บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ระบบการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มจากระบบการสื่อสารในยุคแรก (first generation) ซึ่งนิยมใช้ระบบการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA) ต่อมาเป็นยุคของการสื่อสารรุ่นที่สอง (second generation) ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารในปัจจุบัน มีการใช้เทคนิคในทำนองเดียวกัน คือ ระบบการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA) และระบบการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA) โดยเทคนิค CDMA นี้ได้นำเอาไปใช้ในระบบการสื่อสารรุ่นที่สาม (third generation) อีกด้วย (Rappaport, 2002) ระบบการร่วมใช้ช่องสัญญาณทั้งสามแบบจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ โดยอาศัยความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ร่วมกัน ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และมีความสำคัญอย่างมากสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย ในปัจจุบันนักออกแบบด้านการสื่อสารแบบไร้สายได้พบความจริงที่ว่า แถบความถี่สำหรับคลื่นวิทยุ และความซับซ้อนของสภาพแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น (propagation) สามารถเพิ่มความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีคุณภาพสูง และมีอัตราการรับส่งที่มากขึ้นได้ แต่ในอดีตนักออกแบบได้อาศัยเพียงเทคนิคด้านความถี่ เวลา และการเข้ารหัสเท่านั้น ดังนั้นสิ่งที่สามารถพัฒนาเพิ่มขึ้น และต้องพิจารณาในมิติถัดไปได้ คือ พื้นที่ว่างในการวางสายอากาศ โดยการใช้งานสายอากาศแบบหลายองค์ประกอบ (multi-element antenna) โดยระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท (Multiple-Input Multiple-Output Systems) เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณได้ โดยการใช้สายอากาศหลายๆ ตัว ทั้งในด้านส่งและด้านรับสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จากการใช้สายอากาศหลายๆ ตัว จะทำให้ความจุช่องสัญญาณ มีการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้น และอาศัยคุณสมบัติการเฟดของคลื่นแบบหลายวิถี (multi-path fading) เป็นส่วนสำคัญ

ระบบการสื่อสารไร้สายที่เป็นระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท (Multiple-Input Multiple-Output : MIMO) เริ่มมีการศึกษาวิจัยกันอย่างมากในระยะเวลาไม่นานมานี้ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้ โดยการใช้งานสายอากาศแบบหลายองค์ประกอบทั้งในด้านส่งและด้านรับ ซึ่งในปัจจุบันถูกนำไปเสนอใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายความเร็วสูง ตามมาตรฐาน IEEE 802.11n ความจุของระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ได้เป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา

โดยได้แสดงให้เห็นว่า สำหรับช่องสัญญาณ (channel) ระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุทแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน (independent and identically distributed : i.i.d.) จะทำให้ความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ตามค่าที่น้อยที่สุดของจำนวนสายอากาศด้านรับและด้านส่ง ซึ่งผลที่ได้นี้ อธิบายได้ว่าระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท สามารถใช้ประโยชน์จากพื้นที่ว่างในการวางสายอากาศมาช่วยเพิ่มความจุช่องสัญญาณได้ โดยทั่วไปแล้วงานวิจัยที่ผ่านมา เน้นศึกษาบนพื้นฐานการใช้สายอากาศแบบไอโซทรอปิก (isotropic antenna) และให้การกระจายของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศมีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution) คือมีการเข้าถึงสายอากาศในทุกทิศทาง ทำให้การใช้สายอากาศแบบไอโซทรอปิกมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในอาคาร (indoor) สำหรับงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท เพื่อนำมาใช้งานในสภาวะภายนอกอาคาร (outdoor) โดยใช้สายอากาศ แบบมีทิศทาง (directional antenna) ซึ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (antenna radiation pattern) กับความจุช่องสัญญาณ (channel capacity) สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท โดยการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ผลจากลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ และความเป็นไปได้ของสายอากาศชนิดต่าง ๆ ที่ให้ค่าความจุช่องสัญญาณที่เหมาะสมในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อศึกษาแบบจำลองความจุช่องสัญญาณ ระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ในสภาพแวดล้อม การเฟดของคลื่นแบบหลายวิถี (multipath fading) เพื่อใช้อธิบายคุณลักษณะต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ และเพื่อเป็นแบบจำลองอ้างอิง

- เพื่อศึกษาพัฒนาแบบจำลองสำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุช่องสัญญาณกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

