



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเลือกสายอากาศสำหรับช่องสัญญาณไร้สายหลายสายอากาศด้วยการร่วมคู่ควบ

Antenna Selection for Multiantenna Wireless Channels with Mutual Coupling

นามผู้วิจัย นายดิศตถานนท์ คุรุฑเมือง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรณศักดิ์ สันติเพชร, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเลือกสายอากาศสำหรับช่องสัญญาณไร้สายหลายสายอากาศด้วยการร่วมคู่ควบ

Antenna Selection for Multiantenna Wireless Channels with Mutual Coupling

โดย

นายดิตถานนท์ กระจุกเมือง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดิถานนท์ ครูทเมือง 2555: การเลือกสายอากาศสำหรับช่องสัญญาณไร้สายหลาย
สายอากาศด้วยการร่วมคู่ควบ ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร, Ph.D. 60 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาและนำเสนอวิธีการเลือกใช้สายอากาศในช่องสัญญาณไร้สายโดยมี
จำนวนสายอากาศส่งและ/หรือรับมากกว่าอย่างละหนึ่งสาย การเลือกใช้สายอากาศให้เหมาะกับ
สถานะช่องสัญญาณทำให้สมรรถนะของการสื่อสารเพิ่มขึ้น เช่น เพิ่มความจุช่องสัญญาณหรือลด
ความน่าจะเป็นของการเกิดเอ้าท์เดจ วิธีการที่นำเสนอพัฒนามาจากวิธีของโกลโพลคอฟ โดยแตกต่าง
จากวิธีที่นำเสนอในอดีตคือใช้อิมพีแดนซ์ของการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศด้วย ในงานวิจัยนี้
จำลองช่องสัญญาณจางหายที่คำนึงถึงทั้งสหสัมพันธ์และการคู่ควบร่วมของสายอากาศที่ติดตั้งใกล้กัน
และกำหนดให้ชุดสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศไดโพลที่ติดตั้งขนานกันและในพื้นที่ทาง
กายภาพที่จำกัด โดยวิธีการที่นำเสนอใช้การคำนวณที่ต่ำกว่าวิธีของโกลโพลคอฟด้วยการไม่เลือกใช้
สายอากาศที่อยู่ใกล้หรือได้รับอิทธิพลสูงจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศกับสายอากาศที่ถูก
เลือกใช้ไปก่อนหน้า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกสายอากาศที่นำเสนอให้สมรรถนะ
ใกล้เคียงกับสมรรถนะที่ดีที่สุดซึ่งได้จากการตรวจสอบทุกชุดสายอากาศที่เป็นไปได้แต่สามารถ
ลดความซับซ้อนทางการคำนวณในการเลือกสายอากาศลงประมาณ 100 เท่าในบางกรณี

Dithanon Khrutmuang 2012: Antenna Selection for Multiantenna Wireless Channels with Mutual Coupling. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wiroonsak Santipach, Ph.D. 60 pages.

This thesis studies and presents antenna selection methods for wireless channels with multiple transmit and/or receive antennas. Selecting antennas that best suits status of current channel state increases the performance of communications, for example, increasing channel capacity or decreasing outage probability. The proposed methods are based on and improved upon the selection method by Gorokhov. The difference from previous work is the use of mutual impedance in addition to channel information to select set of antennas. In this research, model for fading channel includes spatial correlation and mutual coupling among antennas installed close to one another. Antenna array is assumed to consist of side-by-side dipole antennas and to have very limited space. The proposed selection has less computational complexity than Gorokhov's by reducing the number of potential selection of antennas with thresholding on mutual impedance. Simulation results have shown that the proposed methods perform close to the optimum, which is obtained by exhaustive search. In some cases, selection complexity can be reduced by 100 folds from that of exhaustive search.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม และอาจารย์ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้มอบความรู้แก่ผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สนม ทรุฑเมือง ผู้เป็นบิดา และ นางดาราวดี ลักษณะ โภเศษ ผู้เป็น
มารดาและ นพ.ดิศตาวุธ ทรุฑเมือง ผู้เป็นพี่ชาย ครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้อบรมเลี้ยงดูข้าพเจ้าตลอดมา
ขอบคุณความรักที่มั่นคงจากพระเจ้า ขอบใจเพื่อนและน้องในคณะวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ โดยเฉพาะนายกฤษฎา มามาตร นิสิตปริญญาเอก และสุคทัยคือนางสาวธัญลดา
ประกาศโนบล ผู้เป็นกำลังใจและแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา

หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะและขออภัยมา
ณ ที่นี้

ดิศตานนท์ ทรุฑเมือง
เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
วิธีการ	18
ผลและวิจารณ์	32
ผล	32
วิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	52
สรุป	52
ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	54
ภาคผนวก	55
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	60

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบจำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณด้วยวิธีต่างๆในการเลือกสายอากาศภาคส่ง	30
2	เปรียบเทียบจำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณด้วยวิธีต่างๆในการเลือกสายอากาศภาครับ	30
3	เปรียบเทียบจำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณด้วยวิธีต่างๆในการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับ	30

สารบัญภาพ

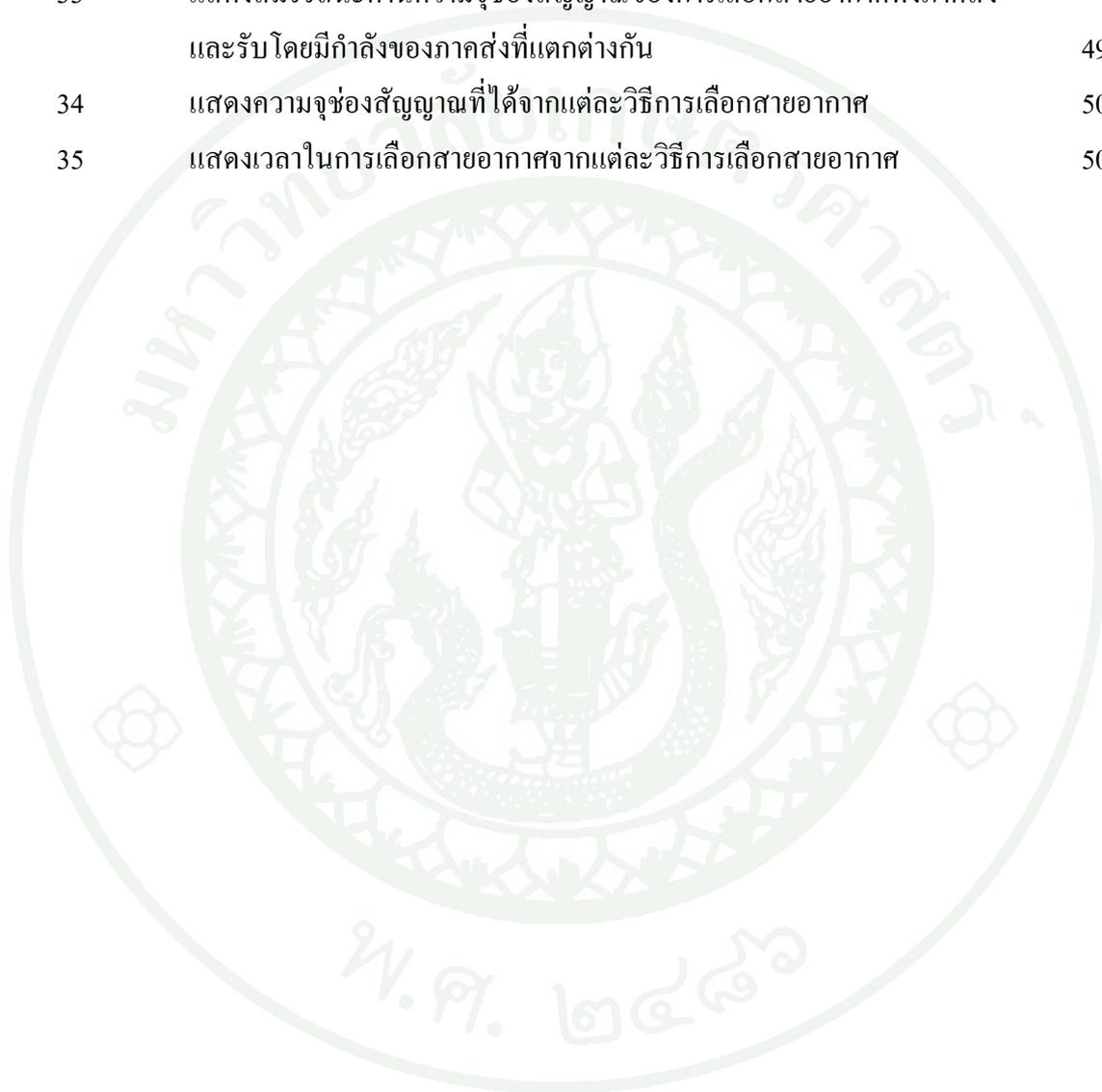
ภาพที่		หน้า
1	การสื่อสารในแบบไซโซ่และไมโม	3
2	แสดงการสื่อสารช่องสัญญาณไร้สาย	6
3	ลักษณะการเกิดการรวมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณ	7
4	แสดงชุดสายอากาศไดโพลที่ถูกกำหนดค่าพื้นที่ของชุดสายอากาศ	8
5	แสดงตำแหน่งการจัดเรียงวางของสายอากาศ	9
6	อธิบายภาพรวมช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบไมโม	10
7	แสดงวิธีการเลือกสายอากาศโดยวิธีของ Gorokhov	20
8	ขั้นตอนของการเลือกสายอากาศภาคส่งโดยใช้วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov	23
9	แสดงการคัดสายอากาศออกจากการพิจารณาด้วยวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov	25
10	ขั้นตอนการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับแยกกัน	27
11	ขั้นตอนการเลือกสายอากาศภาคส่งและภาครับไปพร้อมกัน	29
12	แสดงความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกันในช่วงที่มี SNR สูงแต่ขอบเขตของชุดสายอากาศมีขนาดแคบ	33
13	แสดงความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกันในช่วงที่มี SNR ต่ำและขอบเขตของชุดสายอากาศมีขนาดแคบ	33
14	แสดงความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกันไปในช่วงที่มีกำลังส่งสูงและขอบเขตของชุดสายอากาศกว้าง	34
15	แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณ	35
16	แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านเวลาการเลือกสายอากาศส่ง	36
17	แสดงถึงความกว้างของขอบเขตของชุดสายอากาศมีผลกับความจุช่องสัญญาณ	37

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับ การเลือกสายอากาศอื่น	37
19	แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศส่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การเลือกสายอากาศแบบอื่น	38
20	แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณจากการเลือกสายอากาศหลายวิธี	39
21	แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศส่งในหลายๆแบบการทดลอง	40
22	แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณแบบเอาต์เดจ	41
23	แสดงสมรรถนะด้านความน่าจะเป็นที่จะเกิดเอาต์เดจ	42
24	แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณ	43
25	แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านเวลา การเลือกสายอากาศรับ	43
26	แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับ การเลือกสายอากาศอื่น	44
27	แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศรับเมื่อเปรียบเทียบกับ การเลือกสายอากาศอื่น	44
28	แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศรับเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov กับวิธีการเลือกสายอากาศแบบ Gorokhov	45
29	ผลสรุปของสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณเมื่อเปลี่ยนจำนวนสายอากาศที่เลือกใช้ในภาคส่งและรับ	46
30	เปรียบเทียบความจุช่องสัญญาณระหว่างการเลือกสายอากาศภาคส่งก่อนกับเลือกภาครับก่อน	47
31	แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณของการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) เมื่อเลือกค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน	48
32	แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศของวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) เมื่อเลือกค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณของการเลือกสายอากาศทั้งภาคส่งและรับ โดยมีกำลังของภาคส่งที่แตกต่างกัน	49
34	แสดงความจุช่องสัญญาณที่ได้จากแต่ละวิธีการเลือกสายอากาศ	50
35	แสดงเวลาในการเลือกสายอากาศจากแต่ละวิธีการเลือกสายอากาศ	50



การเลือกสายอากาศสำหรับช่องสัญญาณไร้สายหลายสายอากาศ ด้วยการร่วมคู่ควบ

Antenna Selection for Multiantenna Wireless Channels with Mutual Coupling

คำนำ

วิธีการสื่อสารด้วยหลายสายอากาศส่งและ/หรือรับ ได้ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารสมัยใหม่ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และ 4 วิทยุ IEEE 802.11n เป็นต้น ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสื่อสารในช่องสัญญาณ ไร้สายด้วยจำนวนสายอากาศที่มากขึ้นทั้งภาคส่งและรับ ทำให้ประสิทธิภาพทางสเปกตรัมเพิ่มสูงขึ้น(ในอัตราเชิงเส้นสำหรับช่องสัญญาณอุดมคติ) การเลือกใช้สายอากาศในจำนวนสายอากาศที่ติดตั้ง ถูกแสดงในงานวิจัยที่ผ่านมาว่าทำให้สมรรถนะของระบบสื่อสารเพิ่มสูงขึ้น โดยได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบสื่อสารที่มีการเลือกใช้บางสายอากาศและการใช้สายอากาศทั้งหมดพบว่าความแตกต่างของสมรรถนะอาจสูงถึง 2 เท่าด้วยกำลังรวมเท่ากันในสองกรณี แต่การเลือกใช้สายอากาศยังต้องคำนึงถึงความซับซ้อนของวิธีการเลือกหรือเวลาในการเลือกสายอากาศ โดยได้มีงานวิจัยที่ผ่านมานำเสนอวิธีการเลือกใช้สายอากาศที่มีความซับซ้อนน้อยและเพิ่มความจุช่องสัญญาณ แต่การเลือกสายอากาศในงานวิจัยที่ผ่านมาใช้แบบจำลองช่องสัญญาณที่ไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากความสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศที่เลือกใช้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ประโยชน์จากวิธีการเลือกใช้ช่องสัญญาณให้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง โดย 2 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราขยายช่องสัญญาณระหว่างสายอากาศที่ติดตั้งใกล้กันคือ สหสัมพันธ์(correlation) ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบ(mutual coupling)ระหว่างสายอากาศ ทั้ง 2 ปัจจัยจะมีอิทธิพลมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เลือกใช้ที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งอุปกรณ์สื่อสารที่มีขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ ไม่อาจหลีกเลี่ยงปัจจัยเหล่านี้ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงว่าการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศทำให้สมรรถนะการสื่อสารของช่องสัญญาณ เช่น ความจุของช่องสัญญาณลดลง

วัตถุประสงค์

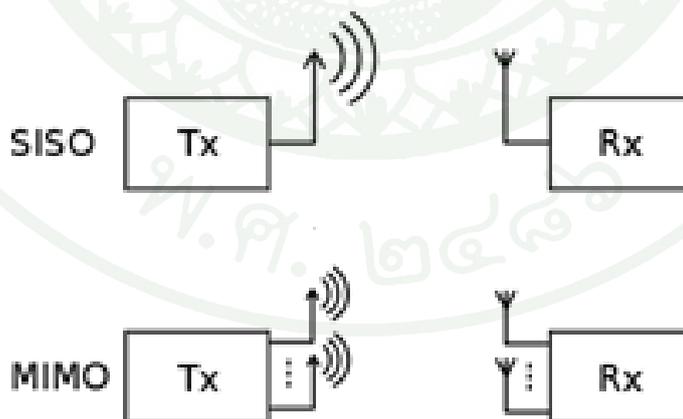
งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการเลือกใส่สายอากาศในภาคส่งและ/หรือภาครับในระบบการสื่อสารหลายสายอากาศโดยพิจารณาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศ เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพช่องสัญญาณจริง โดยวัตถุประสงค์ของการเลือกสายอากาศคือเพิ่มความจุช่องสัญญาณให้สูงที่สุดและลดความซับซ้อนในการคำนวณหาชุดสายอากาศที่เลือกใช้ในวิธีการที่นำเสนอได้ใช้การร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศร่วมในการพิจารณาเลือกชุดสายอากาศ โดยสายอากาศที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันจนผลของการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมีอิทธิพลสูงกว่าค่าขีดแบ่งจะไม่ถูกพิจารณาเลือกใช้ วิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี โดยการเลือกต่างๆ โดยเปรียบเทียบทั้งสมรรถนะของระบบและความซับซ้อนในการเลือกสายอากาศของแต่ละวิธี

การตรวจเอกสาร

การสื่อสารหลายสายอากาศหรือไมโม

บทนำ

ไมโมหรือการสื่อสารหลายสายอากาศ (MIMO or Multiple-input Multiple-output) ใช้การติดตั้งสายอากาศจำนวนมากกว่าหนึ่งที่ภาคส่งและภาครับ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร เนื่องด้วยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศทั้งภาคส่งและรับเป็นการเพิ่มปริมาณข้อมูลที่ส่งผ่านช่องสัญญาณและเพิ่มช่องทางของการสื่อสาร โดยไม่ต้องเพิ่มแบนด์วิดท์เมื่อเปรียบเทียบกับ การสื่อสารด้วยสายอากาศเดี่ยวหรือไซโซ(SISO or Single-input Single output)ตามภาพที่ 1 ดังนั้น ไมโมมี ประสิทธิภาพทางสเปกตรัมมากขึ้นโดยอัตราบิตส่งต่อแบนด์วิดท์สูง นอกจากนี้ยังเพิ่มความน่าเชื่อถือของการส่ง ซึ่งเกิดจากความหลากหลายทางพื้นที่(spatial diversity) จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้ไมโมเป็นส่วนสำคัญในมาตรฐานการสื่อสารในปัจจุบันและในอนาคตเช่น IEEE 802.11n (Wifi), 4G, 3GPP Long Term Evolution, WiMAX และ HSPA+ เนื่องจากทรัพยากร เช่น กำลังส่ง ฮาร์ดแวร์มีอย่างจำกัด การปรับการส่งให้มีความเหมาะสมต่อช่องสัญญาณจึงมีความจำเป็นต้องปรับการส่งอาจทำได้ด้วยการปรับวิธีการเข้ารหัสการกล้ำสัญญาณ การจัดสรรกำลัง หรือการเลือกสายอากาศส่งและ/หรือรับที่เหมาะสม ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาการเลือกสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางสเปกตรัมของการสื่อสารไร้สาย



ภาพที่ 1 การสื่อสารในแบบไซโซและไมโม

ที่มา: Benbaum (2011)

สรุปข้อดีและข้อเสียของไมโม

ข้อดี ได้แก่

1. ให้ประสิทธิภาพทางสเปกตรัมสูงกว่าการสื่อสารด้วยสายอากาศเดี่ยว
2. เมื่อใช้การเข้ารหัสช่องสัญญาณอัตราบิดเบือนหรือความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่ำกว่าการสื่อสารด้วยสายอากาศเดี่ยว
3. สามารถแก้ไขในเรื่องของจุดอับของสัญญาณได้เมื่อใช้สายอากาศหลายๆสาย หากมีสายอากาศใดสายหนึ่งอยู่ในจุดอับสัญญาณ ก็ยังมีสายอากาศอื่นส่งสัญญาณหรือรับสัญญาณได้

ข้อเสีย ได้แก่

1. วิธีการเข้ารหัสช่องสัญญาณของการสื่อสาร ไมโมและการถอดรหัสช่องสัญญาณมีความซับซ้อน ทำให้ฮาร์ดแวร์ที่ภาคส่งและภาครับมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น
2. การสื่อสารหลายสายอากาศส่งอาจต้องมีการมัลติเพล็กซ์สายข้อมูล(data stream) ก่อนส่งผ่านสายอากาศส่ง
3. การส่งสัญญาณผ่านสายอากาศต้องเปลี่ยนสัญญาณสารซึ่งเป็นสัญญาณแถบฐาน (baseband signal) ที่ความถี่พาห้ โดยใช้ฮาร์ดแวร์โซ่อาร์เอฟ (RF Chain) ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยหลายสายอากาศพร้อมกันซึ่งต้องใช้จำนวน โซ่อาร์เอฟมากขึ้น ซึ่งโซ่อาร์เอฟเป็นอุปกรณ์ที่ซับซ้อนและใช้กำลังส่งเพิ่มขึ้น

วิธีการสื่อสารหลายสายอากาศ

ในวรรณกรรมวิจัยการใช้สายอากาศในระบบสื่อสารไมโมที่แตกต่างกัน โดย 2 วิธีหลัก ได้แก่

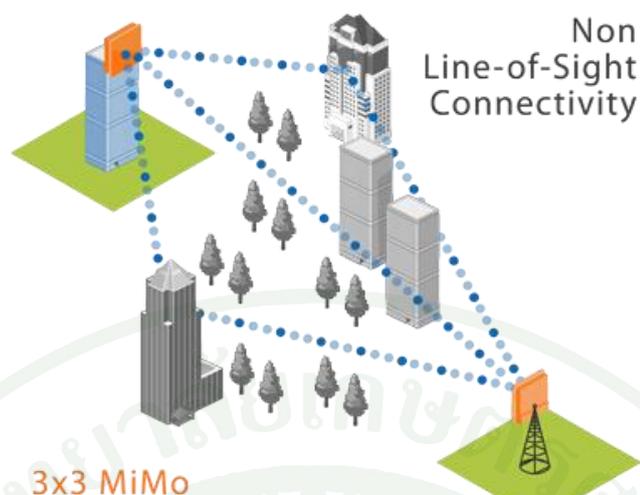
1. การเข้ารหัสล่วงหน้า (precoding) หรือ มัลติเพล็กซ์เชิงพื้นที่ (spatial multiplexing) คือ การรวมส่งหลายลำคลื่น โดยแต่ละลำคลื่นจะถูกขยายด้วยสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับมุมและอัตราขยาย ช่องสัญญาณไปยัง ณ สายอากาศรับ ประโยชน์ของการรวมส่งหลายลำคลื่นหรือการเข้ารหัสของลำคลื่นจะเพิ่มความจุช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ภาคส่ง ต้องรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (channel state information(CSI))

2. การเข้ารหัสเพื่อสร้างความหลากหลาย(diversity coding) เป็นวิธีการส่งไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ โดยเข้ารหัสข้อมูลจากกระแสเดียว ซึ่งแตกต่างจากวิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงพื้นที่ ตัวอย่างการเข้ารหัสเพื่อสร้างความหลากหลายได้แก่ การเข้ารหัสทางพื้นที่และเวลา (space-time coding) เป็นวิธีการเข้ารหัสที่ใช้ทั้งมิติเวลาและมิติพื้นที่หรือสายอากาศส่งเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของการส่งผ่านข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายการเข้ารหัสอย่างง่าย เช่น การใช้สายอากาศส่งหลายสายเพื่อเพิ่มความซ้ำซากของสารไปยังเครื่องรับเพื่อว่าอย่างน้อยบางลำเนาข้อมูลจะถึงภาครับและสามารถถอดรหัสข้อมูลได้จึงช่วยให้อัตราบิดผิดพลาดลดต่ำลง

การจำลองช่องสัญญาณไร้สายไม่โม

ช่องสัญญาณไร้สาย

เนื่องจากกำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นมีการเปลี่ยนแปลงรอบค่าเฉลี่ยกำลังที่เกิดจากการจางหายของคลื่นสัญญาณ หากผลของสภาพแวดล้อม เช่น ต้นไม้ ก้อนเมฆ ตึก หรือ สิ่งกีดขวางการเดินทางของคลื่นที่ทำให้เกิดการสะท้อน เลี้ยวเบน และกระเจิง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่รับได้ตามภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณจะเป็นไปอย่างช้า ๆ และขึ้นอยู่กับระยะทาง โดยกำลังสัญญาณส่งมีการลดทอนในอัตราที่ผกผันกับระยะทาง เรียกการจางหายแบบดังกล่าวที่กล่าวมาข้างต้นว่าการจางหายสเกลใหญ่ (large scale fading) ส่วนการจางหายสเกลเล็ก (small scale fading) เกิดจากการเดินทางของสัญญาณหลายเส้นทาง (multipath) เมื่อสัญญาณจากหลายเส้นทางรวมกันที่ภาครับอาจมีการรวมกันแบบเสริมกันหรือหักล้างกันทำให้เกิดการเลือนของสัญญาณ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้น ๆ หรือเมื่อเครื่องรับเคลื่อนที่ในระยะสั้นๆ โดยชนิดของการจางหายแบ่งออกได้เป็นหลายลักษณะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะในช่องสัญญาณ เช่น หากพิจารณาถึงขนาดของเวลาการเชื่อมโยง(coherence time) แบ่งได้เป็น การจางหายอย่างช้า (Slow fading) และการจางหายอย่างรวดเร็ว(fast fading) หากพิจารณาถึงขนาดของแบนด์วิดท์(coherence bandwidth) แบ่งได้เป็น การจางหายแบบเรียบ(flat fading) และการจางหายแบบเลือกความถี่(frequency-selective fading) เป็นต้น



