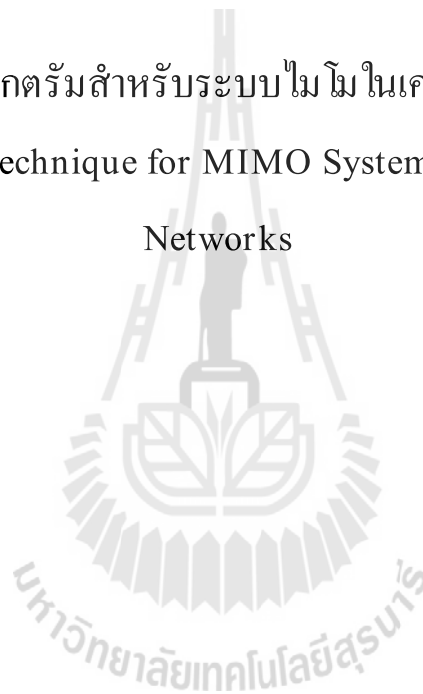




รายงานการวิจัย

เทคนิครับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมโนในเครือข่ายวิทยุรู้คิด
Spectrum Sensing Technique for MIMO Systems in Cognitive Radio
Networks



ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

เทคนิครับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมโม่ในเครือข่ายวิทยุรู้คิด

Spectrum Sensing Technique for MIMO Systems in Cognitive Radio
Networks

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2559

ก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้
ขอขอบคุณนักศึกษาในที่ปรึกษาของผู้วิจัยที่ช่วยเก็บผลการทดลอง นายรัฐศาสตร์ ลายกนกและขอขอบคุณ
รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูซารสกุล สำหรับคำแนะนำในเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2559



บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้ถูกคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความต้องการของผู้ใช้บริการที่มากขึ้นเรื่อยๆ รวมไปถึงการพัฒนาแอปพลิเคชันใหม่ๆ อีกมาก ทำให้ทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ส่วนหนึ่งเป็นเพราะการจัดสรรสเปกตรัมของผู้ใช้ที่ได้มาถูกต้องตามกฎหมาย แต่การใช้ยังไม่คุ้มค่าพอ จึงเกิดเทคโนโลยีวิทยุคิดค้นเพื่ออนุญาตให้ผู้ใช้รองเข้ามาใช้ความถี่เดียวกับผู้ใช้หลักในบริเวณเดียวกัน โดยหนึ่งในหัวใจหลักของเทคโนโลยีวิทยุคิดคือการตรวจจับสเปกตรัม ที่จะทำการตรวจหาแถบความถี่ที่ว่างจากการใช้งานของผู้ใช้หลัก แล้วอนุญาตให้ผู้ใช้รองเข้าใช้แถบความถี่นั้นได้ แต่ทว่าวิธีดังกล่าวยังไม่เพียงพอสำหรับรองรับผู้ใช้จำนวนมากที่เพิ่มขึ้นอีกในอนาคต จึงมีการนำเทคโนโลยีหลายสายอากาศตัวส่งหลายสายอากาศตัวรับหรือที่เรียกว่าระบบไมโมเข้ามาช่วยในการพัฒนาการลดสัญญาณแทรกสอด ซึ่งสามารถช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยทั่วไปความสำเร็จของเทคโนโลยีวิทยุคิดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบไมโมนั้นจะมีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น ซึ่งสามารถถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางการรับรู้สเปกตรัมได้มากกว่าการมีสายอากาศเพียงต้นเดียว อย่างไรก็ตามจากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่าการใช้สายอากาศหลายต้นเพื่อรับรู้สเปกตรัมมีการตัดสินใจเพียงสองระดับเท่านั้นคือสเปกตรัมว่างหรือไม่ว่างทั้งๆ ที่มีข้อมูลประกอบการตัดสินใจจากสายอากาศหลายต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่พัฒนาการตัดสินใจเป็นแบบซอฟต์แวร์ซึ่งให้ผลที่เหมาะสมกับระบบไมโมในเครือข่ายวิทยุคิด และมีการนำเสนอวิธีการรวมเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมสองแนวทางเข้าด้วยกัน คือเทคนิค Equal Gain Combining และ MAJORITY Rule ผลการจำลองแบบยืนยันว่าเทคนิคที่เสนอขึ้นในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา

Abstract

Nowadays, the wireless communication systems have been developed continuously because the demand of users increase rapidly as well as a lot of new applications have been launched. This reason makes the existing resources insufficient. One problem is because the use of legal spectrum holder is inefficient. To solve this problem, the cognitive radio technology has been proposed in order that the secondary users can employ the same spectrum of primary users when it is available. One key success of cognitive radio technology is the spectrum sensing technique to detect the available spectrum. However, this technique alone cannot meet the user demand which is increasing everyday. The further development is to apply cognitive radio with multiple antennas, called as MIMO systems, in order to reduce interference and improve system efficiency. In general, the success of cognitive radio technology depends on how accurate of spectrum sensing is. For MIMO systems, there are multiple antennas which can be more utilized for spectrum sensing than only one antenna like conventional systems. However, in literatures, the use of multiple antennas for sensing approach is based on two-state decision; available or occupied spectrums. In this paper, multi-state decision so called soft decision has been proposed to improve the performance of spectrum sensing for MIMO systems. Also this paper proposes the integration of Equal Gain Combining and MAJORITY Rule for sensing the spectrum. The results show that the proposed technique provides the best performance in comparing with other techniques.

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| กิตติกรรมประกาศ..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญรูปภาพ..... | ช |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย..... | 3 |
| 1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ผลสำเร็จของโครงการ..... | 3 |
| 1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย..... | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง..... | 6 |
| 2.1 กล่าวนำ..... | 6 |
| 2.2 ระบบวิทยุรู้คิด..... | 6 |
| 2.2.1 นิยามของวิทยุรู้คิด..... | 7 |
| 2.2.2 ความสามารถรู้คิด..... | 8 |
| 2.2.3 การปรับพารามิเตอร์ของระบบ..... | 9 |
| 2.2.4 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิด..... | 10 |
| 2.2.5 แบบการใช้แถบความถี่ของเครือข่ายผู้ใช้งาน..... | 12 |
| 2.3 เทคโนโลยีโมโม..... | 13 |
| 2.3.1 ประเภทของเทคโนโลยีโมโม..... | 14 |
| 2.4 การตรวจหาพลังงาน (Energy Detection, ED)..... | 16 |
| 2.5 วิธีการรวมกันของอัตราขยายที่เท่ากันและกฎการตัดสินใจแบบร่วมมือกัน..... | 20 |
| 2.5.1 วิธีการรวมกันของอัตราขยายที่เท่ากัน..... | 20 |
| 2.5.2 กฎการตัดสินใจแบบร่วมมือกัน..... | 20 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| 2.6 | การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับสเปกตรัมที่พัฒนาจากการร่วมมือกันแบบดั้งเดิม..... | 21 |
| 2.6.1 | MAJORITY++ Rule..... | 21 |
| 2.6.2 | MAJORITY++ Rule กับการตัดสินใจแบบละเอียดอ่อน..... | 22 |
| 2.7 | กล่าวท้ายบท..... | 22 |
| บทที่ 3 | การวิเคราะห์สมรรถนะการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมโมในเครือข่ายวิทยุรู้คิด..... | 24 |
| 3.1 | กล่าวนำ..... | 24 |
| 3.2 | แบบจำลองระบบการดำเนินการการแบ่งปันสเปกตรัม..... | 24 |
| 3.2.1 | ค่าทางสถิติที่เกี่ยวข้อง..... | 26 |
| 3.3 | การวิเคราะห์การดำเนินการโดยปราศจากสัญญาณแทรกสอด PT-SR..... | 29 |
| 3.3.1 | ความน่าจะเป็นความผิดพลาด..... | 29 |
| 3.3.2 | การดำเนินการอัตราความผิดพลาด..... | 30 |
| 3.4 | การวิเคราะห์การดำเนินการร่วมกับสัญญาณแทรกสอด PT-SR..... | 32 |
| 3.5 | กล่าวท้ายบท..... | 36 |
| บทที่ 4 | ผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์..... | 37 |
| 4.1 | กล่าวนำ..... | 37 |
| 4.2 | การทดสอบพารามิเตอร์..... | 37 |
| 4.3 | ปัญหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่กับค่าอัตราผิดพลาด..... | 40 |
| 4.4 | ผลการจำลองผลการตรวจจับสเปกตรัมโดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ..... | 42 |
| 4.5 | กล่าวท้ายบท..... | 45 |
| บทที่ 5 | สรุปและข้อเสนอแนะ..... | 47 |
| 5.1 | สรุป..... | 47 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 48 |
| บรรณานุกรม | | 49 |
| ภาคผนวก ก | การเผยแพร่ผลงานวิจัย..... | 51 |
| ภาคผนวก ข | บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่..... | 52 |
| ประวัติผู้วิจัย | | 58 |

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การใช้แถบความถี่ที่มีการใช้งานไม่เท่ากัน7

รูปที่ 2.2 แถบความถี่ว่าง (spectrum hole)8

รูปที่ 2.3 วัฏจักรรู้คิด.....9

รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิด.....10

รูปที่ 2.5 เครือข่ายผู้ใช้รองที่ใช้ความถี่ร่วมกับผู้ใช้หลัก12

รูปที่ 2.6 เครือข่ายผู้ใช้รองบนแถบความถี่ซึ่งไม่มีผู้ถือครอง13

รูปที่ 2.7 แบบจำลองระบบโมโม.....14

รูปที่ 2.8 แบบจำลองการเข้ารหัสแบบ SM15

รูปที่ 2.9 สเปกตรัมที่รับได้เมื่อบางช่องสัญญาณไม่ถูกใช้งาน17

รูปที่ 2.10 เส้นโค้ง ROC ของ ED ปกติ ที่ $\gamma_{th} = -30$ dB, and $\gamma_{th} = 2000$ 19

รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบการแบ่งปันสเปกตรัมของระบบวิทยุรู้คิดแบบโมโม25

รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบเมื่อผู้ส่งหลักอยู่ไกลจากผู้รับรองมาก.....29

รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบเมื่อผู้ส่งหลักอยู่ใกล้กับผู้รับรอง.....32

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบของค่า BER ของผู้ใช้รองเมื่อเทียบกับค่าการจำกัดสัญญาณแทรกสอด γ_{th} ภายใต้อำนาจขาอากาศที่เปลี่ยนไป38

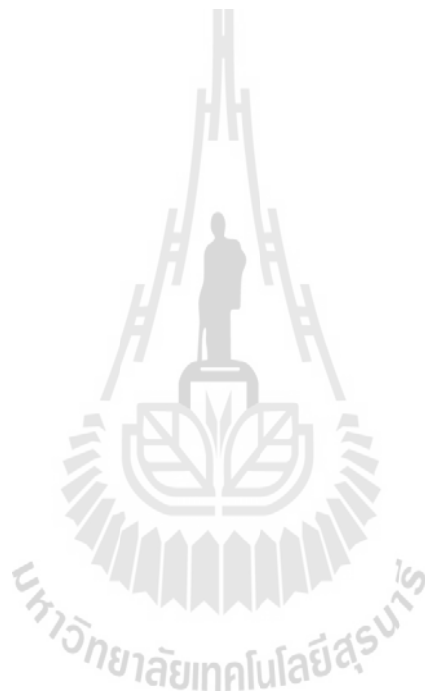
รูปที่ 4.2 BER เมื่อเทียบกับค่า SNR ที่เปลี่ยนไปในกรณีที่ไม่พิจารณาสัญญาณแทรกสอดจากการเชื่อมต่อ PT-SR และกรณีที่พิจารณาสัญญาณแทรกสอดจาก PT-SR39

รูปที่ 4.3 ขอบเขตค่า BER ของเครือข่ายผู้ใช้หลักอันเนื่องมาจากสัญญาณแทรกสอดจาก SU ในบริเวณเดียวกัน40

รูปที่ 4.4 ขอบเขตพื้นที่ดำเนินการแบ่งปันสเปกตรัมอันเนื่องมาจากค่า BER ของทั้งเครือข่ายผู้ใช้หลักและเครือข่ายผู้ใช้รองในกรณีที่ผู้รับรองอยู่ใกล้กับผู้ส่งหลัก.....41

รูปที่ 4.5 ขอบเขตพื้นที่ดำเนินการแบ่งปันสเปกตรัมอันเนื่องมาจากค่า BER ของทั้งเครือข่ายผู้ใช้หลักและเครือข่ายผู้ใช้รองในกรณีที่ผู้รับรองอยู่ไกลจากผู้ส่งหลัก42

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC สำหรับ OR rule, AND rule และ MJ rule ที่ $\sigma = 4$, $\sigma_{\text{th}} = -30$ dB และ $\sigma = 2000$ | 43 |
| รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC ของ MJ++ และ MJS++ ที่ $\sigma = 2$ และ 4 , $\sigma_{\text{th}} = -30$ dB และ $\sigma = 2000$ | 44 |
| รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC สำหรับ ED ($\sigma = 1$), EGC ($\sigma = 4$), MJ rule ($\sigma = 4$) และ MJS++ ($\sigma = 4$), ที่ $\sigma_{\text{th}} = -30$ dB และ $\sigma = 2000$ | 45 |



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันการใช้ทรัพยากรในการสื่อสารโทรคมนาคมให้มีประสิทธิภาพเป็นเรื่องที่อยู่ในความสนใจเพราะจะเพิ่มโอกาสให้ทั้งผู้ให้บริการมีรายได้มากขึ้นและผู้รับบริการเข้าถึงข้อมูลข่าวสารได้ดีขึ้น เครือข่ายวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio Networks) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีใหม่ที่ตอบสนองการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่า ทั้งนี้เป็นเพราะเครือข่ายจะอนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบการใช้งานความถี่วิทยุก่อนทำการส่งข้อมูล นั่นแปลว่าถ้าผู้ใช้งานหลัก (Primary User) พักการส่งข้อมูลในขณะนั้น ผู้ใช้งานของวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio User) ก็จะสามารถใช้ความถี่นั้นส่งข้อมูลออกไปได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การใช้เครือข่ายวิทยุรู้คิดสามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานได้มากขึ้นบนทรัพยากรที่มีเท่าเดิม อย่างไรก็ตามการใช้งานของเครือข่ายนี้จำเป็นต้องมีการจัดการสรรทรัพยากรหลักการใช้งานระหว่างผู้ใช้งานหลัก และผู้ใช้งานที่รับรู้ทางวิทยุซึ่งมีความซับซ้อนอยู่มาก

สำหรับกระบวนการวิทยุรู้คิดนั้นต้องประกอบด้วยสามขั้นตอนคือ ขั้นแรกต้องสามารถตรวจสอบรู้สเปกตรัมในอากาศเพื่อหาความถี่ช่วงที่สามารถใช้งานได้ ขั้นที่สองเพื่อวิเคราะห์แถบความถี่เหล่านี้แล้วประยุกต์เข้ากับการตัดสินใจเพื่อจะกำหนดการใช้งานในช่วงความถี่ใดและรูปแบบใด ส่วนในขั้นสุดท้ายนั้นคือการสั่งให้อุปกรณ์ทั้งหมดสามารถปรับเปลี่ยนการทำงานไปใช้ความถี่และรูปแบบที่กำหนดไว้ จะเห็นได้ว่าขั้นตอนที่สำคัญที่สุดขั้นแรกคือการรับรู้สเปกตรัมให้ได้ถูกต้อง เพราะถ้าไม่สามารถกำหนดช่องว่างของแถบความถี่ได้ ก็จะไม่ทำให้เกิดประโยชน์ต่อการใช้เครือข่ายวิทยุรู้คิด แล้วยังทำให้เกิดผลเสียขึ้นได้ เช่น ตรวจสอบว่าช่องความถี่ที่ต้องการว่าง แต่จริงๆมีผู้ใช้งานหลักใช้อยู่ ก็จะทำให้กำลังสัญญาณแทรกสอดเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการนำเสนอแนวคิดที่จะใช้ระบบโมโม (MIMO : Multiple Input Multiple Output) สำหรับเครือข่ายวิทยุรู้คิดเพราะระบบนี้สามารถเพิ่มความจุของช่องสัญญาณได้มากขึ้นในขณะที่ยังคงข้อดีของโคเวซิติอยู่ด้วย ทำให้ปัญหาในการตรวจสอบรู้สเปกตรัมต้องเพิ่มความยุ่งยากมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะความน่าจะเป็นที่จะตรวจสอบสเปกตรัมผิดพลาดขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพเป็นหลัก ซึ่งปัจจัยเหล่านี้รวมไปถึง สัญญาณแทรกสอด สัญญาณรบกวน กำลังสัญญาณที่รับได้ และเทคนิคที่ใช้ในการ

ตรวจรู้สเปกตรัม ซึ่งระบบโมโมนั้นจะเพิ่มสัญญาณแทรกสอดในเครือข่ายให้สูงขึ้น ทำให้ลดประสิทธิภาพในการตรวจรู้สเปกตรัม แต่เนื่องจากมีจำนวนสายอากาศหลายต้น ดังนั้นจึงน่าจะมีข้อดีเรื่องการใช้สายอากาศหลายๆ ต้นร่วมตัดสินใจในการตรวจรู้ดังกล่าว จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มียานวิจัยใดเคยเสนอแนวคิดที่จะพัฒนาเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมโมในเครือข่ายวิทยุรู้คิดมาก่อน เพราะส่วนใหญ่จะสนใจตรวจรู้เฉพาะการใช้งานของสายอากาศต้นเดียว หรือถ้าหลายต้นก็จะเป็นเพียงการทำซ้ำหลายๆ ต้นเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงการเข้ารหัสของระบบโมโมเลย ผลที่ตามมาเมื่อพิจารณาการเข้ารหัสของระบบโมโมนั้นจะทำให้คุณภาพในการตรวจรู้ลดลง ซึ่งถ้าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้สำเร็จก็จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นเพราะมีความแม่นยำในการตรวจรู้สเปกตรัมเพิ่มขึ้น ดังนั้นการทำวิจัยเรื่องนี้จึงเป็นเรื่องที่น่าจะให้ความสำคัญเร่งด่วนเพราะสามารถสร้างองค์ความรู้ทันกับการวิจัยในต่างประเทศ ทำให้เพิ่มโอกาสแข่งขันในระดับสากลมากขึ้น

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่พัฒนาการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมโมในเครือข่ายวิทยุรู้คิด ซึ่งผลสำเร็จจากการวิจัยนี้จะช่วยให้ระบบสื่อสารสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้นได้ และยังเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรร่วมกันได้ รวมถึงยังเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานได้มากยิ่งขึ้น ทำให้งานวิจัยนี้สอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2555-2559) ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 2 การสร้างศักยภาพและความสามารถในการพัฒนาทางเศรษฐกิจ กลยุทธ์การวิจัยที่ 7 เพิ่มสมรรถนะและขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร แผนงานวิจัยที่ 5 การวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อุปกรณ์โทรคมนาคมและเทคโนโลยีสารสนเทศ และสอดคล้องกับแผนงานวิจัยกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555-2559) เรื่อง 4. ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจสู่การเติบโตอย่างมีคุณภาพ และยั่งยืน หัวข้อ 4.2 การพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิจัย และนวัตกรรม

นอกจากนี้ผลสำเร็จของโครงการวิจัยยังทำให้คุณภาพของการสื่อสารไร้สายดีขึ้น เป็นการยกระดับคุณภาพชีวิตของกลุ่มเป้าหมาย ด้วยการพัฒนาองค์ความรู้จากนักวิจัยในประเทศไทย ทำให้ตรงกับนโยบายเร่งด่วนที่จะเริ่มดำเนินการ ในปีแรก หัวข้อที่ 8. ยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน โดยเพิ่มกำลังซื้อภายในประเทศ สร้างสมดุลและความเข้มแข็งอย่างมีคุณภาพให้แก่ระบบเศรษฐกิจมหภาค และตรงกับนโยบายระยะการบริหารราชการ 4 ปี ของรัฐบาล หัวข้อที่ 5. นโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การวิจัย และนวัตกรรม 5.1 เรื่องการเร่งพัฒนาให้ประเทศไทยเป็นสังคมที่อยู่บนพื้นฐานขององค์ความรู้

จากการสำรวจวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่าเทคนิคที่เสนอในงานวิจัยนี้เป็นเรื่องใหม่ที่ยังไม่เคยมีงานวิจัยใดเสนอมาก่อน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพัฒนาเทคนิคดังกล่าวในทางปฏิบัติด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไปและนำมาเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการพัฒนาโครงการวิจัยนี้ จึงถือเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องรับส่งในระบบสื่อสารไร้สายที่สามารถประยุกต์เข้ากับเทคโนโลยีที่

สำคัญทั้งในปัจจุบันและอนาคต ทำให้นำไปสู่การสร้างฐานรากของอุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีสื่อสารอื่นๆ ของประเทศ จึงสอดคล้องกับกลุ่มเรื่องที่ควรวิจัยเร่งด่วนตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2555-2559) หัวข้อ 9. เทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม และสอดคล้องแผนงานวิจัยกับยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติรายประเด็นที่ 8 ยุทธศาสตร์การวิจัยรายเทคโนโลยี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ความรู้ของการรับรู้สเปกตรัมสำหรับเครือข่ายวิทยุรู้คิด
2. เพื่อพัฒนาเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบไมโมในเครือข่ายวิทยุรู้คิด

1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมของเครือข่ายวิทยุรู้คิด ด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ณ ห้องปฏิบัติการ F4 ศูนย์เครื่องมือฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. ศึกษาเทคนิคการเข้ารหัสของระบบไมโม โดยใช้การจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB ณ ห้องปฏิบัติการ F4 ศูนย์เครื่องมือฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ศึกษาสมรรถนะการรับรู้สเปกตรัมของระบบไมโมในเครือข่ายวิทยุรู้คิดด้วยโปรแกรม MATLAB
4. พัฒนาเทคนิคการรับรู้ให้เหมาะสมกับระบบไมโมในเครือข่ายวิทยุรู้คิด
5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ และเปรียบเทียบกับแนวทางที่เสนอไว้ในงานวิจัยอื่นๆ
6. พัฒนา ปรับปรุง แก้ไข เพื่อให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้
7. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ
8. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุงงานวิจัย
9. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

1.4 ผลสำเร็จของโครงการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 บทความ ซึ่งเป็นน่านองค้ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เผยแพร่แก่นักวิจัยที่ทำงานใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ได้ ซึ่งหน่วยงานวิจัยทางโทรคมนาคมในประเทศไทยสามารถนำผลงานดังกล่าวไปใช้ได้

