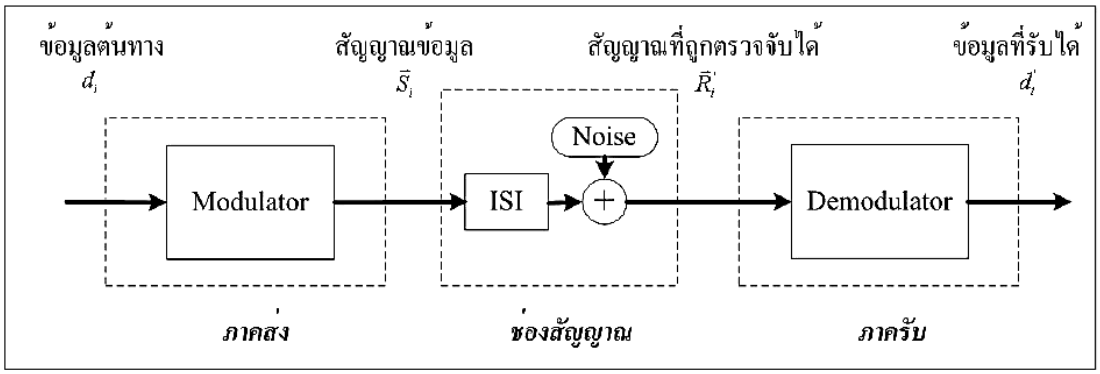
บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ในการออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อรับ/ส่งข้อมูลดิจิตอลนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์(Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และ กำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลดิจิตอล d_i ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลต (Modulate) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูล S_i ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูล R_i' ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ ดีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิตอล d_i' เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่า ข้อมูลดิจิตอลที่ได้จากทำงานของภาครับนั้นอาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านมาเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน(Noise) และเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูล สามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายวิถีด้วยกัน (Multi-path) โดยที่ในแต่ละเส้นทางนั้น อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณในลักษณะของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ขึ้น



รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

2.2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี้ (Diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (Code bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (Data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Codes) และยังไม่ต้องมีการส่งสัญญาณ ที่เรียกว่า Training sequence สำหรับใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรอีควอไลเซอร์ ซึ่งหมายถึงว่า ไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับ/ส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา สำหรับการทำไดเวอร์ซิตี้ ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตี้จึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของไดเวอร์ซิตี้ คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหายทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้น โดยที่ทางภาครับสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยเลย ซึ่งวิธีการไดเวอร์ซิตี้ชนิดที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.2.1 ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา (Time Diversity)

ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา (Time Diversity) คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำ มากกว่าหนึ่งครั้ง ที่เวลาแตกต่างกัน 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

2.2.2 ไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่ (Frequency Diversity)

ไดเวอร์ซิตี้ชนิดนี้ จะใช้ความถี่ถึงสองช่องสัญญาณ ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับข้อมูลจะถูกส่งโดยเครื่องส่งสองตัว ที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศ

เดียวกัน (แต่อาจมีโพลาไรเซชั่นต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา เครื่องรับแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีโอกาสน้อยมากๆที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อมๆกัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเพียงพอ และถ้ายิ่งห่างกัน 5 เปอร์เซ็นต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสีย ของไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ จำนวนช่องสัญญาณก็มีจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซ

2.2.3 ไดเวอร์ซิตี้ทางสเปซหรือสายอากาศ (Space-Diversity)

ไดเวอร์ซิตี้ชนิดนี้ เครื่องรับจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไดเวอร์ซิตี้คอมไบเนอร์ (Diversity combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ สัญญาณจากด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทางไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น และสัญญาณจากเครื่องส่งอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดมัลติพาธเฟดดิงขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดมัลติพาธเฟดดิง ที่เหมือนกัน เพราะระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกันนั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับ ข้างใดข้างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่า การใช้ไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่าซึ่งเป็นที่น่าพอใจมาก และสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบล่าสุด การจัดสายอากาศไดเวอร์ซิตี้ที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ข้าง ๆ กัน นอกจากนี้ การใช้ไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซยังมีประสิทธิภาพดีกว่าฟรีเควนซี่ไดเวอร์ซิตี้เพราะว่า ไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซ ใช้ความถี่น้อยกว่า และใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่า

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก

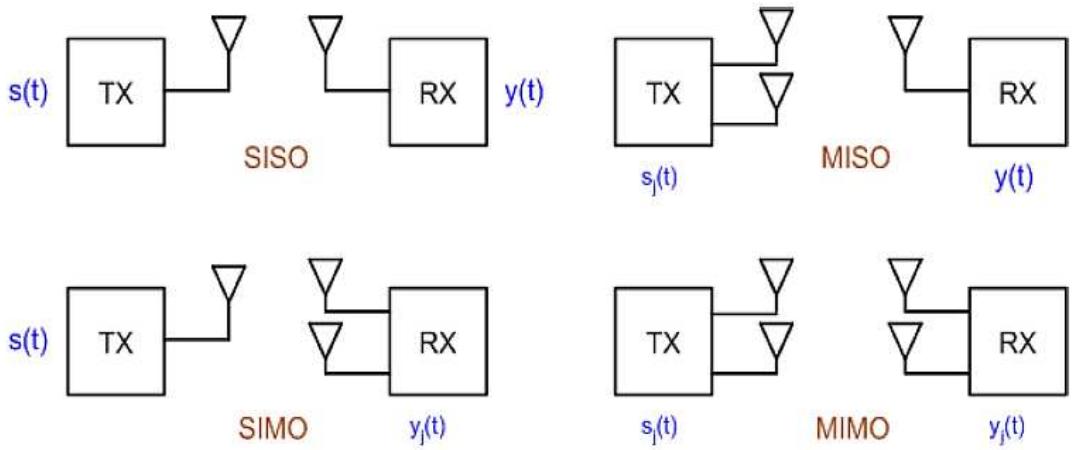
ช่วงแรกๆ ของงานวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สาย จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่ต้นเดียว ที่เรียกว่า ระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก

(Single-Input Single-Output system: SISO) ต่อมาได้มีการพัฒนางานวิจัยมาศึกษา ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับ/ส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

1) ระบบหนึ่งทางเข้า หลายทางออก (Single-Input Multiple-Output system: SIMO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหนึ่งสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ

2) ระบบหลายทางเข้า หนึ่งทางออก (Multiple-Input Single-Output system: MISO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหนึ่งสายอากาศ

3) ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output system: MIMO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ เช่นกัน



รูปที่ 2.2 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดียว และหลายสายอากาศ

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

1) อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain)

การใช้สายอากาศหลายๆเสา จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (Range) และพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมาก

ขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่ไม่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งสถานีฐานลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากตัวสถานีเคลื่อนที่ (โทรศัพท์มือถือ) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่สถานีฐานนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่สถานีฐานรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2) อัตราการขยายไดเวอร์ซิตี้ (Diversity Gain)

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไดเวอร์ซิตี้จึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้นๆ (หรือที่เรียกว่า Fading) ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก(MIMO) จึงมีการใช้สายอากาศภาคส่ง M_T เสา และสายอากาศภาครับ M_R เสา ที่มีการจางหายหรือเฟดดิงเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (SISO)

3) กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain)

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละเสาภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (Rich scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่างๆ ออกจากกันได้

4) การลดการแทรกสอด (Interference reduction)

การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (Co-channel interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลายๆเสา จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.3.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก

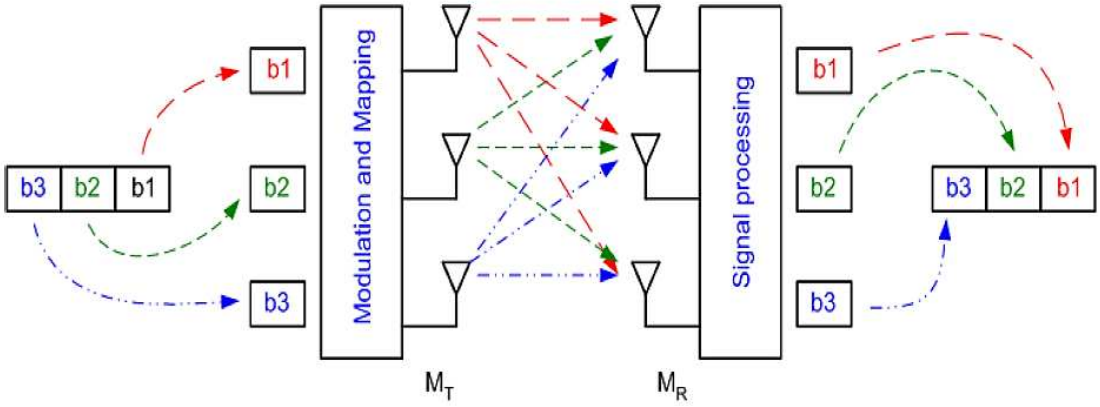
ในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีช่องสัญญาณเป็นแบบหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีเทคนิคการส่งข้อมูลอยู่หลายเทคนิค แต่ก็สามารถจัดกลุ่มรวมกันตามเทคนิคหลักๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

1) การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (Space-time coding)

เทคนิคนี้จะใช้สายอากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบ มาช่วยกันเข้ารหัส เพื่อให้ได้ไดเวอร์ซิตี้ทางปริภูมิ-เวลา ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความน่าเชื่อถือ และมีความทนทานต่อการผิดพลาดมากขึ้น เมื่อช่องสัญญาณที่ส่งผ่านเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งวิธีการส่งแบบนี้มีข้อดี คือ มีรูปแบบการส่งสัญญาณที่ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำ

2) การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ (Spatial multiplexing)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก ซึ่งเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่ง จะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด MT ค่า (เท่ากับจำนวนของสายอากาศที่ภาคส่ง) ต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.3



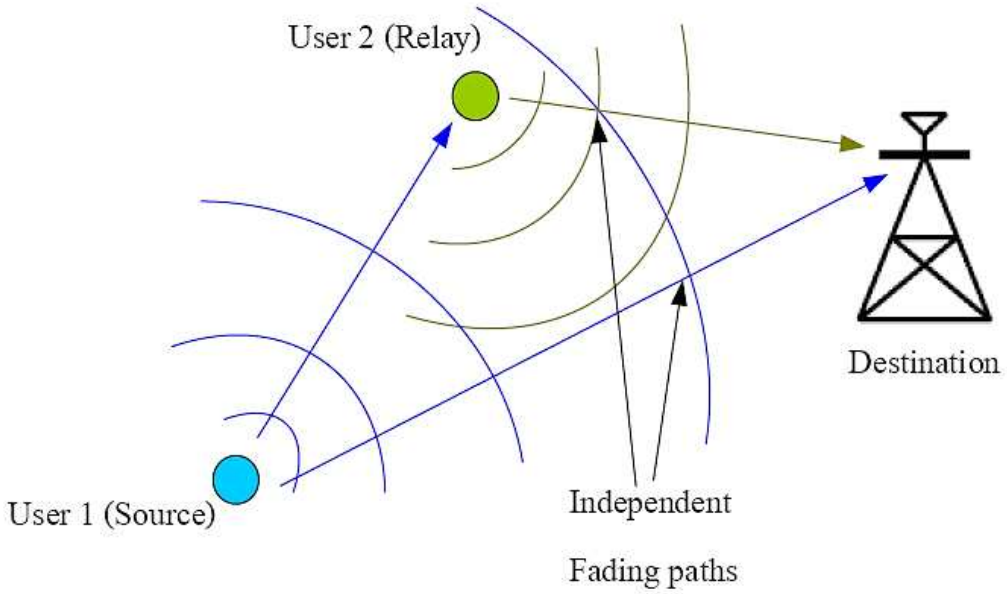
รูปที่ 2.3 แบบจำลองการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ

