน

P_1 คือ กำลังส่งสัญญาณจากโหนดต้นทาง

ช่วงเวลาที่ 2 ($\frac{T}{2}-T$) เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน จะช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ดังสมการที่ (2.6)

$$r_{RD}(n) = \sqrt{P_2} h_{RD} \hat{x}_s(n) + n_{RD}(n) \tag{2.8}$$

และ

$$r_{SRD}(n) = r_{SD}(n) + r_{RD}(n) \tag{2.9}$$

เมื่อ $\hat{x}_s(n)$ คือ ข้อมูลที่โหนดส่งผ่านทำการถอดรหัสได้

h_{RD} คือ ช่องสัญญาณระหว่างโหนดส่งผ่านและโหนดปลายทาง

$n_{RD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างโหนดส่งผ่านและโหนดปลายทาง

P_2 คือ กำลังส่งสัญญาณจากโหนดส่งผ่าน

2.5.2 โพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอโพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือไว้ 3 รูปแบบ ตาม J. N. Laneman [6] ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 โพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้มีหลักการคือมีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด

2.5.2.2 โพรโทคอลแบบเลือก (Selecting Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้จะมีหลักการ คือ ไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านจากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็นโหนดส่งผ่านที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งโพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโพรโทคอล แบบไม่เปลี่ยนแปลง

2.5.2.3 โพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายๆกับโพรโทคอลแบบเลือกโหนดส่งผ่านเพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไข

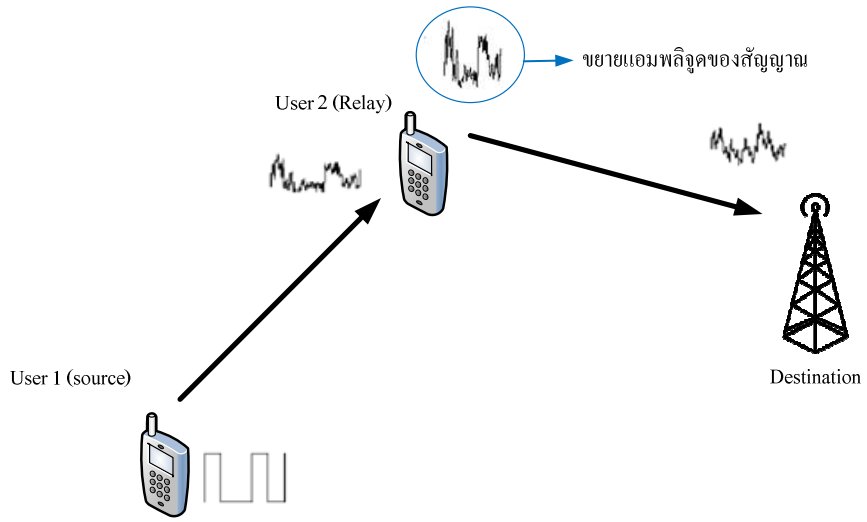
---

[6] J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. “Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and OutageBehavior.” *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 12,No.9, (September 2005) . 597-600

การเลือกผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านมากขึ้น และจุดเด่นของโพรโทคอลนี้ก็คือ โหนดปลายทางจะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลนั้นไม่มีความผิดพลาด โหนดปลายทางจะส่งข้อความกลับมายังทุกโหนดในระบบ เพื่อให้รับทราบสถานะของการส่งที่สมบูรณ์ จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านไม่ต้องส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง แต่ถ้าหากการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด โหนดปลายทางจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน โพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนสูงที่สุด

การหาประสิทธิภาพของโพรโทคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดย การหาความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหาย (Outage probability) และจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลในแต่ละแบบจะมีความซับซ้อนแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงสุด และโพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด โดยการส่งต่อสัญญาณจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ Amplify-and-Forward (AF) และ Decode-and-Forward (DF)

1) Amplify-and-Forward ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านจะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังโหนดปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.7 โหนดส่งผ่านจะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด และส่งต่อสัญญาณที่ได้รับไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งผลของข้อมูลที่ได้ จะเป็นดังสมการที่ (2.8)

$$x_R(n) = \beta r_{SR}(n) \qquad ;n = \frac{T}{2} - T \tag{2.10}$$

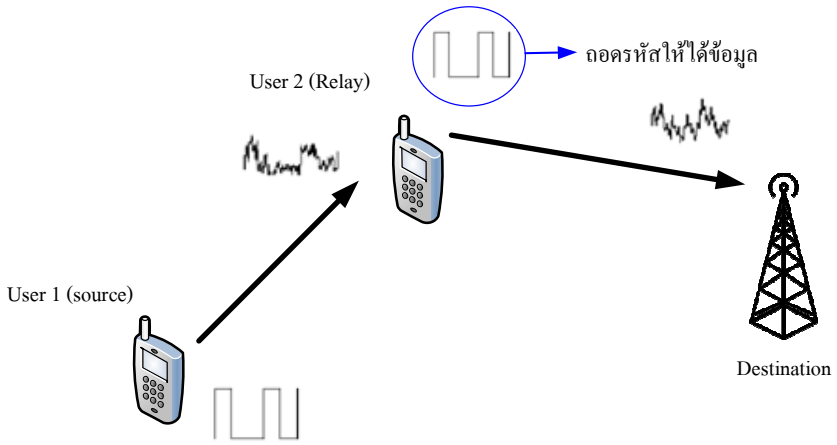
เมื่อ $r_{SR}(n)$ คือ สัญญาณที่โหนดส่งผ่านรับได้จากโหนดต้นทาง

