



โครงการศึกษาวิจัยเพื่อเสนอแนะนโยบาย

สาธารณะด้านการบริหารคลื่นความถี่สำหรับกรณีการใช้
คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล
เทคโนโลยี 5G และ กิจการอื่นในย่านความถี่ 3500 เมกะเฮิรตซ์
และ 28 กิกะเฮิรตซ์

โครงการศึกษาวิจัยเพื่อเสนอแนะนโยบายสาธารณะด้านการบริหารคลื่นความถี่สำหรับการใช้คลื่น
ความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G และ กิจการอื่นในย่านความถี่
3500 เมกะเฮิรตซ์ และ 28 กิกะเฮิรตซ์

คณะวิจัย

1.	รศ. ดร.วิทวัส สิมฐกุล	หัวหน้าโครงการ
2.	ดร. พิสิฐ วนิชชานันท์	นักวิจัย
3.	ดร. สิทธิชัย เด่นตรี	นักวิจัย
4.	ผศ. ดร.วิทยากร อัครวิเศษ	นักวิจัย
5.	ผศ. ดร. ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี	นักวิจัย
6.	นายธีรพงษ์ ประทุมศิริ	นักวิจัย
7.	ดร. ศรีญญา ปะสะกวี	นักวิจัย
8.	รศ.ดร.ชานนท์ วรिसาร	นักวิจัย

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

สารบัญ

1	บทคัดย่อ.....	4
2	Abstract	5
3	มาตรฐานและวิธีการทดสอบคลื่นความถี่ย่าน 3500 MHz	6
3.1	การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor).....	6
3.1.1	อุปกรณ์ในการทดสอบ	7
3.1.2	สถานที่ทดสอบ	13
3.1.3	ผู้เข้าร่วมทดสอบ	14
3.1.4	วิธีการทดสอบ.....	14
3.1.5	สมมติฐานในการทำสอบ	19
3.1.6	ข้อจำกัดในการทดสอบ	19
3.1.7	ผลการทดสอบ	20
3.1.8	สรุปผลการทดสอบ	30
3.2	การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร (Outdoor).....	31
3.2.1	อุปกรณ์ในการทดสอบ	31
3.2.2	สถานที่ทดสอบ	36
3.2.3	ผู้เข้าร่วมทดสอบ	37
3.2.4	วิธีการทดสอบ.....	37
3.2.5	สมมติฐานในการทำสอบ	56
3.2.6	ข้อจำกัดในการทดสอบ	56
3.2.7	ผลการทดสอบ	57
4	ผลการศึกษาเพิ่มเติม	81
4.1	ผลการศึกษากรณีใช้งานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.8 เมตรไม่ได้หันเข้าหากันโดยตรง	81
4.2	กิจการสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก (Very Small Aperture Terminal)	91
4.3	การจำลองเพื่อหาระยะห่างป้องกันสำหรับการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศน์ดาวเทียมในกรณีที่ใช้หัว LNB ที่ไม่มี 5G Filter.....	98
4.3.1	การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Planet.....	100
4.3.2	ผลการจำลอง.....	104
4.3.3	การนำตารางไปใช้งาน.....	106
4.4	การจำลองเพื่อหาระยะห่างป้องกันสำหรับการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศน์ดาวเทียมในกรณีการติดตั้งสถานีฐานในพื้นที่ชนบท (Rural Area).....	113
4.5	การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจ	115

4.6	ผลการศึกษาการรบกวนสัญญาณจากระบบ 5G ต่อเครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุของอากาศยาน	116
4.6.1	ข้อกังวลและคำเตือนโดย ICAO	116
4.6.2	เครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุ	116
4.6.3	ลักษณะการรบกวนสัญญาณ RA.....	119
4.6.4	ตัวอย่างผลการศึกษาในสหรัฐอเมริกา	123
4.6.5	ตัวอย่างแนวทางการกำกับดูแลในต่างประเทศ	128
4.6.6	ข้อเสนอแนะแนวทางการกำกับดูแลสำหรับประเทศไทย	129
4.6.7	ข้อคิดเห็นของผู้ใช้งาน.....	130
4.7	ผลของทิศทางสถานีฐาน.....	131
5	สรุปผลการดำเนินงานโครงการ.....	136
5.1	ข้อสรุปคุณสมบัติทางเทคนิค	136
5.1.1	การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor) ย่าน 3500 MHz.....	136
5.1.2	การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร (Outdoor) ย่าน 3500 MHz	137
5.2	ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย ปัญหา อุปสรรค หรือข้อเสนอแนะอื่นๆ	138
5.2.1	ข้อเสนอแนะสำหรับการกำกับดูแลใช้งานคลื่นความถี่ในย่าน 3500 MHz ระหว่างการสื่อสารเคลื่อนที่ 5G และกิจการอื่น	138
5.2.2	รายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคขั้นต่ำของหัวรับ LNB ที่พึงประสงค์.....	141
5.3	มาตรการบรรเทาการรบกวน และเงื่อนไขในการใช้คลื่นความถี่ร่วมกัน	142
6	บรรณานุกรม	143

1 บทคัดย่อ

โครงการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ คือ 1) เพื่อเสนอแนะนโยบายสาธารณะด้านการบริหารคลื่นความถี่การใช้คลื่นความถี่ย่าน 3500 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 28 กิกะเฮิร์ตซ์ รวมทั้งคุณสมบัติทางเทคนิคในการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (IMT) เทคโนโลยี 5G และกิจการอื่นในย่านความถี่ 3500 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 28 กิกะเฮิร์ตซ์ และ 2) เพื่อสร้างกลไกการมีส่วนร่วมของภาคส่วนที่เกี่ยวข้องต่อการกำหนดนโยบายด้านการบริหารคลื่นความถี่ของประเทศเพื่อประโยชน์สาธารณะอย่างแท้จริง โดยมีขอบเขตการดำเนินงาน ได้แก่ 1) การศึกษา รวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลหรืองานวิจัยหรือแนวทางการกำกับดูแลเกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่ร่วมกัน ในต่างประเทศอย่างน้อย 2 ประเทศ 2) การศึกษาเพื่อกำหนดคุณสมบัติทางเทคนิคการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการโทรคมนาคม เคลื่อนที่สากล (IMT) เทคโนโลยี 5G และกิจการอื่นในย่านความถี่ 3500 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 28 กิกะเฮิร์ตซ์ ในประเทศไทย ซึ่งรวมถึงการตรวจสอบการรบกวนในสถานการณ์ที่กำหนด พร้อมทั้งการหามาตรการบรรเทาการ รบกวน และเงื่อนไขในการใช้คลื่นความถี่ร่วมกัน 3) จัดให้มีการทดลองภาคสนาม (Field Trial) โดยทดสอบตามสถานการณ์ (Scenario) ที่ได้เสนอผ่านการวิเคราะห์เบื้องต้น 4) จัดทำคุณสมบัติทางเทคนิค ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย ปัญหา อุปสรรค หรือข้อเสนอแนะอื่นๆ ที่ได้จากการทดลองภาคสนาม และ 5) เผยแพร่ผลการศึกษาให้หน่วยงานของรัฐ ภาคประชาสังคม และประชาชนทั่วไปรับทราบ อย่างน้อย 3 ช่องทาง ทั้งนี้ ผลสรุปการดำเนินโครงการมีข้อสรุปคุณสมบัติทางเทคนิคดังนี้ ในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor) ย่าน 3500 MHz พบว่า กรณีที่ $LNB = 3400$ ถึง 4200 MHz ค่ากำลังส่งที่หน้าสถานีฐาน จะมีสัญญาณที่ -45 dBm/Hz ในขณะที่ค่ากำลังส่งสถานีฐานด้านล่างอาคารที่ระยะ 25 เมตร สัญญาณถูกลดทอนลงไปเหลือที่ -120.28 dB/Hz และสัญญาณ (Channel Power) ที่วัดหน้าจานรับดาวเทียมมีขนาดน้อยกว่า -110 dBm/Hz นอกจากนี้ ในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร (Outdoor) ย่าน 3500 MHz จากการสังเกตภาพด้วยสายตา (ไม่มี Macro blocking , Blackout, Freeze และ Audio Silence) พบว่า ในกรณีทดสอบที่ 1 : $LNB = 3400$ ถึง 4200 MHz จะไม่สามารถหาความถี่ป้องกันได้ และระยะทางสั้นที่สามารถใช้งานได้อาจมากกว่า 280 เมตร¹ และในกรณีทดสอบที่ 2 : $LNB, LNB_F^2, BPF = 3700$ ถึง 4200 MHz ความถี่ป้องกันมีค่าน้อยกว่า 100 เมกะเฮิร์ตซ์ และระยะทางสั้นที่สามารถใช้งานได้คือ 130 ในส่วนของการจำลองคลื่นความถี่ย่าน 28 GHz ได้มีการจำลอง 1) กรณีใช้คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างสถานีดาวเทียมไม่เคลื่อนที่และระบบ 5G 2) กรณีใช้คลื่นความถี่ข้างเคียงกันระหว่างสถานีดาวเทียมไม่เคลื่อนที่และระบบ 5G 3) กรณีใช้คลื่นความถี่ข้างเคียงกันระหว่าง A-ESIM และ 4) กรณีใช้คลื่นความถี่ข้างเคียงกันระหว่างสถานีดาวเทียม HDFSS และระบบ 5G

¹ เนื่องจากระยะทางสั้นที่สุดที่สามารถใช้งานได้สำหรับหัว LNB ชนิดความถี่ 3400 – 4200 MHz มีค่ามากกว่าระยะทดสอบไกลสุดคือ 280 เมตร เพราะมีหอประชุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกั้นกลางบริเวณการทำลอง

² หัวรับสัญญาณดาวเทียม (Low-Noise Block Downconverter + 5G Filter (LNB_F)) ชนิดมีตัวกรองสัญญาณ 5G หรือ 5G Filter

2 Abstract

This research includes Its objectives are 1) to establish public policy on spectrum management and to conduct spectrum management research. in the case of spectrum usage in the 3500 MHz and 28 GHz frequency bands, including technical qualification of spectrum sharing between IMT, 5G technology, and other enterprises in the 3500 MHz and 28 GHz frequency bands. and 2) to create a mechanism for participation of the sectors involved in determining the country's spectrum management policy for the real public benefit. The following is the scope of work: 1) Research, collect, and analyze data or research or regulatory guidelines on the use of shared spectrum. Abroad in at least two countries. 2) A study to determine the technical properties of spectrum sharing among telecommunications companies, International Mobile Telecommunications (IMT), 5G technology, and other businesses in Thailand's 3500 MHz and 28 GHz frequency bands. This includes checking for interference in a given situation. as well as finding measures to mitigate interference and conditions for sharing frequencies. 3) Conduct field trials in accordance with the scenario suggested by preliminary analysis. 4) Compile a list of technical qualifications. Policy recommendations, issues, obstacles, and other suggestions 5) Publish the study's findings available to government agencies. At least three channels of communication are used to keep civil society and the public informed. By summarizing the technical characteristics in the case of 5G base stations inside the building in the 3500 MHz band, it was found that in the case of LNB = 3400 to 4200 MHz, the power transmitted in front of the base station There will be a signal at -45 dBm/Hz while the base station power is 25 meters below the building. The signal is attenuated to -120.28 dB/Hz and the signal (Channel Power) measured in front of the satellite dish has less than -110 dBm/Hz. In addition, in the case of the 5G base station outside the building in the 3500 MHz band, from observing the image with a sight (No Macro blocking, Blackout, Freeze and Audio Silence), it was found that in Test Case 1: LNB = 3400 to 4200 MHz will the guard band could not be found. and the short distance that can be used can be more than 280 meters. In test case 2: LNB, LNB_F³, BPF = 3700 to 4200 MHz, the guard band is at least 100 MHz. And the shortest distance that can be used is 130 meters. In the simulation of the 28 GHz frequency band, there was a simulation. 1) In the case of spectrum sharing between fixed satellite stations and 5G systems. 2) In the case of using side-by-side frequencies between a stationary satellite station and a 5G system. 3) in the case of using side-by-side frequencies between A-ESIM. and 4) in the case of using side-by-side frequencies between HDFSS satellite stations and the 5G system.

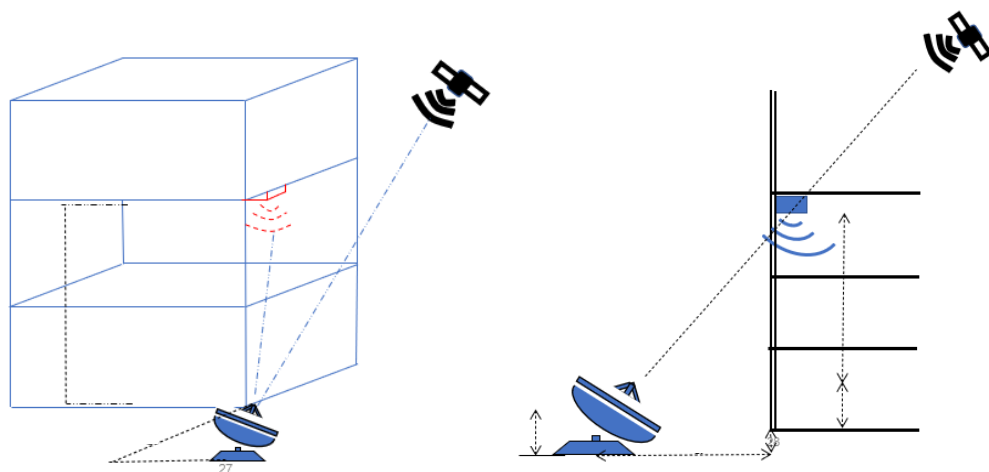
³ Low-Noise Block Downconverter + 5G Filter type with 5G filter (LNB_F)

3 มาตรฐานและวิธีการทดสอบคลื่นความถี่ย่าน 3500 MHz

จากมาตรฐานการทดสอบ คณะวิจัยได้แบ่งกรณีทดสอบการศึกษาวិจัยเพื่อเสนอแนะนโยบาย สาธารณะด้านการบริหารคลื่นความถี่สำหรับกรณีการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการโทรคมนาคม เคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G และ กิจการอื่นในย่านความถี่ 3500 MHz ออกเป็น 2 กรณีคือ การทดสอบใน กรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor) และการทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอก อาคาร (Outdoor) ซึ่งจะเป็นการสะท้อนถึงการนำเอาระบบ 5G มาใช้จริงในประเทศไทย ซึ่งส่วนใหญ่สถานี ฐานในย่านความถี่ 3500 MHz จะประกอบไปด้วย 2 ประเภทคือ ประเภทที่ถูกติดตั้งใช้งานภายในอาคาร ซึ่งจะเป็นสถานีฐานระดับขนาดเล็ก (Pico cell) หรือขนาดเล็กมาก (Femto cell) เป็นต้น ส่วนสถานีฐาน ที่นิยมติดตั้งภายนอกอาคารจะเป็นสถานีฐานขนาดใหญ่ (Macro cell) เป็นต้น

3.1 การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor)

การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร จะเป็นการทดสอบในกรณีที่แย่ที่สุด (Worst Case) คือเป็นกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ในบริเวณอาคาร (ขอบกำแพงอาคาร) ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการรั่วไหล ของสัญญาณไปยังบริเวณภายนอกมากที่สุด จากนั้นคณะวิจัยจะทำการตั้งจานรับดาวเทียมในบริเวณใกล้เคียง โดยให้จานนั้นหันหัวไปในทิศทางเดียวกับสถานีฐาน 5G มากที่สุดดังรูป 1

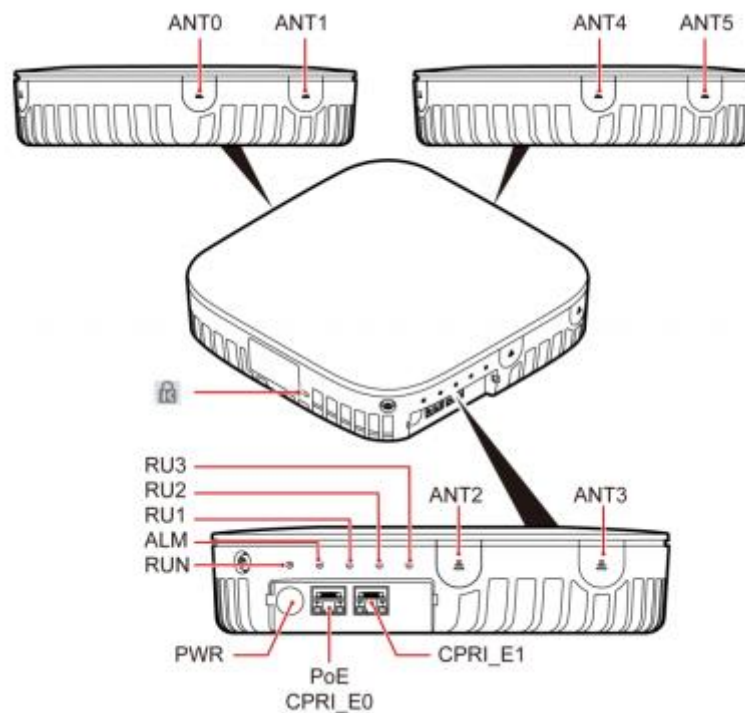


รูป 1 ตำแหน่งของสถานีฐาน 5G และจานดาวเทียมสำหรับการทดสอบกรณีภายในอาคารแบบ Worst Case

3.1.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ

สำหรับการทดสอบในกรณี Indoor โครงการนี้ได้ทำการกำหนดกรณีทดสอบขึ้น โดยใช้

1. สถานีฐาน 5G ในรูปแบบของ Indoor รุ่น 5G pRRU 5935 ของบริษัท Huawei โดยใช้ค่าสัญญาณดังนี้



รูป 2 สถานีฐาน 5G ภายในอาคาร รุ่น 5G pRRU 5935 ของบริษัท Huawei

Center Frequency Band (MHz)	RX Frequency Band (MHz)	RX Frequency Band (MHz)	IBW (MHz)
3550	3500-3600	3500-3600	100

Mode	Capacity	Tx/RX Channel
------	----------	---------------

NR	1 carrier	4T4R
----	-----------	------

Center Frequency Band (MHz)	Maximum Output Power (mW)
3550	4x250 mW

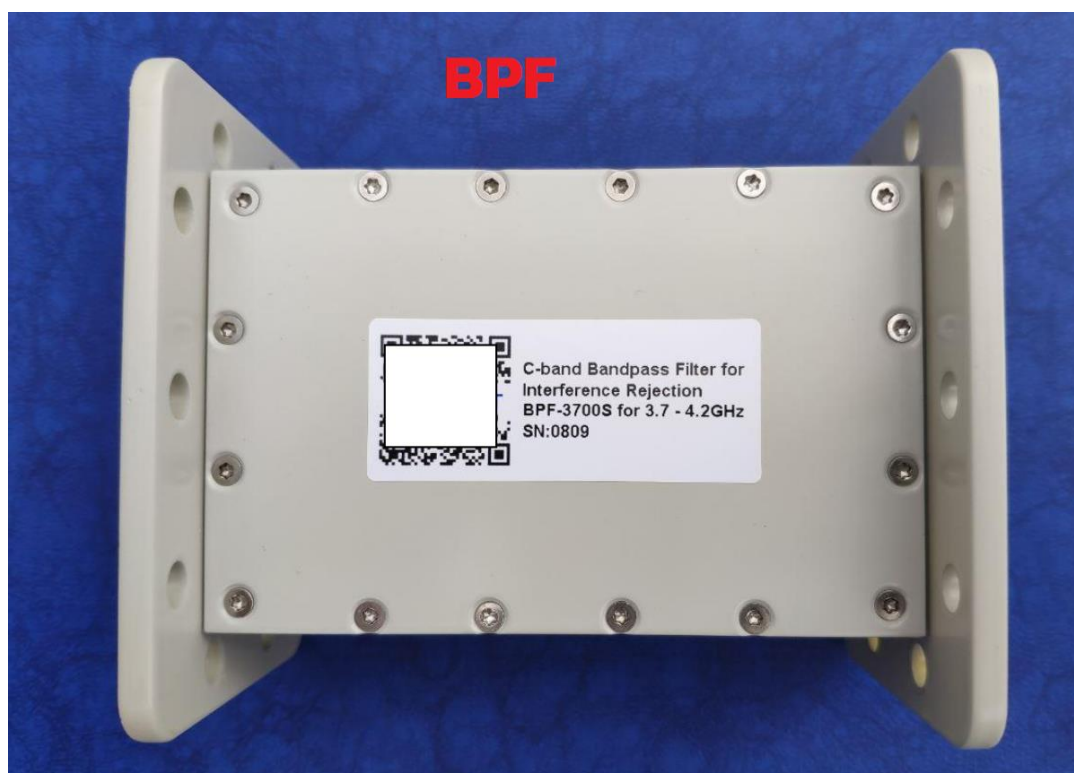
Center Frequency Band (MHz)	Gain (dBi)	Polarization mode	Directivity
3550	4	Linear	Omnidirectional

2. ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม

2.1. หัวรับ Low-Noise Block downconverter (LNB), Low-Noise Block downconverter with 5G Filter (LNB_F) และ Band-Pass Filter (BPF)

ทางคณะวิจัยได้จัดหาหัวรับ LNB, LNB_F⁴ และ BPF หลากหลายตราอักษรเพื่อใช้ในการทดสอบครั้งนี้ โดยใช้เลือกใช้หลักเกณฑ์การคัดเลือกเป้าหมาย (Key Informants) ด้วยวิธีการเลือกหัวรับ LNB ประเภท C band แบบสุ่ม (Purposive Sampling) ซึ่งเป็นหัวรับ LNB ที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด และได้รับความนิยมจากผู้บริโภคในการเลือกซื้อจำนวนมาก⁵

โดยหัวรับ LNB ในที่นี้หมายถึงหัวรับ LNB ที่ไม่มีตัวกรองสัญญาณ 5G หรือ 5G Filter เลย ทำงานในย่าน 3.4 ถึง 4.2 GHz และ หัวรับ LNB_F ในที่นี้หมายถึงหัวรับ LNB ที่มีตัวกรองสัญญาณ 5G หรือ 5G Filter ทำงานในย่าน 3.7 ถึง 4.2 GHz



⁴ หัวรับสัญญาณดาวเทียม (Low-Noise Block Downconverter + 5G Filter (LNB_F)) ชนิดมีตัวกรองสัญญาณ 5G หรือ 5G Filter

⁵ ผลการสำรวจจากร้านค้าปลีกอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมในพื้นที่กรุงเทพมหานครและต่างจังหวัดทั้ง 5 ภูมิภาค



รูป 3 หัวรับ LNB, LNB_F และ BPF

2.2. ตัวรับสัญญาณ TVRO จานรับดาวเทียมและทีวีแอลซีดี



รูป 4 ระบบการรับสัญญาณดาวเทียม

ในการรับสัญญาณดาวเทียมนั้น คณะวิจัยจะอาศัยจานรับดาวเทียมขนาด 1.5 เมตร (จานดำ) ขนาดมาตรฐานมาใช้รวมสัญญาณเข้าสู่ อุปกรณ์ LNB หรือ LNB_F เพื่อแปลงสัญญาณให้เหมาะสมเข้าไปสู่อุปกรณ์ TVRO และแสดงผลออกมาในรูปแบบสัญญาณทีวีตามลำดับ

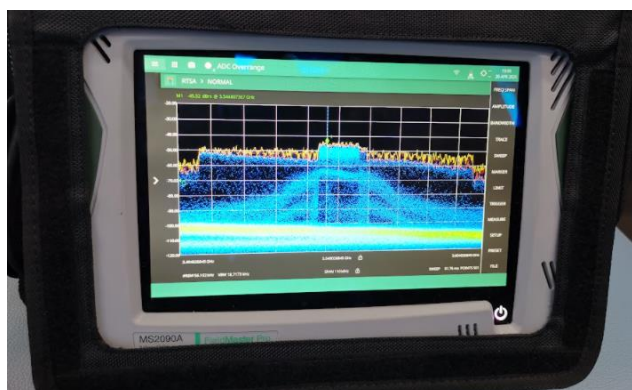
2.3. เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียม



รูป 5 เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียม

ในที่นี้คณะวิจัยใช้เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียมตราอักษร Promax ที่มีความสามารถในการตรวจวิเคราะห์สัญญาณโทรทัศน์ และทีวีดาวเทียม รองรับ DVB – T2 / S2 / C2 จอสัมผัส Touch Screen + ปุ่มควบคุมการทำงาน สเปกตรัมความละเอียดสูง Sweep Rate 70 ms รองรับ HEVC H.265 demodulation

2.4. เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ 5G

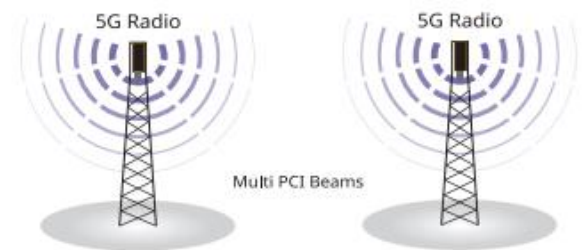


รูป 6 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ ตราอักษร Anritsu รุ่น Field Master Pro

ในที่นี้คณะวิจัยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ ตราอักษร Anritsu รุ่น Field Master Pro (High-Performance RF Spectrum Analyzer) รองรับค่าความถี่ตั้งแต่ 9 KHz ถึง 32 GHz มีค่าข้อกำหนดเฉพาะผลิตภัณฑ์ดังนี้

Parameter	Specification
Frequency range	9 kHz to 9/14/20/26.5/32/43.5/54 GHz
Analysis bandwidth	110 MHz
Demodulation	5G NR demodulation, RF and modulation quality plus SSB signal analysis
TOI	+20 dBm
DANL (with pre amp)	-164 dBm
Amp range	DANL to +30 dBm
Phase noise @ 1 GHz	-110 dBc/Hz @ 100 kHz offset (typical)
RBW/VBW	1 Hz to 10 MHz
Input SWR	1.5
Amplitude accuracy	< 14 GHz ± 1.3 dB (± 0.5 dB typ)
RTSA bandwidth	22 MHz, 55 MHz, 110 MHz (option dependent)

Feature	Specification
Display	10.1 inch, 1280 x 800 color touchscreen
Traces	6
Detectors	Peak, RMS/Avg., Negative
Gated sweep	For time gated spectrum measurements
Markers	12, fully featured with table
Limit lines	Complex limit lines with Pass/Fail
IQ	Capture and streaming of IQ data
Trace record and playback	Record and replay spectrum traces to/from internal memory
GNSS	GPS, GLONASS, Galileo
Interfaces and connectivity	USB 3.0, USBTMC, Ethernet, 802.11b/g/a/n/ac
Battery life	>2 hours (function dependent)



รูป 7 การวัดสัญญาณรบกวนจากสถานีฐาน 5G

เครื่องมือวัดดังกล่าวได้ถูกออกแบบเฉพาะให้สามารถจับสัญญาณจากสถานีฐาน 5G ครอบคลุมทุกบีม (Beamforming) ของสถานีฐาน 5G

3.1.2 สถานที่ทดสอบ

การทดสอบจะกระทำในพื้นที่ทดสอบ DEPA Sandbox ณ สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล โดย สถานีฐาน 5G จะถูกติดตั้งอยู่ในชั้น 2 ของตัวอาคารสำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล ส่วนตำแหน่งของ จานดาวเทียมที่ใช้วัดสัญญาณจะอยู่ที่ลานจอดรถของบริษัท พ.มีทรัพย์ ซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่งของสถานีฐาน 5G ประมาณ 30 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 8



รูป 8 ตำแหน่งของสถานีฐาน 5G และจานดาวเทียมสำหรับการทดสอบกรณี Indoor ที่สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล

3.1.3 ผู้เข้าร่วมทดสอบ

1. บริษัท หัวเว่ย เทคโนโลยี (ประเทศไทย)
2. บริษัท เอ็ม เจ. แชนเทลไลท์ เซ็นเตอร์ จำกัด (ไอเดียแซท)
3. บริษัท พีเอสไอ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
4. บริษัท อินโฟแซท จำกัด
5. บริษัท ไทยแซท เอ็กซ์เพิร์ทเอ็นจิเนียริง จำกัด
6. บริษัท ไทยคม จำกัด (มหาชน)

3.1.4 วิธีการทดสอบ

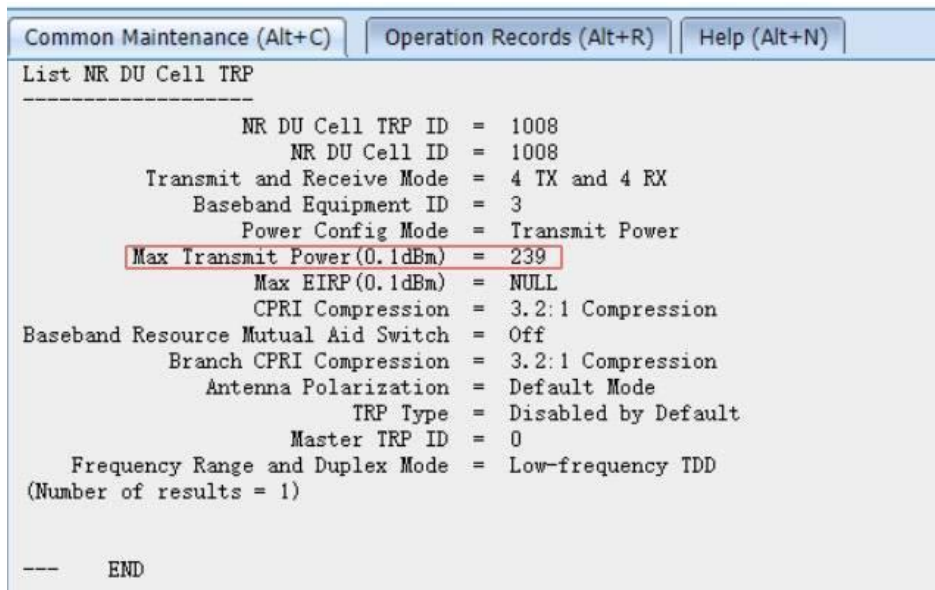
1. ทำการปรับค่ากำลังส่งของสถานีฐาน 5G ในรูปแบบของ Indoor รุ่น 5G pRRU 5935 ของบริษัท Huawei โดยใช้ค่าสัญญาณดังนี้

Center Frequency Band (MHz)	RX Frequency Band (MHz)	RX Frequency Band (MHz)	IBW (MHz)
3550	3500-3600	3500-3600	100

Mode	Capacity	Tx/RX Channel
NR	1 carrier	4T4R

Center Frequency Band (MHz)	Maximum Output Power (mW)
3550	4x250 mW

Center Frequency Band (MHz)	Gain (dBi)	Polarization mode	Directivity
3550	4	Linear	Omnidirectional



Enter watts:
 W

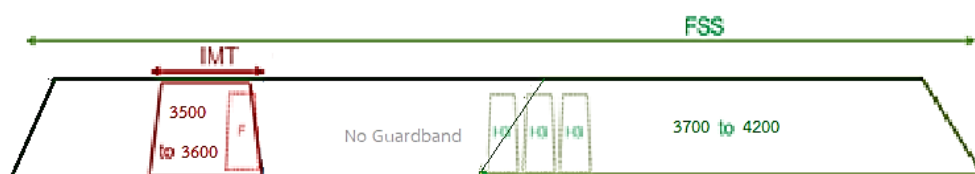
Enter dBm:
 dBm

รูป 9 การตั้งค่าให้กับสถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคาร

ทำให้ได้สเปกตรัมของการวัดสัญญาณ 5G IMT ที่ขนาด 100 MHz และค่ากำลังส่งสูงสุด 1 วัตต์ดังนี้

1.1. กรณีทดสอบที่ 1 (Case 1): LNB = 3400 ถึง 4200 MHz

- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3500 ถึง 3600 MHz
- Guard band: ไม่มี
(สัญญาณ IMT ใช้งานอยู่ใกล้กับย่านสัญญาณดาวเทียม)
- LNB: 3400 ถึง 4200 MHz



รูป 10 ช่วงความถี่ของสถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคารและความถี่ของสัญญาณดาวเทียม

* คณะวิจัยเลือกใช้ค่ากำลังส่งและแบนด์วิธสูงสุดเพื่อกำหนดกรณีที่แย่ที่สุดที่เป็นไปได้ (Worst Case)

2. ทำการวัดสัญญาณจากสถานีฐาน 5G โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ ทรานซิวเวอร์ Anritsu รุ่น Field Master Pro (High-Performance RF Spectrum Analyzer) รองรับค่าความถี่ตั้งแต่ 9 KHz ถึง 32 GHz โดยปรับค่าแบนด์วิธที่ 100 MHz และนำสายอากาศ Omnidirectional มาวางใกล้กับสถานีฐาน 5G แบบภายในอาคาร จากนั้นบันทึกผล
3. ทำการตั้งจานรับดาวเทียมในบริเวณใกล้เคียง โดยให้จานนั้นหันหัวไปในทิศทางเดียวกับสถานีฐาน 5G มากที่สุด โดยมีการวางตำแหน่งตามรูปจุดที่ 1 ถึง 7 โดยร้องขอให้บริษัท เอ็ม เจ. แซทเทลไลท์ เซ็นเตอร์ จำกัด (ไอเดียแซท) บริษัท พีเอสไอ คอร์ปอเรชั่น จำกัด บริษัท อินโฟแซท จำกัด และบริษัท ไทยแซท เอ็กซ์เพิร์ทเอ็นจิเนียริง จำกัด เข้าร่วมทดสอบ





รูป 11 การวางตำแหน่งจากรับดาวเทียมตามตำแหน่งที่ 1 ถึง 7

4. เริ่มปรับใช้หัวรับ LNB และหัวรับ LNB_F แต่ละหัวมาใช้ในระบบการรับสัญญาณดาวเทียม โดยเริ่มจากการใช้หัวรับ LNB ปกติย่านความถี่ 3.4 ถึง 4.2 GHz จากนั้นจึงใช้หัวรับ LNB_F ชนิดที่มีตัวกรองความถี่ 5G ทั้งนี้หากหัวรับปกติสามารถรับสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมได้ นั่นหมายความว่าหัวรับ LNB_F ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าก็สามารถรับสัญญาณได้เช่นกัน โดยร้องขอให้บริษัท เอ็ม เจ. แซทเทลไลท์ เซ็นเตอร์ จำกัด (ไอเดียแซท) บริษัท พีเอสไอ คอร์ปอเรชั่น จำกัด บริษัท อินโฟแซท จำกัด และบริษัท ไทยแซท เอ็กซ์เพิร์ทเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด เข้าร่วมทดสอบ

5. ทำการวัดสัญญาณด้วยเครื่องวัดสัญญาณดาวเทียมตราอักษร Promax ที่มีความสามารถในการตรวจวิเคราะห์สัญญาณโทรศัพท์ และทีวีดาวเทียม แล้วทำการบันทึกผล
6. ทำการบันทึกค่าที่ได้เป็นแบบแอนะล็อกโดยใช้สายดาวเคราะห์ว่าภาพสัญญาณทีวีที่ได้รับได้มีลักษณะอย่างไรเช่น 1) Macro blocking 2) Blackout 3) Freeze และ 4) Audio Silence ตามลำดับ

3.1.5 สมมติฐานในการทดสอบ

- 1) ในการทดสอบครั้งนี้ คณะวิจัยจะยึดกรณีการทดสอบในสภาวะที่แย่ที่สุดเป็นหลัก กล่าวคือ ในการรับสัญญาณของดาวเทียมนั้น หน้าจอนับสัญญาณดาวเทียมต้องหันไปในทิศทางเดียวกับสายอากาศของสถานีฐาน 5G ด้วย ทำให้ได้แนวในการขยับจานรับดาวเทียมในแนวเดียวเท่านั้น เพื่อคงรักษามุมของจานรับดาวเทียมให้หันไปทางเดียวกับทั้งดาวเทียมและสถานีฐาน 5G
- 2) ในการทดสอบนี้จานรับสัญญาณดาวเทียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ถูกใช้โดยถือว่าเป็นตัวแทนของจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.8 เมตรและจาน VSAT ด้วย เนื่องจากในการรับสัญญาณดาวเทียม สัญญาณรบกวน (Noise) จาก IMT จะถูกขยายโดยอัตราขยาย (Gain) ของจานเป็นอัตราส่วนเท่ากัน ทำให้อัตราขยายของจานไม่ถูกนำมาคิดในการคำนวณตามทฤษฎี
- 3) ในการทดสอบครั้งนี้ ถือว่าไม่มีสัญญาณรบกวนอื่นใดจากภายนอก

3.1.6 ข้อจำกัดในการทดสอบ

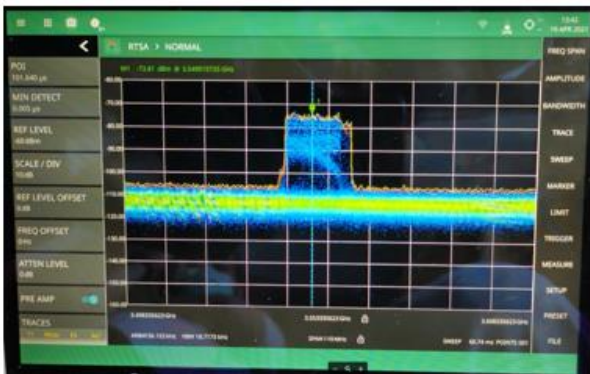
- 1) พื้นที่ทดสอบจำเป็นต้องได้รับอนุญาตจาก กสทช. โดยได้พิจารณาเลือกใช้พื้นที่สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล (DEPA) เพื่อเชื่อมกับระบบ Core Network ของ Huawei ในพื้นที่ดังกล่าว ซึ่งมีระยะการทดสอบใกล้สุดอยู่ที่ 25 เมตรและระยะไกลสุด 60 เมตรเท่านั้น นอกจากนั้นในสถานที่ทดสอบ ยังพบว่ามียอดสูงขนาดใหญ่บดบังแนวการรับสัญญาณระหว่างจานรับดาวเทียม และดาวเทียม ทำให้มุมของจานรับดาวเทียมไม่สามารถปรับให้อยู่ในแนวรับสัญญาณเดียวกับทั้งดาวเทียมและสถานีฐาน 5G
- 2) อุปกรณ์สถานีฐาน 5G กรณีอยู่ภายในอาคารได้รับการสนับสนุนจากบริษัท Huawei มีเพียงแค่รุ่นเดียวเท่านั้น และค่ากำลังส่งสูงสุดที่ใช้คือ 1 วัตต์ ในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รุ่นอื่นอาจได้ผลการทดสอบที่แตกต่างออกไป
- 3) จานรับดาวเทียมที่ใช้จะเป็นชนิดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร เพียงขนาดเดียวเนื่องจากในการทดสอบจะยึดกรณีสภาวะที่แย่ที่สุดเป็นหลัก

3.1.7 ผลการทดสอบ

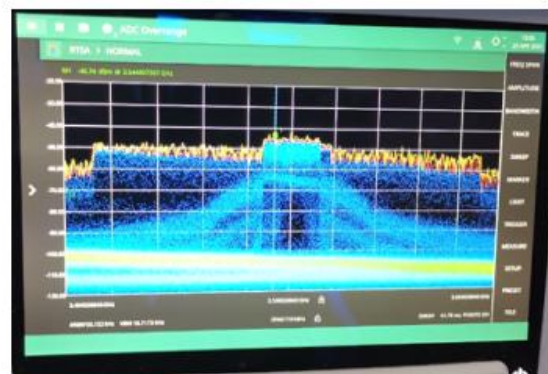
ผลการทดสอบการศึกษาวิจัยเพื่อเสนอแนะนโยบายสาธารณะด้านการบริหารคลื่นความถี่สำหรับกรณีการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G และ กิจการอื่นในย่านความถี่ 3500 MHz กรณีสถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor) พบว่า ค่าสเปกตรัมของสถานีฐาน 5G ที่วัดได้นั้นมีอยู่ 2 โหมดคือ โหมดสแตนด์บายส์ (Standby) และโหมดแอคทีฟ (Active Mode) คือสเปกตรัมและกำลังส่งสัญญาณจะถูกส่งแบบเต็มกำลัง โดยในขณะที่ทำการวัดสเปกตรัมของสัญญาณจะต้องอยู่ในโหมดแอคทีฟเสมอ โดยเมื่อวัดสัญญาณจากสถานีฐาน 5G โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ ตราอักษร Anritsu รุ่น Field Master Pro (High-Performance RF Spectrum Analyzer) รองรับค่าความถี่ตั้งแต่ 9 KHz ถึง 32 GHz โดยปรับค่าแบนด์วิธที่ 100 MHz และนำสายอากาศ Omnidirectional มาวางใกล้กับสถานีฐาน 5G แบบภายในอาคาร ในโหมด สแตนด์บายส์ คณะวิจัยวัดค่ากำลังส่งสัญญาณ (Channel Power) ได้ที่ -75 dBm/Hz และในโหมดแอคทีฟ คณะวิจัยวัดค่ากำลังส่งสัญญาณ (Channel Power) ได้ที่ -45 dBm/Hz



