

การวิเคราะห์เงื่อนไขทางเทคนิคเพื่อคุ้มครองการรบกวนจากระบบโทรคมนาคม ที่มีต่อหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติ

The Analysis of Technical Conditions to Protect Thai National Radio Astronomy Observatory from Interference Caused by Telecommunication Systems

ธิรพีรพร ทองคำวิฑูรย์ และ ศุภณัฐ จุฑาเจริญวงศ์

สำนักบริหารคลื่นความถี่ สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

thirapiroon.t@nbt.go.th supanath.j@nbt.go.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเพื่อกำหนดเกณฑ์ทางเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อการคุ้มครองการรบกวนแก่อุปกรณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติ จากการรบกวนที่เกิดจากระบบโทรคมนาคมในพื้นที่ข้างเคียง โดยใช้การวิเคราะห์สมมูลลิงก์ (Link Budget) การจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) และการจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่ผ่านภูมิประเทศโดยใช้ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ผลการศึกษาช่วยให้เข้าใจเงื่อนไขเพื่อใช้ประกอบการพิจารณา กำหนดหลักเกณฑ์ทางเทคนิคเพื่อคุ้มครองการรบกวน เช่น ระยะเว้นการตั้งสถานี ผลของแนวป้องกันทางภูมิศาสตร์ โอกาสเกิดการรบกวนจากจำนวนของอุปกรณ์ที่ใช้งานเพิ่มขึ้นในพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งเงื่อนไขทางเทคนิคเหล่านี้ จะสนับสนุนการพัฒนากระบวนการเพื่อให้โครงสร้างพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์และโทรคมนาคมสามารถพัฒนาไปพร้อมกันอย่างสมดุลในประเทศไทย

คำสำคัญ: ดาราศาสตร์วิทยุ, การป้องกันการรบกวน, สมมูลลิงก์, การจำลองแบบมอนติคาร์โล, การจำลองภูมิประเทศ, นโยบายคลื่นความถี่

Abstract

This paper presents studies to determine technical conditions for the protection of the Thai National Radio Astronomy Observatory (TNRO) from interference caused by telecommunication systems. The approach investigates link budget analysis, Monte Carlo simulation, and terrain-aware propagation modeling using geographic data. The results provide insights to better understand technical conditions such as station separation distances, geographical shielding, and the probability of interference relative to the number of devices in nearby areas. These conditions will support the development of regulations that enable coexistence between scientific and telecommunication infrastructure, fostering balanced technological growth in Thailand.

Keywords: Radio astronomy, interference protection, link budget, Monte Carlo analysis, terrain modeling, spectrum policy

1. บทนำ

ดาราศาสตร์วิทยุ (Radio Astronomy) เป็นสาขาหนึ่งของดาราศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับวัตถุท้องฟ้าและปรากฏการณ์ธรรมชาติผ่านการตรวจจับและวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่วิทยุ โดยเฉพาะในช่วงความถี่เมกะเฮิรตซ์ (MHz) จนถึงหลายร้อยกิกะเฮิรตซ์ (GHz) ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาวิจัยดาราศาสตร์และสังเกตการณ์เทหวัตถุร่วมกับการศึกษาดาราศาสตร์เชิงแสง (Optical Astronomy) ผ่านการเก็บข้อมูล

และวิเคราะห์กิจกรรมในห้วงอวกาศจากแสงในย่านความถี่ที่ตามองเห็น (visible light) ทั้งนี้ ข้อมูลทางดาราศาสตร์วิทยุจะถูกเก็บจากอุปกรณ์ภาครับของหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุ (radioastronomy observatory) ซึ่งจะรับคลื่นวิทยุซึ่งมีระดับความแรงสัญญาณต่ำจากห้วงอวกาศก่อนนำไปขยายขนาดสัญญาณและประมวลผลต่อเพื่อแปลผลการสังเกตการณ์ ทั้งนี้การใช้งานดังกล่าวมีลักษณะพาสซีฟ (passive) หรือรับสัญญาณเพียงอย่างเดียว และมีความอ่อนไหวสูงต่อการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ปัจจุบัน สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สดร.) ได้ดำเนินโครงการพัฒนาเครือข่ายดาราศาสตร์วิทยุและวิทยุเอเซียในพื้นที่ของศูนย์การศึกษาการพัฒนาห้วยฮ่องไคร้อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยกล้องโทรทรรศน์วิทยุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เมตร และกล้องโทรทรรศน์วิทยุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เมตร เพื่อเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศไทย โดยได้สรุปการศึกษาและดำเนินโครงการเพื่อตั้งหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุ และสำรวจสภาพระดับการรบกวนทางคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Interference: RFI) เพื่อพิจารณาเลือกสถานที่ตั้งที่เหมาะสมไว้ในบทความ [1] และ [2] ตามลำดับ

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) มีการกีดตามกฎหมายในการคุ้มครองไม่ให้เกิดการรบกวนระหว่างการใช้คลื่นความถี่ในกิจการต่างๆ ซึ่งรวมถึงการรบกวนจากการใช้คลื่นความถี่เพื่อรองรับกิจกรรมทางโทรคมนาคมต่อหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุ งานวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาเพื่อประกอบการพิจารณา กำหนดหลักเกณฑ์ทางเทคนิค พารามิเตอร์ที่สำคัญ และแนวทางการใช้งานที่เกี่ยวข้องเพื่อให้การใช้คลื่นความถี่ในกิจการโทรคมนาคมในพื้นที่ใกล้เคียงไม่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อภาครับของหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุ ดังกล่าว

บทความนี้ แบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ โดยหัวข้อที่ 1 และ 2 นำเสนอบทนำและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อที่ 3 อธิบายถึงการวิเคราะห์การรบกวน ผลการจำลองและบทสรุปจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การให้การคุ้มครองให้กับการใช้งานในกิจการดาราศาสตร์วิทยุ (Radio Astronomy Service: RAS) จากการรบกวนที่เกิดจากระบบโทรคมนาคมในพื้นที่ใกล้เคียงเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับงานวิจัยและด้านการกำกับดูแลในระดับนานาชาติ ซึ่งหลักเกณฑ์ทางเทคนิคที่ถูกใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงระดับสากล สำหรับกำหนดกฎระเบียบในประเทศต่างๆ เพื่อให้การคุ้มครองการรบกวนที่มีแหล่งกำเนิดจากระบบโทรคมนาคมที่อยู่ในระดับส่งผลกระทบต่อการทำงานของหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุ ได้แก่ เอกสารข้อเสนอแนะ ITU-R Recommendation RA.769 [3] ของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) ซึ่งใช้