β คือ อัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ $\beta \le \sqrt{\frac{1}{|h_{SR}|^2 P_1 + N_0}}$

h_{SR} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน

N_0 คือ แวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

2) Decode-and-Forward ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านจะถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากโหนดต้นทาง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังโหนดปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.8 โหนดส่งผ่านจะทำการถอดรหัสสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากโหนดต้นทาง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งข้อมูลที่ได้ เป็นดังสมการที่ (2.11)

$$x_R(n) = \hat{x}_S(n) \qquad ;n = \frac{T}{2} - T \tag{2.11}$$

เมื่อ $\hat{x}_S(n)$ คือ ข้อมูลจากโหนดต้นทาง ซึ่งถูกถอดรหัสจากโหนดส่งผ่านถอดรหัสให้ได้ข้อมูล

2.6 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา และ วิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding)[7]

การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (Space-Time Coding หรือ STC) เป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการทำไดเวอร์ซิตี้ทางด้านส่ง ซึ่งเป็นการรวมเอาการออกแบบรหัสช่องสัญญาณและการใช้สายอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้สายอากาศส่งหลายๆต้น และสายอากาศรับต้นเดียว หรือหลายๆ ต้น ร่วมกับการใช้ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าหากตั้งสายอากาศส่งและรับในปริภูมิให้มีความเป็นอิสระเชิงปริภูมิแล้ว สัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละตัว ที่ส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละตัว จะต้องได้รับผลกระทบจากเฟดดิงที่แตกต่างกัน เพื่อให้ข่าวสารที่ถูกส่งไป ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละเส้นทาง ไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทาง ดังนั้น การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากเฟดดิง ทำให้ระบบของการสื่อสารไร้สายมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จะมีการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

1) รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding หรือ STTC)

2) รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding หรือ STBC) ซึ่งจะมีเนื้อหาของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes) รวมอยู่ด้วย

สำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding หรือ STTC) เป็นเทคนิคจากการทำไดเวอร์ซิตี้ทางด้านส่ง ที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบที่เกิดจากเฟดดิง (Fading) สูงที่สุดในทั้ง 3 แบบ แต่มีข้อเสีย คือ นอกจากต้องมีสายอากาศรับ/ส่ง ที่คงที่ตายตัวแล้ว กระบวนการถอดรหัสของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิสก็ยังมีความซับซ้อนสูงมาก โดยความซับซ้อนในการถอดรหัสจะเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียล ตามอัตราความเร็วในการส่ง (Transmission Rate)

โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะขออธิบายเฉพาะวิธีการของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti เท่านั้น ทั้งนี้ก็เป็นเพราะคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่เรียบง่าย และให้ไดเวอร์ซิตี้ในระบบสูง

2.6.1 รหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes)

วิธีการเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อแหล่งกำเนิดข่าวสาร (Information Source) ให้กำเนิดสัญลักษณ์ข้อมูล และส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ (Modulator) ครั้งละ จำนวน 2 สัญลักษณ์ สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว ได้แก่

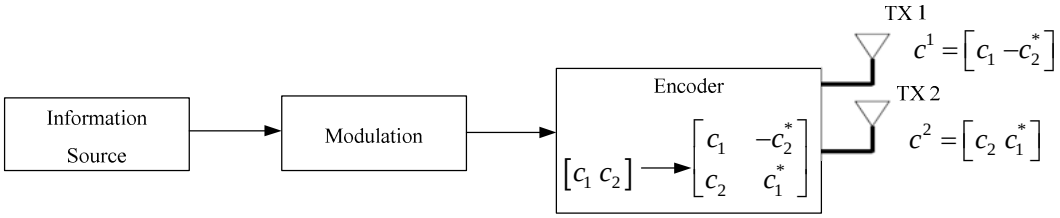
---

[7] ชาญวิทย์ ใยบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิตสาขาวิชาไฟฟ้าภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

c_1 และ c_2 จะได้รับการแปลงด้วยวงจรเข้ารหัส (Encoder) ให้ได้เป็นสัญญาณที่ใช้ส่งจริงในสายอากาศแต่ละต้น โดยรูปแบบการส่งสัญญาณสามารถเขียนแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2^* \\ c_2 & c_1^* \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

