

การสื่อสารไร้สายร่วมกับผลป้อนกลับที่จำกัด  
Wireless Communications With Limited Feedback

รองศาสตราจารย์ ดร.วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

28 เมษายน พ.ศ. 2563

## คำนำ

โทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์สื่อสารไร้สายอื่น ๆ เป็นเครื่องมือสื่อสารหลักของคนในสังคมปัจจุบัน ความต้องการสื่อสารไร้ผ่านคลื่นวิทยุวันนี้มีแต่จะเติบโตขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับจำนวนย่านความถี่ และความกว้างแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่เหมาะต่อการสื่อสารซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด คลื่นความถี่จึงเป็นทรัพยากรของชาติที่สำคัญและมีจำกัด และเป็นทรัพยากรที่มีมูลค่าสูง ดังจะเห็นจากราคาการประมูลคลื่นความถี่ย่านต่าง ๆ ที่ผ่านมา ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่มุ่งหาวิธีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพเชิงสเปกตรัมสูง ซึ่งนิยามหนึ่งของประสิทธิภาพเชิงสเปกตรัมคือ อัตราส่วนของอัตราส่งสารในหน่วยบิตต่อวินาทีต่อแบนด์วิดท์การสื่อสารในหน่วยเฮิรตซ์ ผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ถ้าเครื่องส่งสารในระบบสื่อสารมีข้อมูลสถานะช่องสัญญาณ (Channel state information) ที่ถูกต้องเป็นปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลสถานะช่องสัญญาณในที่นี้หมายถึง อัตราขยายของช่องสัญญาณ (Channel gain) หรือข้อมูลอื่น ๆ ที่บ่งชี้ลักษณะเฉพาะและสมบัติของช่องสัญญาณ ถึงแม้ว่าปริมาณข้อมูลช่องสัญญาณไม่มาก แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อเครื่องส่งสารมีข้อมูลช่องสัญญาณ เครื่องส่งสามารถปรับวิธีการส่งสารให้เหมาะกับช่องสัญญาณ และส่งสารด้วยอัตราบิตที่สูงขึ้นได้ คำถามถัดมาคือ เครื่องส่งสารได้ข้อมูลช่องสัญญาณอย่างไร สำหรับการสื่อสารสองทิศทางแบ่งความถี่หรือเอฟดีดี (Frequency-division duplex: FDD) เครื่องส่งสารอาจได้รับข้อมูลสถานะช่องสัญญาณจากเครื่องรับสาร ซึ่งต้องประมาณช่องสัญญาณเพื่อตรวจสอบหาสารอยู่แล้ว เครื่องรับสารจึงสามารถป้อนกลับข้อมูลสถานะช่องสัญญาณกลับไปยังเครื่องส่ง เพื่อใช้ปรับการส่งสารให้เหมาะกับช่องสัญญาณปัจจุบัน โดยทั่วไปอัตราป้อนกลับ (Feedback rate) มักมีค่าจำกัด ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำและความเป็นปัจจุบันของข้อมูลสถานะช่องสัญญาณ ปัญหาผลป้อนกลับที่จำกัดในระบบสื่อสารไร้สายเป็นที่สนใจของนักวิจัยจำนวนมาก และผลการวิจัยได้ถูกประยุกต์ใช้ในมาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 4 (4G) ระบบแอลทีอีแอดวานซ์ (LTE-Advanced) และยุคที่ 5 (5G) ดังนั้นการสื่อสารไร้สายร่วมกับผลป้อนกลับที่จำกัด หรือร่วมกับข้อมูลสถานะช่องสัญญาณที่จำกัด จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่สำคัญ แต่จากผลการสำรวจและสืบค้นของผู้แต่งไม่พบหนังสือหรือแหล่งความรู้ที่เป็นภาษาไทยในหัวข้อนี้ ประกอบกับความรู้และผลวิจัยที่ผู้แต่งสังเคราะห์มาพร้อมสปี จึงเป็นเหตุจูงใจให้แต่งหนังสือเล่มนี้ขึ้น

หนังสือเล่มนี้แบ่งเป็น 8 บท โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักได้ดังนี้

