4. การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบของปัจจัยต่างๆต่อคุณภาพการให้บริการของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ได้จากการออกแบบด้วยอัลกอริทึมดังกล่าวในข้อ 1.
5. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพการให้บริการสื่อสารของเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมากับคุณภาพของเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการอื่น โดยจะทำการเปรียบเทียบกับเทคนิคที่มุ่งเน้นการออกแบบเพื่อให้ได้สัญญาณครอบคลุมของเครือข่ายที่ดีที่สุด

2. ปริทัศน์วรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ไม่ปรากฏว่ามีรายงานการตีพิมพ์เผยแพร่ของคณะนักวิจัยใดที่พิจารณางานวิจัยที่ซ้ำซ้อนกับงานวิจัยที่จะดำเนินการในโครงการที่เสนอนี้มาก่อน จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าว สามารถสรุปหลักการและวิธีดำเนินการวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้เป็น 4 กลุ่มคือ กลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่ายเพื่อให้ได้สัญญาณครอบคลุมของเครือข่ายที่ดีที่สุด (signal coverage optimization) กลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่ายเพื่อให้ค่าใช้จ่ายของเครือข่ายน้อยที่สุด (network cost minimization) กลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่ายเพื่อให้ปริมาณงานรวมของเครือข่ายมีค่าสูงที่สุด (network throughput maximization) และกลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่ายให้ได้สัญญาณครอบคลุมของเครือข่ายที่ดีที่สุดและมีค่าใช้จ่ายของเครือข่ายน้อยที่สุด (signal coverage optimization and network cost minimization) แต่ละกลุ่มงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1) กลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่ายเพื่อให้ได้สัญญาณครอบคลุมของเครือข่ายที่ดีที่สุด โดยทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งจุดเข้าถึง (access point) เพื่อให้คุณภาพสัญญาณในเครือข่ายดีที่สุด ตัวอย่างงานวิจัยในกลุ่มนี้ได้แก่ งานวิจัย [1] มุ่งเน้นให้อัตราส่วนของสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) ในเครือข่ายมีค่าสูงที่สุด และให้ค่าความลดทอนของสัญญาณ (path loss) มีค่าต่ำที่สุด โดยทำการแก้ปัญหาการออกแบบเพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งจุดเข้าถึง โดยมีสมมติฐานว่าจุดเข้าถึง แต่ละเครื่องส่งสัญญาณที่ระดับความแรงเท่ากัน และใช้ช่องความถี่เดียวกัน งานวิจัย [2-3] ได้ทำการหาจำนวนและตำแหน่งการติดตั้ง AP ที่ทำให้คุณภาพของสัญญาณในเครือข่ายดีที่สุด โดยทำให้มีการลดทอนของสัญญาณในเครือข่ายน้อยที่สุด (minimize path loss) และงานวิจัย [4] ได้ทำการตำแหน่งในการติดตั้งจุดเข้าถึง และช่องความถี่สำหรับจุดเข้าถึง แต่ละเครื่องเพื่อให้ระดับความแรงของสัญญาณในเครือข่ายมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่ระดับสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำที่สุด

งานวิจัยในกลุ่มนี้ทำการออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์บางตัวของจุดเข้าถึงเท่านั้น ยังไม่มีรายงานการตีพิมพ์เผยแพร่ของงานวิจัยใดที่ทำการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของจุดเข้าถึงที่จำเป็นในการสร้างเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายอย่างครบถ้วน พารามิเตอร์ดังกล่าวประกอบด้วย ตำแหน่งในการติดตั้ง ระดับความแรงสัญญาณ และช่องความถี่ของจุดเข้าถึงซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยที่นำเสนอนี้

2) กลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่ายเพื่อให้ค่าใช้จ่ายของเครือข่ายน้อยที่สุด งานวิจัยส่วนใหญ่ในแนวทางนี้ต้องการใช้จำนวนจุดเข้าถึงน้อยที่สุดในการสร้างเครือข่ายเพื่อให้มีสัญญาณ

ครอบคลุมทั่วถึงภายในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการ โดยทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งจุดเข้าถึงเพื่อให้คุณภาพสัญญาณในเครือข่ายอยู่ในระดับที่ต้องการ (threshold) โดยมีสมมติฐานว่าจุดเข้าถึงแต่ละเครื่องส่งสัญญาณที่ระดับความแรงเท่ากัน และใช้ช่องความถี่เดียวกัน [5] หลักการของการออกแบบเครือข่ายของงานวิจัยในกลุ่มนี้ได้พัฒนามาจากการออกแบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้จำนวนสถานีฐานให้น้อยที่สุด เพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายน้อยที่สุด โดยให้มีสัญญาณครอบคลุมภายในพื้นที่ตามที่กำหนด [6-7] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยในกลุ่มนี้ไม่ได้คำนึงถึงเรื่องปริมาณข้อมูลและจำนวนผู้ใช้งานในเครือข่าย ซึ่งอาจทำให้ขนาดความจุของเครือข่ายไม่เพียงพอในการรองรับการสื่อสารของโปรแกรมประยุกต์มัลติมีเดีย

3) กลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่าย เพื่อให้ปริมาณงานรวมของเครือข่ายมีค่าสูงที่สุด นั่นคือเครือข่ายสามารถรองรับข้อมูลจากเครื่องผู้ใช้ที่อยู่ภายในพื้นที่บริการได้มากที่สุด โดยงานวิจัย [8] ได้ทำการหาตำแหน่งที่ตั้ง และช่องความถี่ของจุดเข้าถึงแต่ละเครื่องที่ใช้ในเครือข่าย โดยได้คำนึงถึงลักษณะการเข้าใช้ช่องสัญญาณตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งกำหนดหลักการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance) [9] ส่วนงานวิจัย [10] ใช้หลักการออกแบบเครือข่ายที่คำนึงถึงปริมาณข้อมูลของผู้ใช้งานในเครือข่ายและลักษณะการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA แต่ไม่ได้มีข้อจำกัดเรื่องค่าใช้จ่ายของเครือข่าย

งานวิจัยในกลุ่มนี้ไม่ได้คำนึงว่าจะมีสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการทั้งหมดหรือไม่ แต่มุ่งเน้นการติดตั้งจุดเข้าถึงในตำแหน่งที่คาดว่าจะมีผู้ใช้งานอยู่มากเท่านั้น แต่เนื่องจากว่าเครื่องผู้ใช้เป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถย้ายตำแหน่งไปที่ใดก็ได้ จึงอาจทำให้ไม่สามารถทำการใช้งานเครือข่ายได้ในบางพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณครอบคลุม หรือสัญญาณมีระดับความแรงน้อยเกินไปได้ หรือมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป ดังนั้นในการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายจึงควรพิจารณาเรื่องคุณภาพของสัญญาณภายในพื้นที่ให้บริการด้วย ซึ่งในการวิจัยของโครงการที่นำเสนอนี้จะมุ่งเน้นการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายเพื่อให้ได้คุณภาพของสัญญาณครอบคลุมดีที่สุด และมีปริมาณงานของเครือข่ายสูงที่สุดด้วย โดยใช้จำนวนจุดเข้าถึงหรือค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายภายในงบประมาณที่กำหนดให้ หลักการออกแบบเครือข่ายในลักษณะนี้ยังไม่เคยมีคณะนักวิจัยกลุ่มใดนำเสนอมาก่อน

4) กลุ่มงานวิจัยที่มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครือข่าย เพื่อให้ได้สัญญาณครอบคลุมของเครือข่ายที่ดีที่สุด และมีค่าใช้จ่ายของเครือข่ายน้อยที่สุด ได้แก่ งานวิจัย [11] ซึ่งได้ทำการหาจำนวนและตำแหน่งการติดตั้งจุดเข้าถึง เพื่อให้ได้เครือข่ายที่มีค่าเฉลี่ยของ SNR ภายในพื้นที่ให้บริการสูงที่สุด โดยใช้จำนวนจุดเข้าถึงน้อยที่สุด ส่วนงานวิจัย [12] ก็ได้ทำการหาจำนวนและตำแหน่งการติดตั้งจุดเข้าถึง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณในเครือข่ายน้อยที่สุด และใช้จำนวนจุดเข้าถึงน้อยที่สุด

งานวิจัยในกลุ่มนี้ถึงแม้ว่าจะเป็นการออกแบบเครือข่ายที่มุ่งเน้นหลายวัตถุประสงค์ (multi-objective) แต่ก็ไม่ได้คำนึงถึงวัตถุประสงค์ในด้านปริมาณงานรวมของเครือข่ายเพื่อการรองรับการสื่อสารของโปรแกรมมัลติมีเดียที่มีทั้งเสียงและภาพเคลื่อนไหว ซึ่งมีปริมาณข้อมูลสูง และต้องใช้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลมากกว่าการรับ-ส่งข้อมูลธรรมดาที่ไม่ใช่โปรแกรมมัลติมีเดีย นอกจากนั้นงานวิจัยในกลุ่มนี้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ของจุดเข้าถึงเพียงอย่างเดียวคือ ตำแหน่งการติดตั้ง โดยสมมติให้จุดเข้าถึงส่งสัญญาณที่ระดับแรงดันเท่ากัน และใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน

จากการทบทวนวรรณกรรมที่กล่าวข้างต้น จะเห็นว่ายังไม่มีรายงานของการตีพิมพ์เผยแพร่ใดที่ทำการพัฒนาอัลกอริทึมการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยมุ่งพิจารณาคุณภาพของเครือข่ายในหลายประเด็นพร้อมกันอันประกอบด้วย คุณภาพของสัญญาณครอบคลุมภายในพื้นที่ให้บริการ ปริมาณงานรวมที่เครือข่ายสามารถรองรับได้ และค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่าย ซึ่งเป็นหลักการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่จะใช้ในโครงการวิจัยที่นำเสนอนี้ รวมทั้งยังไม่ปรากฏผลงานของคณะนักวิจัยใดที่ทำการหาค่าพารามิเตอร์ของจุดเข้าถึงที่จำเป็นในการสร้างเครือข่ายครบทั้งสามพารามิเตอร์คือ ตำแหน่งที่ตั้ง ความแรงสัญญาณที่ส่งออก และช่องความถี่ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยที่นำเสนอนี้

3. เทคนิคการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้วิธีการแบบหลายวัตถุประสงค์

หัวข้อนี้อธิบายเทคนิคการออกแบบเครือข่ายที่พัฒนาขึ้นโดยใช้วิธีการแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective approach) โดยหัวข้อ 3.1 เป็นการนิยามปัญหาการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายและอธิบายประเด็นที่พิจารณาในการออกแบบเครือข่าย หัวข้อ 3.2 นำเสนอสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้วิธีการแบบหลายวัตถุประสงค์ และหัวข้อ 3.3 อธิบายวิธีการแปลงสมการคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปของสกาลาร์ฟังก์ชัน (Scalarizing function)

3.1 การนิยามปัญหาสำหรับการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ในการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย สิ่งที่ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดคือ จำนวนจุดเข้าถึงที่ต้องใช้ติดตั้งในพื้นที่ให้บริการ และต้องกำหนดตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสม รวมถึงช่องความถี่ และความแรงในการส่งสัญญาณของจุดเข้าถึงแต่ละเครื่องด้วย ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้เครือข่ายสามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ และมีคุณภาพการให้บริการสูงสุด

สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาคุณภาพของเครือข่ายทั้งสองด้านคือคุณภาพการให้บริการในด้านของความพอใจในคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของผู้ใช้บริการ รวมถึงคุณภาพของสัญญาณในพื้นที่ของเครือข่าย

3.1.1 การพิจารณาคุณภาพการให้บริการในด้านของความพอใจในคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของผู้ใช้บริการ

วิธีการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในงานวิจัยนี้พิจารณาเรื่องของความพอใจในคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของผู้ใช้บริการ โดยวัดจากความสามารถในการรองรับปริมาณงานเฉลี่ยจากผู้ใช้บริการ เนื่องจากเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายใช้โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบซีเอสเอ็มเอ/ซีเอ ซึ่งปริมาณงานของจุดเข้าถึงจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อ หรือสื่อสารผ่านจุดเข้าถึงนั้นและขึ้นอยู่กับช่องความถี่ที่ใช้งานในกลุ่มบริการพื้นฐานที่อยู่ข้างเคียง (neighbor BSSs) เนื่องจากเครื่องผู้ใช้ที่อยู่ในกลุ่มบริการพื้นฐานที่อยู่ข้างเคียงสามารถหน่วงการส่งข้อมูลของเครื่องผู้ใช้อื่นที่ส่งข้อมูลที่ช่องความถี่เดียวกันได้ ตามหลักการทำงานของโปรโตคอลการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบซีเอสเอ็มเอ/ซีเอ ดังนั้นในการจัดสรรช่องความถี่และการเลือกตำแหน่งติดตั้งสำหรับจุดเข้าถึงจะต้องลักษณะการกระจายตัวของผู้ใช้บริการภายในพื้นที่ของเครือข่ายด้วย

3.1.2 การพิจารณาคุณภาพของสัญญาณในพื้นที่ของเครือข่าย

ในการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายจำเป็นต้องพิจารณาคุณภาพของสัญญาณในแง่ของความแรงของสัญญาณและระดับของสัญญาณรบกวนในพื้นที่ของเครือข่ายเนื่องจาก ความสามารถในการรับส่งข้อมูล รวมถึงอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับคุณภาพของสัญญาณดังกล่าว วิธีการออกแบบเครือข่ายไร้สายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้พิจารณาคุณภาพของสัญญาณโดยมีวัตถุประสงค์ให้เครือข่ายที่ได้มีบริเวณที่สัญญาณครอบคลุมได้ทั่วถึงมากที่สุด การประเมินบริเวณที่สัญญาณครอบคลุมพิจารณาจากค่าความแรงของสัญญาณ (signal strength) ซึ่งคำนวณโดยใช้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณแบบ Partition dependent model [13] และ ค่าเอสไออาร์ หรืออัตราส่วนกำลังส่งต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Interference Ratio, SIR) โดยการกำหนดจุดทดสอบ (Signal Test Point STP) ซึ่งเป็นจุดที่จะทำการประเมินคุณภาพสัญญาณ ซึ่งถ้าได้ค่าสูงกว่าค่าขีดแบ่ง (threshold) ที่กำหนดไว้ก็แสดงว่าจุดนั้นสามารถรับสัญญาณได้ และสามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ระดับอัตราเร็วของการรับส่งข้อมูล ณ ระดับความแรงสัญญาณนั้นๆ