2.4 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือคือ ระบบสื่อสารที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless communication network)[1] ทำหน้าที่รับสัญญาณและช่วยส่งต่อสัญญาณที่รับได้ไปยังเครื่องรับปลายทางร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า

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

“เครื่องส่ง (Source) ” และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณ เรียกว่า “Relay” [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งการช่วยส่งต่อสัญญาณจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity gain) ขึ้น เหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มพิสัย (Range) ในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้เครื่องรับปลายทางสามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมาก ๆ ได้ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าอันจำกัด จากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบ ลดลงได้ ทำให้สามารถสื่อสารได้นานขึ้น



รูปที่ 2.4 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

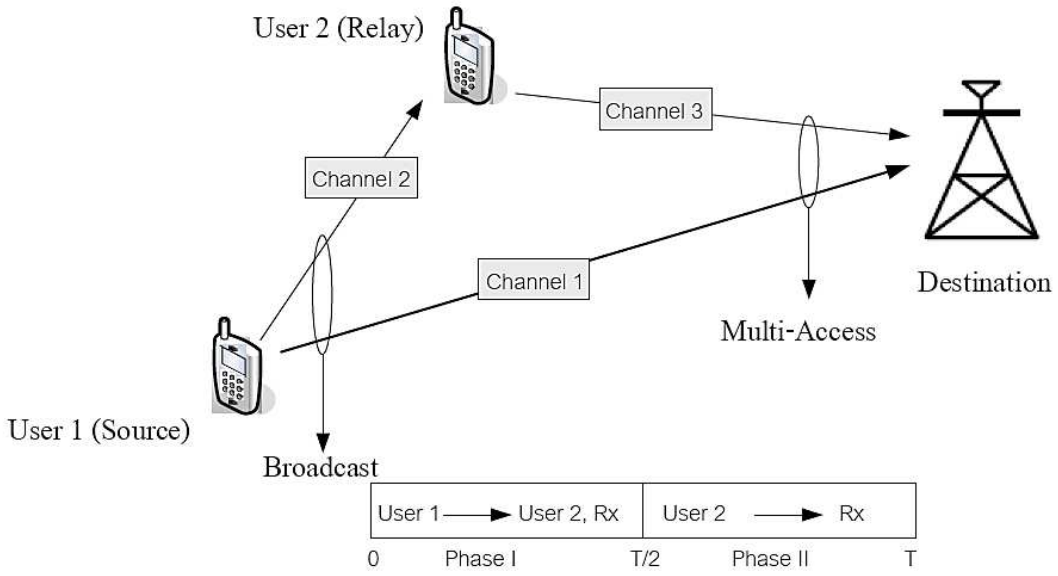
2.4.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสายไร้สายแบบร่วมมือ จะพิจารณาการส่งสัญญาณในแบบทิศทางเดียว คือ การสื่อสารในทิศทางจากผู้ใช้งานไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลายๆ ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน และมีการเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ใช้หลายคนได้ 3 แบบคือ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access:

---

[2] Chaiyod Pirak, Z.Jane Wang and K.J. Ray Liu. “An Adaptive protocol for cooperative communications achieving asymptotic minimum symbol-error-rate.” Proceeding of IEEE ICASSP06, (May 2006) : IV53-IV56.

FDMA) การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) และการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และให้เวลาสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานทั้งหมดไปยังเครื่องรับมีกระบวนการซิงโครไนซ์ (Synchronization) อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.5 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือสำหรับระบบสื่อสายไร้สายในรูปที่ 2.5 ซึ่งกำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay โดยมีช่วงเวลาของการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ทั้งหมด คือ T สามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟส ดังนี้

เฟสที่ 1 (0 – T/2) **:** เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งกระจายสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทางและผู้ใช้คนที่ 2 พร้อม ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สาย สัญญาณที่รับได้ยังเครื่องรับปลายทาง และสัญญาณที่รับได้ที่รีเลย์ แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

$$Y_{SD}(n) = \sqrt{P_1} h_{SD} x_S(n) + n_{SD}(n) \tag{2.1}$$

$$Y_{SR}(n) = \sqrt{P_1} h_{SR} x_S(n) + n_{SR}(n) \tag{2.2}$$

เมื่อ $x_S(n)$ คือ ข้อมูลที่ส่งออกจากเครื่องส่ง

h_{SD} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

h_{SR} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและ Relay

$n_{SD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

$n_{SR}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและ Relay

P_1 คือ กำลังส่งสัญญาณจากเครื่องส่ง

n คือ ลำดับเวลาในการส่งแต่ละครั้ง โดยที่ $n = \frac{nT}{4}$

เฟสที่ 2 (T/2 - T) **:** เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Relay ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยสัญญาณที่รับได้ยังเครื่องรับปลายทาง ดังสมการที่ 2.3

$$Y_{RD}(n) = \sqrt{P_2} h_{RD} x_R(n) + n_{RD}(n) \qquad (2.3)$$

เมื่อ $x_R(n)$ คือ ข้อมูลที่ Relay รับได้และส่งต่อไปยังปลายทาง

h_{RD} คือ ช่องสัญญาณระหว่าง Relay และเครื่องรับปลายทาง

$n_{RD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่าง Relay และเครื่องรับปลายทาง

P_2 คือ กำลังส่งสัญญาณจาก Relay

ดังนั้นการรวมสัญญาณแบบอัตราส่วนเท่ากัน (Equal Ratio Combining :ERC) ที่รับได้ที่เครื่องรับปลายทางสามารถเขียนได้เป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$Y_{SRD}(n) = Y_{SD}(n) + Y_{RD}(n) \qquad (2.4)$$

2.4.2 โปรโตคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอโปรโตคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือไว้ 3 รูปแบบตาม J. N. Laneman [3] ดังต่อไปนี้

1) โปรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol) โปรโตคอลแบบนี้มีหลักการคือ มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โปรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด

---

[3] J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. (September 2005) Ibid.