ภาพที่ 2 แสดงการสื่อสารช่องสัญญาณไร้สาย

ที่มา: Proxim Wireless Corporation (2010)

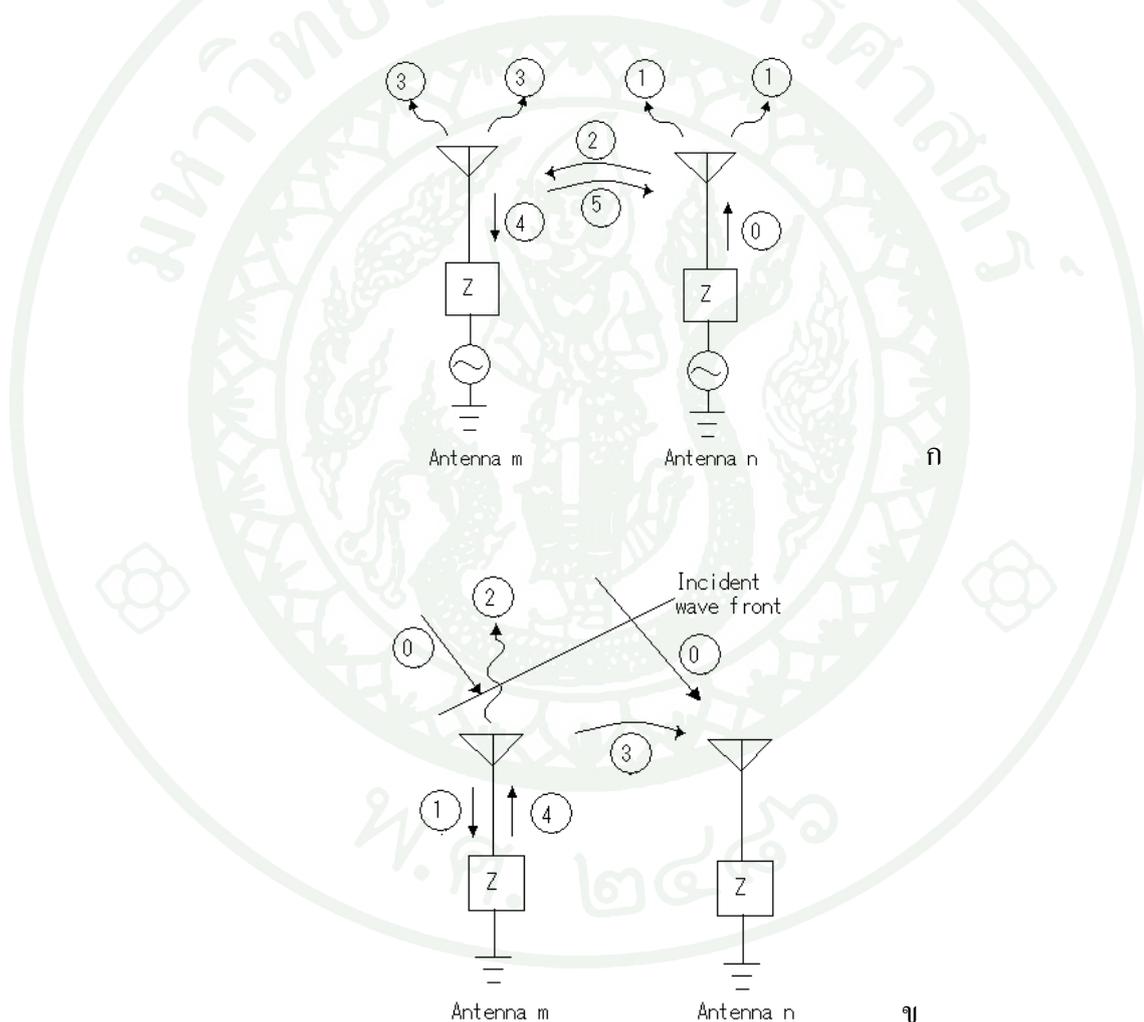
สหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศที่อยู่ใกล้กัน

สหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายช่องสัญญาณระหว่างคู่สายอากาศที่อยู่ใกล้กัน โดยความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับทิศทางการกระจายของสัญญาณและรับสัญญาณโดยสายอากาศที่ใกล้กัน เมื่อสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศมีค่าสูงทำให้จำนวนช่องทางอิสระ (independent channels) ของช่องสัญญาณไร้สายลดลงเนื่องจากสายอากาศที่มีขนาดเล็กและอยู่ใกล้กันจะได้รับสัญญาณที่คล้ายกันสหสัมพันธ์มีค่าสูงยิ่งสายอากาศต้องอยู่ใกล้กัน เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Kermoal *et al.*, 2002) จากผลวิจัยของ (Dai, 2006) สหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศอาจจะลดหรือเพิ่มความจุของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับสถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่งในกรณีที่ภาคส่งรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณก็สามารถปรับการส่งเพื่อให้เหมาะกับช่องสัญญาณและเพิ่มความจุช่องสัญญาณที่มีค่าสหสัมพันธ์ได้ โดยภาคส่งสามารถส่งข้อมูลได้ถูกต้องตามสภาวะการณ์ของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงและสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศ (Santipach and Honig, 2009)

การร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศ

การร่วมคู่ควบ (mutual coupling) ระหว่างสายอากาศเป็นการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศที่อยู่ใกล้กัน (Balanis, 1997) ซึ่งจะเกิดขึ้นควบคู่ไปกับสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศเมื่อสายอากาศอยู่ใกล้กันพลังงานจากสายอากาศหนึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดพลังงานในอีกสายอากาศ การเกิดการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศส่ง สามารถอธิบายได้ตามภาพที่ 3(ก) ดังนี้ เมื่อนำสายอากาศ

ส่ง m และ n มาติดตั้งใกล้กัน ถ้าให้แหล่งกำเนิดพลังงานที่สายอากาศ n พลังงานจะถูกส่งผ่านไปยังตำแหน่ง (0) ก่อนจะแพร่กระจายไปตามอากาศที่ตำแหน่ง (1) และตำแหน่ง (2) โดยมีพลังงานส่วนหนึ่งที่ถูกส่งไปยังสายอากาศส่ง m จะมีพลังงานส่วนหนึ่งถูกส่งออกไปทันทีกระจายออกไปยังอากาศที่ตำแหน่งที่ (3) ส่วนพลังงานที่เหลือเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานในสายอากาศส่ง m ในตำแหน่ง (4) ในขณะที่พลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศ m บางส่วนจะถูกส่งกลับไปยังสายอากาศส่ง n ในตำแหน่ง (5) ขั้นตอนการถ่ายเทพลังงานจะคล้ายกันไม่ว่าจะเปลี่ยนสายอากาศส่ง m เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน หรือเอาแหล่งกำเนิดออกจากสายอากาศส่ง n หรือให้ทั้งสายอากาศส่ง m และ n มีแหล่งกำเนิดพลังงานด้วยกันทั้งคู่

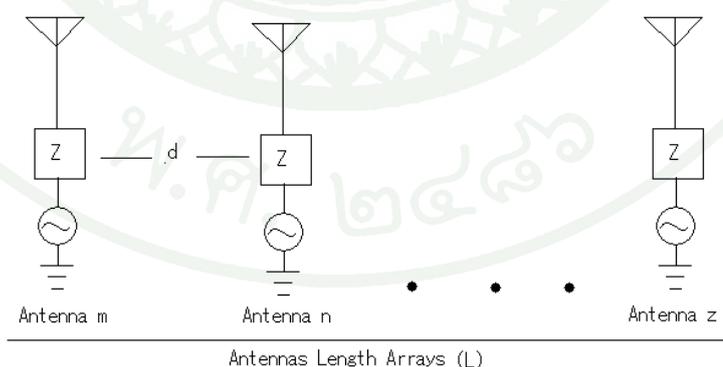


ภาพที่ 3 ลักษณะการเกิดการร่วมคู่ควมระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณ

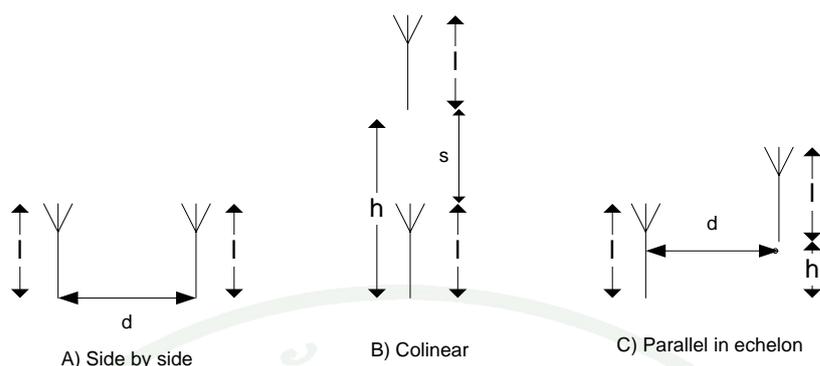
ที่มา: Balanis (2005)

ส่วนการเกิดการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศรับ สามารถอธิบายได้ดังนี้ จากภาพที่ 3(ข) เมื่อนำสายอากาศรับ m และ n มาติดตั้งใกล้กัน เมื่อสายอากาศรับ m ได้รับพลังงานจากสัญญาณสื่อสาร (ตำแหน่ง (0)) จะมีพลังงานส่วนหนึ่งถูกดูดซับไปยังสายอากาศรับ m ในตำแหน่ง (1) ในขณะที่มีพลังงานบางส่วนถูกสะท้อนกลับออกไป (ตำแหน่ง (2)) พลังงานบางส่วนของสายอากาศรับ m ที่สะท้อนออกไปยังอากาศที่ตำแหน่ง (3) ที่ตำแหน่งสายอากาศรับ n ซึ่งจะได้รับพลังงานจากแหล่งส่งพลังงานในตำแหน่ง (0) ด้วย ในขณะที่สายอากาศรับ m เมื่อได้รับพลังงานแล้วจะทำหน้าที่คล้ายแหล่งกำเนิดส่งพลังงานออกไปยังอากาศในตำแหน่ง (4)

Allen and Diamond (1996); McKay and Murch (2010) ได้ศึกษาสภาวะช่องสัญญาณที่พิจารณาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณ (spatial correlation and mutual coupling) โดยทดลองในสายอากาศแบบไดโพล (dipole) ความยาวของชุดสายอากาศ (antenna length arrays) ถูกกำหนดค่าเอาไว้ที่ค่าหนึ่ง โดยจัดเรียงวางขนานกันในแนวราบ (ground plane) ดังภาพที่ 4 และให้พลังงานการส่งสัญญาณเท่ากัน เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศทำให้สายอากาศอยู่ใกล้กันมากขึ้น ส่งผลให้สหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมีค่าสูงขึ้นและมีผลกับการรับหรือส่งข้อมูลมากขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศอยู่ใกล้กันมากพบว่าความจุสัญญาณมีค่าลดลงแม้จำนวนสายอากาศจะเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งตำแหน่งการจัดเรียงวางของสายอากาศและมุมการวางระหว่างสายอากาศยังมีผลกับการเกิดการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณตามภาพที่ 5



ภาพที่ 4 แสดงชุดสายอากาศไดโพลที่ถูกกำหนดค่าพื้นที่ของชุดสายอากาศ



ภาพที่ 5 แสดงตำแหน่งการจัดเรียงวางของสายอากาศ

โดยสรุปปริมาณการเหนี่ยวนำหรือการรวมคู่ควบที่เกิดขึ้นมาจากปัจจัยดังนี้

1. ลักษณะการแผ่คลื่นของสายอากาศหรือชนิดของสายอากาศ รวมถึงเส้นผ่าศูนย์กลางรัศมีการแผ่คลื่นของสายอากาศมีผลกับการรวมคู่ควบระหว่างสายอากาศ
2. ระยะห่างระหว่างสายอากาศ โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ใกล้กันเมื่อเปรียบเทียบในหน่วยความยาวคลื่นจะมีผลทำให้การรวมคู่ควบระหว่างสายอากาศมีผลกับการส่งสัญญาณมาก
3. ตำแหน่งการจัดเรียงวางของสายอากาศและมุมการวางระหว่างสายอากาศมีผลกับการแผ่กระจายของการรวมคู่ควบระหว่างสายอากาศ

รายละเอียดของการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การรวมคู่ควบสามารถค้นหาเพิ่มเติมได้ (Balanis 1997)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสัญญาณไมโม

กำหนดให้ N_t เท่ากับจำนวนสายอากาศส่ง N_r เท่ากับจำนวนสายอากาศรับ การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไมโมเริ่มจากการกำหนดการจางหายระหว่างสายอากาศภาคส่งและรับด้วยความสัมพันธ์ในโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่องโดยการแปลงสัญญาณต่อเนื่อง (continuous time signal) ให้เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (discrete time signal) หรือการแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกให้กลายเป็นสัญญาณดิจิทัลได้โดยการชักตัวอย่าง (sampling) และการแบ่งนับ (quantization) ของสัญญาณต่อเนื่อง ดังนั้นสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณส่งและรับได้ดังนี้

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

โดย \mathbf{v} แทน เวกเตอร์ช่องสัญญาณรับมีขนาด $N_r \times 1$ \mathbf{x} แทนเวกเตอร์สัญญาณส่งมีขนาด $N_t \times 1$

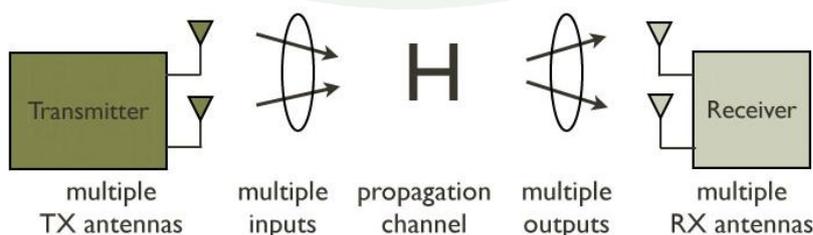
\mathbf{n} แทนเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวน โดยกำหนดให้สัญญาณรบกวนเป็นประเภทสัญญาณรบกวนสีขาว ดังนั้นสมาชิกในเวกเตอร์เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายทางความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน ดังตัวอย่าง และ \mathbf{H} เป็นช่องสัญญาณมีขนาดเท่ากับ $N_r \times N_t$ โดยสมาชิกในเมทริกซ์แทนอัตราขยายช่องสัญญาณระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ในแบบจำลองช่องสัญญาณพิจารณาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศ ดังนั้นเมทริกซ์ช่องสัญญาณจากแบบจำลองนี้มีองค์ประกอบดังนี้

$$\mathbf{H} = \frac{C_r R^2 H_w S^2 C_t}{P_t P_r} \quad (2)$$

โดยที่ \mathbf{H}_w แทนเมทริกซ์ช่องสัญญาณอุดมคติมีขนาด $N_r \times N_t$ โดยอัตราขยายช่องสัญญาณระหว่างสายอากาศส่ง j และสายอากาศรับ i มีการกระจายแบบเกาส์เซียนหรือมีการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh fading) และมีการจางหายแบบเรียบ (flat fading)

$$\mathbf{H}_w = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & \cdots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ดังนั้นสมาชิก h_{ij} มีการกระจายทางความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนสมมาตรโดยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าแปรปรวน(variance) เท่ากับหนึ่ง



ภาพที่ 6 อธิบายภาพรวมช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบ MIMO

โดย R และ S คือเมทริกซ์ผลกระทบกับช่องสัญญาณที่เกิดจากสภาพความสัมพันธ์ที่ภาครับ และภาคส่งตามลำดับ โดยมีสมมติฐานให้แต่ละสายอากาศมีการแพร่กระจายเชิงมุมสม่ำเสมอ (uniformly distributed angular spread) ดังนั้นจากรูปแบบการ Jakes (Wallace *et al.* 2004) องค์ประกอบ (i, j) ของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ภาคส่งคือ

$$S_{i,j} = J_0\left(\frac{2\pi d_{i,j}}{\lambda}\right), 1 \leq i, j \leq N_t \quad (4)$$

โดย $J_0(\cdot)$ คือ ฟังก์ชัน Bessel ลำดับที่ 0 และ เท่ากับระยะห่างระหว่างสายอากาศ i และ j λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณ ผู้วิจัยได้ให้สายอากาศอยู่ห่างเท่าๆกัน โดยที่ขอบเขตของชุดสายอากาศมีค่าเท่ากับ D ดังนั้น

$$d_{i,j} = \frac{D_t|i-j|}{N_t-1} \quad (5)$$

โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศอธิบายตามภาพที่ 4 แสดงการจัดวางสายอากาศใน ขณะที่เมทริกซ์สหสัมพันธ์ภาครับ R มีสมาชิกในตำแหน่ง (i,j) เท่ากับ

$$R_{i,j} = J_0\left(\frac{2\pi d_{i,j}}{\lambda}\right), 1 \leq i, j \leq N_r \quad (6)$$

$$d_{i,j} = \frac{D_r|i-j|}{N_r-1} \quad (7)$$

C_r และ C_t เป็นเมทริกซ์ผลกระทบการร่วมคู่ควมระหว่างสายอากาศในชุดสายอากาศรับ และส่งตามลำดับ กำหนดให้ R เป็นเมทริกซ์มีขนาดเท่ากับ $N_r \times N_r$ ที่ภาครับและ S มีขนาดเมทริกซ์เท่ากับ $N_t \times N_t$ ที่ภาคส่ง C_r มีขนาด $N_r \times N_r$ และ C_t มีขนาด $N_t \times N_t$

$$C^t = Z_T(Z_T + Z_S)^{-1} \quad (8)$$

$$C^r = Z_L(Z_R + Z_L)^{-1} \quad (9)$$

โดย Z_T เป็นเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ตัวเองและอิมพีแดนซ์ร่วม (impedance matrix) ในภาคส่ง มีขนาด

$N_s \times N_s$ โดยในตำแหน่งเส้นทแยงมุม (diagonal elements) บรรจุค่าอิมพีแดนซ์ตัวเอง (self-impedance) และตำแหน่งสมาชิกเมทริกซ์อื่นที่ไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเส้นทแยงมุม (diagonal elements) เป็นอิมพีแดนซ์ของระหว่างสายอากาศหรือการร่วมคู่ควบ (mutual impedance) ซึ่ง Z_T มีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสายอากาศ หากต้องการพิจารณาคุณสมบัติการร่วมคู่ควบอย่างง่าย การเลือกใช้สายอากาศไดโพลที่มีขนาดครึ่งความยาว (λ) ในหน่วยความยาวคลื่นและจัดเรียงวางข้างกัน (side-by-side) สามารถเขียนเป็นสมการอิมพีแดนซ์ตัวเอง (Z_m) โดยให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดเขียนได้ดังนี้ (Balanis, 2005)

$$Z_m = R_m + jX_m \quad (10)$$

Z_m ประกอบด้วยจำนวนจริง R_m ของอิมพีแดนซ์ตัวเองโดยให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด และจำนวนจินตภาพ X_m ของอิมพีแดนซ์ตัวเองโดยให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

$$R_m = \frac{\eta}{2\pi} \left\{ 0.577 + \ln(2\pi l) - C_i(2\pi l) + \frac{1}{2} \sin(2\pi l) [S_i(4\pi l) - 2S_i(2\pi l)] + 12 \cos 2\pi l [0.577 + \ln 2\pi l + C_i 4\pi l - 2C_i k 2\pi l] \right\} \quad (11)$$

$$X_m = \frac{\eta}{4\pi} \left\{ 2S_i(2\pi l) + \cos(2\pi l) [2S_i(2\pi l) - S_i(4\pi l)] - \sin(2\pi l) [2C_i(2\pi l) - C_i 4\pi l - C_i 4\pi a 2l] \right\} \quad (12)$$

โดย $\eta = 120\pi$, $C_i(x) = -\int_x^\infty \frac{\cos(\Gamma)}{\Gamma} d\Gamma$, $S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin(\Gamma)}{\Gamma} d\Gamma$ สมการอิมพีแดนซ์ตัวเองโดยให้กระแสนำเข้าเขียนสมการได้ดังนี้

$$Z_i = R_i + jX_i \quad (13)$$

โดย Z_i หมายถึงอิมพีแดนซ์ตัวเองโดยให้กระแสนำเข้า Z_i ประกอบด้วยจำนวนจริง R_i ของอิมพีแดนซ์ตัวเองโดยให้กระแสนำเข้าและจำนวนจินตภาพ X_i ของอิมพีแดนซ์ตัวเองโดยให้กระแสนำเข้า

$$R_i = \frac{R_m}{\sin^2\left(\frac{2\pi l}{2}\right)} \quad (14)$$

$$X_i = \frac{X_m}{\sin^2\left(\frac{2\pi l}{2}\right)} \quad (15)$$

สำหรับสมการอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศ 2 และสายอากาศ 1 (Z_{21m}) โดยให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดเขียนสมการได้ดังนี้

$$Z_{21m} = R_{21m} + jX_{21m} \quad (16)$$

โดย R_{21m} แทนจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศ 2 และสายอากาศ 1 โดยให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด และ X_{21m} แทนจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศ 2 และสายอากาศ 1 โดยให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

$$R_{21m} = \frac{\eta}{4\pi} [2C_i(u_0) - C_i(u_1) - C_i(u_2)] \quad (17)$$

$$X_{21m} = -\frac{\eta}{4\pi} [2S_i(u_0) - S_i(u_1) - S_i(u_2)] \quad (18)$$

โดยที่ $u_0 = 2\pi d$,,

สมการอิมพีแดนซ์ร่วมโดยให้กระแสนำเข้าเขียนได้ดังนี้

$$Z_{21i} = R_{21i} + jX_{21i} \quad (19)$$

$$R_{21i} = \frac{R_{21m}}{\sin^2\left(\frac{2\pi l}{2}\right)} \quad (20)$$

$$X_{21i} = \frac{X_{21m}}{\sin^2\left(\frac{2\pi l}{2}\right)} \quad (21)$$

R_{21i} หมายถึงจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศ 2 และสายอากาศ 1 โดยให้
 กระแสนำเข้า X_{21i} หมายถึงจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศ 2 และสายอากาศ
 1 โดยให้กระแสนำเข้า สำหรับการคำนวณอิมพีแดนซ์ของตัวเองและอิมพีแดนซ์ร่วมของชุดสายอากาศ
 อื่นๆสามารถค้นหาเพิ่มเติมได้ใน (Balanis 2005) และ Z_S จะมีขนาดเท่ากับ Z_T แต่มีค่าเฉพาะใน
 ตำแหน่งเส้นทแยงมุม(diagonal elements) ที่มีค่าเป็นสังยุค(conjugate) ของตำแหน่งเส้นทแยงมุม
 (diagonal elements) ใน Z_T ส่วน Z_R มีขนาด $N_R \times N_R$ เป็นเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
 ตัวเองและระหว่างสายอากาศในสายอากาศภาครับ หากค่าได้จากการคำนวณคล้ายใน Z_T แต่เปลี่ยน
 จากภาคส่งมาเป็นภาครับ เช่นเดียวกันกับหาค่า Z_L ที่คล้ายกับ Z_S

$$P_t = \frac{(Z_T)_{11}}{(Z_T)_{11} + (Z_T)^*_{11}} \quad (22)$$

$$P_r = \frac{(Z_R)^*_{11}}{(Z_R)_{11} + (Z_R)^*_{11}} \quad (23)$$

P_r และ P_t เป็นค่าคงที่ปกติ(normalizing constants)สำหรับ C_t และ C_r ตามลำดับ

ความจุช่องสัญญาณไม่โม

ในกรณีที่ช่องสัญญาณมีการจางหายอย่างรวดเร็ว(fast fading)ความจุช่องสัญญาณเออร์กอไดค
 เท่ากับ

$$\begin{aligned} C &= E \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger \right) \right] \\ &= E \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_t} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H}^\dagger \mathbf{H} \right) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

โดย $p = \frac{E[\|\mathbf{x}\|^2]}{\sigma_n^2}$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังสัญญาณส่งต่อกำลังสัญญาณรบกวน
 (Signal-to-noise ratio) $\det(\cdot)$ คือดีเทอร์มิแนนต์(determinant) และ $(\cdot)^\dagger$ คือ เฮอร์มิเชียนทรานส
 โปสส์(hermitian transpose)

\mathbf{I}_{N_r} และ \mathbf{I}_{N_t} ทั้งคู่เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์(identity matrix) ที่มีขนาด $N_r \times N_r$ และ $N_t \times$
 N_t ตามลำดับ L_t เท่ากับจำนวนเลือกใช้สายอากาศส่งในกรณีที่ช่องสัญญาณมีการจางหายอย่างช้า