**ความรู้พื้นฐาน** ประกอบด้วยบทที่ 1 2 และ 3 เริ่มจากบทแรกกล่าวถึงพัฒนาการของการสื่อสารไร้สายจากในอดีตและระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ปัญหาและความท้าทายของการสื่อสารไร้สาย ซึ่งมีความแตกต่างจากการสื่อสารผ่านสายสัญญาณ ที่มาและความสำคัญของการป้อนกลับข้อมูลสถานะช่องสัญญาณจากเครื่องรับสัญญาณมายังเครื่องส่ง ซึ่งผลการป้อนกลับสามารถเพิ่มสมรรถนะของการสื่อสาร ในบทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองช่องสัญญาณไร้สายรวมถึงแบบจำลองทางสถิติที่สำคัญ การจำแนกประเภทของช่องสัญญาณไร้สาย ลักษณะและสมบัติของช่องสัญญาณประเภทต่าง ๆ บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการส่งสารในช่องสัญญาณไร้สาย ตัวชี้วัดสมรรถนะการสื่อสารที่สำคัญ เช่น ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ความจุช่องสัญญาณ การสร้างความหลากหลายในโดเมนเวลาและโดเมนพื้นที่หรือสายอากาศ เพื่อลดความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในการส่งสาร

**การป้อนกลับในช่องสัญญาณที่เครื่องส่งและรับสัญญาณมีสายอากาศเดียว** ในเนื้อหาส่วนที่สองนี้ ศึกษาการป้อนกลับในช่องสัญญาณไร้สายที่เครื่องส่งมีหนึ่งสายอากาศส่งและเครื่องรับมีหนึ่งสายอากาศรับ ซึ่งอาจเรียกว่าช่องสัญญาณรับเข้าเดี่ยวและส่งออกเดี่ยว หรือช่องสัญญาณไซโซ (Single-input single-output: SISO) เนื้อหาในส่วนนี้ประกอบด้วยบทที่ 4 และ 5 ในบทที่ 4 พิจารณาการสื่อสารในช่องสัญญาณไซโซที่มีแบนด์วิดท์ของการสื่อสารแคบ โดยความกว้างของแบนด์วิดท์อยู่ในหน่วยกิโลเฮิรตซ์ ตัวอย่างเช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 1 หรือ 2 เป็นต้น สำหรับบทที่ 5 กล่าวถึงการป้อนกลับช่องสัญญาณไซโซแบนด์กว้าง โดยความกว้างของแบนด์วิดท์ของการสื่อสารอยู่ในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ขึ้นไป ตัวอย่างเช่น โอเอฟดีเอ็ม (OFDM) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีส่งสารในระบบโทรศัพท์ 4G การป้อนกลับในส่วนนี้เน้นการป้อนกลับกำลังส่ง และอัตราส่งสารที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณ และมีผลวิจัยของผู้แต่งที่นำเสนอวิธีป้อนกลับ และวิเคราะห์สมรรถนะของช่องสัญญาณโอเอฟดีเอ็มอีกด้วย

**การป้อนกลับในช่องสัญญาณที่ซับซ้อนขึ้น** ในกรณีเครื่องส่งสารมีสายอากาศมากกว่าหนึ่งสายอากาศ วิธีการป้อนกลับข้อมูลช่องสัญญาณมีความซับซ้อนขึ้น และอัตราป้อนกลับต้องเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งรายละเอียดการป้อนกลับพร้อมทั้งการวิเคราะห์สมรรถนะการสื่อสารอยู่ในบทที่ 6 และในบทนี้ยังกล่าวถึงการออกแบบสมุดรหัส (Codebook) สำหรับการแบ่งนัยเวกเตอร์บีมฟอร์มมิงส่ง (Transmit beamforming) และเมทริกซ์พรีโค้ดดิ้ง (Precoding matrix) ซึ่งการแบ่งนัยเป็นขั้นตอนหนึ่งในการป้อนกลับข้อมูลการส่งให้เครื่องส่ง ในบทที่ 6 มีการนำเสนอสมุดรหัสอาร์วีคิว (RVQ codebook) และวิเคราะห์สมรรถนะของสมุดรหัสดังกล่าว เมื่อใช้ในการแบ่งนัยข้อมูลการส่งก่อนการป้อนกลับ ซึ่งส่วนหนึ่งของเนื้อหาเป็นผลวิจัยของผู้แต่งเอง ในบทที่ 7 กล่าวถึงการป้อนกลับในช่องสัญญาณหลายผู้ใช้ โดยเน้นที่ช่องสัญญาณดาวนลิงค์ ซึ่งตัวอย่างหนึ่งคือช่องสัญญาณสื่อสารในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ (Cellular telephone system) จากสถานะพื้นฐาน