รูปการวางสายอากาศของเครื่องมือวัดใกล้กับสถานีฐาน 5G



รูปสเปกตรัมของสัญญาณในโหมดสแตนด์บาย



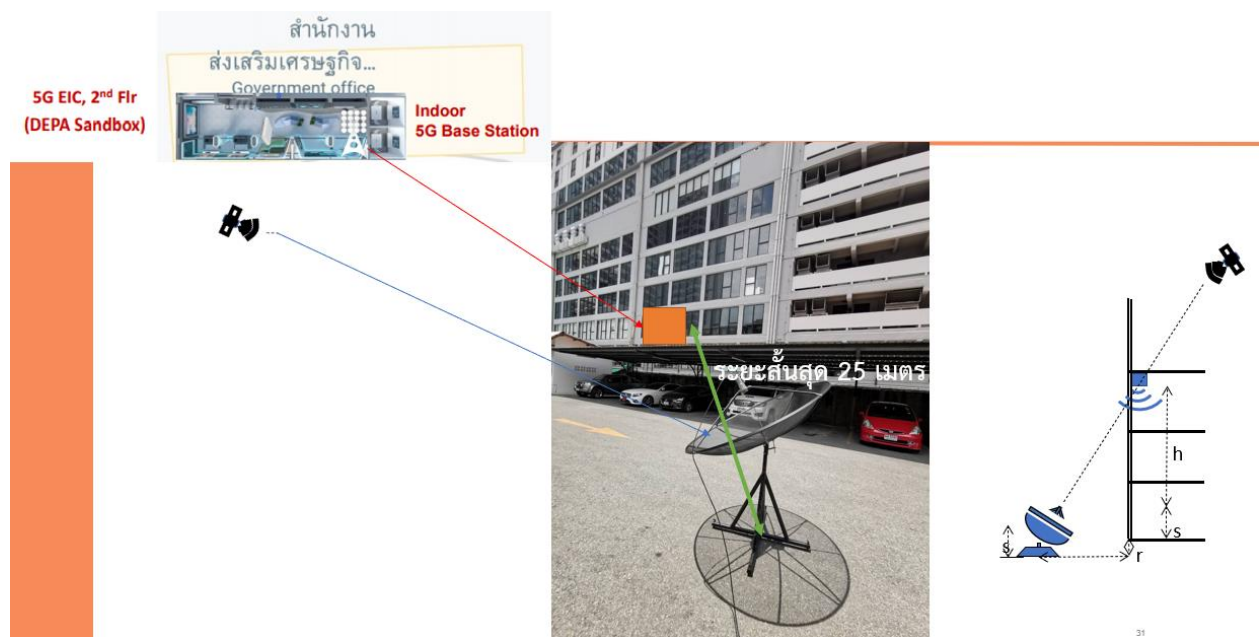
รูปสเปกตรัมของสัญญาณในโหมดแอคทีฟ

รูป 12 สเปกตรัมของสัญญาณของสถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคาร

ทั้งนี้กำลังส่งสัญญาณ (Channel Power) ได้ที่ -45 dBm/Hz นั้น สามารถทำให้คณะวิจัยมั่นใจว่า สถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคารนั้นแพร่กระจายสัญญาณมาตามสูตรคือ $= 10\log_{10}(1000 \cdot \text{กำลังส่ง (Watt) / แบนด์วิธของสถานีฐาน}) + \text{อัตราขยายของ Omnidirectional ของสถานีฐาน} + \text{อัตราขยายของสายอากาศเครื่องวัด} = 1 \text{ Watt} / 100 \text{ MHz} + 4 \text{ dBi} + 5 \text{ dBi} = -50 + 4 + 5 = -41 \text{ dBm /Hz}$ โดยค่าที่คำนวณนั้นใกล้เคียงกับที่วัดได้มาก ทำให้มั่นใจว่าสัญญาณที่วัดได้ตรงตามข้อกำหนดเฉพาะผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตสถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคาร

จากนั้นผลจากการปรับค่าโดยให้งานนั้นหันหัวไปในทิศทางเดียวกับสถานีฐาน 5G มากที่สุด โดยมีการวางตำแหน่งตามรูปจุดที่ 1 ถึง 7 โดยร้องขอให้บริษัท เอ็ม เจ. แชนเทลไลท์ เซ็นเตอร์ จำกัด (ไอเดียแซท) บริษัท พีเอสไอ คอร์ปอเรชั่น จำกัด บริษัท อินโฟแซท จำกัด และบริษัท ไทยแซท เอ็กซ์เพิร์ทเอ็นจิเนียริ่ง

จำกัด เข้าร่วมทดสอบตั้งจานดาวเทียมในบริเวณใกล้เคียงพบว่าคณะวิจัยสามารถวางตำแหน่งของอุปกรณ์ตามรูปได้ดังนี้



รูป 13 การวางแผนงานและระยะทดสอบสิ้นสุดที่ 25 เมตร

โดยจากรูป คณะวิจัยสามารถแสดงผลเป็นค่าตัวเลขมุมก้มมุมเงยและระยะของสถานีฐาน 5G และตำแหน่งดาวเทียมได้ดังนี้

➤ ตำแหน่งของสถานีฐาน 5G

ละติจูด 13.811975 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.561639 องศาตะวันออก ความสูง 6 เมตร

➤ ตำแหน่งจานดาวเทียม

ละติจูด 13.811838 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.561820 องศาตะวันออก ความสูง 1 เมตร

➤ ทิศทางของจานดาวเทียมหันหน้าเข้าหาสถานีฐาน 5G

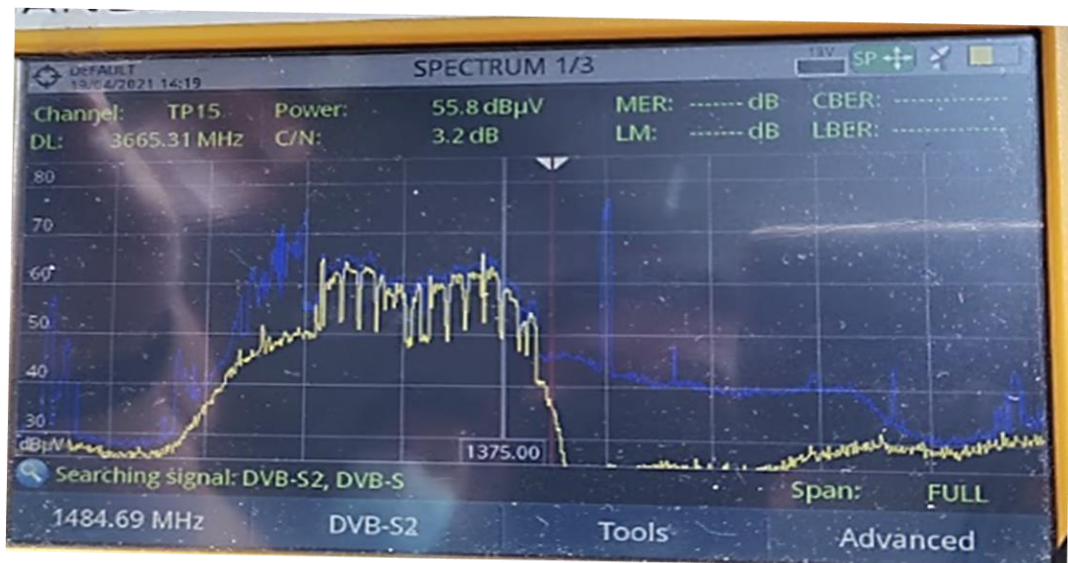
มุมอาซิมูท 307.7756 องศา มุมเงย 11.4196 องศา

➤ ทิศทางของจานดาวเทียมหันหน้าเข้าหาดาวเทียมไทยคม 6

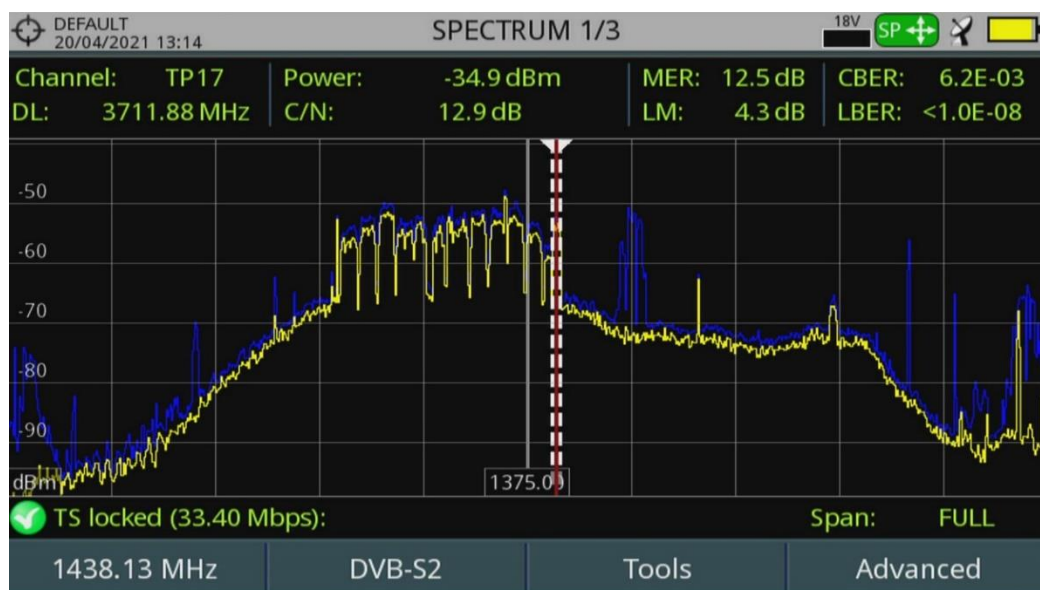
มุมอาซิมูท 239.6580 องศา มุมเงย 59.7984 องศา

➤ ระยะสิ้นสุดระหว่างสถานีฐาน 5Gและจานดาวเทียม: 25 เมตร

โดยคณะวิจัยได้เก็บค่าสเปกตรัมของสัญญาณดาวเทียมภายหลังปล่อยสัญญาณ 5G เพื่อแสดงว่า คณะวิจัยยังสามารถรับชมรายการทีวีได้ทุกช่องดังรูปต่อไปนี้ และ (ข้อมูลตามภาคผนวก ก)



รูป 14 สเปกตรัมของสัญญาณดาวเทียมกรณียังไม่มีปล่อยสัญญาณ 5G จากสถานีฐาน 5G



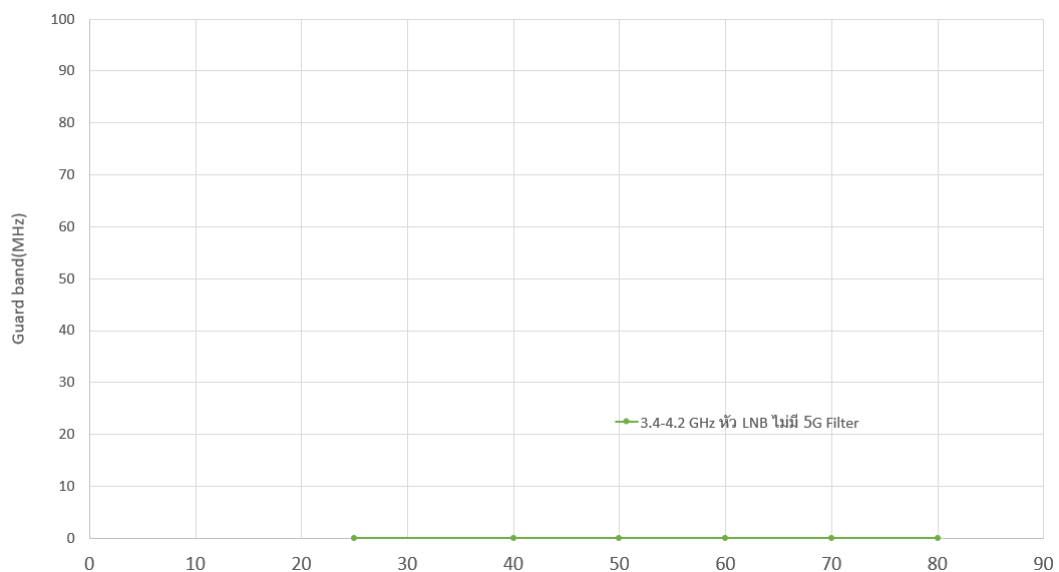
รูป 15 สเปกตรัมของสัญญาณดาวเทียมกรณีปล่อยสัญญาณ 5G จากสถานีฐาน 5G

คณะวิจัยพบว่าเมื่อปล่อยสัญญาณ 5G ออกจากสถานีฐาน 5G แล้ว จะทำให้ระดับสเปกตรัมของสัญญาณทั้งหมดยกขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากคณะวิจัยเริ่มทดสอบจากหัวรับ LNB ชนิดที่ไม่มี 5G Filter ก่อน แต่อย่างไรก็ตามระดับสัญญาณที่เพิ่มขึ้น ยังส่งผลให้คณะวิจัยสามารถดูสัญญาณได้ครบทุกช่อง ในที่นี้ขอให้คุณผลการทดสอบเป็นค่าสเปกตรัมในภาคผนวก ก



รูป 16 ตัวอย่างภาพจากสัญญาณดาวเทียมกรณีปล่อยสัญญาณ 5G จากสถานีฐาน 5G

ทั้งนี้คณะวิจัยได้นำผลการทดสอบที่ได้มาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Guardband และระยะทางสั้นสุดที่เป็นไปได้ดังกราฟรูปข้างล่าง

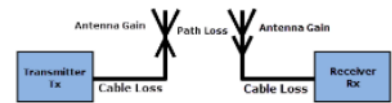


รูป 17 สเปกตรัมของสัญญาณดาวเทียมกรณีปล่อยสัญญาณ 5G จากสถานีฐาน 5G

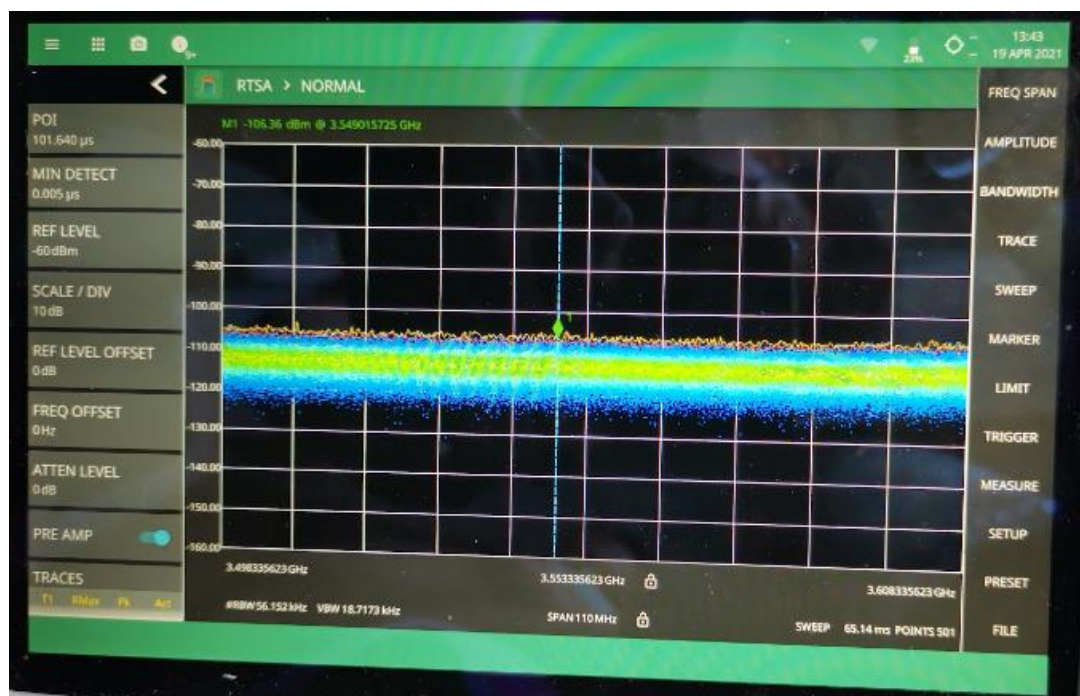
จากรูปกราฟ คณะวิจัยพบว่าระยะทางสั้นสุดที่วัดได้ 25 เมตร คือเนื่องจากสภาพแวดล้อม ทำให้คณะทำงานไม่สามารถขยับจานดาวเทียมเข้าใกล้สถานีฐาน 5G มากกว่านี้เนื่องจาก จะโดนตึกบังสัญญาณดาวเทียมจากดาวเทียมไทยคม 6 โพรดสังเกตว่าไม่มีค่า Guard band ระหว่างสัญญาณ 5G และสัญญาณดาวเทียม เนื่องจากสเปกตรัมระหว่างสัญญาณทั้งสองทับซ้อนกันพอดี สาเหตุที่คณะวิจัยสามารถใช้งานความถี่ร่วมกันได้เนื่องจากสัญญาณจากสถานีฐาน 5G ถูกลดทอนลงมามากกว่าจะถึงจานรับสัญญาณดาวเทียม โดย

สามารถคำนวณได้ค่ากำลังส่งสัญญาณ (Channel Power) ได้ที่ -45 dBm/Hz เมื่อถูกลดทอนโดยผนัง ประมาณ 10 dB และค่า Path Loss ที่ระยะทาง 25 เมตรจะได้เป็น 65.28 dB จากสูตร

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) - G_t - G_r$$



ทำให้ค่ากำลังรับสัญญาณดาวเทียมจะมีค่าประมาณ $-45 - 10 - 65.28 = -120.28$ dBm/Hz ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า Sensitivity ของระบบการรับสัญญาณดาวเทียม ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถยืนยันได้จากการนำเอาเครื่องวัดสเปกตรัมของสัญญาณไปวัดหน้าจานรับดาวเทียมแล้วไม่พบค่าสัญญาณเนื่องจากต่ำกว่าระดับ Noise floor ของเครื่องที่ประมาณ -110 dBm/Hz จึงสามารถยืนยันได้ว่าสัญญาณที่วัดได้ต่ำกว่า -110 dBm/Hz



รูป 18 สเปกตรัมของสัญญาณ 5G ที่ด้านหน้าจานรับดาวเทียมที่ระยะ 25 เมตร

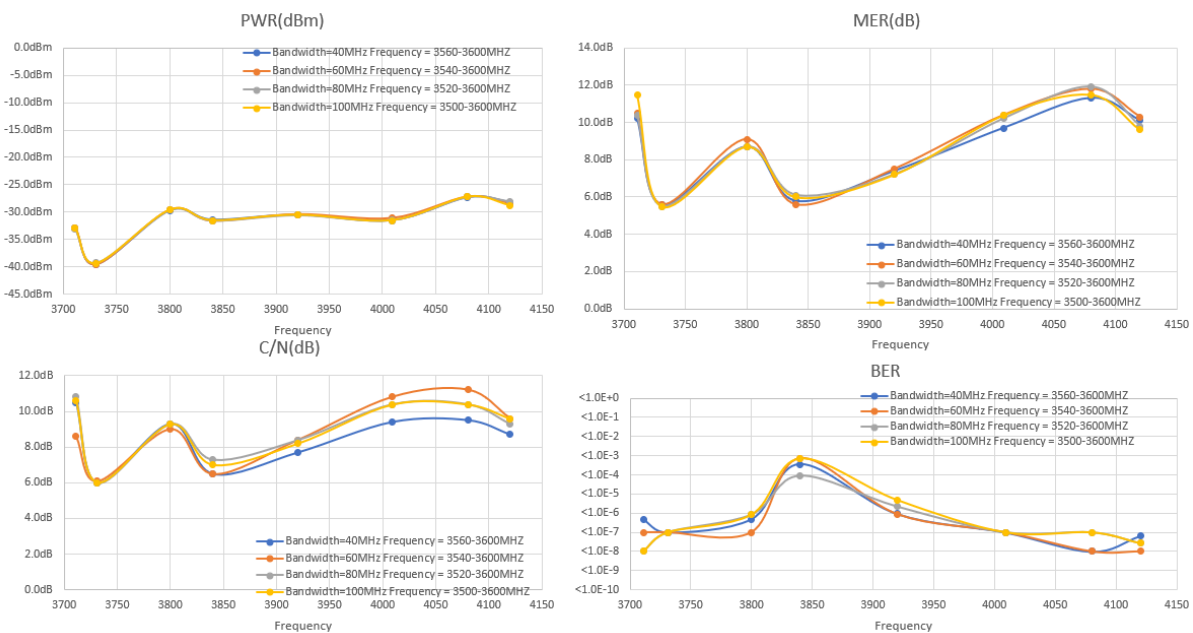
สำหรับการทดสอบในกรณี Indoor จะทำการบันทึกค่า Signal Quality, C/N margin และค่า Bit error rate ของสัญญาณโทรศัพท์ผ่านดาวเทียม

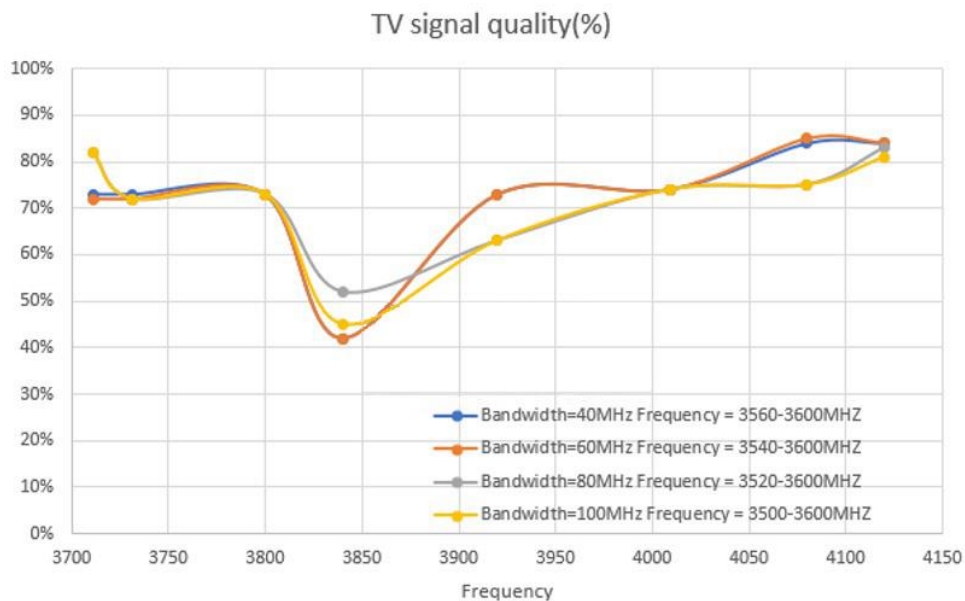
ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณจาก LNB แบบไม่มี Filter ยี่ห้อ A

5G Transmitter		Power = 1W					Power = 1W					Power = 1W					Power = 1W				
Indoor Type		Bandwidth = 40MHz					Bandwidth = 60MHz					Bandwidth = 80MHz					Bandwidth = 100MHz				
		Frequency = 3560-3600MHz					Frequency = 3540-3600MHz					Frequency = 3520-3600MHz					Frequency = 3500-3600MHz				
		Result					Result					Result					Result				
LNB/LNBF	Satellite Frequency	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)
LNB Frequency 3400MHz- 4200MHz (No Filter 5G)	3711	-32.9	10.2	10.5	4.90E-07	73	-32.8	10.5	8.6	<1.0E-07	72	-33	10.4	10.8	<1.0E-08	82	-32.9	11.5	10.6	<1.0E-08	82
	3731	-39.5	5.6	6	<1.0E-07	73	-39.5	5.6	6.1	<1.0E-07	72	-39.2	5.5	6	<1.0E-07	72	-39.3	5.5	6	<1.0E-07	72
	3800	-29.7	8.7	9.3	4.90E-07	73	-29.6	9.1	9	1.00E-07	73	-29.6	8.7	9.3	8.40E-07	73	-29.6	8.7	9.3	8.40E-07	73
	3840	-31.4	5.8	6.5	3.60E-04	42	-31.6	5.6	6.5	7.20E-04	42	-31.5	6.1	7.3	8.90E-05	52	-31.5	6	7	7.20E-04	45
	3920	-30.5	7.4	7.7	9.10E-07	73	-30.4	7.5	8.4	8.70E-07	73	-30.5	7.2	8.4	2.20E-06	63	-30.5	7.2	8.2	4.90E-06	63
	4009	-31.5	9.7	9.4	<1.0E-07	74	-31.1	10.4	10.8	<1.0E-07	74	-31.4	10.2	10.4	<1.0E-07	74	-31.5	10.4	10.4	<1.0E-07	74
	4080	-27.3	11.3	9.5	<1.0E-08	84	-27.2	11.8	11.2	<1.0E-08	85	-27.2	11.9	10.4	<1.0E-07	75	-27.2	11.5	10.4	<1.0E-07	75
	4120	-28.2	10.1	8.7	6.50E-08	84	-28.4	10.3	9.6	<1.0E-08	84	-28	9.8	9.3	2.70E-08	83	-28.8	9.6	9.6	2.70E-08	81

รูป 19 ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบไม่มี Filter ตราอักษร A

หมายเหตุ ค่าสัญญาณต่ำสุดที่ดาวเทียมรับได้ควรมีค่าต่ำสุดคือ -103.98 dBm (อ้างอิงตามเอกสาร C-Band TWG-1 Best Practices Annexes D-P (fcc.gov) หน้า 3 TWG1-006 ทั้งนี้เราพบว่าสัญญาณ 5G ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่า -128.28 dBm ทำให้มั่นใจว่าสัญญาณรบกวนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าสัญญาณดาวเทียมขั้นต่ำที่รับได้





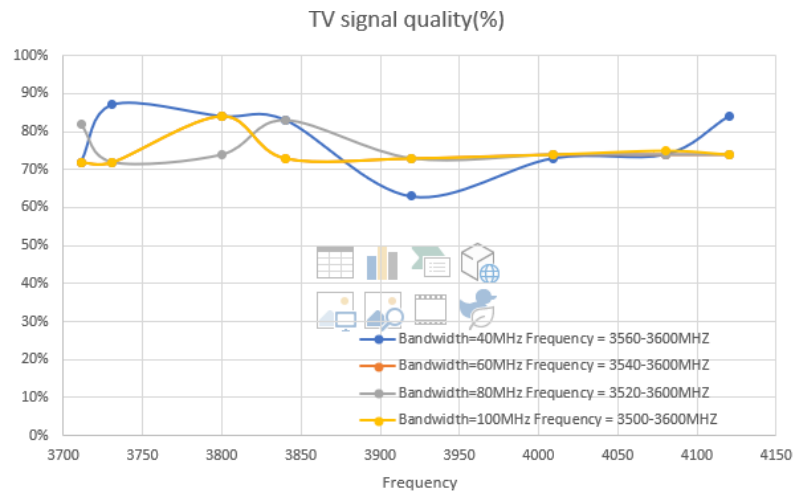
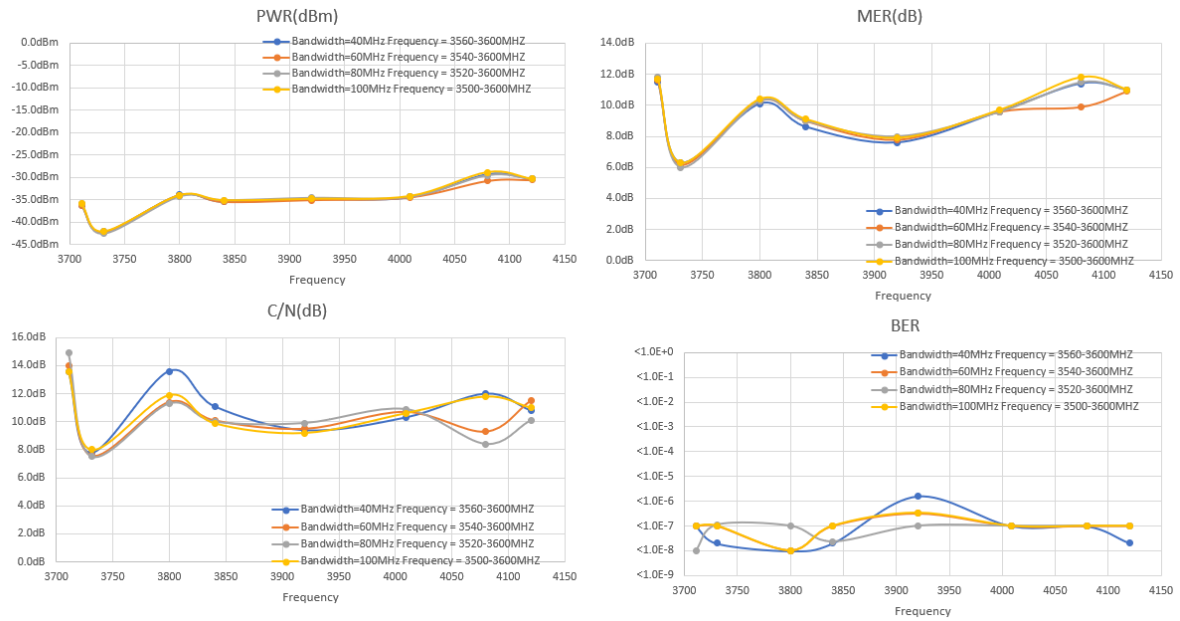
รูป 20 กราฟผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบไม่มี Filter ตราอักษร A

ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณจาก LNB แบบมี Filter ยี่ห้อ A

Click to add text

5G Transmitter		Power = 1W					Power = 1W					Power = 1W					Power = 1W				
Indoor Type		Bandwidth = 40MHz					Bandwidth = 60MHz					Bandwidth = 80MHz					Bandwidth = 100MHz				
		Frequency = 3560-3600MHz					Frequency = 3540-3600MHz					Frequency = 3520-3600MHz					Frequency = 3500-3600MHz				
		Result					Result					Result					Result				
LNB/LNB	Satellite Frequency	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)	PWR dBm	MER	C/N	BER	TV signal quality(%)
LNB Frequency 3400MHz - 4200MHz (No Filter 5G)	3711	-36.2	11.5	13.6	<1.0E-07	72	-36.2	11.6	14	<1.0E-07	72	-35.9	11.8	14.9	<1.0E-08	82	-35.9	11.7	13.6	<1.0E-07	72
	3731	-42.2	6.3	7.8	2.00E-08	87	-42.3	6.2	7.6	<1.0E-07	72	-42.5	6	7.5	1.10E-07	72	-42	6.3	8	<1.0E-07	72
	3800	-33.9	10.1	13.6	<1.0E-08	84	-34	10.3	11.4	<1.0E-08	84	-34.3	10.3	11.3	<1.0E-07	74	-34	10.4	11.9	<1.0E-08	84
	3840	-35.4	8.6	11.1	2.00E-08	83	-35.5	9	10.1	<1.0E-07	73	-35.1	9	10	2.30E-08	83	-35.1	9.1	9.9	<1.0E-07	73
	3920	-34.8	7.6	9.4	1.60E-06	63	-35.1	7.8	9.5	3.30E-07	73	-34.6	8	9.9	<1.0E-07	73	-34.8	7.9	9.2	3.40E-07	73
	4009	-34.4	9.6	10.3	<1.0E-07	73	-34.5	9.6	10.7	<1.0E-07	74	-34.4	9.6	10.9	<1.0E-07	74	-34.2	9.7	10.6	<1.0E-07	74
	4080	-29.2	11.4	12	<1.0E-07	74	-30.8	9.9	9.3	<1.0E-07	74	-29.6	11.5	8.4	<1.0E-07	74	-28.9	11.8	11.8	<1.0E-07	75
	4120	-30.3	11	10.8	2.10E-08	84	-30.6	10.9	11.5	<1.0E-07	74	-30.4	11	10.1	<1.0E-07	74	-30.4	11	11	<1.0E-07	74

รูป 21 ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบมี Filter ตราอักษร A

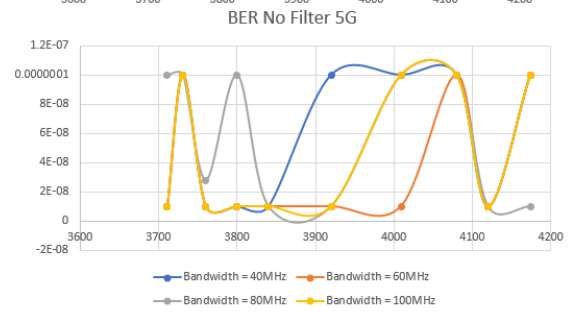
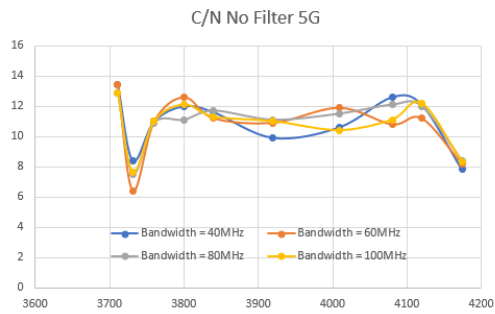
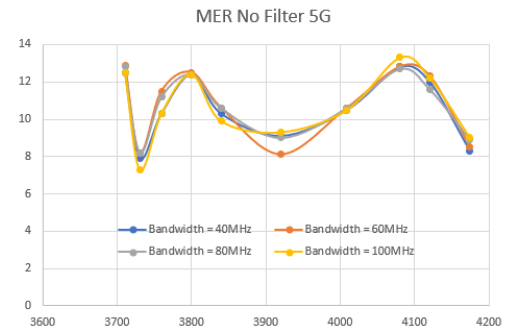


รูป 22 กราฟผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบมี Filter ตราอักษร A

ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณจาก LNB แบบไม่มี Filter ยี่ห้อ B

5G Base Station Indoor		Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 40MHz Frequency = 3560-3600MHz					Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 60MHz Frequency = 3540-3600MHz					Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 80MHz Frequency = 3520-3600MHz					Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 100MHz Frequency = 3500-3600MHz				
LNB/LNBF	Satellite Frequency	Recorded Parameter					Recorded Parameter					Recorded Parameter					Recorded Parameter				
		PWR	MER	C/N	BER	TVRO	PWR	MER	C/N	BER	TVRO	PWR	MER	C/N	BER	TVRO	PWR	MER	C/N	BER	TVRO
LNB Frequency 3400MHz - 4200MHz (No Filter 5G)	3711	-34.4dBm	12.5dB	13.4dB	1x10 ⁻⁸	75%	-34.1dBm	12.9dB	13.4dB	1x10 ⁻⁸	75%	-34.3dBm	12.8dB	12.9dB	1x10 ⁻⁷	74%	-34.9dBm	12.5dB	12.9dB	1x10 ⁻⁸	74%
	3731	-39.6dBm	7.9dB	8.4dB	1x10 ⁻⁷	59%	-39.4dBm	8.2dB	6.4dB	1x10 ⁻⁷	58%	-39.4dBm	8.2dB	7.5dB	1x10 ⁻⁷	58%	-40.5dBm	7.3dB	7.6dB	1x10 ⁻⁷	58%
	3760	-32.3dBm	10.3dB	11.0dB	1x10 ⁻⁸	58%	-32.1dBm	11.5dB	11.0dB	1x10 ⁻⁸	58%	-32.3dBm	11.2dB	10.9dB	2.8x10 ⁻⁸	58%	-33.0dBm	10.3dB	11.0dB	1x10 ⁻⁸	58%
	3800	-30.7dBm	12.4dB	12.0dB	1x10 ⁻⁸	71%	-30.4dBm	12.5dB	12.6dB	1x10 ⁻⁸	71%	-30.6dBm	12.4dB	11.1dB	1x10 ⁻⁷	71%	-31.2dBm	12.4dB	12.1dB	1x10 ⁻⁸	71%
	3840	-30.2dBm	10.3dB	11.6dB	1x10 ⁻⁸	50%	-30.2dBm	10.6dB	11.2dB	1x10 ⁻⁸	50%	-30.2dBm	10.6dB	11.7dB	1x10 ⁻⁸	50%	-31.2dBm	9.9dB	11.3dB	1x10 ⁻⁸	50%
	3920	-31.3dBm	9.1dB	9.9dB	1x10 ⁻⁷	41%	-30.9dBm	8.1dB	10.9dB	1x10 ⁻⁸	41%	-30.9dBm	9.0dB	11.1dB	1x10 ⁻⁸	42%	-31.9dBm	9.3dB	11.0dB	1x10 ⁻⁸	42%
	4009	-33.9dBm	10.5dB	10.6dB	1x10 ⁻⁷	70%	-33.9dBm	10.6dB	11.9dB	1x10 ⁻⁸	71%	-34.0dBm	10.6dB	11.5dB	1x10 ⁻⁷	71%	-34.2dBm	10.5dB	10.4dB	1x10 ⁻⁷	70%
	4080	-29.7dBm	12.8dB	12.6dB	1x10 ⁻⁷	78%	-29.4dBm	12.8dB	10.8dB	1x10 ⁻⁷	77%	-29.2dBm	12.7dB	12.1dB	1x10 ⁻⁷	78%	-29.8dBm	13.3dB	11.1dB	1x10 ⁻⁷	77%
	4120	-31.5dBm	12.0dB	12.1dB	1x10 ⁻⁸	67%	-31.0dBm	12.3dB	11.2dB	1x10 ⁻⁸	66%	-30.9dBm	11.6dB	12.0dB	1x10 ⁻⁸	67%	-32.2dBm	12.2dB	12.2dB	1x10 ⁻⁸	67%
	4174	-40.0dBm	8.3dB	7.8dB	1x10 ⁻⁷	40%	-39.8dBm	8.5dB	8.2dB	1x10 ⁻⁷	40%	-39.5dBm	8.9dB	8.4dB	1x10 ⁻⁸	40%	-40.7dBm	9.0dB	8.3dB	1x10 ⁻⁷	40%

รูป 23 ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบไม่มี Filter ตราอักษร B



รูป 24 กราฟผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบไม่มี Filter ตราอักษร B

ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณจาก LNB แบบมี Filter ยี่ห้อ B

5G Base Station Indoor		Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 40MHz					Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 60MHz					Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 80MHz					Power = 0.25Wx4Port Bandwidth = 100MHz				
		Frequency = 3560-3600MHz					Frequency = 3540-3600MHz					Frequency = 3520-3600MHz					Frequency = 3500-3600MHz				
		Recorded Parameter					Recorded Parameter					Recorded Parameter					Recorded Parameter				
LNB/LNBF	Satellite Frequency	PWR	MER	C/N	BER	TVRO	PWR	MER	C/N	BER	TVRO	PWR	MER	C/N	BER	TVRO	PWR	MER	C/N	BER	TVRO
LNB-F Frequency 3700MHz - 4200MHz (Filter 5G)	3711	-34.9dBm	11.8dB	12.9dB	1x10 ⁻⁸	71%	-35.0dBm	11.8dB	12.2dB	1x10 ⁻⁸	70%	-35.0dBm	12.1dB	13.3dB	1x10 ⁻⁸	70%	-35.5dBm	10.2dB	12.1dB	1x10 ⁻⁸	70%
	3731	-38.1dBm	7.2dB	7.0dB	1x10 ⁻⁷	54%	-38.3dBm	7.2dB	7.6dB	1x10 ⁻⁷	55%	-38.6dBm	7.1dB	8.2dB	1x10 ⁻⁸	55%	-37.7dBm	7.0dB	8.0dB	1x10 ⁻⁸	55%
	3760	-28.2dBm	10.7dB	12.0dB	1x10 ⁻⁸	57%	-28.2dBm	10.6dB	10.8dB	1x10 ⁻⁷	56%	-28.9dBm	10.8dB	11.5dB	1x10 ⁻⁷	57%	-28.2dBm	9.3dB	10.5dB	1x10 ⁻⁷	56%
	3800	-24.9dBm	11.7dB	11.7dB	1x10 ⁻⁸	70%	-24.9dBm	12.3dB	12.2dB	1x10 ⁻⁸	70%	-24.6dBm	12.4dB	12.5dB	1x10 ⁻⁸	70%	-23.8dBm	11.9dB	12.1dB	1x10 ⁻⁸	70%
	3840	-27.4dBm	10.9dB	11.3dB	1x10 ⁻⁸	54%	-27.3dBm	10.8dB	12.5dB	1x10 ⁻⁸	55%	-27.2dBm	11.0dB	11.4dB	1x10 ⁻⁸	54%	-26.0dBm	10.9dB	12.6dB	1x10 ⁻⁷	55%
	3920	-32.1dBm	8.7dB	10.3dB	1x10 ⁻⁸	41%	-32.1dBm	8.7dB	10.3dB	1x10 ⁻⁸	41%	-32.4dBm	9.0dB	10.5dB	1x10 ⁻⁷	41%	-26.7dBm	8.7dB	10.0dB	1x10 ⁻⁸	41%
	4009	-36.1dBm	10.1dB	11.0dB	1x10 ⁻⁷	69%	-36.7dBm	10.0dB	10.9dB	1x10 ⁻⁷	69%	-36.8dBm	10.3dB	10.6dB	1x10 ⁻⁷	69%	-28.5dBm	10.2dB	9.8dB	1x10 ⁻⁷	68%
	4080	-31.5dBm	12.3dB	12.6dB	1x10 ⁻⁸	75%	-31.9dBm	12.5dB	11.7dB	1x10 ⁻⁷	75%	-32.1dBm	12.5dB	11.2dB	1x10 ⁻⁷	74%	-22.6dBm	13.2dB	12.3dB	1x10 ⁻⁷	75%
	4120	-31.1dBm	12.4dB	11.1dB	1x10 ⁻⁸	69%	-31.2dBm	12.3dB	12.0dB	1x10 ⁻⁷	70%	-30.9dBm	12.0dB	11.8dB	1x10 ⁻⁸	69%	-30.3dBm	11.7dB	11.3dB	1x10 ⁻⁸	69%
	4174	-43.3dBm	5.8dB	6.7dB	1x10 ⁻⁶	38%	-41.1dBm	8.0dB	8.7dB	3x10 ⁻⁶	39%	-41.0dBm	8.8dB	9.4dB	1x10 ⁻⁷	40%	-41.0dBm	7.8dB	8.2dB	1x10 ⁻⁸	39%