2) โปรโตคอลแบบเลือก (Selective Relaying Protocol) โปรโตคอลแบบนี้จะมีหลักการ คือไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay ที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay จากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็น Relay ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งโปรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโปรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง

3) โปรโตคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol) โปรโตคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายๆกับโปรโตคอลแบบเลือก Relay เพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไขการเลือกผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay มากขึ้น และจุดเด่นของโปรโตคอลนี้ก็คือ เครื่องรับจะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลนั้นไม่มีความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้รับทราบสถานะของการส่งที่สมบูรณ์จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay ไม่ต้องส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ แต่ถ้าหากการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay โปรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนสูงที่สุด

การหาประสิทธิภาพของโปรโตคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดย การหาความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหาย (Outage probability) และจะเห็นได้ว่าโปรโตคอลในแต่ละแบบจะมีความซับซ้อนแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโปรโตคอลแบบมีการป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงสุด และโปรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด

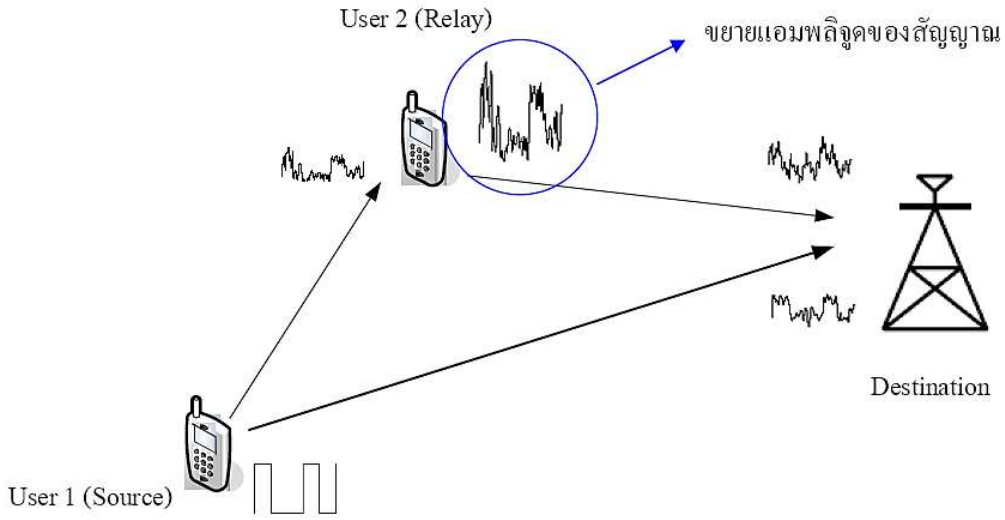
2.4.3 การส่งต่อสัญญาณจาก Relay ไปยังเครื่องรับปลายทาง

การส่งต่อสัญญาณจาก Relay ไปยังเครื่องรับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน และสามารถใช้งานกับโปรโตคอลสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือได้ทั้งสามแบบ คือ Amplify-and-Forward (AF) และ Decode-and-Forward (DF) [4]

1) Amplify-and-Forward : การส่งต่อแบบขยายแล้วส่งต่อ โดยผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาด แอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังเครื่องรับปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเนื่องจากการส่งข้อมูลแบบสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือจะมีการแบ่งช่วงเวลาในการส่งเป็น 4 ช่วงเวลา (Time Slot) ดังนั้นจึงกำหนดให้ลำดับเวลาในการส่งแต่ละครั้งเป็น $n = \frac{nT}{4}$

---

[4] J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. (September 2005) Ibid.



รูปที่ 2.6 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

โดยจากสมการที่ 2.3 สามารถเขียน ข้อมูลที่ Relay รับได้และส่งต่อไปยังปลายทาง $x_R(n)$ ได้ใหม่ตามสมการที่ 2.5

$$x_R(\frac{nT}{4}) = \beta Y_{SR}(\frac{nT}{4}) \quad ; n = 1,2,3,...,n \tag{2.5}$$

เมื่อ $Y_{SR}(\frac{nT}{4})$ คือ สัญญาณที่ Relay รับได้จากเครื่องส่ง

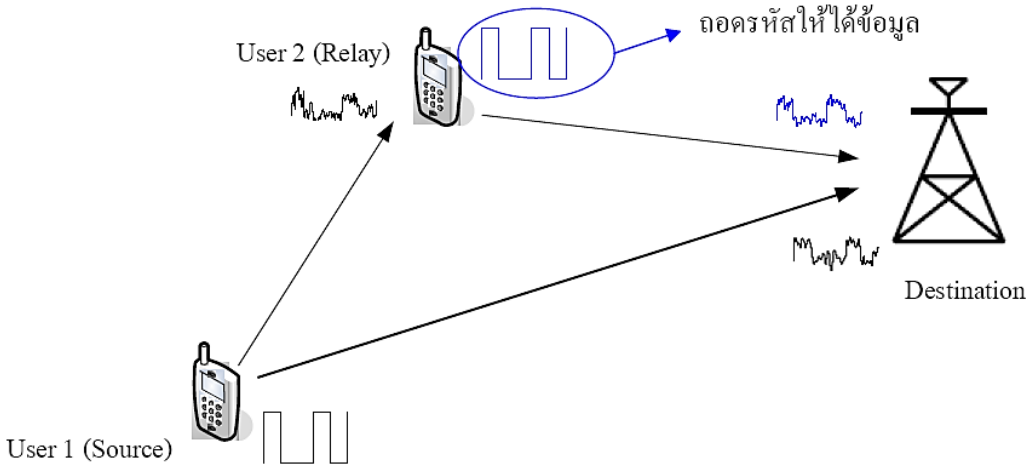
β คือ อัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ; $\beta \le \sqrt{\frac{P_1}{|h_{SR}|^2 P_1 + N_0}}$