(slow fading) ความจุเออร์กอดิกเท่ากับศูนย์โดยสมรรถนะของช่องสัญญาณในกรณีนี้อาจพิจารณาจากความน่าจะเป็นที่จะเกิดเอาต์เจจ (probability of outage) เป็นความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณไม่สามารถรองรับอัตราส่งข้อมูลที่ต้องการได้ ถ้ากำหนดให้ความน่าจะเป็นของการเกิดเอาต์เจจต้องเท่ากับ ϵ บิตต่อการใช้ช่องสัญญาณ จะได้ว่า

$$\Pr \left\{ \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^\dagger \right) < R \right\} = \epsilon \quad (25)$$

และสามารถนิยามความจุเอาต์เจจได้ดังนี้ $C_\epsilon = R$

วิธีการเลือกสายอากาศ

หลักการเลือกสายอากาศพิจารณาตามสถานะของช่องสัญญาณ (Channel) ที่ทำให้สมรรถนะของระบบสื่อสารมากที่สุด วิธีการเลือกสายอากาศได้พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความจุช่องสัญญาณ ลดความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ลดกำลังส่งหรือปริมาณฮาร์ดแวร์ เช่น จำนวน โซ่ RF ที่ต้องใช้ วิธีการเลือกสายอากาศจะแบ่งออกเป็น การเลือกสายอากาศโดยภาคส่งต้องรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ ถึงจะเลือกสายอากาศได้ (channel state information(CSI)) และไม่ต้องรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (no CSI) การรู้ถึงข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณสามารถทำได้โดยในภาครับสามารถรู้ได้เนื่องจากสัญญาณนำร่อง(pilot signal)จากภาครับและทำการเลือกสายอากาศในภาครับ แต่ในการเลือกสายอากาศในภาคส่งจำเป็นต้องมีการช่องสัญญาณป้อนกลับ(feedback channel)จากภาครับสัญญาณเพื่อที่จะสามารถรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณซึ่งอยู่ในงานวิจัย (Love *et al.*, 2003); (Santipach and Honig, 2009); (Santipach *et al.*, 2003) โดยวัดประสิทธิภาพของระบบจากความจุของช่องสัญญาณ ซึ่งงานวิจัย (Telatar, 1999) ได้แสดงถึงความจุในระบบการสื่อสารแบบหลายสายอากาศโดยสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศส่ง/รับ ความจุเออร์กอดิกจะเพิ่มสูงขึ้นในอัตราเชิงเส้นกับจำนวนสายอากาศ แต่ในกรณีนี้แบบจำลองช่องสัญญาณ ไม่ได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศ

วิธีการเลือกสายอากาศที่ทำให้ระบบมีความจุมากที่สุดคือการเลือกสายอากาศแบบพิจารณาทุกความเป็นไปได้ (exhaustive search) โดยเป็นการเลือกสายอากาศทั้งหมดที่เป็นไปได้ เพื่อหาว่าสายอากาศตัวไหนจะทำให้มีความจุดีที่สุด เช่น มีสายอากาศภาคส่งอยู่ทั้งหมด $N_t=20$ ตัว เลือกใช้สายอากาศภาคส่ง $L_t=8$ ตัว จะได้ตัวเลือกทั้งหมดของ $C_{N_t}^{L_t}=125970$ ซึ่งจะเห็นได้ว่ายังมีจำนวนสายอากาศภาคส่งมาก จะทำให้ระบบใช้เวลาในการคำนวณที่นาน จึงได้มีหลายวิธีการที่จะพัฒนาการ

เลือกสายอากาศ โดยให้ได้ความจุที่ใกล้เคียงกับการเลือกสายอากาศแบบพิจารณาทุกความเป็นไปได้ แต่ใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยลง (Marzetta and Hochwald, 1999) ทำการวิจัยหาความจุของช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh flat fading) ในระบบ MIMO (Win and Winter, 2000) เสนอการเลือกสายอากาศแบบไฮบริดจ์ (Hybrid Selection/Maximum ratio combining) เป็นวิธีการเลือกสายอากาศเพื่อส่งข้อมูลหรือรับข้อมูลจำนวน L จากจำนวนสายอากาศที่มีทั้งหมด N โดยสายอากาศที่เลือกใช้งานจะให้กำลังส่งหรือรับ ส่วนที่ไม่ได้เลือกใช้จะไม่ให้กำลังส่งหรือรับ ในงานวิจัย (Gore et al, 2000) ได้เสนอวิธีการเลือกสายอากาศอย่างรวดเร็ว ผลที่ได้มีความจุที่ใกล้เคียงกับการพิจารณาทุกความเป็นไปได้ วิธีการเลือกสายอากาศจะพิจารณาถึง Frobenius norm แต่พิจารณาการเลือกเฉพาะสายอากาศส่ง งานวิจัย Gore and Paulraj (2001) ได้เสนอการเลือกสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศที่มีไม่มากโดยช่องสัญญาณพิจารณาถึงมุมมองระหว่างสายอากาศ โดยวิธีการนี้สามารถใช้ได้ทั้งภาครับและส่ง ผลการทดลองสามารถเลือกสายอากาศที่ทำให้ระบบมีความจุใกล้เคียงกับการพิจารณาทุกความเป็นไปได้และลดเวลาในการคำนวณเลือกสายอากาศ แต่ผลการทดลองในเรื่องการลดเวลาในการคำนวณไม่มีประสิทธิภาพหากใช้สายอากาศจำนวนมาก

งานวิจัย Gorokhov (2002) ได้เสนอวิธีการเลือกสายอากาศอย่างรวดเร็วทั้งในส่วนภาครับและส่ง โดยวิธีการเลือกนั้นเริ่มจากการลดสายอากาศลงในตำแหน่งที่สายอากาศทำให้ระบบมีความจุน้อยที่สุดทีละสาย เมื่อลดจำนวนสายอากาศลงไปแล้วระบบจะทำการปรับช่องสัญญาณใหม่ ซึ่งเป็นการปรับขนาดของช่องสัญญาณให้มีขนาดที่เล็กลงตามการคัดสายอากาศที่ไม่ใช่ ออก ทำต่อไปจนได้จำนวนสายอากาศ (L_r) ที่ต้องการใช้งาน แล้ว Gorokhov ยังได้พัฒนาการเลือกรับสายอากาศภาครับ (Gorokhov, 2003) โดยเพิ่มวิธีการเลือกใช้สายอากาศทีละสายอากาศแล้วค่อย ๆ เพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปทีละ 1 สายอากาศในกรณีที่สายอากาศนั้นทำให้ระบบมีความจุมากที่สุดแล้วทำการปรับขนาดช่องสัญญาณให้มีตำแหน่งการเลือกใช้สายอากาศนั้น เมื่อต้องการเลือกสายอากาศเพิ่มอีกจะต้องนำสายอากาศที่เลือกไปก่อนหน้านี้แล้วมารวมการพิจารณาการหาค่าความจุที่มากที่สุดด้วย แล้วทำการปรับขนาดของช่องสัญญาณให้มีการเลือกใช้สายอากาศ ดังนั้นขนาดของช่องสัญญาณที่ทุกครั้งที่มีการปรับค่าจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้สายอากาศภาครับทั้งหมดย่อมดีกว่าการเลือกสายอากาศ (Alkhansari, 2003) ได้เสนอวิธีการเลือกสายอากาศที่คล้ายๆ กับ Gorokhov แต่วิธีการของ Alkhansari จะเริ่มจากการเพิ่มสายอากาศเข้าไปทีละ 1 โดยเลือกสายอากาศที่ทำให้มีความจุมากที่สุด และทำการปรับช่องสัญญาณโดยทำอยู่ในรูปแบบ QR decomposition ผลที่ได้คือมีความจุที่ใกล้เคียงกับของ Gorokhov และลดเวลาในการคำนวณลงไปได้เล็กน้อย ในงานวิจัย (Dai 2004) ได้พิจารณาการเลือกสายอากาศในภาครับ โดยกำหนดให้มีสหภาพความสัมพันธ์ที่ภาครับเท่านั้น วิธีการตัดสินใจเลือกสายอากาศพิจารณาเพียงสหภาพ

ความสัมพันธ์ โดยไม่ได้พิจารณาสถานะของช่องสัญญาณ เรียกวิธีการนี้ว่า correlated selection algorithm (CSA) เป็นการพิจารณาการเลือกสายอากาศโดยดูความสัมพันธ์ของสหภาพความสัมพันธ์ งานวิจัย (Dai, 2006) พัฒนาการเลือกสายอากาศทั้งในภาคส่งและรับพร้อมกัน และลดเวลาในการคำนวณได้มากที่สุด ในกรณีที่สหภาพความสัมพันธ์มีผลกระทบกับช่องสัญญาณมาก วิธีนี้เรียกว่า low-complexity selection algorithm (L-CSA) มีวิธีที่เพิ่มขึ้นมาคือใช้วิธีการคัดสายอากาศที่เลือกใช้ออกทำให้ลดเวลาในการคำนวณเลือกสายอากาศ ผลการทดลองได้พิสูจน์ว่าใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าทุกวิธีที่กล่าวมาในข้างต้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ถูกนำไปใช้ในช่องสัญญาณที่มีสหภาพความสัมพันธ์เท่านั้นและเนื่องจากวิธีการนี้เป็นการเลือกโดยไม่ได้พิจารณาถึงค่าช่องสัญญาณที่แท้จริง จึงทำให้บางครั้งหากสหภาพความสัมพันธ์มีผลกระทบกับช่องสัญญาณน้อย การเลือกใช้สายอากาศโดยวิธีนี้จะได้ความจุที่ไม่ดีหากเทียบกับวิธีการเลือกอื่น

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่กล่าวในข้างต้นได้กล่าวถึงวิธีการเลือกสายอากาศในช่องสัญญาณที่ ไม่ได้พิจารณาถึงการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณ โดยในความเป็นจริงแล้วผลกระทบที่เกิดจากสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศมีผลต่อความจุของช่องสัญญาณอย่างมาก ดังนั้นการเลือกสายอากาศต้องพิจารณาร่วมกับสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศ และการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณเพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงพิจารณาถึงช่องสัญญาณที่มีผลกระทบที่เกิดจากสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศ และการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณ โดยมีเป้าหมายที่หาวิธีเลือกสายอากาศส่งหรือ/และรับที่ทำให้ความจุของช่องสัญญาณมีค่าสูงที่สุดโดยใช้เวลาในการประมวลผลมีค่าน้อยที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Intel ® Core™ 2DuoCPU@2.66 GHz 2.00 GB of RAM
2. โปรแกรม Matlab

วิธีการ

กำหนดให้การจำลองการสื่อสารทั้งภาคส่งและรับใช้สายอากาศไดโพล โดยใช้สายอากาศไดโพลที่มีขนาดรัศมีเท่ากับ 0.001 ความยาวคลื่นและความยาวเท่ากับ 0.25 ความยาวคลื่นและจัดเรียงวางข้างกัน โดยใช้สมการที่ 13 และ 19 ในการหาอิมพีแดนซ์ตัวเองและระหว่างสายอากาศตามลำดับ

การเลือกสายอากาศภาคส่ง

กำหนดให้สายอากาศส่งมีทั้งหมด N_t และต้องการเลือกสายอากาศส่งจำนวน L_t โดย $L_t \leq N_t$ เนื่องจากภาคส่งมีสถานะข้อมูลของช่องสัญญาณซึ่งอาจจะได้มาจากการประมาณช่องสัญญาณด้วยตนเองหรือรับข้อมูลจากภาครับ ในงานวิจัยนี้มีสมมุติฐานว่าภาคส่งมีสถานะข้อมูลช่องสัญญาณหรือเมทริกซ์ของอัตราขยายช่องสัญญาณ \mathbf{H} อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีความผิดพลาดจากการประมาณ เริ่มต้นด้วยการเลือกสายอากาศของ Gorokhov (Gorokhov 2003) ซึ่งเป็นพื้นฐานของวิธีแรกของการเลือกสายอากาศที่จะนำเสนอ การเลือกสายอากาศตามวิธีของ Gorokhov มีหลักการเลือกสายอากาศที่ให้ความจุช่องสัญญาณที่มากที่สุดโดยเลือกทีละสายอากาศในแต่ละขั้นเลือกจากสายอากาศที่เหลืออยู่ร่วมกับสายอากาศที่ถูกเลือกมาก่อนหน้านี้ ถ้าสายอากาศใดที่เลือกร่วมกับสายอากาศที่ถูกเลือกมาก่อนหน้านี้ให้ความจุช่องสัญญาณที่มากที่สุด จึงเลือกสายอากาศนั้นและดำเนินการเลือกสายอากาศต่อไปในแบบเดียวกันจนได้สายอากาศครบจำนวน L_t ตามที่ต้องการ ในการเลือกสายอากาศนี้มีสมมุติฐานว่าสายอากาศที่ไม่ได้เลือกจะถูกถอดออกจากการติดตั้งในภาคส่ง ดังนั้นขนาดของเมทริกซ์ \mathbf{H} มีขนาดลดลง เช่น ช่องสัญญาณไม่โมฆะขนาด 3×3 ถ้าเลือกใช้เฉพาะสายอากาศที่ 1 และ 3 สมาชิกของเมทริกซ์ \mathbf{H} แถวที่สองจะถูกตัดออกไปและ

เมทริกซ์จะมีขนาด 2×3 เป็นต้นหรือเสมือนว่าแถวที่สองของเมทริกซ์ \mathbf{H} ดังเดิมมีสมาชิกเป็นศูนย์ทั้งหมด กำหนดให้เมทริกซ์ \mathbf{F}_t มีขนาด $\mathbf{N}_t \times \mathbf{N}_t$ เป็นเมทริกซ์เลือกสายอากาศส่ง โดย \mathbf{F}_t เป็นเมทริกซ์เส้นทแยงมุมโดยสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมมีค่า 0 หรือ 1 โดยสมาชิกเป็น 0 เมื่อสายอากาศในตำแหน่งดังกล่าวไม่ถูกเลือกใช้ และ 1 เมื่อสายอากาศถูกเลือกใช้ใช้งาน จากตัวอย่างข้างต้น เมทริกซ์

เลือกสายอากาศส่งเท่ากับ $\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ และ $\mathbf{H}\mathbf{F}_t$ จะให้เมทริกซ์ช่องสัญญาณเลือกใช้สายอากาศ

1 และ 3 จากภาพที่ 7 เป็นตัวอย่างการเลือกสายอากาศในภาคส่งโดยวิธีของ Gorokhov โดยมีจำนวน \mathbf{N}_t เท่ากับ 3 สาย และกำหนดจำนวน \mathbf{L}_t เท่ากับ 2 สาย เริ่มแรกยังไม่มีสายอากาศที่ถูกเลือกดังนั้น

ในขั้นที่ (0) เมทริกซ์เลือกสายอากาศเท่ากับ $\mathbf{F}_t^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ขั้นต่อไปเลือกหนึ่ง

สายอากาศจากสามสายอากาศส่ง ดังนั้นมีเมทริกซ์เลือกสายอากาศทั้งหมดดังนี้ $\mathbf{F}_t^{(1)}_1$

$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_t^{(1)}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ และ $\mathbf{F}_t^{(1)}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ จากนั้นคำนวณความ

จุช่องสัญญาณของแต่ละเมทริกซ์ดังนี้

$$C = E \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H}\mathbf{F}_t\mathbf{H}^+ \right) \right] \quad (26)$$

\mathbf{F}_t มีคุณสมบัติโดย $\mathbf{F}_t^+ \mathbf{F}_t = \mathbf{F}_t \mathbf{F}_t^+ = \mathbf{F}_t$ โดย \mathbf{F}_t สามารถแทนเซตของสายอากาศส่งที่เลือกในขั้นต่างๆ นอกจากนี้อาจใช้เมทริกซ์ \mathbf{e} เพื่อทดลองหาสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด โดยมีขนาดและคุณสมบัติคล้ายกับ \mathbf{F}_t โดย $\mathbf{F}_t = \mathbf{e}\mathbf{e}^+$ โดยสาเหตุที่ต้องเลือกใช้เมทริกซ์ \mathbf{e} ในการเลือกสายอากาศเนื่องจากในวิธีการเลือกสายอากาศในขั้นต่อไปจะมีการพิจารณาถึงลำดับของสายอากาศก่อนที่จะเลือกสายอากาศ จากภาพที่ 7 สายอากาศตำแหน่งที่ 2 ทำให้ระบบมีความจุช่องสัญญาณมากที่สุดในสมการที่ 17 จึงเลือกสายอากาศสายที่ 2 เป็นสายอากาศที่เลือกใช้

ตัวแรก $\mathbf{F}_{t_{max}}^{(1)} = \mathbf{F}_{t_2}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ลำดับต่อไปลองให้กำลังสายอากาศสายอื่นร่วมกับ

สายอากาศที่เลือกมาก่อนหน้านี้แล้วเช่น $\mathbf{F}_{t_1}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{t_3}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ เห็นได้ว่าเมื่อ

เลือกสายอากาศสายที่ 2 และสายที่ 1 จากการคำนวณในสมการที่ 17 ทำให้ความจุช่องสัญญาณใน

สมมุติฐานนี้มากที่สุด ดังนั้น $\mathbf{F}_{t_{max}}^{(2)} = \mathbf{F}_{t_1}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ และช่องสัญญาณที่ถูกเลือกสายอากาศ

ภาคส่งแล้วมีลักษณะดังนี้ $\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{F}_t$ โดย $\hat{\mathbf{H}}$ เป็นเมทริกซ์ช่องสัญญาณที่ถูกเลือกสายอากาศ

ภาคส่งแล้ว มีขนาดเท่ากับ $\mathbf{N}_t \times \mathbf{N}_t$ โดยคอลัมน์ที่แทนสายอากาศส่งที่ไม่ถูกเลือกใช้เป็นศูนย์

จากในตัวอย่าง $\mathbf{F}_{t_{max}}^{(2)} = \mathbf{F}_{t_1}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ และสมมติช่องสัญญาณ $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$ ดังนั้น

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 4 & 5 & 0 \\ 7 & 8 & 0 \end{bmatrix}$$

ค่าเริ่มต้น $\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

ขั้นตอนที่ 1 $\mathbf{F}_{t_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \mathbf{F}_{t_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots \mathbf{F}_{t_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

คำนวณหาความจุช่องสัญญาณ $C = E \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H}\mathbf{F}_t\mathbf{H}^\dagger \right) \right]$ และเลือกใช้สายอากาศที่ทำให้มีความจุช่องสัญญาณมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 $* \mathbf{F}_{t_{2,1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_{t_{2,3}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

ภาพที่ 7 แสดงวิธีการเลือกสายอากาศโดยวิธีของ Gorokhov

สำหรับช่องสัญญาณที่จางหายซ้ำความน่าจะเป็น (probability of outage) ได้สมการดังนี้

$$\Pr \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H}\mathbf{F}_t\mathbf{H}^\dagger \right) < R \right\} = \epsilon \quad (27)$$

และความจุเอาต์เดทที่ ϵ (ϵ -outage capacity) เท่ากับ $C_\epsilon = R$

สามารถอธิบายเป็นชุดโค้ดการเลือกสายอากาศได้ดังนี้

วิธีที่ 1: Gorokhov (Gorokhov 2003)

1: $\Omega_s = \{\}$ and $\Omega_n = \{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_{N_t}\}$

2: $L=0$

3: While ($L < L_t$)

4: Find

$$\mathbf{e}_s = \arg \max_{\mathbf{e}_j \in \Omega_s} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{N_t} \mathbf{H}\mathbf{e}_j\mathbf{e}_j^\dagger \mathbf{H}^\dagger \right)$$

5: $\Omega_s \leftarrow \Omega_s \cup \{e_s\}$
 6: $\Omega_n \leftarrow \Omega_n \setminus \{e_s\}$
 7: $L \rightarrow L+1$
 8: End while
 9: Return Ω_s

ในวิธีที่ 1 กำหนด Ω_s และ Ω_n เป็นเวกเตอร์มีขนาด $N_t \times 1$ แทนตำแหน่งสายอากาศภาคส่งที่ถูกเลือกและแทนตำแหน่งสายอากาศภาคส่งที่ยังไม่ได้ใช้ตามลำดับ กำหนดค่าเริ่มต้นให้จำนวนสมาชิกใน Ω_s เป็นเซตว่างและ Ω_n มีสมาชิกของการเลือกสายอากาศภาคส่งทุกตำแหน่ง $\Omega_n = \{e_1, \dots, e_{N_t}\}$ ทำการเลือกทีละสายอากาศที่ทำให้ความจุช่องสัญญาณมีค่ามากที่สุดในการที่ 24 โดยในสายอากาศที่ถูกเลือกจะถูกย้ายตำแหน่งสมาชิกของ Ω_n มา Ω_s หมายความว่าได้เลือกสายอากาศตำแหน่งนั้น เมื่อได้เซตของเวกเตอร์เลือกสายอากาศส่ง Ω_s หรือเมทริกซ์เลือกสายอากาศส่ง F_t แล้ว ความจุช่องสัญญาณสามารถคำนวณจากสมการ 24

ผู้วิจัยพัฒนาวิธีที่ 1 เพื่อให้เวลาในการเลือกใช้สายอากาศน้อยลงกว่าเดิมโดยสมรรถนะไม่ลดลง เนื่องจากสายอากาศที่อยู่ใกล้กันจะมีการเหนี่ยวนำการรบกวนและมีผลให้ความจุช่องสัญญาณลดต่ำลง จึงใช้สัมประสิทธิ์การรบกวนในการพิจารณาเลือกสายอากาศด้วยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การรบกวนระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณระหว่างสายอากาศที่เลือกไปแล้วกับสายอากาศตัวต่อไปที่กำลังพิจารณาเลือกหรือเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศในเซต Ω_s และ Ω_n ถ้าสายอากาศที่กำลังพิจารณาเลือก (สมาชิกใน Ω_n) อยู่ใกล้กับสายอากาศที่ถูกเลือกไปแล้ว (สมาชิกใน Ω_s) จนทำให้เกิดการรบกวนระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมากเกินไปกว่าค่าขีดแบ่ง (threshold(μ)) สายอากาศดังกล่าวจะไม่ถูกพิจารณาเลือกแต่พิจารณาสายอากาศถัดไป (สมาชิกถัดไปใน Ω_n) ถ้าเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การรบกวนระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณระหว่างสมาชิกใน Ω_s และ Ω_n ที่ตำแหน่งใดน้อยกว่าค่าขีดแบ่ง สายอากาศดังกล่าวจะถูกจัดในเซต Ω_c ซึ่งเป็นเซตของสายอากาศที่มีสัมประสิทธิ์การรบกวนน้อยกว่าค่าขีดแบ่ง จากนั้นภาคส่งจะพิจารณาเลือกสายอากาศส่งถัดไปจากเซต Ω_c เท่านั้น ซึ่งจำนวนสายอากาศใน Ω_c มีน้อยกว่าหรือเท่ากับ Ω_n ดังนั้นการคำนวณสมการความจุช่องสัญญาณจึงน้อยลง โดยสายอากาศ Ω_c ที่ทำให้มีความจุช่องสัญญาณมากที่สุดจะถูกเลือกใช้และสายอากาศนั้นจะถูกย้ายจาก Ω_n มา Ω_s ทำตามขั้นตอนดังกล่าวจนกว่าจะได้จำนวนการเลือกสายอากาศภาคส่ง (L_t) ตามต้องการ วิธีการดังกล่าวมีการคำนวณที่น้อยลงและเวลาในการเลือกสายอากาศลดลง เรียกวิธีนี้ว่าการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (Modified Gorokhov Selection Algorithm (MG)) สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