รูป 25 ผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบมี Filter ตราอักษร B



รูป 26 กราฟผลการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ LNB แบบมี Filter ตราอักษร B

****ข้อสังเกต** ในการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ คณะวิจัยจะใช้เกณฑ์การตัดสินหลักจากความสามารถในการรับชมภาพจากจอทีวีได้เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 วินาทีเป็นหลัก โดยมีเกณฑ์การให้ทั้งสิ้น 4 รูปแบบคือ 1) Macro blocking 2) Blackout 3) Freeze และ 4) Audio Silence โดยคณะวิจัยจะกำหนดให้ผู้ทดสอบใช้แบบฟอร์มในการเลือกกากบาทในช่องที่ผู้ทดสอบพบเห็นจากการทดสอบจริงเป็นหลัก ทั้งนี้หากภาพที่ได้เป็นภาพปกติ นั้นหมายความว่าสัญญาณดิจิทัลสามารถถูกถอดรหัสจากเครื่องรับได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นเพื่อความโปร่งใสของการเก็บผลข้อมูล จึงมีการบันทึกผลเป็นค่าพารามิเตอร์ PWR, MER, C/N และ BER ไว้เป็นหลักฐานสำคัญ เพื่อยืนยันว่าผู้ทดสอบบันทึกค่าที่ได้อย่างถูกต้องอย่างแท้จริง

3.1.8 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนจากสถานีฐาน 5G ที่อยู่ภายในอาคารของสถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคารรุ่น 5G pRRU 5935 ของบริษัท Huawei ให้ค่ากำลังส่งที่หน้าสถานีฐานที่ -45 dBm/Hz และเมื่อแพร่กระจายไปด้านล่างอาคารที่ระยะ 25 เมตร พบว่าสัญญาณถูกลดทอนลงไปเหลือที่ -120.28

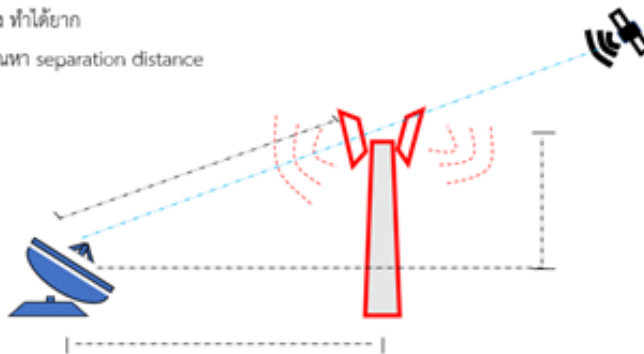
dB/Hz ทำให้สัญญาณ (Channel Power) ที่วัดหน้าจานรับดาวเทียมมีขนาดน้อยกว่า -110 dBm/Hz โดยค่าที่ได้รับดังกล่าว สามารถจับได้จากการใช้เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียมตราอักษร Promax เนื่องจากในระบบการวัดสัญญาณดาวเทียมนั้นมีการใช้จานรับดาวเทียมและหัวรับ LNB ซึ่งภายในมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ LNA ภายใน ทำให้คณะวิจัยเห็นระดับสัญญาณรบกวนสูงขึ้น แต่ที่ระยะ 25 เมตรและค่ากำลังส่งดังกล่าว ยังไม่มีความแรงของสัญญาณพอเพียงที่จะทำให้ระบบภาพดาวเทียมเกิดความเสียหาย ทำให้ยังดูภาพได้ปกติ และจากการที่คณะวิจัยสามารถใช้หัวรับ LNB ชนิดที่ไม่มี 5G Filter แล้วยังสามารถรับชมสัญญาณดาวเทียมได้เป็นปกติ นั้นหมายความว่าหัวรับ LNB_F ชนิดที่มี 5G หรือดีกว่า ก็สามารถใช้งานได้ปกติ

3.2 การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร (Outdoor)

การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร จะเป็นการทดสอบในกรณีที่แย่ที่สุด (Worst Case) คือเป็นกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร จากนั้นคณะวิจัยจะทำการตั้งจานรับดาวเทียมในบริเวณใกล้เคียง โดยให้จานนั้นหันหัวไปในทิศทางเดียวกับสถานีฐาน 5G มากที่สุดดังรูป 27

การทดสอบกรณี Outdoor

- ดำเนินการทดสอบโดยคำนึงถึงกรณี worst case (สายอากาศหันเข้าหากัน)
- การทดสอบหา Separation distance (D) ในกรณี Worst case
- การทดสอบหา separation distance โดยตรง ทำได้ยาก
- ทดสอบใน test setup ที่เป็นไปได้ และคำนวณหา separation distance



รูป 27 ตำแหน่งของสถานีฐาน 5G และจานดาวเทียมสำหรับการทดสอบกรณีภายนอกอาคารแบบ Worst Case

3.2.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ

สำหรับการทดสอบในกรณี Outdoor โครงการนี้ได้ทำการกำหนดกรณีทดสอบขึ้น โดยใช้

1. สถานีฐาน 5G ในรูปแบบของ Outdoor รุ่น 5G AAU5613 ของบริษัท Huawei จำนวน 2 ชุด โดยใช้ค่าสัญญาณดังนี้



Huawei Active Antenna Unit (AAU) 5613

Technical standard	3GPP Release 15
Frequency Band	3400Mhz - 3800Mhz
TX RX channel	64T64R
Polarization	+45°, -45°
Gain (dBi)	24
Horizontal sweep range (°)	-60 - 60
Vertical sweep range (°)	-15 - 15



รูป 28 สถานีฐาน 5G ภายในอาคาร รุ่น 5G AAU5613 และ BBU5900 ของบริษัท Huawei

2. ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม

2.1. หัวรับ Low-Noise Block downconverter (LNB), Low-Noise Block downconverter with 5G Filter (LNB_F) และ Band-Pass Filter (BPF)

ทางคณะวิจัยได้จัดหาหัวรับ LNB, LNB_F และ BPF หลากหลายตราอักษรเพื่อใช้ในการทดสอบครั้งนี้ โดยใช้เลือกใช้หลักเกณฑ์การคัดเลือกเป้าหมาย (Key Informants) ด้วยวิธีการเลือกหัวรับ LNB ประเภท C band แบบสุ่ม (Purposive Sampling) ซึ่งเป็นหัวรับ LNB ที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด และได้รับความนิยมจากผู้บริโภคในการเลือกซื้อจำนวนมาก⁶

โดยหัวรับ LNB ในที่นี้หมายถึงหัวรับ LNB ที่ไม่มีตัวกรองสัญญาณ 5G หรือ 5G Filter เลย ทำงานในย่าน 3.4 ถึง 4.2 GHz และ หัวรับ LNB_F ในที่นี้หมายถึงหัวรับ LNB ที่มีตัวกรองสัญญาณ 5G หรือ 5G Filter ทำงานในย่าน 3.7 ถึง 4.2 GHz

⁶ ผลการสำรวจจากร้านค้าปลีกอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมในพื้นที่กรุงเทพมหานครและต่างจังหวัดทั้ง 5 ภูมิภาค



รูป 29 หัวรับ LNB และ LNB_F

2.2. ตัวรับสัญญาณ TVRO จานรับดาวเทียมและทีวีแอลซีดี



รูป 30 ระบบการรับสัญญาณดาวเทียม

ในการรับสัญญาณดาวเทียมนั้น คณะวิจัยจะอาศัยจานรับดาวเทียมขนาด 1.5 เมตร (จานดำ) ขนาดมาตรฐานมาใช้รวมสัญญาณเข้าสู่ อุปกรณ์ LNB หรือ LNB_F เพื่อแปลงสัญญาณให้เหมาะสมเข้าไปสู่อุปกรณ์ TVRO และแสดงผลออกมาในรูปแบบสัญญาณทีวีตามลำดับ

2.3. เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียม



รูป 31 เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียม

ในที่นี้คณะวิจัยใช้เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียมตราอักษร Promax ที่มีความสามารถในการตรวจวิเคราะห์สัญญาณโทรทัศน์ และทีวีดาวเทียม รองรับ DVB – T2 / S2 / C2 จอสัมผัส Touch Screen + ปุ่มควบคุมการทำงาน สเปกตรัมความละเอียดสูง Sweep Rate 70 ms รองรับ HEVC H.265 demodulation

2.4. เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ 5G

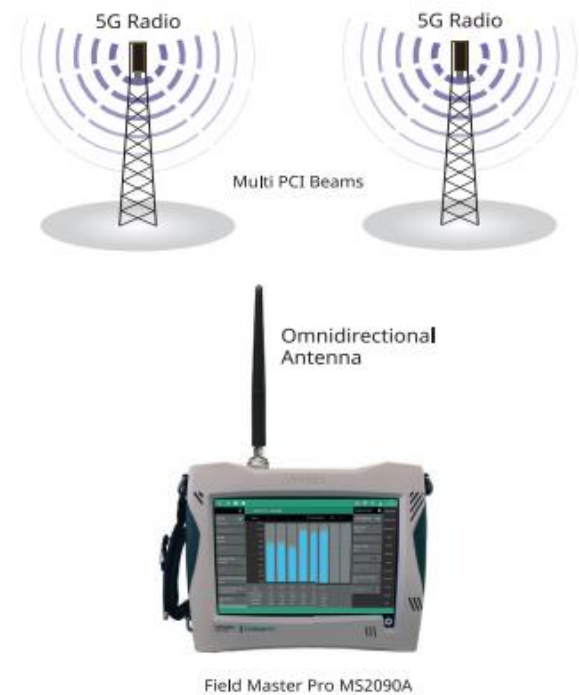


รูป 32 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ ตราอักษร Anritsu รุ่น Field Master Pro

ในที่นี้คณะวิจัยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ ตราอักษร Anritsu รุ่น Field Master Pro (High-Performance RF Spectrum Analyzer) รองรับค่าความถี่ตั้งแต่ 9KHz ถึง 32 GHz มีค่าข้อกำหนดเฉพาะผลิตภัณฑ์ดังนี้

Parameter	Specification
Frequency range	9 kHz to 9/14/20/26.5/32/43.5/54 GHz
Analysis bandwidth	110 MHz
Demodulation	5G NR demodulation, RF and modulation quality plus SSB signal analysis
TOI	+20 dBm
DANL (with pre amp)	-164 dBm
Amp range	DANL to +30 dBm
Phase noise @ 1 GHz	-110 dBc/Hz @ 100 kHz offset (typical)
RBW/VBW	1 Hz to 10 MHz
Input SWR	1.5
Amplitude accuracy	< 14 GHz ± 1.3 dB (± 0.5 dB typ)
RTSA bandwidth	22 MHz, 55 MHz, 110 MHz (option dependent)

Feature	Specification
Display	10.1 inch, 1280 x 800 color touchscreen
Traces	6
Detectors	Peak, RMS/Avg., Negative
Gated sweep	For time gated spectrum measurements
Markers	12, fully featured with table
Limit lines	Complex limit lines with Pass/Fail
IQ	Capture and streaming of IQ data
Trace record and playback	Record and replay spectrum traces to/from internal memory
GNSS	GPS, GLONASS, Galileo
Interfaces and connectivity	USB 3.0, USBTMC, Ethernet, 802.11b/g/a/n/ac
Battery life	>2 hours (function dependent)



รูป 33 การวัดสัญญาณรบกวนสถานีฐาน 5G

เครื่องมือวัดดังกล่าวได้ถูกออกแบบเฉพาะให้สามารถจับสัญญาณจากสถานีฐาน 5G ครอบคลุมทุกปีม (Beamforming) ของสถานีฐาน 5G

3.2.2 สถานที่ทดสอบ

การทดสอบวัดสัญญาณสำหรับกรณี Outdoor จะกระทำในพื้นที่ทดสอบ Sandbox ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสถานีฐาน 5G จะถูกติดตั้งอยู่ที่ตาดฟ้าของอาคารจามจุรี 5 ซึ่งภายในสถานีฐานได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ AAU โมเดล Huawei AAU5613 จำนวน 2 เครื่องเพื่อใช้สำหรับส่งสัญญาณ 5G ที่ความถี่ 3.4 – 3.8 GHz และอุปกรณ์ BBU โมเดล Huawei BBU5900 จำนวน 1 เครื่องเพื่อใช้สำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายแกน (core network) และควบคุมการทำงานของ AAU ทั้งสอง โดยการเชื่อมต่อของโครงข่าย 5G ที่ใช้สำหรับการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 35



รูป 34 ตำแหน่งของสถานีฐาน 5G และจานดาวเทียมสำหรับการทดสอบกรณี Outdoor ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 ผู้เข้าร่วมทดสอบ

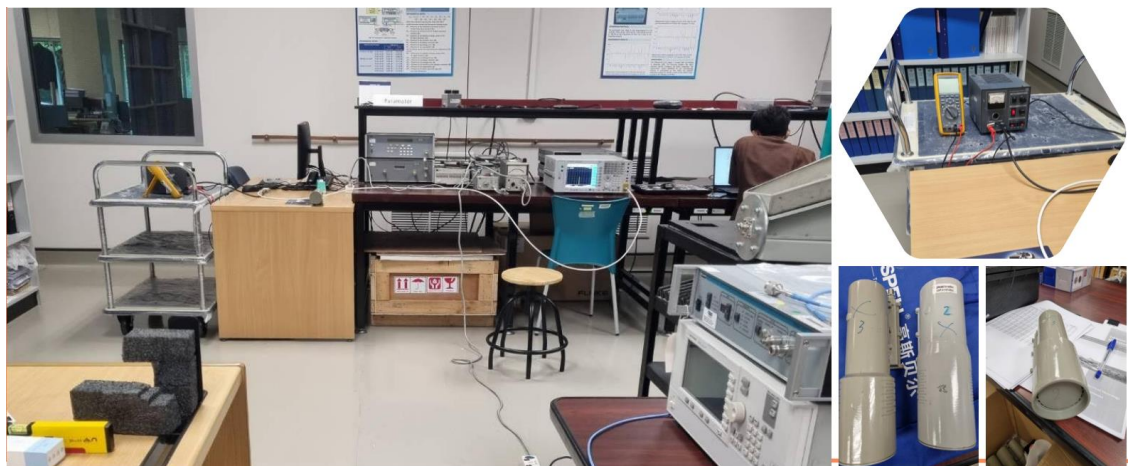
1. บริษัท หัวเว่ย เทคโนโลยี (ประเทศไทย)
2. บริษัท ทูมูฟ เอช ยูนิเวอร์แซล คอมมิวนิเคชั่น จำกัด
3. บริษัท ดีแทค ไตรเน็ต จำกัด
4. บริษัท เอ็ม เจ. แชนเทลไลท์ เซ็นเตอร์ จำกัด (ไอเดียแซท)
5. บริษัท พีเอสไอ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
6. บริษัท อินโฟแซท จำกัด
7. บริษัท ไทยแซท เอ็กซ์เพิร์ทเอ็นจิเนียริง จำกัด
8. บริษัท ไทยคม จำกัด (มหาชน)
9. บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)
10. บริษัท จีเอ็มเอ็ม แกรมมี่ จำกัด

3.2.4 วิธีการทดสอบ

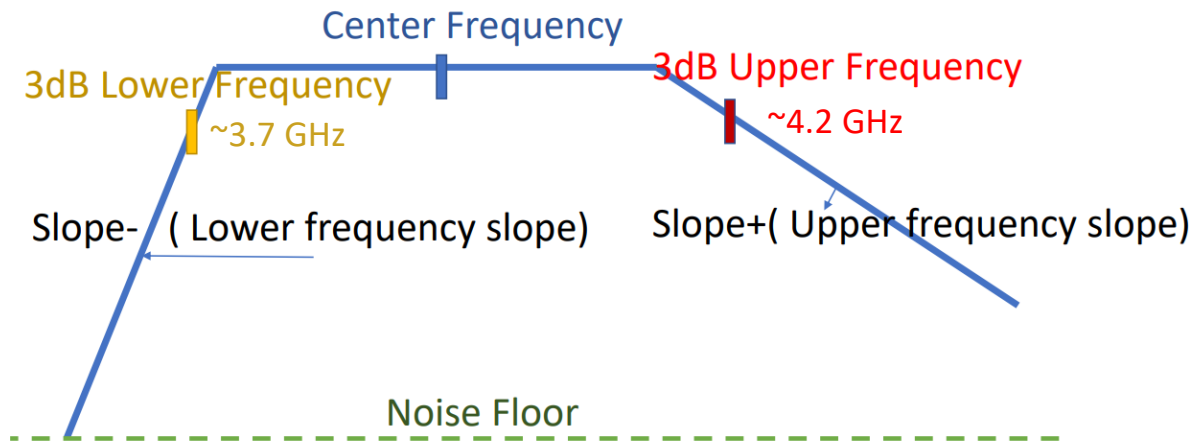
1. ทำการวัดอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF โดยโมเดลของอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF จะถูกนำไปทดสอบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เพื่อหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของตัวอุปกรณ์ โดย

อุปกรณ์ทั้งหมดที่นำมาทดสอบจำนวน 22 โมเดลจะถูกนำมาวัดหาค่าคุณลักษณะดังรูปซึ่งผลที่ได้จากการวัดจะทำให้ทราบถึงช่วงความถี่กลาง Noise floor ความชื้น และอื่นๆ





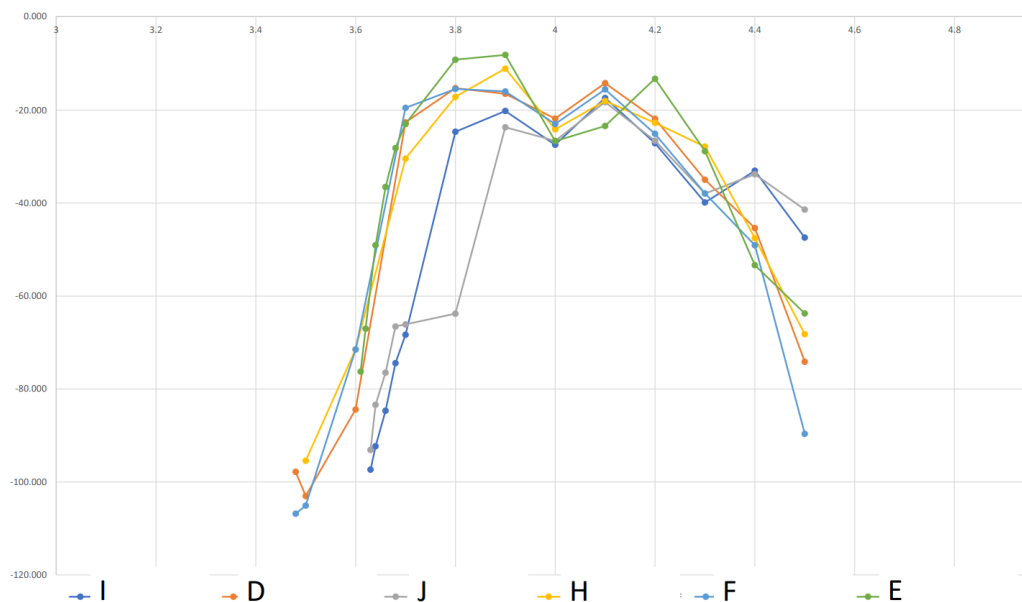
รูป 35 การทดสอบอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF ที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ



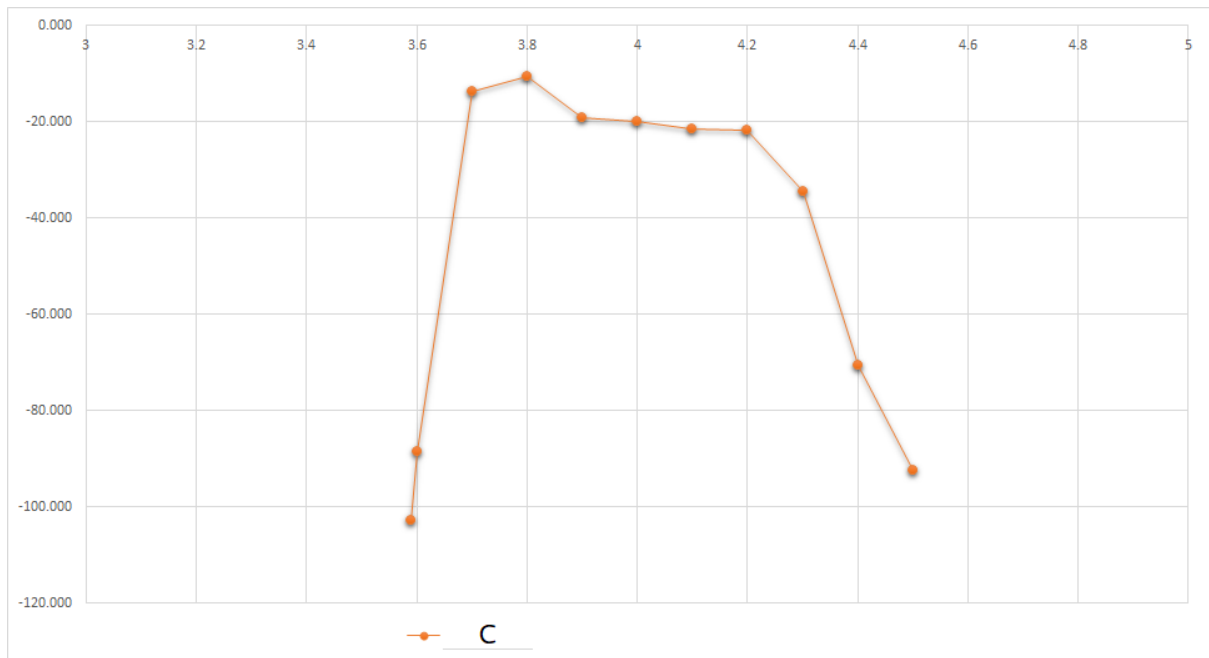
รูป 36 ค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดอุปกรณ์

ผลการวัดอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF ทั้ง 22 โมเดลจะแสดงดังรูปต่อไปนี้ ซึ่งโมเดลของอุปกรณ์จะถูกแทนด้วยตัวอักษร A ถึง V โดยคุณลักษณะต่างๆ ที่ได้จากการวัดจะถูกบันทึกลงในตารางดังรูปที่ 19

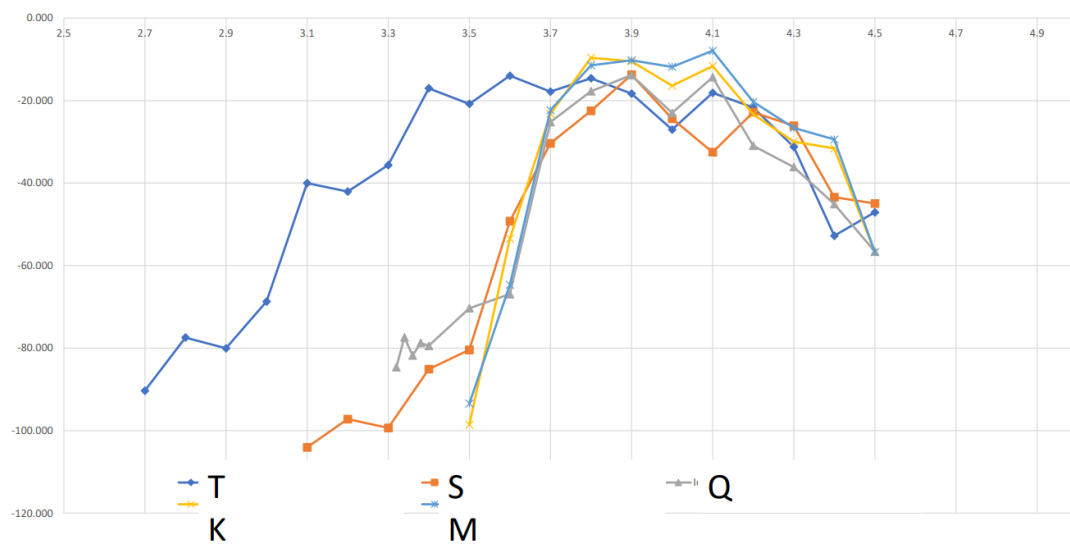
หมายเหตุ 3dB Lower Frequency หมายถึง ความถี่ขอบล่าง มีค่าประมาณ 3.7 GHz และ 3dB Upper Frequency หมายถึง ความถี่ขอบบน มีค่าประมาณ 4.2 GHz



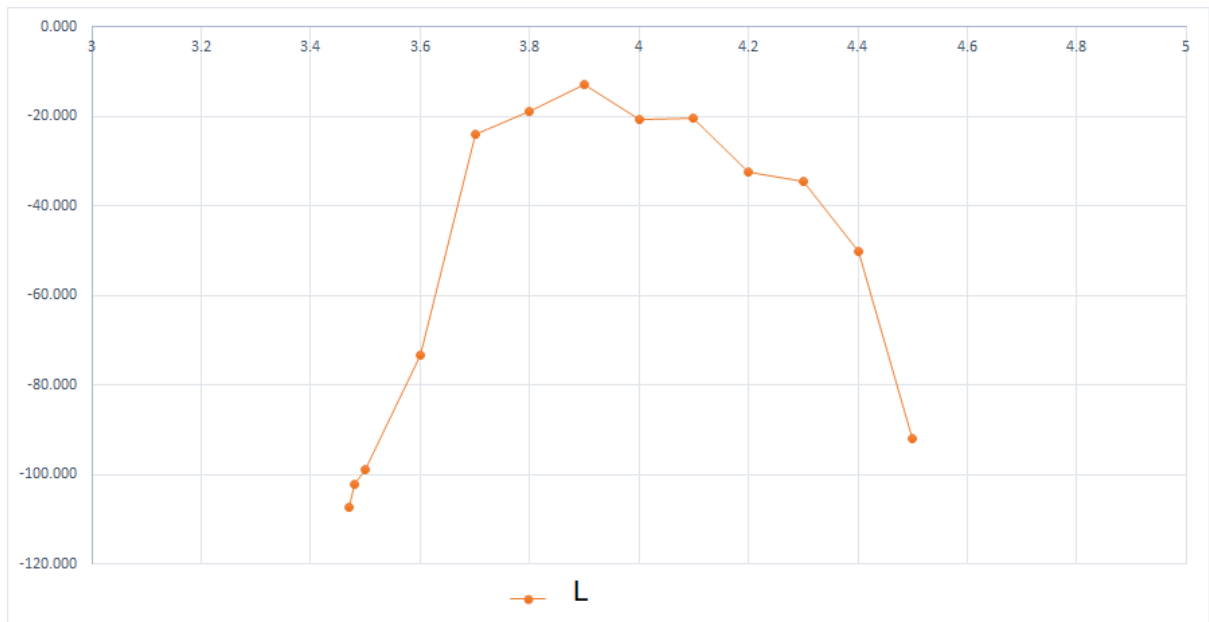
รูป 37 ผลการวัดอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF โมเดล I, D, J, H, F และ E



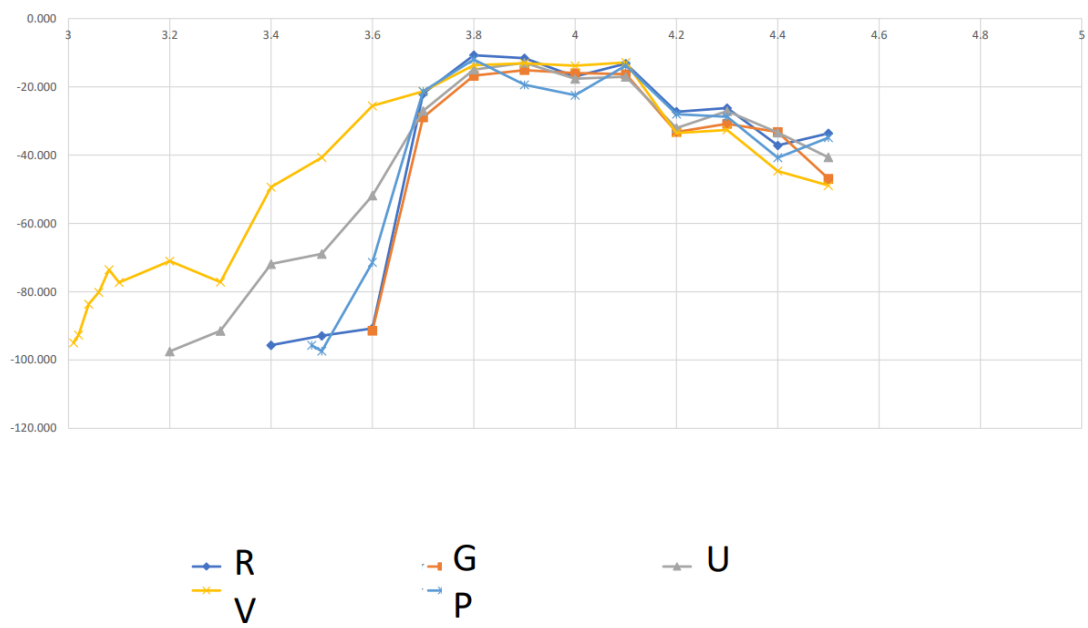
รูป 38 ผลการวัดอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF โมเดล C



รูป 39 ผลการวัดอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF โมเดล T, S, Q, K และ M



รูป 40 ผลการวัดอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF โมเดล O, L และ N



รูป 41 ผลการวัดอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF โมเดล R, G, U, V และ P

ยี่ห้อและรุ่น	Noise Floor (dBm)	Slope+ (dB/GHz)	3dB Lower Frequency (GHz)	Center Frequency (GHz)	3dB Upper Frequency (GHz)	Slope- (dB/GHz)
C	-105	400	3.70	3.95	4.20	-120
D	-100	400	3.70	3.95	4.20	-100
E	-100	400	3.68	3.99	4.30	-100
F	-110	400	3.68	3.94	4.20	-125
G	-90	400	3.70	3.95	4.20	-115
H	-100	400	3.70	4.00	4.30	-125
I	-100	400	3.70	4.00	4.30	-150
J	-100	305	3.70	3.98	4.25	-165
K	-100	375	3.70	3.95	4.20	-75
L	-110	300	3.70	3.95	4.20	-100
M	-93	300	3.70	3.95	4.20	-150
P	-100	400	3.70	3.95	4.20	-100
Q	-90	300	3.70	3.95	4.20	-150
R	-100	400	3.70	3.95	4.20	-100
S	-100	375	3.70	4.00	4.30	-150
T	-90	100	3.70	4.00	4.30	-100
U	-100	200	3.70	3.95	4.20	-100
V	-100	200	3.70	3.95	4.20	-100

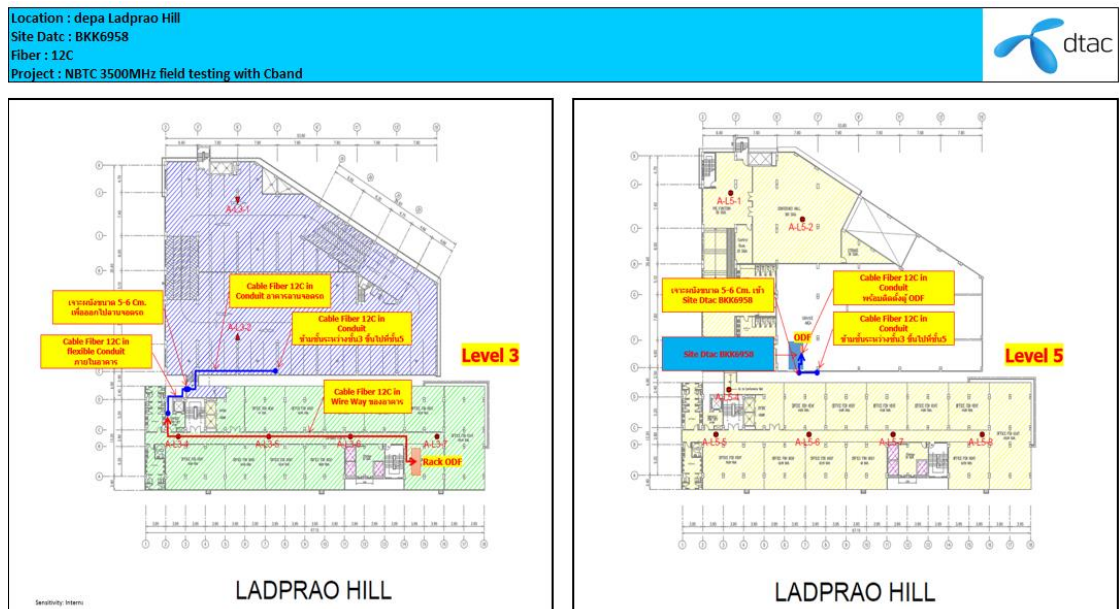
รูป 42 ตารางสรุปค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ได้จากการวัดค่า

หมายเหตุ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หาจากรูป โดยการใช้การประมาณเชิงเส้น โดยการลากผ่านจำนวนจุดที่ผ่านมากที่สุดเป็นเส้นตรงเพื่อให้เกิดรูปร่างสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ภายหลังจากการลากเส้นแล้วจึงทำการวัดค่าความชันทางฝั่งซ้าย (Slope+) และฝั่งขวา (Slope-) ตามลำดับ

2. ทำการเชื่อมต่อโครงข่ายสถานีฐาน 5G โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท โทร ฟูฟ เอช ยูนิเวอร์แซล คอมมิวนิเคชั่น จำกัด ในการใช้สายอากาศ AAU 5613 จำนวน 2 ชุด พร้อม BBU 5900 จำนวน 1 ชุด และเชื่อมต่อโครงข่าย Transmission ผ่านสายไฟเบอร์ออฟติกส์ไปยังตึก Depa โดยผ่านระบบ Transmission ของบริษัท ดีแทค ไตรเน็ต จำกัด ไปเชื่อมต่อยัง Core Network ของบริษัท หัวเว่ย เทคโนโลยี (ประเทศไทย) บนตึก Depa ดังรูปที่ 43 ถึง 45

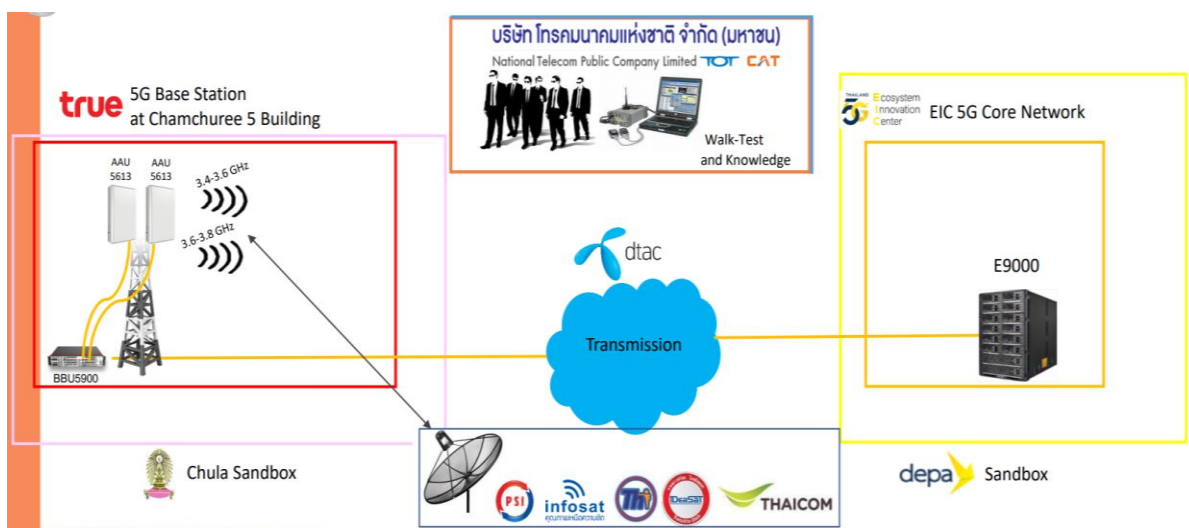


รูป 43 การติดตั้งสถานีฐาน 5G ที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณี Outdoor





รูป 44 การติดตั้งระบบ Transmission ของ DTAC ให้สถานีฐาน 5G ที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณี Outdoor



รูป 45 การเชื่อมต่อโครงข่าย 5G ที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณี Outdoor

3. ทำการปรับค่ากำลังส่งของสถานีฐาน 5G ในรูปแบบของ Outdoor รุ่น 5G AAU5613 จำนวน 2 ตัว ของบริษัท Huawei สาเหตุที่ต้องใช้สายอากาศรุ่น AAU5613 จำนวน 2 ชุดเนื่องจากสายอากาศ 1 ชุดจะสามารถปรับค่าแบนด์วิดธ์ได้ 200 MHz ในที่นี้คณะวิจัยต้องการเพิ่มค่าสัญญาณ 5G ให้ได้ระหว่าง 3.4 ถึง 3.8 GHz จึงต้องใช้สองชุด โดยโครงการนี้ได้ทำการกำหนดกรณีทดสอบขึ้นด้วยการใช้พารามิเตอร์ช่วงความถี่ใช้งาน LNB, LNB_F และ BPF กับช่วงความถี่ Guard band ในการกำหนดกรณีทดสอบแต่ละกรณี โดยกรณีทดสอบทั้งหมดจะมี 16 กรณีซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1. กรณีทดสอบที่ 1 (Case 1): LNB = 3400 ถึง 4200 MHz

3.1.1. กรณีทดสอบที่ 1.1 (Case 1.1)

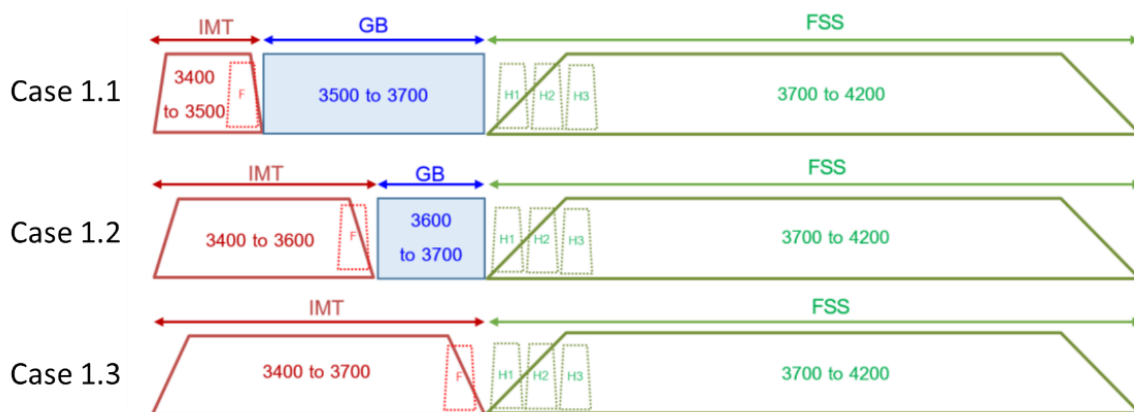
- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3500 MHz
- Guard band: 3500 ถึง 3700 MHz
- LNB: 3400 ถึง 4200 MHz

3.1.2. กรณีทดสอบที่ 1.2 (Case 1.2)

- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3600 MHz
- Guard band: 3600 ถึง 3700 MHz
- LNB: 3400 ถึง 4200 MHz

3.1.3. กรณีทดสอบที่ 1.3 (Case 1.3)

- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3700 MHz
- Guard band: 0 Hz
- LNB: 3400 ถึง 4200 MHz