และ

h_{SR} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและ Relay

N_0 คือ กำลังของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

2) Decode-and-Forward : การส่งต่อแบบถอดรหัสแล้วส่งต่อ ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะถอดรหัสสัญญาณ (re-encode) เพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

โดยจากสมการที่ 2.3 สามารถเขียน ข้อมูลที่ Relay รับได้และส่งต่อไปยังปลายทาง $x_R(n)$ ได้ใหม่ตามสมการที่ 2.6

$$x_R(\frac{nT}{4}) = x_s(\frac{nT}{4}) \quad ; \; n = 1, 2, 3, ..., n \tag{2.6}$$

เมื่อ $x_S(n)$ คือข้อมูลจากเครื่องส่ง ซึ่งถูกถอดรหัสจาก Relay

2.5 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

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

โดยทั่วไปแล้ว การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จะมีการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding: STBC) กับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

แบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding: STTC) และในรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก ก็ยังมีเรื่องของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti อยู่ด้วย แต่ในบางครั้งก็จะแยกออกเป็น 3 กลุ่มดังกล่าว เพื่อความชัดเจนของเนื้อหา ในงานวิจัยฉบับนี้จะแบ่งการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา ออกเป็น 3 เรื่องใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

1. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding: STTC)

2. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes)

3. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding: STBC)

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

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายเฉพาะวิธีการของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes)[5] เท่านั้น ทั้งนี้ก็เป็นเพราะคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่เรียบง่าย และให้ไดเวอร์ซิตี้ในระบบสูง

2.5.1. การเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

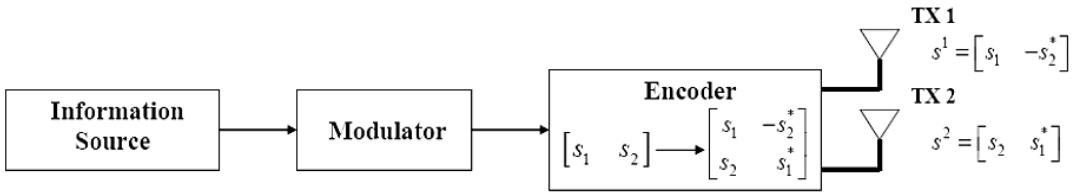
วิธีการเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อแหล่งกำเนิดข่าวสาร (Information Source) ให้กำเนิดสัญลักษณ์ข้อมูล และส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ (Modulator) ครั้งละ จำนวน 2 สัญลักษณ์ สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว ได้แก่ S_1 และ S_2 จะได้รับการแปลงด้วยวงจรเข้ารหัส (Encoder) ให้ได้เป็นสัญญาณที่ใช้ส่งจริงในสายอากาศแต่ละต้น โดยรูปแบบการส่งสัญญาณสามารถเขียนแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

---

[5] Paitoon Poonsawatt and Punyawi Jamjareekul,"Improving Dual-Hop Amplify-and-Forward Cooperative Mobile Network Based on Path selection and STBC with Pre-Coding Scheme" Proceeding of 2011 Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), May 2011, Mahidol University Thailand, pp 409-413.

การส่งสัญญาณแต่ละครั้ง หรือการส่งสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาต่อเนื่องกัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ได้แก่ S_1 และ S_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-S_2^*$ และ S_1^* ตามลำดับ ทั้งนี้ S_1^* คือ ค่าเชิงซ้อนสังยุคของ S_1 จะเห็นว่ารูปแบบการเขียนเมตริกซ์ S นั้นกำหนดให้ หมายเลขแถวหมายถึงสายอากาศที่จะส่ง และหมายเลขทางคอลัมน์หมายถึงเวลา



รูปที่ 2.8 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

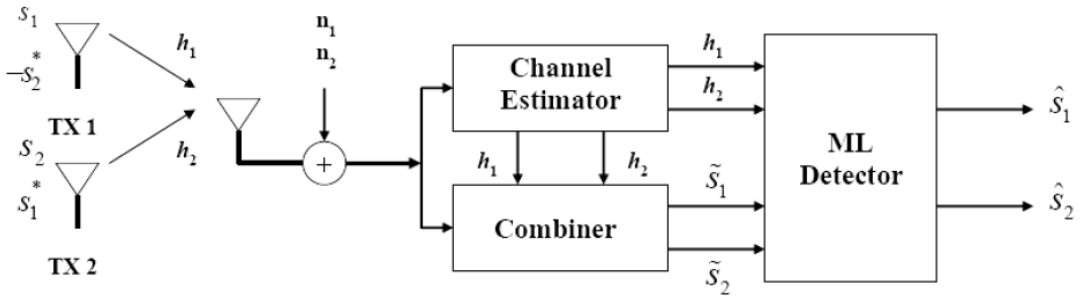
คุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของรหัสแบบ Alamouti คือ การที่เราสามารถกำหนดหรือเลือกชนิดของการมอดดูเลตแบบใดก็ได้ เช่น M-PSK, M-QAM หรือ M-ASK เป็นต้น ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่ง ในแต่ละครั้งได้ตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ใช้การมอดดูเลตแบบ 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