ประเมินความสามารถในการร่วมใช้คลื่นความถี่และเข้ากันได้ (sharing and compatibility) ระหว่างกิจการดาราศาสตร์วิทยุที่ใช้งานแบบพาสซีฟ (passive) และระบบโทรคมนาคมที่ใช้งานแบบแอคทีฟ (active) และ ITU-R Report RA.2332 [4] ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่น ขีดจำกัดกำลังส่ง และระยะเว้นใช้งานเพื่อป้องกันการรบกวน (separation distance) ระหว่างสถานีดาราศาสตร์วิทยุและสถานีฐานทางโทรคมนาคม ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (International Mobile Telecommunications: IMT) หรือ 4G/5G เพื่อให้การคุ้มครองการรบกวนให้กับการใช้งานทางดาราศาสตร์วิทยุ

งานวิจัย [5] ได้ศึกษาแนวทางบรรเทาการรบกวนจากคลื่นวิทยุ (Radio frequency Interference: RFI) โดยใช้วิธีการกำกับดูแล (regulatory approach) ประกอบกับกรรมวิธีการประมวลผลสัญญาณ เพื่อตัดเอาสัญญาณรบกวนออกจากภาครับในกิจการดาราศาสตร์วิทยุ ในขณะที่งานวิจัย [6] ได้ศึกษาวิธีการควบคุมกำลังส่งของสถานีฐานในระบบ 5G และจำกัดการแพร่แปลกปลอมนอกย่าน (out-of-band emission) เพื่อป้องกันการรบกวนดังกล่าว การศึกษาวิเคราะห์ผลของการรบกวนจากสถานีฐานภาคพื้นดินในระบบ 6G ที่มีต่อระบบตรวจจับสัญญาณแบบพาสซีฟในกิจการสำรวจพิภพผ่านดาวเทียมและระบบดาราศาสตร์วิทยุ ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ P. Testolina et al [7]

3. การวิเคราะห์การรบกวน

3.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 คลื่นความถี่

การตรวจรับสัญญาณด้วยกล้องโทรทรรศน์วิทยุมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อตรวจรับสัญญาณและข้อมูลที่ไม่สามารถตรวจรับได้จากการสังเกตการณ์โดยใช้แสงที่ตามนุษย์มองเห็น โดยสามารถตรวจจับสัญญาณจากวัตถุในอวกาศที่ปล่อยคลื่นวิทยุ เช่น แก๊สไฮโดรเจน พัลซาร์ หลุมดำ และกาแล็กซีที่อยู่ห่างไกล ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมี และวิวัฒนาการของเอกภพ ดังนั้น ในบริบทของการศึกษาทางดาราศาสตร์วิทยุจึงต้องการรับสัญญาณทุกช่วงความถี่ให้กว้างที่สุดที่จะเป็นไปได้ ในขณะที่เดียวกัน มนุษย์มีความจำเป็นต้องใช้คลื่นความถี่ในการสื่อสารโทรคมนาคมและการประยุกต์ใช้อื่นทางวิทยาศาสตร์ ประเทศสมาชิกของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) จึงร่วมกันกำหนดคลื่นความถี่สแกนตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่มีความสำคัญยิ่งยวดต่อการวิจัยทางดาราศาสตร์วิทยุ และกำหนดไว้ในข้อ RR. 5.340 ของข้อบังคับวิทยุระหว่างประเทศ (Radio Regulations) โดยห้ามระบบใดๆ ที่มนุษย์สร้างขึ้นแพร่คลื่นความถี่ในย่านต่อไปนี้ ตามตัวอย่างซึ่งแสดงในตารางที่ 1

เนื่องจาก ข้อบังคับวิทยุระหว่างประเทศถูกบังคับใช้ในระดับสากลโดยทั่วไป ส่งผลให้ไม่มีระบบโทรคมนาคมใดถูกออกแบบให้ใช้คลื่นความถี่สแกนดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ยังมีคลื่นความถี่อื่นที่สำคัญต่อการศึกษาดาราศาสตร์วิทยุ แต่ต้องร่วมใช้คลื่นความถี่ซ้อนทับกับกิจการอื่นที่สำคัญ โดยประเทศต่างๆ ต้องพิจารณาออกกฎระเบียบเพิ่มเติมสำหรับการใช้คลื่นความถี่ร่วมกัน (sharing and compatibility) ให้เข้ากับบริบทของตน เช่น กรณีในประเทศไทย ได้แก่ คลื่นความถี่ย่าน 1718.80 - 1722.20 MHz ที่ตรงกับคลื่นความถี่ที่ใช้สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่าน 1800 MHz นอกจากนี้ ถึงแม้จะมีการใช้งานคลื่นความถี่ตรงกับย่านที่กล้องโทรทรรศน์วิทยุได้รับการคุ้มครองโดยตรง แต่การรบกวนอาจเกิดขึ้นได้จากการใช้คลื่นความถี่ข้างเคียง (adjacent bands) และการแพร่ออกนอกย่านความถี่ใช้งานที่เกิดจากลักษณะทางเทคนิคของอุปกรณ์ภาคส่งที่ไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 1 ตัวอย่างรายการคลื่นความถี่ที่สงวนห้ามมิให้มีการแพร่คลื่นความถี่ตามข้อบังคับ RR. 5.340 ของข้อบังคับวิทยุระหว่างประเทศ