รูป 46 การจัดสรรช่วงความถี่ของกรณีทดสอบที่ 1 สำหรับกรณี Outdoor

3.2. กรณีทดสอบที่ 2 (Case 2): LNB, LNB_F, BPF = 3700 ถึง 4200 MHz

3.2.1. กรณีทดสอบที่ 2.1 (Case 2.1)

- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3500 MHz
- Guard band: 3500 ถึง 3700 MHz
- LNB, LNB_F, BPF: 3700 ถึง 4200 MHz

3.2.2. กรณีทดสอบที่ 2.2 (Case 2.2)

- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3600 MHz
- Guard band: 3600 ถึง 3700 MHz
- LNB, LNB_F, BPF: 3700 ถึง 4200 MHz

3.2.2.1. กรณีทดสอบที่ 2.22 (Case 2.22)

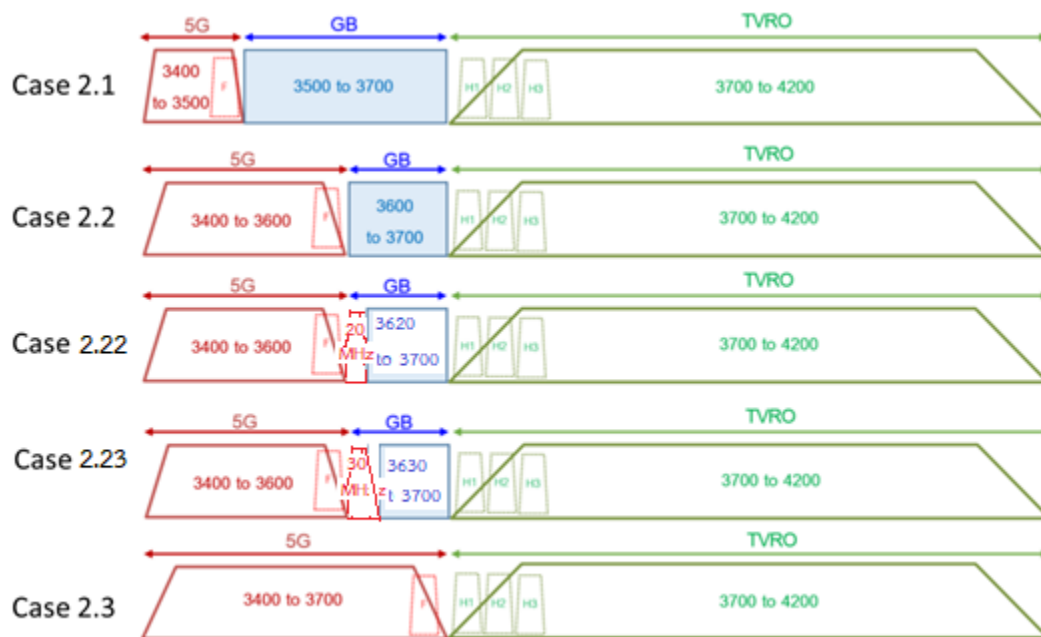
- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3620 MHz
- Guard band: 3620 ถึง 3700 MHz
- LNB, LNB_F, BPF: 3700 ถึง 4200 MHz

3.2.2.2. กรณีทดสอบที่ 2.23 (Case 2.23)

- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3630 MHz
- Guard band: 3630 ถึง 3700 MHz
- LNB, LNB_F, BPF: 3700 ถึง 4200 MHz

3.2.3. กรณีทดสอบที่ 2.3 (Case 2.3)

- ช่วงความถี่สัญญาณ 5G: 3400 ถึง 3700 MHz
- Guard band: 0 Hz
- LNB, LNB_F, BPF: 3700 ถึง 4200 MHz

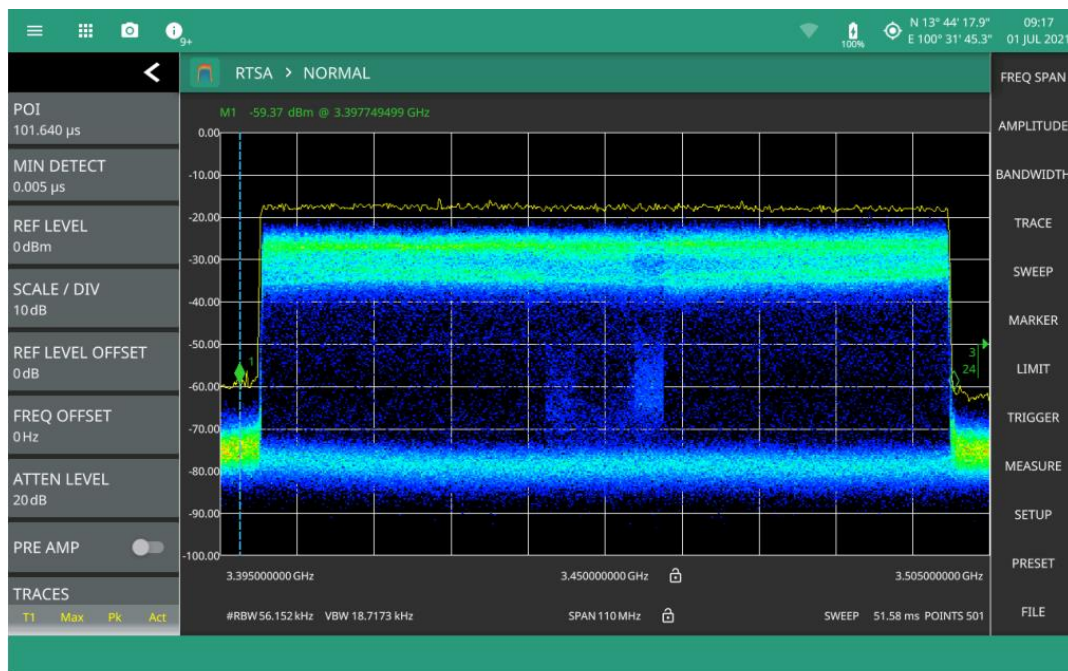


รูป 47 การจัดสรรช่วงความถี่ของกรณีทดสอบที่ 2 สำหรับกรณี Outdoor

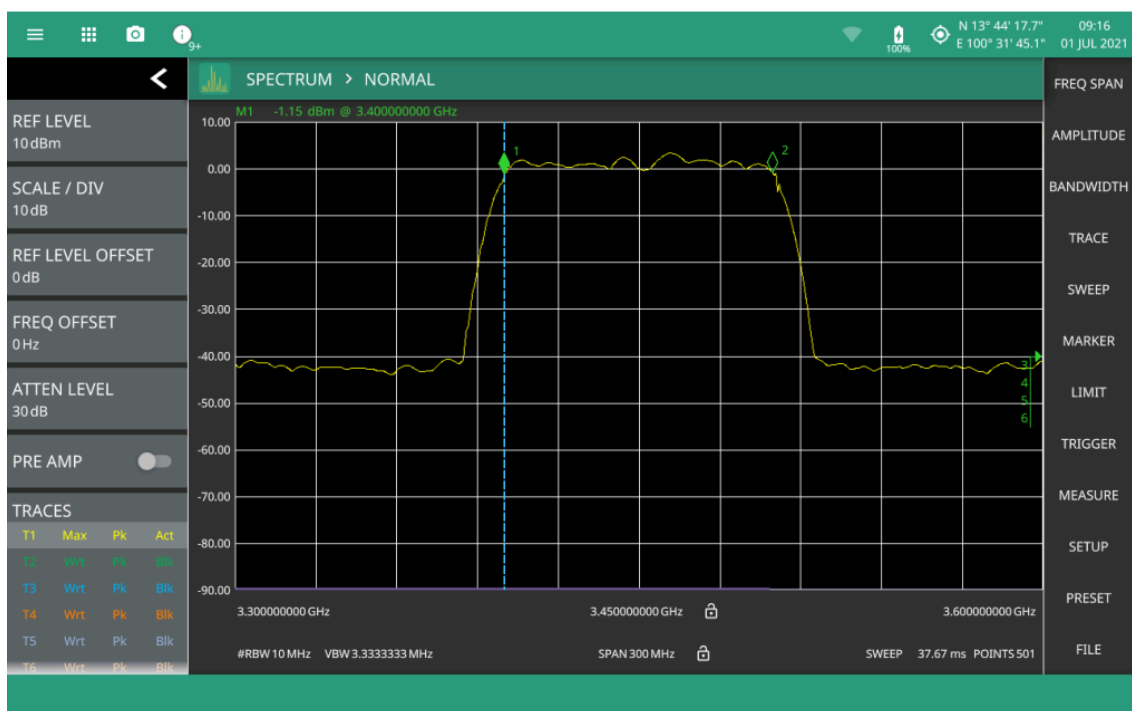
4. ทำการวัดสัญญาณจากสถานีฐาน 5G โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ ทรายอักษร Anritsu รุ่น Field Master Pro (High-Performance RF Spectrum Analyzer) รองรับค่าความถี่ตั้งแต่ 9KHz ถึง 32 GHz โดยปรับค่าแบนด์วิธที่ 100 MHz และนำสายอากาศ Omnidirectional มาวางใกล้กับสถานีฐาน 5G แบบภายนอกอาคาร จากนั้นบันทึกผลสัญญาณ 5G คือ แบนด์วิธของสัญญาณ 5G (MHz) และกำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ 5G

4.1. กรณีที่ 1 ความถี่ 3400 – 3500 MHz

4.1.1. Power 200 W (Real Time Spectrum)

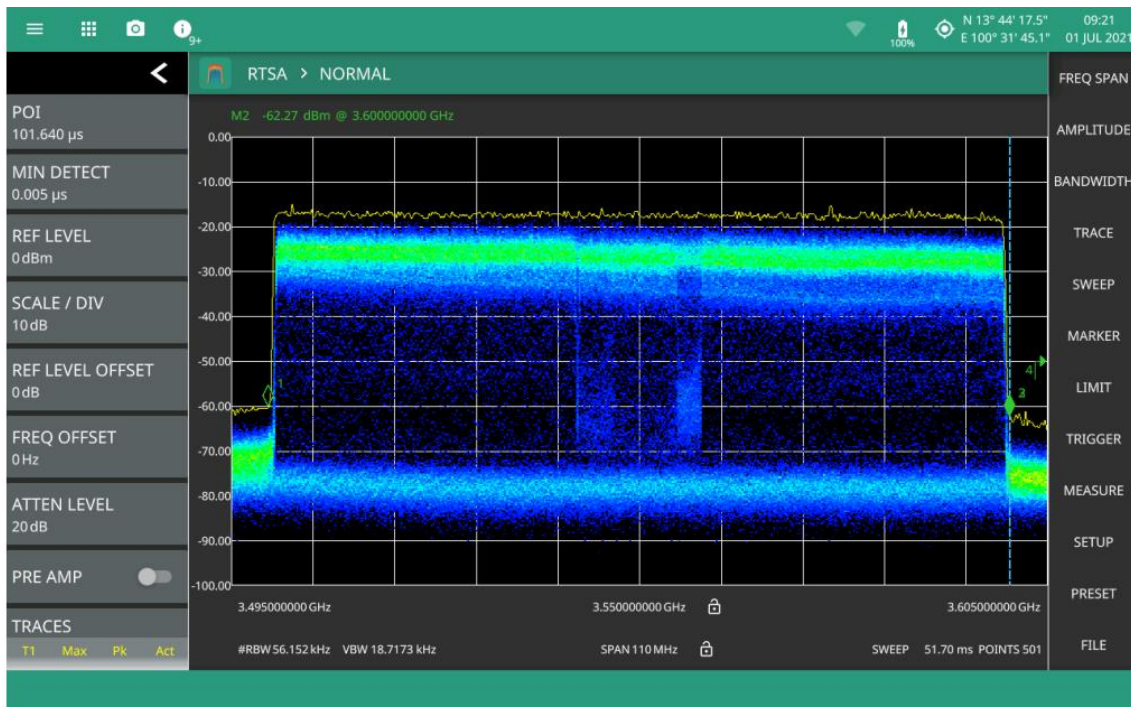


4.1.2.Power 200 W (Non-Real Time Spectrum)



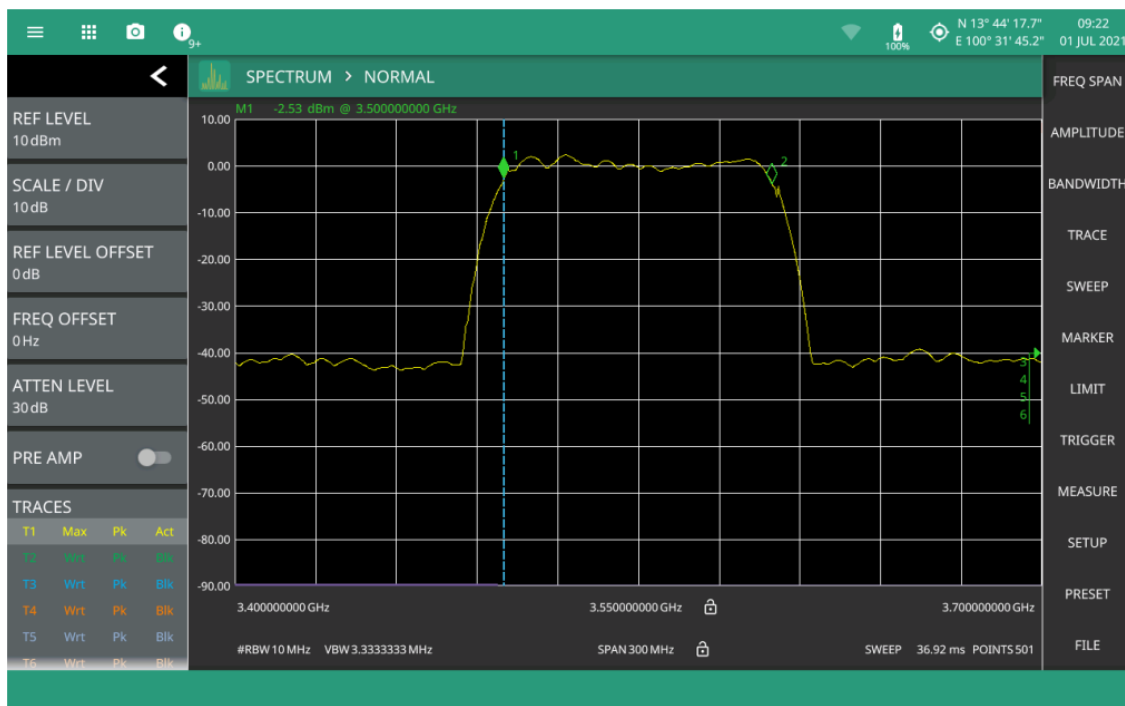
4.2. กรณีที่ 2 ความถี่ 3500 – 3600 MHz

4.2.1.Power 200 W (Real Time Spectrum)



Anritsu MS2090A SN: 2019021 SW Package: V2021.5.1
Options: 0024,0031,0089,0090,0104,0124,0125,0128,0199,0400,0407,0421,0431,0444,0445,0732,0883,0888
Date/Time: 01 Jul 2021 09:21:35 +07 GPS: N 13° 44' 17.5"; E 100° 31' 45.1"; 29.3 m / 96.1 ft

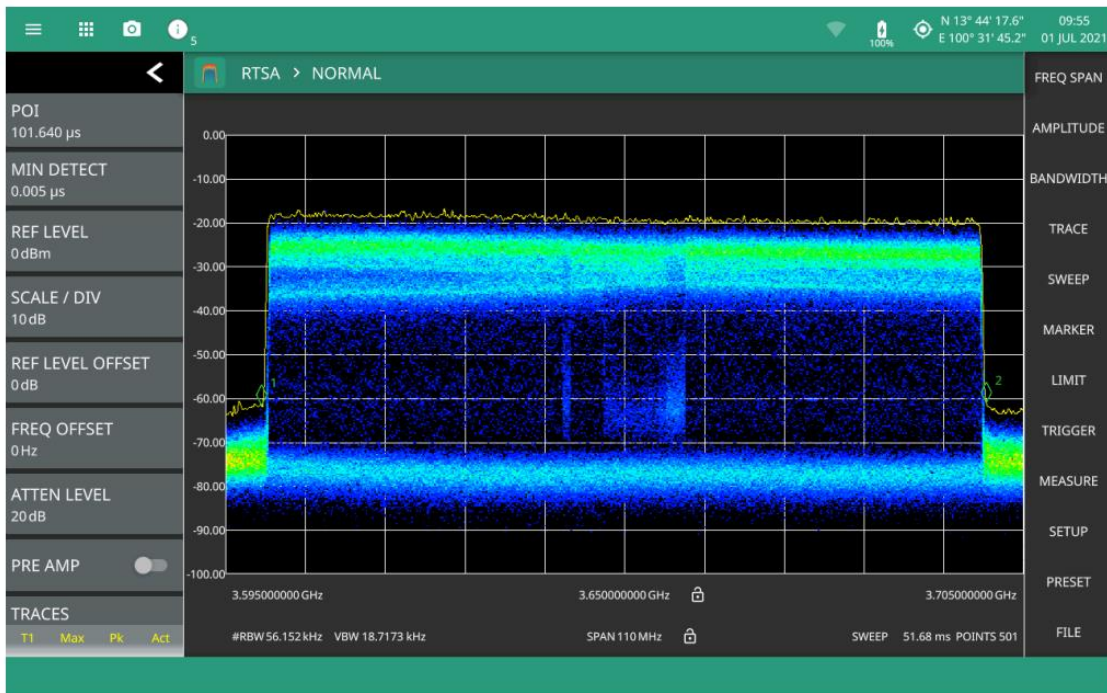
4.2.2. Power 200 W (Non-Real Time Spectrum)



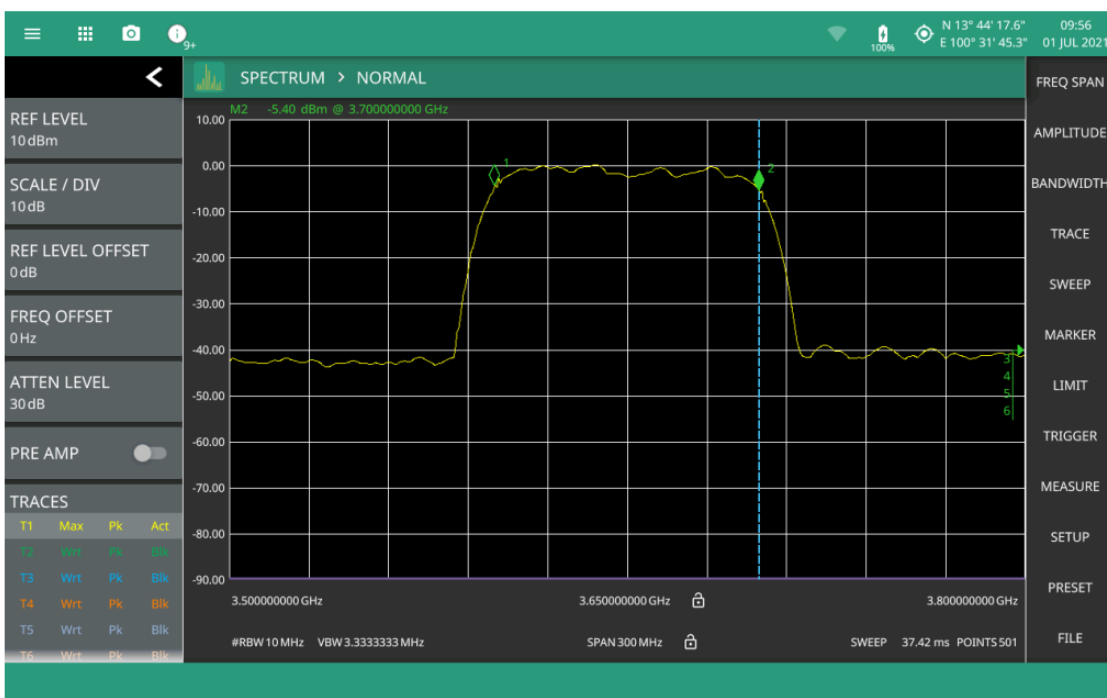
Anritsu MS2090A SN: 2019021 SW Package: V2021.5.1
Options: 0024,0031,0089,0090,0104,0124,0125,0128,0199,0400,0407,0421,0431,0444,0445,0732,0883,0888
Date/Time: 01 Jul 2021 09:22:54 +07 GPS: N 13° 44' 17.7"; E 100° 31' 45.2"; 29.2 m / 95.8 ft

4.3. กรณีที่ 3 ความถี่ 3600 – 3700 MHz

4.3.1. Power 200 W (Real Time Spectrum)

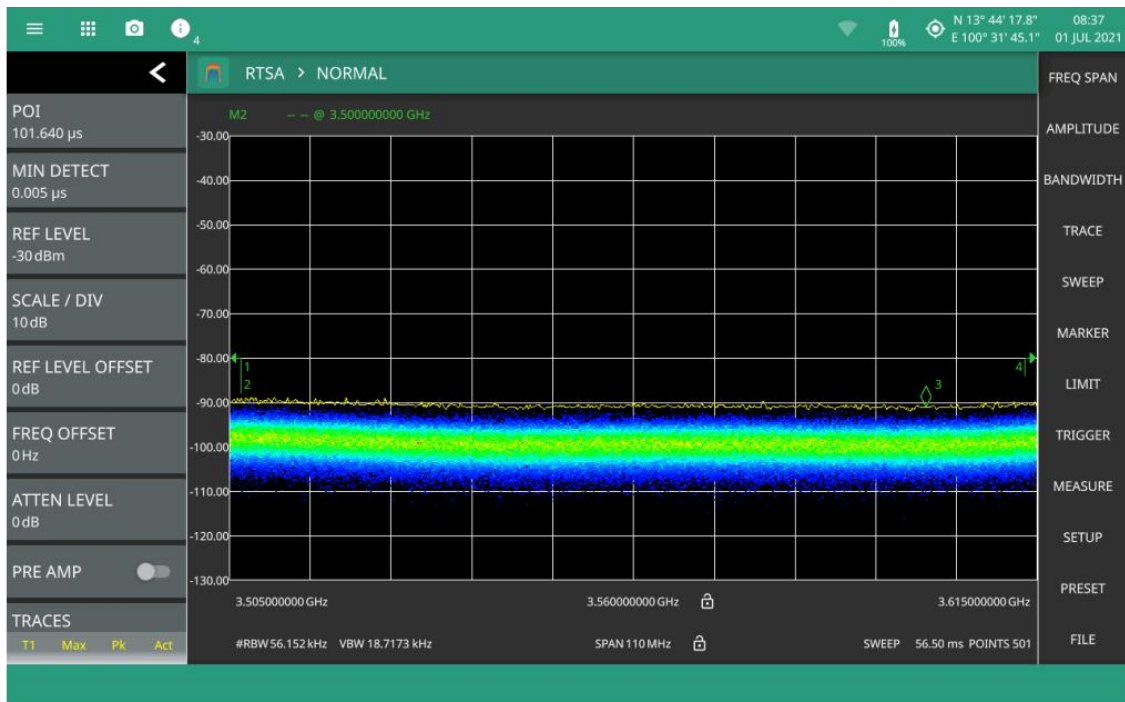


4.3.2. Power 200 W (Non-Real Time Spectrum)



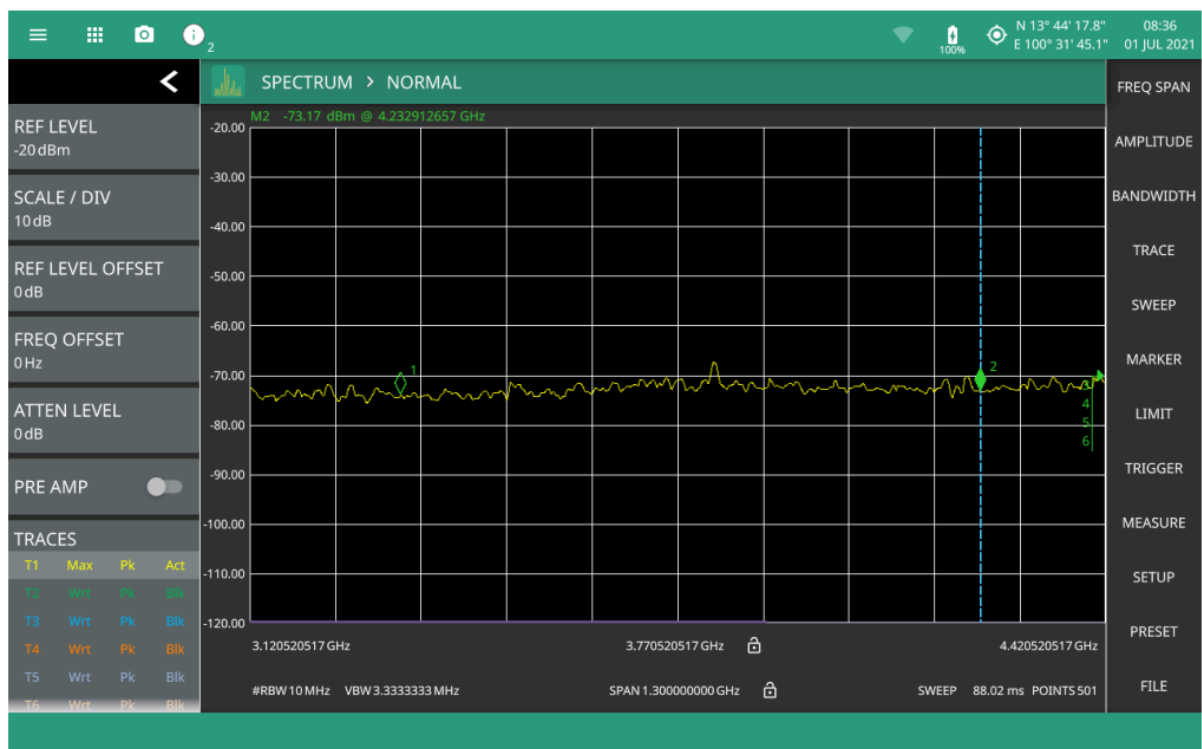
4.4. Noise Floor

4.4.1. Real Time Spectrum



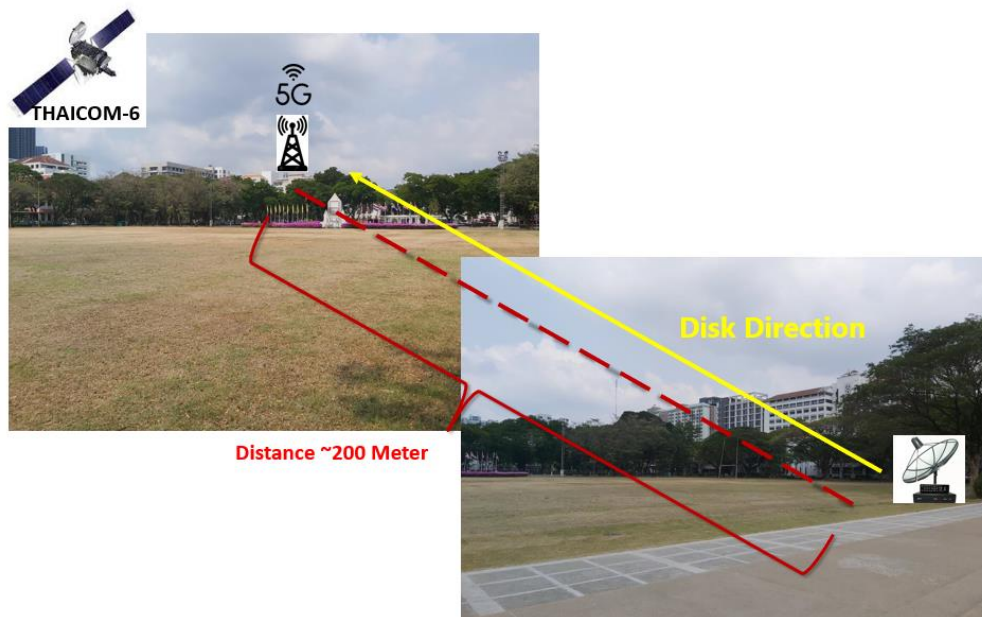
Anritsu MS2090A SN: 2019021 SW Package: V2021.5.1
Options: 0024,0031,0089,0090,0104,0124,0125,0128,0199,0400,0407,0421,0431,0444,0445,0732,0883,0888
Date/Time: 01 Jul 2021 08:38:01 +07 GPS: N 13° 44' 17.8"; E 100° 31' 45.1"; 27.1 m / 88.9 ft

4.4.2. Non-Real Time Spectrum



Anritsu MS2090A SN: 2019021 SW Package: V2021.5.1
Options: 0024,0031,0089,0090,0104,0124,0125,0128,0199,0400,0407,0421,0431,0444,0445,0732,0883,0888
Date/Time: 01 Jul 2021 08:36:55 +07 GPS: N 13° 44' 17.8"; E 100° 31' 45.1"; 27.2 m / 89.2 ft

5. ตั้งจานรับดาวเทียมในบริเวณใกล้เคียง โดยให้จานนั้นหันหัวไปในทิศทางเดียวกับสถานีฐาน 5G มากที่สุด โดยมีการวางตำแหน่งตามระยะทางซึ่งมีค่าเป็น 60, 80, 130 150 200 250 และ 280 เมตร โดยร้องขอให้บริษัท เอ็ม เจ. แชนเทลไลท์ เซ็นเตอร์ จำกัด (ไอเดียแซท) บริษัท พีเอสไอ คอร์ปอเรชั่น จำกัด บริษัท อินโฟแซท จำกัด และบริษัท ไทยแซท เอ็กซ์เพิร์ทเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด เข้าร่วมทดสอบ



รูป 48 การวางตำแหน่งของจานรับดาวเทียมตามระยะทาง

6. ทำการปรับค่ากำลังส่งของสัญญาณ 5G ซึ่งมีค่า 1, 10, 50, 100 และ 200 W ตามลำดับในแต่ละระยะทาง
7. ทำการเปลี่ยนโมเดลของ LBN, LBN_F และ BPF ที่มาจาก vendor ต่าง ๆ



รูป 49 การวางตำแหน่งของงานรับดาวเทียมตามระยะทาง



รูป 50 การเข้าร่วมสังเกตการณ์การวัดโดยทุกภาคส่วน

8. ทำการวัดสัญญาณใช้เครื่องวัดสัญญาณดาวเทียมตราอักษร Promax ที่มีความสามารถในการตรวจวิเคราะห์สัญญาณโทรทัศน์ และทีวีดาวเทียม แล้วทำการบันทึกผล คือ คุณภาพของสัญญาณ TV (%), C/N (dB), BER, MER, PWR และรุ่นและตราอักษรของ LBN, LBN_F และ BPF ที่ใช้ทดสอบ
9. ทำการบันทึกค่าที่ได้เป็นแบบแอนะล็อกโดยใช้สายตาวิเคราะห์ว่าภาพสัญญาณทีวีที่ได้รับได้มีลักษณะอย่างไรเช่น Macro blocking , Blackout, Freeze และ Audio Silence ตามลำดับ

3.2.5 สมมติฐานในการทดสอบ

- 1) ในการทดสอบครั้งนี้ คณะวิจัยจะยึดกรณีการทดสอบในสภาวะที่แย่ที่สุดเป็นหลัก กล่าวคือ ในการรับสัญญาณของดาวเทียมนั้น หน้าจานรับสัญญาณดาวเทียมต้องหันไปในทิศทางเดียวกับสายอากาศของสถานีฐาน 5G ด้วย ทำให้ได้แนวในการขยับจานรับดาวเทียมในแนวเดียวเท่านั้น เพื่อคงรักษามุมของจานรับดาวเทียมให้หันไปทางเดียวกับทั้งดาวเทียมและสถานีฐาน 5G
- 2) ในการทดสอบ คณะวิจัยได้กำหนดให้กำลังคลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศออกมาทุกทิศทาง ด้วยกำลังส่งสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้
- 3) กำลังส่งของสถานีฐานจะต้องถูกปรับให้มีกำลังส่งสูงสุดคือที่ 200 วัตต์เพื่อให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ที่ปกติจะใช้กำลังส่งสูงสุด
- 4) ในการทดสอบนี้จานรับสัญญาณดาวเทียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ถูกใช้โดยถือว่าเป็นตัวแทนของจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.8 เมตรและจาน VSAT ด้วย เนื่องจากในการรับสัญญาณดาวเทียม สัญญาณรบกวน (Noise) จาก IMT จะถูกขยายโดยอัตราขยาย (Gain) ของจานเป็นอัตราส่วนเท่ากัน ทำให้อัตราขยายของจานไม่ถูกนำมาคิดในการคำนวณตามทฤษฎี
- 5) ในการทดสอบครั้งนี้ ถือว่าไม่มีสัญญาณรบกวนอื่นใดจากภายนอก

3.2.6 ข้อจำกัดในการทดสอบ

- 1) พื้นที่ทดสอบจำเป็นต้องได้รับอนุญาตจาก กสทช. โดยได้พิจารณาเลือกใช้พื้นที่ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากพื้นที่จุฬาฯ มีความเหมาะสมด้านสถานที่และโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ระยะเวลาวัดพื้นที่ของการทดสอบ TVRO การขออนุญาตใช้ Radio Unit หรือการใช้ Dark fiber เพื่อเชื่อมต่อไปยัง Sandbox ของ สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล (DEPA) เพื่อเชื่อมกับระบบ Core Network ของ Huawei ในพื้นที่ดังกล่าว ซึ่งมีระยะเวลาทดสอบใกล้สุดอยู่ที่ 30 เมตรและระยะไกลสุด 280 เมตรเท่านั้น เนื่องจากหากขยับใกล้กว่า 30 เมตรจะติดกับขอบรั้วของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหากขยับออกมากกว่านั้นจะติดกับหอประชุมจุฬา
- 2) สถานที่ทดสอบที่ใช้มีข้อจำกัด ในบางระยะจะมีอุปสรรค เช่น สระบัวขวางอยู่ ทำให้การทดสอบระยะห่างระหว่าง 130 เมตรและ 80 เมตรไม่สามารถกระทำได้
- 3) สถานที่ทดสอบมีตึกสูงขนาดใหญ่บดบังแนวการรับสัญญาณระหว่างจานรับดาวเทียม และที่ระยะระหว่าง 30 เมตรและ 80 เมตรมีต้นไม้ใหญ่ล้อมรอบ ทำให้อาจเกิดการลดทอนของสัญญาณมากขึ้น และบางระยะไม่เป็นไปตามทฤษฎีการลดทอนกำลังของคลื่นตามระยะทาง
- 4) อุปกรณ์สถานีฐาน 5G กรณีอยู่ภายในอาคารได้รับการสนับสนุนจากบริษัท Huawei มีเพียงแค่นั้นเดียวเท่านั้น ในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รุ่นอื่นอาจได้ผลการทดสอบที่แตกต่างออกไป

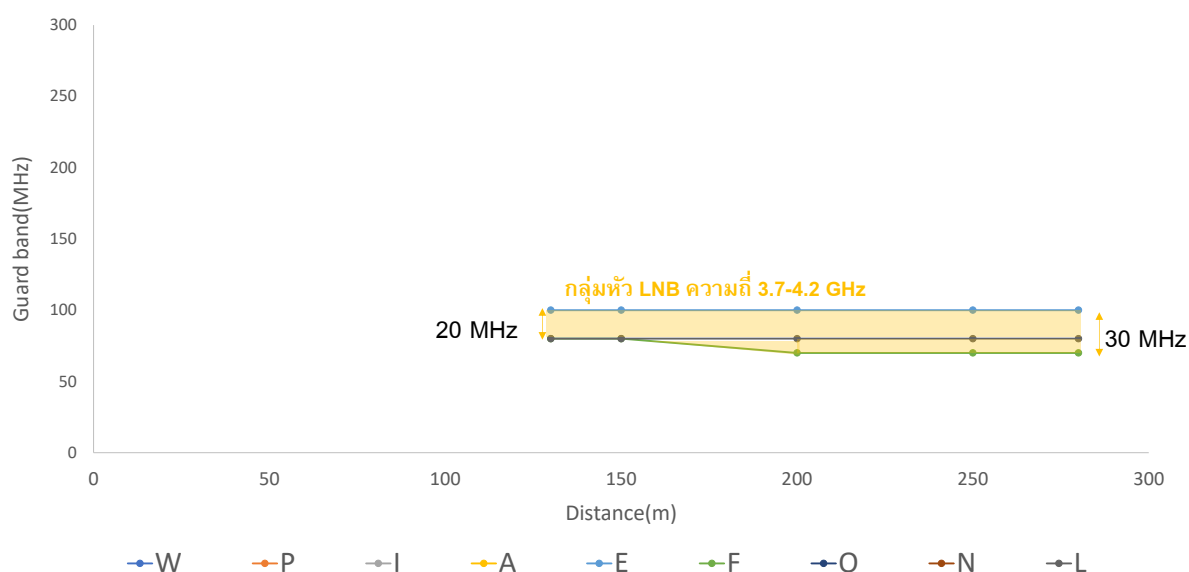
3.2.7 ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและบันทึกผล โดยจะดำเนินการทดสอบตามกรณีทดสอบกรณี Outdoor นอกจากนั้น เนื่องจากโมเดลของอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่จะใช้ทดสอบการวัดสัญญาณของภาครับดาวเทียม ดังนั้นโมเดลของอุปกรณ์ LNB, LNB_F และ BPF จะถูกนำไปทดสอบเพื่อหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของตัวอุปกรณ์ ซึ่งผลการทดสอบจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อนี้เช่นกัน ค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของอุปกรณ์สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์อื่น ๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างระยะและ Guard band ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานส่งสัญญาณ 5G และ Guard Band อื่นๆ

ซึ่งในการวัดครั้งนี้ คณะวิจัยพบว่าเมื่อคณะวิจัยเปิดสัญญาณของสถานีฐาน 5G ให้มีกำลังส่ง 1 วัตต์ขึ้นไปในระยะ 280 เมตร จะทำให้หัวรับ LNB ปกติไม่สามารถใช้งานได้เลย เนื่องจากสัญญาณรบกวนจะเข้าไปสู่หัวรับ LNB ชนิดที่ไม่มีตัวกรองสัญญาณ 5G ถึงแม้ว่าคณะวิจัยจะถอยร่นระยะของจานรับดาวเทียมไปจนสุดระยะที่ 280 เมตรก็ตาม

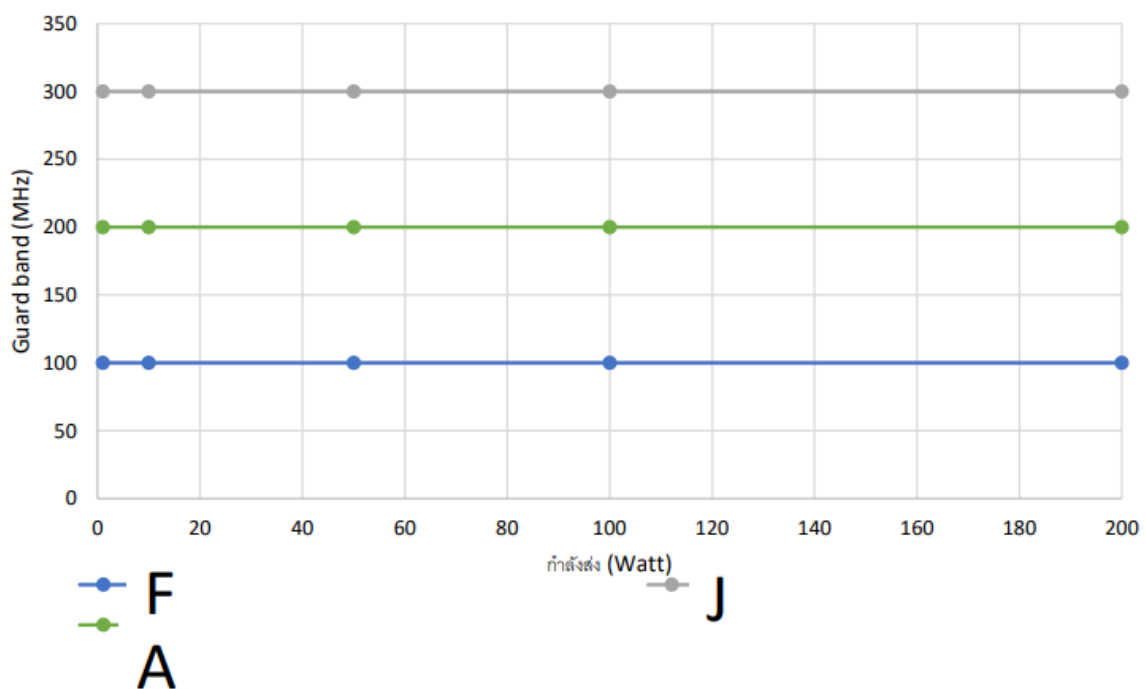
ดังนั้นผลการวัดจึงเน้นที่การวัดหัวรับ LNB_F ประเภทต่างๆ เช่น 3.7 ถึง 4.2 GHz แทนดังแสดงในรูปต่อไปนี ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มของหัวรับ LNB_F และ LNB_F+BPF ที่ค่าความถี่ต่างๆ เทียบกับระยะทางสั้นสุด (Protection distance) ระหว่างสถานีฐาน 5G และจานรับดาวเทียม ที่ยังทำให้ระบบทีวีดาวเทียม ยังสามารถรับสัญญาณได้โดยไม่มีอาการ Macro blocking , Blackout, Freeze และ Audio Silence ซึ่งผลในตารางนี้จะเน้นที่ค่าแสดงผลแบบแอนะล็อก ซึ่งเกิดจากการบันทึกผลด้วยสายตาว่า สัญญาณภาพที่รับได้ไม่มีการผิดเพี้ยนเลยเป็นเวลาอย่างน้อย 30 วินาที