1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันการบริโภคระบบสื่อสารไร้สายได้เพิ่มขึ้นอย่างมากในทุกๆวัน ทำให้การใช้ทรัพยากรความถี่ต้องถูกจำกัดให้น้อยที่สุดและนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด อย่างไรก็ตามย่านความถี่หลายๆ ย่านก็ถูกจำกัดสิทธิในการใช้งานซึ่งต้องประมูลซื้อแถบความถี่เหล่านั้นในราคาแพง หรือแถบความถี่บางช่วงก็ถูกนำไปจัดสรรให้ใช้กับการใช้งานด้านอื่นๆ จนไม่เหลือที่ให้นำไปใช้เพื่อการสื่อสารไร้สายที่กำลังขยายตัวขึ้น ในกรณีนี้เครือข่ายวิทยุรู้คิดจึงได้ถูกเสนอขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาความขาดแคลนทรัพยากรความถี่ โดยมีแนวคิดที่ว่าแถบความถี่ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันไม่ได้ถูกใช้งานอยู่ตลอดเวลา การจัดสรรการใช้ความถี่ในบางพื้นที่สามารถนำช่วงว่างของแถบความถี่บางช่วงมาให้บริการการสื่อสารไร้สายอื่นๆ ในพื้นที่นั้นๆ ได้ อุปกรณ์วิทยุรู้คิดจึงต้องมีความสามารถที่จะตรวจสอบสเปกตรัมที่อยู่ในอากาศบริเวณพื้นที่นั้นว่าสามารถใช้แถบความถี่ใดที่จะไม่กวนกับการใช้งานของผู้ใช้งานหลักได้ ดังนั้นการรับรู้สเปกตรัมจึงเป็นเรื่องที่สำคัญที่สุดและเป็นสิ่งแรกที่เครือข่ายวิทยุรู้คิดจะต้องให้ความสำคัญในทางปฏิบัติ [1], [2] ทั้งนี้ถ้าอุปกรณ์วิทยุรู้คิดตรวจพบการใช้สเปกตรัมของผู้ใช้งานหลักในแถบความถี่ที่กำลังใช้งานอยู่เมื่อใด อุปกรณ์วิทยุรู้คิดต้องหยุดการใช้งานในย่านความถี่นั้นทันทีเพื่อไม่ให้กระทบต่อการใช้งานของผู้ใช้งานหลัก มิฉะนั้นแล้วทั้งสองระบบคือผู้ใช้งานหลักและผู้ให้บริการวิทยุรู้คิดจะกลายเป็นสัญญาณแทรกสอดกันเอง ส่งผลต่อความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลและคุณภาพของการบริการ

การรับรู้สเปกตรัมสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ 1) การรับรู้สเปกตรัม in-band และ 2) การรับรู้สเปกตรัม out-of-band [3] สำหรับในกรณีที่เป็น in-band นั้นระบบวิทยุรู้คิดจะตรวจสอบสเปกตรัมที่กำลังใช้งานอยู่เฉพาะในแถบความถี่ที่อุปกรณ์วิทยุรู้คิดใช้งานอยู่ในขณะที่กรณี out-of-band นั้นจะตรวจสอบแถบความถี่ที่อุปกรณ์วิทยุรู้คิดไม่ได้กำลังใช้งานอยู่ สำหรับอุปกรณ์วิทยุรู้คิดกรณี in-band นั้นควรจะไม่ต้องส่งสัญญาณขณะที่กำลังตรวจสอบสเปกตรัมเพราะกำลังที่ส่งออกไปจะไปกวนการตรวจสอบสเปกตรัมของผู้ใช้งานหลัก ช่วงเวลาที่อุปกรณ์วิทยุรู้คิดไม่ส่งสัญญาณนี้เรียกว่า quiet time ซึ่งเป็นช่วงที่อุปกรณ์ทำการตรวจสอบสเปกตรัมอยู่ดังนั้นช่วงเวลานี้ควรยาวนานพอที่จะตรวจสอบสเปกตรัมให้มั่นใจ [3], [4] อย่างไรก็ตามถ้านานมากเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อภาระหน่วงเวลาในการรับส่งข้อมูลของผู้ให้บริการจะได้รับ ทำให้บริการแบบ real-time เช่น VoIP นั้นไม่ต้องการ นอกจากนี้ช่วงเวลาตรวจสอบที่นานเกินไปยังส่งผลกระทบต่อสูญเสียปริมาณข้อมูลในการรับส่งด้วย เพื่อแก้ปัญหานี้เทคนิคการรับรู้สเปกตรัมชื่อว่า two-stage sensing ได้ถูกนำเสนอโดยพิจารณาคุณภาพในการให้บริการเป็นหลัก เทคนิคนี้จะใช้ 2 วิธีการของการรับรู้ร่วมกัน วิธีแรกคือการรับรู้อย่างรวดเร็วซึ่งโดยมากแล้วจะใช้การตรวจสอบระดับพลังงานบนแถบความถี่นั้นและอีกวิธีการหนึ่งคือการรับรู้อย่างละเอียดซึ่งจะขึ้นอยู่กับวิธีการรับรู้ที่ซับซ้อนเช่น วิธี cyclostationary [3] โดยปกติแล้ววิธีการรับรู้อย่างรวดเร็วนั้นสามารถทำได้ภายใน 1 ms ขณะที่การรับรู้อย่างละเอียดต้องใช้

ระยะเวลาพอสมควร เช่น ประมาณ 24.2 ms สำหรับ Advanced Television System Committee [5] สำหรับการให้สองวิธีร่วมกันนี้จะใช้วิธีการรับรู้อย่างรวดเร็วในตอนแรกเพื่อให้อุปกรณ์วิทยุรู้ขีดทราบการใช้งานแถบความถี่อย่างรวดเร็วก่อน แล้วจึงค่อยตัดสินใจว่าจะต้องทำการรับรู้อย่างละเอียดหรือไม่ ทำให้วิธีการนี้ปรับปรุงคุณภาพของการบริการให้ดีขึ้นได้ในขณะที่รักษาความแม่นยำได้ดี แต่วิธีการนี้ก็ยังคงมีการตรวจสอบผิดพลาดอยู่เรื่อยๆ เนื่องจากข้อมูลที่ตรวจสอบใช้เวลาสั้นจึงอาจจะเป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้งานหลักไม่ส่งข้อมูลอยู่ในช่วงขณะนั้น เพื่อแก้ปัญหานี้ได้มีงานวิจัยที่เสนอการใช้ dynamic frequency hopping [6] เพื่อตรวจสอบความถี่ไปยังแถบความถี่ที่ว่างอยู่ตลอดทั้งช่วงที่สนใจ วิธีนี้มีข้อเสียที่การเสียเวลาในการกระโดดไปยังแถบความถี่ต่างๆ ที่ว่างอยู่ แม้ว่าจะลดการผิดพลาดของการตรวจรู้สเปกตรัมลงได้บ้าง และก็ไม่คุ้มที่จะใช้งานจริงและยิ่งเป็นไปได้ยากถ้าผู้ใช้งานวิทยุรู้ขีดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแนวคิดที่ดีที่สุดคือการตรวจรู้สเปกตรัมเฉพาะแถบความถี่ที่ต้องการส่งข้อมูลเพียงแถบเดียว ซึ่งต่อมาได้มีงานวิจัยที่จะใช้การร่วมมือกันของผู้ให้บริการวิทยุรู้ขีดหลายๆ คนช่วยกันตรวจรู้สเปกตรัม หรือเรียกว่า cooperative spectrum sensing ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจรู้ขีดได้ยิ่งขึ้น [2], [7]–[11] รูปแบบการกระจายการรับรู้สเปกตรัมจากผู้ใช้งานหลายๆ คนสามารถบอกถึงพื้นที่การใช้งานของผู้ใช้งานหลักได้ ทำให้ลดความผิดพลาดในการตรวจรู้สเปกตรัมได้มาก ผลการวิเคราะห์สมรรถนะการตรวจรู้สเปกตรัมภายใต้การเฟดของช่องสัญญาณถูกนำเสนอไว้ใน [7] และมีการพัฒนาโดยใช้รีเลย์ในงานวิจัยที่ [8] ส่วนงานวิจัยที่ [10] ได้เสนอเทคนิค cooperative spectrum sensing ที่จะทำให้ได้ปริมาณการรับส่งข้อมูลสูงที่สุด ซึ่งจากงานวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การตรวจรู้สเปกตรัมคือระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ กำลังของสัญญาณแทรกสอด และช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานหลักและผู้ให้บริการวิทยุรู้ขีด ปัจจัยดังกล่าวนี้ก็ยังทวีความรุนแรงขึ้นเมื่อเป็นระบบโมโม ทั้งนี้เพราะจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้นและการส่งข้อมูลที่เข้ารหัสไว้หลายชุดพร้อมกันทำให้เกิดระดับของสัญญาณแทรกสอดที่เพิ่มขึ้นมาก คุณภาพการให้บริการก็จะมีควมไวต่อช่องสัญญาณมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการรับรู้สเปกตรัมในเครือข่ายวิทยุรู้ขีดโดยตรง สิ่งที่เป็นปัญหาเหล่านี้ยังไม่เคยถูกพิจารณาไว้ในงานวิจัยใดมาก่อน ซึ่งในทางปฏิบัติย่อมไม่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหานี้ได้ จึงทำให้โครงการวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนาเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมโมในเครือข่ายวิทยุรู้ขีดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจรู้ขีดพร้อมๆ กับเพิ่มความจุของช่องสัญญาณด้วย ซึ่งถ้าหากทำได้เป็นผลสำเร็จก็จะเป็นงานวิจัยที่ใหม่และสามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้อย่างแน่นอน

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการการแบ่งปันสเปกตรัมซึ่งประกอบด้วย ระบบวิทยุรู้คิด เทคโนโลยีโมโม การตรวจจับสเปกตรัมด้วยวิธีการตรวจหาพลังงาน รวมไปถึงเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับสเปกตรัม ซึ่งเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นจะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญซึ่งนำไปสู่การแบ่งปันสเปกตรัมระหว่างผู้ใช้หลักและผู้ใช้รองในระบบวิทยุรู้คิดสำหรับระบบโมโม

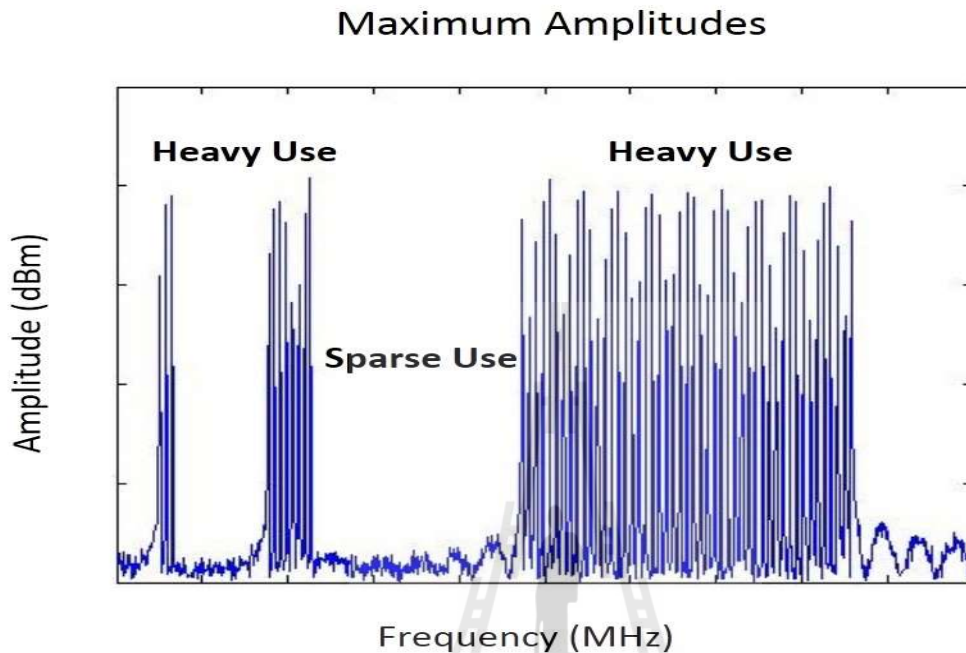
2.2 ระบบวิทยุรู้คิด

ในปัจจุบันเครือข่ายไร้สายมีนโยบายในการจัดสรรแถบความถี่แบบคงที่ คือรัฐจะเป็นผู้กำหนดแถบความถี่ไร้สายให้กับผู้รับสัมปทานใช้ในระยะยาว เนื่องจากความต้องการแถบความถี่มีมากขึ้น และแถบความถี่นั้นเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด ทำให้การขาดแคลนความถี่เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วในปัจจุบัน ในความเป็นจริงบางแถบความถี่ที่ถูกใช้ส่วนใหญ่จะถูกใช้เป็นเวลาเท่านั้น ดังได้แสดงในรูปที่ 2.1 เพราะฉะนั้นการใช้แถบความถี่ในปัจจุบันนั้นถือว่ายังไม่มีประสิทธิภาพ โดยระบบวิทยุรู้คิดนั้นเป็นระบบที่มีไว้แก้ปัญหาค่าความหนาแน่นของการใช้แถบความถี่ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้ใช้แถบความถี่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [5]

วิทยุรู้คิดนั้นมีความสามารถในการแบ่งปันช่องสัญญาณระหว่างผู้ใช้หลักซึ่งเป็นผู้ได้รับอนุญาตจากรัฐกับผู้ใช้รอง เทคโนโลยีของระบบวิทยุรู้คิดนี้สามารถให้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ความกว้างแถบความถี่ที่สูงขึ้นได้ โดยเทคนิคการสลับใช้แถบความถี่ที่แตกต่างกัน แต่ระบบวิทยุรู้คิดจะมีปัญหาเนื่องจากการเข้าใช้แถบความถี่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา รวมไปถึงความต้องการคุณภาพการให้บริการ (quality of service, QoS) ของการใช้งานต่างๆเพื่อให้ได้ช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ระบบวิทยุรู้คิดจึงต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. สามารถตรวจหาว่าผู้ใช้หลักนั้นมีการใช้งานหรือไม่มีการใช้งาน (spectrum sensing)
2. สามารถอนุญาตให้ผู้ใช้รองใช้แถบความถี่พร้อมกับผู้ใช้หลัก โดยผู้ใช้หลักยอมให้มีสัญญาณแทรกสอดในระดับที่ทนได้

3. การเลือกผู้ใช้งานเพื่อลดสัญญาณแทรกสอดให้น้อยที่สุดในระบบที่ใช้แถบความถี่ร่วมกัน

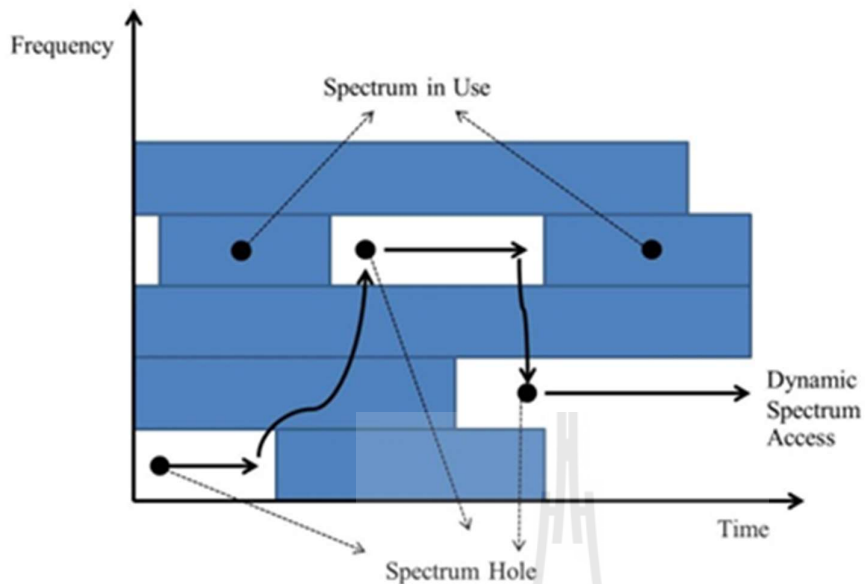


รูปที่ 2.1 การใช้แถบความถี่ที่มีการใช้งานไม่เท่ากัน

2.2.1 นิยามของวิทยุรู้คิด

นิยามของระบบวิทยุรู้คิดคือ ระบบวิทยุที่ปรับตัวหรือเปลี่ยนวิธีการส่ง เมื่อสภาพแวดล้อมนั้นเปลี่ยนแปลงไป [6] ซึ่งเป็นระบบที่มีความสามารถสองประการได้แก่

1. ความสามารถรู้คิด (cognitive capability) ตำแหน่งของแถบความถี่ซึ่งไม่มีการใช้งานบางช่วงเวลา เรียกว่า แถบความถี่ว่าง (spectrum hole) [7] ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 ระบบวิทยุรู้คิดจะสามารถระบุส่วนของแถบความถี่ซึ่งไม่ได้มีการใช้งาน จากนั้นจะทำการเลือกแถบความถี่ที่ดีที่สุด เพื่อผู้ใช้งานเข้าร่วมใช้แถบความถี่ และจะต้องไม่มีสัญญาณแทรกสอดต่อผู้ใช้หลัก



รูปที่ 2.2 แถบความถี่ว่าง (spectrum hole)

2. การปรับค่าพารามิเตอร์ (reconfigurability) ระบบวิทยุรู้คิดสามารถปรับพารามิเตอร์ให้ส่งและรับได้หลายความถี่ โดยมีการปรับทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อสามารถใช้งานได้ในแต่ละแถบความถี่

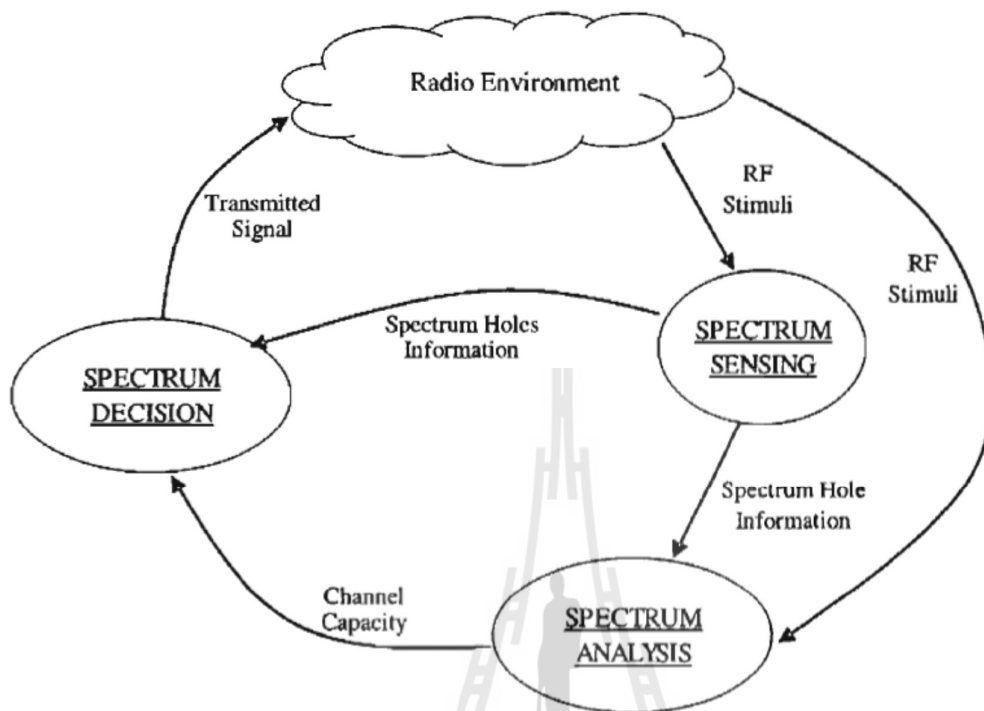
2.2.2 ความสามารถรู้คิด

ความสามารถรู้คิดของระบบวิทยุรู้คิดนั้นทำการติดต่อสื่อสารและปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรหรือวิธีการส่งให้เหมาะสมเมื่อสภาพแวดล้อมนั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งขั้นตอนที่จำเป็นในการปรับตัวของระบบวิทยุรู้คิดนั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เรียกว่า วัฏจักรรู้คิด (cognitive cycle) [7] ซึ่งมีทั้งหมดสามขั้นตอนคือ ตรวจจับสเปกตรัม วิเคราะห์สเปกตรัม และการเลือกสเปกตรัม

1. ตรวจจับสเปกตรัม (spectrum sensing) โดยระบบวิทยุรู้คิดนั้นจะทำการตรวจสอบแถบความถี่ที่เหมาะสม ทำการรวบรวมข้อมูล และหาตำแหน่งความถี่ที่ว่าง

2. วิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analysis) วิเคราะห์ตำแหน่งที่ว่างของแถบความถี่ ว่าตำแหน่งว่างมีความเหมาะสมต่อผู้ใช้หรือไม่

3. การตัดสินใจเลือกสเปกตรัม (spectrum decision) ระบบวิทยุรู้คิดนั้นกำหนดอัตราเร็วในการส่งข้อมูล รูปแบบในการส่ง และความกว้างแถบความถี่ในการส่ง จากนั้นแถบความถี่ที่เหมาะสมจะได้รับเลือกตามลักษณะและความต้องการของผู้ใช้



รูปที่ 2.3 วัฏจักรรู้คิด

2.2.3 การปรับพารามิเตอร์ของระบบ

การปรับระบบที่ชาญฉลาดเพื่อใช้ในการส่ง โดยปราศจากการเพิ่มเติมในส่วนของฮาร์ดแวร์ ประกอบด้วย ระบบความถี่ การผสมสัญญาณ กำลังส่ง และเทคโนโลยีการสื่อสาร

1. ระบบความถี่ (operating frequency) ระบบวิทยุรู้คิดนั้นมีความสามารถในการเปลี่ยนความถี่ในการดำเนินการ ขึ้นอยู่กับข้อมูลเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม และการสื่อสารสามารถดำเนินการแบบพลวัตในสเปกตรัมที่เหมาะสม