ย่านความถี่ (MHz / GHz)	รายละเอียด / การใช้งานทางดาราศาสตร์
1400-1427 MHz	เส้นไฮโดรเจน (Hydrogen line); สำคัญในการศึกษาแก๊สไฮโดรเจนในกาแล็กซีและเอกภพ
10.6-10.68 GHz	การรับสัญญาณต่อเนื่อง (continuum); ใช้ในการศึกษาอวกาศห้วงลึก (deep space)
23.6-24.0 GHz	ไอน้ำในชั้นบรรยากาศ; ใช้ในการศึกษาดาราศาสตร์และสภาพอากาศ
31.3-31.8 GHz	การวัดการแผ่รังสีต่อเนื่อง; สำคัญในการศึกษาชั้นไอโอโนสเฟียร์พื้นหลังของจักรวาล
86-92 GHz	การศึกษาค้นหามิลลิเมตร เช่น โมเลกุลคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
100-102 GHz	การวัดคลื่นสเปกตรัมละเอียด; ใช้ศึกษาคุณสมบัติของวัตถุท้องฟ้า
109.5-111.8 GHz	การสังเกตโมเลกุลในกลุ่มเมฆระหว่างดวงดาว
114.25-116 GHz	การศึกษารังสีจากฝุ่นและโมเลกุลในจักรวาล
148.5-151.5 GHz	การศึกษาดาราศาสตร์ความถี่สูง (submillimeter)
164-167 GHz	การแผ่รังสีจากฝุ่นและการเปลี่ยนระดับพลังงานของโมเลกุล
167-174.8 GHz	ใช้ในงานวิจัยด้านคลื่นต่อเนื่องและคลื่นสเปกตรัม
200-231.5 GHz	การศึกษาดาราศาสตร์ความถี่สูง (submillimeter)
250-252 GHz	การศึกษาวัตถุท้องฟ้าในระดับความถี่สูงมาก

3.1.2 ลักษณะทางเทคนิคของอุปกรณ์ภาคส่ง

ลักษณะทางเทคนิคและสภาพการใช้งานภาคส่งในอุปกรณ์โทรคมนาคม มีโอกาสก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนวิทยุ (RFI) ต่อภาครับดาราศาสตร์วิทยุที่มีความไวสูง และถูกออกแบบมาเพื่อรับสัญญาณจากอวกาศที่อ่อนมาก โดยปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้

- 1) กำลังส่ง (Transmit Power): อุปกรณ์ภาคส่งที่มีกำลังส่งสูงจะมีระยะครอบคลุมของการแพร่สัญญาณที่ไกล และเพิ่มโอกาสที่สัญญาณรบกวนในระดับที่เกินกำหนดต่อกล้องโทรทรรศน์วิทยุได้
- 2) การแพร่สัญญาณนอกย่านความถี่ (Out-of-Band Emissions – OOB): ระบบโทรคมนาคมไม่เพียงแต่แพร่สัญญาณในย่านความถี่ที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น แต่ยังแพร่ออกนอกย่านด้วย เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของวงจรกรองสัญญาณ (filter) ความไม่เชิงเส้นในวงจร หรือ การรั่วไหลของสเปกตรัมและฮาร์โมนิก (Spectral Leakage and Harmonics) การแพร่สัญญาณเหล่านี้อาจทับซ้อนกับย่านความถี่ที่สงวนไว้สำหรับดาราศาสตร์วิทยุ โดยเฉพาะเมื่อไม่มีแถบความถี่ป้องกัน (guard bands) มากเพียงพอ
- 3) ลักษณะทางเทคนิคอื่น เช่น เทคนิคการมอดูเลต (Modulation Techniques) ความต่อเนื่องหรืออัตราการใช้งานของอุปกรณ์ลูกข่าย ลักษณะและทิศทางของเสาอากาศ (Antenna Characteristics and Orientation) โดยเสาอากาศที่มีกำลังขยายสูงและชี้ไปยังกล้องโทรทรรศน์วิทยุ หรือตั้งอยู่บนที่สูง เช่น หอดูดาวหรือดาวเทียม สามารถก่อให้เกิดการรบกวนแบบทิศทางเข้มข้นได้

3.1.3 ลักษณะทางเทคนิคของอุปกรณ์ภาครับ

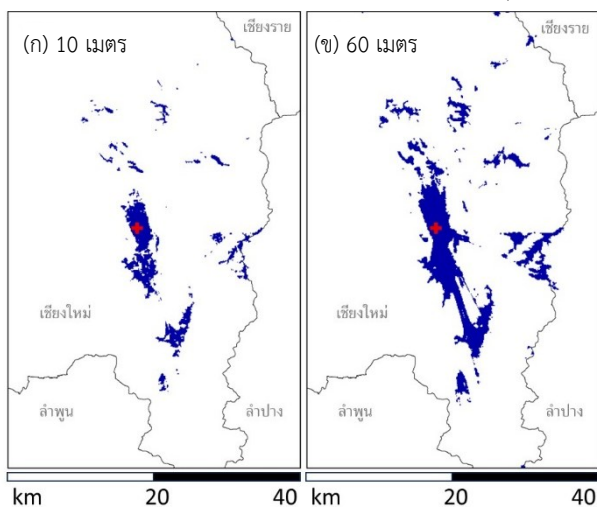
ลักษณะทางเทคนิคของอุปกรณ์ภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุมีบทบาทสำคัญต่อความไวต่อการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นความถี่วิทยุ (RFI) โดยตรง ระบบรับสัญญาณที่มีความไวสูงซึ่งจำเป็นสำหรับตรวจจับสัญญาณจักรวาลที่อ่อนมากจะมีโอกาสถูกรบกวนได้ง่ายแม้

สัญญาณรบกวนจะมีระดับต่ำตาม อุปกรณ์ภาครับที่มีช่วงไดนามิกกว้าง (High Dynamic Range) จะช่วยให้สามารถรับสัญญาณดาราศาสตร์ที่อ่อนมากควบคู่กับสัญญาณรบกวนที่แรงกว่าได้โดยไม่เกิดความเพี้ยนหรือการอ้อมตัวของกำลังขยาย (gain compression) ระบบที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง (High Linearity) และมีการติดตั้ง และใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier: LNA) จะทำให้มีความต้านทานในการป้องกันการรบกวนจากอินเตอร์มอดูเลชัน (intermodulation) ของสถานีฐานที่มีภาคส่งกำลังสูงส่งที่อยู่ใกล้เคียง ทั้งนี้ ลักษณะทางเทคนิคและสถานะปัจจุบันของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์ภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุ 40 เมตร ที่ติดตั้ง ณ หอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติ และสภาพการรบกวนในปัจจุบันมีรายละเอียดปรากฏตาม [8]