2.5.2 การถอดรหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่สายอากาศรับในรูปที่ 2.9 จะได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้ r_1 และ r_2 ณ เวลา 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 คือ สัญญาณรบกวน AWGN ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ ที่เป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ย(mean) เท่ากับศูนย์ และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density) เท่ากับ N_0

ในขั้นตอนการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลา ให้นำสัญญาณ r_1 และ r_2 ที่รับได้ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินเลือกสัญลักษณ์ s_1 และ s_2 โดยใช้ วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder) ซึ่งทำได้ โดยการกำหนดฟังก์ชั่นต้นทุน ให้อยู่ในรูปของระยะยูคลิเดียน (Euclidean distance) ระหว่างคู่สัญญาณที่รับได้ (r_1, r_2) กับคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ทำการคำนวณหาค่า ฟังก์ชั่นต้นทุนของคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ที่เป็นไปได้ทั้งหมด ให้ครบทุกรูปแบบ จากนั้นให้ตัดสินเลือกสัญลักษณ์ โดยเลือกคู่สัญลักษณ์ที่มีค่าฟังก์ชั่นต้นทุนต่ำสุด หรือเทียบเท่ากับการมีระยะยูคลิเดียนต่ำสุด (Minimum Euclidean Distance) กระบวนการตัดสินใจเลือกนั้นสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

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

สังเกตว่า ในขั้นตอนการคำนวณนี้ จะทำได้ก็ต่อเมื่อภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ h_1 และ h_2 ที่ถูกต้องสมบูรณ์ ในทางปฏิบัติ ค่าดังกล่าวนี้จะได้จากการประมาณค่าด้วยวงจรแยกต่างหาก

2.5.3 ข้อดีของรหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

Alamouti ได้ขยายผลของวิธีการนี้ออกไป เป็นกรณีของ 2 เสาอากาศส่ง และหลากหลาย (M_R) เสาอากาศรับ และได้แสดงผลวิธีการนั้นโดยได้กำหนด จำนวนของไดเวอร์ซิตี้เป็น 2 M_R ซึ่งลักษณะของวิธีการนี้ได้รวมถึง

1) ไม่ต้องมีการตอบกลับ จากเครื่องรับมายังเครื่องส่ง ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับระบบเพื่อที่ จะได้ไดเวอร์ซิตี้ทางด้านส่งสูงสุด

2) ไม่ต้องมีการขยายแบนด์วิดท์ (เพราะมีมากพอต่อการใช้ช่วงปริภูมิ ผ่านทางสายอากาศหลายเสา ไม่ใช่ ในเวลา หรือ ในความถี่)

3) กระบวนการถอดรหัสมีความซับซ้อนต่ำ

4) ให้ประสิทธิภาพเสมือนกับ วิธีการรวมสัญญาณจากหลายทิศทางแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด (MRC) ถ้าผลรวมของการแผ่กระจายกำลังงาน เป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับการใช้แบบ MRC เป็นเพราะว่า ถ้ากำลังงานส่งเป็นค่าคงที่ วิธีการนี้จะแย่กว่า 3 dB เพราะว่า กำลังงานส่งจะถูกแบ่งครึ่งให้กับเสาอากาศส่งทั้งสองต้น

5) ไม่ต้องมีการออกแบบใหม่สำหรับระบบเดิมที่มีอยู่ เพียงแค่ควบรวมระบบเข้ากับวิธีการไดเวอร์ซิตี้นี้ จึงเป็นวิธีที่นิยมอย่างมาก สำหรับการทำให้คุณภาพการเชื่อมต่อดีขึ้น บนพื้นฐานของเทคนิคเสาอากาศส่งคู่ ซึ่งไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบมากมาย

2.6 เทคนิคการรวมสัญญาณ[6]

เนื่องจากเครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันทั้งจากเครื่องส่งและ Relay ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับ เพื่อให้ได้สัญญาณรวมที่ดีที่สุดไปใช้งาน พิจารณาระบบสื่อสารไร้สายที่มีการรับสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจำนวน N ช่อง สัญญาณทั้งหมดนี้สามารถนำมารวมกันแบบเชิงเส้น (linear combination) เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมแต่ละช่องสัญญาณคือ a_j แสดงได้ดังสมการที่ 2.11

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

---

[6] ชาญวิทย์ ไยบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

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

และ $x_j(t)$ คือช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล

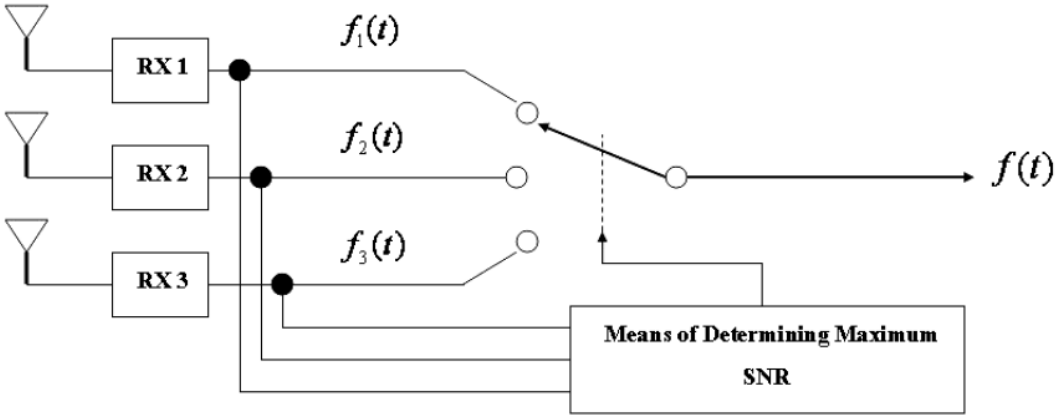
$m(t)$ คือข้อมูลที่ต้องการส่ง

a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรวมของแต่ละช่องสัญญาณ

$n_j(t)$ คือสัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

ซึ่งเทคนิคการรวมสัญญาณมีดังนี้

2.6.1 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection combining: SC)