การส่งสัญญาณแต่ละครั้ง หรือการส่งสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาต่อเนื่อง กัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ได้แก่ c_1 และ c_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-c_2^*$ และ c_1^* ตามลำดับ ทั้งนี้ คือ c_1^* ค่าเชิงซ้อนสังยุคของ c_1 จะเห็นว่ารูปแบบการเขียนเมตริกซ์ S นั้นกำหนดให้ หมายเลขแถวหมายถึงเวลาที่จะส่งและหมายเลขทางคอลัมน์หมายถึงสายอากาศ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

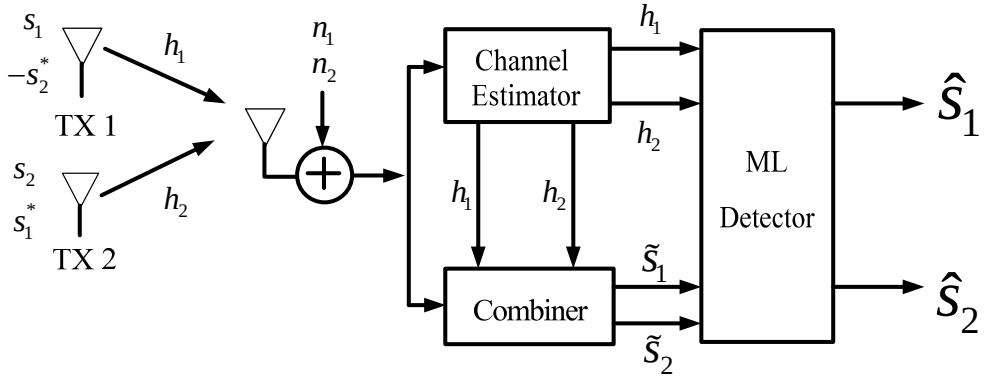
คุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของรหัสแบบ Alamouti คือ การที่เราสามารถกำหนดหรือเลือกชนิดของการมอดูเลตแบบใดก็ได้ เช่น M-PSK, M-QAM หรือ M-ASK เป็นต้น ดังนั้น เราจึงสามารถกำหนดจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่ง ในแต่ละครั้งได้ตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying) หรือหากต้องการส่งให้ได้ความเร็วเพิ่มขึ้นเท่าตัว คือ 2 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ต้องใช้การมอดูเลตแบบ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) สำหรับกรณีทั่วไปที่ใช้ M-PSK จำนวนบิตที่ระบบสามารถส่งได้ต่อหนึ่งคาบเวลา มีค่าเท่ากับ $m = \log_2 M$ การที่เราสามารถกำหนด อัตราบิตในการส่งผ่านข้อมูลได้ตามต้องการนั้น จัดว่าเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวที่เป็นประโยชน์ประการหนึ่งของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

2.6.1.1 การถอดรหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่สายอากาศรับในรูปที่ 2.9 จะได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้ r_1 และ r_2 ณเวลา t และ $t+T$ ตามลำดับดังนี้

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \tag{2.8}$$

$$r_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \tag{2.9}$$



รูปที่ 2.9 ภาพรวมของระบบรับ-ส่งสัญญาณที่ใช้รหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

โดยที่ n_1 และ n_2 คือสัญญาณรบกวน AWGN ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ที่เป็นอิสระต่อกันมีค่าเฉลี่ย(mean) เท่ากับศูนย์และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density) เท่ากับ N_0

ในขั้นตอนการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาให้นำสัญญาณ r_1 และ r_2 ที่รับได้ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินเลือกสัญลักษณ์ s_1 และ s_2 โดยใช้วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder) ซึ่งทำได้โดยการกำหนดฟังก์ชั่นต้นทุนให้อยู่ในรูปของระยะยูคลิเดียน (Euclidean distance) ระหว่างคู่สัญญาณที่รับได้ (r_1, r_2) กับคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชั่นต้นทุนของคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดให้ครบทุกรูปแบบจากนั้นให้ตัดสินเลือกสัญลักษณ์โดยเลือกคู่สัญลักษณ์ที่มีค่าฟังก์ชั่นต้นทุนต่ำสุดหรือเทียบเท่ากับการมีระยะยูคลิเดียนต่ำสุด (Minimum Euclidean Distance) กระบวนการตัดสินใจเลือกนั้นสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$(\hat{s}_1, \hat{s}_2) = \arg \min_{(s_1, s_2) \in C} \left| r_1 - h_1 s_1 - h_2 s_2 \right|^2 + \left| r_2 + h_1 s_2^* - h_2 s_1^* \right|^2 \tag{2.10}$$

สังเกตว่าในขั้นตอนการคำนวณนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่อภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ h_1 และ h_2 ที่ถูกต้องสมบูรณ์ในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวนี้จะได้จากการประมาณค่าด้วยวงจรแยกต่างหาก