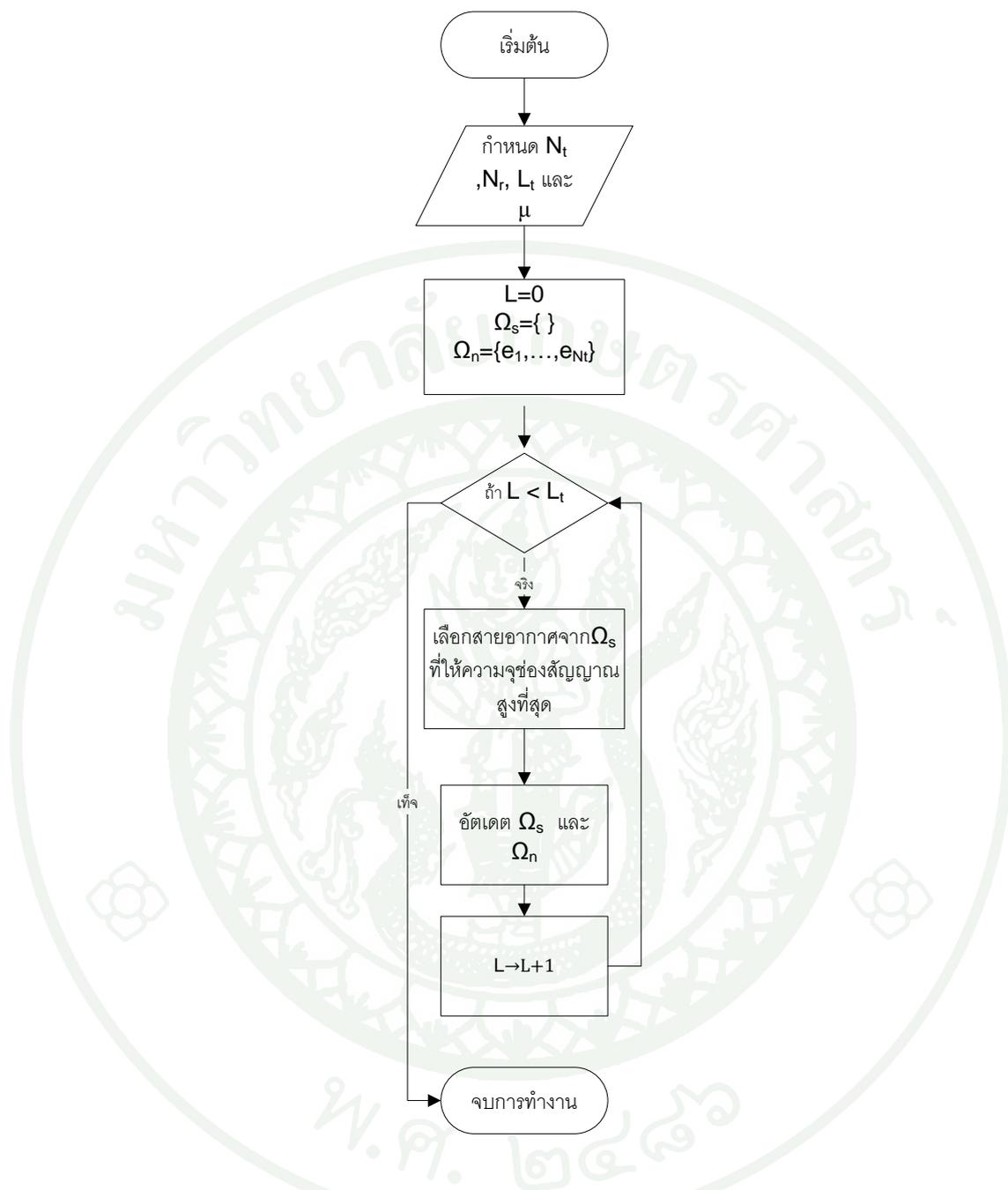
วิธีที่ 2: Modified Gorokhov Selection Algorithm (MG) on Transmit Selection

- 1: $\Omega_s = \{\}$ and $\Omega_n = \{e_1, \dots, e_{N_t}\}$
- 2: $L=0$
- 3: While ($L < L_t$)
- 4: If $L=0$ then
- 5: Find

$$\mathbf{e}_s = \arg \max_{\mathbf{e}_j \in \Omega_s} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H} \mathbf{e}_j \mathbf{e}_j^\dagger \mathbf{H}^\dagger \right)$$
- 6: $\Omega_s \leftarrow \Omega_s \cup \{\mathbf{e}_s\}$
- 7: $\Omega_n \leftarrow \Omega_n \setminus \{\mathbf{e}_s\}$
- 8: $L \leftarrow L+1$
- 9: Else if
- 10: $\Omega_c = \{\}$
- 11: For all $\mathbf{e}_t \in \Omega_s$ do
- 12: $\Omega_c \leftarrow \Omega_c \cup \left\{ \mathbf{e}_w \in \Omega_n \mid \frac{\text{abs}(\mathbf{e}_t^\dagger \mathbf{z}_t \mathbf{e}_w)}{\text{abs}(\mathbf{z}_t(1,1))} \leq \mu \right\}$
- 13: End for
- 14: If $\Omega_c = \{\}$ then
- 15: $\Omega_c \leftarrow \Omega_n$
- 16: End if
- 17: Find

$$\mathbf{e}_s = \arg \max_{\mathbf{e}_j \in \Omega_c} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{H} \left(\sum_{\mathbf{e}_i \in \Omega_s} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\dagger + \mathbf{e}_j \mathbf{e}_j^\dagger \right) \mathbf{H}^\dagger \right)$$
- 18: $\Omega_s \leftarrow \Omega_s \cup \{\mathbf{e}_s\}$
- 19: $\Omega_n \leftarrow \Omega_n \setminus \{\mathbf{e}_s\}$
- 20: $L \leftarrow L+1$
- 21: End if
- 22: End while
- 23: Return Ω_s

วิธีที่ 2 สามารถอธิบายด้วยผังไหลได้ในภาพที่ 8

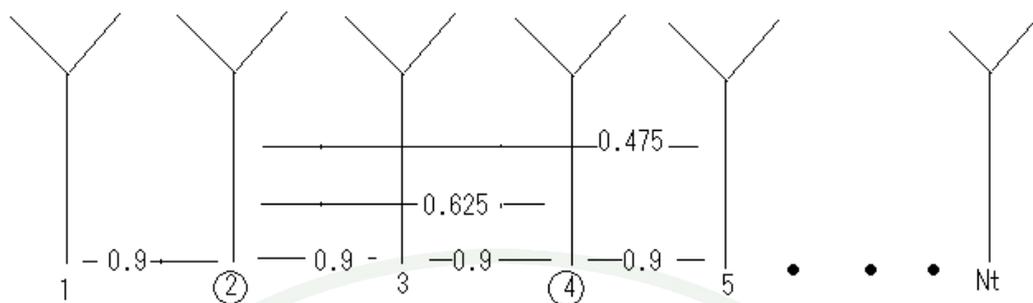


ภาพที่ 8 ขั้นตอนของการเลือกสายอากาศภาคส่งโดยใช้วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov

การกำหนดนิยามค่าขีดแบ่ง (μ) ให้อยู่ในรูปแบบการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์จำนวนจริงของการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณ

$$\frac{|Z_t(s,w)|}{|Z_t(1,1)|} \leq \mu \quad (28)$$

โดย s แสดงถึงตำแหน่งที่เลือกสายอากาศภาคส่งไปแล้ว และ w แสดงถึงตำแหน่งที่เลือกพิจารณาสายอากาศภาคส่งตัวถัดไป หรือเขียนสมการ $\frac{|Z_t(s,w)|}{|Z_t(1,1)|}$ เป็นสมการในลำดับขั้นตอนได้ $\frac{|Z_t(s,w)|}{|Z_t(1,1)|}$ โดย e_t เป็นเวกเตอร์แทนสายอากาศในตำแหน่ง t ในภาคส่งที่เลือกไปแล้ว โดย $e_t \in \Omega_s$ และ e_w เป็นเวกเตอร์แทนสายอากาศในภาคส่งที่ยังไม่ได้ใช้ โดย $e_w \in \Omega_n$ โดย $e_t^t Z_t e_w$ เท่ากับอิมพีแดนซ์ของการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศที่เลือกใช้ไปแล้วเทียบกับสายอากาศที่กำลังพิจารณา และ $Z_t(1,1)$ คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวเอง ดังนั้นสัดส่วนระหว่าง $e_t^t Z_t e_w$ หรือ $Z_t(s,w)$ และ $Z_t(1,1)$ แสดงถึงปริมาณของผลกระทบที่เกิดจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศ s และ w ค่าขีดแบ่งที่ใช้ได้มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าขีดแบ่งที่เข้าใกล้ 0 แสดงถึงสภาวะระหว่างสายอากาศที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศหรือสายอากาศอยู่ห่างไกลกันมาก ส่วนค่าขีดแบ่งที่เข้าใกล้ 1 แสดงถึงสภาวะระหว่างสายอากาศที่ได้รับผลกระทบจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมากหรือสายอากาศอยู่ใกล้กันมาก สำหรับการเลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่ดีต้องพิจารณาจากชนิดของสายอากาศที่ใช้ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ ตำแหน่งการจัดเรียงวางของสายอากาศและมุมการวางระหว่างสายอากาศ ตามที่กล่าวมาในส่วนของผลกระทบจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศ โดยค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมกับการเลือกใช้ควรเป็นค่าที่น้อยที่สุดของการเทียบสัมประสิทธิ์จำนวนจริงของการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณ (Z_t) โดยเทียบกันระหว่างสายอากาศสายที่ 1 และ 2 ดังสมการที่ 28 การร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมีอิทธิพลสูงต่อช่องสัญญาณในการลดความจุช่องสัญญาณ ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศสายที่ 2 ทำให้ความจุช่องสัญญาณของระบบมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับสายอากาศทั้งหมดที่มีเป็นจำนวน N_t จึงเลือกสายอากาศที่ 2 เป็นอันดับแรกดังภาพที่ 9 เมื่อพิจารณาสายอากาศสายต่อไปเมื่อดูจากในระบบนี้แล้วเห็นได้ว่า สายอากาศสายที่ 1 และสายที่ 3 มีตำแหน่งที่ได้รับผลกระทบจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมากเกินไปเกินค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้ ดังนั้นจะข้ามการพิจารณาในสายอากาศสายที่ 1 และสายที่ 3 แล้วไปเลือกพิจารณาสายอากาศสายอื่น เมื่อเลือกสายอากาศอื่นร่วมกับสายอากาศสายที่ 2 แล้วจะทำให้ความจุมีค่ามากที่สุด จากภาพที่ 9 เห็นได้ว่าเลือกสายอากาศสายที่ 4 เป็นสายอากาศอันดับที่ 2 เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าค่าขีดแบ่ง และเมื่อเลือกคู่กับสายอากาศสายที่ 2 แล้วทำให้มีความจุมากที่สุด หากต้องทำการเลือกสายอากาศตัวถัดไปก็ข้ามการพิจารณาสายอากาศตัวที่ 1, 3 และ 5 ไปได้เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวได้รับผลกระทบจากการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณกับสายอากาศสายที่เลือกไปก่อนหน้านี้คือสายอากาศสายที่ 2 และ 4



ภาพที่ 9 แสดงการตัดสายอากาศออกจากการพิจารณาด้วยวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov

การเลือกสายอากาศในภาครับ

สำหรับการเลือกสายอากาศภาครับสามารถใช้วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov หรือวิธีที่ 2 ในการเลือกสายอากาศภาครับคล้ายกับการเลือกสายอากาศภาคส่ง โดยกำหนดให้ ภาคส่งเลือกให้ทุกสายอากาศที่มีในการส่งสัญญาณ $L_t = N_t$ ในทำนองเดียวกับการเลือกสายอากาศส่ง การเลือกสายอากาศรับใช้เมทริกซ์ F_r มีขนาด $N_r \times N_r$ เป็นเมทริกซ์เลือกสายอากาศรับ F_r เป็นเมทริกซ์เส้นทแยงมุม โดยสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมมีค่า 0 หรือ 1 โดยสมาชิกเป็น 0 เมื่อสายอากาศดังกล่าวไม่ถูกใช้ และ 1 เมื่อสายอากาศถูกใช้งาน และมีคุณสมบัติ $F_r^T F_r = F_r F_r^T = F_r$ โดย F_r สามารถแทนเซตของสายอากาศรับที่เลือกในขั้นต่างๆ ดังสมการที่ 29

$$C = E \left[\log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{p}{L_t} F_r H H^T F_r \right) \right] \quad (29)$$

วิธีที่ 2 ต้องเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการเลือกสายอากาศภาครับ เนื่องจากขั้นตอนการเลือกสายอากาศรับเหมือนกับการเลือกสายอากาศส่ง โดยวิธีที่ 3 แสดงขั้นตอนการเลือกสายอากาศรับ

วิธีที่ 3: Modified Gorokhov Selection Algorithm (MG) on Receive Selection

- 1: $\Omega_s = \{\}$ and $\Omega_n = \{e_1, \dots, e_{N_r}\}$
- 2: $L=0$
- 3: While ($L < L_r$)
- 4: If $L=0$ then

```

5: Find
    $\mathbf{e}_s = \arg \max_{\mathbf{e}_j \in \Omega_s} \log_2 \det (\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{e}_j \mathbf{e}_j^\dagger \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger \mathbf{e}_j \mathbf{e}_j^\dagger)$ 
6:  $\Omega_s \leftarrow \Omega_s \cup \{\mathbf{e}_s\}$ 
7:  $\Omega_n \leftarrow \Omega_n \setminus \{\mathbf{e}_s\}$ 
8:  $L \leftarrow L+1$ 
9: Else if
10:  $\Omega_c = \{\}$ 
11: For all  $\mathbf{e}_r \in \Omega_s$  do
12:    $\Omega_c \leftarrow \Omega_c \cup \left\{ \mathbf{e}_w \in \Omega_n \mid \frac{\text{abs}(\mathbf{e}_r^\dagger \mathbf{z}_t \mathbf{e}_w)}{\text{abs}(\mathbf{z}_t (1,1))} \leq \mu \right\}$ 
13: End for
14: If  $\Omega_c = \{\}$  then
15:    $\Omega_c \leftarrow \Omega_n$ 
16: End if
17: Find
    $\mathbf{e}_s = \arg \max_{\mathbf{e}_j \in \Omega_c} \log_2 \det (\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} (\sum_{\mathbf{e}_i \in \Omega_s} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\dagger + \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\dagger) \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger (\sum_{\mathbf{e}_i \in \Omega_s} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\dagger + \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\dagger))$ 
18:  $\Omega_s \leftarrow \Omega_s \cup \{\mathbf{e}_s\}$ 
19:  $\Omega_n \leftarrow \Omega_n \setminus \{\mathbf{e}_s\}$ 
20:  $L \leftarrow L+1$ 
21: End if
22: End while
23: Return  $\Omega_s$ 

```

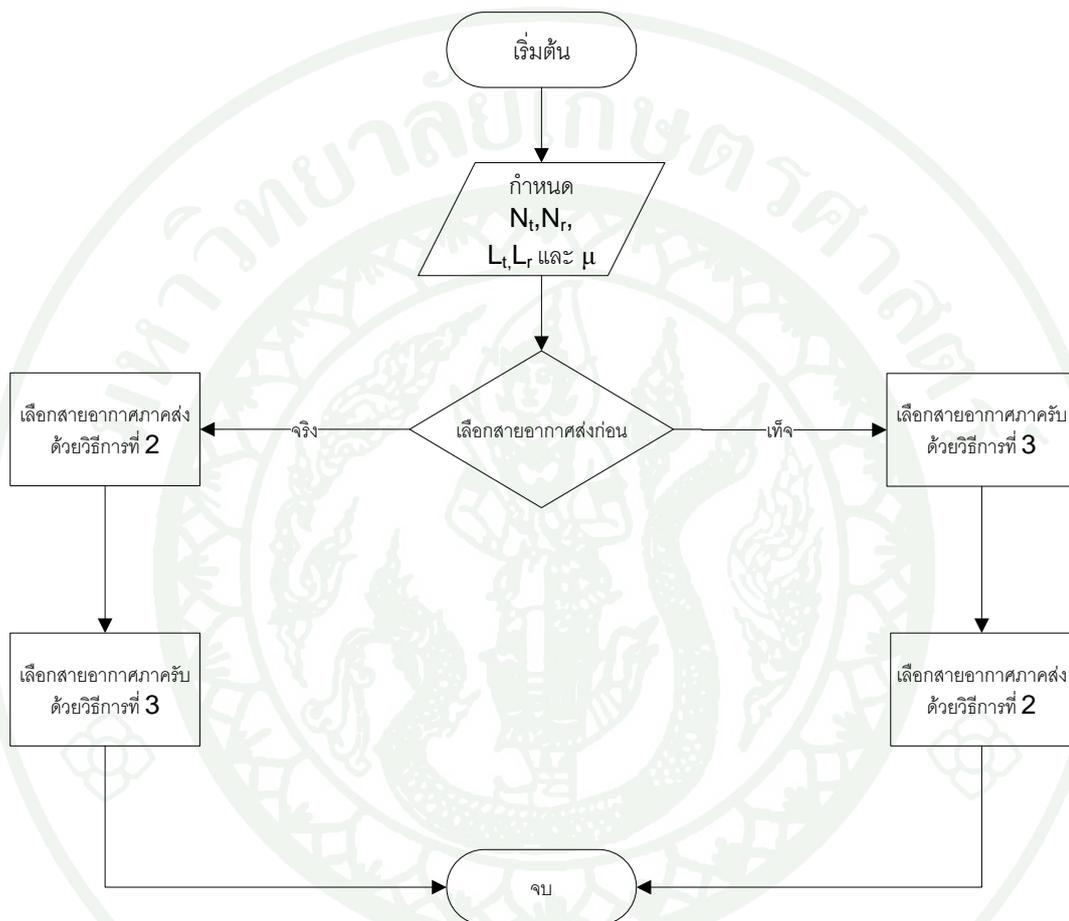
การเลือกสายอากาศในภาคส่งและรับ

ในการเลือกสายอากาศในภาคส่งและรับแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ คือ การเลือกสายอากาศภาคส่งและรับแยกกัน และ วิธีการเลือกสายอากาศภาคส่งและภาครับร่วมกัน

1. การเลือกสายอากาศภาคส่งและรับแยกกัน

วิธีการนี้นำวิธีการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับ ในวิธีที่ 2 และ 3 มาใช้เลือกสายอากาศภาคส่งหรือรับให้เสร็จก่อนถึงเลือกสายอากาศอีกภาคหนึ่ง ดังตัวอย่าง กำหนดสายอากาศ N_t และ N_r เท่ากับ 10 สายอากาศ กำหนด L_t และ L_r เท่ากับ 3 สายอากาศ เริ่มแรกเลือกสายอากาศภาคส่งหรือภาครับอย่างใดอย่างหนึ่งก่อน สมมุติทำการเลือกสายอากาศภาคส่งให้เสร็จก่อนผ่านทางวิธีที่ 1 หรือวิธีที่ 2 ระบบจะทำการเลือกสายอากาศภาคส่งให้มีจำนวน $L_t = 3$ โดยใช้จำนวนสายอากาศภาครับ $L_r = N_r = 10$ และเมื่อทำการเลือกสายอากาศภาครับผ่านทางวิธีที่ 1 หรือวิธีที่ 2 ระบบจะทำการเลือกสายอากาศภาครับให้มีจำนวน $L_r = 3$ โดยใช้จำนวนสายอากาศภาคส่ง

$L_t = 3$ ดังนั้นสามารถเขียนเป็นวิธีที่ 4 ได้โดยนำวิธีที่ 2 และ 3 มาปรับปรุงให้สามารถเลือกสายอากาศได้ทั้งภาคส่งและรับ โดยวิธีที่ 4 สามารถตัดสินใจว่าเลือกสายอากาศภาคส่งก่อนถึงจะเลือกสายอากาศในภาครับ หรือเลือกสายอากาศภาครับก่อนเลือกสายอากาศภาคส่ง แสดงได้ตามผังไหลดังนี้



ภาพที่ 10 ขั้นตอนการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับแยกกัน

2. การเลือกสายอากาศภาคส่งและภาครับร่วมกัน

เมื่อมีการเลือกใช้ทั้งสายอากาศส่งและรับร่วมกัน ดังนั้นต้องมีการพิจารณา F_t และ F_r ร่วมกัน เมทริกซ์ช่องสัญญาณของการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับเท่ากับ $F_r H F_t$ หรือเมทริกซ์ \hat{H} ที่แถวและคอลัมน์แทนสายอากาศส่งและรับที่ไม่ถูกเลือกใช้เป็นศูนย์ ดังนั้นความจุช่องสัญญาณที่มีทั้ง F_t และ F_r เท่ากับ

$$C = E \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{L_t} \mathbf{F}_r \mathbf{H} \mathbf{F}_t \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}_r \right) \right] \quad (30)$$

การเลือกสายอากาศภาคส่งและภาครับไปพร้อมกันจะพิจารณาทั้ง \mathbf{F}_t และ \mathbf{F}_r ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับ ดังนั้นไม่สามารถใช้วิธีการเลือกสายอากาศวิธีที่ 1, 2 หรือ 3 ในการตัดช่องสัญญาณที่เลือกไป หากเพียงแต่นำหลักการในการพิจารณาไม่เลือกสายอากาศที่อยู่ใกล้กันมากจนผลของการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศในช่องสัญญาณมีอิทธิพลสูงต่อช่องสัญญาณมาใช้ร่วมกับวิธีพิจารณาทุกความเป็นไปได้ เรียกวินี้ว่าการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากพิจารณาทุกความเป็นไปได้ (Modified Exhaustive Search Selection Algorithm (ME)) สามารถเขียนบรรยายได้ดังนี้

วิธีที่ 5: Modified Exhaustive Search Selection Algorithm (ME)

1: Start with \mathbf{F}_t and \mathbf{F}_r

2: Find

$$\bar{\mathbf{F}}_t = \{ \mathbf{F}_t \in \bar{\mathbf{F}}_t | \text{all nonzero off-diagonal entries of } \mathbf{F}_t \mathbf{Z}_t \mathbf{F}_t < \epsilon \mathbf{Z}_{t,1,1} \}$$

3: Find

$$\bar{\mathbf{F}}_r = \{ \mathbf{F}_r \in \bar{\mathbf{F}}_r | \text{all nonzero off-diagonal entries of } \mathbf{F}_r \mathbf{Z}_r \mathbf{F}_r < \epsilon \mathbf{Z}_{r,1,1} \}$$

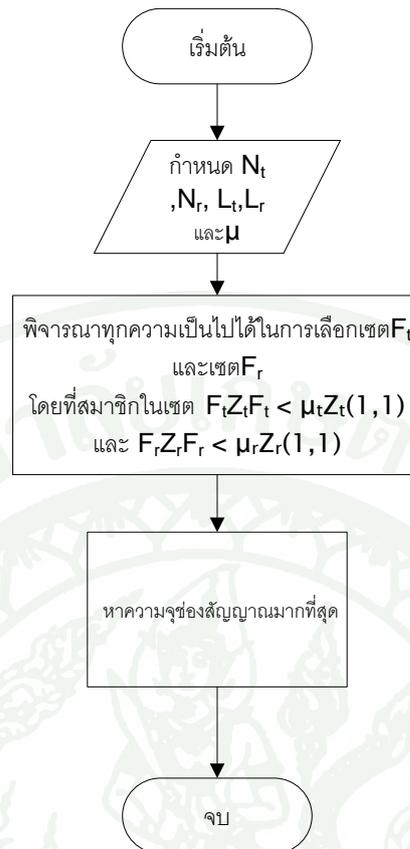
4: Find

$$\mathbf{F}_t^*, \mathbf{F}_r^* = \operatorname{argmax}_{\mathbf{F}_t \in \bar{\mathbf{F}}_t, \mathbf{F}_r \in \bar{\mathbf{F}}_r} \left(\log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{p}{N_t} \mathbf{F}_r \mathbf{H} \mathbf{F}_t \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}_r \right) \right)$$

5: return \mathbf{F}_t^* and \mathbf{F}_r^*

โดย $\bar{\mathbf{F}}_t = \{ \mathbf{F}_t^i \}$ เมื่อ $1 \leq i \leq L$ โดยหมายถึง รูปแบบการเลือกสายอากาศส่งจำนวน L จากจำนวนสายอากาศส่งทั้งหมดที่มี N_t โดยมีความแตกต่างกันทั้งหมดหรือเพียงบางส่วนมาจัดหมู่ โดยไม่ถือตำแหน่งหรือลำดับก่อนหลังเป็นสำคัญ ตัวอย่างถ้า $N_t = 2$ และ $L_t = 1$

$\bar{\mathbf{F}}_t = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\}$ เช่นเดียวกับ $\bar{\mathbf{F}}_r = \{ \mathbf{F}_r^j \}$ เมื่อ $1 \leq j \leq C_{N_r}^{L_r}$ สามารถเขียนเป็นผังไหลของการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับพร้อมกันดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการเลือกสายอากาศส่งและภาครับไปพร้อมกัน