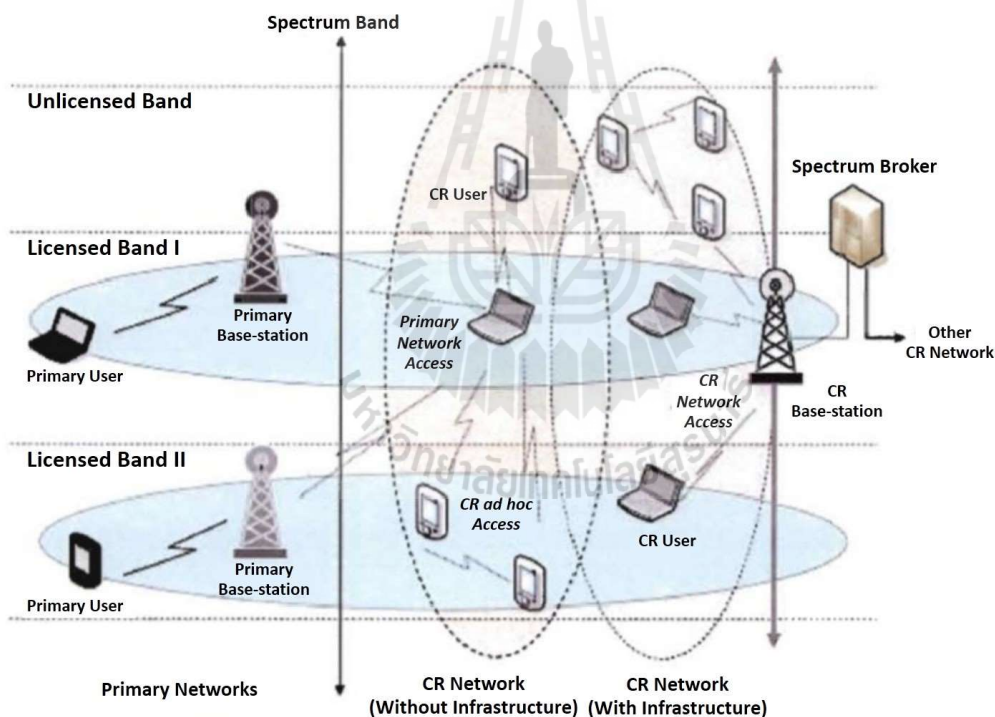
2. การผสมสัญญาณ (modulation) ระบบวิทยุรู้คิดนั้นควรจะปรับการผสมสัญญาณที่เหมาะสมกับผู้ใช้ และช่องสัญญาณ เนื่องจากการผสมสัญญาณที่เหมาะสมนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร

3. กำลังส่ง (transmission power) กำลังในการส่งนั้นจะถูกปรับแต่งภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ถ้าให้กำลังในการส่งมากเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสีย ระบบวิทยุรู้คิดนั้นจะปรับกำลังส่งให้เหมาะสมในการใช้ความถี่ร่วมกันและการลดสัญญาณแทรกสอดที่จะเกิดขึ้น

4. เทคโนโลยีการสื่อสาร (communication technology) ระบบวิทยุรู้คิดนั้นจะทำการปรับรูปแบบของผู้ใช้เพื่อใช้ในระบบสื่อสารที่แตกต่างได้

2.2.4 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิด

ส่วนประกอบของสถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิด (cognitive network architecture) [5] นั้นได้แสดงในรูปที่ 2.4 แบ่งผู้ใช้ระบบเป็นสองกลุ่มคือ เครือข่ายผู้ใช้หลัก (primary network) และ เครือข่ายผู้ใช้รอง (cognitive radio network or secondary network) โดยผู้ใช้อุปกรณ์มีสามแถบความถี่ที่สามารถใช้งานได้คือ แถบความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต (unlicensed band) และอีก 2 แถบความถี่ที่มีใบอนุญาต (licensed band) โดยผู้ใช้หลักจะใช้เพียงแถบความถี่ที่มีใบอนุญาต ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิด

2.2.4.1 เครือข่ายผู้ใช้หลัก

เป็นเครือข่ายที่มีสิทธิใช้แถบความถี่อย่างสมบูรณ์ เช่นเครือข่ายที่วี้ออกอากาศ เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วย

1. ผู้ใช้หลัก คือผู้ใช้ที่มีสิทธิใช้แถบความถี่ดังกล่าว โดยถูกควบคุมจากสถานีฐานผู้ใช้หลัก (primary base station) เพียงเท่านั้นและไม่ควรมีผลของสัญญาณแทรกสอดจากผู้อื่นๆ ผู้ใช้หลักจึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนในระบบวิทยุรู้คิด

2. สถานีฐานผู้ใช้หลัก เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเครือข่ายผู้ใช้หลักซึ่งได้รับใบอนุญาตในแถบความถี่ดังกล่าว โดยปกติแล้วสถานีฐานผู้ใช้หลักจะไม่มีขีดความสามารถให้เครือข่ายผู้ใช้รองเข้าร่วมใช้แถบความถี่ได้

2.2.4.2 เครือข่ายวิทยุรู้คิด หรือเครือข่ายผู้ใช้รอง

เป็นเครือข่ายที่ไม่มีใบอนุญาตให้เข้าดำเนินงานในแถบความถี่ของผู้ใช้หลัก ดังนั้นการเข้าใช้แถบความถี่ของผู้ใช้หลักนั้นจึงต้องอาศัยการเทคนิคปรับตัวของเครือข่าย เครือข่ายผู้ใช้รองสามารถนำมาใช้ในเครือข่ายโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) และเครือข่าย Ad-hoc ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 2.4 เครือข่ายผู้ใช้รองประกอบด้วย

1. ผู้ใช้รอง เป็นผู้ใช้ที่ต้องการเข้าใช้แถบความถี่ร่วมกับผู้ใช้หลัก
2. สถานีฐานผู้ใช้รอง เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเครือข่ายผู้ใช้รอง จะให้การเชื่อมต่อกับผู้ใช้รอง โดยใช้วิธีเข้าร่วมแถบความถี่ของผู้ใช้หลัก จากรูปที่ 2.4 เห็นได้ว่าระบบวิทยุรู้คิดประกอบด้วยเครือข่ายต่างชนิดกันเช่น เครือข่ายผู้ใช้หลัก เครือข่ายผู้ใช้รองและเครือข่าย Ad-hoc ของผู้ใช้รอง ในกรณีที่เครือข่ายผู้ใช้รองนั้นเข้าใช้แถบความถี่แบบคลื่นผสม ซึ่งประกอบไปด้วยการเข้าใช้แถบความถี่ของตน และการร่วมใช้แถบความถี่กับเครือข่ายผู้ใช้หลัก เครือข่ายผู้ใช้รองมีวิธีการเข้าถึงแถบความถี่สามรูปแบบด้วยกันคือ

1. การเข้าถึงเครือข่ายผู้ใช้รอง (cognitive network access) ผู้ใช้รองสามารถเข้าถึงสถานีฐานของผู้ใช้รองผ่านทางแถบความถี่ที่ได้รับอนุญาตและไม่ได้รับอนุญาต

2. การเข้าถึงเครือข่าย Ad-hoc ของผู้ใช้รอง (cognitive Ad-hoc access) ผู้ใช้รองสามารถสื่อสารกับผู้ใช้รองได้ผ่านช่องสัญญาณ Ad-hoc

3. การเข้าถึงเครือข่ายผู้ใช้หลัก (primary network access) ผู้ใช้รองสามารถเข้าถึงแถบความถี่ของผู้ใช้หลักผ่านทางแถบความถี่ที่ต้องได้รับอนุญาต

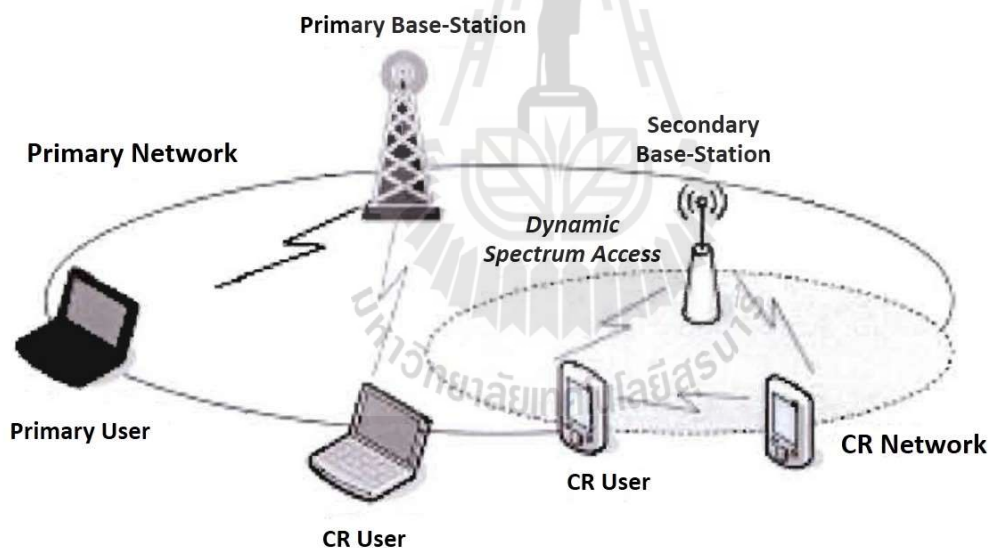
จากรูปที่ 2.4 แสดงระบบวิทยุรู้คิด ในส่วนของเครือข่ายผู้ใช้รองนั้น จำเป็นต้องมีหน้าที่ในการสนับสนุนความแตกต่างของเครือข่าย ฉะนั้นส่วนต่อไปจะอธิบายหน้าที่ของเครือข่ายผู้ใช้รอง

2.2.5 แบบการใช้แถบความถี่ของเครือข่ายผู้ใช้รอง

จากการเข้าถึงเครือข่าย (network access) ของผู้ใช้รองข้างต้นจะเห็นได้ว่าผู้ใช้รองมีการเข้าใช้ทั้งรูปแบบของแถบความถี่ที่มีผู้ถือครองและแถบความถี่ที่ไม่มีผู้ถือครอง เพราะฉะนั้นเครือข่ายของผู้ใช้รอนั้นจะแตกต่างกันตามแถบความถี่ที่ถือว่าเป็นแถบความถี่แบบใด การเข้าถึงเครือข่ายผู้ใช้รองโดยการใช้แถบความถี่ใดนั้น จะอธิบายดังต่อไปนี้

2.2.5.1 เครือข่ายผู้ใช้รองที่ใช้ร่วมกันบนแถบความถี่ผู้ใช้หลัก

ในรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าเมื่อใดที่ผู้ใช้หลักนั้นไม่ได้ใช้งานแถบความถี่นั้น จะเกิดแถบความถี่ว่าง ด้วยเหตุนี้เครือข่ายผู้ใช้รองจึงสามารถปรับตัวเพื่อเข้าไปใช้แถบความถี่ว่างเหล่านี้ผ่านทางระบบวิทยุรู้คิด ซึ่งรูปแบบการสื่อสารได้แสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อเครือข่ายผู้ใช้รองเข้าร่วมกับเครือข่ายผู้ใช้หลักผ่านทางแถบความถี่เดียวกันและบริเวณเดียวกัน

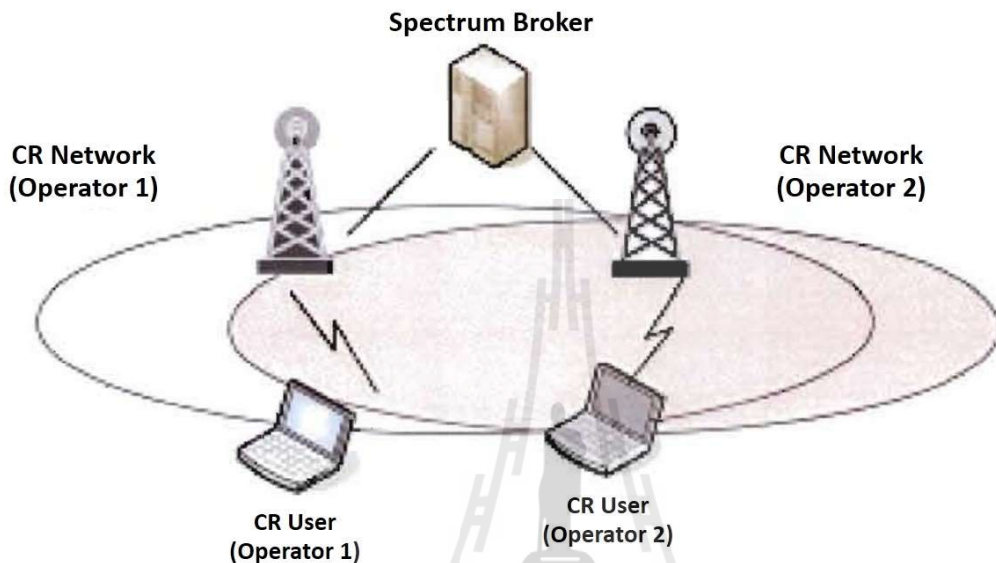


รูปที่ 2.5 เครือข่ายผู้ใช้รองที่ใช้ความถี่ร่วมกับผู้ใช้หลัก

2.2.5.2 เครือข่ายผู้ใช้รองที่ใช้บนแถบความถี่แบบไม่มีผู้ถือครอง

การสื่อสารหลายระบบบนแถบความถี่เดียวกันนั้นก่อให้เกิดปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ แต่ระบบวิทยุรู้คิดนั้นสามารถออกแบบให้สามารถทำงานบนแถบความถี่เดียวกันได้ ซึ่งได้แสดงโครงสร้างที่รูป 2.6 ไม่มีผู้ใช้ถือครองแถบความถี่ของระบบ แต่ผู้ใช้สามารถเข้าใช้แถบความถี่นั้นได้โดยมีสิทธิเท่า

เทียมกัน เครื่องข่ายผู้ใช้รองที่ใช้แถบความถี่ร่วมกัน ในบริเวณเดียวกัน จึงต้องมีอัลกอริทึมเพื่อลดสัญญาณแทรกสอด ในระบบดังกล่าวผู้ใช้รองต้องเรียนรู้สภาวะของตนเองและผู้ใช้รองอื่น เพื่อหาวิธีในการแบ่งแถบความถี่ของผู้ใช้รอง



รูปที่ 2.6 เครื่องข่ายผู้ใช้รองบนแถบความถี่ซึ่งไม่มีผู้ถือครอง

2.3 เทคโนโลยีโมโม

ในการสื่อสารโดยใช้สายอากาศหลายคันในการส่งและรับสัญญาณดังรูปที่ 2.7 เป็นเทคนิคในการเพิ่มความหลากหลาย (spatial diversity) เพื่อลดปัญหาของการจางหายของสัญญาณ (fading) การใช้สายอากาศที่มากกว่าหนึ่งในการส่งนั้นเป็นการสร้างหลายช่องทางเชิงตำแหน่ง (multiple spatial channels) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง นอกจากนี้ระบบโมโมสามารถเพิ่มความจุของช่องสัญญาณให้มากขึ้น ทำให้ระบบสามารถออกแบบให้มีอัตราการส่งข้อมูล (bit rate) สูงขึ้นได้ โดยคลื่นแต่ละชุดจะมีลักษณะเฉพาะในด้านทิศทาง หากนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ที่ภาครับก็จะสามารถแยกแยะว่าสัญญาณที่ส่งออกมาจากหลายคันนั้นมีข้อมูลอะไรบ้าง เมื่อนำมารวมกันที่ปลายทางก็จะได้ข้อมูลต้นฉบับเปรียบเสมือนการส่งข้อมูลขนานจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยระบบโมโมจะประกอบด้วยจำนวนสายอากาศของภาคส่งคือ N คัน และจำนวนสายอากาศของภาครับคือ M คัน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$y = Hx + n \quad (2.1)$$

โดยที่ y แทนเวกเตอร์สัญญาณที่ภาครับขนาด $M \times 1$

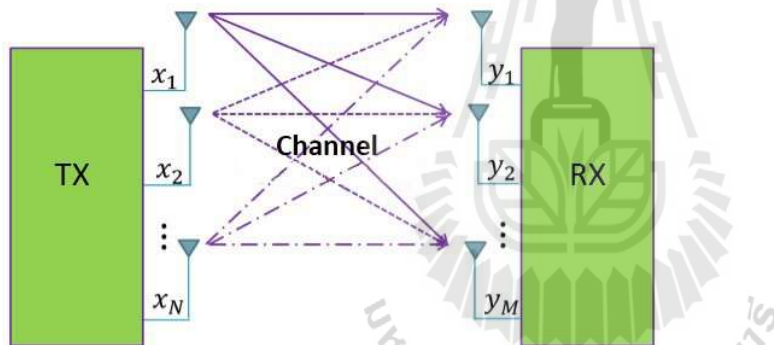
x แทนเวกเตอร์สัญญาณที่ภาคส่งขนาด $N \times 1$

n แทนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ภาครับ

H แทนเวกเตอร์ของช่องสัญญาณที่มีขนาด $M \times N$

ซึ่ง H สามารถเขียนแทนได้ดังนี้

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \cdots & h_{MN} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.7 แบบจำลองระบบโมโม

2.3.1 ประเภทของเทคโนโลยีโมโม

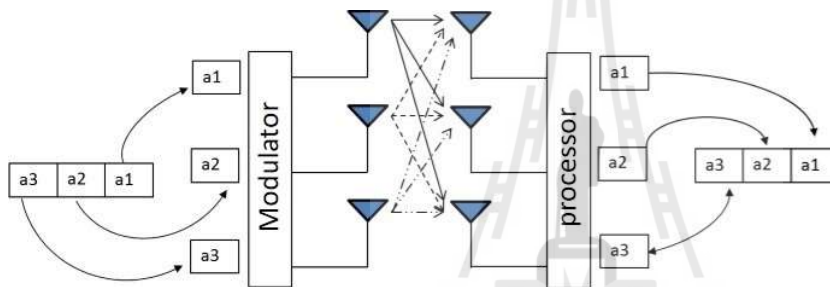
เทคโนโลยีโมโมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบเปิด (open loop) และระบบปิด (close loop) โดยทั้งสองระบบนี้มีข้อแตกต่างกันคือ ในระบบปิดจะมีการป้อนกลับสัญญาณที่รับได้ไปวิเคราะห์ว่าสัญญาณที่รับได้นั้นมีคุณภาพดีหรือไม่อย่างไร ถ้าไม่ดีก็จะทำการส่งข้อมูลป้อนกลับไปยังภาคส่งเพื่อให้ส่งข้อมูลมาใหม่ ในระบบปิดมีความซับซ้อนกว่าระบบเปิดมาก แต่เทียบคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นจะมีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าระบบเปิด ซึ่งแตกต่างจากระบบเปิดที่ไม่มีการป้อนกลับสัญญาณไปที่ภาคส่ง

2.3.1.1 ระบบเปิด

เทคโนโลยีโมโระบบเปิดสามารถแบ่งประเภทตามเทคนิคการส่งสัญญาณออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.3.1.1.1 วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

เทคนิควิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (spatial multiplexing, SM) เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณแบบสลับตำแหน่งโดยใช้เวลาและความแรงของสัญญาณไม่เท่ากัน [8-9] ขั้นตอนการส่งจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันทั้งหมดเท่ากับจำนวนสายอากาศที่อยู่ในภาคส่งคือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.8 เทคนิคนี้ถือเป็นหัวใจสำคัญในระบบไร้สาย (wireless) 802.11n สำหรับการเพิ่มความเร็ว แต่ทั้งนี้ต้องอาศัยสายอากาศภาคส่งและรับหลายต้นที่รู้จักกันในชื่อ โมโม



รูปที่ 2.8 แบบจำลองการเข้ารหัสแบบ SM

2.3.1.1.2 วิธีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก

การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก (space-time block coding, STBC) เป็นการเข้ารหัสเพื่อเพิ่มข้อมูลอีกชุดหนึ่งส่งออกอากาศโดยใช้สายอากาศอีกต้นหนึ่ง ในลักษณะของโมโซ (Multiple Input Single Output) ทำให้ภาครับรับสัญญาณได้ 2 ชุด ช่วยให้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น [10-11] แต่นั่นก็ต้องแลกมาด้วยการปรับปรุงวงจรทั้งภาคส่งและภาครับ โดยภาคส่งทางด้านทางจะต้องมีวงจรเข้ารหัสแบบ STBC และสายอากาศ 2 ต้น เพื่อส่งข้อมูลออกไปพร้อมๆ กัน และทางภาครับก็ต้องมีวงจรถอดรหัสแบบ STBC ด้วย

2.3.1.2 ระบบปิด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าระบบโมโมแบบระบบปิดมีความแตกต่างจากระบบโมโมแบบระบบเปิดคือ ระบบปิดจะมีการป้อนกลับสัญญาณไปยังภาคส่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณให้ดีขึ้น โดยระบบปิดจะมีความซับซ้อนกว่าระบบเปิด

2.4 การตรวจหาพลังงาน (ENERGY DETECTION, ED)

หลักการของการตรวจจับสเปกตรัมสามารถเข้าใจได้ง่ายๆ [12] เพราะสนใจเพียงแค่แถบความถี่ในสมมติฐานสองแบบ ได้แก่ H_0 (ว่าง) และ H_1 (ไม่ว่าง) สถานะว่าง (idle) คือเมื่อสัญญาณผู้ใช้หลัก (PU) ถูกตรวจจับไม่ได้ สัญญาณที่รับได้จะมีแค่สัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมความถี่วิทยุ (radio frequency, RF) สำหรับสถานะไม่ว่าง (busy) จะเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณที่รับได้ประกอบไปด้วย สัญญาณผู้ใช้หลัก และสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถอธิบายโดย

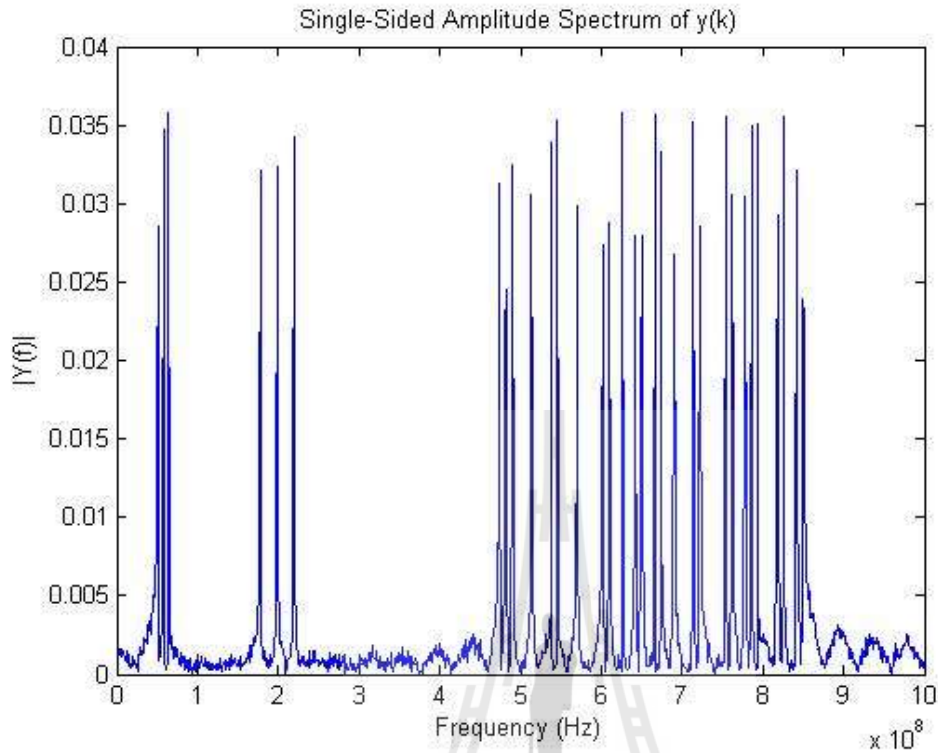
$$\begin{aligned} H_0: y(k) &= w(k) \\ H_1: y(k) &= s(k) + w(k), \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อ $y(k)$ แทนสัญญาณที่รับได้, $w(k)$ แทนสัญญาณรบกวน และ $s(k)$ แทนสัญญาณผู้ใช้หลัก สำหรับ $k = 1, \dots, n$ และ n คือจำนวนตัวอย่างที่รับได้ (received samples) ในความเป็นจริงมีเทคนิคการตรวจจับสเปกตรัมอยู่มากมาย แต่ที่วิธีการตรวจหาพลังงานเป็นที่นิยมเนื่องด้วยความสะดวกในการนำมาใช้งาน อีกทั้งยังมีความง่ายในการแยกแยะสถานะของสัญญาณผู้ใช้หลักด้วยพลังงานที่มาพร้อมกับสัญญาณได้อย่างตรงไปตรงมาดังจะเห็นได้ในรูปที่ 2.9