2.6.1.2 ข้อดีของรหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

Alamouti ได้ขยายผลของวิธีการนี้ออกไปเป็นกรณีของ 2 เสาอากาศส่งและหลากหลาย (M_R) เสาอากาศรับและได้แสดงผลวิธีการนั้นโดยได้กำหนดจำนวนของไดเวอร์ซิตี้เป็น 2 M_R ซึ่งลักษณะของวิธีการนี้ได้รวมถึง

1) ไม่ต้องมีการตอบกลับจากเครื่องรับมายังเครื่องส่งซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับระบบเพื่อที่จะได้ไดเวอร์ซิตี้ทางด้านส่งสูงสุด

2) ไม่ต้องมีการขยายแบนด์วิดท์ (เพราะมีมากพอต่อการใช้ช่วงปริภูมิผ่านทางสายอากาศหลายเสาไม่ใช่ในเวลาหรือในความถี่)

3) กระบวนการถอดรหัสมีความซับซ้อนต่ำ

4) ให้ประสิทธิภาพเสมือนกับวิธีการรวมสัญญาณจากหลายทิศทางแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด (Maximum Ratio Combining หรือ MRC) ถ้าผลรวมของการแผ่กระจายกำลังงานเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับการใช้แบบ MRC เป็นเพราะว่าถ้ากำลังงานส่งเป็นค่าคงที่วิธีการนี้จะแย่กว่า 3 dB เพราะว่ากำลังงานส่งจะถูกแบ่งครึ่งให้กับเสาอากาศส่งทั้งสองต้น

5) ไม่ต้องมีการออกแบบใหม่สำหรับระบบเดิมที่มีอยู่เพียงแค่ควบรวมระบบเข้ากับวิธีการไดเวอร์ซิตี้นี้ จึงเป็นวิธีที่นิยมอย่างมากสำหรับการทำให้คุณภาพการเชื่อมต่อดีขึ้นบนพื้นฐานของเทคนิคเสาอากาศส่งคู่ซึ่งไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบมากมาย

2.6.2 การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า (Precoding)

การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า (Precoding) ที่โหนดปลายทาง หรือการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อมูล ที่ผิดพลาดที่โหนดต้นทาง เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับลดความผิดพลาดในการส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสาร ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานทำให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสารมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งถูกนำมาใช้ในงานหลายประเภทด้วยกัน เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น โดยมีวิธีการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าที่ใช้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีจุดเด่นและจุดด้อยในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้สัญญาณข้อมูลและข้อมูลที่ตรวจจับได้ที่โหนดปลายทางผิดเพี้ยนไปเนื่องจากผลของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสาร หนึ่งในวิธีการที่สามารถลดการผิดเพี้ยนของข้อมูลที่ตรวจจับได้ที่โหนดปลายทางคือการปรับแต่งสัญญาณ ดังนั้นวิธีการปรับแต่งสัญญาณจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว และเป็นวิธีการที่ถูกนำไปใช้งานในระบบสื่อสารหลายประเภทด้วยกัน เช่น ระบบโทรศัพท์และอุปกรณ์ประเภทโมเด็ม เป็นต้น

2.6.2.1 วิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima (TH-Precoding)

วิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima เป็นวิธีการที่ถูกพัฒนามาจากรูปแบบการทำงานของวงจร Inverse Filter โดยการนำกระบวนการคำนวณค่ามอดุโล $-N$ (Modulo-N) เข้ามาใช้งานเพื่อให้สัญลักษณ์เข้ามาใช้งานเพื่อให้สัญญาณข้อมูลที่ได้รับจากการคำนวณ มีค่าอยู่ในขอบเขตที่จำกัดเป็นผลให้การทำงานมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น มีการนำสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่ง ณ เวลาต่างๆ มาใช้งานโดยการนำข้อมูลผลกระทบของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์มาลบออกจากสัญญาณที่ถูกส่งออกไป จากนั้นสัญญาณข้อมูลที่ถูกชดเชยผลกระทบของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ ถูกนำมาผ่านกระบวนการคำนวณค่ามอดุโล $-N$ เพื่อทำให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งออกไปในระบบสื่อสารอยู่ในช่วง $-N/2$ ถึง $N/2$ สำหรับการทำงานของภาคตรวจจับข้อมูลที่ภาครับมีการนำสัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับมาทำการคำนวณหาค่ามอดุโล $-N$ เพื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับ ให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูลที่สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้สำหรับวิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima (TH-Precoding) นั้นเป็นวิธีการที่สามารถใช้งานร่วมกับระบบสื่อสารทีมีการมอดูเลตแบบ QAM ได้อย่างดี และเนื่องจากมีการใช้วงจรที่ใช้ในการบวกแบบมอดุโล (Modulo) ในการคำนวณ ดังนั้นจึงทำให้ค่าของสัญญาณที่ได้จากการทำงานของวงจรนั้นอยู่ในช่วงที่จำกัด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการ TH Precoding นั้นไม่สามารถนำมาใช้งานกับระบบสื่อสารแบบ Time-Vary Fading ซึ่งผลของการจางหายของขนาดของสัญญาณจะมีผลทำให้ข้อมูลที่ปลายทางนั้นเกิดความผิดพลาดได้ง่าย และนอกจากนั้น วิธีการ TH Precoding ไม่ได้มีการออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบสื่อสารที่มีการมอดูเลตแบบเฟสมอดุเลชั่น (Phase Modulation) ที่มีขนาดของสัญญาณที่ได้จากการทำงานคงที่