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและ Guard band

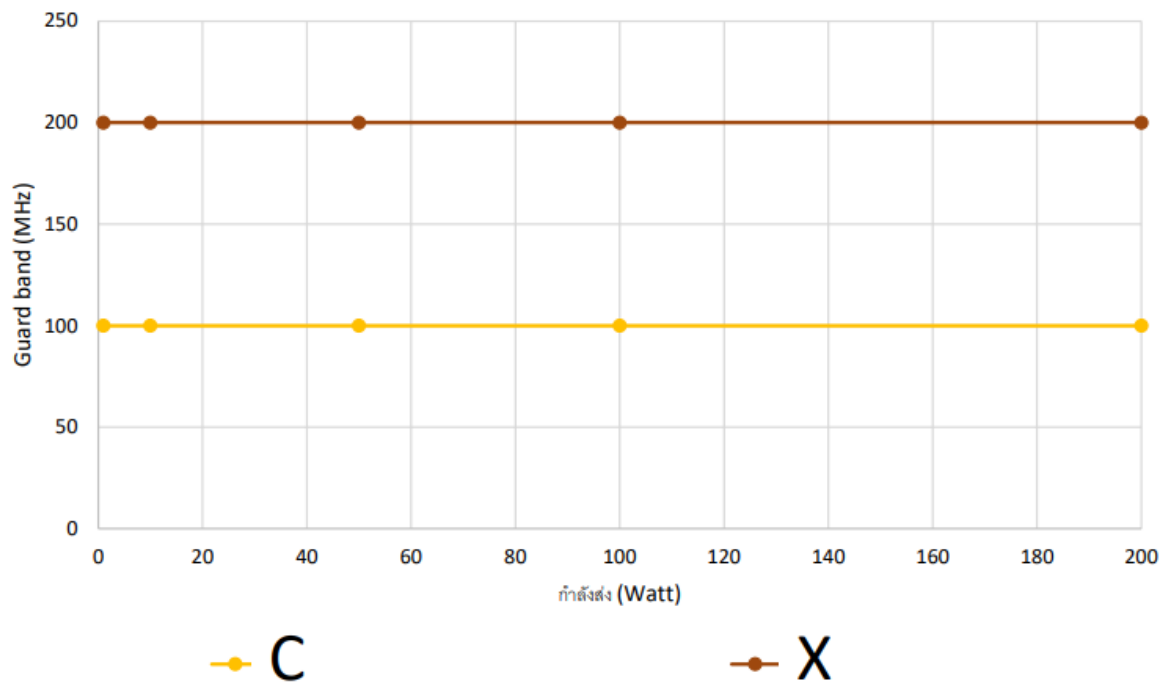


รูป 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะและ Guard band

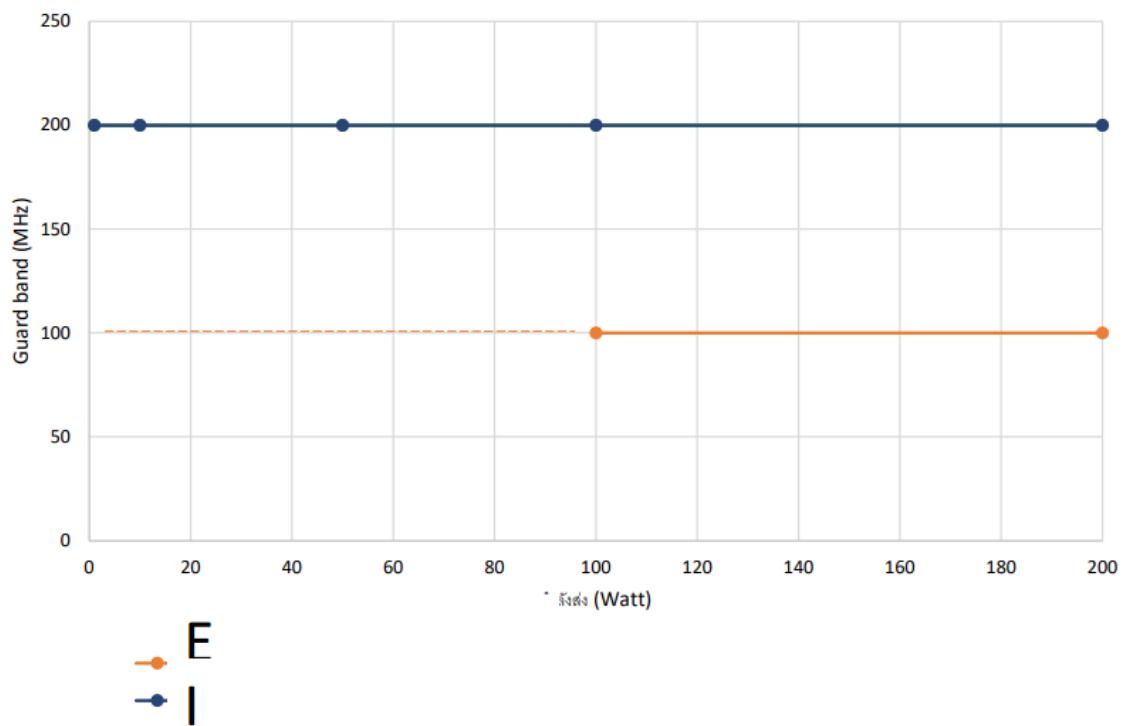
รูป 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะและ Guard band แสดงให้เห็นถึงค่าระยะทางสิ้นสุด (Protection distance) ระหว่างสถานีฐาน 5G และจานรับดาวเทียม ที่ยังทำให้ระบบทีวีดาวเทียม ยังสามารถรับสัญญาณได้โดยไม่มีอาการ Macro blocking , Blackout, Freeze และ Audio Silence ซึ่งจากการวัด คณะวิจัยสามารถสรุปได้ว่าสำหรับหัวรับ LNB_F ความถี่ 3.7 ถึง 4.2 GHz นั้นต้องการความถี่ป้องกัน (Guard band) อยู่อย่างน้อย 100 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยระยะทางสั้นที่สามารถใช้งานได้คือที่ 130 เมตร ซึ่งค่า Guard band นี้สามารถลดลงได้ หากใช้หัวรับหรือ LNB ที่ดีขึ้นโดยอาจจะสามารถลดการใช้ Guard band ลงได้ 20 เมกกะเฮิร์ตซ์ที่ระยะ 130 เมตร และสามารถลดการใช้ Guard band ลงได้ 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ที่ระยะ 200 เมตร



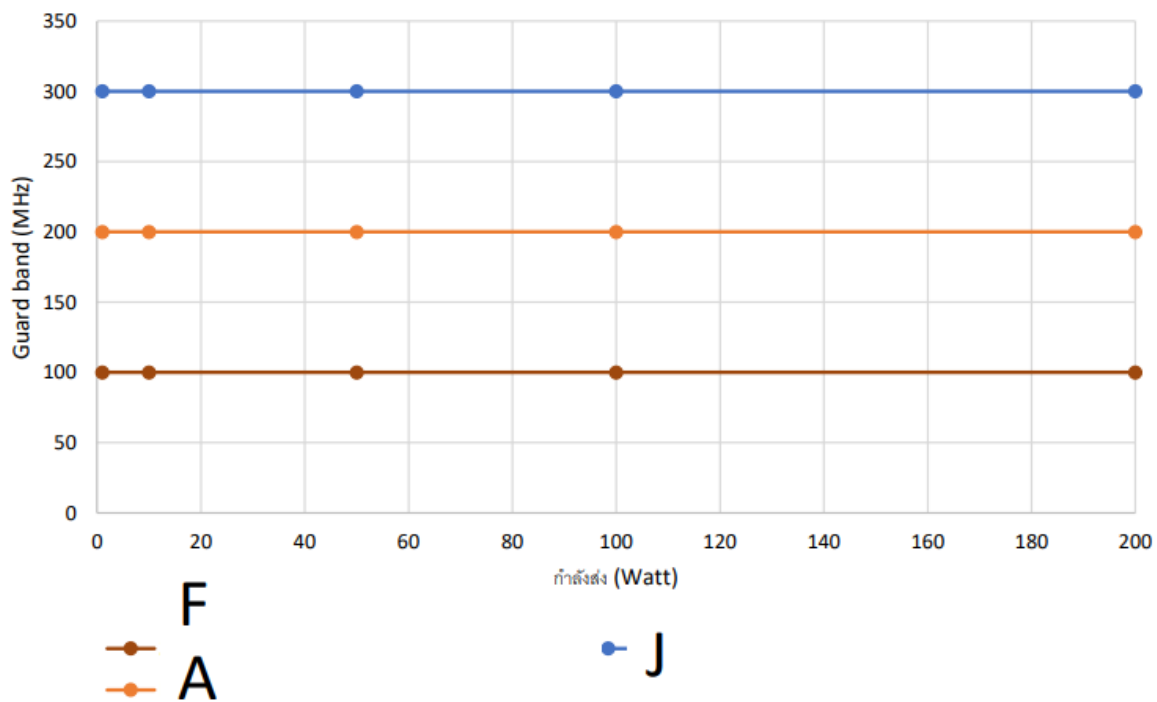
รูป 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานส่งสัญญาณ 5G และ Guard Band ที่ระยะ 280 เมตร



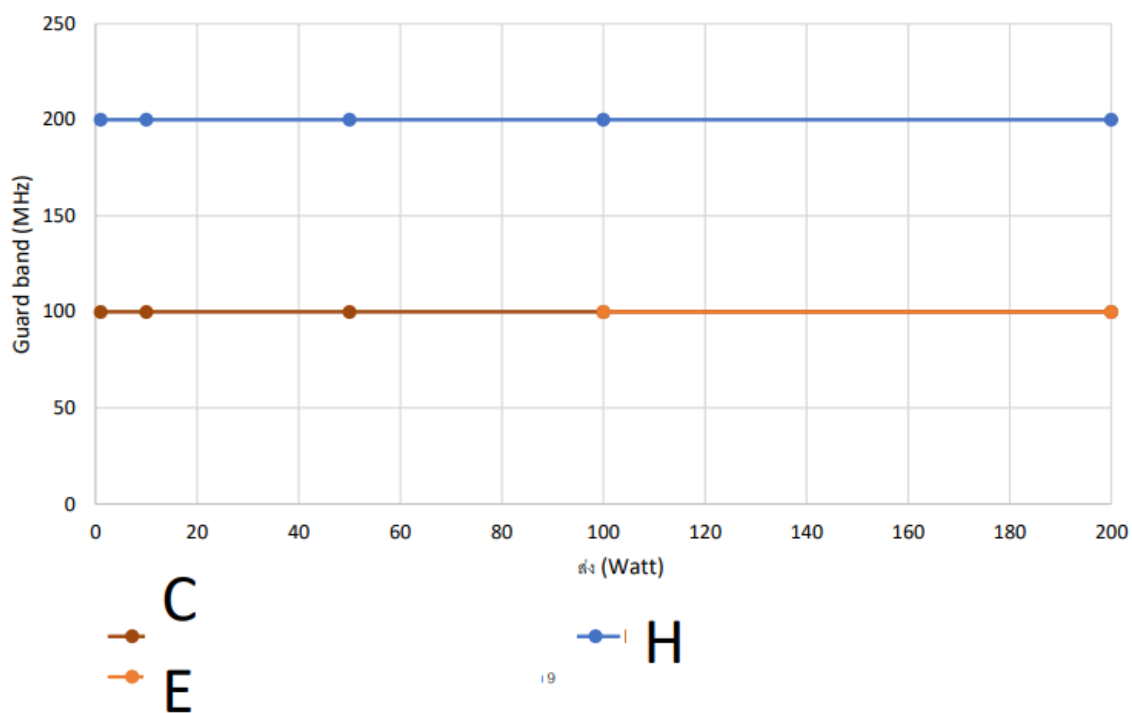
รูป 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานส่งสัญญาณ 5G และ Guard Band ที่ระยะ 280 เมตร



รูป 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานส่งสัญญาณ 5G และ Guard Band ที่ระยะ 280 เมตร



รูป 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานส่งสัญญาณ 5G และ Guard Band ที่ระยะ 250 เมตร

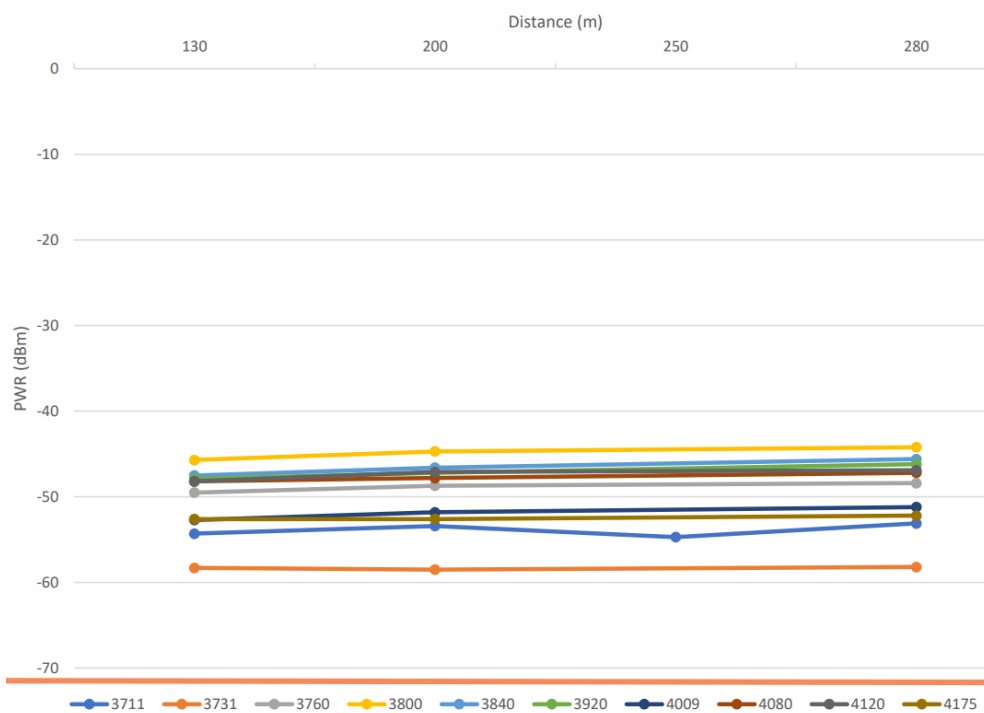


รูป 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานส่งสัญญาณ 5G และ Guard Band ที่ระยะ 250 เมตร

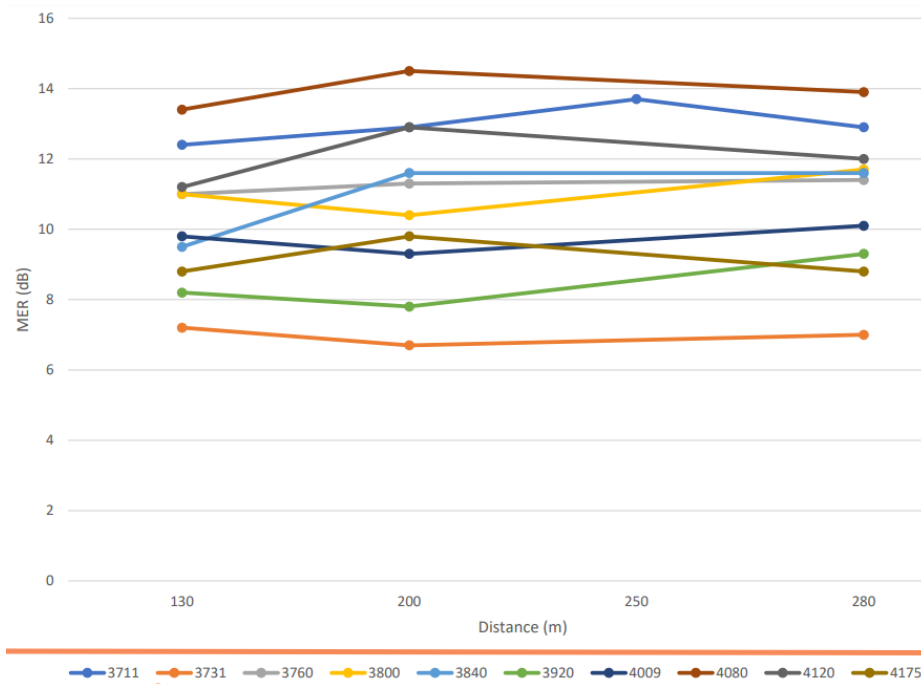
จากรูป 52 ถึง รูป 56 คณะวิจัยพบว่าค่ากำลังส่งไม่ส่งผลกระทบต่อ Guard band มากนัก เนื่องจากไม่ว่าคณะวิจัยจะเพิ่มค่ากำลังส่งไปที่เท่าไรระหว่าง 1 วัตต์ถึง 200 วัตต์ คณะวิจัยพบว่าค่า Guard band ที่ต้องใช้ขึ้นนั้นยังคงที่ สำหรับที่ระยะทดสอบ 200 เมตรและ 280 เมตรตามลำดับ ค่านี้เป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่า ค่ากำลังส่งมีผลกระทบน้อยกว่าค่าระยะทาง เนื่องจากค่าการลดทอนจากระยะทาง (Path Loss) นั้นจะลดลงตามค่าระยะทางกำลังสอง

สำหรับการทดสอบในกรณี Outdoor จะทำการบันทึกค่า Signal Quality, C/N margin และค่า Bit error rate ของสัญญาณโทรศัพท์ผ่านดาวเทียมดังต่อไปนี้ เพื่อยืนยันว่าระบบรับสัญญาณดาวเทียมสามารถรับสัญญาณเชิงดิจิทัลได้จริง นอกเหนือจากการดูด้วยสายตาแบบแอนะล็อกก่อนหน้านี้

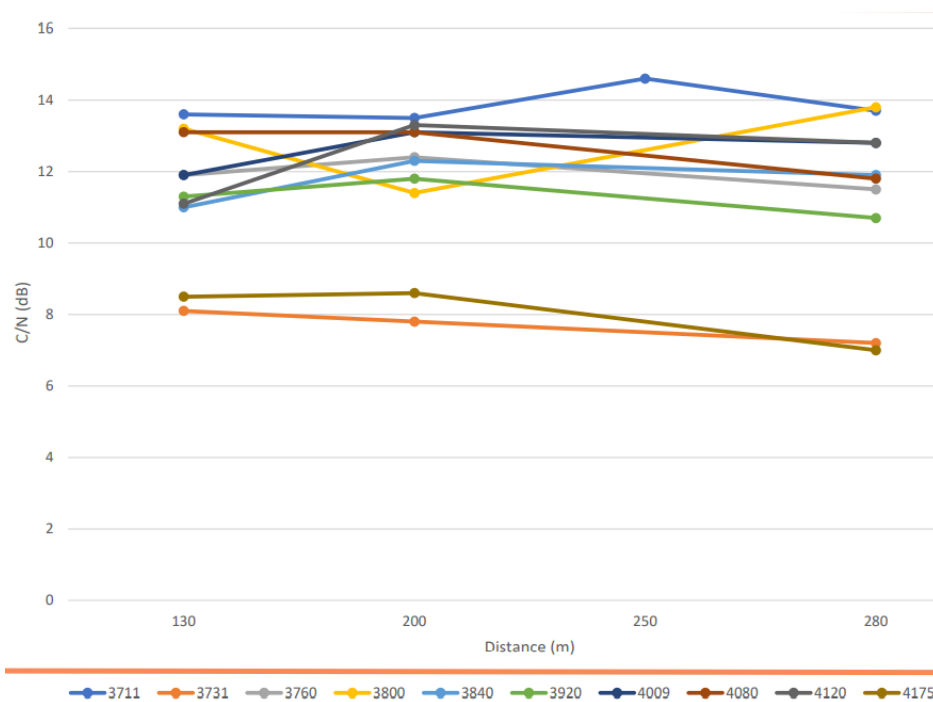
3.2.7.1 ผลการทดสอบการวัดสัญญาณตัวอย่าง LNB 5G Filter รุ่น A 3.7-4.2 GHz ของกรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz จะแสดงดังรูปที่ 59 ถึงรูปที่ 64



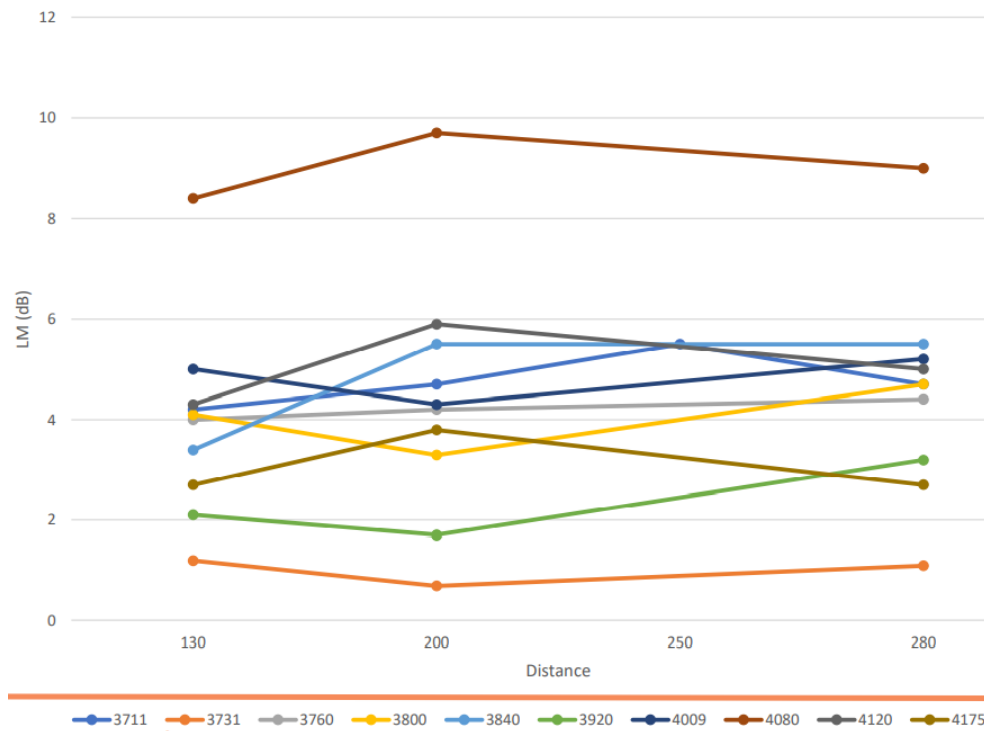
รูป 57 กราฟความสัมพันธ์ PWR กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น A 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



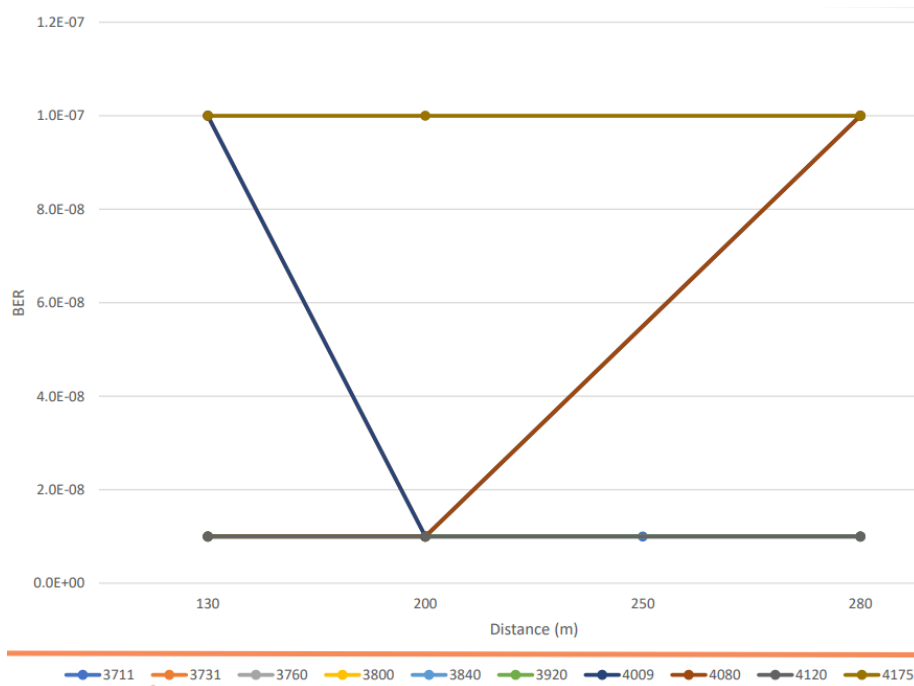
รูป 58 กราฟความสัมพันธ์ MER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น A 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



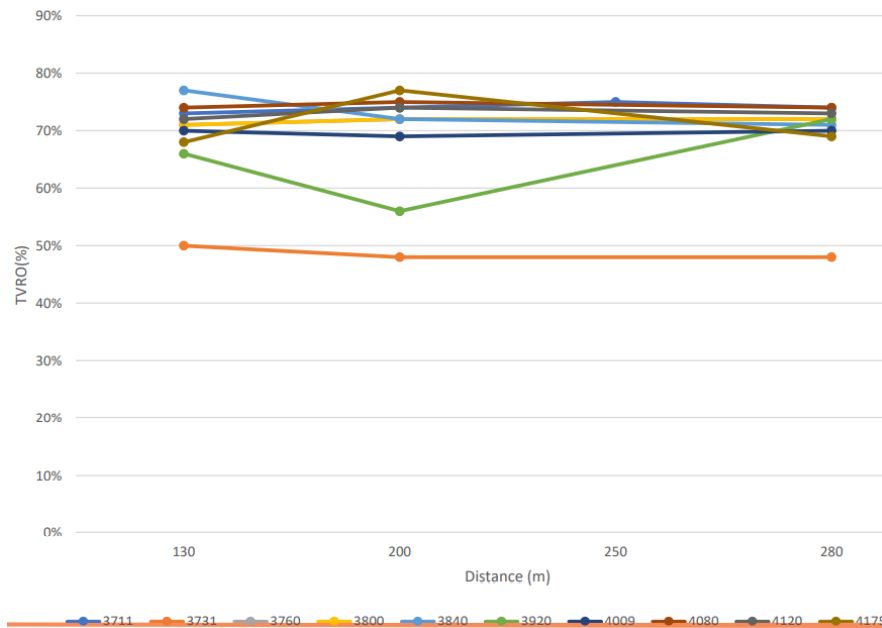
รูป 59 กราฟความสัมพันธ์ C/N กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น A 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



รูป 60 กราฟความสัมพันธ์ LM กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น A 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

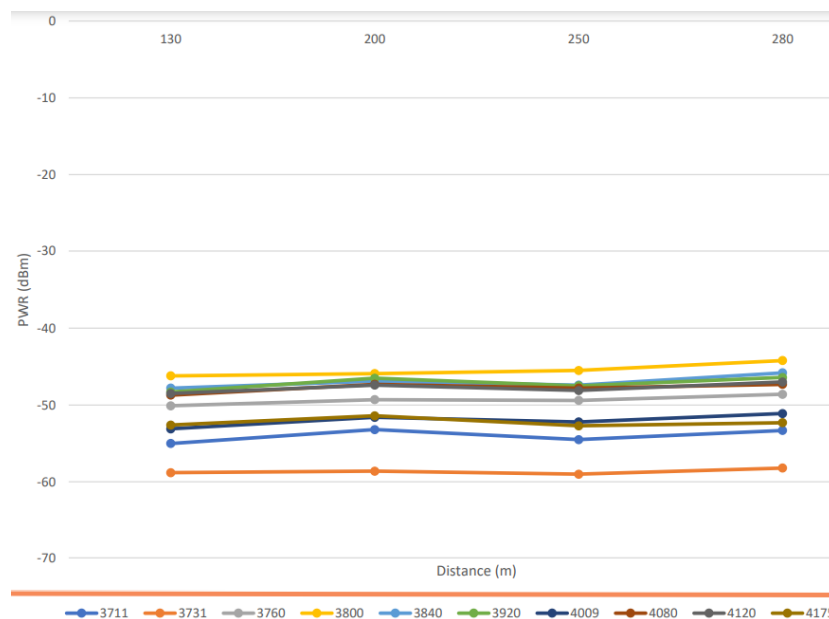


รูป 61 กราฟความสัมพันธ์ BER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น A 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

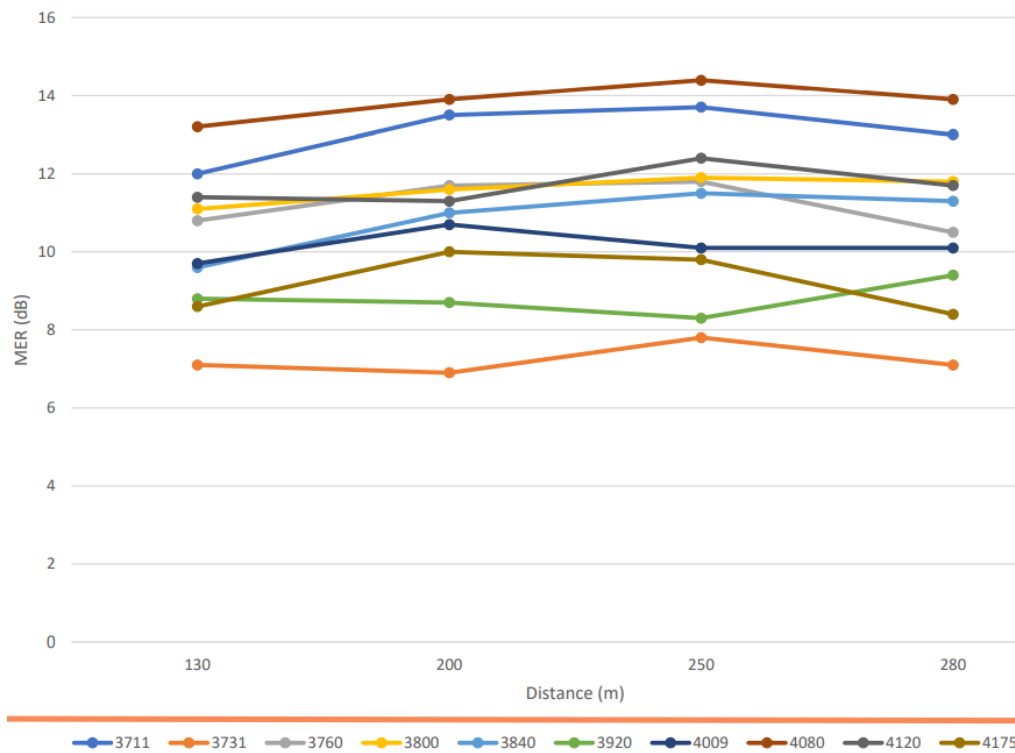


รูป 62 กราฟความสัมพันธ์ TVRO กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น A 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

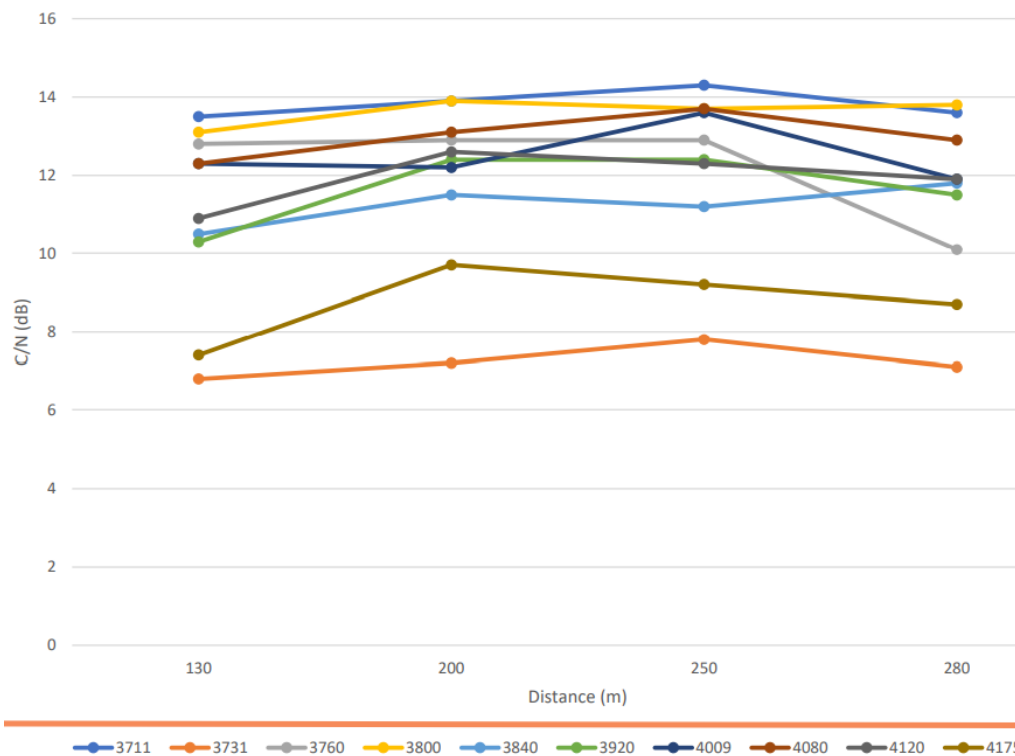
3.2.7.2 ผลการทดสอบการวัดสัญญาณตัวอย่าง LNB 5G Filter รุ่น B 3.7-4.2 GHz ของกรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz จะแสดงดังรูปที่ 65 ถึงรูปที่ 70



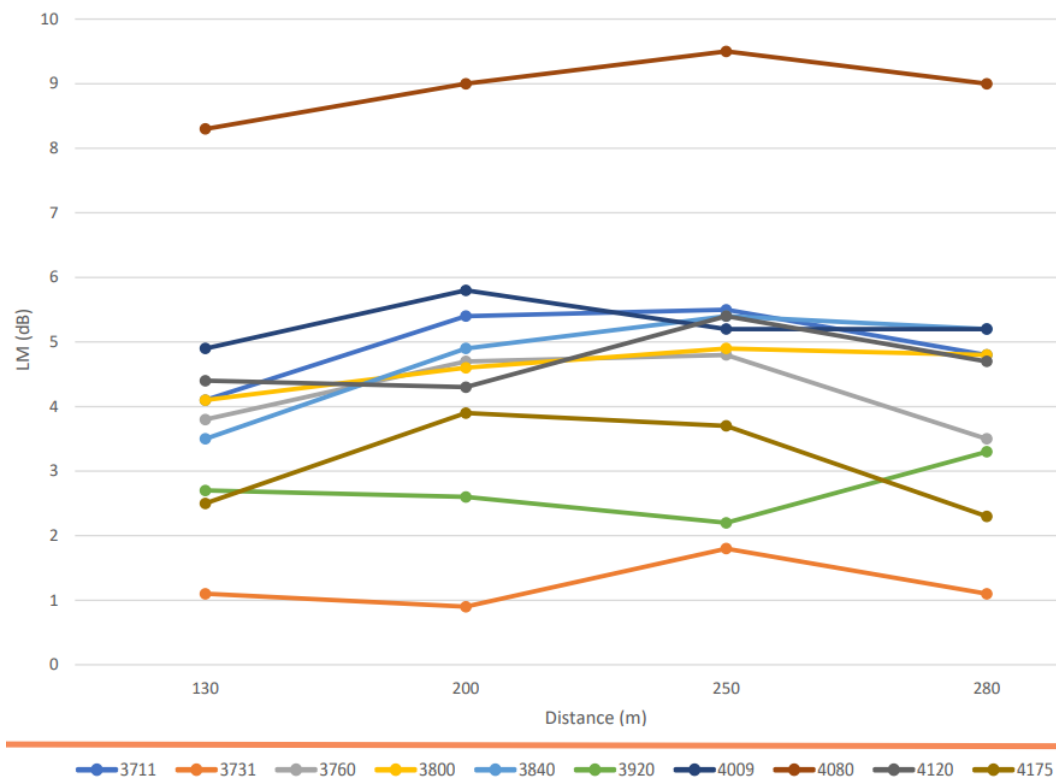
รูป 63 กราฟความสัมพันธ์ PWR กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น B 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



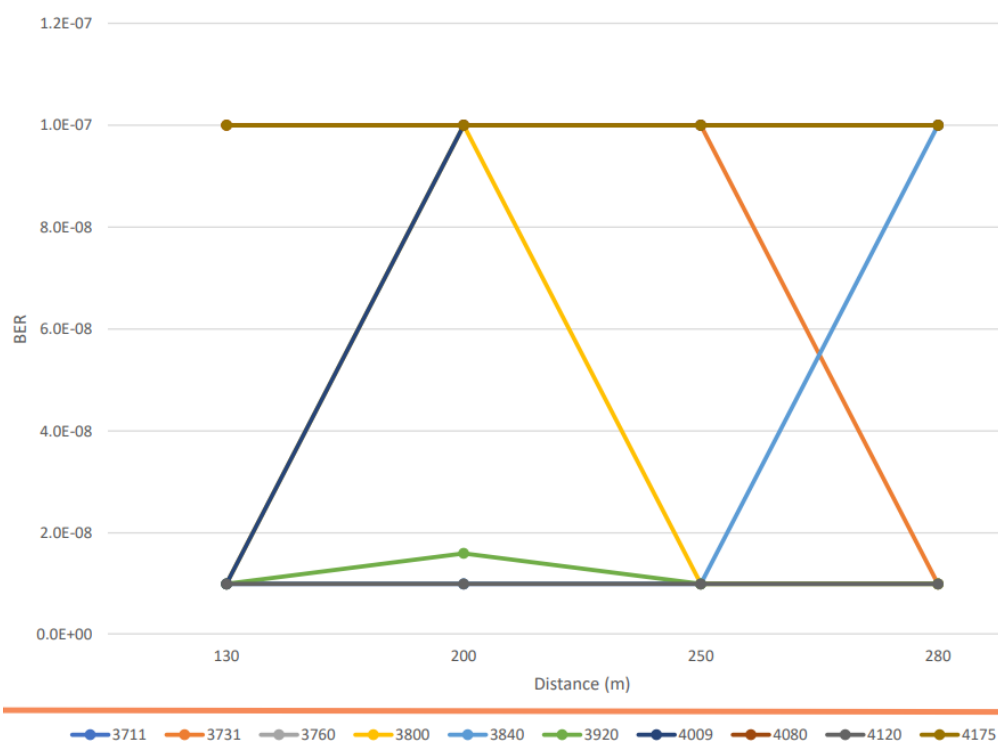
รูป 64 กราฟความสัมพันธ์ MER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น B 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



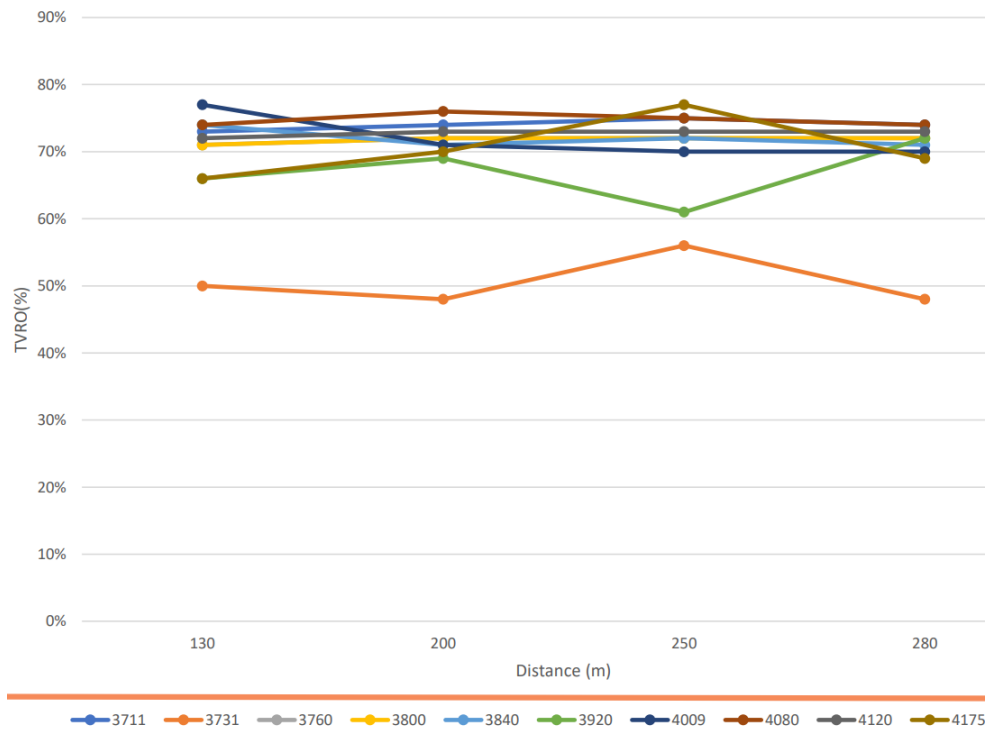
รูป 65 กราฟความสัมพันธ์ C/N กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น B 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