การประเมินผลการดำเนินการของเทคนิคการตรวจจับสเปกตรัมสามารถดูอย่างมีนัยสำคัญได้จากค่าความน่าจะเป็นสองชนิด ได้แก่ ความน่าจะเป็นของการตรวจหาได้ P_D และความน่าจะเป็นของการเตือนผิด P_{FA}

P_D เป็นความน่าจะเป็นของการตรวจหาสัญญาณบนความถี่ที่พิจารณาเมื่อสัญญาณนั้นปรากฏขึ้นจริง หรือสามารถอธิบายในอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งก็คือ ความน่าจะเป็นของส่วนที่เหลือจากความน่าจะเป็นของการตรวจหาพลาด P_{MD} สามารถเขียนได้เป็น

$$P_D = 1 - P_{MD} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมที่รับได้เมื่อบางช่องสัญญาณไม่ถูกใช้งาน

เมื่อ P_{MD} เป็นความน่าจะเป็นของการตรวจหาสัญญาณเมื่อช่องสัญญาณที่ไม่ว่างถูกตรวจผิดว่าเป็นช่องสัญญาณที่ว่าง ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ พลังงานของสัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์การตรวจหา (detection threshold) τ ส่วน P_{FA} เป็นความน่าจะเป็นของการตรวจหาสัญญาณเมื่อช่องสัญญาณที่ว่างถูกตรวจผิดว่าเป็นช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง โดยมักจะมีเหตุมาจากความเข้าใจผิดที่ว่าสัญญาณรบกวนที่มีค่ามากเกินไปในช่องสัญญาณที่ว่างงาน P_{MD} และ P_{FA} สามารถถูกกำหนดเป็น

$$P_{MD} = Prob\{Decide H_0 | H_1\} \quad (2.5)$$

$$P_{FA} = Prob\{Decide H_1 | H_0\} \quad (2.6)$$

จะสามารถเห็นได้ว่า P_{FA} มีความเกี่ยวข้องกับ P_D ในเชิงที่ว่า P_{FA} เป็นหนึ่งในรูปแบบต่างๆของ P_D เมื่อจำนวนทั้งหมดของสัญญาณถูกตรวจจับ จากนั้นมีจำนวนหนึ่งของสัญญาณรบกวนที่ถูกเข้าใจผิด

ค่าความน่าจะเป็น P_{FA} และ P_{MD} ในรูปแบบของการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณอย่างง่ายถูกจำลองในกรณีของกระบวนการสังเกตแบบ Gaussian ที่มีค่ากลางเป็นศูนย์ (zero-mean) และเป็นอิสระจากสัญญาณรบกวน อันซึ่งสามารถคำนวณเป็น

$$P_{FA} = \Gamma_u(n\tau, n) \quad (2.7)$$

$$P_{MD} = \Gamma_u\left(\frac{n\tau}{1+SNR}, n\right) \quad (2.8)$$

ที่ $\Gamma_u(\dots)$ คือ Upper Incomplete Gamma function [12]

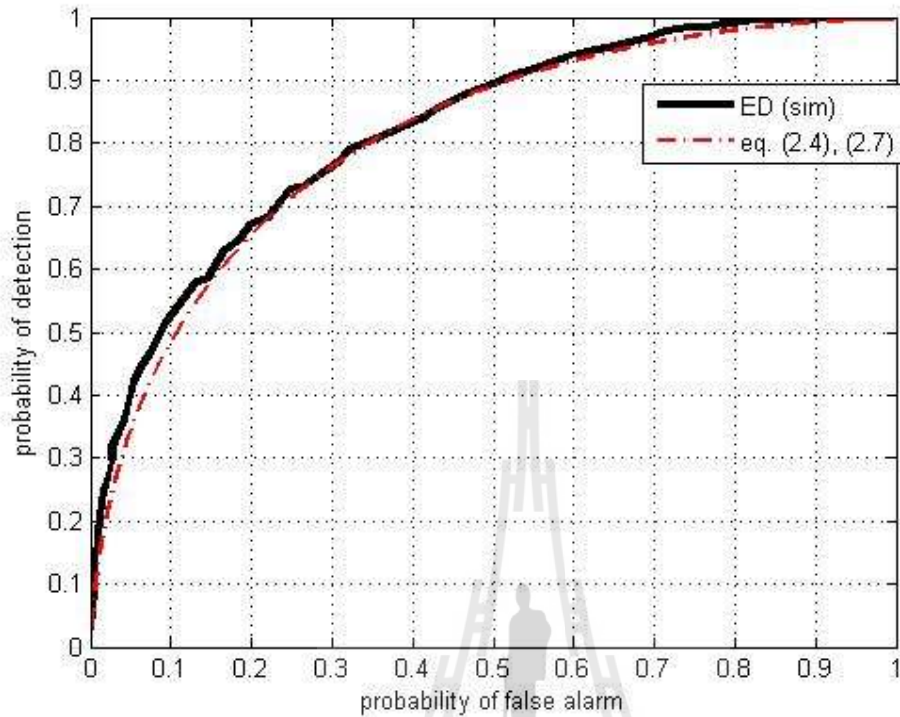
ในทางปฏิบัติ สามารถแบ่งแยกความถี่ต่างๆ ของแต่ละช่องจากสัญญาณที่ได้รับใน (2.3) เป็นดังต่อไปนี้

$$y(k) = \sum_{ch=1}^{CH} u_{ch}(k) \quad (2.9)$$

ที่ CH คือ จำนวนของช่องสัญญาณที่ถูกพิจารณา

จากนั้น นำสัญญาณที่กำลังพิจารณาในแต่ละช่องสัญญาณเข้าสู่ สมการการตัดสินใจหนึ่งบิต (one-bit decision equation) จะได้ว่า

$$U_{ch} = \begin{cases} 0, & avg(|u_{ch}(k)|^2) < \tau \\ 1, & avg(|u_{ch}(k)|^2) > \tau \end{cases} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.10 เส้นโค้ง ROC ของ ED ปกติ ที่ $SNR = -30$ dB, and $n = 2000$

เพื่อแสดงให้เห็นแนวคิดของการตรวจหาพลังงาน การจำลองผลเบื้องต้นได้ถูกดำเนินการ เมื่อช่องสัญญาณถูกสุ่มสถานะทั้งหมด 2,000 รอบ การเปรียบเทียบระหว่างการแก้ปัญหาแบบปิด (closed form solution) ที่ปรากฏใน (2.4), (2.7) โดยผลการจำลองผลถูกแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งในรูปนี้ การประเมินผลของค่าความน่าจะเป็น P_D และ P_{FA} ถูกนำเสนอ และรูปแบบนี้ถูกรู้จักกันว่าเป็น เส้นโค้งลักษณะการดำเนินการของภาครับ (Receiver Operating Characteristic, ROC) ซึ่งแสดงถึง ความจับไว (sensitivity) ในเทอมของ P_D และ ความจำเพาะ (specificity) ในเทอมของ P_{FA} ดังนั้นเส้นโค้ง ROC บรรลุค่า 1 สำหรับ P_D และ ค่า 0 สำหรับ P_{FA} จะเป็นกรณีในอุดมคติ (ideal case) รูปนี้ยังแสดงให้เห็นว่าผลของการจำลองผลของการตรวจจับสเปกตรัมด้วยวิธีการตรวจหาพลังงานมีความใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ตามทฤษฎี

2.5 วิธีการรวมกันของอัตราขยายที่เท่ากันและกฎการตัดสินใจแบบร่วมมือกัน

ความแตกต่างของผู้ใช้ CR ธรรมดา และ CR แบบไมโม คือจำนวนของสายอากาศบนภาครับ ดังนั้นสำหรับ CR แบบไมโม วิธีการที่จะใช้ประโยชน์จากสายอากาศหลายต้นมีความสำคัญอย่างมาก โดยวิธีการใช้ประโยชน์จากสายอากาศหลายต้นสำหรับการตรวจจับสเปกตรัมเรียกว่าเทคนิคการร่วมมือกัน (cooperative techniques) ในส่วนนี้จะนำเสนอรากฐานของเทคนิคที่ถูกพัฒนาเพื่อสนับสนุนเทคโนโลยีวิทยุรู้คิดในระบบไมโม

2.5.1 วิธีการรวมกันของอัตราขยายที่เท่ากัน

วิธีการรวมกันของอัตราขยายที่เท่ากัน (Equal Gain Combining, EGC) หลอมรวมสัญญาณที่ได้รับได้ทั้งหมดจากสายอากาศแต่ละต้นเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการรวมกัน [13] ดังต่อไปนี้

$$y_{EGC}(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y_m(k) \quad (2.11)$$

ที่ M คือจำนวนของสายอากาศองค์ประกอบ

การใช้งานของวิธีการรวมกันของอัตราขยายที่เท่ากัน คือการนำสัญญาณที่ได้รับได้ $y_{EGC}(k)$ ใน (2.11) ไปใส่ใน (2.9) และ (2.10) แทนที่ $y(k)$

2.5.2 กฎการตัดสินใจแบบร่วมมือกัน

กฎการตัดสินใจแบบร่วมมือกัน (cooperative decision rule) กล่าวถึงสามรูปแบบที่แตกต่างกันได้แก่ OR rule, AND rule และ MAJORITY rule (MJ) หลังจากที่ได้รับสัญญาณจากสายอากาศแต่ละสายอากาศองค์ประกอบจะถูกส่งไปตรวจนับแบบแบ่งแยกโดย (2.9) และต่อไปยัง (2.10) ท้ายที่สุด ทำการให้แฉ้มข้อมูล U_{ch} แก่ทุกช่องสัญญาณของสายอากาศแต่ละต้น รวมแฉ้มของช่องสัญญาณที่สอดคล้องกันเพื่อดำเนินการการตัดสินใจครั้งสุดท้าย (final decision) ตามกฎตรรกะดังต่อไปนี้

$$U_{total}(k) = \sum_{m=1}^M U_m(k) \begin{cases} < \kappa, H_0 \\ > \kappa, H_1 \end{cases} \quad (2.12)$$

ที่ K คือปัจจัยการตัดสินใจ (decision factor) อันซึ่ง OR rule สอดคล้องกับกรณีของ $K = 1$, AND rule สอดคล้องกับกรณีของ $K = M$ และ MAJORITY rule สอดคล้องกับกรณีของ $K = M/2$

2.6 การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับสเปกตรัมที่พัฒนาจากการร่วมมือกันแบบดั้งเดิม

2.6.1 MAJORITY++ Rule

จากทั้งสองวิธีในหัวข้อที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้นำมารวมกันเพื่อปรับปรุงการดำเนินการของการตรวจจับสเปกตรัมให้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยให้ชื่อวิธีการที่นำเสนอชื่อว่า MAJORITY++ (MJ++) เทคนิคนี้ถูกสร้างขึ้นโดยการเพิ่มสัญญาณผู้ช่วย (assistant signal)

$$y_{M+1}(k) = \left(\frac{1}{M}\right) \sum_{m=1}^M w_m * y_m(k) \quad (2.13)$$

ซึ่งนำมาจากวิธีการรวมกันของอัตราขยายที่เท่ากัน และ w_m คือสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) เหตุผลของการเพิ่ม w คือ การที่สัญญาณที่รับได้ของแต่ละสายอากาศองค์ประกอบมีการเลื่อนเฟส (phase shift) จากหลักการพื้นฐานของสายอากาศแถวลำดับ [14]

จากนั้นนำสัญญาณจาก (2.13) และ สัญญาณที่รับได้ปกติเข้าไปสู่กระบวนการของการตัดสินใจตามปกติโดย (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ หลังจากนั้น MJ ถูกนำมาใช้ตาม (2.12) ปัจจัยการตัดสินใจของวิธีนี้ถูกให้โดย

$$K_{MJ++} = \left(\frac{M+1}{2}\right) \quad (2.14)$$

ซึ่งผลที่ได้จาก (2.14) จะถูกใช้สำหรับการตัดสินใจครั้งสุดท้ายใน (2.12)

2.6.2 MAJORITY++ Rule กับ การตัดสินใจแบบละเอียดอ่อน

ตามที่เราเห็นในการตัดสินใจหนึ่งบิตที่แสดงใน (2.10) ข้อบกพร่องก็คือมีเพียง ผลสองสถานะ เฉพาะ ช่องสัญญาณที่ว่างหรือไม่ว่างเท่านั้นเป็นผลได้สุดท้าย ในบางกรณีที่ช่องสัญญาณได้ถูกตัดสินใจครั้งสุดท้ายว่าว่างแม้ว่าสัญญาณจะมีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์เล็กน้อย เช่นนี้ก็เพราะระบบสองสถานะมีการเปรียบเทียบกับระดับค่าเกณฑ์ที่เคร่งครัดโดยไม่คำนึงถึงระดับความใกล้เคียงระหว่างสัญญาณกับค่าเกณฑ์ ในแง่ที่ผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดใหม่เพื่อเพิ่มโอกาสสำหรับสัญญาณที่อ่อนแอเหล่านั้นที่มีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์เพียงเล็กน้อย เพื่อให้สัญญาณเหล่านั้นมีสิทธิมีเสียงมากขึ้นประกอบการตัดสินใจ โดยการแบ่งค่าเกณฑ์ออกเป็นหลายๆระดับ จำนวน L ระดับ ดังนั้นเรียกได้ว่าเป็นค่าเกณฑ์หลายสถานะ (multi-state threshold) และให้แต่้มการตัดสินใจที่เหมาะสมต่อทุกระดับ แล้วจะได้มาซึ่งการตัดสินใจแบบเป็นระดับ (leveled decision) ซึ่งเรียกได้ว่าเป็น การตัดสินใจแบบละเอียดอ่อน (soft decision) ดังแสดงใน (2.15)

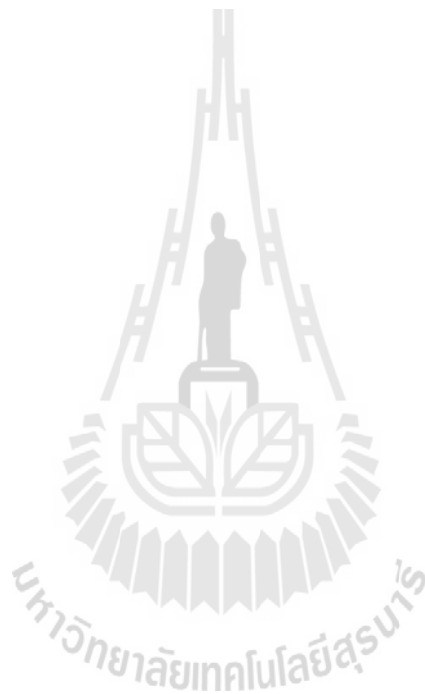
$$U_{L,ch} = \begin{cases} 0, & \text{avg}(|u_{ch}(k)|^2) < l\tau \\ \downarrow & \downarrow \\ 1, & \text{avg}(|u_{ch}(k)|^2) \geq L\tau \end{cases} \quad (2.15)$$

ที่ l เป็นค่าคงที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนของระดับ ไปถึงค่า L ค่าของ $U_{L,ch}$ อยู่ระหว่างค่า 0 และ 1 เช่นเดียวกับ U_{ch} ใน (2.10) ผู้วิจัยให้ชื่อของวิธีนี้ว่า MAJORITY++ rule กับ การตัดสินใจแบบละเอียดอ่อน (MAJORITY++ with soft decision, MJS++)

2.7 กล่าวท้ายบท

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เริ่มด้วยปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรความถี่ในปัจจุบันจนเกิดเป็นเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด ที่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานเข้ามาขอใช้สเปกตรัมร่วมกับผู้ใช้หลักที่ได้รับอนุญาตทางกฎหมาย ทำให้ใช้ประโยชน์จากทรัพยากรความถี่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งในเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบันซึ่งก็คือเทคโนโลยีหลายสายอากาศตัวส่งหลายสายอากาศตัวรับ หรือโมโม ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางการสื่อสารโดยการลดปัญหาของการจางหายของสัญญาณ ซึ่งการที่ระบบโมโมประกอบด้วยสายอากาศสองคู่ประกอบหลายต้นนั้น สามารถนำมาใช้พัฒนาเทคนิคการ

ตรวจจับสเปกตรัมของเทคโนโลยีวิทยุรู้คิดได้ โดยในบทนี้ได้อ้างอิงถึงวิธีการตรวจหาพลังงานซึ่งมีความตรงไปตรงมาในการระบุสถานะของช่องสัญญาณ และสะดวกในทางปฏิบัติ ข้อมูลของสัญญาณที่ได้จากสายอากาศแต่ละต้นนั้นถูกนำมาช่วยกันเพื่อวิเคราะห์และตัดสินใจได้อย่างถูกต้องมากขึ้น อีกทั้งผู้วิจัยยังได้เพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับสเปกตรัมขึ้นไปอีกโดยใช้เทคนิคใหม่ที่มีรากฐานมาจากเทคนิคที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะช่วยให้เทคโนโลยีวิทยุรู้คิดเป็นที่ยอมรับมากขึ้นในอนาคต



บทที่ 3 การวิเคราะห์สมรรถนะการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมโนในเครือข่ายวิทยุรู้คิด

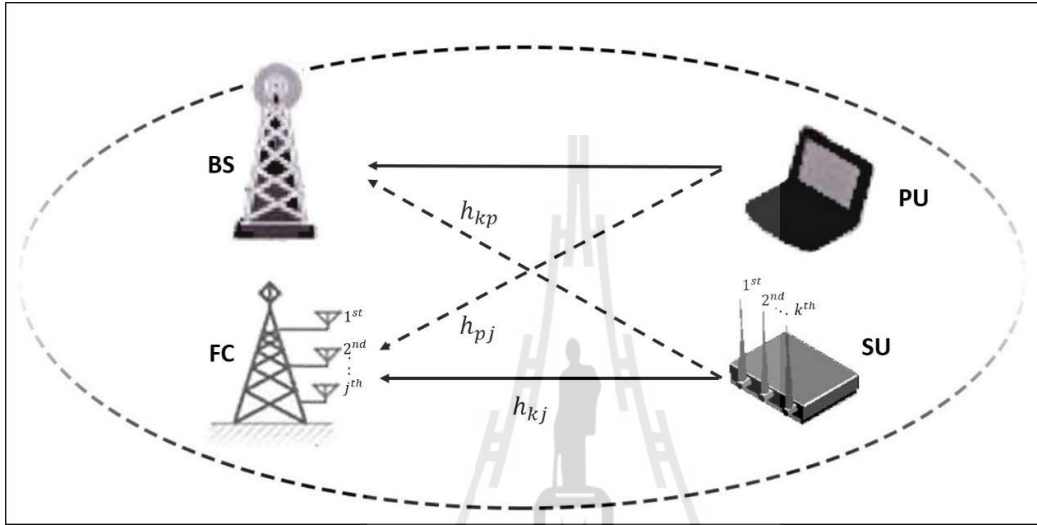
3.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาวิธีการตรวจจับสเปกตรัมในบทที่ผ่านมาทำให้สามารถรู้สถานะของช่องสัญญาณว่ามี การใช้งานของผู้ใช้หลักอยู่หรือไม่ โดยในการแบ่งปันสเปกตรัมจะแบ่งออกเป็นสองรูปแบบหลักๆ ได้แก่ การแบ่งปันสเปกตรัมแบบไม่ซ้อนทับกัน (non-overlapping spectrum sharing) ซึ่งจะอนุญาตให้ผู้ใช้รองเข้า ใช้ช่องสัญญาณเมื่อตรวจไม่พบสัญญาณของผู้ใช้หลักเท่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดต่อผู้ใช้หลัก แต่ผู้วิจัยให้ความสนใจความเป็นไปได้ที่มากกว่าจากอีกรูปแบบหนึ่งคือ การแบ่งปันสเปกตรัมแบบซ้อนทับ กัน (overlapping spectrum sharing) ซึ่งจะอนุญาตให้ผู้ใช้รองเข้าใช้ช่องสัญญาณได้พร้อมๆ กับผู้ใช้หลัก หากว่าสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งในปัจจุบันโปรแกรมการใช้งาน (application) ทางการสื่อสารส่วนใหญ่ไม่เหลือช่องสัญญาณที่ว่างให้ใช้อีกแล้ว จึงต้องใช้การแบ่งปันสเปกตรัมแบบ ซ้อนทับกันเข้ามาเพิ่มความคุ้มค่าให้มากที่สุดในการใช้งานทรัพยากรความถี่ที่กำลังขาดแคลน โดยในบทนี้ จะเริ่มอธิบายตั้งแต่กระบวนการเลือกสายอากาศตัวส่ง ไปจนถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบวิทยุรู้คิด เมื่อทำการแบ่งปันสเปกตรัม

3.2 แบบจำลองระบบการดำเนินการแบ่งปันสเปกตรัม

พิจารณาเครือข่ายวิทยุรู้คิดแบบซ้อนทับกัน (overlapping cognitive network) ที่การเชื่อมต่อตรง ประกอบด้วยผู้ส่งรอง (secondary transmitter, ST) และผู้รับรอง (secondary receiver, SR) ที่ได้ติดตั้ง สายอากาศจำนวน N และ M ตามลำดับ แต่ทว่าการเชื่อมต่อหลักประกอบด้วยสายอากาศเพียงอย่างละต้น ของผู้ส่งหลัก (primary transmitter, PT) และผู้รับหลัก (primary receiver, PR) (ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ PR คือสถานีฐาน (base station, BS) และ SR คือศูนย์ฟิวชัน (fusion center, FC)) และกำหนดให้ h_{kj} , h_{kp} และ h_{pj} เป็นสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณระหว่าง สายอากาศตัวที่ k^{th} ของ ST และ สายอากาศตัวที่ j^{th} ของ SR, สายอากาศตัวที่ k^{th} ของ ST และ PR, และระหว่าง PT และ สายอากาศตัวที่ j^{th} ของ SR ตามลำดับ ดังในรูปที่ 3.1 ซึ่งจำลองด้วยการจางหายแบบเรียบ (flat fading) และการกระจายตัวแบบเรย์ลี