(Base station) มายังอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Mobile equipment) ในพื้นที่ให้บริการ บทที่ 7 มีผลการศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารเมื่อข้อมูลช่องสัญญาณของผู้ใช้ที่สถานีฐานมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งส่วนหนึ่งของผลการศึกษาจากการวิจัยของผู้แต่งและคณะ ผลจากการศึกษาและวิจัยในหัวข้อผลป้อนกลับที่จำกัดในช่องสัญญาณไร้สาย ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในมาตรฐานแอลทีอี ซึ่งเป็นมาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G รายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 8 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายของหนังสือ

เนื้อหาส่วนที่ 1 และ 2 สามารถใช้ประกอบการเรียนการสอนรายวิชา การสื่อสารไร้สาย การสื่อสารเคลื่อนที่ หรือรายวิชาเฉพาะเลือกในหลักสูตรระดับปริญญาตรี ซึ่งผู้เรียนควรเรียนวิชาพื้นฐาน เช่น หลักการสื่อสาร มาก่อน สำหรับเนื้อหาส่วนที่ 3 สามารถใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาได้ หนังสือเล่มนี้เหมาะกับผู้มีความรู้พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารและสนใจหัวข้อการสื่อสารไร้สายร่วมกับผลป้อนกลับที่จำกัด หนังสือเล่มนี้ได้รับการปรับปรุงแก้ไขให้มีคุณภาพและความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เชี่ยวชาญหลายท่าน

วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนสนับสนุนทำให้หนังสือเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนให้คณาจารย์สร้างสรรค์ผลงานทางวิชาการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครงการเพิ่มศาสตราจารย์แบบก้าวกระโดด ที่สนับสนุนงบประมาณการพิมพ์หนังสือ และสร้างโอกาสให้ผู้แต่งได้พบปะแลกเปลี่ยนความรู้กับคณาจารย์จากคณะวิชาต่าง ๆ ได้รับความรู้ คำแนะนำ และกำลังใจจากอาจารย์พี่เลี้ยง ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.งามผ่อง คงคาทิพย์ ศาสตราจารย์เกียรติคุณกุลวดี มกราภิรมย์ และวิทยากรทุกท่าน ขอขอบคุณทุกท่าน รวมทั้งอาจารย์ผู้ดูแลโครงการ ฯ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธานีรินทร์ คงศิลา และเจ้าหน้าที่โครงการทุกคน

ขอขอบคุณคณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนงบประมาณการเข้าร่วมโครงการ ฯ ขอขอบคุณศาสตราจารย์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่เป็นตัวอย่างนักวิชาการและเป็นแรงบันดาลใจให้อาจารย์รุ่นน้อง ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ฐิโงปการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนิศา รุ่งแจ้ง สำหรับคำแนะนำในการปรับปรุงหนังสือ ขอขอบคุณหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า รุ่นพี่รุ่นน้องและเพื่อนร่วมงานที่ภาควิชา ฯ ทุกท่านที่สร้างบรรยากาศการทำงานและการเรียนการสอนที่อบอุ่น โดยเฉพาะรุ่นพี่อย่าง รองศาสตราจารย์ ดร.สมหญิง ไทยนิมิต และรองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ไพศาลกิตติสกุล ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล ที่คอยให้กำลังใจและผลักดันอาจารย์รุ่นถัดมาให้เติบโตทางวิชาการ

เนื้อหาในหนังสือบางส่วนเป็นผลวิจัยที่ผู้แต่งร่วมสร้างสรรค์กับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษาในอดีต โดยเฉพาะงานวิจัยเรื่องการป้อนกลับในช่องสัญญาณไร้สายหลายเรื่องทำร่วมกับ ดร.กฤษฎา มามาตร อดีตนิสิตในที่ปรึกษา ขอขอบคุณ ดร.เขมทัต จิราวรรณสถิตย์ ที่ช่วยจัดทำรูปในหนังสือเล่มนี้ ขอขอบคุณทั้งสองคนที่ช่วยตรวจทานต้นฉบับหนังสือ ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่กรุณาอ่านและให้คำแนะนำสำหรับการปรับปรุงหนังสือเล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณศาสตราจารย์ไมเคิล แอล โฮนิก (Professor Michael L. Honig) แห่งมหาวิทยาลัยนอร์ทเวสเทิร์น (Northwestern University) สหรัฐอเมริกา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการระดับปริญญาตรี และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ปริญญาโทและเอกของผู้แต่ง ศาสตราจารย์โฮนิกเป็นแบบอย่างนักวิจัยของผู้แต่งและเป็นผู้สอนและฝึกทักษะการเขียนที่ดีให้ผู้แต่ง