รูป 66 กราฟความสัมพันธ์ LM กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น B 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz

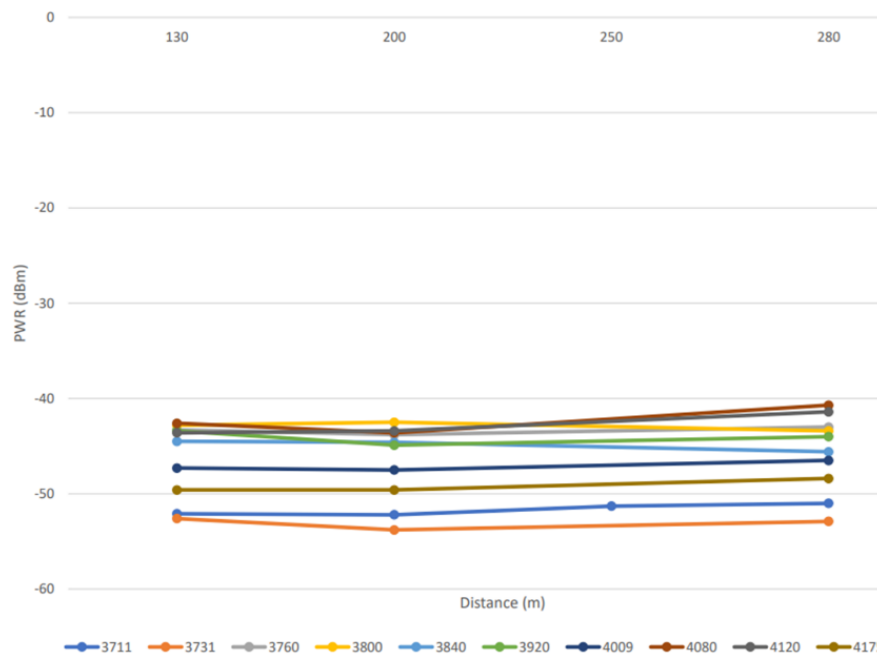


รูป 67 กราฟความสัมพันธ์ BER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น B 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz

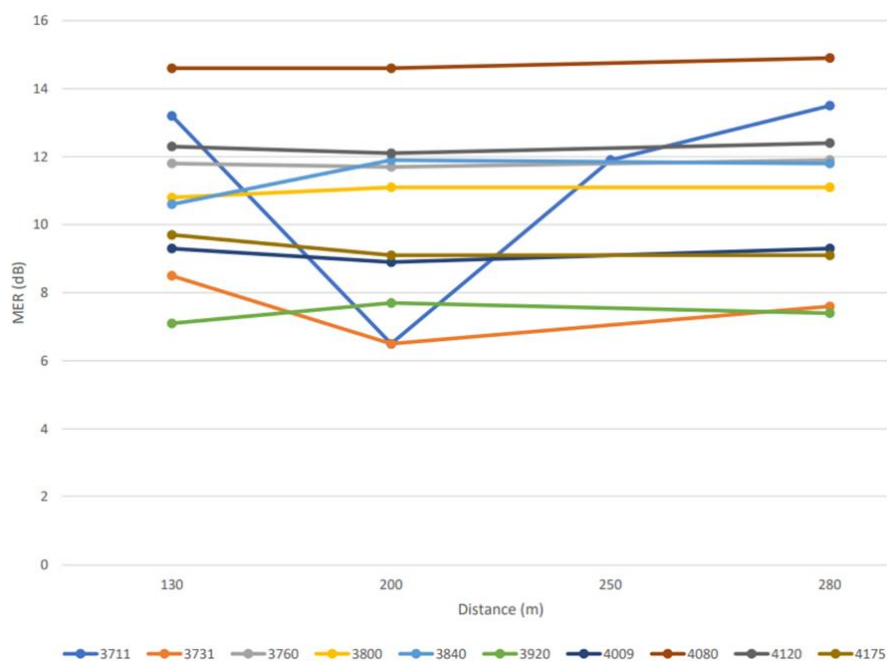


รูป 68 กราฟความสัมพันธ์ TVRO กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น B 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz

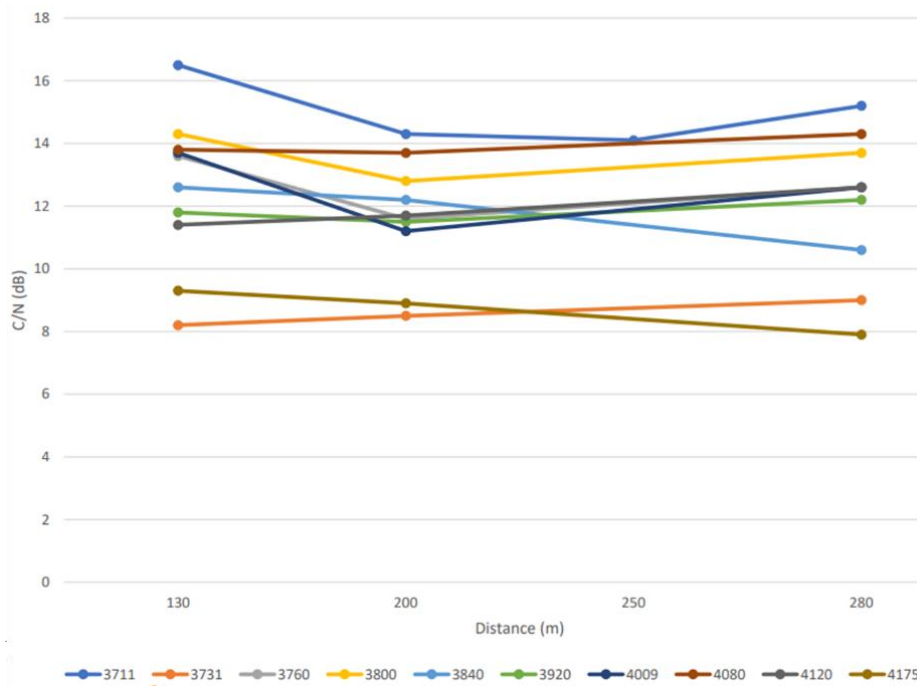
3.2.7.3 ผลการทดสอบการวัดสัญญาณตัวอย่าง LNB 5G Filter รุ่น C 3.7-4.2 GHz ของกรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz จะแสดงดังรูปที่ 71 ถึงรูปที่ 76



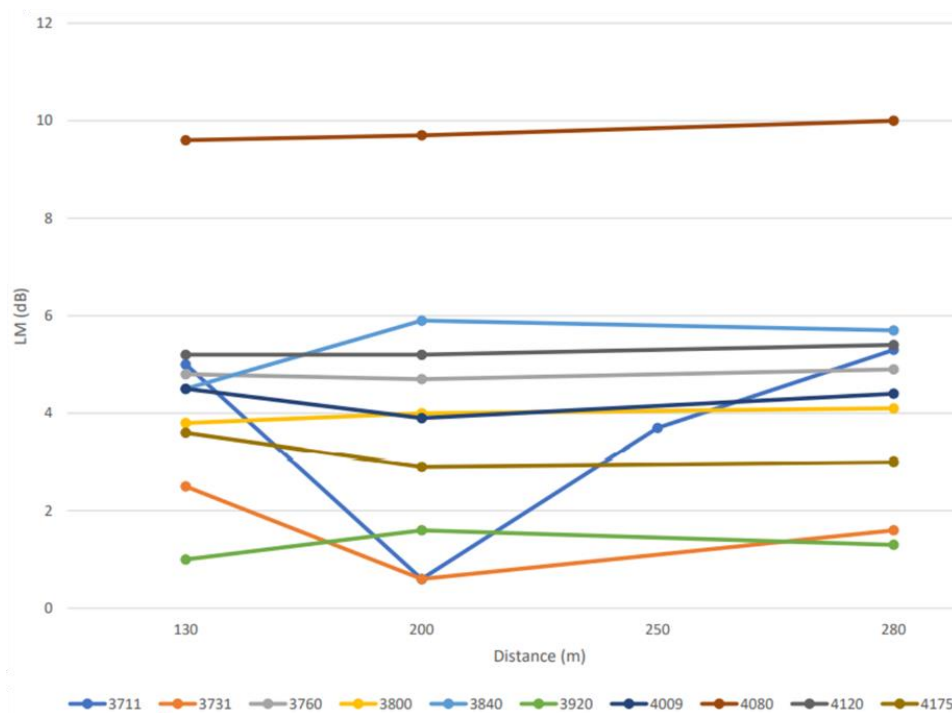
รูป 69 กราฟความสัมพันธ์ PWR กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น C 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



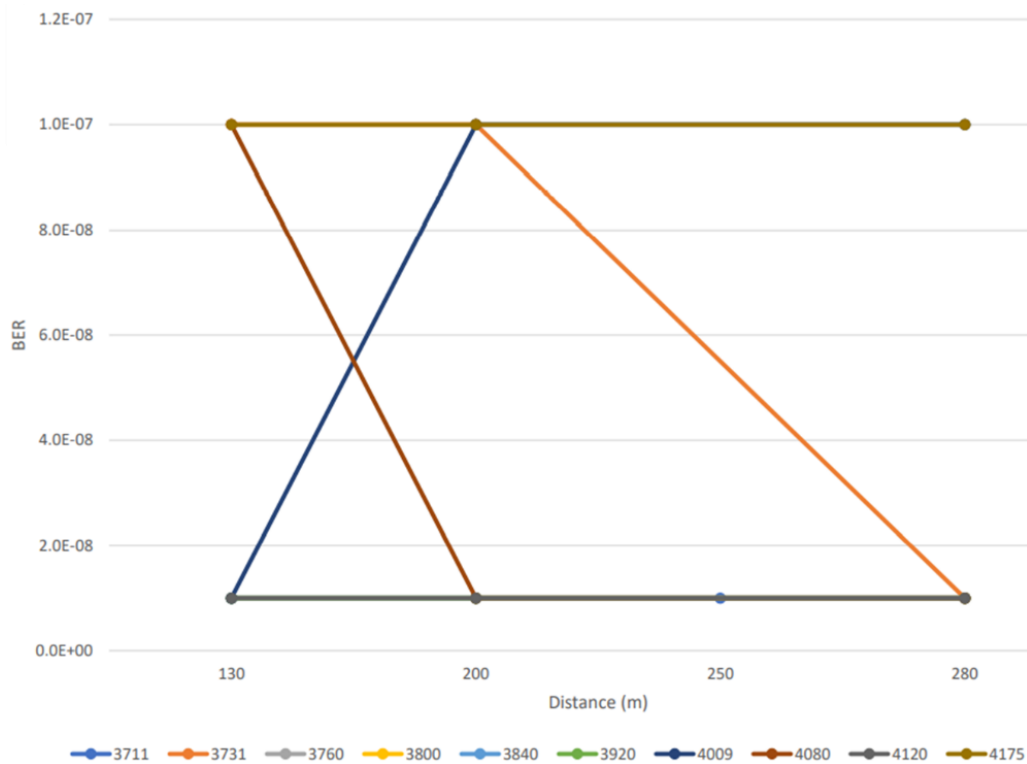
รูป 70 กราฟความสัมพันธ์ MER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น C 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



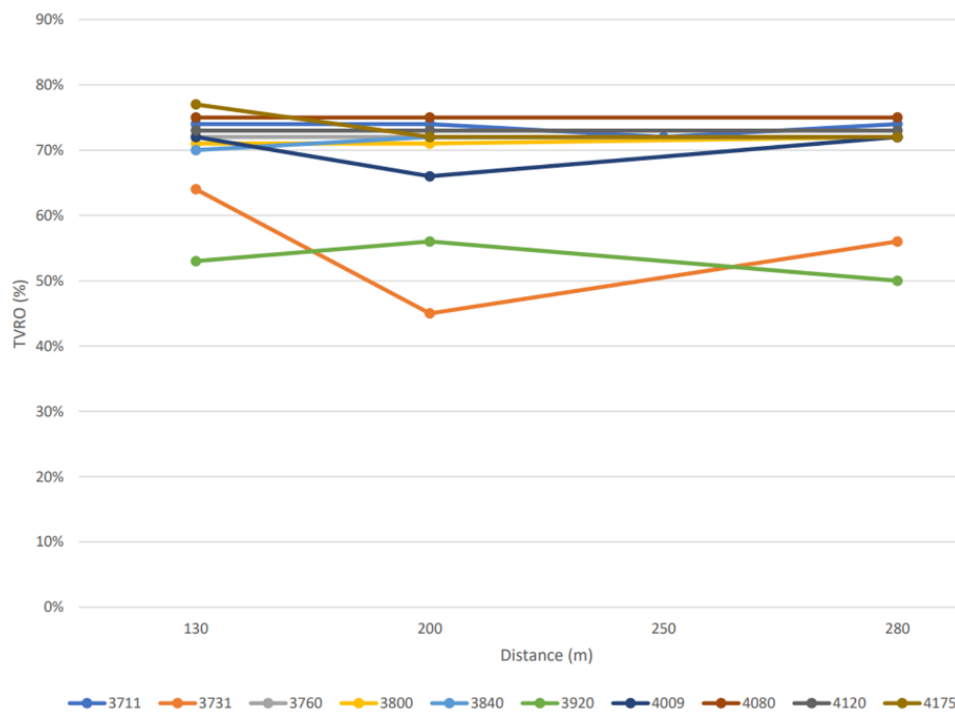
รูป 71 กราฟความสัมพันธ์ C/N กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น C 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



รูป 72 กราฟความสัมพันธ์ LM กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น C 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

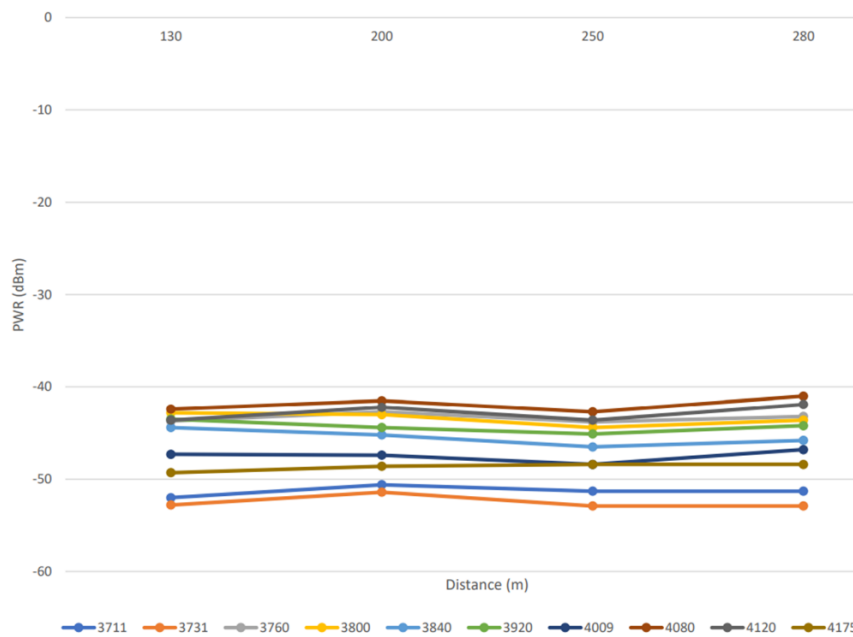


รูป 73 กราฟความสัมพันธ์ BER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น C 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

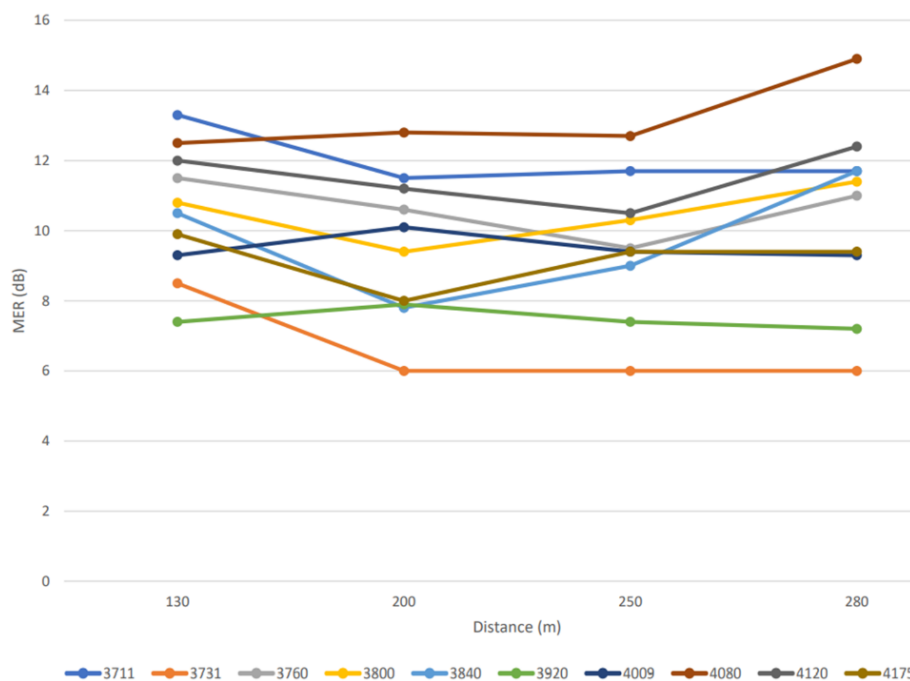


รูป 74 กราฟความสัมพันธ์ TVRO กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น C 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

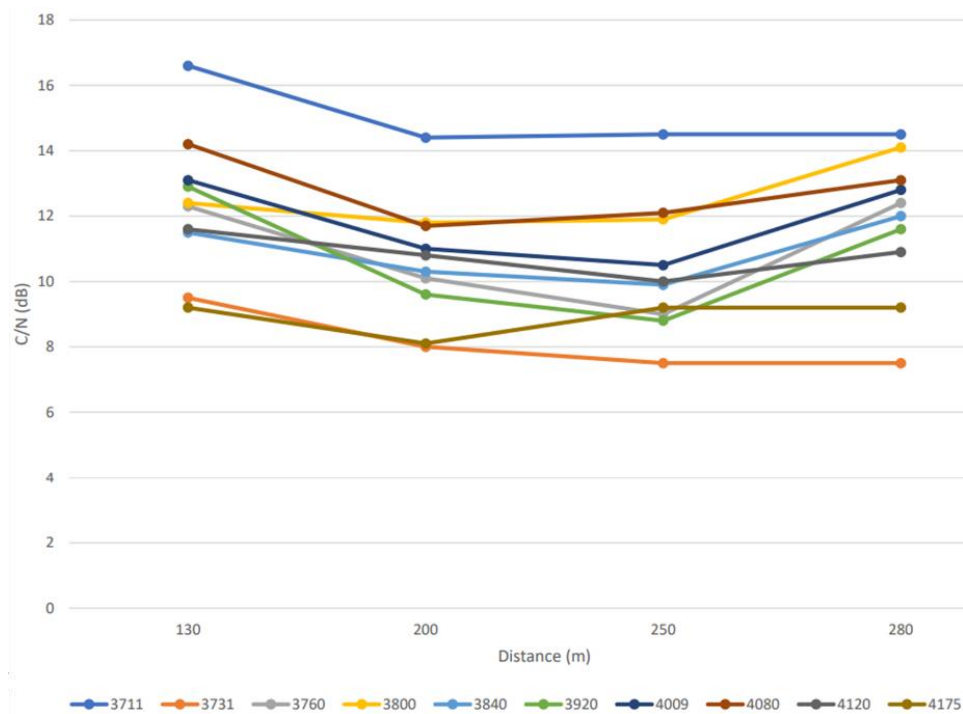
3.2.7.4 ผลการทดสอบการวัดสัญญาณตัวอย่าง LNB 5G Filter รุ่น D 3.7-4.2 GHz ของกรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz จะแสดงดังรูปที่ 77 ถึงรูปที่ 82



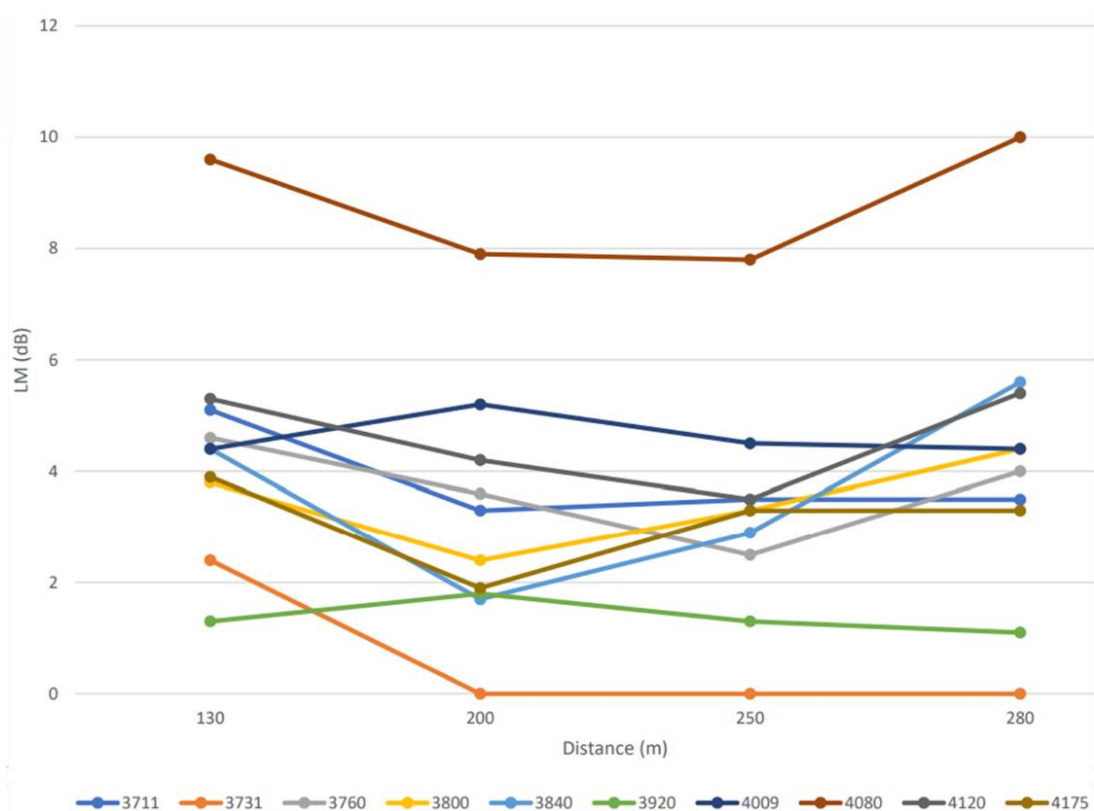
รูป 75 กราฟความสัมพันธ์ PWR กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น D 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



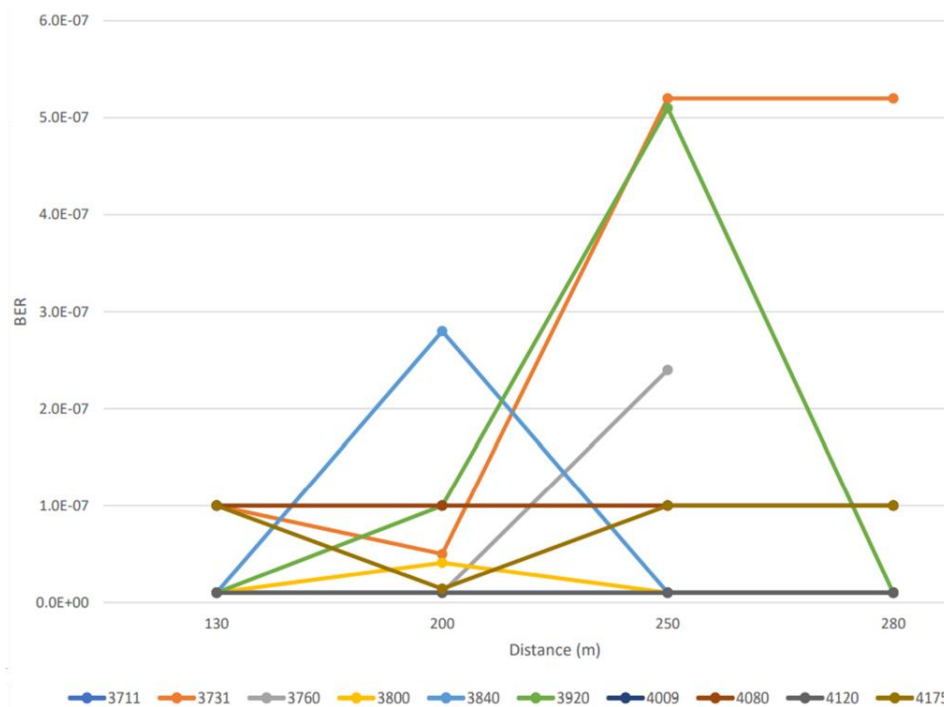
รูป 76 กราฟความสัมพันธ์ MER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น D 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



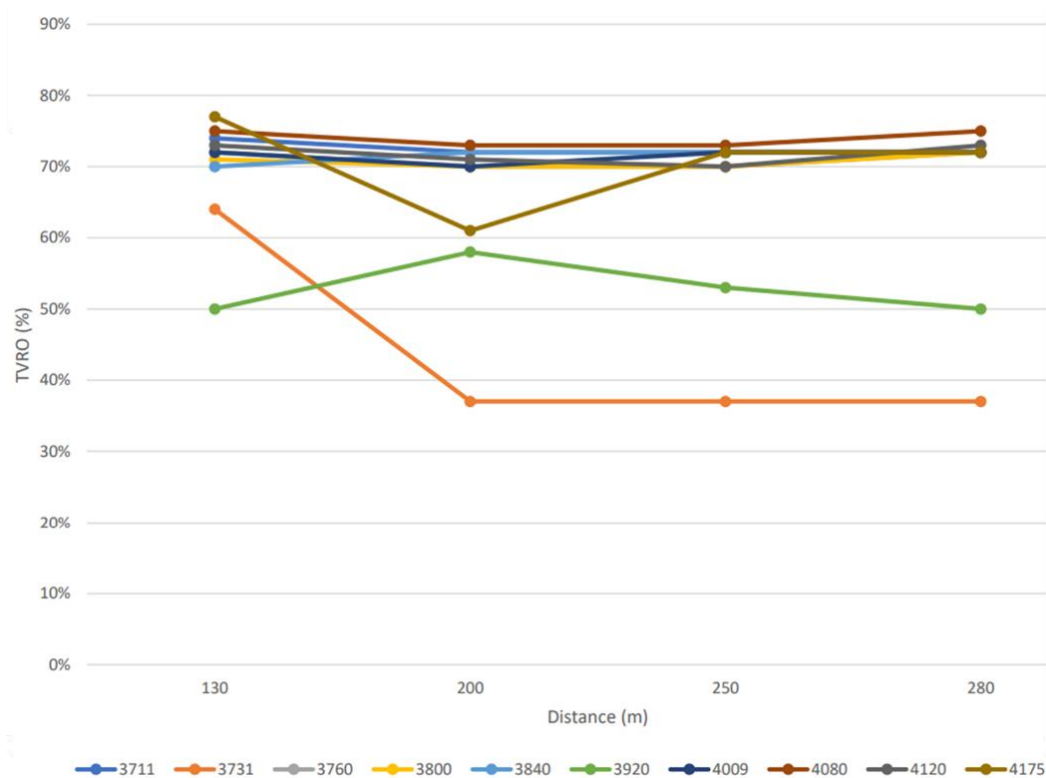
รูป 77 กราฟความสัมพันธ์ C/N กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น D 3.7-4.2 GHz กรณีสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



รูป 78 กราฟความสัมพันธ์ LM กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น D 3.7-4.2 GHz กรณีสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz

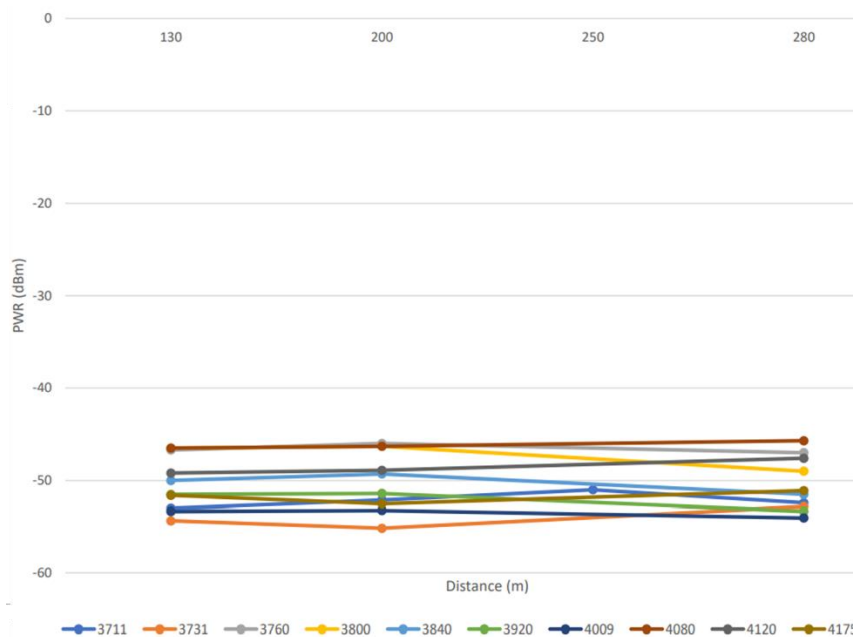


รูป 79 กราฟความสัมพันธ์ BER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น D 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz

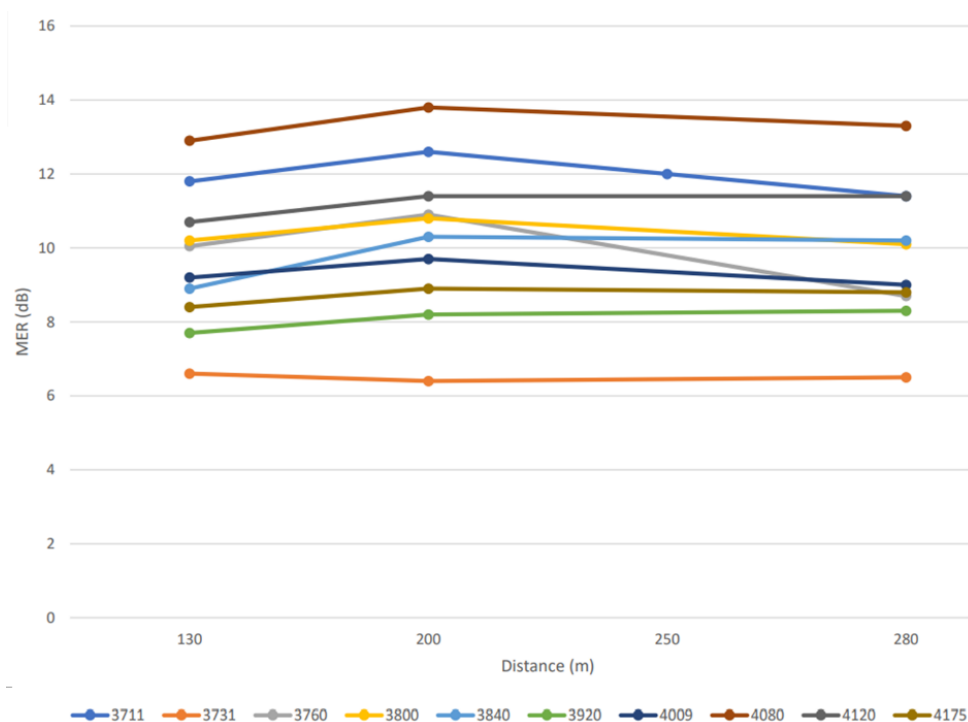


รูป 80 กราฟความสัมพันธ์ TVRO กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น D 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz

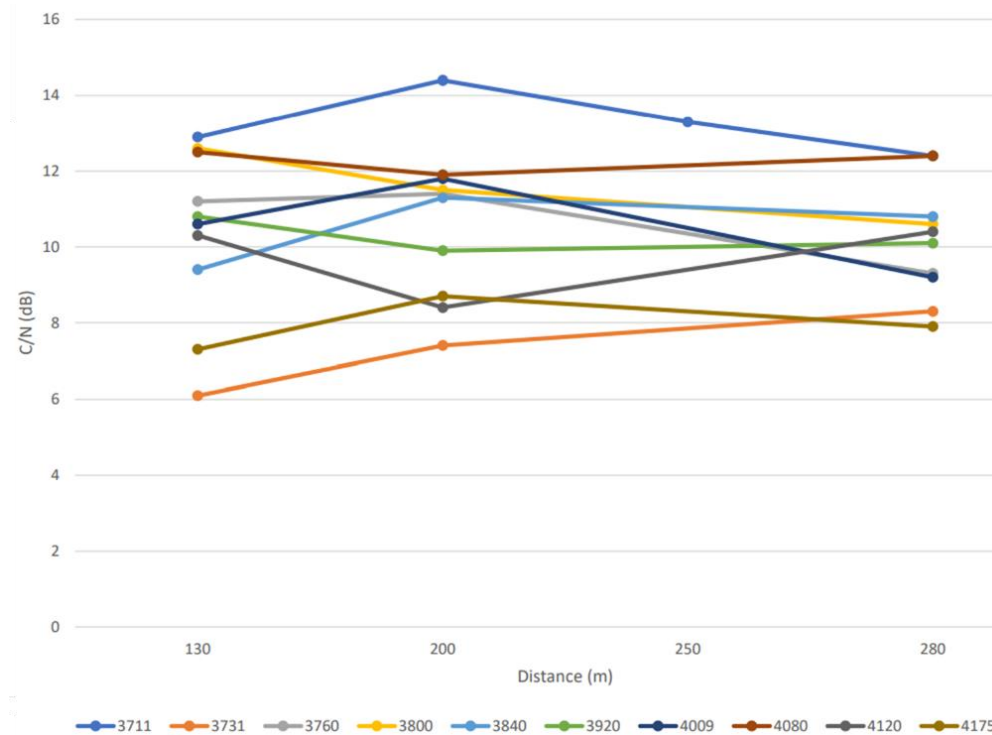
3.2.7.5 ผลการทดสอบการวัดสัญญาณตัวอย่าง LNB 5G Filter รุ่น E 3.7-4.2 GHz ของกรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz จะแสดงดังรูปที่ 83 ถึงรูปที่ 88



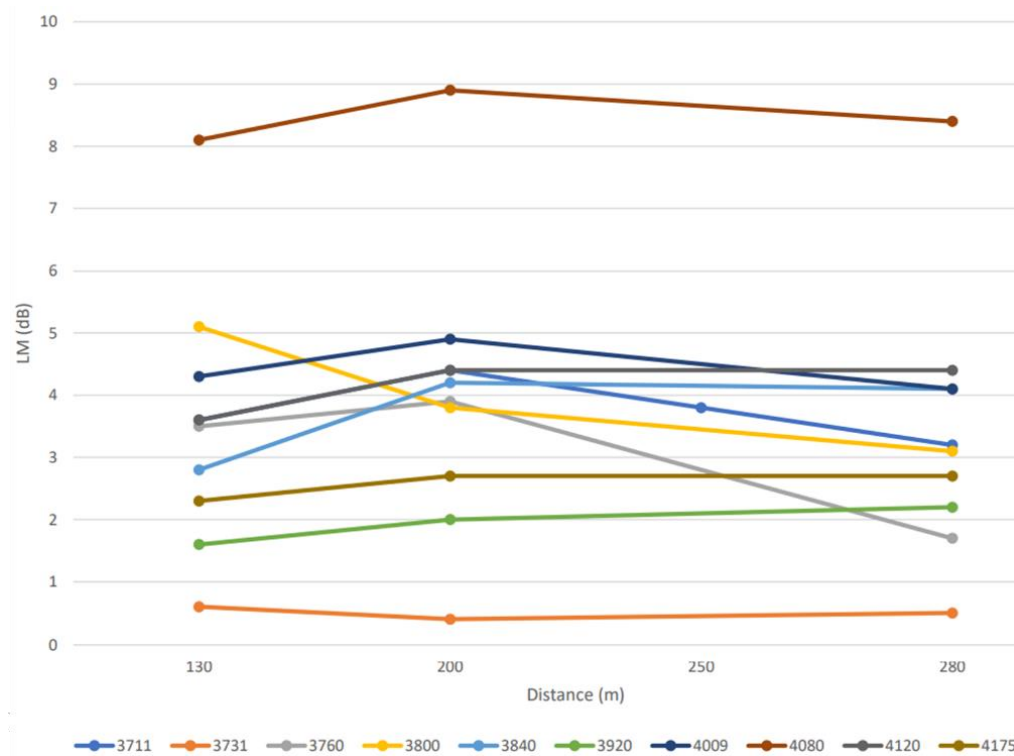
รูป 81 กราฟความสัมพันธ์ PWR กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น E 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



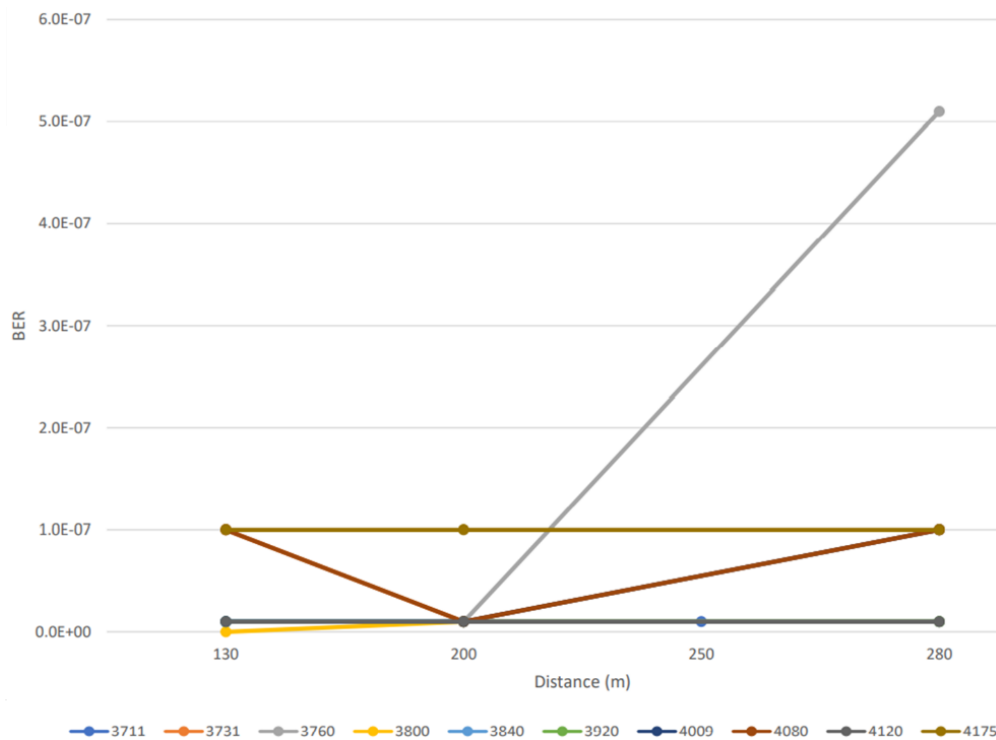
รูป 82 กราฟความสัมพันธ์ MER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น E 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