วิธีการเลือกสายอากาศนี้มีหลักการเลือกสายอากาศคล้ายกับการเลือกสายอากาศแบบพิจารณาทุกความเป็นไปได้แต่จะเพิ่มการพิจารณาหาค่าความสัมพันธ์ของการร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศที่เลือกใช้ส่งหรือรับไม่ให้มีค่ามากเกินไปกว่าค่าขีดแบ่งที่กำหนดเอาไว้ กล่าวคือไม่พิจารณาเลือกใช้สายอากาศที่อยู่ใกล้เกินไปทำให้การร่วมคู่ควาระหว่างสายอากาศมีผลกับระบบจนทำให้ความจุลดต่ำลง ถึงแม้วิธีการเลือกสายอากาศร่วมกันนี้จะลดความซับซ้อนในการเลือกสายอากาศส่งไปเมื่อเทียบกับการเลือกสายอากาศจากทุกแบบที่เป็นไปได้ แต่มีความซับซ้อนมากกว่าการเลือกสายอากาศส่งและรับแยกกัน โดยการคำนวณความซับซ้อนพิจารณาได้จากจำนวนครั้งที่ต้องกลับมาคำนวณหาความจุของสัญญาณ ซึ่งความซับซ้อนในการเลือกสายอากาศแยกกันที่แก้ไขจากวิธีของ Gorokhov ให้เสร็จก่อนในภาคส่งและถึงเลือกสายอากาศภาครับจะน้อยกว่า $[\frac{N_t}{2} (N_t + 1) - \frac{L_t}{2} (L_t + 1)] + [\frac{N_r}{2} (N_r + 1) - \frac{L_r}{2} (L_r + 1)]$ แต่ความซับซ้อนในการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ในการเลือกสายอากาศพร้อมกันทั้งภาคส่งและรับจะเท่ากับ $C_{N_t}^{L_t} \times C_{N_r}^{L_r}$ เห็นได้ว่ายังมีจำนวนสายอากาศเพิ่มมากขึ้นยิ่งทำให้ใช้เวลาในการเลือกสายอากาศที่แตกต่างกันมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างถ้า $N_t = 10, N_r = 10, L_t = 3, L_r = 3$ วิธีแยกกันจำนวนการคำนวณเท่ากับ 98 ครั้ง วิธีร่วมกัน

จำนวนการคำนวณเท่ากับ 14,400 ครั้ง โดยแสดงตารางจำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น 2 ตาราง ตารางที่ 1 สำหรับวิธีการเลือกสายอากาศภาคส่ง ตารางที่ 2 สำหรับวิธีการเลือกสายอากาศภาครับและตารางที่ 3 สำหรับวิธีการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบจำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณด้วยวิธีต่างๆในการเลือกสายอากาศภาคส่ง

วิธีการ	จำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณ
เลือกจากทุกความเป็นไปได้	$C_{N_t}^{L_t}$
เลือกของGorokhov ใช้เลือกภาคส่ง	$[\frac{N_t}{2} (N_t+1) - \frac{L_t}{2} (L_t + 1)]$
เลือกด้วยวิธีที่ 2	$< [\frac{N_t}{2} (N_t+1) - \frac{L_t}{2} (L_t + 1)]$

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบจำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณด้วยวิธีต่างๆในการเลือกสายอากาศภาครับ

วิธีการ	จำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณ
เลือกจากทุกความเป็นไปได้	$C_{N_r}^{L_r}$
เลือกของGorokhov ใช้เลือกภาครับ	$[\frac{N_r}{2} (N_r+1) - \frac{L_r}{2} (L_r + 1)]$
เลือกด้วยวิธีที่ 3	$< [\frac{N_r}{2} (N_r+1) - \frac{L_r}{2} (L_r + 1)]$

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบจำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณด้วยวิธีต่างๆในการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับ

วิธีการ	จำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณ
เลือกจากทุกความเป็นไปได้	$C_{N_t}^{L_t} \times C_{N_r}^{L_r}$
เลือกด้วยวิธีที่ 4	$< C_{N_t}^{L_t} \times C_{N_r}^{L_r}$
เลือกของGorokhov ใช้เลือกภาคส่งและรับตามลำดับ	$[\frac{N_t}{2} (N_t+1) - \frac{L_t}{2} (L_t + 1)] + [\frac{N_r}{2} (N_r+1) - \frac{L_r}{2} (L_r + 1)]$

ตารางที่ 3 (ต่อ)

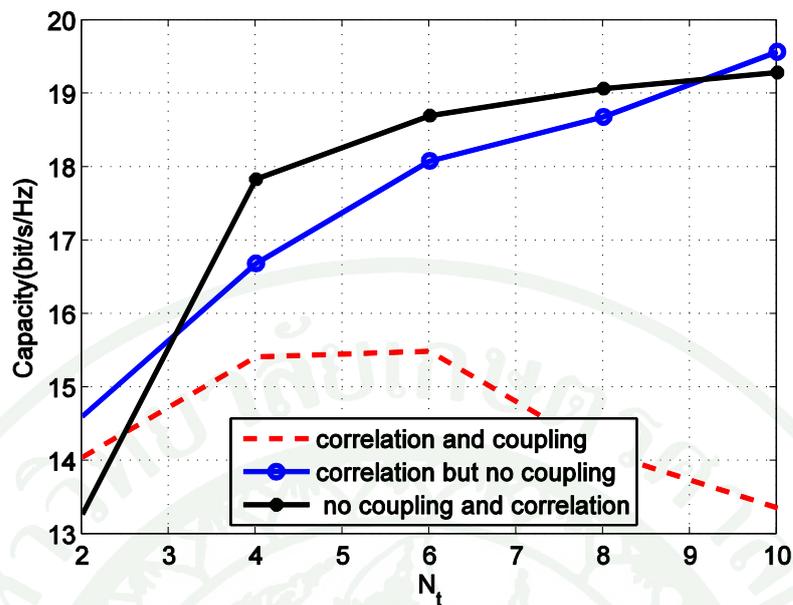
วิธีการ	จำนวนการคำนวณความจุช่องสัญญาณ
เลือกด้วยวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ตามลำดับ	$< [\frac{N_t}{2} (N_t + 1) - \frac{L_t}{2} (L_t + 1)] + [\frac{N_r}{2} (N_r + 1) - \frac{L_r}{2} (L_r + 1)]$



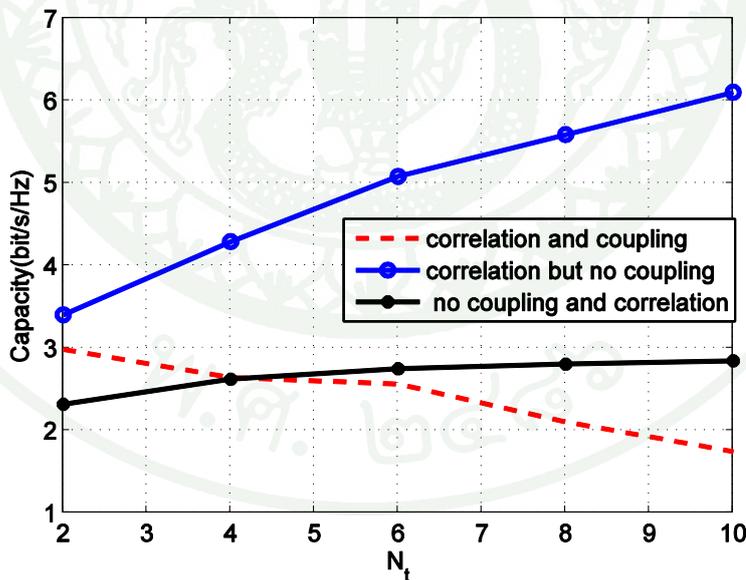
ผลและวิจารณ์

ผล

การทดสอบสมรรถนะ(performance)ของการเลือกสายอากาศแต่ละวิธีใช้โปรแกรม MATLAB ในการทดสอบและจำลองช่องสัญญาณ โดยใช้วิธีมอนติคาโล(monte carlo simulation) โดยวิธีการมอนติคาโลเป็นการหาค่าตัวแปรที่ต้องการจากการเฉลี่ยจากผลการทดลองสุ่มจำนวน 10,000 ครั้ง วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณจางหายเรย์ลีย์ ดังนั้นอัตราขยายช่องสัญญาณหรือสมาชิกในเมทริกซ์ช่องสัญญาณเป็นตัวแปรสุ่ม (random variable) ที่มีการกระจายแบบปกติ (normal distribution) โดยมีค่าเฉลี่ย (mean) เป็น 0 และมีค่าความแปรปรวน(variance)เท่ากับ หรือในบทนี้เปรียบเทียบสมรรถนะของช่องสัญญาณอุดมคติและช่องสัญญาณที่พิจารณาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศ ในการเลือกสายอากาศเฉพาะภาคส่งหรือรับโดยวิธีการเลือกสายอากาศแบบต่างๆ หลังจากนั้นนำเสนอการเลือกสายอากาศทั้งภาคส่งและรับโดยวิธีเลือกแยกกันและวิธีเลือกร่วมกัน โดยกำหนดให้ทุกผลการทดลองใช้สายอากาศใดโพลที่มีขนาดรัศมีเท่ากับ 0.001 ความยาวคลื่น และมีระยะการแผ่คลื่นที่มีความยาว 0.25 ความยาวคลื่น งานวิจัยของ (Shen *et al.*, 2010) เปรียบเทียบสมรรถนะของช่องสัญญาณโมโมที่พิจารณาและไม่พิจารณาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศโดยเลือกใช้สายอากาศภาคส่งที่มีทั้งหมด ภาพที่ 1 เป็นการจำลองระบบโมโมที่ใช้ SNR สูงที่ 20 เดซิเบล มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่ง(D_t) และภาครับ(D_r) ที่แคบเท่ากับ 0.5 ความยาวคลื่น(λ) เช่นกัน ผลการทดลองเห็นได้ว่าในช่วงที่จำนวนสายอากาศส่งมีน้อย ความจุช่องสัญญาณที่พิจารณาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นพร้อมกับจำนวนสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีมากขึ้นจะทำให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศมีขนาดที่น้อยลง เป็นผลทำให้การร่วมคู่ควบมีสูงขึ้นและความจุช่องสัญญาณลดลง ในขณะที่ช่องสัญญาณอุดมคติที่ไม่มีการร่วมคู่ควบ ความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นตามจำนวนสายอากาศส่งที่เพิ่มขึ้น จึงเห็นได้ว่าการร่วมคู่ควบเป็นปัจจัยที่มีผลกับความจุช่องสัญญาณหลายสายอากาศอย่างมีนัยสำคัญ และภาพที่ 13 เป็นการจำลองช่องสัญญาณโมโมที่ใช้ SNR ต่ำ 0 เดซิเบล มี $D_t = D_r = 0.5 \lambda$ ภาพที่ 12 และภาพที่ 13 มีความแตกต่างกันในเฉพาะ SNR แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความจุช่องสัญญาณและจำนวนสายอากาศส่งมีลักษณะคล้ายกัน จากสถานะในภาพที่ 12 โดยช่องสัญญาณที่พิจารณาสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศที่มีจำนวนสายอากาศส่งเท่ากับ 6 สายทำให้ความจุช่องสัญญาณมีค่าสูงสุด และจากสถานะในภาพที่ 13 พบว่าจำนวนสายอากาศส่งที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับสองสาย

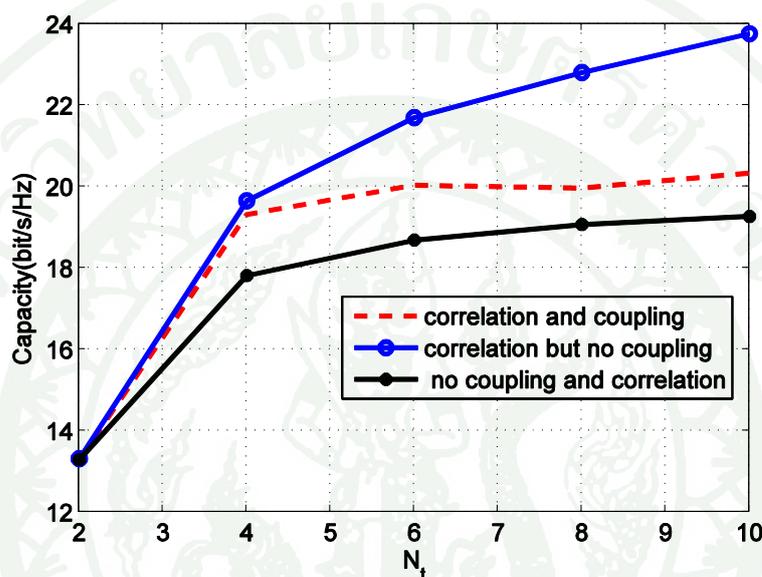


ภาพที่ 12 แสดงความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกันในช่วงที่มี SNR สูงแต่ขอบเขตของชุดสายอากาศ มีขนาดแคบ ($\text{SNR} = 20 \text{ dB}$, $D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $N_r = 3$)



ภาพที่ 13 แสดงความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกันในช่วงที่มี SNR ต่ำและขอบเขตของชุดสายอากาศ มีขนาดแคบ ($\text{SNR} = 0 \text{ dB}$, $D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $N_r = 3$)

จากภาพที่ 14 เป็นการจำลองช่องสัญญาณ โมโมที่ใช้ SNR 20 เดซิเบล มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่งและขอบเขตของชุดสายอากาศภาครับเท่ากับ 1 ความยาวคลื่น โดยแสดงให้เห็นว่าเมื่อขอบเขตของชุดสายอากาศมีขนาดที่กว้างขึ้นหรือระยะห่างระหว่างสายอากาศมากขึ้นจะมีผลให้ความจุช่องสัญญาณมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลในภาพที่ 12 ที่เป็นเช่นนี้เพราะผลกระทบจากการร่วมคู่ควบในกรณีในภาพที่ 14 มีน้อยกว่า



ภาพที่ 14 แสดงความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกันไปในช่วงที่มีกำลังส่งสูงและขอบเขตของชุดสายอากาศกว้าง (SNR = 20 dB , $D_t = D_r = 1 \lambda$, $N_r = 3$)

จากผลการทดลองตามที่ได้แสดงมา เห็นได้ว่าการร่วมคู่ควบมีผลกระทบมากกับความจุช่องสัญญาณ และการลดการร่วมคู่ควบคือการเลือกใช้สายอากาศที่ระยะห่างที่เหมาะสมและคำนึงถึงสภาวะช่องสัญญาณ ดังนั้นการเลือกใช้สายอากาศจึงมีความสำคัญ

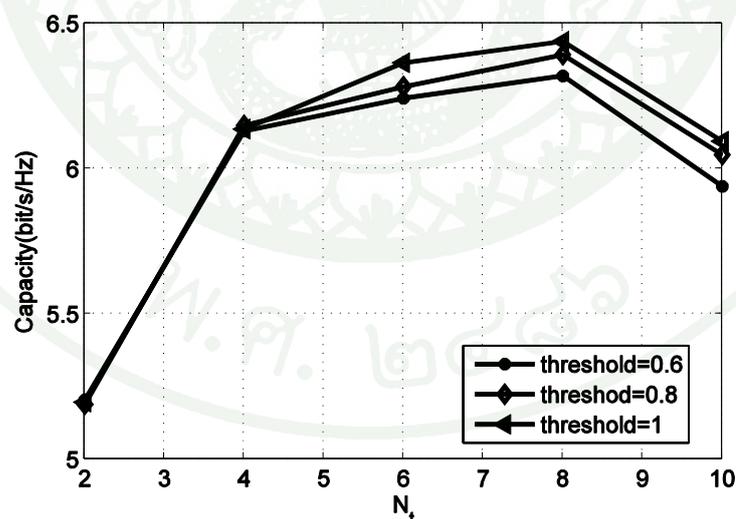
การเลือกสายอากาศภาคส่งหรือรับ

ในการทดลองการเลือกสายอากาศภาคส่งหรือรับ ผู้วิจัยเปรียบเทียบการเลือกสายอากาศ 4 วิธี ได้แก่ การเลือกสายอากาศจากทุกความเป็นไปได้ การเลือกใช้ทุกสายอากาศ การเลือกสายอากาศของ Gorokhov และการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับช่องสัญญาณที่พิจารณาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศและการร่วมคู่ควบระหว่างสายอากาศ โดยทำการจำลองช่องสัญญาณที่มีตัวแปรที่แตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

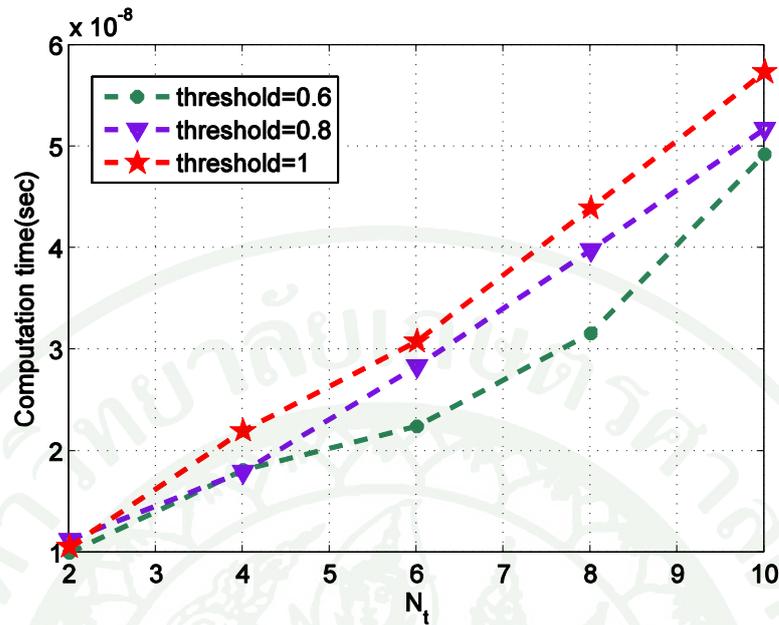
(SNR) จำนวนสายอากาศภาคส่งและรับ ขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่งและขอบเขตของชุดสายอากาศภาครับ โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละวิธีการด้วยความจุช่องสัญญาณเออร์กออดิก และเวลาที่ใช้การเลือกสายอากาศ นอกจากนี้ความจุช่องสัญญาณเอาต์เดจ (outage capacity) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดเอาต์เดจ (probability of outage)

การเลือกสายอากาศภาคส่ง

ในภาพที่ 15 และ 16 ทดลองเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov หรือวิธีการที่ 2 โดยใช้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.6 0.8 และ 1 ในสภาวะช่องสัญญาณที่มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่งและขอบเขตของชุดสายอากาศภาครับเท่ากับ 0.7 ความยาวคลื่น ใช้ SNR 5 เดซิเบล $L_t = 2N_r = 3$ ผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดค่าขีดแบ่งไว้ที่ค่าแตกต่างกันจะได้สมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน โดยหากกำหนดค่าขีดแบ่งไว้ที่ 1 เสมือนว่าเป็นการเลือกสายอากาศแบบ Gorokhov จะส่งผลให้ความจุช่องสัญญาณของการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov มีค่าเท่ากับ Gorokhov ตามภาพที่ 15 แต่หากพิจารณาถึงผลการทดลองด้านเวลาการเลือกสายอากาศแสดงตามภาพที่ 16 เห็นได้ว่าหากเลือกค่าขีดแบ่งที่มีค่าเข้าใกล้ 1 ทำให้ระบบใช้เวลาในการเลือกสายอากาศที่นานกว่าหากเลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่เข้าใกล้ 0 โดยเวลาในการเลือกสายอากาศหามาจากการจับเวลาในโปรแกรม Matlab ซึ่งสเปกของเครื่องคอมพิวเตอร์มีผลกับเวลาในการเลือกสายอากาศ

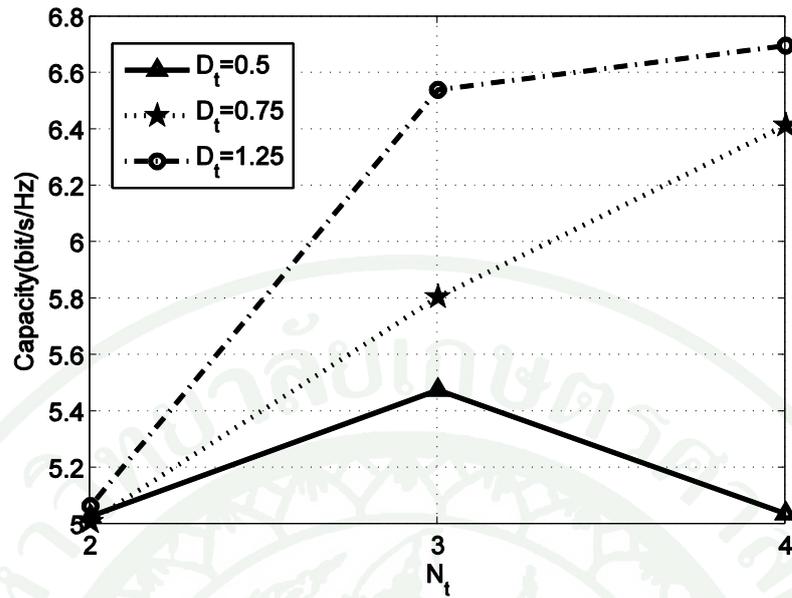


ภาพที่ 15 แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณ (SNR = 5 dB, $D_t = D_r = 0.7 \lambda$, $L_t = 2$, $N_r = 3$)

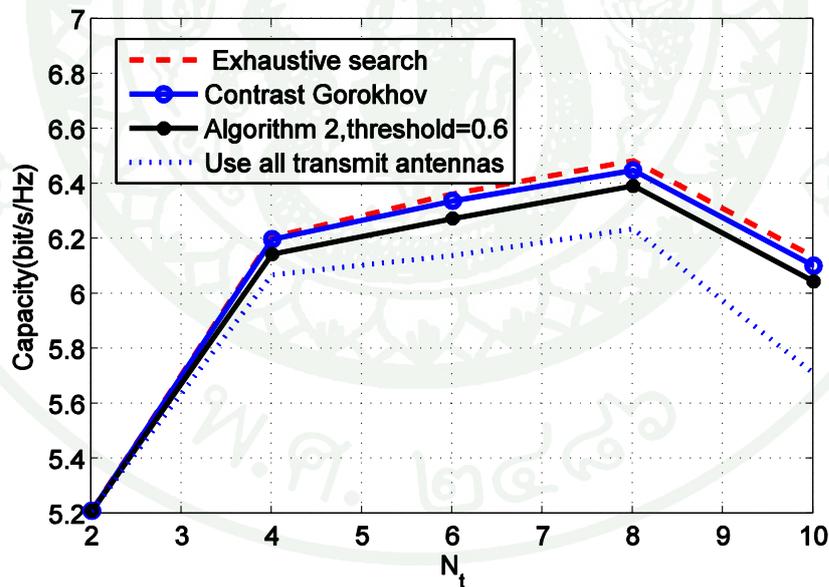


ภาพที่ 16 แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านเวลาการเลือกสายอากาศส่ง (SNR = 5 dB , $D_t = D_r = 0.7 \lambda$, $L_t = 2$, $N_r = 3$)

นอกจากนั้น D_t และ D_r มีผลกับความจุช่องสัญญาณโดยหากกำหนด D_t เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งแล้วปรับเปลี่ยนค่า D_r เพื่อพิจารณาแนวโน้มความจุช่องสัญญาณที่ได้จากวิธีเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีการที่ 2) จากภาพที่ 17 ใช้ SNR = 5 dB มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาครับเท่ากับ 1 ความยาวคลื่น $L_t = 2N_r = 3$ ใช้ค่าขีดแบ่งภาคส่งที่ 0.6 โดยเห็นได้ว่ากรณีนี้หากเลือกช่องสัญญาณมี $D_t = 0.5\lambda$ จำนวนสายอากาศส่งที่เหมาะสมเท่ากับ 3 สาย แต่หากช่องสัญญาณมี $D_t = 0.75\lambda$ หรือ $D_t = 1.25\lambda$ เห็นได้ว่าจำนวนสายอากาศส่งที่เหมาะสมอาจมากกว่า 4 สาย เพราะความกว้างของขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่งมีมากขึ้น

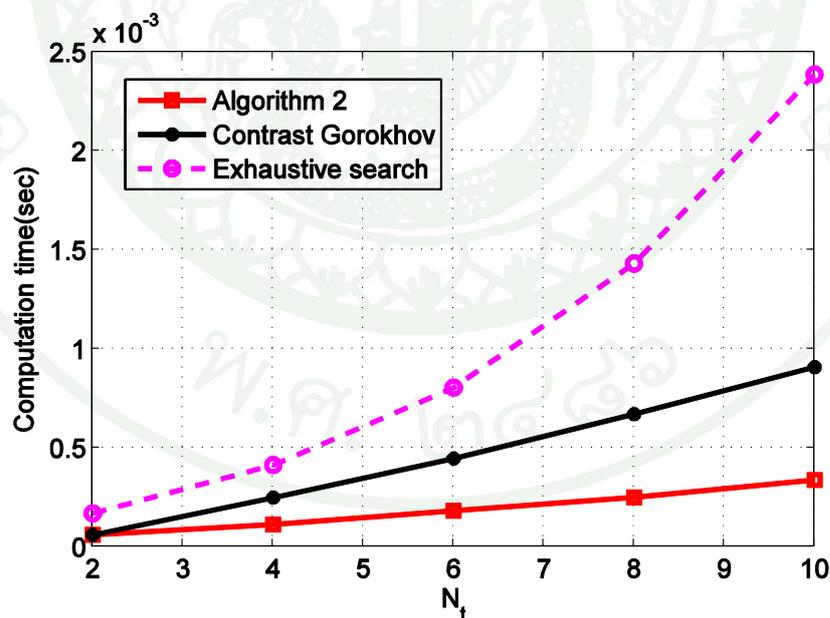


ภาพที่ 17 แสดงถึงความกว้างของขอบเขตของชุดสายอากาศมีผลกับความจุช่องสัญญาณ (SNR = 5 dB, $D_t = D_r = 0.7 \lambda$, $L_t = 2$, $N_r = 3$)