2.6.2.1 วิธีการ Precoding แบบ Dimension Partitioning

สำหรับวิธีการลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสาร โดยใช้วิธีการ Equalization นั้น จะเป็นการนำสัญญาณข้อมูลที่รับได้ ณ ปลายทางมาผ่านกระบวนการเพื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณ ให้อยู่ในรูปแบบที่คาดว่าเป็นรูปแบบของสัญญาณที่ปราศจากผลของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ โดยสำหรับรูปแบบในการทำงานนั้น จะมีรูปแบบในการทำงานหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งรูปแบบที่สำคัญในการทำงานได้แก่วิธีการ Equalization แบบ MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation) ที่มีการพิจารณาช่องสัญญาณในรูปแบบของ Finite State Machine และใช้วิธีการ เช่น Vitetrbi Algorithm ในการหาค่าของสัญญาณที่คาดว่าถูกส่งมา ณ เวลาต่างๆ และ DFE (Decision Feedback equalization) ที่มีการนำข้อมูลที่ตรวจจับได้ในอดีต และตัวแปรที่แสดงถึงลักษณะของช่องสัญญาณ ณ เวลานั้นๆ มาใช้ในการประมวลผลเพื่อหาค่าของข้อมูลที่รับได้ ณ เวลานั้นๆ

สำหรับวิธีการ Precoding นั้น จะเป็นอีกวิธีการหนึ่งซึ่งถูกนำมาใช้สำหรับลดผลกระทบของการแทรกระหว่างสัญลักษณ์ในระบบสื่อสาร โดยในการทำงานนั้น จะเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณที่จะทำการส่งผ่านช่องสัญญาณให้อยู่ในอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลทำให้เมื่อสัญญาณข้อมูลนั้นถูกส่งไปถึงปลายทาง จะสามารถนำสัญญาณไปใช้งานได้โดยมีผลของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่มีค่าลดลง โดยจะมีรูปแบบในการทำงานหลายรูปแบบด้วยกัน เช่นวิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima Precoding และ Spiral Curve Phase Precoding เป็นต้น การใช้วิธีการ Precoding ที่ใช้วิธีการ Dimension Partitioning ในการทำงาน ซึ่งเป็นวิธีการ Precoding ที่มีการพัฒนามาจากวิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima (TH Precoding) โดยจะสามารถทำให้สามารถใช้วิธีการ Precoding ร่วมกับระบบสื่อสารที่มีการมอดูเลตแบบมีขนาดของสัญญาณคงที่ เช่น BPSK ได้ และมีความสามารถในการลดผลกระทบจากความผิดพลาดเนื่องจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์สูงกว่ากรณีของ Tomlinson-Harashima Precoding

2.7 เทคนิคการรวมสัญญาณ [8]

เนื่องจากเครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันทั้งจากเครื่องส่งและ เครื่องส่งผ่าน(Relay)ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกันดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับเพื่อให้ได้สัญญาณรวมที่ดีที่สุดไปใช้งานพิจารณาระบบสื่อสารไร้สายที่มีการรับสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจำนวน N ช่องสัญญาณทั้งหมดนี้สามารถนำมารวมกันแบบเชิงเส้น (Linear Combination) เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นโดยค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมแต่ละช่องสัญญาณคือ a_j แสดงได้ดังสมการที่ 2.11

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + ... + a_N f_N(t) = \sum_{j=1}^{N} a_j f_j(t) \qquad (2.11)$$