3.2 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้วิธีการแบบหลายวัตถุประสงค์

สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยสัญลักษณ์ประเภทเซท ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และตัวแปรอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการออกแบบซึ่งแบ่งเป็นตัวแปรค่าคงที่ (static parameters) และตัวแปรที่เปลี่ยนค่า (dynamic parameters)

ตัวแปรตัดสินใจเป็นตัวแปรที่จะบอกคำตอบสำหรับปัญหาการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย นั่นคือจะเป็นตัวแปรที่ให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจุดเข้าถึงที่จะใช้งานในเครือข่าย ซึ่งตัวแปรตัดสินใจสำหรับปัญหานี้ได้แก่ ตัวแปรแสดงระดับความแรงสัญญาณที่กำหนดให้จุดเข้าถึง ตัวแปรแสดงช่องความถี่ที่กำหนดให้จุดเข้าถึง ตัวแปรแสดงการเลือกตำแหน่งติดตั้งจุดเข้าถึง ตัวแปรแสดงการเชื่อมต่อของผู้ใช้บริการกับจุดเข้าถึง และตัวแปรแสดงการครอบคลุมของสัญญาณของจุดเข้าถึง

ตัวแปรค่าคงที่เป็นตัวแปรที่มีค่าตามมาตรฐาน ใช้กำหนดค่าขีดแบ่ง (threshold) ของความแรงสัญญาณ ค่าขีดแบ่งของเอสไออาร์ ค่าความจุของจุดเข้าถึง และกำหนดลักษณะการใช้งานของผู้ใช้บริการเครือข่าย (user traffic profiles) ส่วนตัวแปรที่เปลี่ยนค่าได้แก่ ระดับความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบ ระดับสัญญาณแทรกสอดที่จุดทดสอบ และค่าปริมาณงานเฉลี่ยที่ผู้ใช้บริการจะได้รับ ซึ่งตัวแปรที่เปลี่ยนค่านี้จะต้องทำการคำนวณค่าใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าของตัวแปรตัดสินใจในระหว่างกระบวนการออกแบบ

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์

	ตัวแปร	คำนิยาม
เซท	U	เซทของผู้ใช้บริการ
	G	เซทของจุดทดสอบสัญญาณ
	B	เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งจุดเข้าถึงได้
	P	เซตของระดับความแรงสัญญาณที่ใช้จัดสรรได้
	C	เซตของช่องความถี่ที่ใช้จัดสรรได้
	T	เซทของประเภทการให้บริการสื่อสารข้อมูล
	U_t	เซทของผู้ใช้บริการที่ใช้บริการสื่อสารข้อมูลประเภท t $\bigcup_{\forall t \in T} U_t = U$
ตัวแปรตัดสินใจ	p_j	ตัวแปรแสดงระดับความแรงสัญญาณที่กำหนดให้จุดเข้าถึง j
	c_j	ตัวแปรแสดงช่องความถี่ที่กำหนดให้จุดเข้าถึง j
	b_j	ตัวแปรไบนารีแสดงการเลือกตำแหน่งติดตั้งจุดเข้าถึง โดยที่ b_j มีค่า 1 ถ้าเลือกติดตั้งที่ตำแหน่ง j แต่ b_j มีค่า 0 ถ้าไม่เลือกติดตั้งที่ตำแหน่ง j
	u_{ij}^t	ตัวแปรไบนารีแสดงการเชื่อมต่อของผู้ใช้บริการ โดยที่ u_{ij}^t มีค่า 1 ถ้าผู้ใช้บริการ i เชื่อมต่อกับจุดเข้าถึง j แต่ u_{ij}^t มีค่า 0 ถ้าผู้ใช้บริการ i ไม่เชื่อมต่อกับจุดเข้าถึง j
	g_{hj}	ตัวแปรไบนารีแสดงการครอบคลุมของสัญญาณ โดยที่ g_{hj} มีค่า 1 ถ้าจุดทดสอบ h สามารถรับสัญญาณจากจุดเข้าถึง j ได้ แต่ g_{hj} มีค่า 0 ถ้าจุดทดสอบ h ไม่สามารถรับสัญญาณจากจุดเข้าถึง j ได้
ตัวแปรค่าคงที่	N	จำนวนจุดเข้าถึงทั้งหมดที่สามารถติดตั้งในบริเวณเครือข่ายได้
	R_t	ปริมาณงานของเครือข่ายที่ต้องการสำหรับการให้บริการสื่อสารประเภท t
	$P_{Rthreshold}$	กำหนดค่าขีดแบ่งของความแรงสัญญาณ (dBm)
	$SIR_{threshold}$	ค่าขีดแบ่งของเอสไออาร์ (dB)
	W	ค่าความจุของจุดเข้าถึง (bps)
ตัวแปรที่เปลี่ยนค่า	$P_{R_{ij}}(p_j, c_j, b_j)$	ความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบ i รับได้จากจุดเข้าถึง j ซึ่งใช้ความแรงสัญญาณ p_j และใช้ช่องความถี่ c_j
	$Intf_{ij}(p_j, c_j, b_j)$	ระดับสัญญาณแทรกสอดที่จุดทดสอบ i เมื่อพิจารณาการรับสัญญาณจากจุดเข้าถึง j ซึ่งใช้ความแรงสัญญาณ p_j และใช้ช่องความถี่ c_j
	r_i^t	ค่าปริมาณงานเฉลี่ยที่ผู้ใช้บริการ i ซึ่งใช้บริการสื่อสารข้อมูลประเภท t จะได้รับ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่.....
เลขทะเบียน.....245566.....
เลขเรียกหนังสือ.....

สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้วิธีการแบบหลายวัตถุประสงค์ประกอบด้วยสมการวัตถุประสงค์ (objective functions) และสมการเงื่อนไข (constraints) ดังต่อไปนี้

3.2.1 สมการวัตถุประสงค์

วิธีการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของเครือข่าย นั่นคือกำหนดค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดให้กับจุดเข้าถึงที่ใช้ในเครือข่ายเพื่อให้เครือข่ายมีคุณภาพการให้บริการสูงสุด ซึ่งวัดได้จากขนาดพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณมากที่สุด และความพอใช้ในคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของผู้ใช้บริการมากที่สุด วัตถุประสงค์ในการออกแบบดังกล่าวนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

1) ทำให้ขนาดพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณมากที่สุด (Maximize signal coverage availability)

สมการวัตถุประสงค์แรกนี้ (f_1) เป็นการวัดขนาดพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนจุดทดสอบที่มีระดับความแรงสัญญาณที่รับได้และค่าเอสไออาร์สูงกว่าค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้

$$Maximize \quad f_1 = \frac{\sum_{\forall h \in G} \sum_{\forall j \in A} g_{hj}}{|G|} \qquad (1)$$

2) ทำให้ความพอใจในคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของผู้ใช้บริการมากที่สุด (Maximize user satisfaction)

สมการวัตถุประสงค์ที่สอง (f_2) เป็นการวัดระดับความพึงพอใจของผู้ใช้บริการต่อคุณภาพการสื่อสารข้อมูลที่ได้รับผ่านการใช้งานเครือข่าย ระดับความพึงพอใจนี้คำนวณได้จากอัตราส่วนของจำนวนผู้ใช้บริการที่สามารถได้รับปริมาณงานมากกว่าค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้ โดยได้มีการใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก β_t สำหรับผู้ใช้บริการสื่อสารประเภท t ซึ่งค่า β_t เป็นสัดส่วนของปริมาณงานที่ต้องการสำหรับการบริการสื่อสารข้อมูลประเภท t ต่อค่าความจุของจุดเข้าถึง นั่นคือ $\beta_t = R_t / W$.

$$Maximize \quad f_2 = \frac{\sum_{\forall t \in T} \left(\beta_t \times \left(\sum_{\forall j \in A} \sum_{\forall i \in U_t} u_{ij}^t \right) \right)}{\sum_{\forall t \in T} \left(\beta_t \times |U_t| \right)} \qquad (2)$$

3.2.2 สมการเงื่อนไข

ข้อกำหนดต่างๆ ของการสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายได้ถูกแปลงเป็นสมการคณิตศาสตร์ ที่กำหนดเงื่อนไขการสื่อสารดังต่อไปนี้

$$\sum_{\forall j \in B} u_{ij}^{t} \leq 1, \forall i \in U \quad (3)$$

$$u_{ij}^{t}\left(P_{R_{ij}}\left(p_j, c_j, b_j\right) - P_{Rthreshold}\right) \geq 0, \forall i \in U, \forall j \in B \quad (4)$$

$$u_{ij}^{t}\left(P_{R_{ij}}\left(p_j, c_j, b_j\right) - Intf_{ij}\left(p_j, c_j, b_j\right) - SIR_{threshold}\right) \geq 0, \forall i \in U, \forall j \in B \quad (5)$$

$$u_{ij}^{t}\left(r_i^{t} - R_t\right) \geq 0, \forall i \in U, \forall j \in B \quad (6)$$

$$g_{hj}\left(P_{R_{hj}}\left(p_j, c_j, b_j\right) - P_{Rthreshold}\right) \geq 0, \forall h \in G, \forall j \in B \quad (7)$$