3.1.4 ลักษณะภูมิประเทศ

ลักษณะของภูมิประเทศมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการบรรเทาโอกาสของการรบกวน โดยเฉพาะลักษณะภูมิประเทศที่มีที่ตั้งอยู่ในหุบเขาหรือล้อมรอบด้วยเทือกเขา (Radio Shielded Basin) จะได้รับการลดทอนสัญญาณที่แพร่เข้ามาจากภายนอกโดยธรรมชาติ การอยู่ห่างจากแหล่งชุมชนหรือเมืองใหญ่จะช่วยลดโอกาสการรบกวนจากสัญญาณโทรทัศน์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เป็นพื้นที่โล่งที่ไม่มีตึกสูงหรือโครงสร้างโลหะช่วยลดการเกิดคลื่นสะท้อน (multipath interference) และควรเป็นบริเวณที่อากาศแห้งและความชื้นต่ำซึ่งจะช่วยลดขบวนการดูดกลืนคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า 10 GHz

สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ ได้เลือกที่ตั้งของหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุในพื้นที่ ของศูนย์การศึกษาการพัฒนาห้วยฮ่องไคร้อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ อยู่ห่างจากเมืองเชียงใหม่ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 30 กิโลเมตร และเป็นพื้นที่ในร่องเขาจึงมีปราการทางธรรมชาติช่วยป้องกันการรบกวนจากชุมชนภายนอกเขตสันเขา โดยรูปที่ 1 แสดงผลการจำลองขอบเขตพัสการมองเห็น (line of sight) ของอุปกรณ์ภาครับที่ติดตั้งในหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติ ณ ตำแหน่งความสูง 40 เมตร พบว่าหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติมีเทือกเขาเป็นปราการลดทอนการรบกวนที่มาจากทิศตะวันออกและทิศตะวันตกของตำแหน่งที่ตั้ง โดยขอบเขตดังกล่าวชี้ถึงขอบเขตตำแหน่งของสถานีฐานที่มีโอกาสก่อให้เกิดการรบกวนต่อกล้องดาราศาสตร์วิทยุได้



รูปที่ 1 ผลการจำลองขอบเขตพัสการมองเห็น (line of sight) ของอุปกรณ์ภาครับ (จุดสีแดง) ที่มีต่ออุปกรณ์ภาคส่งในพื้นที่โดยรอบ ณ ตำแหน่งความสูงสายอากาศของสถานีส่งที่ (ก) 10 เมตร และ (ข) 60 เมตร

3.2 หลักการวิเคราะห์การรบกวน

3.2.1 ระดับสัญญาณที่ก่อให้เกิดการรบกวน

การรบกวน คือ สภาพที่เกิดขึ้นสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ (unwanted signal หรือ interfering signal) ปรากฏและถูกรับเข้าไปในอุปกรณ์ภาครับ (victim receiver) ในระดับที่สูงเกินจนเป็นอุปสรรคทำให้ภาครับไม่สามารถรับ หรือแยกแยะสัญญาณที่ต้องการ (Wanted Received Signal) มาใช้ประโยชน์ได้ รูปที่ 2 แสดงแผนภาพเปรียบเทียบความรุนแรงตามระดับค่าเฉลี่ยสัญญาณการรบกวนภายใต้สัญญาณรบกวนพื้นฐาน (noise floor) ใน 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนจากระบบอื่น และระดับความเข้มของสัญญาณที่ต้องการ (Wanted Signal Strength) ซึ่งแทนด้วยตัวแปร C มีระดับสูงกว่า noise floor (แทนด้วยตัวแปร N) เป็นสัดส่วนที่สูงกว่าค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) ของอุปกรณ์ภาครับ อุปกรณ์ภาครับจะสามารถแยกแยะสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณ noise floor ได้

กรณีที่ 2 เมื่อมีสัญญาณรบกวนจากระบบอื่นเข้ามาแยกระดับ noise floor ให้สูงขึ้น (increased noise floor) เป็นค่า $N+I$ แต่ระดับดังกล่าวยังคงมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับระดับความเข้มของสัญญาณที่ต้องการ และค่าสัดส่วน $C/(N+I)$ ยังคงมีค่าสูงกว่าค่าระดับ SNR ของอุปกรณ์ภาครับ อุปกรณ์ภาครับจะสามารถแยกแยะสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณ noise floor ไปใช้ประโยชน์ได้

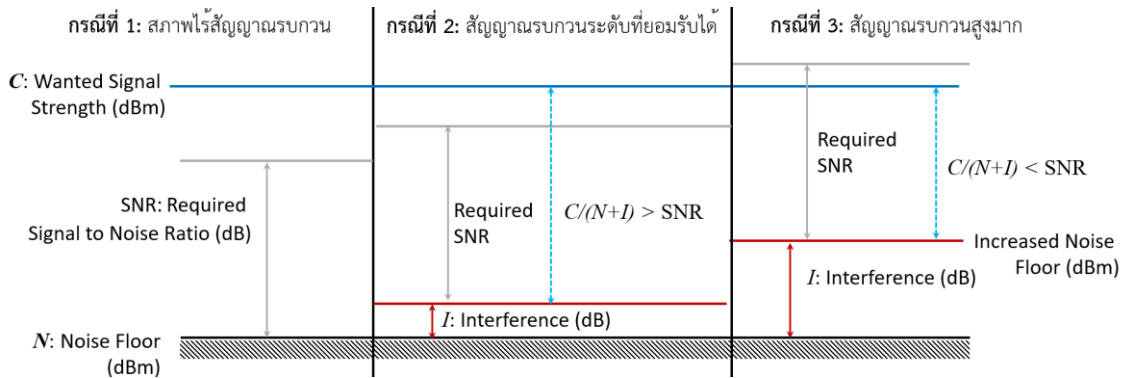
กรณีที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนจากระบบอื่นเข้ามาแยกระดับ noise floor ให้สูงขึ้นในระดับสูงจนเป็นอันตราย (harmful interference) โดยมีค่าสัดส่วน $C/(N+I)$ ต่ำกว่า ค่าระดับ SNR ของอุปกรณ์ภาครับ ทำให้ระดับสัญญาณรบกวนกลบสัญญาณที่ต้องการรับจนอุปกรณ์ภาครับไม่สามารถแยกแยะสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณรบกวนได้

ในกรณีของการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์วิทยุ สัญญาณที่ต้องการรับ (Wanted Signal) จะมีระดับความเข้มที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับระดับความเข้มของสัญญาณที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยมีระดับใกล้เคียงหรือในบางกรณีอาจต่ำกว่าระดับ noise floor ($C \approx N$) ดังนั้น อุปกรณ์ภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุจะต้องมีความสามารถแยกแยะสัญญาณที่มีค่า SNR ที่ต่ำมาก และต้องอาศัยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณ (signal processing) โดยการรวมสัญญาณตลอดช่วงระยะเวลาสังเกตการณ์ การกรองสัญญาณ การลบ noise floor ออกโดยใช้กระบวนการทางสถิติ เพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณที่รบกวนได้ ทั้งนี้ การคุ้มครองการรบกวนให้กับกิจการดาราศาสตร์วิทยุโดยการควบคุมระดับสัญญาณรบกวนให้มีระดับต่ำมากจึงมีความสำคัญ รวมถึง การควบคุมค่าจำกัดระดับสัญญาณที่ระบบโทรทัศน์ต่างๆ ที่แพร่ในคลื่นความถี่อื่นจะหลุดรั่ว (leak) ออกไปยังคลื่นความถี่กลุ่มดังกล่าวใน ITU-R Recommendation RA.769 [3]

ในการศึกษานี้ จะเลือกพิจารณาการรบกวนจากคลื่นความถี่ที่มีโอกาสก่อให้เกิดการรบกวนกับภาครับของกล้องดาราศาสตร์วิทยุ ได้มากที่สุดใน 2 กรณี คือ การใช้สถานีฐานในกิจการ IMT หรือระบบ 4G/5G ตามแผนความถี่ 1427-1517 MHz ในหัวข้อ 3.2.2 (adjacent band) และการรบกวนจากการส่งสัญญาณ uplink จากลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในคลื่นความถี่ 1800 MHz ในหัวข้อที่ 3.2.3 (in band)

3.2.2 การรบกวนจากสถานีฐานภาคส่ง

การคุ้มครองการรบกวนจากสถานีฐานภาคส่งในระบบโทรทัศน์ความถี่ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีกำลังส่งสูง ที่มีต่อกล้องดาราศาสตร์วิทยุ จะเน้นการควบคุม หรือ ประสานงานให้ระดับสัญญาณที่แพร่ภายนอก (Out of Band Emission) ที่แพร่ออกจากสถานีฐานในบริเวณข้างเคียง ให้มีระดับต่ำมาก



รูปที่ 2 แผนภาพเปรียบเทียบความรุนแรงของระดับสัญญาณการรบกวนภายใต้สัญญาณรบกวนพื้นฐาน (noise floor) ในกรณีที่ (ก) ปราศจากสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ (ข) สัญญาณรบกวนในระดับต่ำที่ยอมรับได้ (ค) สัญญาณรบกวนรุนแรงจนภาครับไม่สามารถรับสัญญาณได้

และไปปรากฏ ณ ตำแหน่งภาครับของกล้องดาราศาสตร์วิทยุไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ โดยใช้วิธีการ Link Budget ประมาณค่าระดับความเข้มสัญญาณของสถานีฐานโทรคมนาคม i ซึ่งแพร่ผ่านระยะทาง d ไปปรากฏที่ภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุมีค่าตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$I_i = P_{T,OOB,i} + G_T - L_F + G_R - L_d \quad (1)$$

โดย I_i คือ ค่าประมาณกำลังสัญญาณรบกวนของสถานีโทรคมนาคม i ที่ปรากฏ ณ ภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุ

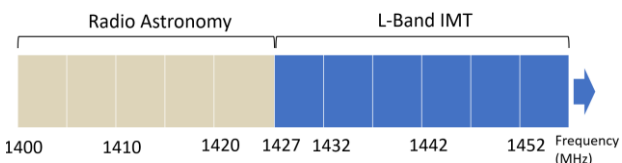
$P_{T,OOB,i}$ คือ ค่ากำลังส่งที่แพร่ออกนอกย่าน (Out of Band Emission) ของสถานีโทรคมนาคม i ที่ไปปรากฏในย่านความถี่ของอุปกรณ์ภาครับดาราศาสตร์วิทยุ

G_T คือ ค่าขยายสายอากาศของอุปกรณ์ภาคส่ง ที่ตรงกับ ความถี่ของอุปกรณ์ภาครับดาราศาสตร์วิทยุ

G_R คือ ค่าขยายสายอากาศของอุปกรณ์ภาครับในย่านความถี่ที่พิจารณา

L_d คือ ค่าการลดทอนจากการแพร่ผ่านระยะทาง d ของย่านความถี่ที่พิจารณา

เมื่อวิเคราะห์ แนวทางป้องกันการรบกวนเฉพาะกรณี ให้กับหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติจากการใช้งานตามแผนความถี่ IMT ย่าน 1427-1517 MHz ซึ่งถูกกำหนดให้นำมาจัดสรรในปี พ.ศ. 2568 และเป็นการใช้ช่องความถี่ในระยะประชิดกับย่านความถี่ 1400-1427 MHz ที่กล้องโทรทรรศน์วิทยุใช้งาน ตามแผนความถี่ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนความถี่ย่าน 1427-1517 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ประชิดการใช้งานภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุในย่านความถี่ 1400-1427 MHz

เมื่อพิจารณาจากขีดจำกัดกำลังสำหรับการให้การคุ้มครองการรบกวนต่อกิจการวิทยุดาราศาสตร์ตาม Recommendation ITU-R RA.769 [3] ค่ากำลังรบกวนที่ปรากฏตลอดย่านความถี่ 1400-1427 MHz ณ อุปกรณ์ภาครับ จะต้องไม่ต่ำกว่า -205 dBW ตามตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังส่งแพร่ออกอากาศนอกย่านมา รบกวนย่านความถี่ 1400-1427 MHz ของอุปกรณ์ภาคส่งที่แตกต่างกัน