โดยกำหนดให้ $f_j(t) = x_j(t) \cdot m(t) + n_j(t)$

และ $x_j(t)$ คือช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล

$m(t)$ คือข้อมูลที่ต้องการส่ง

a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรวมของแต่ละช่องสัญญาณ

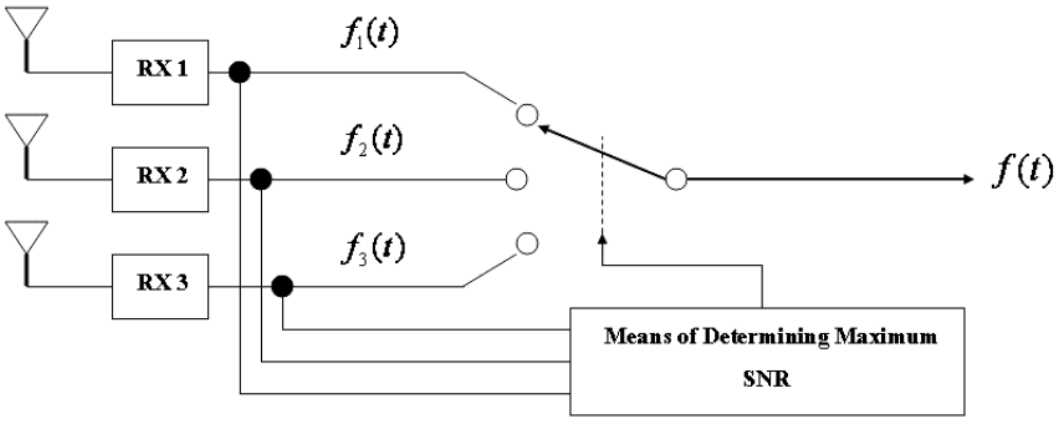
$n_j(t)$ คือสัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

---

[8] ชาญวิทย์ ใยบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิตสาขาวิชาไฟฟ้าภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ซึ่งเทคนิคการรวมสัญญาณมีดังนี้

2.7.1 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Combining หรือ SC)



รูปที่ 2.10 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก

สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ โดยเลือกสัญญาณที่รับได้ จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุดของสัญญาณที่รับมาทั้งหมดและจากสมการที่ 2.11 กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \begin{cases} 1 & , for\ j = k \\ 0 & , for\ j \neq k \end{cases} \qquad (2.12)$$

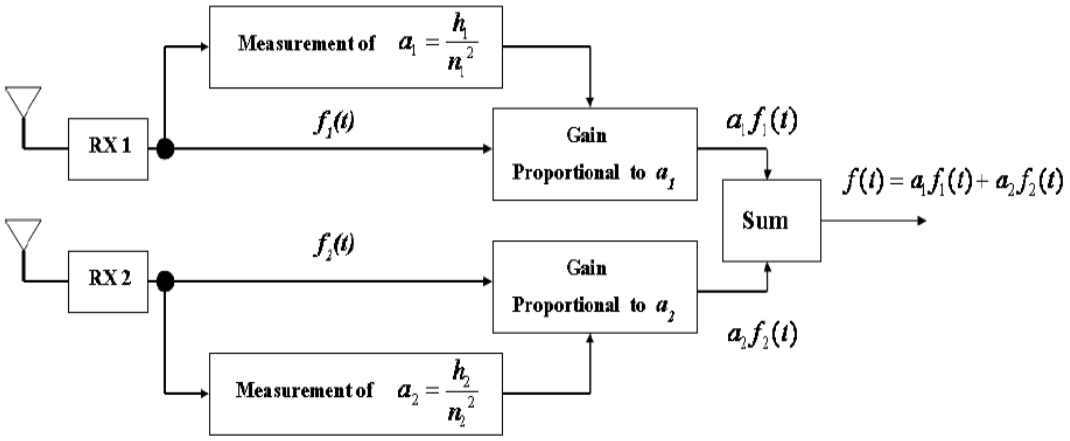
โดยที่ k คือดัชนีสำหรับสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

2.7.2 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด (Maximal-Ratio Combining หรือ MRC)

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด เป็นการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ทั้งหมดบวกกันซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณ

รบกวนของสัญญาณรวมทั้งหมดมีค่าสูงที่สุดและสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \frac{x_j}{n_j^2} \tag{2.13}$$

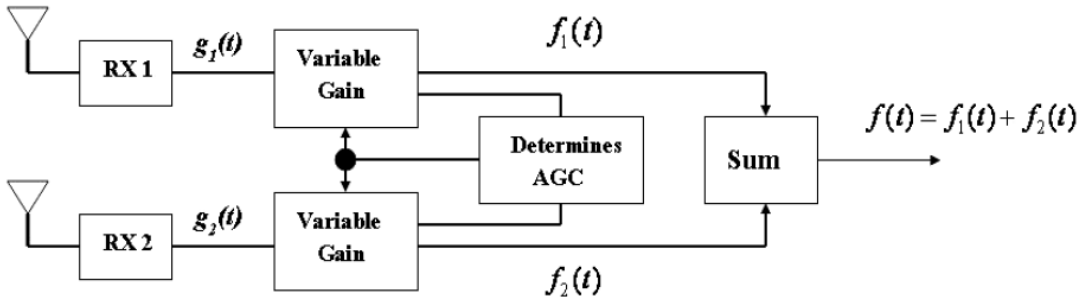


รูปที่ 2.11 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด

โดยเทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุดจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย ตามสมการที่ 2.14