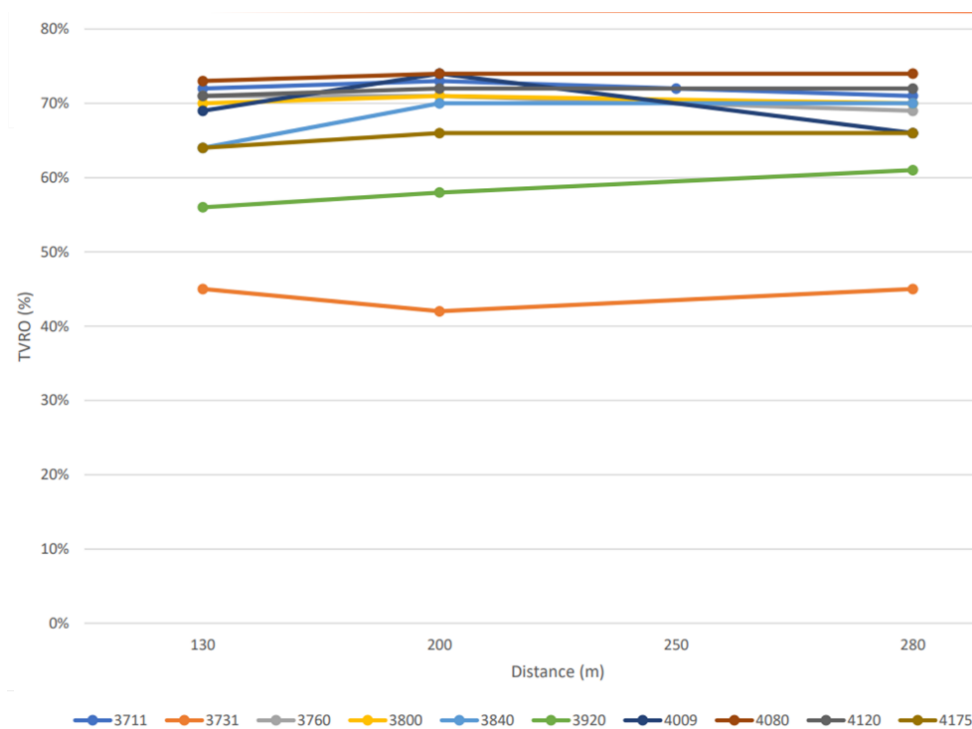
รูป 83 กราฟความสัมพันธ์ C/N กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น E 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz



รูป 84 กราฟความสัมพันธ์ LM กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น E 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

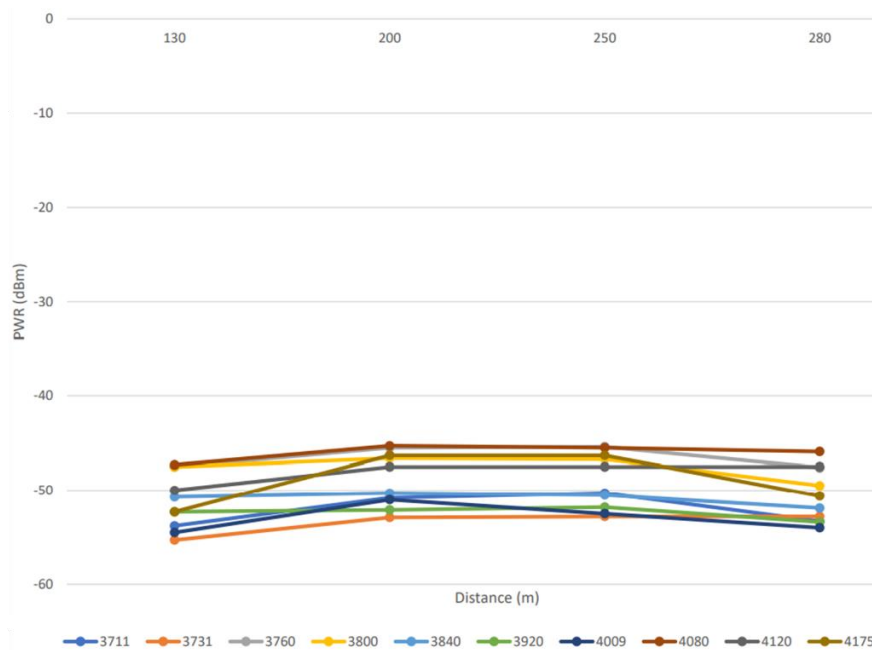


รูป 85 กราฟความสัมพันธ์ BER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น E 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

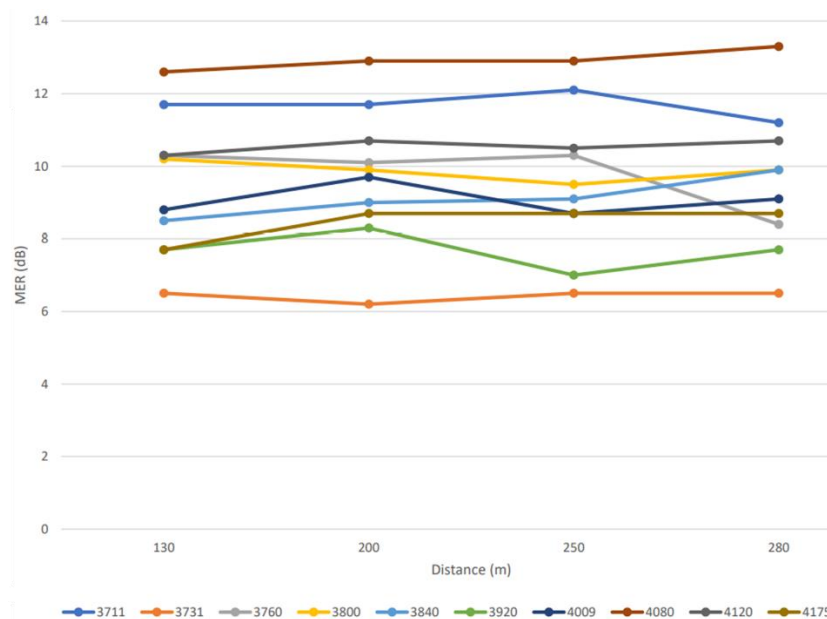


รูป 86 กราฟความสัมพันธ์ TVRO กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น E 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz

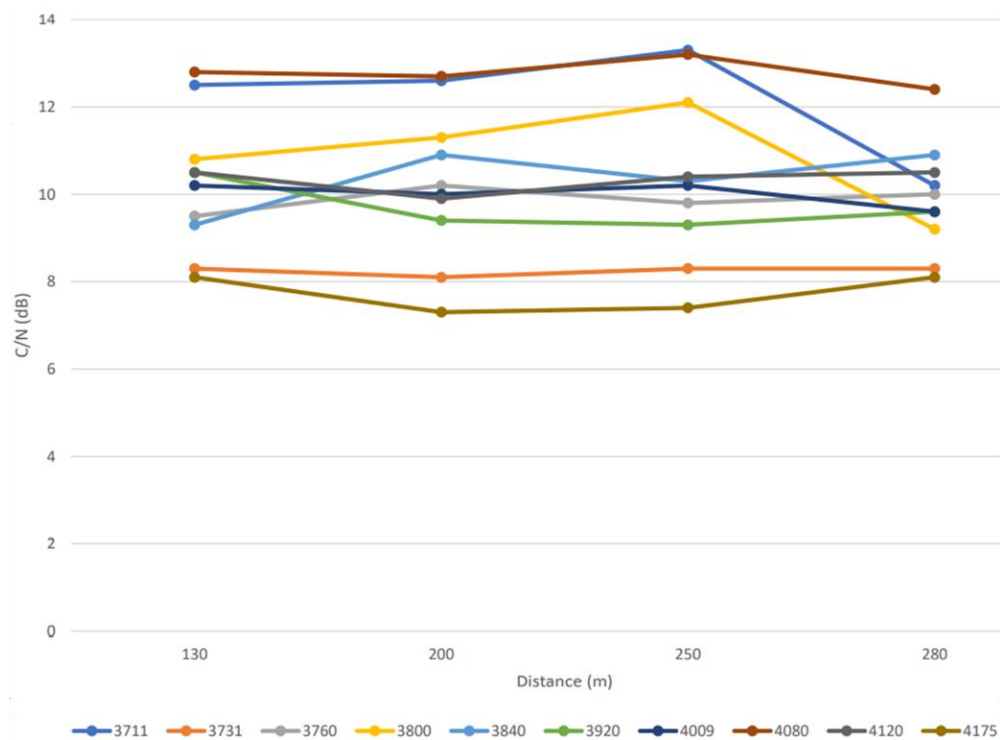
3.2.7.6 ผลการทดสอบการวัดสัญญาณตัวอย่าง LNB 5G Filter รุ่น F 3.7-4.2 GHz ของกรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz จะแสดงดังรูปที่ 89 ถึงรูปที่ 94



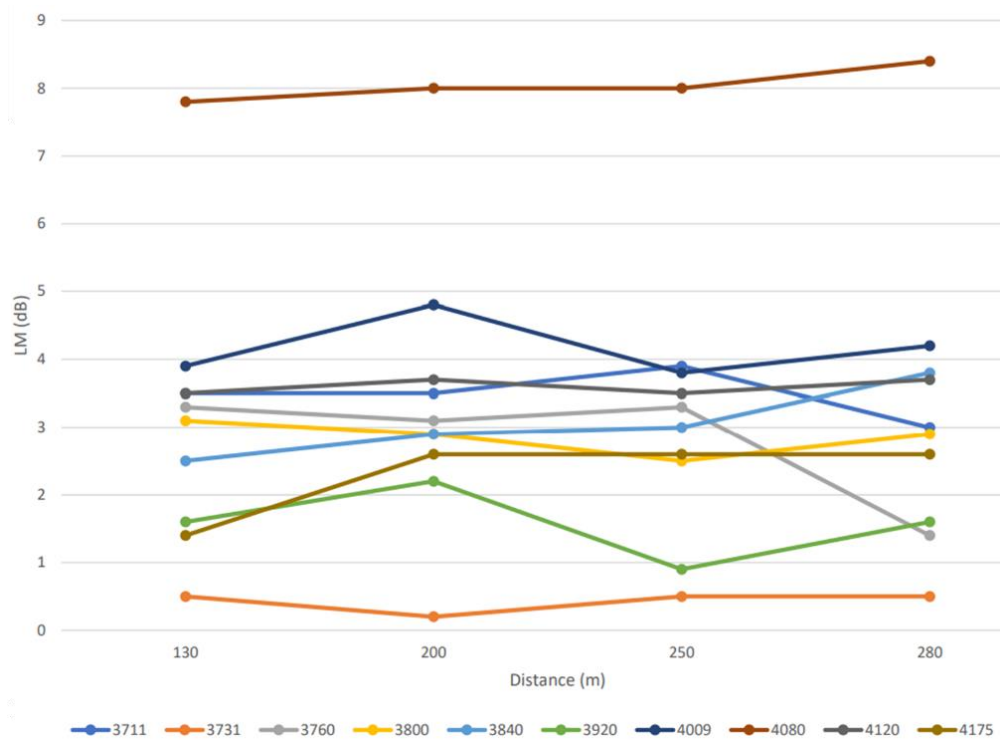
รูป 87 กราฟความสัมพันธ์ PWR กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น F 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



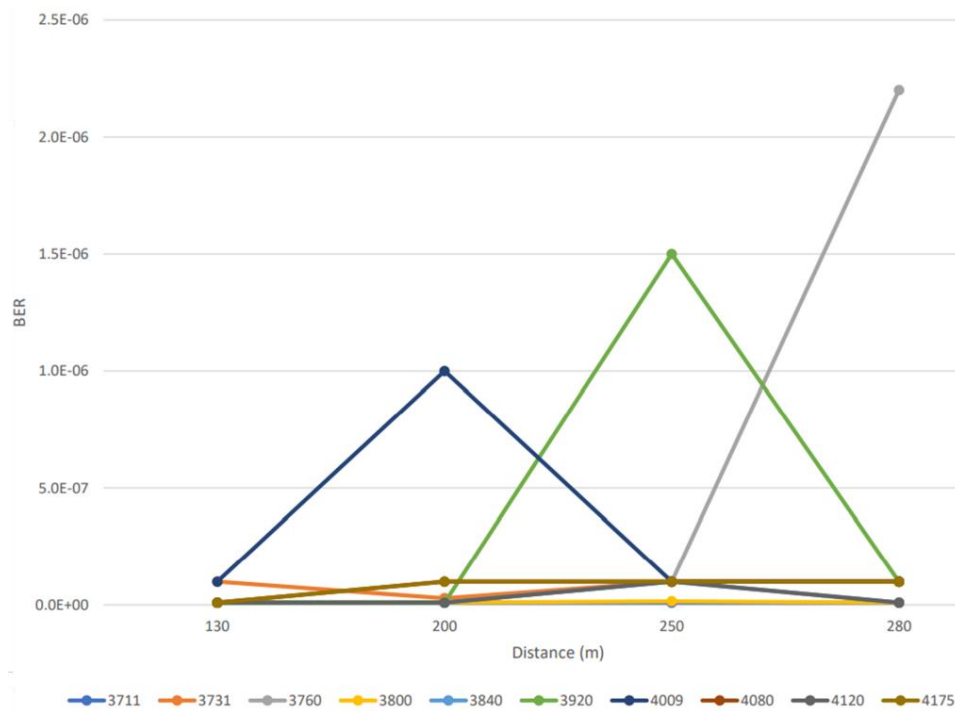
รูป 88 กราฟความสัมพันธ์ MER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น F 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



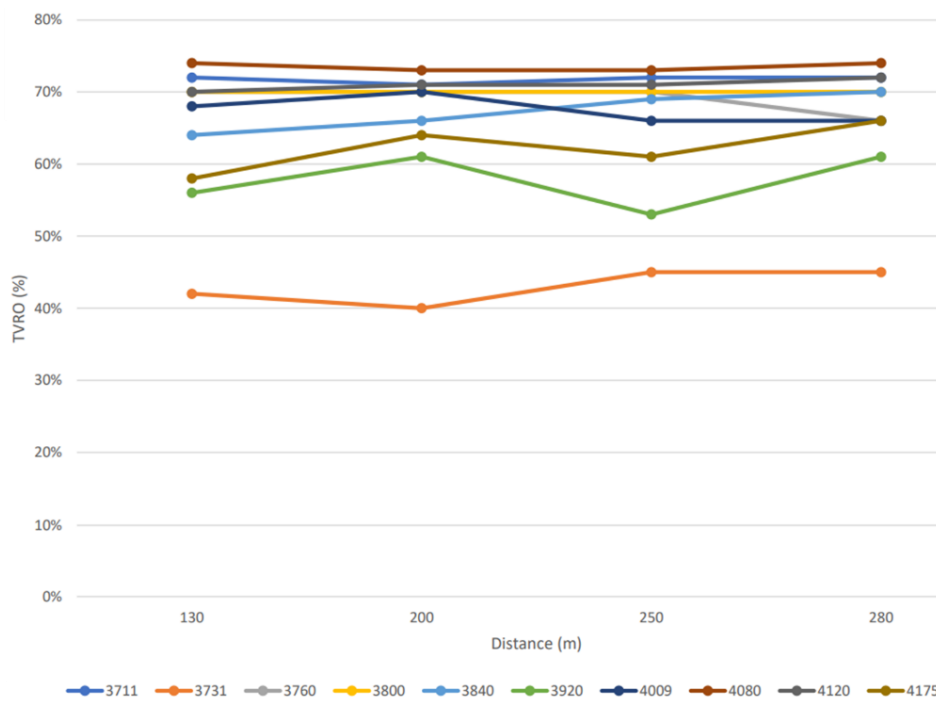
รูป 89 กราฟความสัมพันธ์ C/N กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น F 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



รูป 90 กราฟความสัมพันธ์ LM กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น F 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



รูป 91 กราฟความสัมพันธ์ BER กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น F 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz



รูป 92 กราฟความสัมพันธ์ TVRO กับระยะทางของ LNB 5G Filter รุ่น F 3.7-4.2 GHz กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz

**ข้อสังเกต ในการทดสอบวัดค่าคุณภาพสัญญาณ คณะวิจัยจะใช้เกณฑ์การตัดสินหลักจากความสามารถในการรับชมภาพจากจอทีวีได้เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 วินาทีเป็นหลัก โดยมีเกณฑ์การให้ทั้งสิ้น 4 รูปแบบคือ 1) Macro blocking 2) Blackout 3) Freeze และ 4) Audio Silence โดยคณะวิจัยจะกำหนดให้ผู้ทดสอบใช้แบบฟอร์มในการเลือกกากบาทในช่องที่ผู้ทดสอบพบเห็นจากการทดสอบจริงเป็นหลัก ทั้งนี้หากภาพที่ได้เป็นภาพปกติ นั้นหมายความว่าสัญญาณดิจิทัลสามารถถูกถอดรหัสจากเครื่องรับได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นเพื่อความโปร่งใสของการเก็บผลข้อมูล จึงมีการบันทึกผลเป็นค่าพารามิเตอร์ PWR, MER, C/N และ BER ไว้เป็นหลักฐานสำคัญ เพื่อยืนยันว่าผู้ทดสอบบันทึกค่าที่ได้อย่างถูกต้องอย่างแท้จริง

4 ผลการศึกษาเพิ่มเติม

4.1 ผลการศึกษากฎการใช้จานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.8 เมตรไม่ได้หันเข้าหากันโดยตรง

จานรับสัญญาณดาวเทียมย่าน C-band ที่ใช้งานแพร่หลายในประเทศไทยมีขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร สำหรับการทดสอบการรบกวนการรับสัญญาณดาวเทียมย่าน C-band โดยสัญญาณของโครงข่ายโทรคมนาคมเคลื่อนที่ระบบ 5G ดังแสดงผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 ใช้จานดาวเทียมขนาด 1.5 เมตร ในการทดสอบ เนื่องจากความสะดวกในการติดตั้งและเคลื่อนย้ายอุปกรณ์

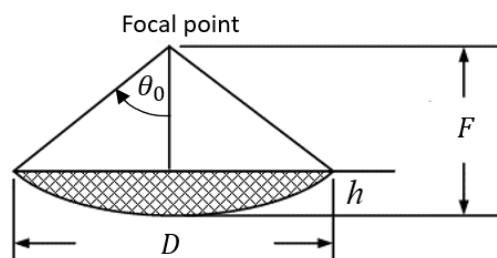
ข้อแตกต่างของลักษณะเฉพาะที่สำคัญของจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการรับสัญญาณ ได้แก่ อัตราขยาย (Gain) และความกว้างลำสัญญาณ (Beamwidth) อัตราขยายของจานรับสัญญาณรูปทรงพาราโบลาที่มีค่าประมาณเท่ากับ

$$G = \varepsilon_{ap} \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจาน λ คือความยาวคลื่น และ ε_{ap} คือ ประสิทธิภาพช่องเปิด (Aperture efficiency) ของจานรับสัญญาณ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_{ap} = \cot^2 \left(\frac{\theta_0}{2} \right) \left| \int_0^{\theta_0} \sqrt{G_f(\theta')} \tan \left(\frac{\theta'}{2} \right) d\theta' \right|^2$$

โดยที่ $G_f(\theta')$ คือแบบรูปการแผ่ (หรือรับ) กำลังงาน (Radiation pattern) ของหัวรับสัญญาณ (Low noise block down converter: LNB) และ θ_0 คือมุมที่ขอบจานทำกับจุดโฟกัส (Focal point) ดังรูป 93



รูป 93 จานรับสัญญาณรูปทรงพาราโบลาและพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้อง

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า จานรับสัญญาณขนาด 1.8 เมตร มีอัตราขยายสูงกว่าจานรับสัญญาณขนาด 1.5 เมตร ประมาณ $20 \log(1.8/1.5) \approx 1.6$ dB (บนสมมติฐานว่า ε_{ap} ของจานทั้งสองขนาดมีค่าใกล้เคียงกัน) ดังนั้น ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน (No interference) จากระบบสื่อสารอื่น ๆ ในย่านความถี่เดียวกัน จานรับสัญญาณขนาด 1.8 เมตร จึงมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณดีกว่าจานรับสัญญาณขนาด 1.5 เมตร ดังแสดงได้จากค่า Carrier-to-Noise Ratio (CNR) ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\text{CNR} = \text{EIRP} + G_r - \text{LOSSES} - P_N$$

โดยที่ CNR คือ Carrier-to-noise ratio (หน่วย dB)

EIRP คือ Equivalent isotropic radiated power ของสัญญาณดาวเทียม (หน่วย dBW)

G_r คือ อัตราขยายของจานรับสัญญาณ (หน่วย dB)

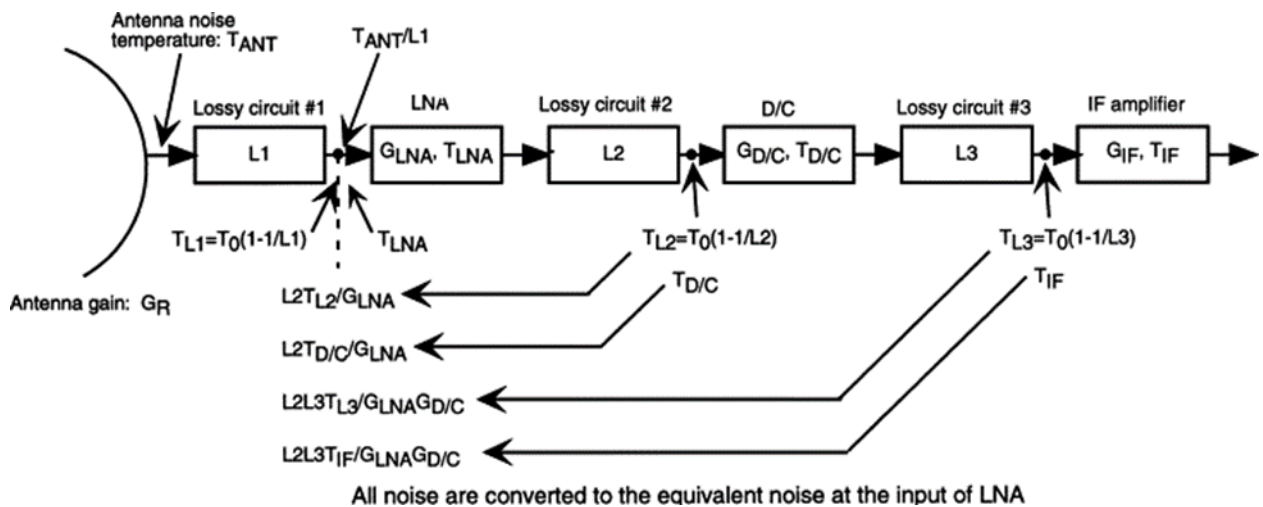
LOSSES คือ ค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดตลอดเส้นทางการรับส่งสัญญาณ (หน่วย dB)

P_N คือ กำลังของสัญญาณรบกวน (Noise) (หน่วย dBW)

รูป 94 แสดงส่วนประกอบของวงจรเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมโดยทั่วไป ประกอบด้วย

- สายอากาศ (Antenna) ได้แก่ จานรับสัญญาณดาวเทียม
- วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise amplifier: LNA)
- วงจรแปลงความถี่ลง (Down converter: D/C)
- วงจรขยายความถี่กลาง (IF amplifier)
- วงจรที่มีการสูญเสีย (Lossy circuit) เช่น สายส่ง (Transmission line) ตัวเชื่อมต่อ (Connector)

ฯลฯ



รูป 94 ส่วนประกอบของวงจรห้รับสัญญาณดาวเทียม (LNB) และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากส่วนต่าง ๆ

ที่มา : lida (2003)

สัญญาณรบกวน (Noise) อาจมาจากแหล่งกำเนิดภายนอกโดยรับเข้ามาทางสายอากาศ (Antenna noise) เช่น Sky noise สำหรับกรณีจานรับสัญญาณดาวเทียม และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในเครื่องรับ โดยสามารถแทนสัญญาณรบกวนได้ในรูปของอุณหภูมิสัญญาณรบกวนสมมูล (Equivalent noise temperature) ที่ฝั่งขาเข้าของ LNA ดังรูป 94 สัญญาณรบกวนรวมของระบบเท่ากับผลรวมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแต่ละส่วนประกอบ

กำลังของสัญญาณรบกวนคำนวณได้จากสมการ

$$P_N = k_B T_S B_N$$

โดยที่ k_B คือ Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 1.380649×10^{-23} J/K

T_S คือ Equivalent noise temperature ของระบบที่ฝั่งขาเข้าของ LNA (หน่วย K)

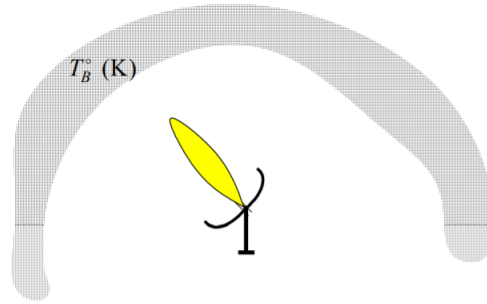
B_N คือ แบนด์วิดท์ของสัญญาณรบกวน (Noise bandwidth) ที่ผ่านเข้าสู่เครื่องรับ ซึ่งเท่ากับแบนด์วิดท์ของ LNA (หน่วย Hz)

จากตัวอย่างวงจรในรูป 94 จะได้ว่า

$$T_S = \frac{T_{ANT}}{L_1} + T_{L1} + T_{LNA} + \frac{T_{L2}L_2}{G_{LNA}} + \frac{T_{D/C}L_2}{G_{LNA}} + \frac{T_{L3}L_2L_3}{G_{LNA}G_{D/C}} + \frac{T_{IF}L_2L_3}{G_{LNA}G_{D/C}}$$

โดยที่ G คืออัตราขยาย (Gain) ของวงจรชนิดแอ็กทีฟ (Active) และ L คือตัวประกอบกำลังสูญเสีย (Loss factor) ของวงจรที่มีการสูญเสีย

กำหนดให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่ (หรือรับ) กำลังงานแทนได้ด้วยฟังก์ชัน $G(\theta, \phi)$ และชี้ทิศทางไปยังวัตถุหรือบริเวณที่มีอุณหภูมิสมมูล (Equivalent temperature) หรืออุณหภูมิความสว่าง (Brightness temperature) เท่ากับ $T_B(\theta, \phi)$ K สำหรับกรณีงานรับสัญญาณดาวเทียมจะชี้ทิศทางไปยังท้องฟ้า ดังรูป 95



รูป 95 งานรับสัญญาณดาวเทียมเล็งไปยังท้องฟ้าซึ่งมีอุณหภูมิสัญญาณรบกวนสมมูลเท่ากับ T_B (K)

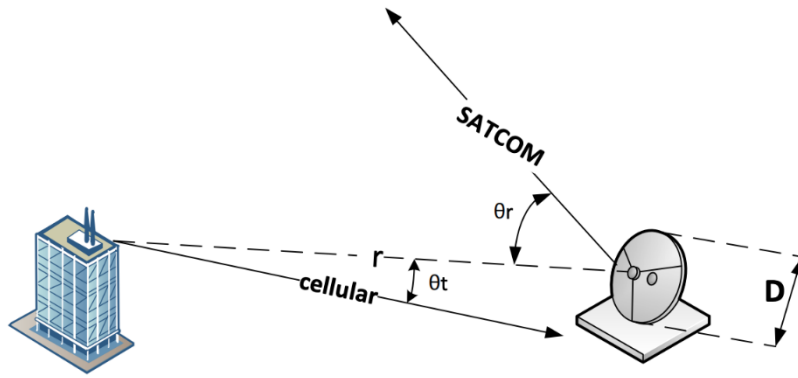
สัญญาณรบกวนที่แผ่จากวัตถุหรือบริเวณที่สายอากาศเล็งไปหาจะถูกรับเข้ามาโดยสายอากาศและปรากฏเป็นอุณหภูมิสมมูลของสายอากาศที่ขั้วต่อ (Terminal) ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ

$$T_{ANT} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi T_B(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}$$

หาก T_B มีค่าประมาณคงที่หรืออย่างน้อยมีค่าคงที่ในบริเวณทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศ จะได้ว่า $T_{ANT} \approx T_B$ นั่นคือ ขนาดของงานรับสัญญาณดาวเทียมที่แตกต่างระหว่าง 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร ไม่มีผลต่อ T_{ANT}

จากสมการของ CNR ข้างต้นจะเห็นว่า หาก G_r เพิ่มขึ้นโดยที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ทางด้านขาของสมการเท่าเดิม จะส่งผลให้ CNR เพิ่มขึ้น และอัตราความผิดพลาดบิต (Bit error rate: BER) ลดลง หรืออีกนัยหนึ่ง สำหรับค่า CNR (หรือ BER) ขั้นต่ำที่เครื่องรับสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ หาก G_r เพิ่มขึ้น ระบบจะสามารถทนทานต่อการสูญเสียและสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น นั่นคือประสิทธิภาพในการรับสัญญาณของระบบเพิ่มขึ้น

กรณีที่มีสัญญาณรบกวน (Interference) จากระบบสื่อสารอื่น ๆ ในย่านความถี่เดียวกันหรือความถี่ใกล้เคียง เช่น สัญญาณของโครงข่ายโทรคมนาคมเคลื่อนที่ระบบ 5G ถูกรับเข้ามาโดยงานรับสัญญาณดาวเทียม ดังแสดงสถานการณ์ในรูป 96



รูป 96 สถานการณ์กรณีสัญญาณของโครงข่ายระบบ 5G รบกวนสัญญาณดาวเทียม

ที่มา : Ardavan (2020)

กำหนดให้จานรับสัญญาณชี้ไปยังทิศทางของดาวเทียม (SATCOM) นั่นคือ ทิศทางที่อัตราขยายและแบบรูปการแผ่ (หรือรับ) กำลังงานของจานรับสัญญาณมีค่าสูงสุด (Boresight direction) เล็งไปยังตำแหน่งของดาวเทียม เพื่อให้จานรับสัญญาณดาวเทียมได้ดีที่สุด กำหนดให้ตำแหน่งของสถานีฐานระบบ 5G อยู่ห่างจากจานรับสัญญาณดาวเทียมเป็นระยะทาง r และอยู่ในทิศทางทำมุม θ_r กับทิศ Boresight ของจานรับสัญญาณ ดังแสดงด้วยแนวเส้นประในรูป 96 ในสถานการณ์ทั่วไปทิศทางของลำคลื่น (Beam) ของสัญญาณโครงข่ายระบบ 5G อาจไม่ได้เล็งไปยังตำแหน่งจานรับสัญญาณดาวเทียมพอดี ดังแสดงในรูป 96 ซึ่งกำหนดให้ทิศทางของลำคลื่นสัญญาณระบบ 5G ทำมุม θ_t กับแนวเส้นประที่เชื่อมระหว่างสถานีฐานระบบ 5G กับจานรับสัญญาณ สำหรับสถานการณ์ที่แย่ที่สุด (Worst-case scenario) ที่กำหนดในการทดสอบภาคสนาม ได้แก่ กรณี $\theta_r = \theta_t = 0$ นั่นคือ สถานีฐานระบบ 5G ตั้งอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่จานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียม และทิศทางของลำคลื่นสัญญาณระบบ 5G เล็งมายังตำแหน่งของจานรับสัญญาณพอดี

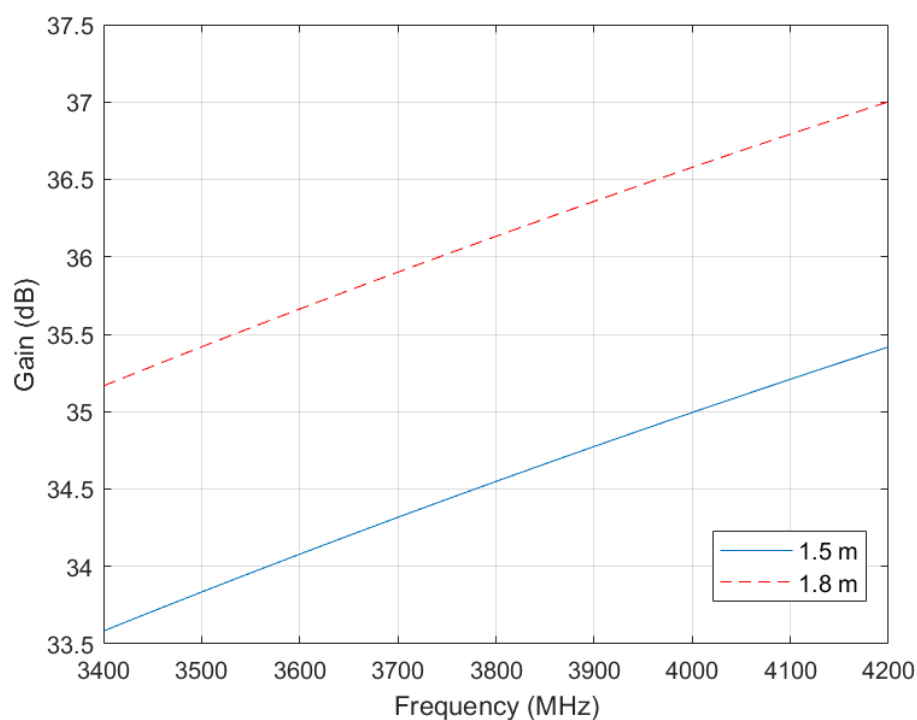
สัญญาณรบกวนอาจมีความถี่ในช่วงเดียวกับสัญญาณดาวเทียม (3700 – 4200 MHz) หรืออาจมีความถี่ใกล้เคียงกับช่วงความถี่ดังกล่าว หากความแรงของสัญญาณมากเพียงพอก็สามารถรบกวนการรับสัญญาณดาวเทียมได้ เนื่องจากสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมถึงพื้นโลกมีระดับความแรงของสัญญาณต่ำมาก (โดยทั่วไปน้อยกว่าความแรงของสัญญาณจากสถานีฐานระบบ 5G มาก) สัญญาณรบกวนอาจส่งผลกระทบต่อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

1) การบีบอัดอัตราขยาย (Gain compression) และการอิ่มตัว (Saturation) ของส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวรับสัญญาณ (LNB) ได้แก่ วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (LNA) วงจรแปลงความถี่ลง (D/C) และวงจรขยายความถี่กลาง (IFA) ดังในรูป 94 โดยหากวงจรเหล่านี้ทำงานในช่วงที่มีการบีบอัดอัตราขยายก็จะมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ทำให้เกิดความเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณ IF ที่ขาเข้าของกล่องรับสัญญาณ ซึ่งอาจส่งผลให้ Modulation error ratio (MER) และ Bit error rate (BER) มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ หากระดับสัญญาณรบกวนสูงมากพอจนทำให้ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวรับสัญญาณเกิดการอิ่มตัว ก็จะทำให้การทำงานขัดข้องและไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้

2) สัญญาณรบกวน (Interference) จากระบบสื่อสารอื่น ๆ จะปรากฏเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) สำหรับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ดังนั้น จะทำให้สัญญาณรบกวนของระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิต (BER) สูงขึ้น นั่นคือประสิทธิภาพในการรับสัญญาณดาวเทียมลดลง

3) อินเตอร์มอดูเลชัน (Intermodulation) ระหว่างสัญญาณรบกวนกับสัญญาณดาวเทียม หรือระหว่างสัญญาณรบกวนกับสัญญาณจาก Local Oscillator (OSC) ของ LNB เนื่องจากคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ของวงจรแปลงความถี่ (D/C) ในกรณีนี้ แม้ว่าสัญญาณรบกวนไม่ได้มีความถี่ในช่วงเดียวกับสัญญาณดาวเทียม แต่ผลของอินเตอร์มอดูเลชันอาจได้สัญญาณในช่วงความถี่เดียวกับความถี่กลาง (IF) ของสัญญาณดาวเทียม และเกิดการรบกวนสัญญาณดาวเทียมได้

สำหรับกรณีสัญญาณโครงข่ายโทรคมนาคมเคลื่อนที่ระบบ 5G ในช่วงความถี่ 3400 – 3600 MHz รบกวนสัญญาณดาวเทียมซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 3700 – 4200 MHz อัตราขยายของจานรับสัญญาณในช่วงความถี่ของสัญญาณทั้งสองอาจมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังตัวอย่างในรูป 97 ซึ่งแสดงอัตราขยายของจานรับสัญญาณรูปทรงพาราโบลา ขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร สำหรับช่วงความถี่ 3400 – 4200 MHz กรณีประสิทธิภาพช่องเปิด $\epsilon_{ap} = 0.8$ จะเห็นว่า อัตราขยายในช่วงความถี่ของสัญญาณระบบ 5G มีค่าต่ำกว่าอัตราขยายในช่วงความถี่ของสัญญาณดาวเทียมไม่เกินประมาณ 1.8 dB และความแตกต่างของอัตราขยายของจานขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร สำหรับความถี่ใด ๆ ในช่วงดังกล่าว มีค่าประมาณ 1.6 dB



รูป 97 อัตราขยายทางทฤษฎีของจานรับสัญญาณรูปทรงพาราโบลา ขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร สำหรับช่วงความถี่ 3400 – 4200 MHz (กรณี $\epsilon_{ap} = 0.8$)

พารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการรับสัญญาณในที่นี้ ได้แก่ Carrier-to-Interference-plus-Noise Ratio (CINR) ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{CINR} = \text{EIRP} + G_{r,\max} - \text{LOSSES} - P_N - P_I$$

โดยที่ $G_{r,\max}$ คืออัตราขยายสูงสุดของจานรับสัญญาณ นั่นคืออัตราขยายในทิศ Boresight ซึ่งเล็งไปยังตำแหน่งของดาวเทียม P_I คือกำลังของสัญญาณรบกวน (หน่วย dBW) ที่รับเข้ามาสู่เครื่องรับ และพารามิเตอร์อื่น ๆ นิยามเหมือนดังในสมการคำนวณ CNR

กำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ

$$P_I = S_I + G_r(\theta_r) + 10 \log(\lambda_I^2 / (4\pi))$$

โดยที่ S_I คือความหนาแน่นกำลัง (Power density) ของสัญญาณรบกวนที่ตกกระทบจานรับสัญญาณ (หน่วย dBW/m²) $G_r(\theta_r)$ คืออัตราขยายของจานรับสัญญาณในทิศทางที่สัญญาณรบกวนเข้ามา (ทำมุม θ_r กับทิศ Boresight ดังรูป 96) และ λ_I คือความยาวคลื่นของสัญญาณรบกวน แทนค่า P_I ในสมการของ CINR จะได้ว่า

$$\text{CINR} = \text{EIRP} + G_{r,\max} - \text{LOSSES} - P_N - S_I - G_r(\theta_r) - 10 \log(\lambda_I^2 / (4\pi))$$

กรณีสัญญาณรบกวน (Interference) เข้ามาในทิศทางเดียวกับสัญญาณดาวเทียม เช่น กรณีสถานีฐานระบบ 5G ตั้งอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่จานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียม จะได้ว่า $\theta_r = 0$ และ $G_r(\theta_r = 0) = G_{r,\max}$ ดังนั้น การเพิ่มอัตราขยายโดยการใช้จานรับสัญญาณขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่พารามิเตอร์อื่น ๆ คงเดิม จึงไม่ทำให้ CINR เพิ่มขึ้น เนื่องจากทั้งสัญญาณดาวเทียมและสัญญาณรบกวนถูกขยายเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่เท่ากัน จากผลการทดสอบภาคสนามกรณีการรบกวนในย่านความถี่ 3500 MHz ดังแสดงในหัวข้อ 5.2 โดยสถานีฐานระบบ 5G ติดตั้งภายนอกอาคารและอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่จานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียมพอดี และใช้จานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.5 เมตร ในกรณีกำหนดแถบความถี่ป้องกัน (Guard band) เท่ากับ 100 MHz พบว่าระยะทางในแนวราบระหว่างจานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G ที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้เท่ากับประมาณ 130 เมตร ผลการทดสอบในสถานการณ์เดียวกันนี้โดยใช้จานรับสัญญาณขนาดใหญ่ขึ้น เช่น ขนาด 1.8 เมตร คาดว่าระยะทางที่สั้นที่สุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้จะไม่แตกต่าง เนื่องจากเหตุผลทางทฤษฎีดังอธิบายข้างต้น ทั้งนี้ ผลสรุปดังกล่าวเป็นการศึกษาโดยอ้างอิงทฤษฎีและยังไม่มีผลการทดสอบภาคสนามมายืนยันสนับสนุน

สำหรับกรณีสัญญาณรบกวนเข้ามาในทิศทางที่แตกต่างจากทิศของสัญญาณดาวเทียม เช่น กรณีสถานีฐานระบบ 5G ไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่จานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียม นั่นคือ $\theta_r \neq 0$ จะได้ว่า $G_r(\theta_r) < G_{r,\max}$ ดังนั้น สัญญาณรบกวนจะถูกขยายน้อยกว่าสัญญาณดาวเทียม หรืออาจไม่ถูกรับเข้ามาเลย ทั้งนี้ขึ้นกับทิศทางของสัญญาณรบกวนว่าตรงกับทิศของลำคลื่นรอง (Minor lobes) หรือตำแหน่งศูนย์ (Nulls) ของแบบรูปการแผ่ (หรือรับ) กำลังงานของจานรับสัญญาณ ซึ่งผลต่าง $G_{r,\max} - G_r(\theta_r)$ ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ CINR มีค่าเพิ่มขึ้น และอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ลดลง หรืออีกนัยหนึ่ง สำหรับค่า CINR ขั้นต่ำที่เครื่องรับสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ หากผลต่างดังกล่าวเพิ่มขึ้น ระบบจะสามารถทนทานต่อความแรงของสัญญาณรบกวน (Interference) ที่ตกกระทบที่จานรับสัญญาณได้มากขึ้น นั่นคือ S_I มีค่าสูงขึ้นได้ หากพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เหลือทางด้านขวาของสมการ CINR มีค่าเท่าเดิม โดย S_I มีค่าเท่ากับ

$$S_I = \text{EIRP}_I - 20 \log(r) - 10 \log(4\pi)$$

โดยที่ EIRP_I คือ Equivalent isotropic radiated power ของสัญญาณรบกวน (หน่วย dBW) และ r คือ ระยะห่างระหว่างงานรับสัญญาณดาวเทียมและแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (สถานีฐานระบบ 5G) ดังรูป 96 จากสมการข้างต้นจะได้ว่า หาก S_I มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ EIRP_I เท่าเดิม จะได้ว่าระยะทาง r ลดลง นั่นคืองานรับสัญญาณดาวเทียมเข้าใกล้สถานีฐานระบบ 5G ได้มากขึ้น โดยที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ ดังนั้น ระยะห่างระหว่างงานรับสัญญาณดาวเทียมและสถานีฐานระบบ 5G ที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้จึงขึ้นกับทิศทางของสถานีฐานเมื่อเทียบกับทิศ Boresight ของงานรับสัญญาณ (ซึ่งเล็งไปยัง ตำแหน่งของดาวเทียม) ด้วย