- เพื่อที่จะได้แบบจำลองสำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ที่อธิบายคุณลักษณะและความสัมพันธ์ระหว่างกับความจุช่องสัญญาณกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความจุช่องสัญญาณกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ในสภาพแวดล้อมการเฟดของคลื่นแบบหลายวิถี โดยอาศัยกระบวนการเชิงสุ่ม (stochastic process)

- ทำการจำลองผลแบบจำลองด้วยวิธีการมอนติคาร์โล (Monte Carlo) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความจุช่องสัญญาณกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาและออกแบบ แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความจุช่องสัญญาณกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

- วิเคราะห์ผลแบบจำลอง ความสัมพันธ์ระหว่างความจุช่องสัญญาณกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท โดยการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความจุช่องสัญญาณกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

- ใช้พัฒนาต้นแบบระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท โดยการเลือกใช้สายอากาศแบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความจุช่องสัญญาณ ในแต่ละสภาวะแวดล้อม

1.6 ปริทัศน์วรรณกรรม

ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ จึงได้ศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาโดยอาศัยฐานข้อมูลต่าง ๆ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียง และได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยัง ได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเตอร์เน็ท จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุทที่ผ่านมา สามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้

1) งานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

2) งานวิจัยที่เกี่ยวกับความจุของระบบระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

3) งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติมิวชวลคัปปลิ้ง (mutual coupling) ที่มีผลกับความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

ซึ่งข้อมูลในรายละเอียดงานวิจัยของแต่ละกลุ่มจะได้อธิบายต่อไปดังนี้

1.6.1 งานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

งานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองช่องสัญญาณ ถือเป็นพื้นฐานของการศึกษาวิจัยสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการการกระจายคลื่น ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญในการค้นหาค่าความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

สำหรับแบบจำลอง ช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยในขอบเขตของ ระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ในลักษณะที่เป็นช่องสัญญาณแบบเชิงสุ่ม (stochastic channel) ดังนั้นช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน จึงมีความเรียบง่าย และเหมาะสมในการศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณโดยทั่วไป

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำเสนอแบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุทที่แตกต่างกันมากมาย โดยที่แบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท สามารถจัดแบ่งออกได้หลายรูปแบบ เช่น สามารถแบ่งได้เป็นแบบจำลองสำหรับแถบความถี่กว้าง (wideband) และแถบความถี่แคบ (narrowband) ในกรณีที่เราพิจารณาโดยใช้ความกว้างแถบความถี่ของระบบเป็นเกณฑ์ ซึ่งในแบบจำลองช่องสัญญาณแถบความถี่กว้าง ช่องสัญญาณจะสมมุติให้มีผลตอบสนองที่แตกต่างกันในแต่ละความถี่ นั่นคือ ช่องสัญญาณจะเป็นในลักษณะที่เรียกว่า ช่องสัญญาณการเฟดโดยการเลือกความถี่ (frequency selective fading channel) และสำหรับช่องสัญญาณแถบความถี่แคบ จะสมมุติให้มีผลตอบสนองที่เท่ากันตลอดย่านความถี่ที่พิจารณา หรือโดยการพิจารณาคุณลักษณะของค่าตัวแปรต่าง ๆ ของช่องสัญญาณแบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุทสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ และแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงฟิสิกส์ โดยแบบจำลองที่ไม่ใช่เชิงฟิสิกส์ จะเป็นแบบจำลองที่พิจารณาค่าตัวแปรที่ได้จากคุณลักษณะของช่องสัญญาณในเชิงสถิติ อย่างไรก็ตามแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ จะมีการพิจารณาถึงค่าตัวแปรเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ เช่น มุมของสัญญาณที่เข้ามา (Angle of Arrival : AoA) มุมของสัญญาณที่ส่งออก (Angle of Departure : AoD) และ เวลาที่สัญญาณมาถึง (Time of Arrival : ToA) เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างของแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ในย่านแถบความถี่แคบ ได้แก่ แบบจำลองช่องสัญญาณ “One-Ring” (Petrust, Reed and Rappaport, 1996) และแบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ (Spatial Channel Model : SCM) สำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณ “One-Ring” ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยหลาย ๆ ชิ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน แบบจำลองช่องสัญญาณ “One-Ring” จะพิจารณาระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศด้วย ซึ่งทำให้สามารถนำมาใช้ในการศึกษาผลจากการมิวชวลคัปปลิ้ง และผลกระทบจากความสัมพันธ์ในลักษณะสหสัมพันธ์ (correlation effect)

แบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ ถือเป็นตัวอย่างหนึ่ง ที่มีความสมจริงมากในการศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณ ซึ่งได้ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานที่ได้พัฒนาโดยกลุ่ม 3GPP-3GPP2 และ ad-hoc group (AHG) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานสำหรับระบบเครือข่ายเซลลูลาร์รุ่นที่ 3 (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2007) โดยแบบจำลองนี้ ยอมให้มีการจำลองระบบในระดับต่าง ๆ รวมทั้งมีรูปแบบการกระจายคลื่นถึงสามลักษณะที่ใช้ในการตรวจสอบ ประกอบด้วย การกระจายคลื่นแบบ suburban macro-cell urban macro-cell และ urban micro-cell

1.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับความจุของระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

ความจุของระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ได้เป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (Foschini, 1996; Foschini and Gans, 1998; Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003; Jensen and Wallace, 2004; Telatar, 1995) โดยงานวิจัยของ Foschini (1996) และ Telatar (1995) ได้แสดงให้เห็นว่า สำหรับช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ที่เป็นแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน ความจุช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าที่น้อยที่สุดของจำนวนสายอากาศด้านรับและด้านส่ง ซึ่งผลที่ได้นี้ อธิบายได้ว่า ระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท สามารถใช้ประโยชน์จากพื้นที่ว่างในการวางสายอากาศมาช่วย โดยการส่งสัญญาณข้อมูลในรูปของช่องสัญญาณที่เป็นเมทริกซ์ แทนที่จะเป็นในรูปของช่องสัญญาณแบบเวคเตอร์ (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003) สำหรับรายละเอียดของระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท ดังแสดงในงานวิจัย (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003; Jensen and Wallace, 2004)

สำหรับงานวิจัยของ Foschini (1996) Foschini and Gans (1998) Shiu, Foschini, Gans and Kahn (2000) Patzold and Hogstad (2004) และ Svantesson and Ranheim (2001) ได้ทำการศึกษาวิจัยภายใต้สมมุติฐานที่ว่า ภาครับเป็นช่องสัญญาณที่มีข่าวสารสมบูรณ์ (perfect channel information) ดังนั้น จึงมีกำลังงานในรูปแบบที่เท่ากัน เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณ และในงานวิจัย Telatar (1995) และ Khalighi, Brossier, Jourdain and Raoof (2001) ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการจัดสรรกำลังงานแบบวอเตอร์ฟิลลิ่ง (water-filling power allocation scheme) จะมีความเหมาะสมกับการประมาณค่าช่องสัญญาณทั้งในด้านรับและด้านส่ง

1.6.3 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติมิวชวลคัปปลิ้งที่มีผลกับความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท

ผลจากมิวชวลคัปปลิ้งที่มีต่อความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุทจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ ซึ่งปรากฏในงานวิจัย Svantesson and Ranheim (2001) จากมุมมองของการทดสอบในการติดตั้งใช้งาน ระยะห่างของสายอากาศที่มี

จำกัด อาทิ ในอุปกรณ์พกพาต่าง ๆ ทำให้เกิดผลของมิวชวลคัปปลิ้งเกิดขึ้น และทำให้สัญญาณที่ได้รับ มีความสัมพันธ์กันระหว่างสายอากาศภาครับแต่ละองค์ประกอบ ในการพิจารณาแบบจำลองการมิวชวลคัปปลิ้ง สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท จะทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นด้วย ดังที่ได้กล่าวไว้ ผลจากมิวชวลคัปปลิ้งจะทำให้มีการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท โดยจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของการกระจัดกระจาย (Svantesson and Ranheim, 2001; Wallace and Jensen, 2004; Wyglinski and Blostein, 2003)

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะอาศัยแบบจำลองพื้นฐานสองแบบ คือ แบบจำลองช่องสัญญาณ “One-Ring” และแบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ โดยอาศัยค่าความจุช่องสัญญาณของระบบที่มีกำลังงานที่ส่งเท่ากัน ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาและสร้างแบบจำลอง เพื่อทำการวิเคราะห์ความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาท์พุท จากผลของลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยแบ่งเป็นสองส่วน คือการศึกษาในระดับสองมิติ และสามมิติ ซึ่งในสองมิติจะกำหนดให้การกระจายของคลื่นอยู่ในระนาบแนวนอน โดยจะจัดวางสายอากาศทั้งภาครับและภาคส่งบนระนาบเดียวกัน ส่วนในระดับสามมิติ จะให้การกระจายของคลื่นมีทั้งในระนาบแนวนอนและระนาบแนวตั้ง โดยให้สายอากาศภาครับและภาคส่งจัดวางอยู่ในระนาบแนวนอนเดียวกัน