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาสละเวลาอ่าน ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นอันทรงคุณค่า และเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงแก้ไขหนังสือให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ศาสตราจารย์ ดร.นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ ผู้จัดการสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำการเตรียมต้นฉบับ ทำการผลิตและเผยแพร่หนังสือเล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ในโอกาสนี้ ผู้แต่งขอกราบขอบคุณพ่อและแม่ที่รักและเลี้ยงดูสนับสนุนในทุกช่วงชีวิต ขอขอบคุณน้องทั้งสองคนที่เป็นกำลังใจให้ตลอด ขอขอบพระคุณ คุณครูและอาจารย์ทุกท่านของผู้แต่งที่ได้เมตตาถ่ายทอดความรู้ และเป็นตัวอย่างครูที่ดีเยี่ยมซึ่งผู้แต่งได้น้อมนำมาปฏิบัติ ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร

---

# สารบัญ

---

<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 พัฒนาการของการสื่อสารไร้สาย . . . . .	2
1.2 ปัญหาและความท้าทายของการสื่อสารไร้สาย . . . . .	7
1.3 การเพิ่มสมรรถนะการสื่อสารไร้สายด้วยการป้อนกลับ . . . . .	18
สรุป . . . . .	24
คำถาม . . . . .	24
<b>2 ช่องสัญญาณไร้สาย</b>	<b>26</b>
2.1 แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับช่องสัญญาณไร้สาย . . . . .	28
2.2 แบบจำลองช่องสัญญาณสมมูลแถบฐาน . . . . .	36
2.3 เวลาพร้อมกันและแบนด์วิดท์พร้อมกัน . . . . .	44
2.4 แบบจำลองช่องสัญญาณทางสถิติ . . . . .	56
สรุป . . . . .	70
คำถาม . . . . .	71
<b>3 การสื่อสารไร้สายเบื้องต้น</b>	<b>74</b>
3.1 การตรวจหาสาร . . . . .	75
3.2 ความหลากหลายในช่องสัญญาณไร้สาย . . . . .	89
3.3 ความจุช่องสัญญาณ . . . . .	111
สรุป . . . . .	115
คำถาม . . . . .	116
<b>4 การป้อนกลับในช่องสัญญาณไซโซแบนด์แคบ</b>	<b>118</b>
4.1 การจัดสรรกำลังส่ง . . . . .	122
4.2 การเลือกการกล้ำสัญญาณ . . . . .	134
4.3 กรณีอัตราป้อนกลับจำกัด . . . . .	139

สรุป . . . . .	148
คำถาม . . . . .	149
<b>5 การป้องกันในช่องสัญญาณไอโซแบนด์กว้าง</b>	<b>153</b>
5.1 การส่งโอเอฟดีเอ็ม . . . . .	154
5.2 กรณีข้อมูลสถานะช่องสัญญาณภาครับสมบูรณ์ . . . . .	169
5.3 กรณีข้อมูลสถานะช่องสัญญาณภาครับไม่สมบูรณ์ . . . . .	176
5.4 การลดการป้องกันสำหรับการส่งโอเอฟดีเอ็ม . . . . .	185
สรุป . . . . .	192
คำถาม . . . . .	193
<b>6 การป้องกันในช่องสัญญาณหลายสายอากาศส่ง</b>	<b>195</b>
6.1 บีเอ็มฟอร์มมิง . . . . .	198
6.2 พรีโค้ดดิ้ง . . . . .	251
6.3 การเลือกสายอากาศส่ง . . . . .	271
สรุป . . . . .	277
คำถาม . . . . .	278
<b>7 การป้องกันในช่องสัญญาณหลายผู้ใช้</b>	<b>280</b>
7.1 ช่องสัญญาณอ็อปติก . . . . .	282
7.2 ช่องสัญญาณดาวนลิงค์ . . . . .	290
7.3 การเลือกผู้ใช้เพื่อส่งสารในช่องสัญญาณดาวนลิงค์ . . . . .	295
7.4 ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณไม่สมบูรณ์ . . . . .	300
7.5 การลดการป้องกัน . . . . .	309
7.6 สถานะที่มีจำนวนสายอากาศส่งมากกว่าหนึ่ง . . . . .	315
สรุป . . . . .	322
คำถาม . . . . .	323
<b>8 การป้องกันในมาตรฐานแอลทีอี</b>	<b>325</b>
8.1 โหมดการส่ง . . . . .	327
8.2 โหมดการรายงาน . . . . .	332
8.3 มาตรฐานแอลทีอีสำหรับ 5G . . . . .	337
สรุป . . . . .	339
คำถาม . . . . .	339



ก เวกเตอร์สุมเกาส์	341
เอกสารอ้างอิง	344
บรรณานุกรม	355
Index	359