จำนวน 4 กรณี โดยอุปกรณ์เป็นตามข้อบังคับสากล และมีการแพร่ไม่เกินที่กำหนดไว้ตาม Out of Band Emission และ Spurious Emission ของอุปกรณ์ Class A มาตรฐาน TS 36.104 ของ 3GPP [9] รายละเอียดเป็นไปตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับอุปกรณ์ภาครับในย่านความถี่ 1400-1427 MHz ตาม Recommendation ITU-R RA.769-2

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่กำหนด
Received frequency	MHz	1400-1427
Bandwidth	MHz	27
Protection Threshold Power ตาม ITU-R RA.769-2	dBW	-205

ตารางที่ 3 ค่าจำกัดกำลังส่งซึ่งแพร่ออกนอกย่านใช้งาน (Out-of-band Emission) ไปยังตลอดย่านความถี่ 1400-1427 MHz

กรณี	ลักษณะของอุปกรณ์ภาคส่ง	ค่าจำกัดกำลังส่ง (dBW)
1	Resolution ที่ 750 ของ Radio Regulations	-72
2	Class A มาตรฐาน TS 36.104 ใช้ช่องความถี่ 1427-1432 MHz	-22.24
3	อุปกรณ์ในกรณีที่ 2 ซึ่งใช้ช่องความถี่ 1437-1442 MHz (10 MHz Guard Band)	-28.69
4	อุปกรณ์ในกรณีที่ 2 ซึ่งติด Suppression Filter ค่า 55 dB/MHz ในช่วง 1400-1427 MHz	-77.40

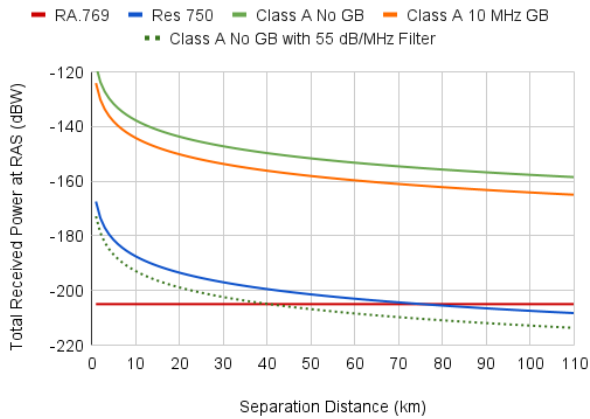
เมื่อนำค่าที่ประเมินได้ในตารางที่ 3 มาหาค่าระดับสัญญาณรบกวน I_i ต่อย่านความถี่ 1400-1427 MHz โดยการแทนค่าที่ได้ในตารางที่ 3 ลงใน $P_{T,OOB,i}$ ในสมการที่ (1) โดยมีสมมติฐานว่าการสูญเสียต่างๆ (loss) ได้ถูกรวมในค่าจำกัดดังกล่าวแล้ว ประกอบกับลดทอนจากการแพร่ผ่าน L_d โดยใช้ Free Space Path Loss Model ตามสมการที่ (2)

$$L_d = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44 \quad (2)$$

โดย d คือ ค่าระยะทางระหว่างสถานีภาคส่งและสถานีภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุ

f คือ ค่าความถี่กลางที่ไปแพร่รบกวนต่อย่านความถี่ 1400-1427 MHz ซึ่งกำหนดค่าเท่ากับ 1413.5 MHz

จะได้การเปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวนที่ลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น สำหรับอุปกรณ์ทั้ง 4 กรณี ของตารางที่ 3 ปรากฏตามกราฟในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระดับสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ภาคส่งของสถานี IMT ใน 4 กรณี ตามขีดจำกัดกำลังที่แพร่ออกนอกย่านของอุปกรณ์ตามตารางที่ 3 และมารบกวนภาครับในย่านความถี่ 1400-1427 MHz

เมื่อพิจารณาผลตามทฤษฎีในรูปที่ 4 โดยเปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ภาคส่งที่แตกต่างกันทั้ง 4 กรณีที่แพร่แบบ Free Space Path Loss พร้อมกับค่าพารามิเตอร์ที่จำกัดระดับสัญญาณที่ภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุที่ค่า -205 dBW/27 MHz (เส้นทึบสีแดง) ตามตารางที่ 2 พบว่า หากอุปกรณ์ภาคส่งมีลักษณะทางเทคนิคเป็นไปตาม Resolution ที่ 750 ของข้อบังคับวิทยุระหว่างประเทศ (เส้นทึบสีน้ำเงิน) จะต้องใช้ระยะเว้นใช้งานเพื่อป้องกันการรบกวน (separation distance) เท่ากับ 75.4 กิโลเมตร เพื่อลดทอนระดับสัญญาณให้อยู่ในระดับที่ต้องการ

ในกรณีค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่ออกแบบในลักษณะ Class A ในมาตรฐาน TS 36.104 ของ 3GPP ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบรับรองให้ใช้งานทั่วไปในประเทศไทย ทั้งในกรณีที่ไม่มีและไม่มีแถบความถี่ป้องกัน (guard band) 10 MHz พบว่าจากการคำนวณเชิงเลข ต้องใช้ระยะทางมากกว่า 1000 กิโลเมตรเพื่อลดทอนสัญญาณดังกล่าว ซึ่งเป็นระยะทางที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ จึงจำเป็นต้องพิจารณามาตรการทางเทคนิคอื่นเพิ่มเติมเพื่อคุ้มครองการรบกวนดังกล่าว โดยจากการคำนวณหากมีการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ (filter) ที่ค่าลดทอน -55 dB ในอุปกรณ์ภาคส่งตลอดความถี่ 1400-1427 MHz ใน ภาคสถานีฐาน (sector) จะสามารถลดระยะเว้นใช้งานเพื่อป้องกันการรบกวนลงมาเหลือ 40.5 กิโลเมตร ทั้งนี้ หัวข้อที่ 4.1 นำเสนอการจำลองเชิงเลขที่สมจริงขึ้นโดยใช้ข้อมูลลักษณะของภูมิประเทศประกอบข้อมูลสถานีฐานโดยละเอียด