(Rayleigh distribution) ด้วยค่าความแปรปรวน λ_s , λ_p และ λ_{ps} ตามลำดับ และถูกสมมติว่า ช่องสัญญาณแบบไมโม ระหว่าง ST กับ SR และเป็นช่องสัญญาณแบบหลายตัวส่งตัวรับเดียว (multiple input multiple output, MISO) จาก ST ไป PR ถูกรับรู้โดยสมบูรณ์ (perfectly known) ที่ ST สำหรับวิธีการเลือกสายอากาศส่ง (transmit antenna selection)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบการแบ่งปันสเปกตรัมของระบบวิทยุรู้คิดแบบไมโม

ระหว่างช่องส่ง (transmission slot) ของ ST หนึ่งในจำนวน N สายอากาศที่ ST จะถูกเลือกตามหลักเกณฑ์การเลือกอัตรา (ratio selection criterion) ที่จะบรรจุข้อมูล ดังต่อไปนี้

$$s = \arg \max_k \left(\frac{g_{ks}}{g_{kp}} \right) \quad (3.1)$$

ที่ $g_{ks} = \sum_{j=1}^M |h_{kj}|^2$ และ $g_{kp} = |h_{kp}|^2$ โดย PDFs ของพวกมันจะหาได้จาก

$$p_{g_{ks}}(x) = \frac{1}{\Gamma(M)} \frac{x^{M-1}}{\lambda_s^M} e^{-\frac{x}{\lambda_s}}, x \geq 0 \quad (3.2)$$

และ

$$p_{g_{kp}}(y) = \frac{1}{\lambda_p} e^{-\frac{y}{\lambda_p}}, y \geq 0 \quad (3.3)$$

ตามลำดับ ที่ $\Gamma(\cdot)$ คือ gamma function ซึ่งต่อไปจะเป็นการแสดงค่าทางสถิติของค่าอัตราขยายช่องสัญญาณที่ถูกเลือก (selected channel gains) และจากนั้นก็จะเป็นกลวิธีการจัดสรรกำลังที่สอดคล้องกัน

3.2.1 ค่าทางสถิติที่เกี่ยวข้อง

เห็นได้ชัดว่ามีความจำเป็นต้องตรวจสอบการแสดงผลทาง PDF และ CDF เพื่อให้ได้มาซึ่งการแสดงผลในรูปแบบปิดที่ถูกต้องสำหรับการวัดประสิทธิภาพเมื่อใช้การเลือกอัตราการส่งสัญญาณในระบบวิทยุรู้คิด

3.2.1.1 PDF และ CDF ของอัตราขยายช่องสัญญาณ ST-SR $g_{ss} = \sum_{j=1}^M |h_{sj}|^2$ เมื่อใช้วิธีการเลือกอัตราใน (3.1) ถูกให้โดย

$$p_{g_{ss}}(x) = \frac{MNx^{MN-1}}{\lambda_s^{MN}\Gamma(M+1)} \Gamma\left(1 - M(N-1), \frac{x}{\lambda_s}\right) \quad (3.4)$$

และ

$$F_{g_{ss}}(x) = \frac{1}{\Gamma(M+1)} \left[\gamma\left(M+1, \frac{x}{\lambda_s}\right) + \left(\frac{x}{\lambda_s}\right)^{MN} \Gamma\left(1 - M(N-1), \frac{x}{\lambda_s}\right) \right] \quad (3.5)$$

ที่ $\Gamma(\cdot, \cdot)$ และ $\gamma(\cdot, \cdot)$ คือ upper และ lower incomplete gamma function ที่ได้จาก [19, Eq. 8.350.2] และ [19, Eq. 8.350.1] ตามลำดับ

ในอีกด้านหนึ่ง สำหรับระบบการแบ่งปันสเปกตรัม จำเป็นต้องมีค่าทางสถิติของการเชื่อมต่อ ST-PR ดังนั้นเมื่อ $g_{sp} = |h_{sp}|^2$ จะได้

3.2.1.2 PDF และ CDF ของอัตราขยายช่องสัญญาณ g_{sp} อันเนื่องมาจากการเลือกอัตรา มีดังต่อไปนี้

$$p_{g_{sp}}(y) = \frac{N\Gamma(MN)}{\Gamma(M)\Gamma(M(N-1))} \sum_{i=0}^{M(N-1)-1} \binom{M(N-1)-1}{i} (-1)^i \times \frac{y^{M+i}}{\lambda_p^{M+i+1}} \Gamma\left(-M-i, \frac{y}{\lambda_p}\right) \quad (3.6)$$

และ

$$F_{g_{sp}}(y) = \frac{N\Gamma(MN)}{\Gamma(M)\Gamma(M(N-1))} \sum_{i=0}^{M(N-1)-1} \frac{\binom{M(N-1)-1}{i}}{M+i+1} (-1)^i \times \left[\left(\frac{y}{\lambda_p}\right)^{M+i+1} \Gamma\left(-M-i, \frac{y}{\lambda_p}\right) + \gamma\left(1, \frac{y}{\lambda_p}\right) \right] \quad (3.7)$$

3.2.2 กลวิธีการจัดสรรกำลัง

จากการพิจารณาการแบ่งปันสเปกตรัมในระบบวิทยุรู้คิด ST ต้องปรับความเหมาะสมของกำลังการออกอากาศ (broadcasting power) P_S ตามสภาพแวดล้อมวิทยุ โดยทำให้สอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

$$arg_{ST} = \begin{cases} Q_S \leq I \\ P_S \leq P_m \end{cases} \quad (3.8)$$

ที่ S อ้างถึงสายอากาศที่ถูกเลือกที่ ST, P_m คือ ค่าการจำกัดกำลังส่งสูงสุดของ ST, I คือ ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ของสัญญาณแทรกสอดที่ทนได้ที่ PR และ Q_S คือ สัญญาณแทรกสอดที่ถูกทำให้เกิดโดยการส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันของ ST บนแถบความถี่เดียวกันกับ PT และถูกให้โดย

$$Q_S \triangleq |h_{sp}|^2 \frac{P_S}{N_o} \quad (3.9)$$

ที่ N_o คือค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน

ในทางปฏิบัติ PR สามารถประมาณค่า mean (mean value, MV) ของอัตราขยายช่องสัญญาณแทรกสอด ST-PR จากนั้นค่า mean โดยประมาณ (estimated mean value) อันซึ่งเป็นค่าคงที่ จะถูกส่งกลับ (fed

back) ไปยัง ST เป็นผลให้เกิดเป็นการใช้ MV สำหรับการจัดสรรกำลัง เรียกได้เป็น แบบแผนค่า MV (MV-based scheme) ซึ่งสามารถลดภาระการส่งกลับข้อมูลได้อย่างมาก ตามเงื่อนไขใน (3.8) สามารถปรับใหม่ได้เป็น

$$arg_{MV} = \begin{cases} \mathbb{E}(Q_s) \leq I \\ P_s \leq P_m \end{cases} \quad (3.10)$$

ที่ $\mathbb{E}(\cdot)$ คือ ตัวปฏิบัติการค่าความมุ่งหวัง (expectation operator) ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise ratio, SNR) แบบรวมกัน (combined SNR) ที่ SR ทำการใช้ การจัดสรรกำลังตามแบบแผน MV สามารถหาได้จาก

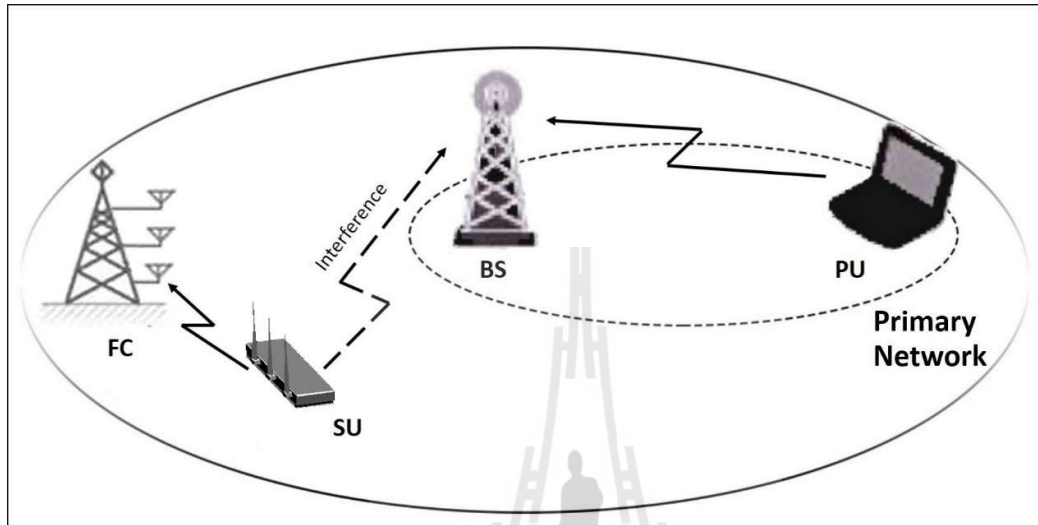
$$\gamma_{ss,MV} = \min\left(\frac{I}{\mathbb{E}(g_{sp})}, \bar{\gamma}\right) \lambda_s \quad (3.11)$$

โดยการใช้ (3.6) ที่ $\bar{\gamma} = P_m/N_o$ ที่ N_o คือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน และ

$$\mathbb{E}(g_{sp}) = \frac{N\Gamma(MN)\lambda_p}{\Gamma(M)\Gamma(M(N-1))} \sum_{i=0}^{M(N-1)-1} \frac{\binom{M(N-1)-1}{i} (-1)^i}{M+i+2} \quad (3.12)$$

ที่จะเห็นได้ว่า ST ไม่ได้พิจารณาสัญญาณแทรกสอดจากการเชื่อมต่อ PT-SR ในการจัดสรรกำลัง เพราะมันยังไม่เกี่ยวข้องกับ ST โดยตรง [15], [16], [17] อีกนัยหนึ่งคือระบบจะต้องรับภาระการส่งกลับข้อมูลเพิ่มเติมเพื่ออัปเดต ST ด้วยอัตราขยายช่องสัญญาณ PT-SR ที่มาพร้อมๆกัน ซึ่งจะทำการอธิบายการวิเคราะห์การดำเนินการของระบบแยกกันได้แก่ เมื่อทำการละเว้นและเมื่อทำการพิจารณาช่องสัญญาณแทรกสอด PT-SR ตามลำดับ

3.3 การวิเคราะห์การดำเนินการ โดยปราศจากสัญญาณแทรกสอด PT-SR



รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบเมื่อผู้ส่งหลักอยู่ไกลจากผู้รับรองมาก

ในส่วนนี้จะทำการแสดงการวิเคราะห์ของระบบเมื่อผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากการเชื่อมต่อ PT-SR ถูกละเว้น กรณีนี้สมมติได้ว่า PT ตั้งอยู่ไกลมากๆจาก SR ดังในรูปที่ 3.2

3.3.1 ความน่าจะเป็นความผิดพลาด

เมื่อพิจารณาการจัดสรรกำลังด้วยแบบแผน MV สามารถสมมติได้ว่า ข้อมูลทางสถิติ $\mathbb{E}(g_{sp})$ มีอยู่ทั้งสองด้านของระบบวิทยุรู้คิดแล้ว ดังนั้น ความน่าจะเป็นความผิดพลาด (outage probability) รอง สามารถหาได้จาก

$$P_{out,MV} = \Pr[\gamma_{ss,MV} < \Phi] = F_{g_{ss}} \left(\frac{\Phi}{\min\left(\frac{I}{\mathbb{E}(g_{sp})}, \bar{\gamma}\right)} \right) \quad (3.13)$$

ที่ $\Phi = 2^R - 1$ และ R คืออัตราการส่งสัญญาณ (transmission rate) เพื่อให้ง่ายขึ้น ได้ทำการกำหนดค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดใน (3.13) ให้เป็นค่าคงที่ไม่เป็นศูนย์ (non-zero constant) (outage probability floor $P_{out,MV}^{floor}$) ที่ SNR ภาคส่ง $\bar{\gamma}$ เข้าใกล้ค่าอนันต์ จะได้

$$P_{out,MV}^{floor} = \lim_{\bar{\gamma} \rightarrow \infty} F_{g_{ss}} \left(\frac{\Phi E(g_{sp})}{I} \right) \quad (3.14)$$

สิ่งนี้ไว้สำหรับค่า SNR ที่มากพอและสำหรับการจำกัดกำลังสัญญาณแทรกสอดที่คงตัว I จนการดำเนินการที่ผิดพลาดรองอ้อมตัว

3.3.1.1 ในช่วงที่ SNR สูง ($\bar{\gamma} \rightarrow \infty$) และ ช่องสัญญาณแทรกสอด ST-PR อ่อนแรง ($\lambda_p \rightarrow 0$) ความน่าจะเป็นความผิดพลาดรองของการจัดสรรกำลังตามแบบแผน MV สามารถประมาณการได้

$$P_{out,MV}^{\infty} \approx \left(\frac{1}{M(N-1)-1} + \frac{1}{M+1} \right) \frac{\left(\frac{\Phi E(g_{sp})}{\lambda_s I} \right)^{M+1}}{\Gamma(M+1)} \quad (3.15)$$

3.3.2 การดำเนินการอัตราความผิดพลาด

ทำการเรียกใช้ผลลัพธ์ทั่วไปจาก [18, Eq.32] สำหรับการให้ค่าอัตราสัญลักษณ์ผิดพลาด (symbol error rate, SER) แบบ end-to-end ในเทอมของ SNR CDF $F_{\gamma}(\cdot)$ ซึ่งก็คือ

$$P_{s,sys} = - \int_0^{\infty} \frac{d}{d\gamma} P_e(x) F_{\gamma}(x) dx \quad (3.16)$$

ที่ $P_e(\cdot)$ คือ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดอย่างมีเงื่อนไข (conditional error probability, CEP) อันซึ่งขึ้นอยู่กับแบบแผนการกล้ำสัญญาณ (modulation) ที่ใช้ สามารถหาได้จาก

$$P_e(\cdot) = aQ(\sqrt{bx}) \quad (3.17)$$

ที่ a และ b คือค่าคงที่จำเพาะการกล้ำสัญญาณ (modulation-specific constants) อันได้แก่ $(a, b) = (1, 2)$ สำหรับ BPSK, $(a, b) = (1, 1)$ สำหรับ BFSK, $(a, b) = \left(\frac{2(m-1)}{m}, 6 \log_2 \frac{(m)}{(m^2-1)} \right)$ สำหรับ m -PAM และ $Q(\cdot)$ คือ Gaussian Q-function

เมื่อพิจารณา CDF ของ g_{ss} ใน (3.5) การแสดงออกของค่าอัตราบิตผิดพลาด (bit error rate, BER) ของแบบแผนการเชื่อมโยงกันในหนึ่งมิติแบบ MV สามารถนิยามโดย

$$P_{s,MV}(a, b) = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{b}{2\pi}} \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{b}{2}x}}{\sqrt{x}} F_{g_{ss}} \left(\frac{x}{\min\left(\frac{I}{\mathbb{E}(g_{sp})}, \bar{\gamma}\right)} \right) dx \quad (3.18)$$

และใช้ [19, Eq. 6.455.1] และ [19, Eq. 6.455.2] ค่า BER ใน (3.18) จะได้รูปแบบปิดดังแสดงใน (3.19)

$$P_{s,MV}(a, b) = \frac{\Gamma\left(M+\frac{3}{2}\right)}{\Gamma(M+1)} \frac{\frac{a}{2} \sqrt{\frac{b}{2\pi}} \left(\frac{1}{\gamma_{ss,MV}}\right)^{1+M}}{\left(\frac{1}{\gamma_{ss,MV}} + \frac{b}{2}\right)^{M+\frac{3}{2}}} \times \left[\frac{1}{MN+\frac{1}{2}} {}_2F_1\left(1, M+\frac{3}{2}; MN+\frac{3}{2}; \frac{b\gamma_{ss,MV}}{2+b\gamma_{ss,MV}}\right) + \frac{1}{1+M} {}_2F_1\left(1, M+\frac{3}{2}; M+2; \frac{2}{2+b\gamma_{ss,MV}}\right) \right] \quad (3.19)$$

ที่ ${}_2F_1(\dots)$ คือ hypergeometric function ได้จาก [19, Eq. 9.14.2] แต่เมื่อ $\bar{\gamma}$ เข้าใกล้ค่าอนันต์ BER จะหยุดลดลงและอ้อมตัวที่ค่า floor ที่ขึ้นอยู่กับระดับกำลังสัญญาณแทรกสอดที่ทนได้ อันซึ่งหาได้โดย

$$P_{s,MV}^{floor}(a, b) = \frac{\Gamma\left(M+\frac{3}{2}\right)}{\Gamma(M+1)} \frac{\frac{a}{2} \sqrt{\frac{b}{2\pi}} \left(\frac{\mathbb{E}(g_{sp})}{\lambda_s I}\right)^{1+M}}{\left(\frac{\mathbb{E}(g_{sp})}{\lambda_s I} + \frac{b}{2}\right)^{M+\frac{3}{2}}} \times \left[\frac{1}{MN+\frac{1}{2}} {}_2F_1\left(1, M+\frac{3}{2}; MN+\frac{3}{2}; \frac{b\lambda_s I}{2\mathbb{E}(g_{sp})+b\lambda_s I}\right) + \frac{1}{1+M} {}_2F_1\left(1, M+\frac{3}{2}; M+2; \frac{2\lambda_s I}{2\mathbb{E}(g_{sp})+b\lambda_s I}\right) \right] \quad (3.20)$$

3.3.2.1 ในช่วงที่ SNR สูง ($\bar{\gamma} \rightarrow \infty$) และ ช่องสัญญาณแทรกสอด ST-PR อ่อนแรง ($\lambda_p \rightarrow 0$) ค่า BER ของแบบแผน MV สามารถหาได้โดย ประมาณค่า CDF ของ $\gamma_{ss,MV}$ จาก (3.15)

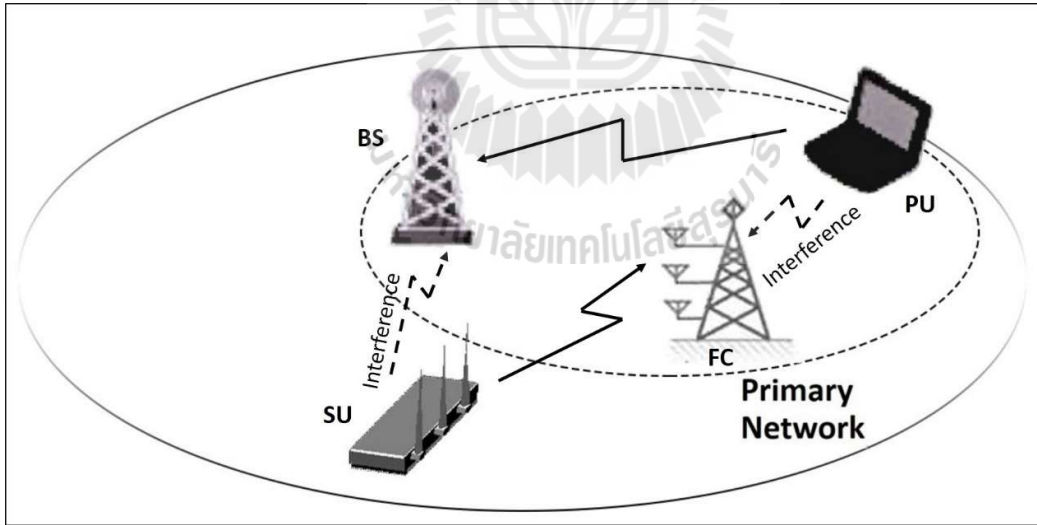
$$F_{Y_{SS,MV}}(x) \approx \left(\frac{1}{M(N-1)-1} + \frac{1}{M+1} \right) \frac{\left(\frac{\mathbb{E}(g_{sp})x}{\lambda_s I} \right)^{M+1}}{\Gamma(M+1)} \quad (3.21)$$

เมื่อ $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ และ $\lambda_p \rightarrow 0$ จากนั้นนำ (3.21) ไปเข้าสู่ (3.18) และใช้ [19, Eq. 3.381.4] จะได้

$$P_{s,MV}^\infty(a,b) \approx \frac{\Gamma(M+\frac{3}{2})}{\Gamma(M+1)} \left(\frac{1}{M(N-1)-1} + \frac{1}{M+1} \right) \left(\frac{\frac{a}{2\sqrt{\pi}}}{(\frac{b}{2})^{M+1}} \right) \left(\frac{\mathbb{E}(g_{sp})}{\lambda_s I} \right)^{M+1} \quad (3.22)$$

3.4 การวิเคราะห์การดำเนินการร่วมกับสัญญาณแทรกสอด PT-SR

ในการปรากฏของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้หลักดังในรูปที่ 3.3 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) แบบร่วมกัน (combined SINR) ที่ SR เมื่อสายอากาศตัวที่ S^{th} ถูกเลือกที่ ST กำหนดได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบเมื่อผู้ส่งหลักอยู่ใกล้กับผู้รับรอง

$$\gamma_{int} = \frac{P_s g_{ss}}{P_m g_I + N_o} = \frac{\frac{P_s}{N_o} g_{ss}}{\bar{\gamma} g_I + 1} \quad (3.23)$$

ที่ $g_I = \frac{|\sum_{j=1}^M h_{sj}^* h_{pj}|^2}{g_{ss}}$ คือ ตัวแปรสุ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential random variable) ของ g_{ss} [20], [21] ด้วย pdf $p_{g_I}(\cdot)$ ถูกกำหนดโดย

$$p_{g_I}(y) = \frac{1}{\lambda_{ps}} e^{-\frac{y}{\lambda_{ps}}} \quad (3.24)$$

3.4.1 ค่าทางสถิติของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนแบบร่วมกัน กำหนด $\gamma_{int,MV}$ เป็น SINR แบบร่วมกันที่รับได้ สำหรับแบบแผน MV อันซึ่งสามารถเขียนเป็น $\gamma_{ss,MV}/(\gamma_I + 1)$ ที่ $\gamma_I = \bar{\gamma} g_I$ ค่า CDF ของ $\gamma_{int,MV}$ ถูกแสดงไว้ดังนี้

$$F_{\gamma_{int,MV}}(x) = \Pr[\gamma_{int,MV} < x] = F_{1,MV}(x) + F_{2,MV}(x) \quad (3.25)$$