รูปที่ 2.10 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก

สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ โดยเลือกสัญญาณที่รับได้ จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุดของสัญญาณที่รับมาทั้งหมด และจากสมการที่ 2.11 กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ตามสมการที่ 2.12

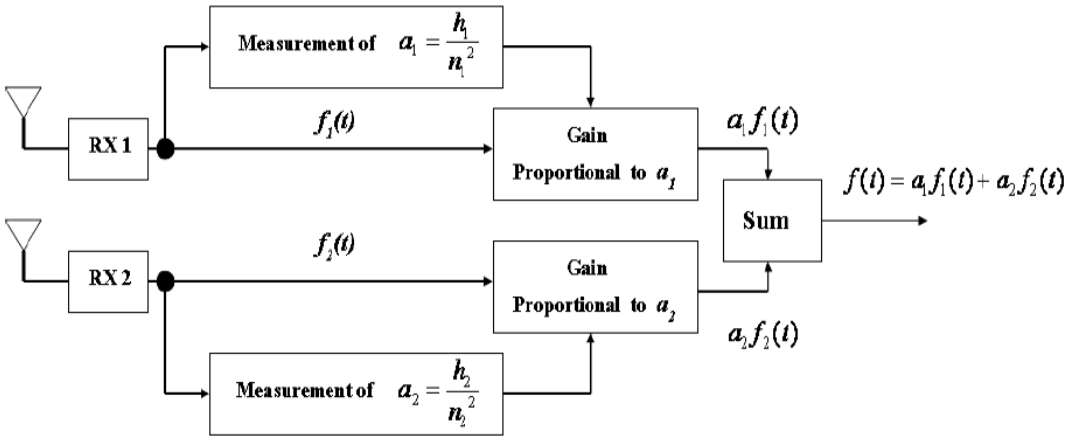
$$a_j(t) = \begin{cases} 1 & , for\ j = k \\ 0 & , for\ j \neq k \end{cases} \qquad (2.12)$$

โดยที่ k คือดัชนีสำหรับสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

2.6.2 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด (Maximal-ratio combining: MRC)

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด เป็นการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ทั้งหมดบวกกัน ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมทั้งหมด มีค่าสูงที่สุดและสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

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

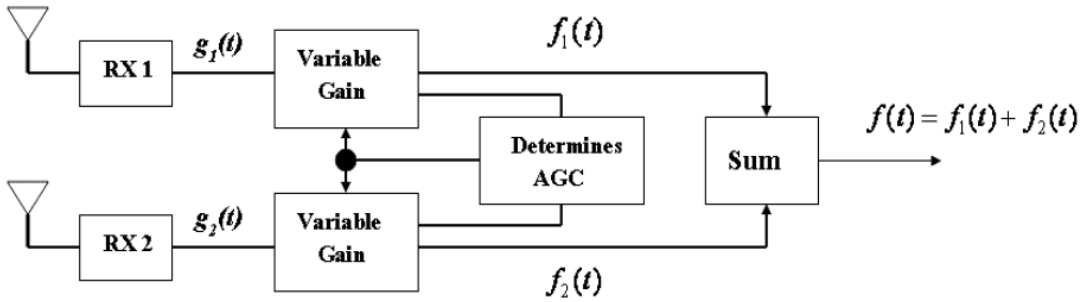


รูปที่ 2.11 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด

โดยเทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด จะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย ตามสมการที่ 2.14

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

2.6.3 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (Equal gain combining: EGC)

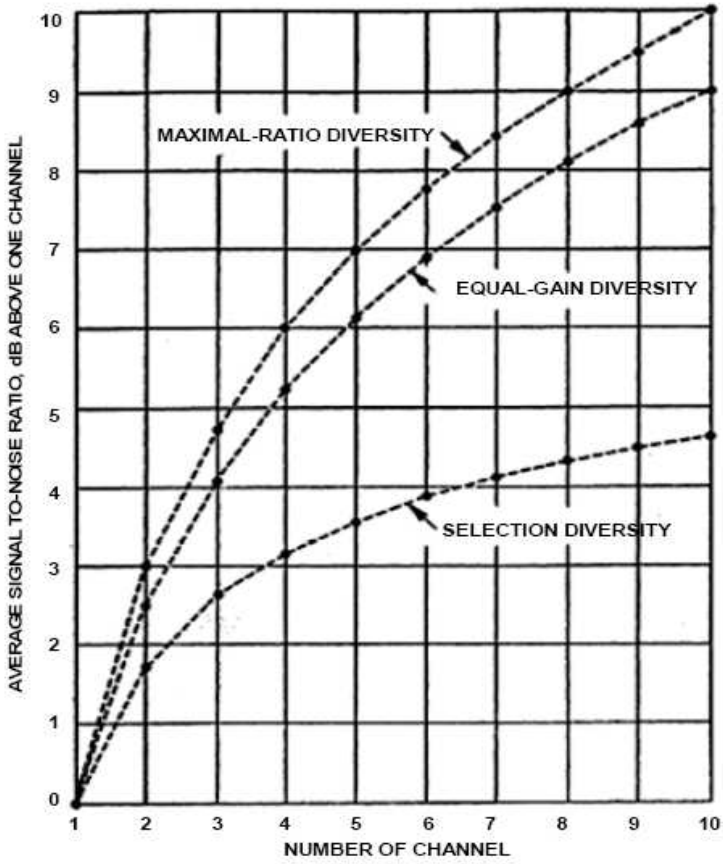


รูปที่ 2.12 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน จะทำการรวมสัญญาณโดยปรับค่าของอัตราการขยาย (Gain) ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทุกช่องสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นนำสัญญาณทั้งหมดรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากันนี้สามารถหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ตามสมการที่ 2.15