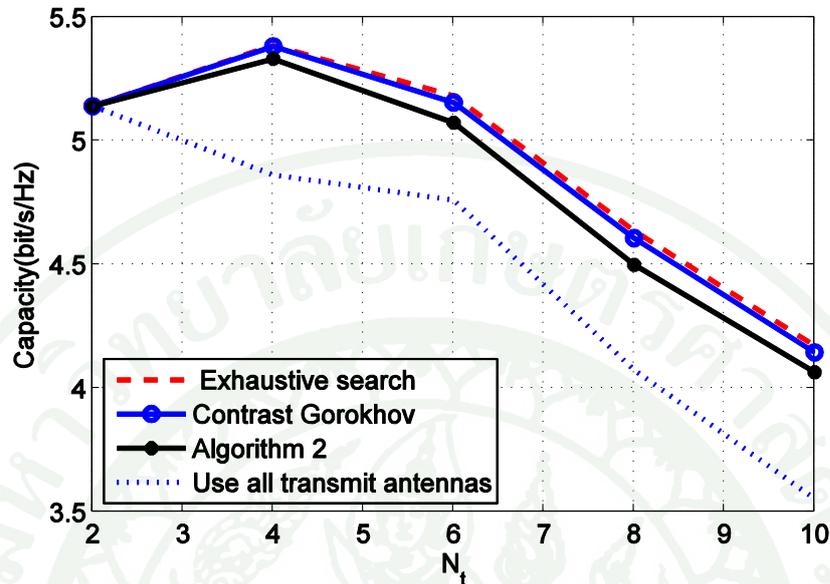
ภาพที่ 18 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกสายอากาศอื่น (SNR = 5 dB, $D_t = D_r = 0.7 \lambda$, $L_t = 2$, $N_r = 3$)

จากภาพที่ 18 และ 19 วิธีเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2) เลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.6 ในสภาวะช่องสัญญาณที่มีขอบเขตของชุดสายอากาศส่งและรับเท่ากับ 0.7 ความยาวคลื่นใช้ SNR 5 เดซิเบล เลือกสายอากาศส่งจำนวน 2 สายและใช้สายอากาศรับจำนวน 3 สาย สาเหตุที่เลือกใช้ค่าขีดแบ่งภาคส่งที่ 0.6 เนื่องจากให้ผลการทดลองสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณตามภาพที่ 18 และเวลาในการเลือกสายอากาศตามภาพที่ 19 ที่ค่อนข้างดีทั้งคู่ จากภาพที่ 18 เห็นได้ว่าที่ตำแหน่งสายอากาศส่งมีจำนวนเท่ากับ 8 สาย ความจุช่องสัญญาณจากการเลือกสายอากาศทุกแบบมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศในชุดสายอากาศภาคส่งมีขนาดแคบขึ้น ดังนั้นผลของการร่วมคู่ควมมีส่วนสำคัญในการลดความจุช่องสัญญาณ จากภาพที่ 19 เห็นได้ว่าเวลาในการเลือกสายอากาศโดยวิธีการเลือกจากทุกความเป็นไปได้ใช้เวลาในการเลือกนานที่สุด และเมื่อมีจำนวนสายอากาศภาคส่งเพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่างของเวลาการเลือกสายอากาศเมื่อเทียบกับวิธีการเลือกสายอากาศของ Gorokhov และวิธีการเลือกสายอากาศแก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเวลาในวิธีการเลือกสายอากาศของ Gorokhov และวิธีการเลือกสายอากาศแก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2) เห็นได้ว่าวิธีการเลือกสายอากาศแก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2) ใช้เวลาในการเลือกสายอากาศน้อยกว่าวิธีการเลือกสายอากาศของ Gorokhov โดยผลต่างของเวลาการเลือกสายอากาศขึ้นอยู่กับค่าขีดแบ่งที่ถูกกำหนดไว้สำหรับวิธีการเลือกสายอากาศแก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2)



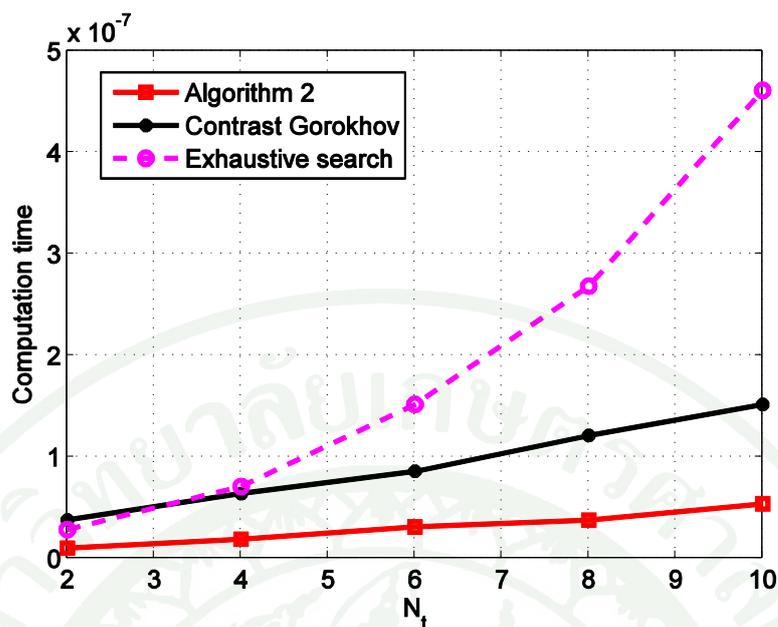
ภาพที่ 19 แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศส่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกสายอากาศ

แบบอื่น (SNR = 10 dB , $D_t = D_r = 0.7 \lambda$, $L_t = 2$, $N_r = 3$,
threshold of algorithm 2 = 0.6)



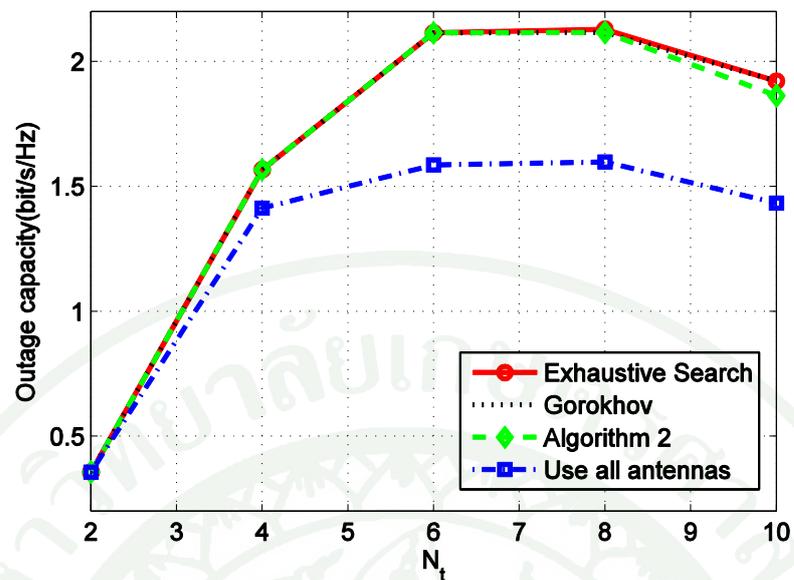
ภาพที่ 20 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณจากการเลือกสายอากาศหลายวิธี (SNR = 5 dB ,
 $D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $L_t = 2$, $N_r = 3$)

ภาพที่ 20 และ 21 เลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2) เลือกใช้ค่าจัดแบ่งที่ 0.8 ในสภาวะช่องสัญญาณที่มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่งและรับเท่ากับ 0.5 ความยาวคลื่น ใช้ SNR 5 เดซิเบล เลือกสายอากาศภาคส่งจำนวน 2 สายและใช้สายอากาศภาครับจำนวน 3 สาย สาเหตุที่เลือกใช้ค่าจัดแบ่งภาคส่งที่ 0.8 เนื่องจากให้ผลการทดลองสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณตามภาพที่ 20 และเวลาในการเลือกสายอากาศตามภาพที่ 21 ที่ค่อนข้างดีทั้งคู่ จากกรณีสถานะช่องสัญญาณในภาพที่ 20 เห็นได้ว่าการมีจำนวนสายอากาศภาคส่งเท่ากับ 4 สาย ทำให้มีความจุช่องสัญญาณมากที่สุดสำหรับวิธีการเลือกสายอากาศจากทุกความเป็นไปได้ วิธีการเลือกสายอากาศของ Gorokhov และวิธีการเลือกสายอากาศแก้ไขจาก Gorokhov(วิธีที่ 2) จากภาพที่ 19 และ 21 เห็นได้ว่าเวลาในการเลือกสายอากาศมีแนวโน้มไปทางเดียวกันแม้สถานะของช่องสัญญาณจากกรณีภาพที่ 19 และ 21 จะต่างกัน



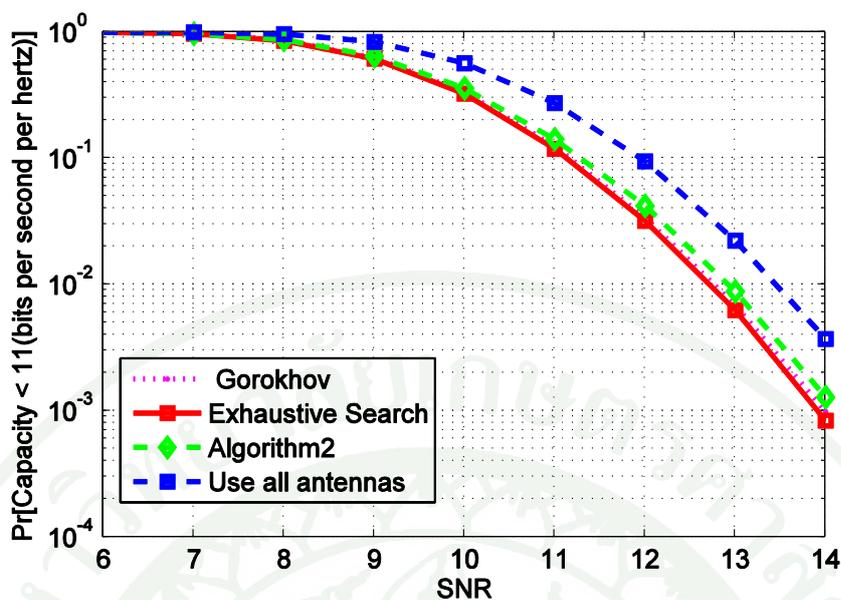
ภาพที่ 21 แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศส่งในหลายๆแบบการทดลอง (SNR = 5 dB, $D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $L_t = 2$, $N_r = 3$)

ภาพที่ 15, 18 และ 20 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณในรูปแบบเออร์กอดิก โดยใช้วิธีการเลือกสายอากาศภาคส่งจากทุกความเป็นไปได้ การเลือกใช้ทุกสายอากาศ การเลือกสายอากาศของ Gorokhov และการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2) โดยในแต่ละภาพที่แสดงเป็นกราฟระหว่างจำนวนสายอากาศภาคส่งและความจุเออร์กอดิกในหน่วยบิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ ภาพที่ 16, 19 และ 21 แสดงสมรรถนะด้านเวลาการเลือกสายอากาศ โดยใช้วิธีการเลือกสายอากาศภาคส่งจากทุกความเป็นไปได้ การเลือกใช้ทุกสายอากาศ การเลือกสายอากาศของ Gorokhov และการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 2) โดยในแต่ละภาพที่แสดงเป็นกราฟระหว่างจำนวนสายอากาศภาคส่งและเวลาในการเลือกสายอากาศในหน่วยวินาที



ภาพที่ 22 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณแบบเอาต์เดจ (SNR = 0 dB , $D_t = D_r = 1$ λ , $L_t = 2$, $N_r = 3$)

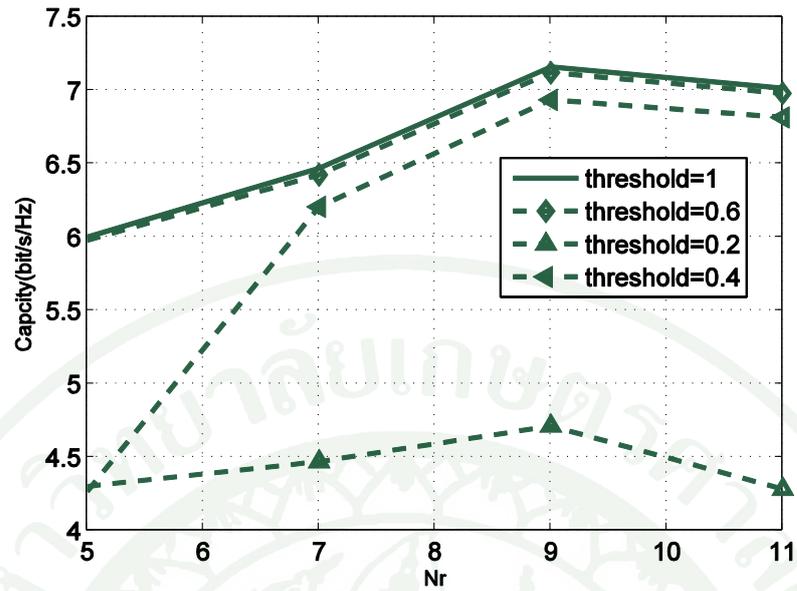
ภาพที่ 22 และ 23 เป็นการแสดงผลการทดลองในกรณีที่ช่องสัญญาณที่มีการจางหายอย่างช้าจึงแสดงความจุในรูปแบบเอาต์เดจและความน่าจะเป็นที่จะเกิดเอาต์เดจตามลำดับ ในสถานะช่องสัญญาณที่มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่งและรับเท่ากับ 1 ความยาวคลื่น ใช้ SNR 0 เดซิเบล เลือกลายอากาศภาคส่งจำนวน 2 สายและใช้สายอากาศรับจำนวน 3 สาย rate=11 bits/s/Hz จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความจุช่องสัญญาณเออร์กอดิกในช่องสัญญาณที่มีการจางหายอย่างเร็วมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับความจุช่องสัญญาณเอาต์เดจในช่องสัญญาณที่มีการจางหายอย่างช้า ดังนั้นในผลการทดลองต่อไปในด้านความจุช่องสัญญาณผู้วิจัยขอแสดงผลการทดลองเป็นความจุช่องสัญญาณเออร์กอดิกเพียงอย่างเดียว



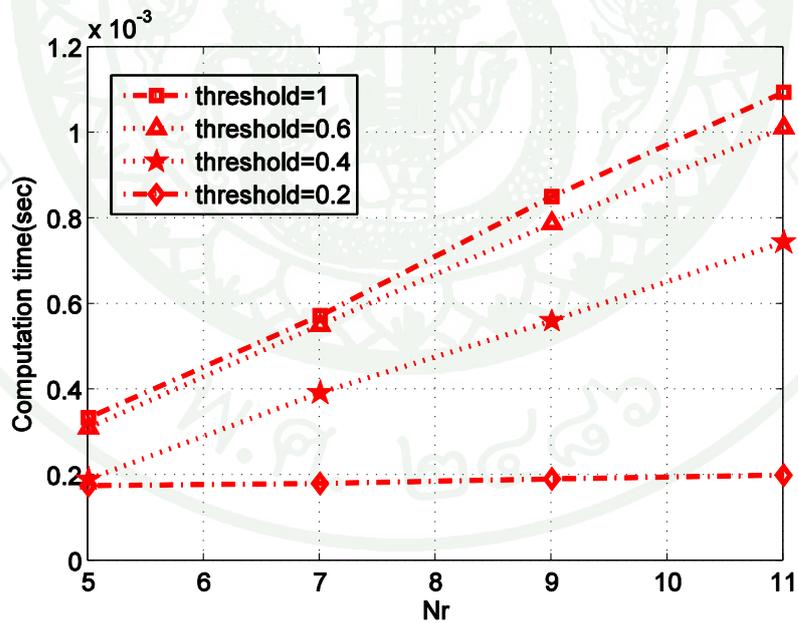
ภาพที่ 23 แสดงสมรรถนะด้านความน่าจะเป็นที่จะเกิดเอาต์เตจ (SNR = 0 dB , $D_t = D_r = 1$
 λ , $L_t = 2$, $N_r = 3$, Rate = $11(\frac{\text{bits}}{\text{s}})/\text{Hz}$)

การเลือกสายอากาศเฉพาะภาครับ

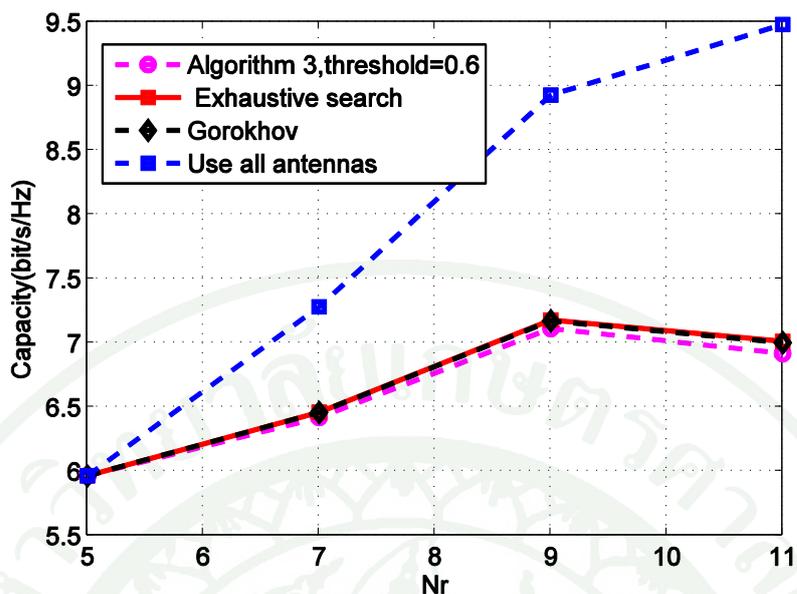
การเลือกสายอากาศเฉพาะภาครับจะกำหนดให้เลือกใช้สายอากาศภาคส่งเท่ากับจำนวนสายอากาศภาคส่งทั้งหมดที่มี จากภาพที่ 24,25,26 และ 27 ใช้ SNR เท่ากับ 0 เดซิเบล ใช้จำนวนสายอากาศภาคส่งทั้งหมดเท่ากับ 5 สาย มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาคส่งและขอบเขตของชุดสายอากาศภาครับเท่ากับ 1 ความยาวคลื่น เลือกใช้สายอากาศภาครับเท่ากับ 5 สาย กำหนดให้ใช้ค่าจัดแบ่งอยู่ที่ 0.2, 0.4, 0.6 และ 1 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณตามภาพที่ 24,26 และ 29 จากภาพที่ 24 เห็นได้ว่าหากเลือกค่าจัดแบ่งอยู่ที่ 1 สำหรับวิธีเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 3) ได้ค่าความจุช่องสัญญาณที่มากที่สุดเทียบเท่ากับการเลือกสายอากาศแบบ Gorokhov และเห็นได้ว่าหากเลือกค่าจัดแบ่งที่ 0.6 จะลดเวลาในการเลือกสายอากาศเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับใช้ค่าจัดแบ่งที่ 1 ตามภาพที่ 25 ในขณะที่ความจุช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าการเลือกใช้ค่าจัดแบ่งที่ 1 เพียงเล็กน้อย



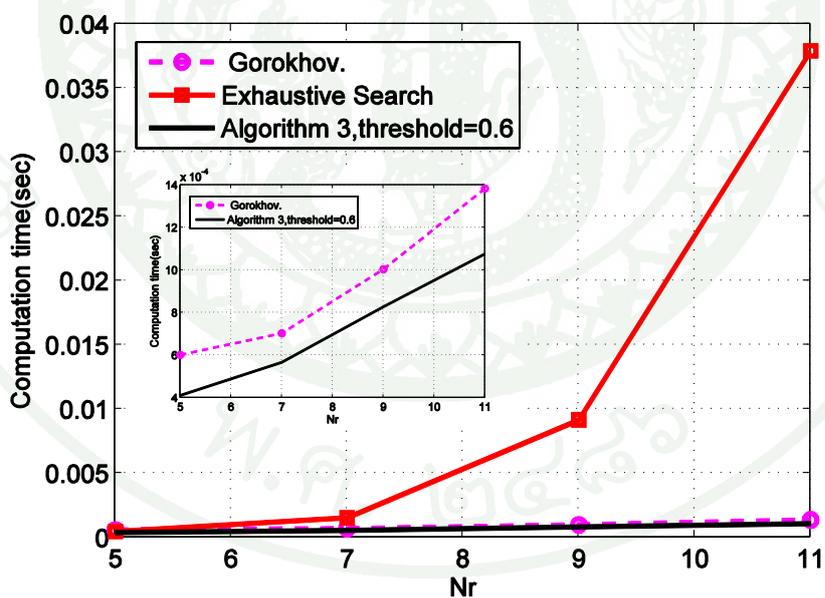
ภาพที่ 24 แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านความจุ
ช่องสัญญาณ (SNR = 0 dB , $D_t = D_r = 1 \lambda$, $L_r = 5$, $N_t = 5$)



ภาพที่ 25 แสดงผลการทดลองของการกำหนดค่าขีดแบ่งที่มีผลกับสมรรถนะด้านเวลาการเลือก
สายอากาศรับ (SNR = 0 dB , $D_t = D_r = 1 \lambda$, $L_r = 5$, $N_t = 5$)



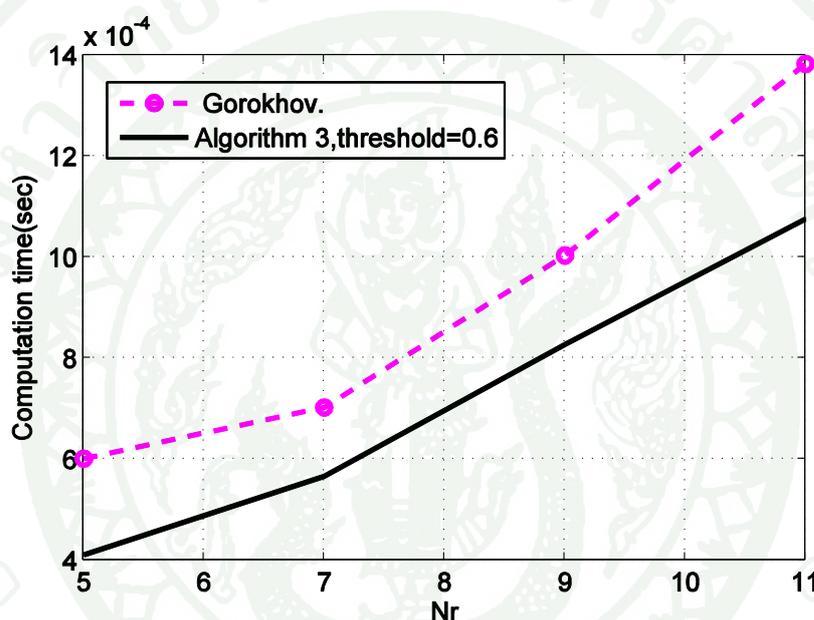
ภาพที่ 26 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกสายอากาศอื่น (SNR = 0 dB , $D_t = D_r = 1 \lambda$, $L_r = 5$, $N_t = 5$, threshold of algorithm 3 = 0.6)



ภาพที่ 27 แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศรับเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกสายอากาศอื่น

(SNR = 0 dB , $D_t = D_r = 1 \lambda$, $L_r = 5$, $N_t = 5$, threshold of algorithm 3 = 0.6)