3.2.3 การรบกวนจากอุปกรณ์ลูกข่าย

โดยทั่วไป อุปกรณ์ลูกข่ายถือเป็นอุปกรณ์ที่มีกำลังส่งต่ำมากเมื่อเทียบกับสถานีฐาน โดยมาตรฐาน 3GPP TS 36.101 และ 3GPP TS 38.101-1 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ลูกข่ายในระบบ 4G และ 5G ตามลำดับได้กำหนดขีดจำกัดกำลังส่งให้กับอุปกรณ์ลูกข่ายมาตรฐานไว้เท่ากันที่ไม่เกิน 23 dBm หรือ 200 mW e.i.r.p. และกำลังส่งดังกล่าวจะมีค่าต่ำลงมากหากวัด ณ ความถี่ที่อยู่นอกจากย่านความถี่ใช้งาน อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ลูกข่ายสามารถก่อให้เกิดการรบกวนต่อกล้องโทรทรรศน์วิทยุได้ หากมีการใช้งานอุปกรณ์ลูกข่ายจำนวนมากพร้อมกันใกล้พื้นที่ตั้งของหอสังเกตการณ์ฯ ในลักษณะกำลังรับรวม (aggregated received power) และอาจไม่สามารถวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกับสถานีในหัวข้อ ที่ 3.2.2 ได้ จึงมีความเหมาะสมที่จะต้องใช้วิธีการแบบ Monte Carlo Analysis [10] ซึ่งเป็นเทคนิคการจำลองทางสถิติที่ใช้สุ่มค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซ้ำหลายพันครั้งเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ภายใต้รูปแบบการแพร่

สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงและไม่แน่นอนผ่านการจำลองสุ่มตำแหน่งของเครื่องลูกข่าย และค่าทางเทคนิค เช่น กำลังส่ง การลดทอนสัญญาณที่แตกต่างกัน เพื่อประกอบการจำลองค่าสถิติของการแพร่กระจายคลื่นในการคำนวณระดับสัญญาณ โดยการจำลองจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4.2

4. ผลการจำลอง

4.1 การถูกรบกวนจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในหัวข้อที่ 3.2.2 จึงนำหลักการดังกล่าวประกอบการจำลองเชิงเลขผ่านโปรแกรม PROGIRA โดยใช้ข้อมูลลักษณะของภูมิประเทศ ตำแหน่งที่ตั้งจริงของหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติ และข้อมูลอุปกรณ์ของภาคส่งที่เป็นไปตามมาตรฐานอุปกรณ์ Class A ที่ใช้ในกระบวนการตรวจสอบรับรองทางเทคนิคเป็นตัวแทนของอุปกรณ์ที่จะถูกติดตั้งในอนาคต ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์ ตามรายละเอียดที่ปรากฏในตารางที่ 4 ได้ผลการจำลองในรูปที่ 5 ซึ่งชี้ว่าระยะห่าง 20 กิโลเมตรสามารถลดทอนสัญญาณและใช้ป้องกันการรบกวนที่เกิดจากการแพร่รบกวนของสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่าน 1427-1432 MHz ได้ โดยระยะทางดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าผลการจำลองแบบ Free Space Path Loss ในทุกกรณีของผลการจำลองในรูปที่ 4 ซึ่งชี้ว่าที่ตั้งในภูมิประเทศที่เหมาะสมเป็นปัจจัยประกอบที่สำคัญซึ่งช่วยคุ้มครองการรบกวนและช่วยให้การจำกัดเงื่อนไขที่เข้มงวดต่อระบบโทรคมนาคมสามารถยืดหยุ่นลงได้

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับอุปกรณ์ภาคส่งสำหรับการจำลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่กำหนด
Downlink frequency	MHz	1427-1432
Bandwidth	MHz	5
Deployment Mode	-	Rural
Transmitter power	dBm	43
Spurious Emission (Class A, TS 36.104)	dBm/MHz	-13
Antenna gain	dBi	18
Antenna height	m	30

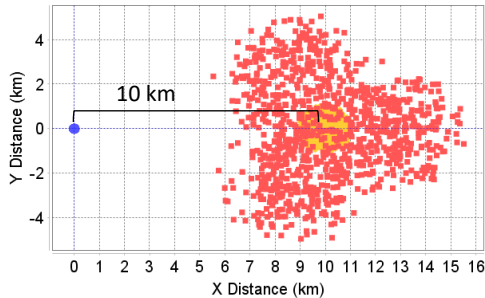


รูปที่ 5 ผลการจำลองขอบเขตของการแพร่สัญญาณระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่าน 1427-1432 MHz ไปยังความถี่ 1400-1427 MHz ในระยะที่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุได้ ผ่านโปรแกรม PROGIRA

4.2 การถูกรบกวนจากลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

เมื่อใช้วิธีการจำลองแบบแบบ Monte Carlo Analysis โดยใช้โปรแกรม SEAMCAT เพื่อคำนวณหาระยะห่างและจำนวนเครื่องลูกข่ายที่เหมาะสมที่จะไม่ก่อให้เกิดการรบกวน โดยเลือกพิจารณาคลื่นความถี่ที่มีความเสี่ยงที่สุดต่อการใช้งานโดยสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ คือ คลื่นความถี่ย่าน 1715-1725 MHz ซึ่งใช้งานในลักษณะ Uplink ของอุปกรณ์ลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ และส่งคลื่นรบกวนภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุที่มีทิศทางสายอากาศขนานขอบฟ้า (towards the

horizon) ความสูงสายอากาศ 40 เมตร ในคลื่นความถี่ 1718.80 - 1722.20 MHz ในลักษณะการรบกวนแบบความถี่ย่านเดียวกัน (in-band) และอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายเป็นไปตามมาตรฐาน 3GPP TS 36.101 จำนวน 20,000 ครั้งต่อเนื่องกันได้ผลการจำลองการกระจายของตำแหน่งลูกข่ายและความสูงของลูกข่ายจากพื้นตามการกระจายตัวแบบ Gaussian ได้ผลในรูปที่ 6 และมีโอกาสเกิดการรบกวน (ร้อยละ) เป็นไปตามตารางที่ 5



รูปที่ 6 ผลการจำลอง Monte Carlo Analysis ผ่านโปรแกรม SEAMCAT ของอุปกรณ์ลูกข่ายตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.2

ตารางที่ 5 โอกาสเกิดการรบกวนต่อภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุในคลื่นความถี่ 1718.80 - 1722.20 MHz โดยอุปกรณ์ลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ความถี่ตรงกัน ตามค่าจำนวนเครื่องลูกข่ายและระยะห่างระหว่างลูกข่ายและที่ตั้งกล้องดาราศาสตร์วิทยุ