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



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 แบบ

จากการเปรียบเทียบเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค ดังรูปที่ 2.13 สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (Maximal-ratio combining: MRC) เป็นเทคนิคที่ทำให้ผลรวมของสัญญาณดีที่สุด เมื่อเทียบกับการรวมสัญญาณแบบเลือกและการรวมสัญญาณแบบให้อัตราขยายเท่ากัน

2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

2.7.1 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate : BER)

อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) หรืออัตราความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาด (Bit Error Probability: BEP) คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูล ที่ทางภาครับตัดสินผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่ง เป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัด

สมรรถนะของระบบ เป็นค่าที่แสดงถึงค่าความถูกต้องของการรับ/ส่งข้อมูลโดยตรง อัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสภาวะต่าง ๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไป เป็นต้น

2.7.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR)

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คือ อัตราส่วนกำลังของสัญญาณเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวน ส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวน ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จึงนิยมวัดกันในหน่วยเดซิเบล (Decibel: dB) โดย ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้คนที่ ในค่าหน่วยของเดซิเบล สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.16[7]

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

เมื่อ $|h|^2$ คือสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ

P คือกำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด

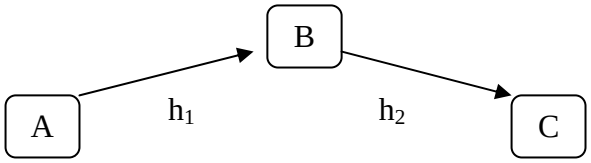
N_0 คือค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ของสัญญาณรบกวน

W คือแบนด์วิดธ์การส่งสัญญาณ

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

[7] กำพล วรดิษฐ์. (2552). พฤติกรรมสัญญาณขาดหายของแผนการสัญญาณซ้ำแบบร่วมมือพร้อมด้วยการเลือกรีเลย์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิสูจน์สมการการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแบบสองฮอบ โดยการใช้การส่งสัญญาณแบบสองฮอบ[8]



รูปที่ 2.14 โมเดลการส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายแบบสองฮอบ (ไม่มีเส้นทางตรงระหว่างแหล่งกำเนิดถึงปลายทาง)

ตามรูปที่ 2.14 โดยที่ โหนด A เป็นแหล่งกำเนิดส่งสัญญาณ S ใช้กำลังส่งเฉลี่ยปกติ ผ่านโหนด B ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์หรือตัวส่งผ่าน และโหนด C เป็นผู้รับหรือปลายทาง

เมื่อ r_B และ r_C สัญญาณที่รับได้ที่โหนด B และโหนด C ตามลำดับ

h_1 เป็นช่องสัญญาณของการจางหายระหว่างโหนด A และโหนด B

h_2 เป็นช่องสัญญาณของการจางหายระหว่างโหนด B และโหนด C

n_1 และ n_2 เป็นสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) ของช่องสัญญาณระหว่างโหนด A ถึงโหนด B และ โหนด B ถึงโหนด C ตามลำดับ ที่มีความหนาแน่นสเปคตรัมกำลังของสัญญาณรบกวน (Power Spectrum Density) เท่ากับ N_0

G เป็นอัตราการขยายสัญญาณของรีเลย์ที่โหนด B

โดยที่กำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด (P) มีค่าเท่ากัน จะได้ว่า สัญญาณที่รับได้ที่โหนด B สามารถเขียนได้เป็น

$$r_B = h_1 S + n_1 \tag{2.17}$$

และสัญญาณที่รับได้ที่โหนด C ปลายทางสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} r_C &= G h_2 r_B + n_2 \\ &= G h_2 (h_1 S + n_1) + n_2 \\ &= G h_2 h_1 S + G h_2 n_1 + n_2 \end{aligned} \tag{2.18}$$

---

[8] Mazen O. Hasna and Mohamed-Slim Alouini, "Performance Analysis of Two-Hop Relayed Transmissions over Rayleigh Fading Channels", Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th, Vol.4, pp.1992-1996.

ดังนั้นอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน สามารถเขียนได้เป็น

$$SNR_{eqv} = \frac{G^2 \left|\frac{h_1^2}{N_0}\right| \left|\frac{h_2^2}{N_0}\right|}{G^2 \left|\frac{h_2^2}{N_0}\right| + \frac{1}{N_0}} \quad ; \text{โดยที่} \quad G^2 = \frac{1}{\left|h_1^2\right| + N_0} \tag{2.19}$$

นำ G^2 หารทั้งเศษและส่วน ;

$$SNR_{eqv} = \frac{\left|\frac{h_1^2}{N_0}\right| \left|\frac{h_2^2}{N_0}\right|}{\left|\frac{h_2^2}{N_0}\right| + \frac{1}{G^2 N_0}} \tag{2.20}$$

แทนค่า G^2 ;

$$SNR_{eqv} = \frac{\left|\frac{h_1^2}{N_0}\right| \left|\frac{h_2^2}{N_0}\right|}{\left|\frac{h_2^2}{N_0}\right| + \left|\frac{h_1^2}{N_0}\right| + \frac{N_0}{N_0}} \tag{2.21}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.16 สามารถเขียนได้เป็น

$$SNR_{eqv} = \frac{SNR_1 SNR_2}{SNR_1 + SNR_2 + 1} \tag{2.22}$$