$$\overline{\gamma}_t = \sum_{j=1}^{N} \gamma_j \tag{2.14}$$

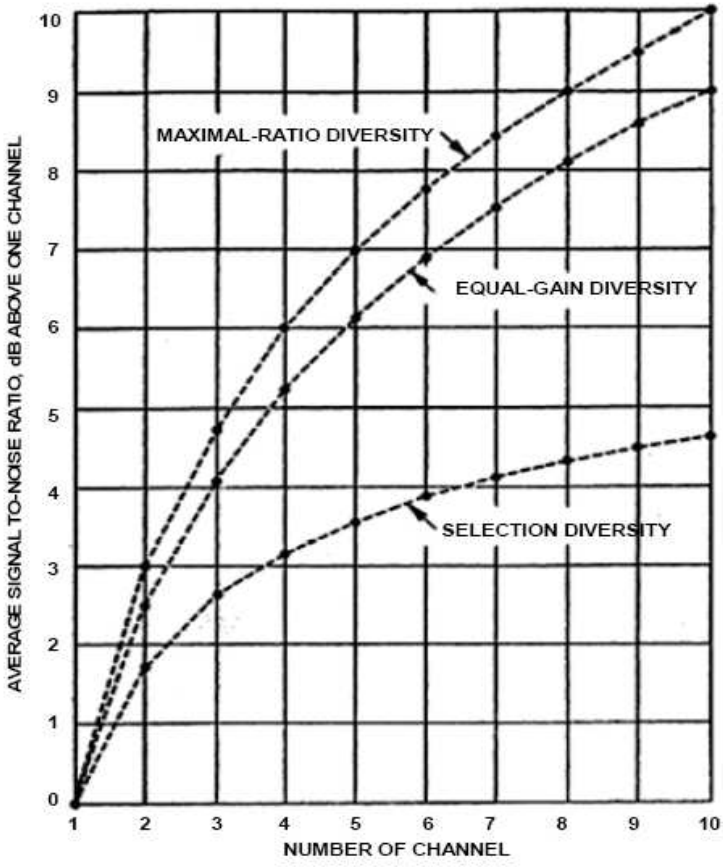
2.7.3 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (Equal Gain Combining หรือ EGC)



รูปที่ 2.12 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน จะทำการรวมสัญญาณโดยปรับค่าของอัตราการขยาย (Gain) ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทุกช่องสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นนำสัญญาณทั้งหมดรวมกันซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากันนี้สามารถหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ตามสมการที่ 2.15

$$\bar{\gamma}_t = \frac{1}{N} \cdot \frac{\left[\sum_{j=1}^{N} x_j\right]^2}{\sum_{j=1}^{N} n_j^{-2}} \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 แบบ

จากการเปรียบเทียบเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิคดังรูปที่ 2.12 สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด เป็นเทคนิคที่ทำให้ผลรวมของสัญญาณดีที่สุดเมื่อเทียบกับการรวมสัญญาณแบบเลือกและการรวมสัญญาณแบบให้อัตราขยายเท่ากัน

2.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

2.8.1 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate หรือ BER)

อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) หรืออัตราความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาด (Bit Error Probability หรือ BEP) คืออัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูลที่ทางภาครับตัดสินผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่งเป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบเป็นค่าที่แสดงถึงค่าความถูกต้องของการรับ/ส่งข้อมูลโดยตรงอัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสภาวะต่างๆเช่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนหรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไปเป็นต้น

2.8.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio หรือ SNR)

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คืออัตราส่วนกำลังของสัญญาณเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวนดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจึงนิยมวัดกันในหน่วยเดซิเบล (Decibel: dB) โดยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้คนที่ในค่าหน่วยของเดซิเบลสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$SNR = \frac{|h|^2 P}{N_0 W} = \frac{d^{-\alpha} P}{N_0 W} \tag{2.16}$$

เมื่อ $|h|^2$ คือ สัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ

P คือ กำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด

N_0 คือ ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ของสัญญาณรบกวน

W คือ แบนด์วิดธ์การส่งสัญญาณ

$d^{-\alpha}$ คือ ค่า Path Loss และ α เป็น Path Loss Exponent

2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying) ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ อาศัยการส่งต่อข้อมูลผ่านโหนดส่งผ่านซึ่งเป็นผู้ใช้งานอื่นในระบบ ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะครอบคลุมในสภาวะที่มีพลังงานอย่างจำกัด อีกทั้งยังสามารถติดต่อสื่อสารได้ในพื้นที่อับสัญญาณ (Shadow Areas) แม้ผู้ใช้งานจะไม่สามารถติดต่อกับโหนดปลายทางได้ก็ตามหรือผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ ซึ่งมีความต้องการที่จะจัดการการแฮนด์ออฟ (Handoff) ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (Bit Error Rate หรือ BER) ของระบบโดยรวมลดลง และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio หรือ SNR) ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทาง

Ho-Jung An et.al.[9] ได้นำเสนอเทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying)โดยใช้วิธีการเข้ารหัสแบบรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และหลักการ Precoding ซึ่งมีการส่งต่อสัญญาณจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางแบบ AF โดยให้มีผู้ใช้งานในโครงข่ายมีจำนวน 2 คน และ มีโหนดปลายทาง 1 เครื่อง กำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทาง ผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน และยังคงมีเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (Line Of Sight หรือ LOS) ผลจากการทดลองส่งผลให้ ค่าของอัตราความผิดพลาดของบิต (BER) ลดลง ที่สถานะของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ต่ำ แต่ในบางกรณีที่ ผู้ใช้งานไม่สามารถติดต่อไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งอาจจะอยู่นอกพื้นที่บริการหรืออาจมีพลังงานที่ต่ำ จึงไม่สามารถทำการเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (LOS) ได้ ซึ่งอาจต้องเลือกใช้โหนดส่งผ่านโหนดอื่นในระบบ

E.Kudoh et.al.[10] นำเสนอวิธีการใช้งานความถี่และกำลังหลายๆ วิธี เพื่อให้ได้รับอัตราการส่งข้อมูลที่ด้วยกำลังส่งที่ต่ำ ในการสื่อสาร VCN ที่สามารถเลือกใช้ การส่งต่อข้อมูลได้หลายๆ โหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการได้ ด้วยเหตุนี้เทคนิคการเลือกเส้นทางการส่งต่อข้อมูลจึงเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาและค้นคว้าเพิ่มมากยิ่งขึ้น

---

[9] Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, (2007) "Cooperative Transmission Scheme to Increase Gain by STBC," **Engineering Letters**

[10] E. Kudoh and F. Adachi, "Power and Frequency Efficient Wireless Multihop Virtual Cellular Concept," IEICE Trans. Comm., Vol. E88-B, No. 4, 2005, pp. 1613 – 1621

Zinan Lin et.al.[11] นำเสนอวิธีการเลือกโหนดส่งผ่านในเครือข่ายเพื่อใช้ในการส่งต่อข้อมูลแบบง่ายๆ โดยทำการออกแบบโครงสร้างการทำงานของระบบด้วยการใช้ประโยชน์จากการรู้ถึงค่าเฉลี่ยของสถานะของค่า SNR ของภาครับ ที่โหนดปลายทางปลายทาง

A.Bletsas et.al.[12] นำเสนอเทคนิคโอกาสการส่งต่อข้อมูล ซึ่งพิจารณาเปรียบเทียบค่า SNR ที่มีค่ามากที่สุดระหว่างสถานีต่างๆ ที่มีมากมายในเครือข่าย แต่เทคนิคดังกล่าวข้างต้นพิจารณา โหนดส่งผ่านเพื่อใช้ในการส่งต่อข้อมูลมาใช้งานแค่โหนดส่งผ่านเดียว

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้เกิดแนวคิดในการที่จะวิเคราะห์และปรับปรุงเครือข่ายของการติดต่อในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่อาศัยระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทาง (Source) ที่อาจอยู่นอกพื้นที่บริการและมีพลังงานที่จำกัดและไม่สามารถเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรงได้โดยใช้วิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับ Precoding ไปยังโหนดปลายทาง (Destination) โดยทำการเลือกโหนดส่งผ่านในระบบ (Path Selection) ที่มีอยู่มากมายในเครือข่ายเพื่อช่วยในการส่งต่อข้อมูล (Relaying) โดยพิจารณาจากค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุด (Channel Capacity) ทำการส่งต่อข้อมูล ในสภาวะที่ช่องสัญญาณมีการจางหายแบบเรย์ลี โดยการส่งต่อข้อมูลจากโหนดส่งผ่านแบบ AF ซึ่งจะผ่านขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังโหนดปลายทาง ส่งผลให้ไม่เกิดความล่าช้า (Delay) ที่เกิดจากการประมวลผลที่โหนดส่งผ่าน อีกทั้ง ในภาครับยังสามารถรวมสัญญาณจากการส่งผ่านมาได้โดยการใช้ ค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด(Maximum Likelihood หรือ ML) ช่วยในการตัดสินใจโดยสมมติให้รูปแบบการจางหายของแต่ละลำดับในการส่งผ่านที่เป็นอิสระต่อกัน

---

[11] Zinan Lin and E. Erkip, “Relay Search Algorithms for Coded Cooperative Systems,” GLOBECOM’05, Vol. 3, 2005, pp. 6 – 10

[12] Bletsas A., Hyundong Shin, and M. Z. Win,“Cooperative Communications with Outage-Optimal Opportunistic Relaying,” IEEE Trans. on Wireless Communication, Vol. 6, Issue 9, 2007, pp. 3450 – 3460.