$$g_{hj}\left(P_{R_{hj}}\left(p_j, c_j, b_j\right) - Intf_{hj}\left(p_j, c_j, b_j\right) - SIR_{threshold}\right) \geq 0, \forall h \in G, \forall j \in B \quad (8)$$

$$u_{ij}^{t} \geq b_j, \forall i \in U, \forall j \in B \quad (9)$$

$$g_{hj} \geq b_j, \forall h \in G, \forall j \in B \quad (10)$$

$$\sum_{\forall j \in B} b_j \leq N \quad (11)$$

$$u_{ij}^{t} \in \{0,1\}, \forall i \in U, \forall j \in B \quad (12)$$

$$g_{hj} \in \{0,1\}, \forall h \in G, \forall j \in B \quad (13)$$

$$b_j \in \{0,1\}, \forall j \in B \quad (14)$$

เงื่อนไขที่ (3) กำหนดให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายเชื่อมต่อกับจุดเข้าถึงได้หนึ่งเครื่องเท่านั้น ซึ่งกำหนดด้วยตัวแปรตัดสินใจ u_{ij}^{t} เมื่อตัวแปรนี้มีค่าเป็น 1 หมายความว่า ผู้ใช้บริการ *i* ทำการเชื่อมต่อกับจุดเข้าถึงที่ตำแหน่ง *j* ซึ่งตัวแปรนี้จะมีค่าเป็น 1 ได้เมื่อค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้บริการ *i* รับได้จากจุดเข้าถึงที่ตำแหน่ง *j* ($P_{R_{ij}}$ in dBm) และค่าเอสไออาร์สัมพัทธ์กับจุดเข้าถึงที่ตำแหน่ง *j* (นั่นคือค่าความแรงสัญญาณ ($P_{R_{ij}}$ in dBm) ลบความแรงของสัญญาณแทรกสอด (*Intf*$_{ij}$ in dBm)) มีค่าไม่น้อยกว่าค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้ตามสมการเงื่อนไขที่ (4) และ (5) นอกจากนี้เมื่อตัวแปร u_{ij}^{t} มีค่าเป็น 1 เงื่อนไขที่ (6) จะต้องเป็นจริง นั่นคือปริมาณงานเฉลี่ยที่ผู้ใช้บริการ *i* จะได้รับจากการสื่อสารผ่านจุดเข้าถึงที่ตำแหน่ง *j* (r_i^{t}) จะต้องมากกว่าค่าปริมาณงานเฉลี่ยที่กำหนดไว้สำหรับผู้ใช้บริการสื่อสารประเภท *t* (R_t) ถ้าเงื่อนไขนี้ไม่เป็นจริงตัวแปร u_{ij}^{t} จะมีค่าเป็นศูนย์

เงื่อนไขที่ (7) และ (8) มีไว้สำหรับประเมินคุณภาพของสัญญาณที่ตำแหน่งจุดทดสอบ *h* ซึ่งเป็นการประเมินค่าความแรงสัญญาณและระดับเอสไออาร์ โดยตัวแปรตัดสินใจ g_{hj} จะมีค่าเป็น 1 ได้ถ้าค่าความแรงของสัญญาณที่จุดทดสอบ *h* รับได้จากจุดเข้าถึงที่ตำแหน่ง *j* ($P_{R_{hj}}$ in dBm) และค่าเอสไออาร์สัมพัทธ์กับจุดเข้าถึงที่ตำแหน่ง *j* (นั่นคือค่าความแรงสัญญาณ ($P_{R_{hj}}$ in dBm) ลบความแรงของสัญญาณแทรกสอด (*Intf*$_{hj}$ in dBm)) มีค่าไม่น้อยกว่าค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้ ถ้ามิฉะนั้นตัวแปร g_{hj} จะมีค่าเป็นศูนย์

เงื่อนไขที่ (9) และ (10) กำหนดว่า ถ้าผู้ใช้บริการ *i* และจุดทดสอบ *h* เชื่อมต่อกับจุดเข้าถึงที่ตำแหน่งที่ตำแหน่ง *j* แล้วจะต้องมีการติดตั้งจุดเข้าถึงที่ตำแหน่ง *j* นั่นคือตัวแปร b_j ซึ่งเป็นตัวแปรไบนารีแสดงการเลือกตำแหน่งติดตั้งจุดเข้าถึงจะต้องมีค่าเป็น 1 ส่วนเงื่อนไขที่ (11) กำหนดจำนวนจุดเข้าถึงที่มากที่สุดที่สามารถติดตั้งได้ในบริเวณที่ให้บริการเครือข่าย สำหรับเงื่อนไข (12) (13) และ (14) กำหนดว่าตัวแปร u_{ij}^{t}, g_{hj} และ b_j เป็นตัวแปรประเภทไบนารีมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

3.3 การแปลงสมการคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปของสมการสกาลาร์

สมการคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสกาลาร์ (Scalarizing function) [14] โดยใช้สมการสกาลาร์ที่มีตัวแปรถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$Maximize\ F = w_1 f_1 + w_2 f_2 \qquad (15)$$

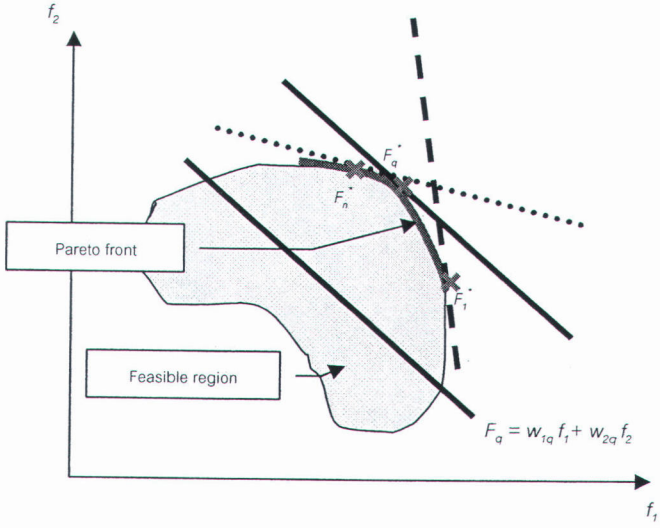
w_1 และ w_2 เป็นตัวแปรถ่วงน้ำหนักสำหรับสมการวัตถุประสงค์ (1) และ (2) โดยตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันคือ $w_1 + w_2 = 1$

ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสกาลาร์นั้น จุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าสูงสุด (maximization) คือจุดที่อยู่บนด้านหน้าพาเรโต (Pareto front) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 1 สมการสกาลาร์ F_q เป็นสมการที่ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักชุด q (w_{1q}, w_{2q}) และจุด F_q^* คือจุดที่เส้นตรงซึ่งกำหนดโดยสมการสกาลาร์ F_q สัมผัสกับเส้นขอบของ feasible region นั่นคือ F_q^* เป็นจุดที่อยู่บนด้านหน้าพาเรโต ซึ่งเป็นจุดที่ให้ค่าสูงที่สุดสำหรับสมการสกาลาร์ F_q

ในการประมาณค่าด้านหน้าพาเรโต (Pareto front approximation) นั้นสามารถทำได้โดยการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์หลายๆครั้ง โดยแต่ละครั้งใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่ต่างกัน ซึ่งการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละค่าจะนำไปสู่จุดสูงสุดที่ต่างกันบนด้านหน้าพาเรโต

กำหนดให้ Q เป็นจำนวนชุดของค่าถ่วงน้ำหนัก และ q เป็นดัชนีบอกลำดับชุดถ่วงน้ำหนัก ค่าต่างๆของตัวถ่วงน้ำหนักใน Q จะกระจายอย่างสม่ำเสมอระหว่างค่า 0 ถึง 1 ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับชุดถ่วงน้ำหนักที่ q (w_{1q}, w_{2q}) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$w_{1q} = (q-1)/(Q-1), \quad w_{2q} = 1 - w_{1q} \qquad (16)$$



รูปที่ 1 สมการสกาลาร์ที่มีตัวแปรถ่วงน้ำหนัก และด้านหน้าพาเรโต

4. แนวทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบศึกษาสำนึก (Heuristic Optimization Approach)

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้แนวทางแบบศึกษาสำนึก สำหรับการแก้ปัญหาการออกแบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ใช้สมการแบบหลายวัตถุประสงค์ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 แนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถหารูปแบบเครือข่ายที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งจุดเข้าถึง นอกจากนี้ยังกำหนดค่าความแรงสัญญาณ และช่องความถี่ที่เหมาะสมที่สุดให้กับจุดเข้าถึงด้วย

โครงสร้างการทำงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้แนวทางแบบศึกษาสำนึกประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization phase) และขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization phase)

4.1 ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization Phase)

ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดรูปแบบโครงข่ายเริ่มต้น โดยการเลือกค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆของจุดเข้าถึง ขั้นตอนนี้ใช้หลักการของการค้นหาค่าแบบโลภ (Greedy based search technique) ซึ่งจะเลือกค่าของตัวแปรที่ทำให้ค่าของสมการสกาลาร์ (15) มีค่าสูงที่สุด หลักการก็คือแต่ละรอบของการค้นหาคำตอบ (Iteration) จะทำการติดตั้งจุดเข้าถึงทีละเครื่อง จนกระทั่งติดตั้งจุดเข้าถึงครบจำนวนที่กำหนดไว้ ในแต่ละรอบนั้นก็จะทำการหาค่าของตัวแปรของจุดเข้าถึง (นั่นคือตำแหน่งที่ติดตั้ง ความแรงสัญญาณ และช่องความถี่) ซึ่งทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณสมการสกาลาร์ (15) มีค่าสูงที่สุด ขั้นตอนการหาคำตอบดังกล่าวสามารถอธิบายเป็นผังการทำงาน (Pseudo-Code) ดังนี้