โดย $F_{1,MV}(\cdot)$ และ $F_{2,MV}(\cdot)$ สามารถหาได้จาก ให้ $\mathbf{Y} \triangleq \bar{\gamma} \frac{|\sum_{j=1}^M h_{sj}^* h_{pj}|^2}{g_{ss}}$ กับ PDF $p_Y(y) = e^{-y/\gamma_{ps}}/\gamma_{ps}$ ที่ $\gamma_{ps} = \lambda_{ps} \bar{\gamma}$ ค่า CDF ของ $\gamma_{int,MV}$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\Pr[\gamma_{int,MV} < x] = \mathbb{E}_Y \left[F_{g_{ss}} \left(\frac{x(y+1)}{\min\left(\frac{I}{\mathbb{E}(g_{sp})}, \bar{\gamma}\right)} \right) \mid \mathbf{Y} = y \right] \quad (3.26)$$

นิยาม $F_{1,MV}(\cdot)$ ได้เป็น

$$F_{1,MV}(x) = \int_0^\infty \frac{\left(\frac{x(y+1)}{\gamma_{ss,MV}}\right)^{MN}}{\Gamma(M+1)} \frac{e^{-\frac{y}{\gamma_{ps}}}}{\gamma_{ps}} \Gamma\left(1 - M(N-1), \frac{x(y+1)}{\gamma_{ss,MV}}\right) dy \quad (3.27)$$

ใช้ [19, Eq. 8.352.5] และ วิธีปริพันธ์แบบแบ่งส่วน จะได้

$$\begin{aligned}
F_{1,MV}(x) = & \frac{(-1)^{M(N-1)} e^{\frac{1}{\gamma_{ps}}} \left(\frac{\gamma_{ps}}{\gamma_{ss,MV}}\right)^{MN}}{\Gamma(M+1)(M(N-1)-1)!} \left[\Gamma\left(MN + \right. \right. \\
& \left. \left. 1, \frac{1}{\gamma_{ps}}\right) x^{MN} \text{Ei}\left(\frac{-x}{\gamma_{ss,MV}}\right) + (MN)! \sum_{k=0}^{MN} \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{ps}}\right)^k}{k!} x^{MN} \left(\frac{1}{\gamma_{ps}} + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right)^{-k} \Gamma\left(k, \frac{1}{\gamma_{ps}} + \frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right) \right] + \\
& \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{ps}}\right) e^{\frac{1}{\gamma_{ps}}}}{\Gamma(M+1)(M(N-1)-1)!} \sum_{k=0}^{M(N-1)+k} (-1)^{M(N-1)+k} k! \left(\frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right)^{MN-k-} \times \\
& \left(\frac{1}{\gamma_{ps}} + \frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right)^{k-MN} \Gamma\left(MN - k, \frac{1}{\gamma_{ps}} + \frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right) \quad (3.28)
\end{aligned}$$

นิยาม $F_{2,MV}(\cdot)$ ได้เป็น

$$F_{2,MV}(x) = \int_0^\infty \frac{\gamma\left(M+1, \frac{x(y+1)}{\gamma_{ss,MV}}\right) e^{-\frac{y}{\gamma_{ps}}}}{\Gamma(M+1) \gamma_{ps}} dy \quad (3.29)$$

ใช้ [19, Eq. 8.352.1] จะได้

$$\begin{aligned}
F_{2,MV}(x) = & \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{ps}}\right) e^{\frac{1}{\gamma_{ps}}} M!}{\Gamma(M+1)} \left[\gamma_{ps} e^{-\frac{1}{\gamma_{ps}}} - \sum_{k=0}^M \frac{\left(\frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right)^k}{k!} \left(\frac{1}{\gamma_{ps}} + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right)^{-k-1} \Gamma\left(k+1, \frac{1}{\gamma_{ps}} + \frac{x}{\gamma_{ss,MV}}\right) \right] \quad (3.30)
\end{aligned}$$

ตามสมการที่ได้ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของแบบแผน MV เมื่อพิจารณาช่องสัญญาณแทรกสอด PT-SR หาได้โดย

$$P_{int,MV} = F_{\gamma_{int,MV}}(\Phi) \quad (3.31)$$

3.4.2 การดำเนินการอัตราผิดพลาด

ค่า BER ของแบบแผน MV ได้รับมาโดยแทน (3.25) ลงใน (3.18) และจะได้ดังสมการ (3.32)

$$P_{Int,MV}(a, b) = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{b}{2\pi}} \frac{1}{\Gamma(M+1)} [I_1 + I_2 + I_3 + I_4] \quad (3.32)$$

หลังจากใช้การจัดรูปทางพีชคณิตและใช้ [19, Eq. 6.228.2] และ [19, Eq. 3.383.4] จะได้ค่า I_1 และ I_2 ดังนี้

$$I_1 = (-1)^{M(N-1)+1} e^{\frac{1}{\gamma_{ps}}} \left(\frac{\gamma_{ps}}{\gamma_{ss,MV}} \right)^{MN} \frac{\Gamma(MN+1, \frac{1}{\gamma_{ps}}) \Gamma(MN+\frac{1}{2})}{\left(MN \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{\gamma_{ss,MV}} + \frac{b}{2} \right)^{MN+\frac{1}{2}}} \times {}_2F_1 \left(1, MN + \frac{1}{2}; MN + \frac{3}{2}; \frac{b\gamma_{ss,MV}}{2+b\gamma_{ss,MV}} \right) \quad (3.33)$$

และ

$$I_2 = (-1)^{M(N-1)} (MN)! \Gamma \left(MN + \frac{1}{2} \right) e^{\frac{b\gamma_{ss,MV}+2}{4\gamma_{ps}}} \sum_{k=1}^{MN} \frac{(k-1)!}{k!} \sum_{m=0}^{k-1} \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{ps}} \right)^m}{m!} \left(\frac{1}{\gamma_{ss,MV}} + \frac{b}{2} \right)^{-\frac{1}{2} \left(MN+m-k \frac{3}{2} \right)} \left(\frac{\gamma_{ss,MV}}{\gamma_{ps}} \right)^{\frac{1}{4} (2k+2m-2MN-)} \times W_{\frac{1}{2}} \left(m-k-MN-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \left(MN+m-k+\frac{1}{2} \right) \left(\frac{b\gamma_{ss,MV}+2}{2\gamma_{ps}} \right) \right) \quad (3.34)$$

ใช้ [19, Eq. 8.352.4] แปลงรูปฟังก์ชัน แล้วใช้ [19, Eq. 3.383.4] จะได้

$$\begin{aligned}
I_3 = & \left(\frac{1}{\gamma_{ps}}\right) e^{\frac{b\gamma_{ss,MV}+2}{4\gamma_{ps}}} \sum_{k=0}^{M(N-1)-2} (-1)^{M(N-1)+k} k! (MN - k - \\
& 1)! \Gamma\left(MN - k - \frac{1}{2}\right) \sum_{m=0}^{MN-k-1} \frac{\gamma_{ss,MV}^{1-m}}{m!} \left(\frac{1}{\gamma_{ss,MV}} + \right. \\
& \left. \frac{b}{2}\right)^{-\frac{1}{2}(m+\frac{1}{2})} \left(\frac{\gamma_{ss,MV}}{\gamma_{ps}}\right)^{\frac{1}{2}(m-\frac{3}{2})} W_{\frac{1}{2}}\left(2k-2MN+m+\frac{3}{2}, \frac{1}{2}\left(-m+\frac{1}{2}\right)\right) \left(\frac{b\gamma_{ss,MV}+2}{2\gamma_{ps}}\right)
\end{aligned} \tag{3.35}$$

สุดท้ายใช้ [19, Eq. 8.352.2] ปรับรูปสมการแล้วใช้ [19, Eq. 3.383.4] จะได้

$$\begin{aligned}
I_4 = & M! \left[\sqrt{\frac{2\pi}{b}} - \left(\frac{1}{\gamma_{ps}}\right) e^{\frac{b\gamma_{ss,MV}+2}{4\gamma_{ps}}} \sum_{k=0}^M \Gamma\left(k + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{1}{2}\right) \sum_{m=0}^k \frac{\gamma_{ss,MV}^{-m+1}}{m!} \left(\frac{1}{\gamma_{ss,MV}} + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{b}{2}\right)^{-\frac{1}{2}(m+\frac{1}{2})} \left(\frac{\gamma_{ss,MV}}{\gamma_{ps}}\right)^{\frac{1}{2}(m-\frac{3}{2})} W_{\frac{1}{2}}\left(m-2k-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\left(-m+\frac{1}{2}\right)\right) \left(\frac{b\gamma_{ss,MV}+2}{2\gamma_{ps}}\right) \right] \tag{3.36}
\end{aligned}$$

3.5 กล่าวท้ายบท

บทนี้ได้พิจารณาการแบ่งปันสเปกตรัมของระบบวิทยุรู้คิดแบบโมโนด้วยแบบแผนการเลือกอัตราที่หนึ่งในสายอากาศส่งถูกเลือกตามอัตราของอัตราขยายช่องสัญญาณรองต่ออัตราขยายช่องสัญญาณแทรกสอด ST-PR ที่มากที่สุด และได้ทำการวิเคราะห์การดำเนินการทั้งหมดบนระบบผู้รบกวนในเทอมของความน่าจะเป็นความผิดพลาด และอัตราบิตผิดพลาด ภายใต้แบบแผนการจัดสรรกำลังแบบ MV โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การดำเนินงานด้วยอัตราบิตผิดพลาดที่มีการพิจารณาสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้หลัก PT-SR ด้วย อันซึ่งจะแสดงผลการดำเนินการในบทต่อไป

บทที่ 4 ผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์

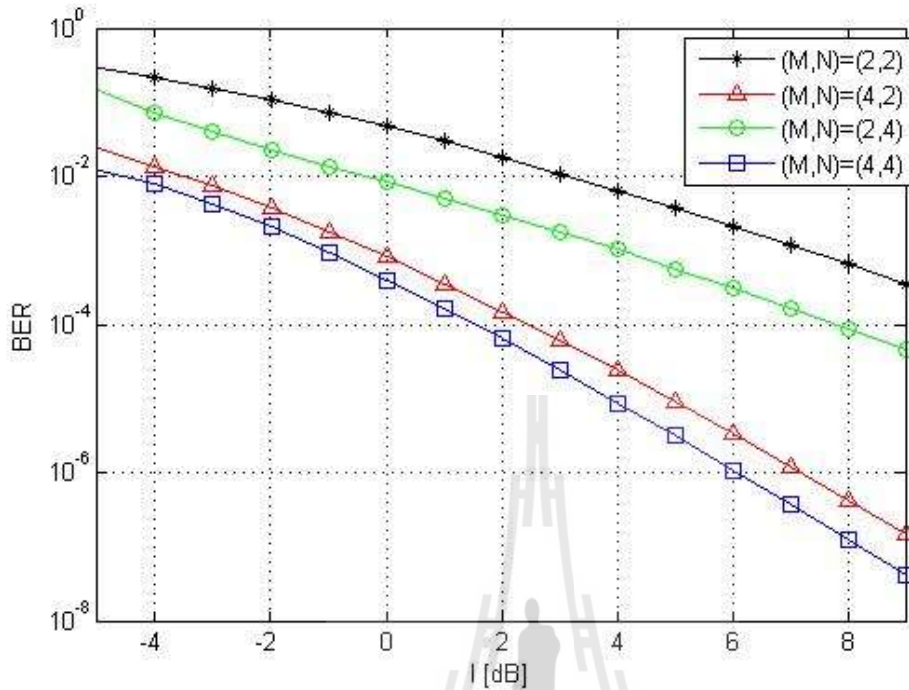
4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่างอัตราบิดผิดพลาดในระบบกับข้อมูลเชิงตำแหน่งของแต่ละ โหนด โดยอาศัยแบบจำลองระบบตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ที่ PT คือ ผู้ใช้หลัก PU, PR คือ สถานีฐาน BS, ST คือ ผู้ใช้รอง SU และ SR คือ ศูนย์พิวซ์ FC โดยการเชื่อมต่อหลักจะเป็นระบบสายอากาศเดี่ยว (single input single output, SISO) โดยสมมติว่า ช่องสัญญาณที่กำลังพิจารณาอยู่ในสถานะที่ผู้ใช้หลักใช้งานอย่างสม่ำเสมอ และได้ผ่านกระบวนการเลือกสายอากาศส่งแล้ว และสุดท้ายคือการแสดงผลการทดสอบเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมที่งานวิจัยนี้เสนอขึ้น

4.2 การทดสอบพารามิเตอร์

ในทางปฏิบัติ จะไม่สามารถเข้าไปยุ่งเกี่ยวกับการทำงานของเครือข่ายผู้ใช้หลักได้ ดังนั้นจึงต้องปรับพารามิเตอร์ของผู้ใช้รองให้เหมาะสม โดยในการทดสอบนี้จะกำหนดให้ ค่าความแปรปรวนของการเชื่อมต่อระหว่าง SU กับ FC $\lambda_S = 1$, ค่าความแปรปรวนของการเชื่อมต่อระหว่าง SU กับ BS $\lambda_p = 1$, ค่าความแปรปรวนของการเชื่อมต่อระหว่าง PU กับ FC $\lambda_{ps} = 0.01$, ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน $N_o = 1$, $(a, b) = (1, 2)$, และอัตราการส่งสัญญาณ $R = 2 \text{ bps/Hz}$

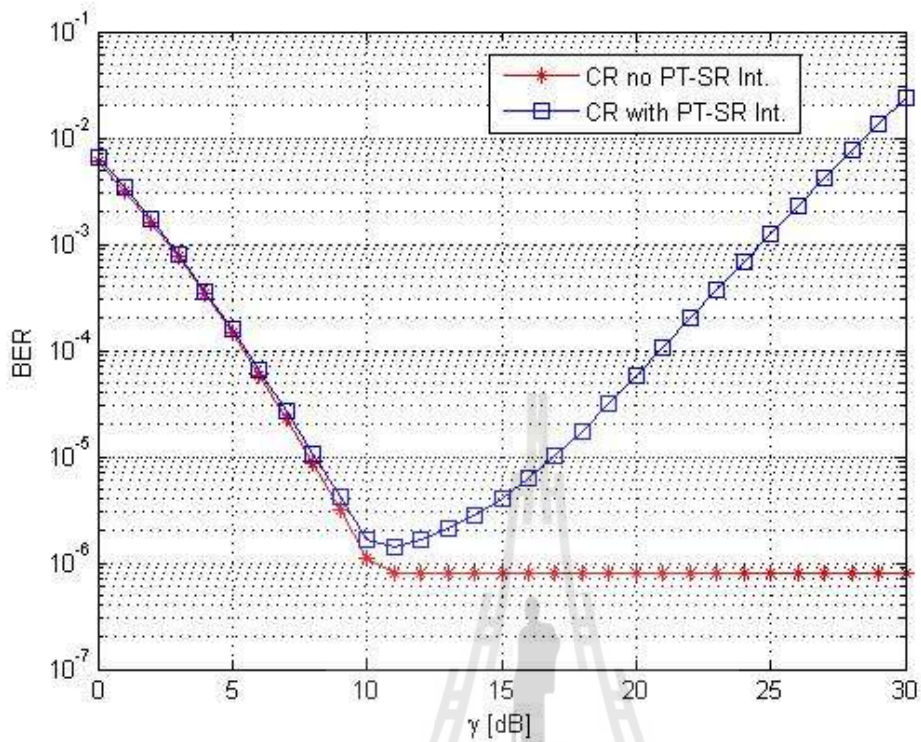
ในรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราบิดผิดพลาด BER ที่ FC เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการจำกัดสัญญาณแทรกสอด I จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มโอกาสให้มีการจำกัดค่าสัญญาณแทรกสอดที่มีผลต่อผู้ใช้หลักให้สามารถมีค่ามากขึ้น ค่าอัตราบิดผิดพลาดของผู้ใช้รองก็จะน้อยลงเพราะสามารถส่งสัญญาณด้วยกำลังที่สูงขึ้นได้ แต่ในทางกลับกัน ถ้าหากเปิดโอกาสให้สัญญาณแทรกสอดมีมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสื่อสารของผู้ใช้หลัก ในรูปนี้จึงแสดงให้เห็นว่า หากไม่สามารถเพิ่มค่าการจำกัดสัญญาณแทรกสอดให้มากขึ้น ก็ยังสามารถใช้คุณสมบัติของระบบโมโมได้ โดยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศองค์ประกอบ



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบของค่า BER ของผู้ใช้งานเมื่อเทียบกับค่าการจำกัดสัญญาณแทรกสอด I ภายใต้จำนวนสายอากาศที่เปลี่ยนไป

จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศ ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็ยิ่งน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเพิ่มสายอากาศภาครับจะให้ผลการดำเนินการที่ดีกว่าการเพิ่มสายอากาศภาคส่ง แต่อย่างไรก็ดี การเพิ่มสายอากาศทั้งสองด้านย่อมดีกว่าทุกกรณี

เมื่อทำการตั้งค่าการจำกัดการแทรกสอดให้เหมาะสมแล้ว ทีเหลือก็คือขีดความสามารถของผู้ใช้งานในการใช้กำลังส่งที่พอเหมาะ ดังในรูปที่ 4.2 กำหนดให้ค่าการจำกัดสัญญาณแทรกสอด $I = 5 \text{ dB}$ และจำนวนสายอากาศส่ง $N = 4$, จำนวนสายอากาศรับ $M = 4$ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าอัตราบิดผิดพลาด BER เมื่อค่า SNR ของผู้ใช้งานเปลี่ยนไป ซึ่งแสดงในสองกรณี คือ กรณีที่ละเว้นการคำนึงถึงสัญญาณแทรกสอด PT-SR จากผู้ใช้หลัก หรือเป็นกรณีที่ภาคส่งของผู้ใช้หลักอยู่ไกลจาก FC มาก จนสัญญาณแทรกสอดมีค่าน้อย จะเห็นได้ว่า ตอนที่ค่า SNR $\bar{\gamma}$ อยู่ในช่วงค่าน้อยค่าอัตราบิดผิดพลาดจะลดลงเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากค่ากำลังของสัญญาณมีค่ามากขึ้น กระบวนการจำกัดสัญญาณแทรกสอดยังไม่ทำงาน จนกระทั่ง $\bar{\gamma} > \frac{I}{E(g_{sp})}$ เมื่อค่า SNR มีค่ามากพอ ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะอึดตัวไม่ลดลงอีก



รูปที่ 4.2 BER เมื่อเทียบกับค่า SNR ที่เปลี่ยนไปในกรณีที่พิจารณาสัญญาณแทรกสอดจากการเชื่อมต่อ PT-SR และกรณีที่พิจารณาสัญญาณแทรกสอดจาก PT-SR

ซึ่งในอีกกรณี คือกรณีที่มีการพิจารณาสัญญาณแทรกสอดจากการเชื่อมต่อ PT-SR จะเห็นได้ว่าการดำเนินการในช่วงต้นจะเหมือนกับกรณีแรก แต่จะมีค่าอัตราบิดผิดพลาดมากกว่าเล็กน้อยอันเนื่องมาจากสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้หลัก แต่เมื่อค่า SNR มีค่ามากพอ ค่าอัตราบิดผิดพลาดกลับสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากเงื่อนไขใน (3.10) ที่ $P_S \leq P_m$ ในที่นี้ P_m คือกำลังส่งสูงสุดของผู้ใช้หลัก เพราะในทางปฏิบัติค่ากำลังส่งของผู้ใช้รองยอมไม่สูงไปกว่าค่ากำลังส่งสูงสุดของผู้ใช้หลัก ฉะนั้นเมื่อค่ากำลังส่งของผู้ใช้หลักสูงขึ้น ค่าสัญญาณแทรกสอดที่ส่งผลต่อการสื่อสารของผู้ใช้รองยอมสูงขึ้นด้วย

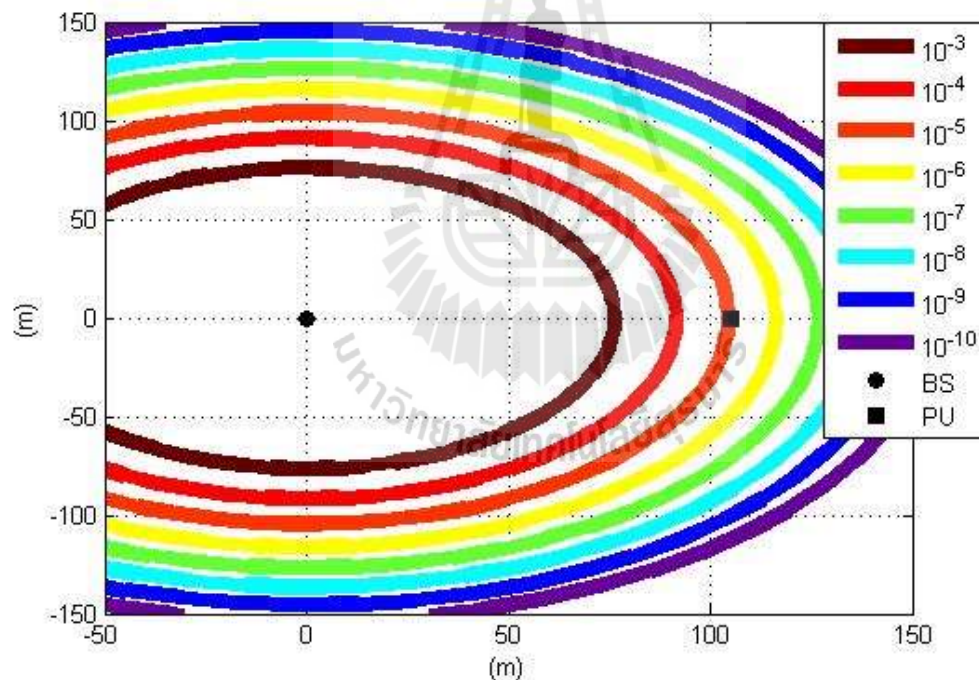
4.3 ปัญหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่กับค่าอัตราบิดผิดพลาด

ในส่วนนี้จะเริ่มจากการวิเคราะห์เครื่องข่ายผู้ใช้หลัก ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศต้นเดี่ยวทั้งภาคส่งและภาครับ

กำหนดให้เครื่องข่ายผู้ใช้หลักใช้การกล้ำสัญญาณแบบ Quadrature Amplitude Modulation (QAM) ซึ่ง m คือจำนวน constellation points ทำให้สามารถประมาณค่าอัตราบิดผิดพลาดของเครื่องข่ายผู้ใช้หลักได้ว่า

$$P_b \approx 0.2e^{-1.5\left(\frac{\bar{\gamma}G_C}{m-1}\right)} \quad (4.1)$$

ที่ G_C คือ อัตราขยายการเข้ารหัส (coding gain) [22, Eq. 9.38]