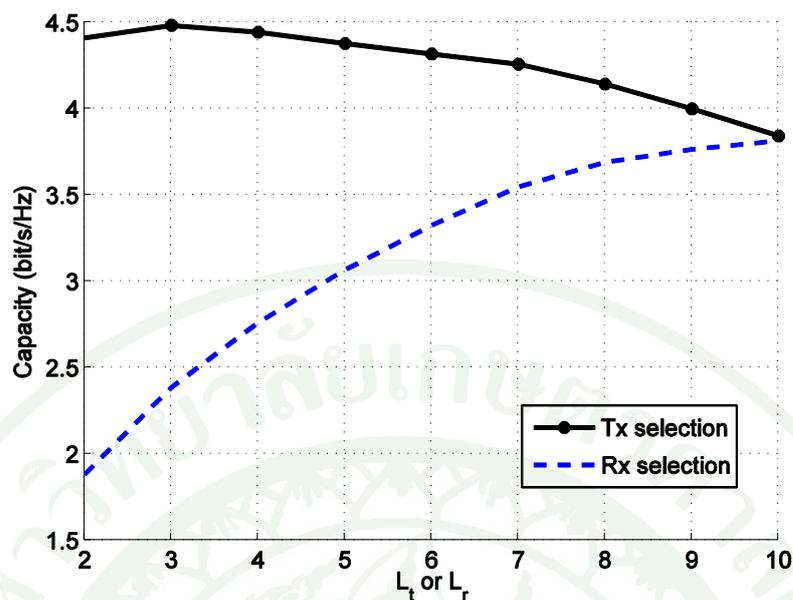
จากภาพที่ 26 และ 27 เลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.6 สำหรับการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 3) สาเหตุที่เลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.6 เนื่องจากให้ผลการทดลองสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณตามภาพที่ 26 และเวลาในการเลือกสายอากาศตามภาพที่ 27 ที่ค่อนข้างดีทั้งคู่ และเห็นได้ว่าวิธีการเลือกสายอากาศแบบ Gorokhov และวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 3) ใช้เวลาในการเลือกสายอากาศที่น้อยกว่าวิธีการเลือกสายอากาศจากทุกความเป็นไปได้อยู่มาก ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบเรื่องเวลาในการเลือกสายอากาศเฉพาะวิธีการเลือกสายอากาศแบบ Gorokhov และวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (วิธีที่ 3) ตามภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศรับเมื่อเปรียบเทียบวิธีการเลือกสายอากาศ

ที่แก้ไขจาก Gorokhov กับวิธีการเลือกสายอากาศแบบ Gorokhov

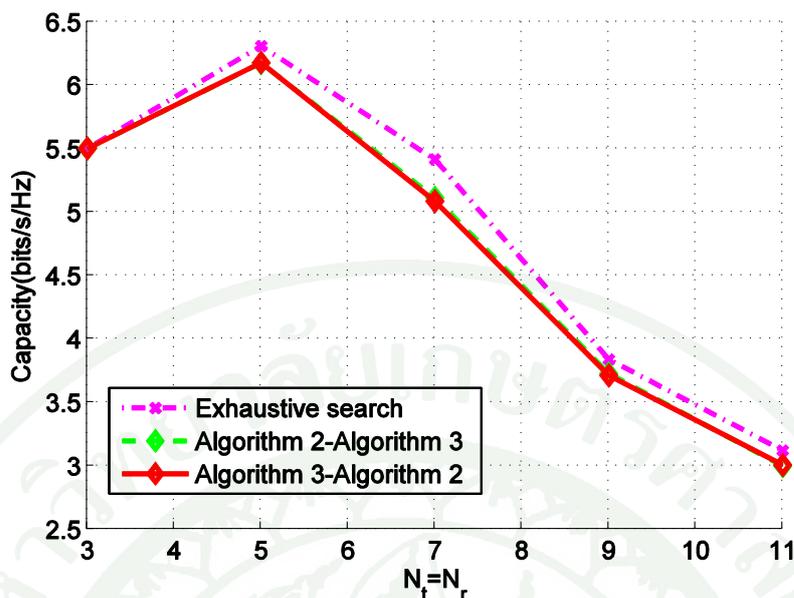
สำหรับการเลือกสายอากาศภาครับนั้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการไม่เลือกหรือการใช้ทุกสายอากาศในภาครับที่มีอยู่ทั้งหมดทำให้ระบบมีความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าการเลือกใช้งานสายอากาศในภาครับตามภาพที่ 29 เนื่องจากที่ตำแหน่งภาครับไม่ได้พิจารณาถึงกำลังที่ใช้ เหมือนกับในภาคส่งที่การเลือกสายอากาศดีกว่าการไม่เลือกสายอากาศหรือการใช้ทุกสายอากาศในภาคส่ง



ภาพที่ 29 ผลสรุปของสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณเมื่อเปลี่ยนจำนวนสายอากาศที่เลือกใช้ในภาคส่งและรับ

การเลือกสายอากาศภาคส่งและภาครับ

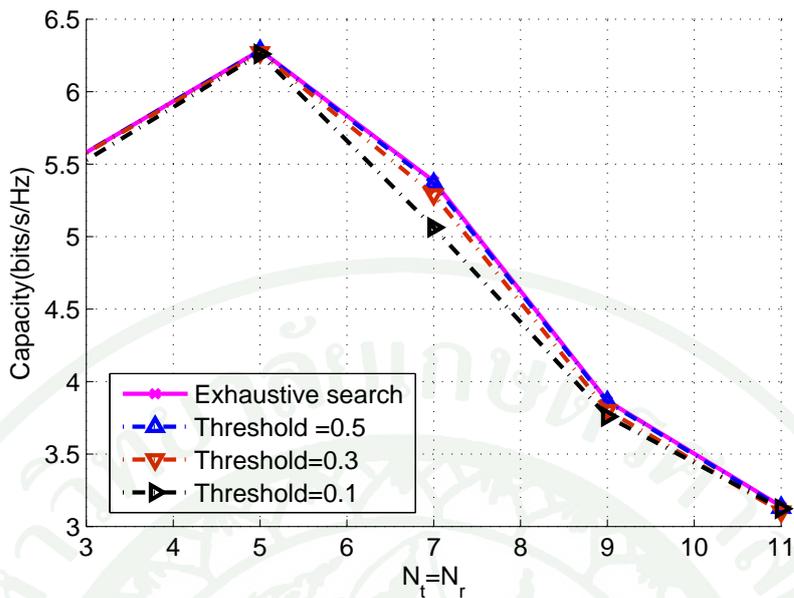
การทดลองการเลือกสายอากาศภาคส่งและรับนั้นผู้วิจัยได้ทดลองใช้การเลือกสายอากาศ 5 วิธีได้แก่การเลือกสายอากาศจากทุกความเป็นไปได้ การเลือกใช้ทุกสายอากาศ การเลือกสายอากาศของ Gorokhov การเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (รวมวิธีที่ 2 และ 3) และการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากพิจารณาทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) โดยวิธีการเลือกสายอากาศของ Gorokhov และการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (รวมวิธีที่ 2 และ 3) ต้องทำการเลือกสายอากาศภาคส่งหรือรับก่อนเลือกสายอากาศภาครับหรือส่ง



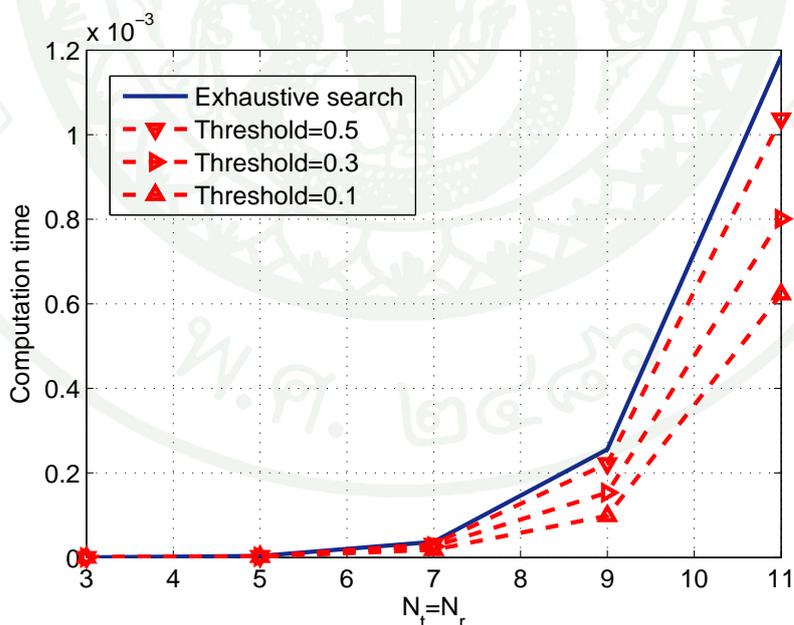
ภาพที่ 30 เปรียบเทียบความจุช่องสัญญาณระหว่างการเลือกสายอากาศส่งก่อนกับเลือกภาครับก่อน (SNR = 5 dB , $D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $L_r = 3$, threshold of algorithm 2 and 3 = 0.8)

ภาพที่ 30 แสดงการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (รวมวิธีที่ 2 และ 3) โดยเปรียบเทียบระหว่างเลือกสายอากาศส่งก่อนเลือกสายอากาศรับและเลือกสายอากาศรับก่อนเลือกสายอากาศส่ง ใช้ SNR เท่ากับ 5 เดซิเบล ใช้จำนวนสายอากาศส่งทั้งหมดเท่ากับ 5 สาย มีขอบเขตของชุดสายอากาศส่งและขอบเขตของชุดสายอากาศรับเท่ากับ 0.5 ความยาวคลื่น กำหนดการเลือกใช้สายอากาศรับและส่งเท่ากับ 3 สาย กำหนดให้มีการใช้ค่าขีดแบ่งของภาครับและส่งที่ 0.8 จากผลการทดลองสรุปว่าการเลือกสายอากาศส่งก่อนกับการเลือกสายอากาศรับก่อนได้ผลการทดลองด้านความจุช่องสัญญาณและเวลาในการเลือกสายอากาศที่ไม่แตกต่างกันเมื่อทำการทดลองซ้ำหลายครั้ง

จากผลการทดลองตามภาพที่ 31 และ 32 ใช้วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากพิจารณาทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) เลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.1 ถึง 0.5 ในสภาวะช่องสัญญาณที่มีขอบเขตของชุดสายอากาศรับและขอบเขตของชุดสายอากาศส่ง 0.5 ความยาวคลื่น ใช้ SNR 5 เดซิเบล เลือกสายอากาศรับและส่งจำนวน 3 สาย เห็นได้ว่าเมื่อเลือกค่าขีดแบ่งให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณ ลักษณะทางกายภาพของสายอากาศและกำลังภาคส่ง จะให้ความจุช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกับวิธีการเลือกสายอากาศจากทุกความเป็นไปได้ตามภาพที่ 31 และใช้เวลาในการเลือกสายอากาศลดลงตามภาพที่ 32 เช่น วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากพิจารณาทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) ใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.3 จะให้ความจุช่องสัญญาณที่ต่างจากการเลือกสายอากาศจากทุกความเป็นไปได้เล็กน้อย แต่ลดเวลาในการเลือกสายอากาศลงไปได้มาก

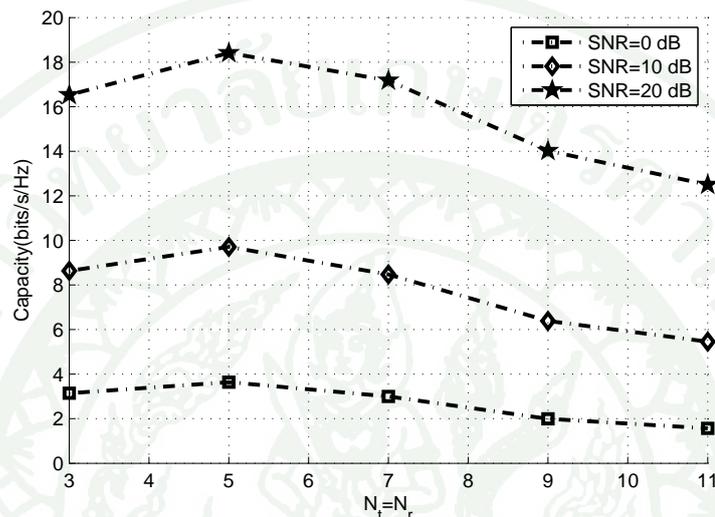


ภาพที่ 31 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณของการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) เมื่อเลือกค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน (SNR = 0 dB , D_t = D_r = 0.5 λ, L_t = L_r = 3)



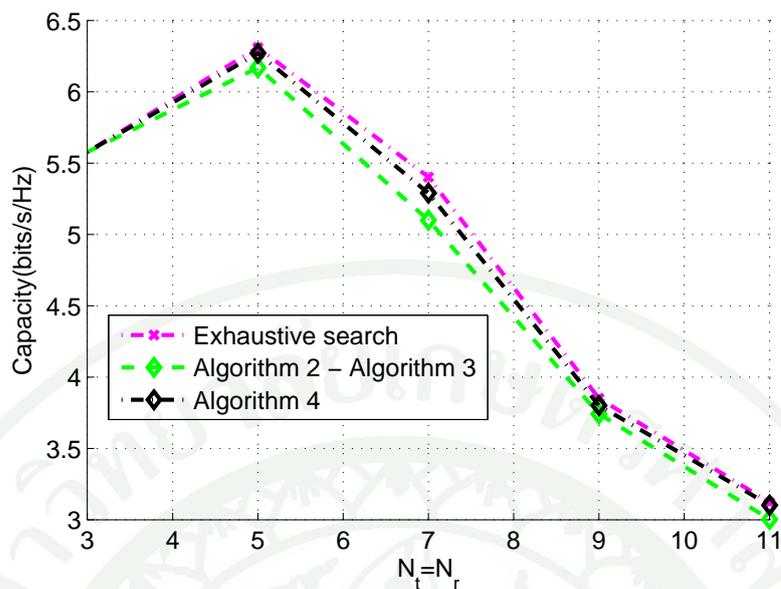
ภาพที่ 32 แสดงสมรรถนะด้านเวลาในการเลือกสายอากาศของวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) เมื่อเลือกค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน (SNR = 0 dB , D_t = D_r = 0.5 λ, L_t = L_r = 3)

จากภาพที่ 33 เลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.3 ในสภาวะช่องสัญญาณที่มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาครับและขอบเขตของชุดสายอากาศส่ง 0.5 ความยาวคลื่น ใช้ SNR 0 เดซิเบล เลือกสายอากาศภาครับและส่งจำนวน 3 สาย สรุปว่าการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ การใช้ SNR ที่แตกต่างกันให้ผลการทดลองในแนวโน้มไปทางเดียวกัน

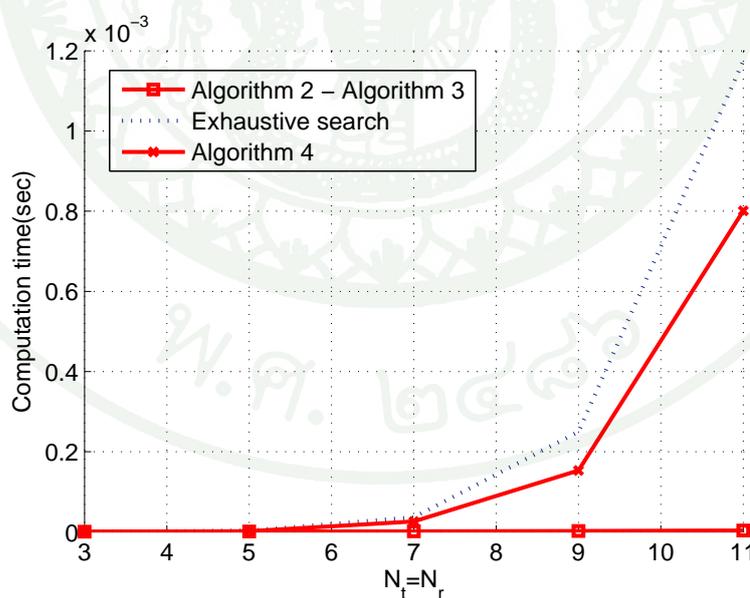


ภาพที่ 33 แสดงสมรรถนะด้านความจุช่องสัญญาณของการเลือกสายอากาศทั้งภาคส่งและรับ โดยมีกำลังของภาคส่งที่แตกต่างกัน ($D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $L_t = L_r = 3$, threshold = 0.3)

ภาพที่ 34 และ 35 มีสภาวะช่องสัญญาณที่มีขอบเขตของชุดสายอากาศภาครับและขอบเขตของชุดสายอากาศส่ง 0.5 ความยาวคลื่น ใช้ SNR 5 เดซิเบล เลือกสายอากาศภาครับและส่งจำนวน 3 สาย แสดงวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (รวมวิธีที่ 2 และ 3) โดยเลือกสายอากาศภาคส่งก่อนเลือกสายอากาศภาครับใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.8 วิธีการเลือกสายอากาศจากทุกความเป็นไปได้และวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) ใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.8 โดยแสดงอยู่ในด้านความจุช่องสัญญาณตามภาพที่ 34 และเวลาในการเลือกสายอากาศตามภาพที่ 35 จากผลการทดลองในภาพที่ 34 เห็นได้ว่าวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (รวมวิธีที่ 2 และ 3) และวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) ที่ใช้ค่าขีดแบ่งเท่ากันทั้งสองวิธีที่ 0.8 วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) จะให้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าเนื่องจากวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (รวมวิธีที่ 2 และ 3) จะตัดการพิจารณาสายอากาศบางสายที่อาจให้ความจุช่องสัญญาณที่ดี อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 35 วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov (รวมวิธีที่ 2 และ 3) จะใช้เวลาในการเลือกสายอากาศที่น้อยกว่าวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4)



ภาพที่ 34 แสดงความจุช่องสัญญาณที่ได้จากแต่ละวิธีการเลือกสายอากาศ (SNR = 5 dB , $D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $L_t = L_r = 3$, threshold of algorithm 2 and 3 = threshold of algorithm 4 = 0.8)



ภาพที่ 35 แสดงเวลาในการเลือกสายอากาศจากแต่ละวิธีการเลือกสายอากาศ (SNR = 5 dB , $D_t = D_r = 0.5 \lambda$, $L_t = L_r = 3$, threshold of algorithm 2 and 3 = threshold of algorithm 4 = 0.8)

วิจารณ์

1. หากเลือกใช้ค่าขีดแบ่งไม่ถูกต้องตามสภาวะของสัญญาณ เช่น ใช้ค่าขีดแบ่งที่มีค่าน้อยเกินไปจะมีผลทำให้ระบบไปตัดการพิจารณาสายอากาศที่อยู่ห่างกันไม่มาก โดยอันที่จริงแล้วสายอากาศสายนั้นอาจจะให้ความจุช่องสัญญาณที่ดีแก่ระบบหากเลือกสายอากาศสายนั้น แต่หากเลือกตั้งค่าขีดแบ่งให้มีค่าสูงเกินความเป็นจริงจะหมายถึงการที่ไม่เลือกพิจารณาเลือกสายอากาศในกรณีที่สายอากาศนั้นอยู่ใกล้กันมากเกินไป ผลที่ได้ทำให้ระบบลดเวลาในการเลือกสายอากาศไปได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นในการทำการทดลองจึงควรเลือกตั้งค่าขีดแบ่งให้ดีตามสภาวะการณดังกล่าวข้างต้นเพื่อให้ผลการทดลองมีความจุช่องสัญญาณและเวลาในการเลือกสายอากาศที่ดี

2. การเลือกสายอากาศที่แก้ไขจาก Gorokhov เหมาะสมในการเลือกสายอากาศภาคส่งและ/หรือภาครับ ส่วนการเลือกสายอากาศที่แก้ไขจากทุกความเป็นไปได้เหมาะสมในการเลือกสายอากาศภาคส่งและภาครับ

สรุปและข้อเสนอแนะ

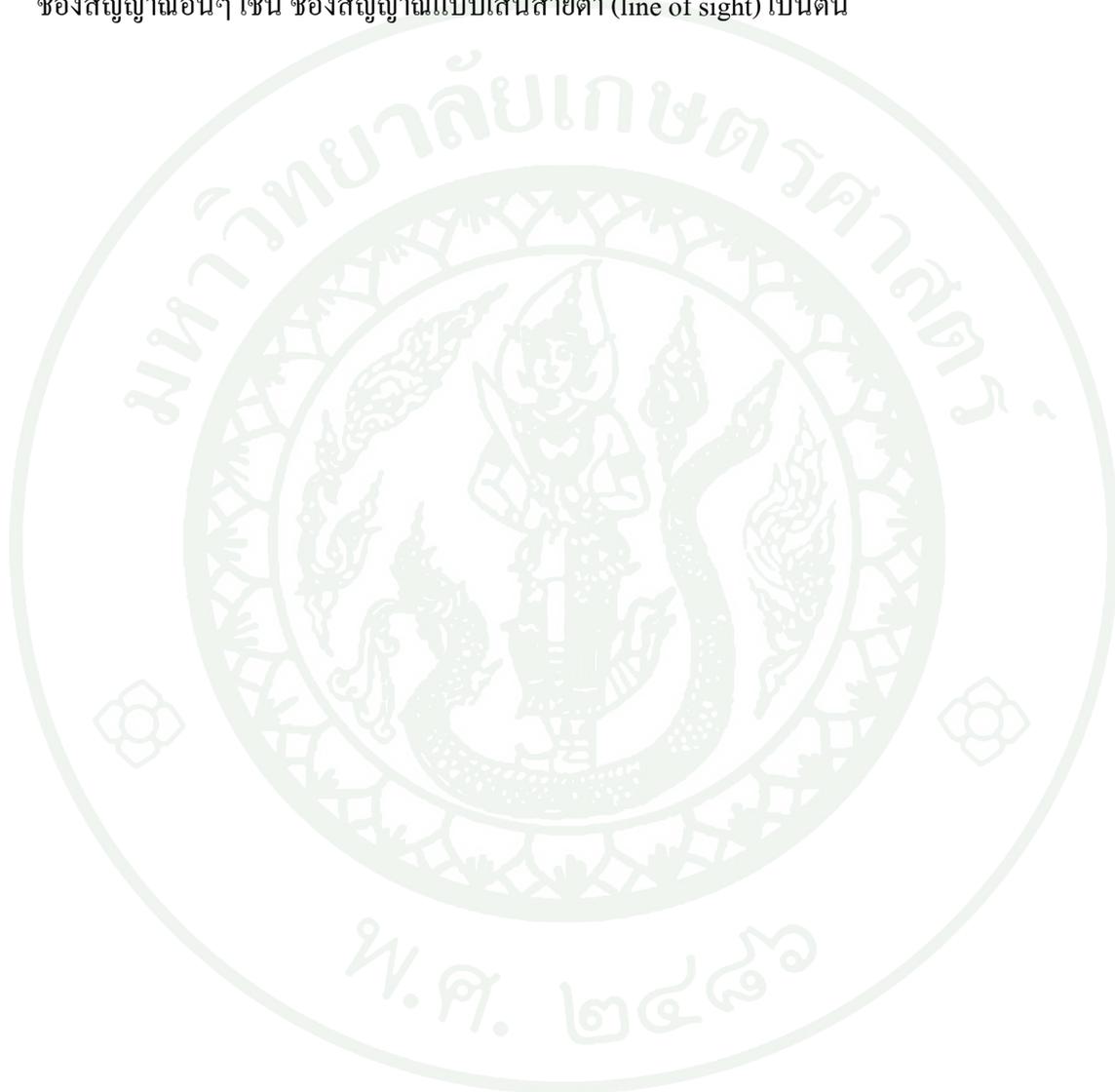
สรุป

การนำเสนอวิธีการเลือกสายอากาศที่มีความซับซ้อนในการเลือกน้อยในงานวิจัยนี้มี 2 วิธี คือ วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจาก Gorokhov (วิธีที่ 2 และ 3) และ วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจากทุกความเป็นไปได้ (วิธีที่ 4) โดยในแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจาก Gorokhov สามารถนำไปใช้ในการเลือกสายอากาศภาคส่งและ/หรือภาครับได้ ส่วนวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจากทุกความเป็นไปได้ถูกนำไปใช้ในการเลือกสายอากาศภาคส่งและภาครับพร้อมกัน โดยผลการทดลองทั้งการเลือกสายอากาศภาคส่งและ/หรือภาครับสามารถสรุปได้ดังนี้

1. วิธีการที่นำเสนอในวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจาก Gorokhov สามารถให้ความจุช่องสัญญาณใกล้เคียงกับวิธีเลือกสายอากาศที่ดีที่สุด(จากทุกความเป็นไปได้) โดยต้องเลือกค่าขีดแบ่งให้เหมาะสม และลดความซับซ้อนทำให้ลดเวลาในการเลือกสายอากาศลงไปได้มากกว่าวิธีการเลือกสายอากาศแบบอื่นๆ
2. นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ยังนำเสนอวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจากทุกความเป็นไปได้ ซึ่งสามารถให้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจาก Gorokhov หากเลือกใช้ค่าขีดแบ่งเท่ากันทั้ง 2 วิธีการ และลดความซับซ้อนทำให้ลดเวลาในการเลือกสายอากาศลงไปได้มากกว่าวิธีเลือกสายอากาศที่ดีที่สุดแต่ใช้เวลาในการเลือกสายอากาศมากกว่าวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจาก Gorokhov
3. ค่าขีดแบ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ร่วมกับอิมพีแดนซ์ตัวเอง โดยการเลือกใช้ค่าขีดแบ่งให้เหมาะสมกับสภาวะของช่องสัญญาณเป็นเรื่องสำคัญมากไม่ว่าจะเป็นวิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจาก Gorokhov หรือ วิธีการเลือกสายอากาศที่แก้ไขปรับปรุงจากทุกความเป็นไปได้ โดยหากต้องการให้ระบบมีความจุช่องสัญญาณที่สูงควรเลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่เข้าใกล้ 1 แต่ทำให้ระบบมีความซับซ้อนในการเลือกสายอากาศเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยต่อไปควรมีการพัฒนาเรื่องการพิจารณาค่าขีดแบ่งให้เหมาะสมกับสภาพช่องสัญญาณ โดยไม่ต้องดูผลการทดลอง และเนื่องจากงานวิจัยนี้นำเสนอการเลือกสายอากาศโดยใช้ช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh fading) ซึ่งในอนาคตควรมีการนำเสนอการเลือกสายอากาศกับช่องสัญญาณอื่นๆ เช่น ช่องสัญญาณแบบเส้นสายตา (line of sight) เป็นต้น



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Balanis, C. and A. Antenna. 1997. **Theory: Analysis and Design**. New York: Wiley.
- Dai, L., S. Sfar and K. Letaief. 2006. "Optimal antenna selection based on capacity maximization for MIMO systems in correlated channels". **IEEE Trans Commun** 54(3): 563–573.
- Gorokhov, A. 2002. "Antenna selection algorithms for MEA transmission systems". **IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)** 3(6): III-2857 –III-2860.
- _____, D. Gore. and A. Paulraj. "Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: theory and algorithms". **IEEE Trans. Signal Process** 51(11): 2796 – 2807.
- Gharavi-Alkhansari, M. and A.B. Gershman. 2004. "Fast antenna subset selection in MIMO systems". **IEEE Trans. Signal Process** 52(2): 339–346.
- Marzetta, T. and B. Hochwald. 1999. "Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading". **IEEE Trans. Inf. Theory** 45(1): 139 –157.
- Shen, S., M. McKay. and R. Murch. 2010. "MIMO systems with mutual coupling: how many antennas to pack into fixed-length arrays?" in Int. Symp. on Inf. **Theory and its Applications (ISITA)**, 10: 531–536.
- Telatar, I.E. 1999. "Capacity of multi-antenna Gaussian channels". **European Trans on Telecommun.** 10(11): 585–595.
- Wallace, J. and M. Jensen. 2004. "Mutual coupling in MIMO wireless systems: A rigorous network theory analysis," **IEEE Trans. Wireless Commun** 3(4): 1317–1325.
- Win, M. and J. Winters. 1999. "Analysis of hybrid selection/maximal-ratio combining in rayleigh fading". **IEEE Trans. Commun** 47(12): 1773 –1776.