Algorithm 1 Initialization algorithm

Input: Objective functions (*f1, f2*), weight coefficients w_1 and w_2
Number of base stations
Service area characteristics (# floors, size, wall materials)
Wireless user characteristics (user density, distribution, traffic profile)

Output: Initial network configuration specifying values of power level and frequency channel assigned to each base station

Step 1: Initialize parameters
$k = 1$ // place the first wireless base station (BS)
Step 2: while ($k \le N$) do // Find parameters location, power level and frequency channel for b_k
For all $j \in B$ do
Place BS k at location j temporarily
For all $p \in P$ do
Assign power level p to BS k
For all $c \in H$ do
Assign frequency channel h to BS k
Compute the scalarizing function with BS k installed at j using p and c
Record the obtained value as $F_k(j,p,c)$
Select the maximum $F_k(j,p,c)$
Assign the optimal parameters (j,p,c) to BS k permanently
k++// place the next BS
Step 3: Return the best solution found and stop

4.2 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Phase)

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดใช้แนวทางการค้นหาแบบทาบู (Tabu search techniques) ซึ่งเป็นแนวทางที่พัฒนาและนำเสนอครั้งแรกโดย Glover [15] หลักการเบื้องต้นของการค้นหาแบบทาบูคือการใช้โครงสร้างความจำ (Memory structures) เป็นแนวทางในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะทำให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการค้นหาแบบทาบูจะทำการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจากคำตอบใกล้เคียง (Neighborhood) ของคำตอบปัจจุบัน โดยในระหว่างการค้นหานั้นจะยอมให้เคลื่อนไปยังคำตอบที่แย่ลงได้เพื่อป้องกันการติดอยู่ที่คำตอบที่ดีที่สุดแบบท้องถิ่น (Local optima) นอกจากนี้การค้นหาแบบทาบูยังเพิ่มข้อจำกัดของคำตอบใกล้เคียงที่จะเคลื่อนไปได้ เพื่อป้องกันไม่ให้การค้นหาวนอยู่กับที่ โดยการใช้ข้อมูลจากโครงสร้างความจำของการค้นหาคำตอบที่ผ่านมาในการกำหนดข้อจำกัดดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนา knowledge-based move operators [16] ซึ่งเป็นระบบข้อมูลและโครงสร้างความจำที่ช่วยในการค้นหาคำตอบใกล้เคียงอย่างมีประสิทธิภาพ หลักการทำงานก็คือการใช้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพการให้บริการของเครือข่ายช่วยในการนำทางการค้นหาคำตอบของวิธีทาบู โดยการกำหนดตัวแปรที่มีความน่าจะเป็นในการที่จะทำให้สามารถปรับปรุงคุณภาพการให้บริการเครือข่ายได้

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนี้เริ่มต้นจากการประเมินคุณภาพเครือข่ายที่มีรูปแบบเครือข่ายตามที่หาได้จากขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization phase) การค้นหาแบบทาบูจะทำการกำหนดกลุ่มของคำตอบใกล้เคียงของคำตอบเริ่มต้น และเคลื่อนที่ไปยังคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มของคำตอบใกล้เคียงนั้นซึ่งไม่ติดข้อจำกัดใดๆ หลังจากนั้นก็จะทำการค้นหาในรอบต่อไปในลักษณะเดิม จนกระทั่งถึงจุดสิ้นสุดการค้นหาคำตอบตามที่ได้กำหนดไว้ ขั้นตอนการหาคำตอบดังกล่าวสามารถอธิบายเป็นผังการทำงาน (Pseudo-Code) ดังนี้

Algorithm 2 TS optimization algorithm

Input: Objective functions (*f1, f2*), weight coefficients w_1 and w_2
Number of base stations
Service area characteristics (# floors, size, wall materials)
Wireless user characteristics (user density, distribution, traffic profiles)
Initial network configuration

Output: Optimal network configuration (specifying base station parameters: locations, power levels, frequency channels)

Step 1: Set the current solution (s) = the initial network configuration
$i = 1$ // initialize the iteration number

Step 2: while ($i \le Max_iter$) do // Exploring the neighborhood
2.1: Generate neighborhood of s denoted as $N(s)$ according to the specified neighborhood structure and the knowledge-based move operators.
2.2: Determine the best solution in $N(s)$ while taking into account the tabu status and the aspiration criteria. The evaluation function is given by the scalarizing function in Eq. (15).
2.3: Determine the tabu tenure which is randomly generated from the interval $[t_{min}, t_{max}]$ with uniform distribution. Update tabu status.
2.4: Update s = the best solution in $N(s)$ and update the best-so far solution.
i++// do the next iteration

Step 3: Return the best solution found and stop