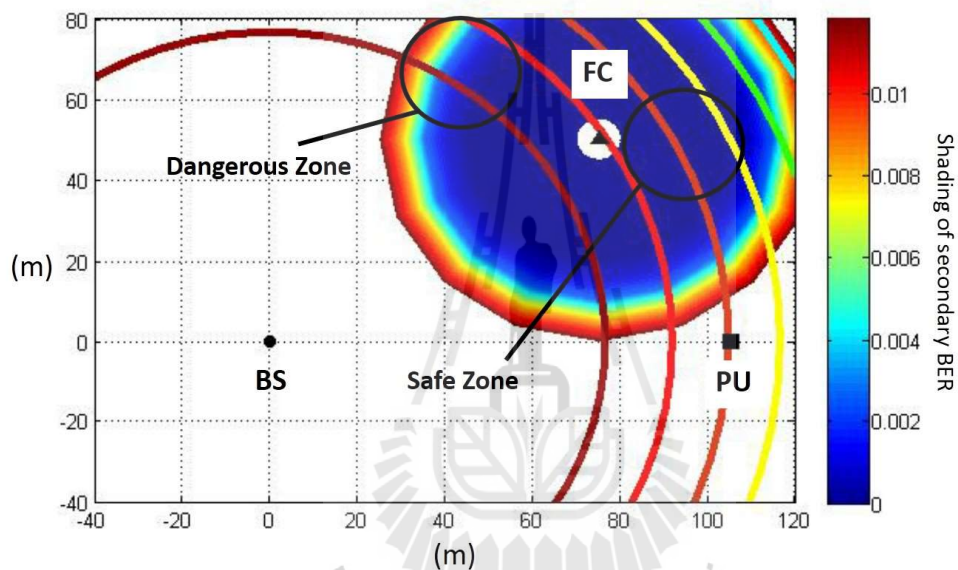


รูปที่ 4.3 ขอบเขตค่า BER ของเครื่องข่ายผู้ใช้หลักอันเนื่องมาจากสัญญาณแทรกสอดจาก SU ในบริเวณเดียวกัน

ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นสถานการณ์ที่มีการสื่อสารของผู้ใช้หลัก โดยที่ผู้ใช้งานเข้ามาร่วมใช้สเปกตรัม ทำให้เกิดขอบเขตของค่าอัตราบิดผิดพลาด โดยกำหนดให้ สเปกตรัมที่พิจารณามีความถี่พาหะ

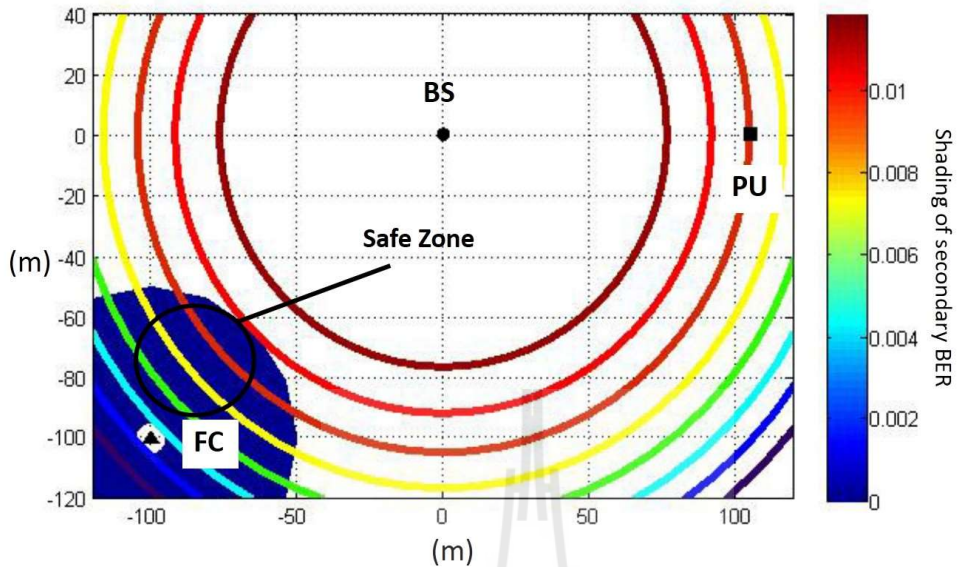
$f_c = 9 \text{ MHz}$, PU อยู่ห่างจาก BS $R_p = 105 \text{ m}$, กำลังส่งผู้ใช้หลัก $P_m = 10 \text{ W}$, ค่า constellation size $m = 16$, และค่าอัตราขยายการเข้ารหัส $G_c = 1$ ซึ่งจะได้ขอบเขตพื้นที่อันตราย และเขตพื้นที่ปลอดภัยสำหรับเครือข่ายผู้ใช้หลัก

และเมื่อนำการวิเคราะห์ค่าอัตราบิดผิดพลาดของเครือข่ายผู้ใช้รอง ที่ได้จาก (3.32) มาแสดงผลเชิงพื้นที่จะได้ดังในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ขอบเขตพื้นที่ดำเนินการแบ่งปันสเปกตรัมอันเนื่องมาจากค่า BER ของทั้งเครือข่ายผู้ใช้หลักและเครือข่ายผู้ใช้รองในกรณีที่ผู้รับรองอยู่ใกล้กับผู้ส่งหลัก

ในรูปที่ 4.4 กำหนดพารามิเตอร์ของเครือข่ายผู้ใช้หลักเหมือนในรูปที่ 4.3 ส่วนพารามิเตอร์ของผู้ใช้รอง ค่าการจำกัดสัญญาณแทรกสอด $I = 5 \text{ dB}$ และจำนวนสายอากาศส่ง $N = 4$, จำนวนสายอากาศรับ $M = 4$ และแถบสี BER ของเครือข่ายผู้ใช้หลักจะเหมือนกับในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่ FC อยู่ใกล้ PU จะเกิดเขตพื้นที่อันตรายที่มีค่าอัตราบิดผิดพลาดมากเกินกว่าระบบจะยอมรับได้ ทั้งนี้เพราะ SU ที่อยู่ใกล้ BS มาก ก็จะมีสัญญาณแทรกสอด ST-PR สูง และ PU ที่อยู่ใกล้ FC มาก ก็จะมีสัญญาณแทรกสอด PT-SR สูงเช่นเดียวกัน

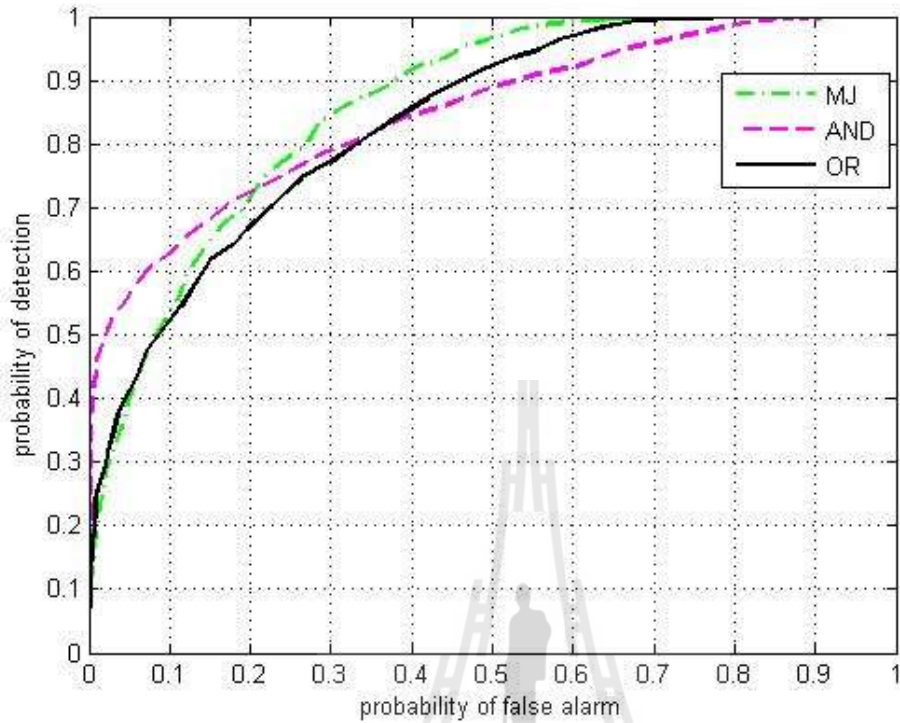


รูปที่ 4.5 ขอบเขตพื้นที่ดำเนินการแบ่งปันสเปกตรัมอันเนื่องมาจากค่า BER ของทั้งเครือข่ายผู้ใช้หลักและเครือข่ายผู้รองในกรณีที่ผู้รับรองอยู่ไกลจากผู้ส่งหลัก

แต่ถ้าหาก FC อยู่ไกลจาก PU ดังในรูปที่ 4.5 ก็จะได้ผลการดำเนินการที่ดี มีอัตราความผิดพลาดต่ำ เนื่องจากพื้นที่ของเขตปลอดภัยมีบริเวณกว้างเพราะ โอกาสที่วงรัศมีที่มีค่าอัตราบิดผิดพลาดสูงของเครือข่ายผู้ใช้หลักได้เข้ามาถึงพื้นที่เขตปลอดภัยนั้นน้อยลง

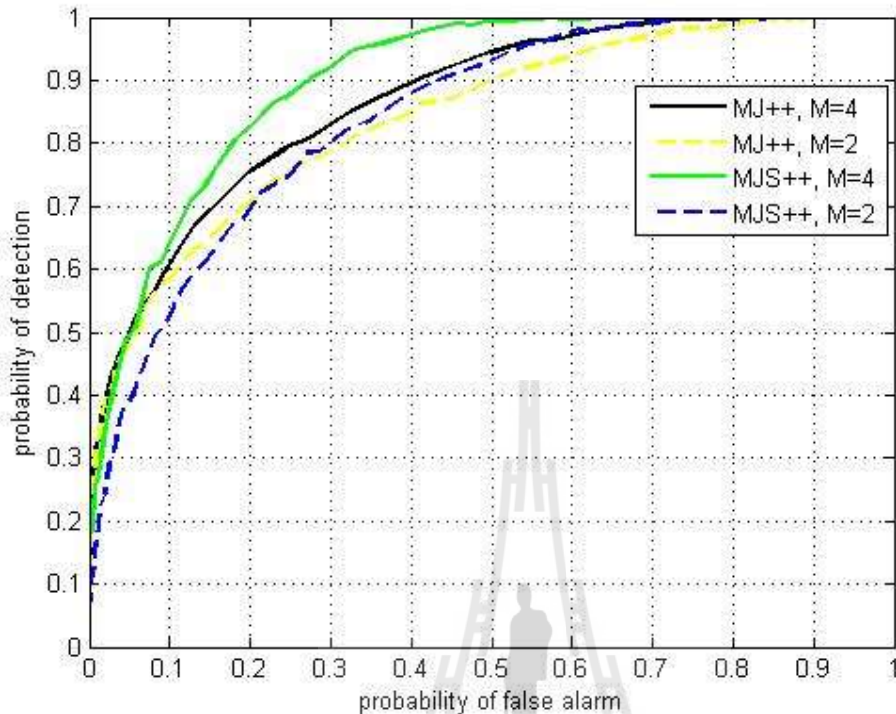
4.4 ผลการจำลองผลการตรวจจับสเปกตรัม โดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ

จำลองสัญญาณด้วยช่องสัญญาณแบบสุ่มสถานะ 60 ช่อง จากนั้น ค่าความน่าจะเป็นของการตรวจหาได้ P_D และค่าความน่าจะเป็นของการเตือนผิด P_{FA} ถูกคำนวณโดยเทคนิคการตรวจจับสเปกตรัมต่างๆ โดยรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC ของกฎการตัดสินใจแบบร่วมมือกันทั้งสาม ผลที่ได้เผยให้เห็นว่า MJ rule เป็นวิธีที่ให้ผลดีที่สุดท่ามกลางกฎการตัดสินใจทั้งสามนั้น ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่นำ MJ rule ไปพัฒนาดังในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC สำหรับ OR rule, AND rule และ MJ rule ที่ $M = 4$, $SNR = -30 \text{ dB}$, และ $n = 2000$

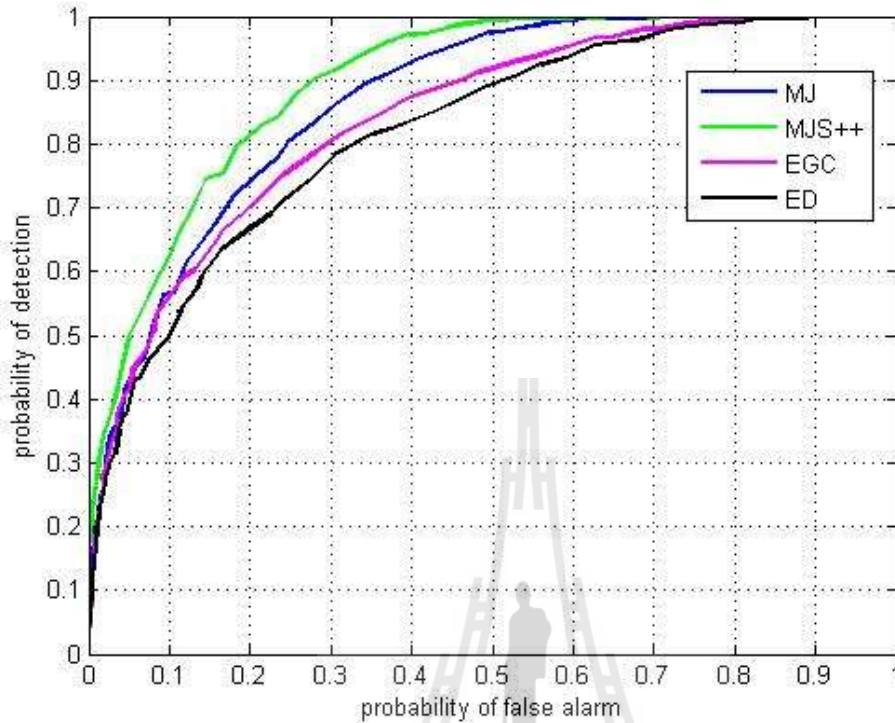
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC ของเทคนิค MAJORITY++ (MJ++) และ MAJORITY++ rule กับการตัดสินใจแบบละเอียดอ่อน (MJS++) ที่ $SNR = -30 \text{ dB}$, และจำนวนของตัวอย่าง $n = 2000$ กำลังส่งของผู้ใช้หลัก $P_t = 1 \text{ dBW}$ และสัญญาณที่ปรากฏในแต่ละช่องสัญญาณเกิดขึ้นแบบสุ่มสถานะ สำหรับระบบไมโม M คือจำนวนสายอากาศ อันซึ่งถูกจำกัดไว้ที่ 2 ถึง 4 ต้น ตามการดำเนินการในทางปฏิบัติ



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC ของ MJ++ และ MJS++ ที่ $M = 2$ และ 4 , $SNR = -30 \text{ dB}$, และ $n = 2000$

ดังที่เห็นในรูปที่ 4.7 วิธี MJS++ ให้การดำเนินการที่ดีกว่า MJ++ สำหรับทั้งกรณีของจำนวนสายอากาศ ผลที่ได้เผยให้เห็นประโยชน์ของการตัดสินใจแบบละเอียดอ่อนสำหรับการตรวจจับสเปกตรัม อีกทั้งในรูปนี้ จำนวนที่มากขึ้นของสายอากาศ จะให้ผลการดำเนินการที่ดีขึ้นด้วย

ในรูปที่ 4.8 ผลที่ได้แสดงการเปรียบเทียบของเทคนิคใหม่ของผู้วิจัยกับเทคนิคที่มีอยู่เดิม ที่ $SNR = -30 \text{ dB}$, $n = 2000$, $P_t = 1 \text{ dBW}$ และ $M = 4$ สำหรับเทคนิคการตรวจหาพลังงานปกติตั้งให้ $M = 1$ เพราะไม่มีการช่วยเหลือแบบร่วมมือกันบนระบบดั้งเดิม อย่างที่คาดไว้ เทคนิคใหม่เอาชนะเทคนิคอื่นๆ ที่ 90% ของความน่าจะเป็นของการตรวจหา เทคนิค MJS++ สามารถลดโอกาสของการเตือนผิดพลาดจาก 50% ของเทคนิค ED เหลือ 26% การปรับปรุงไป 24% นี้สามารถบ่งบอกถึงผลสำเร็จของเทคนิคใหม่สำหรับการใช้งานจริง



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง ROC สำหรับ ED ($M = 1$), EGC ($M = 4$), MJ rule ($M = 4$) และ MJS++ ($M = 4$), ที่ $SNR = -30$ dB และ $n = 2000$

4.5 กล่าวท้ายบท

ในบทนี้ผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบที่ได้จากแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งในช่วงต้นของบทนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับพารามิเตอร์บางอย่างของระบบวิทยุรู้คิดได้ โดยที่ไม่สามารถเข้าไปยุ่งกับระบบของผู้ใช้หลัก ซึ่งสามารถช่วยในการดำเนินการการแบ่งปันสเปกตรัมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นในระดับหนึ่ง แต่ถึงจะเป็นเช่นนั้น หากตำแหน่งของโหนดในเครือข่ายผู้ใช้รองอยู่ในจุดที่ไม่ดี ก็จะทำให้ปัญหาขึ้นดังที่เห็นในเขตพื้นที่อันตรายในรูปที่ 4.4 สิ่งนี้จึงเป็นแนวทางให้ผู้วิจัยหาวิธีพัฒนาเทคนิคในการประเมินตนเองสำหรับการแบ่งปันสเปกตรัมในระบบวิทยุรู้คิดแบบโม โม โดยอาศัยข้อมูลเชิงตำแหน่ง และในช่วงท้ายของบทนี้แสดงถึงสมรรถนะของเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยที่มีการนำเสนอวิธีการรวมเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมสองแนวทางเข้าด้วยกัน คือเทคนิค Equal Gain Combining และ MAJORITY Rule ผลการ

จำลองแบบยืนยันว่าเทคนิคที่เสนอขึ้นในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา



บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

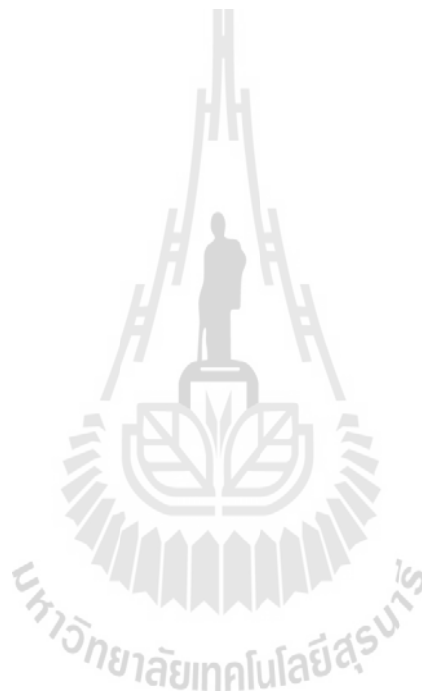
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษางานของระบบวิทยุรู้คิดในการแบ่งปันสเปกตรัมระหว่างเครือข่ายผู้ใช้หลักและเครือข่ายผู้ใช้รอง โดยเริ่มจากการทำความเข้าใจระบบวิทยุรู้คิดเบื้องต้นว่ามีความเป็นมา ความสำคัญ และลักษณะการดำเนินการอย่างไร แล้วได้มุ่งประเด็นมาที่การแบ่งปันสเปกตรัมที่สามารถแบ่งประเภทได้สองแบบหลักๆคือ การแบ่งปันสเปกตรัมแบบไม่ซ้อนทับกัน และการแบ่งปันสเปกตรัมแบบซ้อนทับกัน โดยการแบ่งปันสเปกตรัมแบบไม่ซ้อนทับกัน ระบบวิทยุรู้คิดจะทำการตรวจจับสเปกตรัมในช่องสัญญาณที่พิจารณา หากไม่พบสัญญาณของผู้ใช้หลัก ก็จะอนุญาตให้ผู้ใช้รองเข้ามาใช้ได้ ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาการตรวจจับสเปกตรัมด้วยวิธีการตรวจหาพลังงาน อีกทั้งได้ปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจจับสเปกตรัมโดยการนำเทคโนโลยีโมเด็มเข้ามาช่วย แต่เมื่อพิจารณาจากสถานการณ์ในปัจจุบันพบว่า โปรแกรมใช้งานทางการสื่อสารส่วนใหญ่เข้าใช้ช่องสัญญาณอย่างสม่ำเสมอ จนเสียดายไม่ได้ที่จะใช้ช่องสัญญาณที่ว่างคนละเวลากับผู้ใช้หลัก ผู้วิจัยจึงได้มุ่งความสนใจไปที่การแบ่งปันสเปกตรัมแบบซ้อนทับกัน โดยที่ระบบจะอนุญาตให้ผู้ใช้รองเข้าใช้ช่องสัญญาณในเวลาเดียวกับผู้ใช้หลัก แต่มีเงื่อนไขที่ว่า จะต้องทำการจำกัดสัญญาณแทรกสอดให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีโมเด็มในการลดสัญญาณแทรกสอดลงได้ระดับหนึ่ง แต่ทว่าหากโหนดในระบบอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ดี ระดับสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นก็ยังคงมีค่าสูงแม้ว่าจะทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบแล้วก็ตาม ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมให้เกิดประโยชน์มากที่สุดเมื่อมีการใช้งานในระบบโมเด็ม

โดยทั่วไปความสำเร็จของเทคโนโลยีวิทยุรู้คิดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการรับรู้สเปกตรัมสำหรับระบบโมเด็มนั้นจะมีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้นซึ่งสามารถถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางการรับรู้สเปกตรัมได้มากกว่าการมีสายอากาศเพียงต้นเดียว อย่างไรก็ตามจากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่าการใช้สายอากาศหลายต้นเพื่อรับรู้สเปกตรัมมีการตัดสินใจเพียงสองระดับเท่านั้นคือสเปกตรัมว่างหรือไม่ว่างทั้งๆ ที่มีข้อมูลประกอบการตัดสินใจจากสายอากาศหลายต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่พัฒนาการตัดสินใจเป็นแบบซอฟต์แวร์ซึ่งให้ผลที่เหมาะสมกับระบบโมเด็มในเครือข่ายวิทยุรู้คิด และมีการนำเสนอวิธีการรวมเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมสองแนวทางเข้าด้วยกัน คือเทคนิค Equal Gain Combining และ MAJORITY Rule

ผลการจำลองแบบยืนยันว่าเทคนิคที่เสนอขึ้นในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา

5.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางการวิจัยที่น่าจะดำเนินการต่อคือการทดสอบวัดจริงในทางปฏิบัติเพื่อพิสูจน์แนวคิดของเทคนิคการรับรู้สเปกตรัมของการรับรู้ทางวิทยุสำหรับระบบโมโม



บรรณานุกรม

- [1] Fed. Commun. Comm. Spectrum Policy Task Force, “FCC report of the spectrum efficiency working group,” Washington, DC, Nov. 2002.
- [2] M. Gandetto and C. Regazzoni, “Spectrum sensing: A distributed approach for CTs,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 546–557, Apr. 2007.
- [3] IEEE P802.22TM/D0.1 Draft Standard for Wireless Regional Area Networks, IEEE Std. 802.22 doc. no. 22-06-0068-00-0000, May 2006.
- [4] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. W. Brodersen, “Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation,” in *Proc. ACM 1st Int. Workshop TAPAS*, Aug. 2006, p. 12-es.
- [5] C. Cordeiro, K. Challapali, and M. Ghosh, “Cognitive PHY and MAC layers for dynamic spectrum access and sharing of TV bands,” in *Proc. ACM 1st Int. Workshop TAPAS*, Aug. 2006, p. 3-es.
- [6] H. Wendong, D. Willkomm, M. Abusubaih, J. Gross, G. Vlantis, M. Gerla, and A. Wolisz, “Cognitive radios for dynamic spectrum access—Dynamic frequency hopping communities for efficient IEEE 802.22 operation,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 5, pp. 80–87, May 2007.
- [7] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments,” in *Proc. IEEE DySPAN*, Nov. 2005, pp. 131–136.
- [8] G. Ganesan and Y. Li, “Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” in *Proc. IEEE DySPAN*, Nov. 2005, pp. 137–143.
- [9] E. Peh, Y.-C. Liang, Y. L. Guan, and Y. Zeng, “Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: A sensing-throughput tradeoff view,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 5294–5299, Nov. 2009.
- [10] J. Shen, T. Jiang, S. Liu, and Z. Zhang, “Maximum channel throughput via cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 10, pp. 5166–5175, Oct. 2009.
- [11] Z. Li, F. R. Yu, and M. Huang, “A distributed consensus-based cooperative spectrum-sensing scheme in cognitive radios,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 1, pp. 383–393, Jan. 2010.