จำนวนเครื่องลูกข่าย	ระยะห่าง (กิโลเมตร)			
	10	30	40	50
1	91.54	64.04	39.76	9.075
10	99.25	88.99	69.72	20.91
20	99.98	99.64	97.00	60.64

จากผลการจำลองในตารางที่ 5 พบว่าการรบกวนจากการใช้คลื่นความถี่ตรงกับย่านความถี่ที่ภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุใช้งาน (in-band interference) มีความรุนแรงสูงในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีแนวป้องกันทางภูมิศาสตร์ แม้มีการใช้งานจำนวนลูกข่ายเพียง 1 เครื่องเท่านั้น และจำเป็นต้องใช้ระยะห่างมากกว่า 30 กิโลเมตร เพื่อป้องกันการรบกวน โดยเมื่อมีจำนวนเครื่องลูกข่าย 20 เครื่อง ระยะห่าง 50 กิโลเมตรยังไม่เพียงพอที่จะลดการรบกวนลงให้น้อยกว่าร้อยละ 50 ได้ ซึ่งชี้ว่าการกำหนดเกณฑ์ข้อจำกัดจำนวนลูกข่ายของผู้ใช้งานรอบพื้นที่ตั้งกล้องโทรทรรศน์วิทยุสามารถบังคับใช้ได้ยากในทางปฏิบัติ

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้วิเคราะห์เงื่อนไขทางเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อให้การคุ้มครองการรบกวนแก่อสังเกตรณดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติ โดยได้วิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และไม่ผลการรบกวนของระบบโทรคมนาคมต่อดาราศาสตร์วิทยุ โดยใช้การวิเคราะห์สมมูลลิงก์ และ Monte Carlo Analysis โดยเลือกพิจารณาวิเคราะห์ในรายละเอียดใน 2 กรณี คือ 1) การแพร่กระจายของการใช้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่าน 1427-1517 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ประชิดย่านความถี่ 1400-1427 MHz ซึ่งเป็นย่านสำคัญของการใช้งานภาครับของกล้องโทรทรรศน์วิทยุ และ 2) สัญญาณรบกวนจากเครื่องลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่าน 1800 MHz ซึ่งถึงแม้จะมีกำลังส่งต่ำกว่าสถานีฐาน แต่การรบกวนมีความรุนแรงกว่าเนื่องจากการใช้คลื่นความถี่ซ้อนทับ (in-band interference) กับการใช้งานในระบบดาราศาสตร์วิทยุ

ในทั้งสองกรณีพบว่า มีความจำเป็นต้องกำหนดระยะห่างเพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างการใช้งานระหว่างระบบโทรคมนาคมและกล้องดาราศาสตร์วิทยุ ซึ่งเมื่อนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องและผลลัพธ์ที่แตกต่างในหลายกรณีมาประกอบการพิจารณา และใช้ประโยชน์จากแนวป้องกันทางภูมิศาสตร์ที่เป็นเทือกเขาโดยรอบ ตามระยะพิสัยมีโอกาสได้รับการรบกวนในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นย่านที่สำคัญที่สุด จึงเห็นควรกำหนดระยะห่างอย่างน้อย 20 กิโลเมตร สำหรับทุกย่านความถี่ โดยคำนึงถึงสมมูลของการให้การคุ้มครองการรบกวนต่อระบบดาราศาสตร์วิทยุและผลกระทบต่อผู้ใช้งานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ไม่ให้เกินสมควร ซึ่งสำนักงาน กสทช. จะใช้ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ประกอบการพิจารณากับปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น เพื่อกำหนดมาตรการคุ้มครองที่เกี่ยวข้องให้กับหอสังเกตการณ์ดาราศาสตร์วิทยุแห่งชาติต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์การรบกวนที่เกิดขึ้นจากสถานีฐานโทรคมนาคมหลายสถานี และจากการใช้งานเทคโนโลยีใหม่ที่มีความถี่ซ้อนทับกับความถี่ที่ต้องให้การคุ้มครองต่อระบบดาราศาสตร์วิทยุ โดยเฉพาะการรบกวนจากอวกาศสุญญากาศโดยดาวเทียมแบบ Low Earth Orbits ที่กำลังถูกพัฒนาให้ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sugiyama et. al, "Thai National Radio Astronomy Observatory Project and a future South-East Asian VLBI Network," Journal of Physics Conference Series, June, 2024
- [2] P. Jaroenjitichai et al., "Radio Frequency Interference Site Survey for Thai Radio Telescopes", Siam Physics Congress, 2017
- [3] ITU, "ITU-R Recommendation RA.769 - Protection criteria used for radio astronomical measurements", 2003.
- [4] ITU, "ITU-R Report RA.2332- Compatibility and sharing studies between the radio astronomy service and IMT systems", 2014
- [5] J. M. Ford and K. D. Buch, "RFI mitigation techniques in radio astronomy," in Proc. IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), 2014, pp. 4976-4979
- [6] N. Jai et. Al, "Out-of-Band Interference Management to Protect Radio Astronomy", IEEE Military Communications Conference (MILCOM), 2024, pp. 1150-1155
- [7] P. Testolina et al., "Modeling Interference for the Coexistence of 6G Networks and Passive Sensing Systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, August 2024
- [8] สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), <https://indico.narit.or.th/event/218/page/840-status-report>
- [9] ETSI, TS 136 104 – LTE; E-UTRA; BS radio transmission and reception, 2018
- [10] The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, ECC Report 252 – SEAMCAT Handbook Edition 2, 2016



ดร.พิรุฬห์ ทองคำวิฑูรย์ จบการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขา Electrical and Electronic Engineering จาก Imperial College London ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมคลื่นความถี่ สำนักงาน กสทช. มีความสนใจด้าน Signal Processing และการพัฒนา AI



ศุภณัฐ จุฑาเจริญวงศ์ จบการศึกษาระดับปริญญาโทสาขา Electrical Engineering จาก Stanford University ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรปฏิบัติการระดับสูง สำนักงาน กสทช. มีความสนใจด้าน Spectrum Management และการใช้คลื่นความถี่สำหรับการวิจัยและพัฒนาทางวิทยาศาสตร์