Antenna Subset Selection for MIMO Channels With Mutual Coupling

Dithanon Khrutmuang and Wiroonsak Santipach
 Department of Electrical Engineering
 Faculty of Engineering, Kasetsart University
 Bangkok, Thailand 10900
 Email: dithanon@hotmail.com and wiroonsak.s@ku.ac.th

Abstract—In this work, we propose antenna selection schemes for a point-to-point multiantenna channel. The schemes select subsets of either transmit and/or receive antennas to activate to increase ergodic capacity. The channel model considered includes spatial correlation and mutual coupling among adjacent antennas, which can have significant impact on the channel performance. Our proposed schemes are shown to perform close to the optimal exhaustive search with less computational complexity.

I. INTRODUCTION

A capacity of a multiple-input and multiple-output (MIMO) wireless channel has been shown to increase linearly with the minimum number of transmit and receive antennas [1], [2]. However, the linear capacity growth is applied only to a fading channel model with ideal scattering and no mutual coupling among transmitting or receiving antennas. If the scattering in the environment is not sufficiently rich, then there exists spatial correlation among channel gains between transmit and receive antenna pair. Mutual coupling is an electromagnetic phenomenon, which intrinsically exists in an antenna array, and its effect is detrimental to the capacity when antenna is placed sufficiently close to one another [3], [4]. These practical factors could affect the performance of a MIMO channel significantly and should be taken into account in any reasonable channel model.

To increase the performance of multiantenna link, we propose antenna selection schemes that incorporate mutual coupling consideration. Selecting subset of antennas has been shown to increase channel capacity. Furthermore, using only the selected set of antennas also reduces hardware complexity, e.g., a number of installed radio-frequency (RF) chains needed on either ends of communication link. Antenna selection has been long considered in the literature [5]–[10]. References [6]–[9] proposed fast suboptimal selection algorithms, which perform close to the exhaustive search over all possible antenna subsets. Assuming MIMO channel with spatial correlations between antennas, [10] proposed the scheme to select receive antennas based on correlations.

All of the work previously mentioned do not consider mutual coupling among antennas, which is shown to greatly affect capacity when antennas are placed very close to one

This work was supported by Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI) under the FY2012 Kasetsart University research grant.

another [3], [4]. In this work, we propose suboptimal antenna selection schemes for MIMO channel model with both spatial correlation and mutual coupling. The objective of the proposed schemes is to maximize the capacity over potential antenna subsets whose mutual impedance is not to exceed a given threshold. From numerical examples shown, our schemes perform close to the exhaustive search, but require less computation time.

II. CHANNEL MODEL

We consider a point-to-point MIMO channel with N_t transmit and N_r receive antennas. For a discrete-time channel model, the $N_r \times 1$ received vector is given by

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

where \mathbf{H} is an $N_r \times N_t$ channel matrix whose element $h_{i,j}$ is the channel gain between the j th transmit and the i th receive antennas, \mathbf{x} is an $N_t \times 1$ transmitted vector with zero mean and covariance \mathbf{I} , which is the identity matrix. The transmitted signal is corrupted by additive white Gaussian noise (AWGN) vector \mathbf{n} , whose mean and covariance are zero and $\sigma_n^2 \mathbf{I}$, respectively.

Channel gain $h_{i,j}$ depends on channel model, antenna type, and antenna-array arrangement. Placing antennas close to one another induces a mutual coupling between them. Taking into account both effects of spatial correlation and mutual coupling, the channel matrix is given by

$$\mathbf{H} = \frac{1}{c_t c_r} \mathbf{C}_r \mathbf{R}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_w \mathbf{S}^{\frac{1}{2}} \mathbf{C}_t \quad (2)$$

where, for an ideal Rayleigh fading channel, \mathbf{H}_w is an $N_r \times N_t$ matrix of independent zero-mean unit-variance complex Gaussian random variables, \mathbf{S} is the $N_t \times N_t$ transmit correlation matrix, \mathbf{R} is the $N_r \times N_r$ receive correlation matrix, the $N_t \times N_t$ matrix \mathbf{C}_t and $N_r \times N_r$ matrix \mathbf{C}_r reflect mutual coupling effect at the transmit-antenna and receive-antenna arrays, respectively, and c_t and c_r are normalizing constants.

We assume that each antenna has a uniformly distributed angular spread. Thus, from Jakes' model [11], the (i, j) element of the transmit correlation matrix is given by

$$S_{i,j} = J_0 \left(\frac{2\pi d_{i,j}}{\lambda} \right), \quad 1 \leq i, j \leq N_t \quad (3)$$

where $J_0(\cdot)$ is the zeroth-order Bessel function, and $d_{i,j}$ is the distance between the i th and j th transmit antennas, and

λ is the transmission wavelength. We assume that antennas are placed uniformly and the length of the antenna array is L . Hence,

$$d_{i,j} = \frac{L|i-j|}{N_t - 1}. \quad (4)$$

The receive correlation matrix \mathbf{R} is similarly defined as the transmit correlation matrix \mathbf{S} in (3).

According to [12], the two matrices reflecting mutual coupling effect at the transmit and receive arrays are given by

$$\mathbf{C}_t = \mathbf{Z}_t(\mathbf{Z}_t + \mathbf{Z}_s)^{-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{C}_r = (\mathbf{Z}_r + \mathbf{Z}_i)^{-1} \quad (6)$$

where \mathbf{Z}_t is an $N_t \times N_t$ transmit impedance matrix whose diagonal elements are self impedance and whose off-diagonal elements are mutual impedance, and \mathbf{Z}_s denotes a diagonal matrix whose diagonal elements are the conjugate of the diagonal entries of \mathbf{Z}_t . For a dipole array, \mathbf{Z}_t is well known from standard antenna theory (e.g., see [12, Ch. 8]). Similarly, \mathbf{Z}_r is the $N_r \times N_r$ receive impedance matrix and \mathbf{Z}_i is a diagonal matrix whose diagonal entries are the conjugate of the diagonal entries of \mathbf{Z}_r . Finally, the two normalizing constants are defined as follows

$$c_t = \frac{(\mathbf{Z}_t)_{11}}{(\mathbf{Z}_t)_{11} + (\mathbf{Z}_t)_{11}^*} \quad (7)$$

$$c_r = \frac{(\mathbf{Z}_r)_{11}}{(\mathbf{Z}_r)_{11} + (\mathbf{Z}_r)_{11}^*} \quad (8)$$

where $(\cdot)^*$ denotes complex conjugate.

Assuming that the channel matrix is known perfectly at the transmitter and receiver, we would like to maximize the performance of the channel by selectively activating subsets of transmit and/or receive antennas. For a transmit-antenna selection, we let \mathbf{F}_t denote an $N_t \times N_t$ diagonal matrix whose i th diagonal entry is 1 if the i th transmit antenna is chosen or 0, otherwise. Similarly, we let \mathbf{F}_r denote the $N_r \times N_r$ receive-antenna selection matrix. Let L_t be the number of selected or activated transmit antennas, and L_r be the number of selected receive antennas. Thus, after the transmit and receive selections, the effective channel matrix is given by $\mathbf{F}_r \mathbf{H} \mathbf{F}_t$ and the associated ergodic capacity is given by

$$C = E \left[\log \det \left(\mathbf{I} + \frac{\rho}{L_t} \mathbf{F}_r \mathbf{H} \mathbf{F}_t \mathbf{H}^H \mathbf{F}_r \right) \right] \quad (9)$$

where the expectation is over channel distribution and $\mathbf{F}_t \mathbf{F}_t^H = \mathbf{F}_t$. We note that antennas that are not selected still induce coupling with adjacent antennas. However, we assume that this mutual coupling from passive antennas is small and can be discarded. Thus, (9) is also a capacity of the link equipped with selected antennas only and all other antennas removed.

In this work, we propose algorithms to determine F_t and/or F_r that maximize channel capacity for the channel model with mutual coupling.

III. SELECTION ALGORITHMS

In this section, we describe the proposed algorithms to select a set of transmit antennas, a set of receive antennas, or a set of both transmit and receive antennas. The optimal

selection scheme that maximizes the channel capacity employs exhaustive search over all possible subsets of antennas. However, search complexity can be tremendous when the number of antenna is large. Here we propose the selection schemes that take into account mutual coupling, reduce the search complexity, and perform close to the optimum.

A. Selection At Either Transmit or Receive Antenna Arrays

We start with selection for a single antenna array at either end of a communication link. This selection algorithm is based on that proposed by [9], [13] in which a single antenna is chosen at each step sequentially. To select L_t transmit antennas, we assume that all receive antennas are active ($L_r = N_r$ and thus, $\mathbf{F}_r = \mathbf{I}$). Let \mathbf{e}_j be an $N_t \times 1$ vector whose j th entry is one and all other entries are zero and \mathbf{e}_j also indicates selecting the j th antenna. For example, $\mathbf{e}_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$. We also let Ω_s and Ω_n be the sets of \mathbf{e}_j 's that correspond to selected antennas and the remaining antennas, respectively.

The proposed algorithm starts with empty Ω_s and a full $\Omega_n = \{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_{N_t}\}$. Given channel matrix \mathbf{H} , we select the single transmit antenna that maximizes an instantaneous capacity. If j th antenna is selected, we move the corresponding \mathbf{e}_j from Ω_n to Ω_s . To select subsequent antennas, we determine first if a ratio between mutual impedance between a potential antenna in Ω_n and all selected antennas in Ω_s and the self impedance exceeds a threshold ϵ , where $0 < \epsilon < 1$. If the ratio exceeds ϵ , we will not consider that antenna as a candidate. From a set of candidate antennas denoted by Ω_c , we again find the antenna that maximizes the instantaneous capacity and add it to Ω_s . If Ω_c is empty, we set Ω_c to equal Ω_n . We iterate until L_t antennas are chosen. Detailed steps are shown in Algorithm 1. We note that ϵ limits the number of candidate antennas in Ω_c . If ϵ is set too low, Ω_c may contain too few antennas. If ϵ is set too high, Ω_c will be similar to Ω_n . In this work, we obtain ϵ from numerical experiments.

To select receive antennas, similar steps apply. We set $L_t = N_t$ and hence, $\mathbf{F}_t = \mathbf{I}$. Similar to the transmit selection in Algorithm 1, receive antennas are selected sequentially based on instantaneous capacity and mutual impedance.

B. Selection At Both Transmit and Receive Antenna Arrays

We would also like to select both transmit and receive antennas that maximize the capacity. Employing exhaustive search may not possible since the number of possible sets of transmit and receive antennas, which equals $\binom{N_t}{L_t} \binom{N_r}{L_r}$, could be forbiddingly high. To lessen search complexity, we can apply Algorithm 1 to select first the transmit antennas and then the receive antennas or vice versa. In other words, Algorithm 1 is used twice in sequence and the number of possible capacity computations will be at most $\binom{N_t}{L_t} + \binom{N_r}{L_r}$. However, the performance consequently suffers as later shown by numerical examples in Section IV.

To improve upon the performance of Algorithm 1, we propose Algorithm 2, which is based on the exhaustive search. However, the number of the possible subsets of antennas is reduced by a constraint on mutual impedance. For either transmit or receive sides, we only consider the set of antennas

Algorithm 1 Selection of transmit antennas

```

1:  $\Omega_s = \{\}$  and  $\Omega_n = \{e_1, \dots, e_{N_t}\}$ .
2:  $L = 0$ 
3: while  $L < L_t$  do
4:   if  $L = 0$  then
5:     Find
       
$$e_s = \arg \max_{e_j \in \Omega_n} \log \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{L_t} \mathbf{F}_r \mathbf{H} e_j e_j^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}_r \right).$$

6:      $\Omega_s \leftarrow \Omega_s \cup \{e_s\}$ 
7:      $\Omega_n \leftarrow \Omega_n \setminus \{e_s\}$ 
8:      $L \leftarrow L + 1$ 
9:   else
10:     $\Omega_c = \{\}$ 
11:    for all  $e_t \in \Omega_s$  do
12:       $\Omega_c \leftarrow \Omega_c \cup \left\{ e_w \in \Omega_n \mid \frac{|e_t^\dagger \mathbf{Z}_t e_w|}{|\mathbf{Z}_{t,1,1}|} \leq \epsilon \right\}$ 
13:    end for
14:    if  $\Omega_c = \{\}$  then
15:       $\Omega_c \leftarrow \Omega_n$ 
16:    end if
17:    Find
       
$$e_s = \arg \max_{e_j \in \Omega_c} \log \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{L_t} \mathbf{F}_r \mathbf{H} \left( \sum_{e_i \in \Omega_s} e_i e_i^\dagger + e_j e_j^\dagger \right) \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}_r \right).$$

18:     $\Omega_s \leftarrow \Omega_s \cup \{e_s\}$ 
19:     $\Omega_n \leftarrow \Omega_n \setminus \{e_s\}$ 
20:     $L \leftarrow L + 1$ 
21:  end if
22: end while
23: return  $\Omega_s$ 

```

whose ratio between mutual impedance and self impedance does not exceed the threshold ϵ .

Let $\mathcal{F}_t = \{\mathbf{F}_t^{(i)}\}$, where $1 \leq i \leq \binom{N_t}{L_t}$, denote the set of all possible transmit-antenna selection matrices and $\mathcal{F}_r = \{\mathbf{F}_r^{(j)}\}$, where $1 \leq j \leq \binom{N_r}{L_r}$, denote the set of all possible receive-antenna selection matrices. We note that nonzero off-diagonal entries of $\mathbf{F}_t^{(i)} \mathbf{Z}_t \mathbf{F}_t^{(i)}$ are mutual impedance of the transmit antennas associated with $\mathbf{F}_t^{(i)}$. Similarly, nonzero off-diagonal entries of $\mathbf{F}_r^{(j)} \mathbf{Z}_r \mathbf{F}_r^{(j)}$ are mutual impedance of the receive antennas associated with $\mathbf{F}_r^{(j)}$. Steps of this proposed algorithm is shown in Algorithm 2.

IV. NUMERICAL RESULTS

In all simulation results shown, we assume dipole antenna whose radius is 0.001λ and whose length is 0.25λ . All antennas in the array are uniformly placed side by side. In Fig 1, an ergodic capacity of transmit selection scheme in Algorithm 1 is shown with N_t for $\rho = 0$ dB, $L_t = 2$, $N_r = L_r = 3$, and threshold $\epsilon = 0.8$. Lengths of both arrays and are set to $L = \lambda$. When N_t is large, transmit antennas are placed very close together and hence, induce a large mutual coupling. From the figure, our proposed scheme, exhaustive search, and the scheme proposed by Gorokhov [8] performs

Algorithm 2 Selection of transmit antennas and receive antennas

```

1: Start with  $\bar{\mathcal{F}}_t$  and  $\bar{\mathcal{F}}_r$ .
2: Find
       
$$\bar{\mathcal{F}}_t = \{\mathbf{F}_t \in \mathcal{F}_t \mid \text{all nonzero off-diagonal entries of } \mathbf{F}_t \mathbf{Z}_t \mathbf{F}_t < \epsilon \mathbf{Z}_{t,1,1}\}.$$

3: Find
       
$$\bar{\mathcal{F}}_r = \{\mathbf{F}_r \in \mathcal{F}_r \mid \text{all nonzero off-diagonal entries of } \mathbf{F}_r \mathbf{Z}_r \mathbf{F}_r < \epsilon \mathbf{Z}_{r,1,1}\}.$$

4: Find
       
$$\mathbf{F}_t^*, \mathbf{F}_r^* = \arg \max_{\substack{\mathbf{F}_t \in \bar{\mathcal{F}}_t \\ \mathbf{F}_r \in \bar{\mathcal{F}}_r}} \log \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{L_t} \mathbf{F}_r \mathbf{H} \mathbf{F}_t \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}_r \right).$$

5: return  $\mathbf{F}_t^*$  and  $\mathbf{F}_r^*$ 

```

similarly. Similar to [13], we modify the Gorokhov scheme by starting with an empty set of selected antennas and adding one antenna at each step to the set. However, based on simulation results not shown here, our scheme is the least complex among the three schemes¹. We also plot the capacity of selecting all transmit antennas and see a significant performance loss.

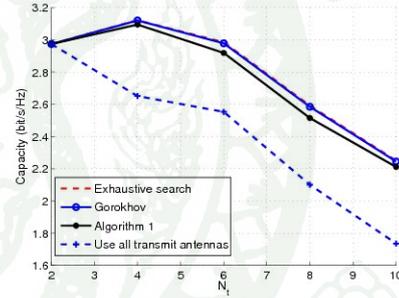


Fig. 1. Capacity with transmit selection scheme in Algorithm 1 is shown with N_t for $\rho = 0$ dB, $L_t = 2$, $N_r = L_r = 3$, $L = \lambda$, and $\epsilon = 0.8$.

With $N_t = N_r = 10$, we would like to find the optimal number of selected transmit and receive antennas. Fig. 2 shows the capacity versus L_t or L_r . For each plot, algorithm 1 was applied to either transmit or receive arrays while all antennas in the other array are active. With transmit selection, the optimal $L_t = 3$ when $\rho = 5$ dB and lengths of both arrays equal 0.5λ . Comparing to using all transmit antennas, we can gain almost 20% from activating only subset of antennas. For receive-antenna selection, using all receive antennas gives the capacity maximum. This is due to the fact that more energy is captured by a larger number of receive antennas. However, more RF chains also need to be installed with a larger cost.

¹The associated numerical result is not shown here due to limited space.

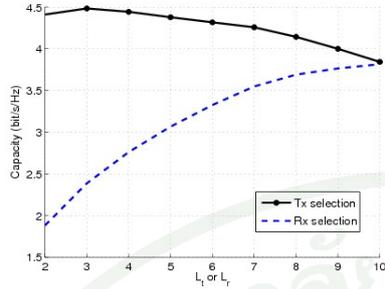


Fig. 2. Capacity with either transmit or receive selection scheme is shown with L_t or L_r for $\rho = 5$ dB, $N_t = N_r = 10$, $L = 0.5\lambda$, and $\epsilon = 0.8$.

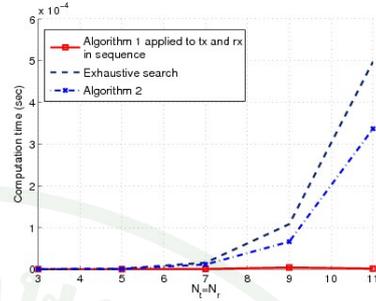


Fig. 4. Computation time of the schemes whose achievable rates are shown in Fig. 3 is plotted with the number of transmit and receive antennas.

In Fig. 3 and 4, both transmit *and* receive antennas are selected with $\rho = 0$ dB, $L_t = L_r = 3$, $L = 0.5\lambda$, and $N_t = N_r$. We note that thresholds for Algorithms 1 and 2 are 0.8 and 0.3, respectively. We apply Algorithm 2 to find the set of selected transmit and receive antennas, which is then compared to the exhaustive search and also Algorithm 1. All three schemes give similar rate performance with the maximum attained when $N_t = N_r = 5$. Complexity of the three schemes is measured by the computation time and is shown in Fig. 4. We note that computation time of exhaustive search increases exponentially with the number of available antennas while those of our proposed schemes are less, especially computation time of Algorithm 1.

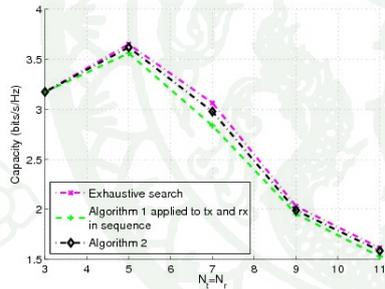


Fig. 3. Capacity with selection of both transmit and receive antennas is shown with N_t or N_r for $\rho = 0$ dB, $L_t = L_r = 3$, $L = 0.5\lambda$, $\epsilon_1 = 0.8$, and $\epsilon_2 = 0.3$.

V. CONCLUSIONS

We proposed antenna selection algorithms for a single-user MIMO channel, which takes into account mutual coupling effect. The proposed schemes shown to perform close to an exhaustive search with much less complexity. Search complexity is a major issue since the selection of antennas happens in

real time and cannot be done offline. Our search complexity depends heavily on the threshold on mutual impedance, which is currently obtained from numerical simulations. Also, performance of the proposed schemes is shown via numerical results. Thus, our future work includes analysis of the performance, which should give us more insights, as well as investigation on the optimal threshold for a given setup.

REFERENCES

- [1] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. on Telecommun.*, vol. 10, pp. 585–595, Nov. 1999.
- [2] T. Marzetta and B. Hochwald, "Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 1, pp. 139–157, Jan. 1999.
- [3] S. Shen, M. McKay, and R. Murch, "MIMO systems with mutual coupling: How many antennas to pack into fixed-length arrays?" in *Int. Symp. on Inf. Theory and its Applications (ISITA)*, Oct. 2010, pp. 531–536.
- [4] J. Wallace and M. Jensen, "Mutual coupling in MIMO wireless systems: A rigorous network theory analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 4, pp. 1317–1325, Jul. 2004.
- [5] M. Win and J. Winters, "Analysis of hybrid selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 12, pp. 1773–1776, Dec. 1999.
- [6] D. Gore, R. Nabar, and A. Paulraj, "Selecting an optimal set of transmit antennas for a low rank matrix channel," in *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, vol. 5, 2000, pp. 2785–2788.
- [7] S. Sandhu, R. Nabar, D. Gore, and A. Paulraj, "Near-optimal selection of transmit antennas for a MIMO channel based on Shannon capacity," in *34th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*, vol. 1, 2000, pp. 567–571.
- [8] A. Gorokhov, D. Gore, and A. Paulraj, "Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: Theory and algorithms," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 11, pp. 2796–2807, Nov. 2003.
- [9] A. Gorokhov, "Antenna selection algorithms for MEA transmission systems," in *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, vol. 3, May 2002, pp. III-2857–III-2860.
- [10] L. Dai, S. Sfar, and K. Letiaief, "Optimal antenna selection based on capacity maximization for MIMO systems in correlated channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, no. 3, pp. 563–573, Mar. 2006.
- [11] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. New York: Wiley, 1975.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Wiley, 1997.
- [13] M. Gharavi-Alkhansari and A. B. Gershman, "Fast antenna subset selection in MIMO systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 339–346, Feb. 2004.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายดิศตานนท์ กรุขเมือง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	24 ตุลาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดพิษณุโลก
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	ได้รับการตีพิมพ์ผลงานเรื่อง “Antenna Subset Selection for MIMO Channels with Mutual Coupling” ใน ECTI CON 2012 International Conference, pp 870-873, May 2012, Huahin, Thailand.