ภาคผนวก ก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ

Lattasart Laikanok, Peerapong Uthansakul and Monthippa Uthansakul. “Soft Decision Spectrum Sensing with Integration of Equal Gain Combining and MAJORITY Rule for MIMO Systems” The 21 Asia Pacific Conference on Communications , 14-16 October 2015, Kyoto, Japan



ภาคผนวก ข

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



Soft Decision Spectrum Sensing with Integration of Equal Gain Combining and MAJORITY Rule for MIMO Systems

Rattasat Laikanok, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul
 School of Telecommunication Engineering
 Suranaree University of Technology
 Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000
 Email: D5640034@g.sut.ac.th, uthansakul@sut.ac.th and mtp@sut.ac.th

Abstract— It is obvious that for cognitive radio technology the success of using it depends on how accurate of spectrum sensing is. For MIMO systems, there are multiple antennas which can be more utilized for spectrum sensing than only one antenna like conventional systems. However, in literatures, the use of multiple antennas for sensing approach is based on two-state decision; available or occupied spectrums. In this paper, multi-state decision so called soft decision has been proposed to improve the performance of spectrum sensing for MIMO systems. Also this paper proposes the integration of Equal Gain Combining and MAJORITY Rule for sensing the spectrum. The results show that the proposed technique provides the best performance in comparing with other techniques.

Keywords— *cognitive radio (CR); multiple-input-multiple-output (MIMO); energy detector (ED); soft decision*

I. INTRODUCTION

At present, the frequency resources allocated to primary users in the use of certain frequencies are not occupied all the time and they have a limited area where the communication signals in the frequency band are strong only, which is referred as a spectrum hole [1] as shown in Fig. 1. This causes researchers to find higher efficient technique to utilize resources. A Cognitive Radio (CR) technology has emerged to support the issue mentioned above and many associated techniques have introduced to improve its performance in various aspects. The popularity of CR technology gains the demand of its validation on the compliance with IEEE 802.22 standard as detailed in [2]. Following this standard, the information on the frequency allocation of the TV channels as shown in Tables I and II will be adopted for simulation in this paper.

The main objective of spectrum sensing is to increase the opportunities for secondary users (SUs) to access the spectrum without interfering to the primary networks. For Multiple Input Multiple

Output (MIMO) systems, there are more than one antenna operating at the same time. Hence, it is possible to utilize the use of multiple antenna for spectrum sensing. The higher accurate sensing results are expected from MIMO systems.

In literatures, the authors have surveyed many spectrum sensing techniques for CR technology that can apply to MIMO systems. One technique among those in literatures is the cooperative sensing concept [3]. In [4], the work described the various techniques of the cooperative sensing and presented the performance comparison of various methods, the advantages-disadvantages of each method. However, the cooperation of many antennas refers to the wasteful use of resources. This is because those methods make a decision based on two-state results either available or occupied spectrum. Hence, the cooperative mechanism can be predicted from two levels of decision which the performance can not be improved much for multiple antennas.

In this paper, the multi-state decision so called soft decision is proposed to the principle of cooperative sensing for array antennas in order to support MIMO systems. Moreover, this paper also presents that the integration of two cooperative sensing techniques, Equal Gain Combining (EGC) and MAJORITY Rule (MJ), provides the best performance among other techniques in literatures.

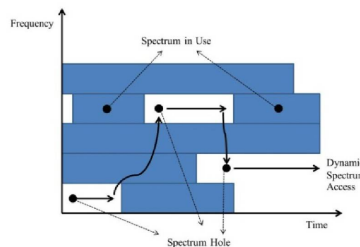


Fig. 1 Spectrum hole concept.

TABLE I. FREQUENCY OF TV CHANNELS IN WESTERN EUROPE AND MANY OTHER COUNTRIES IN AFRICA, ASIA, AND THE PACIFIC (BW=7 MHz)

| CH | f_c (MHz) | CH | f_c (MHz) | CH | f_c (MHz) |
|----|-------------|----|-------------|----|-------------|
| 2 | 50.5 | 6 | 184.5 | 10 | 212.5 |
| 3 | 57.5 | 7 | 191.5 | 11 | 219.5 |
| 4 | 64.5 | 8 | 198.5 | 12 | 226.5 |
| 5 | 177.5 | 9 | 205.5 | | |

TABLE II. FREQUENCY OF TV CHANNELS IN WESTERN EUROPE AND MANY OTHER COUNTRIES IN AFRICA, ASIA, AND THE PACIFIC (BW=8 MHz)

| CH | f_c (MHz) | CH | f_c (MHz) | CH | f_c (MHz) | CH | f_c (MHz) | CH | f_c (MHz) |
|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|
| 21 | 474 | 31 | 554 | 41 | 634 | 51 | 714 | 61 | 794 |
| 22 | 482 | 32 | 562 | 42 | 642 | 52 | 722 | 62 | 802 |
| 23 | 490 | 33 | 570 | 43 | 650 | 53 | 730 | 63 | 810 |
| 24 | 498 | 34 | 578 | 44 | 658 | 54 | 738 | 64 | 818 |
| 25 | 506 | 35 | 586 | 45 | 666 | 55 | 746 | 65 | 826 |
| 26 | 514 | 36 | 594 | 46 | 674 | 56 | 754 | 66 | 834 |
| 27 | 522 | 37 | 602 | 47 | 682 | 57 | 762 | 67 | 842 |
| 28 | 530 | 38 | 610 | 48 | 690 | 58 | 770 | 68 | 850 |
| 29 | 538 | 39 | 618 | 49 | 698 | 59 | 778 | 69 | 858 |
| 30 | 546 | 40 | 626 | 50 | 706 | 60 | 786 | | |

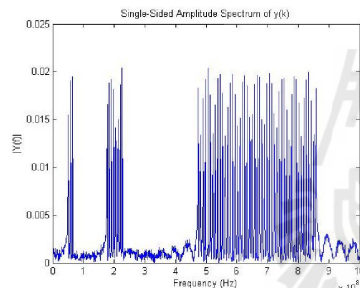


Fig. 2 Received spectrum when all channels are occupied.

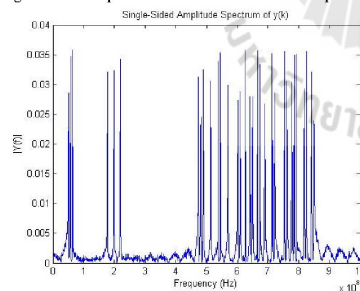


Fig. 3 Received spectrum when some channels are available.

The remainder of this paper is organized as follows. The basis of the energy detector method is given in Section II. Then, the overview of EGC and cooperative decision rules including MJ are presented in Section III. In Section IV, the proposed techniques including the integration of

various methods and the soft decision are given in details. The simulation results and discussion are presented in Section V and then followed by the conclusion in Section VI.

II. ENERGY DETECTION METHOD

The principle of spectrum sensing can be understood easily [5-6] because only the interested spectrum is in just two hypotheses, including H_0 (available) and H_1 (occupied). The state is available when the primary user (PU) signal is not detected. The received signal is just ambient noise in the radio frequency (RF) environment. For the another, the state is occupied when the received signal would be consisted of the PU signal and the ambient noise, that can be explained by

$$H_0: y(k) = w(k) \tag{1}$$

$$H_1: y(k) = s(k) + w(k),$$

when $y(k)$ represents the received signal, $w(k)$ represents the ambient noise, and $s(k)$ represents the PU signal, for $k = 1, \dots, n$, and n is the number of received samples. In fact, there are many spectrum sensing techniques in literatures such as energy detection, cyclostationary and etc. Among those, the energy detection method is very popular due to its ease for implementation. This paper develops the sensing technique based on the energy detector (ED) because it costs the less for multiple antennas in practice. Also this approach has the advantage that it is easy to distinguish the status of the spectrum energy in a way that is quite straightforward. Hence, it can be implemented as multi-state rather than available or occupied.

The simulations are based on the channel from IEEE 802.22 standard. The received spectrum when all channels in Tables I and II are occupied is presented in Fig. 2. The authors random some channels to be available in order to investigate the performance of sensing techniques. The example of received spectrum when some frequencies are available is illustrated in Fig. 3.

The performance evaluation of spectrum sensing techniques can be significantly viewed from two probabilities: probability of detection P_D and probability of false alarm P_{FA} .

P_D is the probability of detecting a signal on the considered frequency when it truly appears, or can be described in another form which is the probability of remaining apart from the probability of missed detection P_{MD} . This can be written as

$$P_D = 1 - P_{MD}, \tag{2}$$

when P_{MD} is the probability of detecting a signal when the occupied channel is detected as the channel is available. It occurs when the energy of the received signal is lower than the detection

threshold τ . The P_{FA} is the probability of detecting a signal when the available channel is detected as the channel is occupied, it is usually caused by a misunderstanding that interference is too high in the available channel. The P_{MD} and P_{FA} can be defined as

$$P_{MD} = \text{Prob}\{\text{Decide } H_0 | H_1\}, \quad (3)$$

$$P_{FA} = \text{Prob}\{\text{Decide } H_1 | H_0\}. \quad (4)$$

It can be seen that the P_{FA} is associated with P_D in such a way that P_{FA} is one of the forms of P_D when the total number of signal that is detected. Then, there is a certain amount of noise that is misunderstood.

The probabilities P_{FA} and P_{MD} in the forms of a simple analysis with the signals are modeled as a zero-mean stationary white Gaussian process, independent of the observation white Gaussian noise, which can be calculated as

$$P_{FA} = \Gamma_u(n\tau, n), \quad (5)$$

$$P_{MD} = \Gamma_u\left(\frac{n\tau}{1+SNR}, n\right), \quad (6)$$

where $\Gamma_u(\dots)$ is the upper incomplete gamma function [7].

In practice, we can separate the various frequencies of each channel from the received signal in (1) as follows:

$$y(k) = \sum_{ch=1}^{CH} u_{ch}(k), \quad (7)$$

where CH is the number of considered channels.

Then, take the signal being considered in each channel into the one-bit decision equation as:

$$U_{ch} = \begin{cases} 0, & \text{avg}(|u_{ch}(k)|^2) < \tau \\ 1, & \text{avg}(|u_{ch}(k)|^2) > \tau \end{cases} \quad (8)$$

To demonstrate the concept of energy detection, the preliminary simulation has been performed. When the available channels are random for 2,000 times, the comparison between closed form solution appeared in (5) and simulated results can be shown in Fig. 4. In this figure, the evaluation of the probabilities P_D and P_{FA} is presented and this figure is well known as the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. The ROC shows the sensitivity in the terms of P_D and the specificity in the terms of P_{FA} . Therefore, the ROC curve that approaches 1 for P_D and 0 for P_{FA} is the ideal case. This figure also shows that the results of the simulation results of the spectrum sensing with energy detector is close to the theoretical analysis, when we refer the channels from Tables I and II.

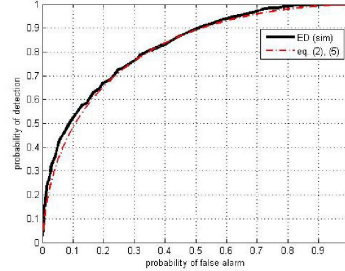


Fig. 4 ROC curves of the normal ED where $SNR = -30$ dB, and $n = 2000$.

III. EGC AND COOPERATIVE DECISION RULE

The difference of normal CR and MIMO CR users is the number of antennas on receiver. Hence, for MIMO CR, the method to utilize the use of multiple antennas is very important. In literatures, there are many techniques that can utilize many antennas for spectrum sensing so called cooperative techniques. Among those, two popular techniques are EGC and cooperative decision rule. This section presents the foundation of developed technique to support the cognitive radio technology in MIMO systems.

A. Equal Gain Combining

Equal Gain Combining (EGC) method fuses all the received signals from each antenna to obtain the following combining result [4]:

$$y_{EGC}(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y_m(k), \quad (9)$$

where M is the number of antenna elements.

The use of EGC is to take the EGC received signal $y_{EGC}(k)$ in (9) into (7) and (8) instead of $y(k)$.

B. Cooperative Decision Rule

The cooperative decision rule refers to three different formats including OR rule, AND rule and MAJORITY (MJ) rule. After the signal is received, each signal of each antenna element will be sent to separated detector by (7), and next to (8). Finally, we have the data points U_{ch} of all channels of each antenna, total points of the corresponding channel to perform the final decision according to the following logic rule [4], as follows:

$$U_{total}(k) = \sum_{m=1}^M U_m(k) \begin{cases} < \kappa, & H_0 \\ > \kappa, & H_1 \end{cases} \quad (10)$$

where κ is the decision factor which the OR rule corresponds to the case of $\kappa = 1$, the AND rule corresponds to the case of $\kappa = M$, and the

MAJORITY rule corresponds to the case of $\kappa = M/2$.

IV. PROPOSED TECHNIQUES

A. MAJORITY++ Rule

From both methods in Section III, the authors combine them to improve the performance of spectrum sensing even better. The authors have named this proposed method as MAJORITY++ (MJ++). The proposed MAJORITY++ rule technique is created by adding the assistant signal:

$$y_{M+1}(k) = \left(\frac{1}{M}\right) \sum_{m=1}^M w_m * y_m(k), \quad (11)$$

that was taken from the EGC method, and w_m is weighting coefficients. The reason of adding w is that the received signal of each antenna element has a phase shift from the principle of array antenna [8].

Then we take the signal from (11) and normally received signals to get into the process of normal decision by (7) and (8) respectively. After that, the MJ rule is taken according to (10). The decision factor of this method is given by

$$\kappa_{MJ++} = \left(\frac{M+1}{2}\right). \quad (12)$$

The result in (12) is used for the final decision in (10).

B. MAJORITY++ Rule with Soft Decision

Based on a one-bit decision shown in (8), the deficiency is that there are only two-state results. Only either available or occupied channels are the final output. In some cases, the available channel can be the final decision even the signal is slightly below the threshold. This is because the two-state system strictly keep comparing with the threshold level no matter how much the difference between signal and threshold is. In this light, the authors propose the new idea to increase the opportunity for those weak signals being slightly lower than the threshold to give them a greater voice in decision making. By dividing the threshold into multiple levels L , so called as multi-state threshold, and giving the proper decision points to them, then we can have the leveled decision, so called as soft decision as shown in (13).

$$U_{L, ch} = \begin{cases} 0, & \text{avg}(|u_{ch}(k)|^2) < l\tau \\ \downarrow & \downarrow \\ 1, & \text{avg}(|u_{ch}(k)|^2) \geq L\tau \end{cases} \quad (13)$$

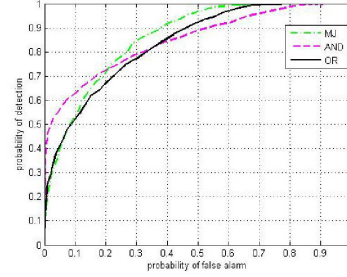


Fig. 5 Comparison of ROC curves for OR rule, AND rule and MJ rule, where $M = 4$, $SNR = -30$ dB, and $n = 2000$.

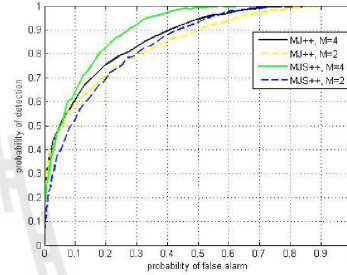


Fig. 6 Comparison of ROC curves for MJ++ and MJS++, where $M = 2$ and 4 , $SNR = -30$ dB, and $n = 2000$.

where L is a constant increase in the number of levels up to L . The value of $U_{L, ch}$ is between 0 and 1 as same as U_{ch} in (8). The authors have named this proposed method as MJS++ for a short reference.

V. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Based on information in Tables I and II, the simulated signals with the random of available channels is generated. Then, the probability of detection P_D and probability of false alarm P_{FA} are calculated by various spectrum sensing techniques. Fig. 5 shows the ROC comparison of the cooperative decision rules. The results in Fig. 5 reveal that MJ rule is the most effective method among those three cooperative decision rules. Thus, this paper select the MJ rule for the integration of EGC with soft decision as presented in the next results.

Fig. 6 shows the ROC comparison of MAJORITY++ rule (MJ++) and MAJORITY++ rule with soft decision (MJS++), where $SNR = 30$ dB, the number of samples $n = 2000$, the transmitted power of primary user $P_t = 1$ dBW, and the presence of the signal in each channel has occurred randomly. For the MIMO systems, M is the number of antennas which is limited to 2 and 4 antennas as related to the practical issue.

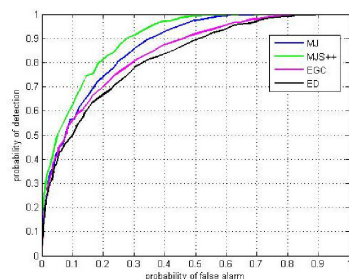


Fig. 7 Comparison of ROC curves for normal ED ($M = 1$), EGC ($M = 4$), MJ rule ($M = 4$) and MJS++ ($M = 4$), where $SNR = -30$ dB and $n = 2000$.

As seen Fig. 6, MJS++ rule offers a better performance than MJ++ rule for both cases of the number of antennas. The results reveal the benefit of soft decision for spectrum sensing. Also in this figure, the more number of antennas, the better performance can be obtained. The results imply the advantage of using the proposed technique for the MIMO CR users.

In Fig. 7, the results show the comparison of the proposed techniques and the existing techniques in literatures, where $SNR = 30$ dB, $n = 2000$, $P_t = 1$ dBW, $M = 4$. For an energy detection technique, the antenna is set to 1 because there is no cooperative help on traditional systems. As expected, the proposed techniques outperform the others. At the 90% probability of detection, the MJS++ technique can reduce the chance of false alarm from 50% of ED technique to 26%. This 24% improvement can indicate the success of proposed technique for practical use.

VI. CONCLUSION

This paper has presented the new concept for sensing the spectrum for MIMO CR users. The proposed concept is to divide the decision threshold into multi-state decision so called as soft decision. Also, the soft decision has been applied to the integration of EGC and MAJORITY rule. The performance of proposed techniques has been examined in terms of ROC curve. The results show that the proposed techniques outperform the other existing techniques. Also the better performance can be obtained using the soft decision.

REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, W. -Y. Lee and M. C. Vuran, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless network: A survey," *Science Direct*, pp. 2127-2130, 2006.
- [2] 802.22-2011 - IEEE Standard for Information technology-- Local and Metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium

Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands.

- [3] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Serv. Tutor.*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [4] C. Hunifang, X. Lei and N. Xiong, "Reputation-based hierarchically cooperative spectrum sensing scheme in cognitive radio networks," *Selected papers from IEEE/CIC ICC2013*, pp. 12-25, Jan. 2014.
- [5] K. Tourki, K. A. Qaraqe, H-C. Yang and M-S. Alouini, "Exact performance analysis of MIMO cognitive radio systems using transmit antenna selection," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 32, no. 3, Mar. 2014.
- [6] F. A. Khan, K. Tourki, M-S. Alouini and K. A. Qaraqe, "Performance analysis of a power limited spectrum sharing system with TAS/MRC," *IEEE Tran. Signal Processing*, vol. 62, no. 4, Feb. 2014.
- [7] A. M. Wyglinski, M. Nekovee and T. Hou, *Cognitive Radio Communications and Networks*, ELSEVIER Inc. 2010.
- [8] J. Foutz, A. Spanias and M. K. Banavar, "Narrowband direction of arrival estimation for antenna arrays," A publication in the Morgan & Claypool publishers series.

ประวัติผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุซารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 และ 2541 จากนั้นเข้าทำงานใน ตำแหน่งวิศวกรระบบโทรคมนาคมที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จนกระทั่ง พ.ศ. 2543 จึงได้ย้ายมา เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia เมื่อ พ.ศ. 2549 จึงได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ MIMO, Information Theory, Signal Processing, Radio Wave Modelling, Mobile Communication, Advance Wireless Communication ปัจจุบันมีบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 30 บทความ ในวารสารวิชาการระดับชาติ 6 บทความ ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 115 บทความ หนังสือวิชาการ ในประเทศ 1 เล่มและต่างประเทศ 1 เล่ม มีลิขสิทธิ์ 1 รายการและ สิทธิบัตร 1 รายการ

รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุซารสกุล ได้รับรางวัล Young Scientist Travel Grant Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antenna Propagation ปี พ.ศ. 2547 ณ ประเทศ ญี่ปุ่น และได้รับรางวัล Best Student Presentation Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ Australian Symposium on Antenna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2553 รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุซารสกุล ได้รับรางวัลพนักงานดีเด่น ด้านการวิจัย สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี และในปี พ.ศ. 2556 บทความที่เป็นผู้ประพันธ์หลักเรื่อง Low-profile beamforming MIMO systems for wireless communications ได้รับรางวัลประกาศนียบัตร ผู้นำเสนอผลงานวิจัยดีมากแบบ โปสเตอร์ ในงานการประชุมสุดยอดมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ครั้งที่ 2 (The Second Thailand National Research Universities Summit : NRU SUMMIT II) วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2556 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติ สิริกิติ์ กรุงเทพฯ