กำหนดให้ $\tilde{G}_r(\theta_r) = G_r(\theta_r) - G_{r,\max}$ คือ อัตราขยายสัมพัทธ์เทียบกับค่าสูงสุด (หน่วยเป็น dB) ในทิศทางทำมุม θ_r กับทิศ Boresight ของงานรับสัญญาณ (ทิศทางของสัญญาณรบกวน) ค่าดังกล่าวนี้จะ เท่ากับแบบรูปการแผ่ (หรือรับ) กำลังงาน (Radiation pattern) ของงานรับสัญญาณ แทนค่า $\tilde{G}_r(\theta_r)$ และ S_I ในสมการของ CINR จะได้ว่า

$$\text{CINR} = \text{EIRP} - \text{LOSSES} - P_N - \text{EIRP}_I - \tilde{G}_r(\theta_r) + 20 \log(r) - 20 \log(\lambda_I / (4\pi))$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า สำหรับค่า CINR ขั้นต่ำที่เครื่องรับสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ หาก $\tilde{G}_r(\theta_r)$ มีค่าลดลง โดยที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ทางด้านขวาของสมการมีค่าเท่าเดิม จะได้ว่า ระยะทาง r สามารถ ลดลงในสัดส่วนที่สัมพันธ์กันตามสมการได้ ดังนั้น สำหรับกรณีสถานีฐานระบบ 5G ไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับ ทิศทางที่งานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียม จะได้ว่า ระยะทางระหว่างงานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G ที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ จะแตกต่างกันในกรณีใช้งานรับสัญญาณขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร เนื่องจากงานทั้งสองขนาดมีแบบรูปการแผ่กำลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งระยะทางที่แตกต่างกันนี้ สามารถประมาณได้ดังนี้

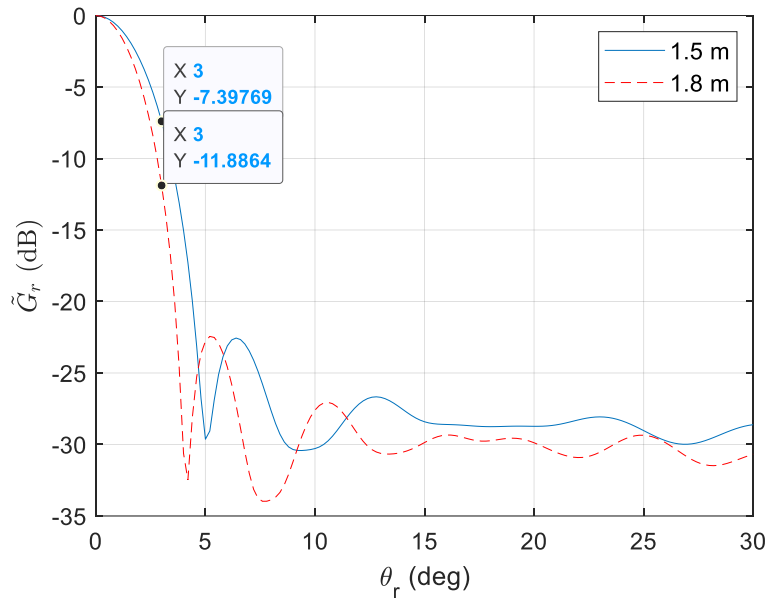
กำหนดให้ $\tilde{G}_{r,1.5m}(\theta_r)$ และ $\tilde{G}_{r,1.8m}(\theta_r)$ แทนอัตราขยายสัมพัทธ์เทียบกับค่าสูงสุด (หรือแบบ รูปการแผ่กำลังงาน) ของงานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร ตามลำดับ และกำหนดให้ $r_{\min,1.5m}$ และ $r_{\min,1.8m}$ คือ ระยะทางระหว่างงานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G ที่สั้นที่สุดที่ยัง สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ กรณีใช้งานขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร ตามลำดับ สำหรับค่า CINR ขั้นต่ำที่เครื่องรับสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ และพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่ จะได้ว่า

$$-\tilde{G}_{r,1.5m}(\theta_r) + 20 \log(r_{\min,1.5m}) = -\tilde{G}_{r,1.8m}(\theta_r) + 20 \log(r_{\min,1.8m})$$

$$\frac{r_{\min,1.8m}}{r_{\min,1.5m}} = 10^{[\tilde{G}_{r,1.8m}(\theta_r) - \tilde{G}_{r,1.5m}(\theta_r)]/20}$$

โดยที่ระยะทาง $r_{\min,1.5m}$ และ $r_{\min,1.8m}$ อยู่ในบริเวณสนามระยะไกล (Far-field) ของงานรับสัญญาณ ขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร ตามลำดับ ในช่วงความถี่ที่พิจารณา

เนื่องจากงานขนาด 1.8 เมตร มีอัตราขยายสูงกว่าและมีความกว้างลำสัญญาณ (Beamwidth) แคบ กว่างานขนาด 1.5 เมตร ดังนั้น $\tilde{G}_{r,1.8m}(\theta_r)$ จึงมีค่าลดลงเร็วกว่า $\tilde{G}_{r,1.5m}(\theta_r)$ เมื่อมุม θ_r เพิ่มขึ้น ดัง ตัวอย่างแบบรูปการแผ่กำลังงานของงานรับสัญญาณรูปทรงพาราโบลาในรูป 98



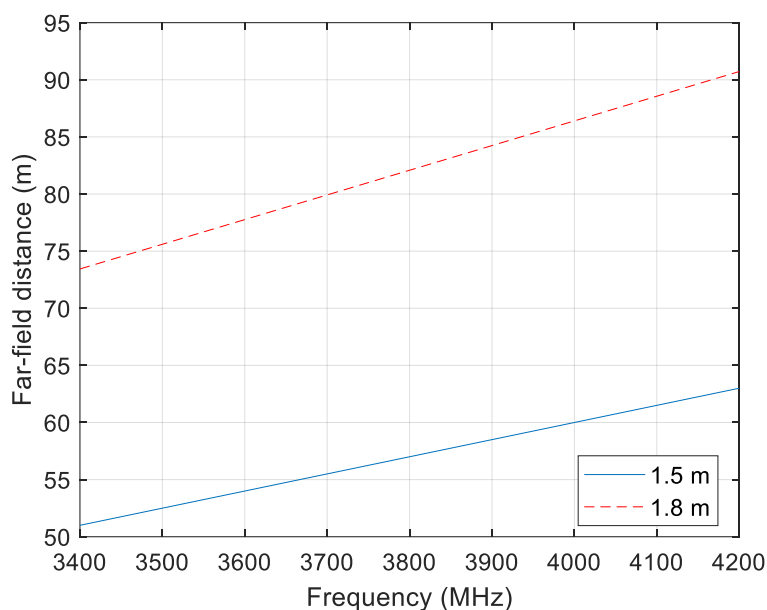
รูป 98 แบบรูปการแผ่กำลังงานของจานรับสัญญาณรูปทรงพาราโบลาขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร (F/D ratio = 0.35) สำหรับความถี่ 3500 MHz และมุม $0^\circ \leq \theta_r \leq 30^\circ$ คำนวณโดยโปรแกรม MATLAB Antenna Toolbox

ดังนั้น กรณีที่สถานีฐานระบบ 5G ไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการที่จานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียม แต่ทำมุมในช่วงประมาณ $0^\circ \leq \theta_r \leq 4^\circ$ จานขนาด 1.8 เมตร อาจสามารถตั้งอยู่ใกล้สถานีฐานระบบ 5G ได้มากกว่าจานขนาด 1.5 เมตร โดยที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ ตัวอย่างเช่น สมมติให้สถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทำมุม $\theta_r = 3^\circ$ กับทิศ Boresight ของจานรับสัญญาณ จากแบบรูปการแผ่กำลังงานสัมพัทธ์จะได้ว่า $\tilde{G}_{r,1.5m}(\theta_r = 3^\circ) \approx -7.4$ dB และ $\tilde{G}_{r,1.8m}(\theta_r = 3^\circ) \approx -11.9$ dB ดังแสดงในรูป 98 ดังนั้น

$$\frac{r_{\min,1.8m}(\theta_r = 3^\circ)}{r_{\min,1.5m}(\theta_r = 3^\circ)} = 10^{[\tilde{G}_{r,1.8m}(\theta_r = 3^\circ) - \tilde{G}_{r,1.5m}(\theta_r = 3^\circ)]/20} \approx 10^{[-11.9 - (-7.4)]/20} \approx 0.6$$

นั่นคือ หากสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทำมุม $\theta_r = 3^\circ$ จากทิศ Boresight ของจาน ระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่างจานรับสัญญาณกับสถานีฐานระบบ 5G โดยที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ กรณีใช้จานขนาด 1.8 เมตร จะน้อยกว่ากรณีใช้จานขนาด 1.5 เมตร เป็นสัดส่วนประมาณ 0.6 เท่า ทั้งนี้ ระยะทางดังกล่าวจะต้องอยู่ในบริเวณสนามระยะไกล (Far-field) ของจานรับสัญญาณ ความสัมพันธ์ของระยะทางตามสมการข้างบนจึงจะใช้ได้

ระยะทางจากสายอากาศถึงบริเวณสนามระยะไกล สำหรับจานรับสัญญาณขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร ในช่วงความถี่ 3400 – 4200 MHz แสดงดังรูป 99 ซึ่งคำนวณได้จาก $R_F = 2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานรับสัญญาณ และ λ คือความยาวคลื่น



รูป 99 ระยะทางจากสายอากาศถึงบริเวณสนามระยะไกล สำหรับงานรับสัญญาณขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร ในช่วงความถี่ 3400 – 4200 MHz

หากพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังงานของงานรับสัญญาณทั้งสองขนาด ในรูป 98 จะเห็นว่า กรณี $4^\circ \leq \theta_r \leq 8^\circ$ อัตราขยายสัมพัทธ์มีค่าต่ำกว่า -20 dB จากค่าสูงสุด และกรณี $\theta_r > 8^\circ$ อัตราขยายสัมพัทธ์มีค่าต่ำกว่า -25 dB จากค่าสูงสุด ดังนั้น จะได้ว่า

$$\frac{r_{\min}(4^\circ \leq \theta_r \leq 8^\circ)}{r_{\min}(\theta_r = 0^\circ)} < 10^{[-20/20]} = 0.1$$

และ

$$\frac{r_{\min}(\theta_r > 8^\circ)}{r_{\min}(\theta_r = 0^\circ)} < 10^{[-25/20]} \approx 0.06$$

นั่นคือ กรณีสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทางมุม $4^\circ \leq \theta_r \leq 8^\circ$ กับทิศที่งานเล็งไปยังดาวเทียม งานรับสัญญาณอาจตั้งอยู่ใกล้กับสถานีฐานระบบ 5G เป็นระยะทางประมาณ 0.1 เท่าของกรณีที่สถานีฐานระบบ 5G ตั้งอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่งานเล็งไปยังดาวเทียมพอดี ($\theta_r = 0^\circ$) โดยที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ และกรณีสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทางมุม $\theta_r > 8^\circ$ กับทิศที่งานเล็งไปยังดาวเทียม งานรับสัญญาณอาจตั้งอยู่ใกล้กับสถานีฐานระบบ 5G เป็นระยะทางประมาณ 0.06 เท่าของกรณีที่สถานีฐานระบบ 5G ตั้งอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่งานเล็งไปยังดาวเทียมพอดี ทั้งนี้ระยะทางดังกล่าวจะต้องอยู่ในบริเวณสนามระยะไกลของงานรับสัญญาณ ความสัมพันธ์ของระยะทางข้างต้นจึงจะใช้ได้

ตัวอย่างเช่น กรณีใช้หัวรับสัญญาณ LNB ชนิดไม่มีวงจรกรองสัญญาณ 5G สมมติให้ระยะทางน้อยที่สุดระหว่างงานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G ที่ตั้งอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่งานเล็งไปยังดาวเทียมพอดี ที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ เท่ากับ 2 กิโลเมตร (เป็นค่าที่สมมติขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ ในการทดลองภาคสนามไม่สามารถทำการทดสอบที่ระยะนี้ได้เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ทดสอบ) หากสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทางมุม $4^\circ \leq \theta_r \leq 8^\circ$ กับทิศที่งานเล็งไปยังดาวเทียม ระยะทางใกล้สุด

ระหว่างงานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G จะลดลงเหลือเพียง 200 เมตร และหากสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทางมุม $\theta_r > 8^\circ$ กับทิศที่งานเล็งไปยังดาวเทียม ระยะทางใกล้สุดระหว่างงานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G จะลดลงเหลือเพียง 120 เมตร

ทั้งนี้ ผลการศึกษาข้างต้นเป็นการวิเคราะห์โดยอ้างอิงหลักการทางทฤษฎีและผลการคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หากแต่ยังไม่มีผลการทดสอบภาคสนามมายืนยันสนับสนุน ในกรณีงานรับสัญญาณดาวเทียมหันไปในทิศทางทำมุม θ_r ค่าต่าง ๆ กับสถานีฐานระบบ 5G และกรณีใช้งานรับสัญญาณขนาด 1.8 เมตร

สรุปผลการศึกษากรณีใช้งานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.8 เมตร

กรณีการรบกวนสูงสุด (Worst case) ได้แก่ กรณีสถานีฐานระบบ 5G ตั้งอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่งานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียม การเพิ่มอัตราขยายโดยการใช้งานรับสัญญาณขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่พารามิเตอร์อื่น ๆ คงเดิม จึงไม่ทำให้ CINR เพิ่มขึ้น เนื่องจากทั้งสัญญาณดาวเทียมและสัญญาณรบกวนถูกขยายเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่เท่ากัน จากผลการทดสอบภาคสนามกรณีการรบกวนในย่านความถี่ 3500 MHz โดยสถานีฐานระบบ 5G ติดตั้งภายนอกอาคารและอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่งานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียมพอดี และใช้งานรับสัญญาณดาวเทียมขนาด 1.5 เมตร ในกรณีกำหนดแถบความถี่ป้องกัน (Guard band) เท่ากับ 100 MHz พบว่าระยะทางในแนวราบระหว่างงานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G ที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้เท่ากับประมาณ 130 เมตร ผลการทดสอบในสถานการณ์เดียวกันนี้โดยใช้งานรับสัญญาณขนาดใหญ่ขึ้น เช่น ขนาด 1.8 เมตร คาดว่าระยะทางที่สั้นที่สุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้จะไม่แตกต่าง เนื่องจากเหตุผลทางทฤษฎีดังอธิบายข้างต้น ทั้งนี้ ผลสรุปดังกล่าวเป็นการศึกษาโดยอ้างอิงทฤษฎีและยังไม่มีผลการทดสอบภาคสนามมายืนยันสนับสนุน

กรณีที่สถานีฐานระบบ 5G ไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่งานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียมแต่ทำมุมบิดไปเล็กน้อย งานขนาด 1.8 เมตรตามทฤษฎีสามารถตั้งอยู่ใกล้สถานีฐานระบบ 5G ได้มากกว่างานขนาด 1.5 เมตร โดยที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ ตัวอย่างเช่น กรณีสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทางมุม 3° กับทิศ Boresight ของงานรับสัญญาณ ระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่างงานรับสัญญาณกับสถานีฐานระบบ 5G โดยที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ กรณีใช้งานขนาด 1.8 เมตร จะน้อยกว่ากรณีใช้งานขนาด 1.5 เมตร เป็นสัดส่วนประมาณ 0.6 เท่า ทั้งนี้ ระยะทางดังกล่าวจะต้องอยู่ในบริเวณสนามระยะไกลของงานรับสัญญาณดาวเทียม

สำหรับงานทั้งขนาด 1.5 เมตร และ 1.8 เมตร หากสถานีฐานระบบ 5G ไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางที่งานรับสัญญาณเล็งไปยังดาวเทียม งานรับสัญญาณดาวเทียมอาจเข้าใกล้สถานีฐานระบบ 5G ได้มากกว่ากรณีการรบกวนสูงสุด โดยที่ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ ตัวอย่างเช่น กรณีสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทางมุม $4^\circ - 8^\circ$ งานรับสัญญาณดาวเทียมอาจเข้าใกล้สถานีฐานระบบ 5G เป็นระยะทางประมาณ 0.1 เท่าของกรณีการรบกวนสูงสุด และกรณีสถานีฐานระบบ 5G อยู่ในทิศทางมุมมากกว่า 8° งานรับสัญญาณดาวเทียมอาจเข้าใกล้สถานีฐานระบบ 5G เป็นระยะทางประมาณ 0.06 เท่าของกรณีการรบกวนสูงสุด ทั้งนี้ ระยะทางดังกล่าวจะต้องอยู่ในบริเวณสนามระยะไกลของงานรับสัญญาณดาวเทียม

4.2 กิจการสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก (Very Small Aperture Terminal)

คลื่นความถี่ในช่วง 3.4 ถึง 4.2 กิกะเฮิรตซ์ มีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย เช่น บริการดาวเทียมประจำที่ (Fixed Satellite Service: FSS) รวมถึงกิจการสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก (Very Small Aperture Terminal: VSAT) แบบประจำที่และแบบเคลื่อนที่ ย่านความถี่ C-band เป็นบริการสื่อสารผ่านดาวเทียมสำหรับให้บริการรับส่งเสียง (Voice) ภาพ (Video) และข้อมูล (Data) รวมไปถึงการให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง (Broadband internet) ระบบ VSAT เป็นการสื่อสารแบบสองทาง (Full duplex) โดยฝั่งขาขึ้นการเชื่อมโยงลง (Downlink) ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณจากดาวเทียมมายังสถานีภาคพื้นดิน ใช้คลื่นความถี่ในช่วง 3.4 ถึง 4.2 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งทับซ้อนหรือใกล้เคียงกับคลื่นความถี่ที่จัดสรรให้ใช้งานสำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G ข้อดีของระบบ VSAT คือ อุปกรณ์มีขนาดเล็ก สามารถติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็วเหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีระบบสื่อสารอื่น ๆ เช่น พื้นที่ในทะเล หรือกรณีเกิดภาวะภัยพิบัติทางธรรมชาติทำให้ระบบสื่อสารหลักเสียหายหรือขัดข้องใช้งานไม่ได้ การประยุกต์ใช้งานระบบ VSAT ส่วนใหญ่ใช้สำหรับภาคธุรกิจ รวมทั้งหน่วยงานทางทหารและรัฐบาล และมีการใช้งานแพร่หลายในกลุ่มประเทศที่มีสภาพภูมิประเทศไม่เอื้อต่อการติดตั้งโครงข่ายภาคพื้นดินให้ครอบคลุมพื้นที่ทั่วถึง สำหรับผู้ใช้งานระบบ VSAT ในประเทศไทยมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในปัจจุบันโครงข่ายภาคพื้นดินกระจายครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ การประยุกต์ใช้งานระบบ VSAT ย่านความถี่ C-band ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้สำหรับการถ่ายทอดสด เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของระบบ VSAT ดังกล่าวข้างต้น

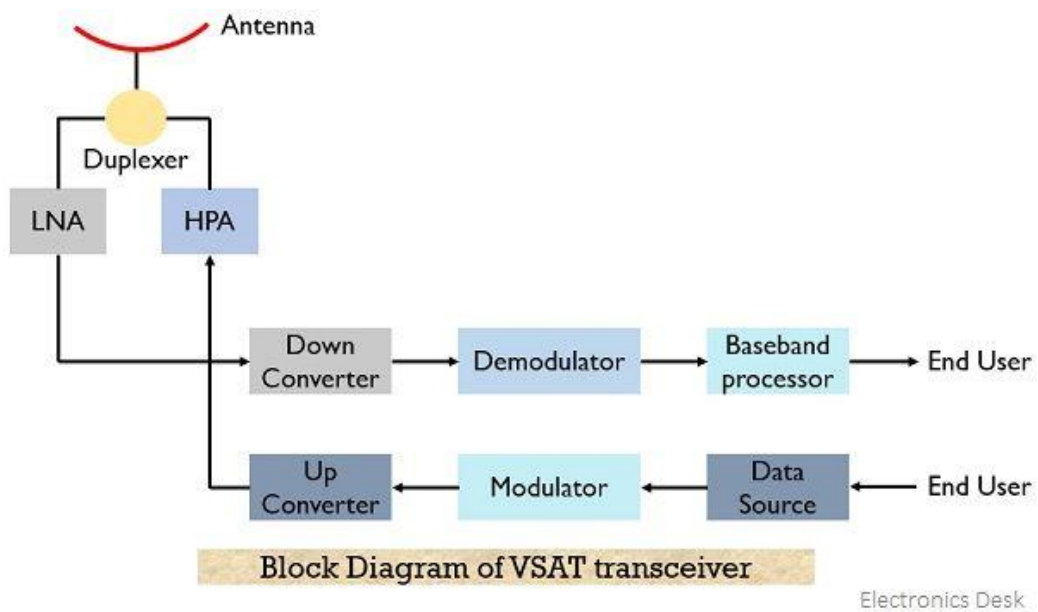
ส่วนประกอบหลักของระบบ VSAT ประกอบด้วย

- 1) ช่องสัญญาณดาวเทียม (Satellite Transponder)
- 2) HUB Earth Station
- 3) VSAT Terminal

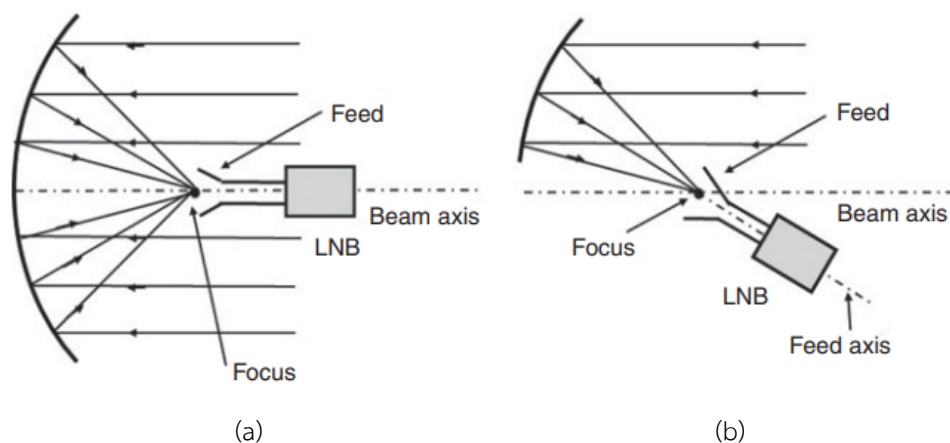
ดังแสดงด้วยแผนภาพบล็อก (Block diagram) ในรูป 100

สำหรับ VSAT Terminal ประกอบด้วย

- 1) จานสายอากาศ (Dish antenna) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.4 เมตร และส่วนใหญ่เป็นแบบ Offset feed ดัง(a) (b)
- 2) รูป 101 (b) เพื่อลดระดับของลำคลื่นรอง (Side lobe level)
- 3) เครื่องรับส่ง (Transceiver) ประกอบด้วย Block up-converter (BUC) และ Low-noise block down-converter (LNB) โดย LNB ที่ใช้สำหรับ VSAT Terminal จะเป็นชนิด PLL (Phase Locked Loop) ซึ่งแตกต่างจาก LNB ชนิด DRO (Dielectric Resonator Oscillator) ที่ใช้ในระบบ TVRO นั่นคือ PLL-LNB จะมีความถี่ของตัวกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) คงที่มากกว่า DRO-LNB แต่ก็จะมีราคาสูงกว่า
- 4) โมเด็มสำหรับสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite MODEM)



รูป 100 แผนภาพบล็อกแสดงส่วนประกอบหลักของระบบ VSAT



รูป 101 จานสายอากาศแบบ (a) Axial feed และ (b) Offset feed

ที่มา : Pratt & Allnutt (2020)

จากข้อมูลผลการศึกษาการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G และกิจการสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก (VSAT) ในต่างประเทศ พบว่ามีการกำหนดแนวทางการใช้งานร่วมกัน ดังต่อไปนี้

ประเทศ	Guard band	ข้อเสนอแนะ
Brazil	25 MHz	จำเป็นต้องติดตั้ง Filter สำหรับเครื่องรับสัญญาณ TVRO คุณภาพต่ำ
Brunei	100 MHz	หยุดให้บริการ VSAT ในย่าน 3.4 – 3.7 GHz และแบ่งย่านความถี่ละ 100 MHz ให้แก่ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวน 2 ราย

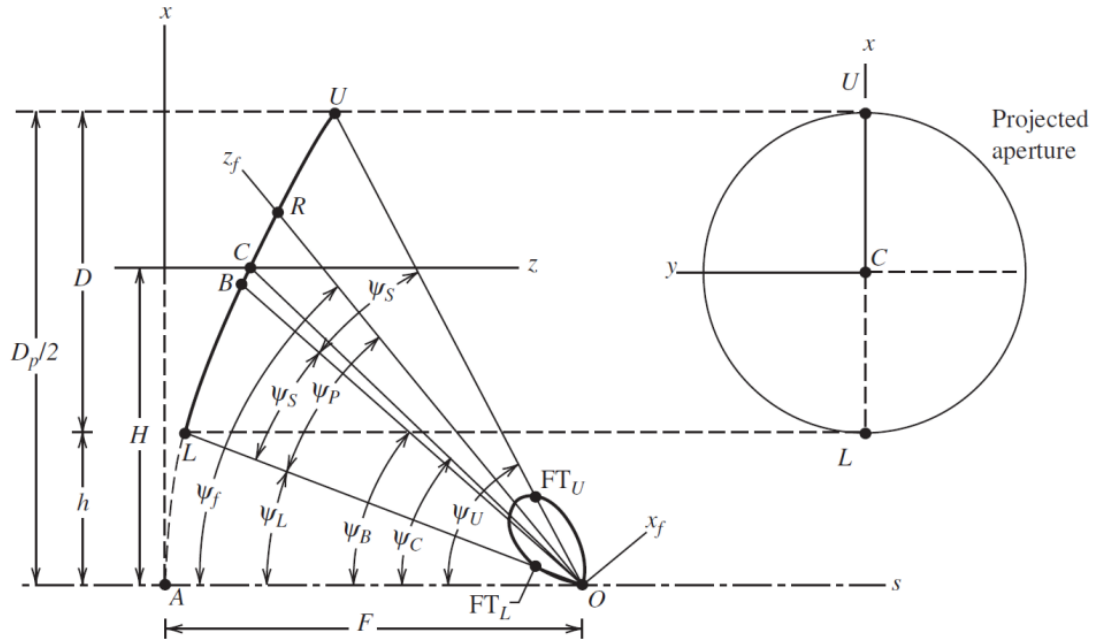
ประเทศ	Guard band	ข้อเสนอแนะ
Hong Kong	100 MHz	ข้อสมมุติฐานกรณีที่ใช้งานแย่งที่สุดถูกใช้ในการวิเคราะห์
Singapore	100 MHz	กำลังมีผลการศึกษาในการหาค่า Guard band ที่เหมาะสม
Taiwan	44 MHz	จำเป็นต้องติดตั้ง Filter สำหรับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมประจำที่ ในย่านความถี่ใกล้เคียง (Adjacent band) ที่ระยะห่างไป 150 เมตร จากสถานีภาครับที่ถูกป้องกัน
US	20 MHz	ถูกกำหนดโดยผู้ให้บริการดาวเทียมตามข้อเสนอในการประมูล
Malaysia	100 MHz	ขึ้นกับผลการศึกษา พบว่าสามารถใช้ร่วมกันได้กับสถานีฐาน 5G ที่ ระยะใกล้สุด 85 เมตรด้วยค่า Guard Band 100 MHz และใช้อุปกรณ์ กรองผ่านสัญญาณที่มีค่าการกีดกัน (Rejection) ไม่น้อยกว่า 45 dB ⁷

สำหรับประเทศไทย ยังไม่พบว่ามีรายงานผลการศึกษาการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันระหว่างกิจการ โทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G และกิจการสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็ก เนื่องจากการทดลอง ภาคสนามเพื่อศึกษาการรบกวนระบบ VSAT โดยสัญญาณโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากลระบบ 5G ไม่ได้อยู่ใน ขอบเขตการดำเนินงานของโครงการนี้ ดังนั้น การศึกษาผลของการรบกวนสัญญาณเพื่อหาระยะทางใกล้สุด ระหว่างจานสายอากาศของระบบ VSAT และสถานีฐานระบบ 5G โดยที่ระบบ VSAT ยังสามารถใช้งานได้ อาจอ้างอิงหลักการทางทฤษฎีและเทียบเคียงจากผลการทดสอบภาคสนามกรณีการรบกวนระบบรับสัญญาณ โทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (TVRO) ย่าน C-band โดยใช้แนวทางเดียวกับการศึกษากรณีใช้งานรับสัญญาณ ดาวเทียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 เมตร สำหรับระบบ TVRO ดังแสดงในหัวข้อ 4.7

สถานการณ์กรณีสัญญาณโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากลระบบ 5G รบกวนการใช้งานระบบ VSAT สามารถแสดงได้เช่นเดียวกับรูป 96 โดยสัญญาณระบบ 5G จะรบกวนการรับสัญญาณฝั่ง Downlink ซึ่งใช้ คลื่นความถี่ในช่วง 3.4 ถึง 4.2 กิกะเฮิรตซ์

จานสายอากาศแบบ Offset feed ซึ่งนิยมใช้สำหรับ VSAT terminal มีค่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต (Geometry parameters) แสดงดังรูป 180 จานสายอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง D และระยะโฟกัส F โดย จานสายอากาศเป็นส่วนหนึ่งของพื้นผิวจานแหล่งกำเนิด (Parent reflector) รูปทรงพาราโบลาที่มีขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง $D/2$ และมีแกนเป็นแนวเส้นตรง s ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง C ของจานสายอากาศอยู่สูงจาก แนวแกน s เป็นระยะ offset H

⁷ MCMC; Co-existence Evaluation between Mobile Service (5G) from 3400 to 3600 MHz and Fixed Satellite Service (VSAT) from 3700 to 4200 MHz – 4th meeting 29 Sep 2020



รูป 102 พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของจานสายอากาศแบบ Offset feed

มุมที่ขอบจานสายอากาศด้านบน (ตำแหน่ง U) และด้านล่าง (ตำแหน่ง L) ทำกับจุดโฟกัส (Subtended angle) ได้แก่ $2\Psi_S$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\Psi_S = \tan^{-1} \left(\frac{8FD}{16F^2 + 4H^2 - D^2} \right)$$

โปรดสังเกตว่า กรณีระยะ offset $H = 0$ ได้แก่จานสายอากาศแบบ Axial feed

อัตราขยายสูงสุดของจานสายอากาศแบบ Offset feed สามารถคำนวณค่าโดยประมาณโดยใช้สมการเดียวกับจานสายอากาศแบบ Axial feed ดังในหัวข้อ 7.1 ได้แก่

$$G_0 = \varepsilon_{ap} \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจาน λ คือความยาวคลื่น และ ε_{ap} คือประสิทธิภาพช่องเปิด (Aperture efficiency) ของจานสายอากาศ ซึ่งเป็นผลรวมของประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ของจานสายอากาศ ดังสมการ

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_r \varepsilon_t \varepsilon_s \varepsilon_a$$

โดยที่

ε_r คือ Radiation efficiency ขึ้นกับการสูญเสีย (Loss) ในส่วนประกอบต่าง ๆ ของสายอากาศ

ε_t คือ Taper efficiency ขึ้นกับแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศตัวป้อน (Feed antenna)

ε_s คือ Spillover efficiency ขึ้นกับขนาดลำคลื่นของสายอากาศตัวป้อนและขนาดพื้นที่ของจาน

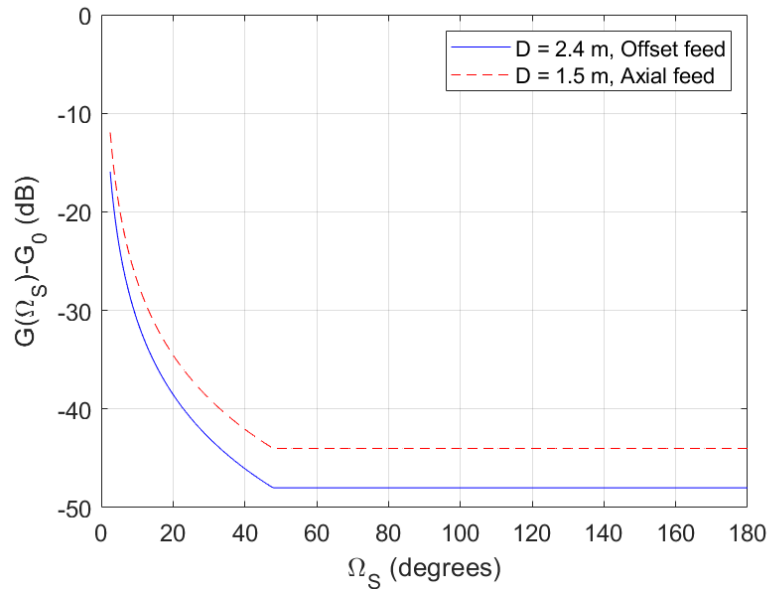
ε_a คือ Achievement efficiency เป็นผลรวมจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความไม่เรียบของพื้นผิวจาน ความคลาดเคลื่อนของรูปทรงของพื้นผิวจานจากอุดมคติ การบังสัญญาณโดยสายอากาศป้อนและตัวจับยึด ความคลาดเคลื่อนของโพลาริเซชันของคลื่น ฯลฯ

ตัวอย่างเช่น จานสายอากาศแบบ Offset feed ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร ซึ่งนิยมใช้สำหรับ VSAT terminal มีอัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ 3800 MHz เท่ากับ $G_0 \approx 9121 \varepsilon_{ap}$ สำหรับกรณี $\varepsilon_{ap} = 0.75$ จะได้ $G_0 \approx 6841 \approx 38$ dB ซึ่งใกล้เคียงกับค่าใน Datasheet ของตัวอย่างจานสายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร ย่านความถี่ C-band ที่ขายในท้องตลาด ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

Electrical		C-Band Linear	C-Band Circular
Antenna Size		2.4M (96 in.)	2.4M (96 in.)
Operating Frequency (GHz)	Receive Transmit	3.625 - 4.20 GHz 5.85 - 6.425 GHz	3.625 - 4.20 GHz 5.85 - 6.425 GHz
Antenna Gain at Midband, dBi ($\pm .2$ dB)	Receive Transmit	38.20 dBi 42.20 dBi	38.00 dBi 42.00 dBi
VSWR		1.3:1 Max	1.3:1 Max
Pattern Beamwidth (in degrees at midband)	-3 dB -15 dB	Rx: 2.20° Tx: 1.40° Rx: 4.90° Tx: 3.10°	Rx: 2.20° Tx: 1.40° Rx: 4.90° Tx: 3.10°
Sidelobe Envelope, Co-Pol (dBi) 100° / D < $\theta \leq 20^\circ$ 20° < $\theta \leq 26.3^\circ$ 26.3° < $\theta \leq 48^\circ$ $\theta > 48^\circ$		29 - 25 Log θ dBi -3.5 dBi 32 - 25 Log θ dBi -10 dBi (averaged)	29 - 25 Log θ dBi -3.5 dBi 32 - 25 Log θ dBi -10 dBi (averaged)
Antenna Noise Temperature 10° Elevation 20° Elevation 30° Elevation 40° Elevation		52 K 46 K 45 K 44 K	57 K 49 K 45 K 45 K
Cross Polarization Isolation (Linear) On Axis	Receive Transmit	>30 dB >30 dB	N/A N/A
Axial Ratio (Circular)	Receive Transmit	N/A N/A	1.4 VAR (2.95 dB) 1.3 VAR (2.28 dB)
Feed Interface	Receive Transmit	CPR 229F CPR 137 or Type N	CPR 229F CPR 137 or Type N

ที่มา : Technical Specifications, 2.4M C-Band Rx/Tx Antenna Series 1241, General Dynamics

สำหรับอัตราขยายในทิศทางนอกลำคลื่นหลักของจานสายอากาศแบบ Offset feed จะต้องไม่เกินค่าขอบเขตตามข้อกำหนดของ ITU-R ใน Recommendation ITU-R S.465-6 เช่นเดียวกับจานสายอากาศชนิด Axial feed ดังแสดงในหัวข้อ 7.1 ดังนั้น ค่าขอบเขตของอัตราขยายสัมพัทธ์ในทิศทางนอกลำคลื่นหลักของจานสายอากาศแบบ Offset feed ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร ย่านความถี่ C-band ($G_0 \approx 38$ dB) อ้างอิงตามข้อกำหนดของ ITU-R แสดงได้ดังรูป 103 เปรียบเทียบกับค่าของจานสายอากาศแบบ Axial feed ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ($G_0 \approx 34$ dB) จากกราฟจะเห็นได้ว่า จานสายอากาศแบบ Offset ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร มีค่าขอบเขตของอัตราขยายสัมพัทธ์ในทิศทางนอกลำคลื่นหลักที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีค่าอัตราขยายสูงสุดในทิศแกนของลำคลื่นหลัก (G_0) ที่สูงกว่านั่นเอง



รูป 103 ค่าขอบเขตของอัตราขยายสัมพัทธ์ในทิศทางนอกลำคลื่นหลักของจานสายอากาศแบบ Offset feed ขนาด $\varnothing$ 2.4 เมตร ($G_0 \approx 38$ dB) เปรียบเทียบกับจานสายอากาศแบบ Axial feed ขนาด $\varnothing$ 1.5 เมตร ($G_0 \approx 34$ dB) ตามข้อกำหนดของ ITU-R

ประสิทธิภาพการสื่อสารฝั่ง Downlink ของระบบ VSAT สัมพันธ์กับค่า Carrier-to-Interference-plus-Noise Ratio (CINR) ที่ภาครับสัญญาณของ VSAT Terminal ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$\text{CINR} = \text{EIRP} - \text{LOSSES} - P_N - \text{EIRP}_I - \tilde{G}_r(\Omega_s) + 20 \log(r) - 20 \log(\lambda_I / (4\pi))$$

โดยที่

- EIRP คือ Equivalent isotropic radiated power ของสัญญาณดาวเทียม
- LOSSES คือ ค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดตลอดเส้นทางการรับส่งสัญญาณ
- P_N คือ กำลังของสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากเครื่องรับ
- EIRP_I คือ Equivalent isotropic radiated power ของสัญญาณรบกวน (Interference) จากระบบ 5G
- λ_I คือความยาวคลื่นของสัญญาณรบกวนจากระบบ 5G
- r คือระยะห่างระหว่างจานรับสัญญาณดาวเทียมและสถานีฐานระบบ 5G
- $\tilde{G}_r(\Omega_s) = G_r(\Omega_s) - G_{r0}$ คือ อัตราขยายสัมพัทธ์เทียบกับค่าอัตราขยายสูงสุดของจานสายอากาศในทิศทางทำมุม Ω_s กับแกนของลำคลื่นหลัก ซึ่งเป็นทิศทางที่รับสัญญาณรบกวนเข้ามา

หากเปรียบเทียบระบบ VSAT และ TVRO ซึ่งถูกรบกวนโดยสัญญาณระบบ 5G โดยพิจารณาจากค่า CINR ตามสมการข้างต้น จะได้ว่า ค่า EIRP, LOSSES และ P_N ของระบบ VSAT และ TVRO มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า EIRP_I , λ_I , r และ Ω_s มีค่าเท่ากันในการเปรียบเทียบทั้งสองระบบ เนื่องจากพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานระบบ 5G เดียวกัน จากกราฟในรูป 103 ค่าขอบเขตในทิศทางนอกลำคลื่นหลัก

ตามข้อกำหนดของ ITU-R ของ $G_r(\Omega_S)$ สำหรับ VSAT Terminal กรณีใช้งานสายอากาศแบบ Offset feed ขนาด $\varnothing$ 2.4 เมตร มีค่าต่ำกว่าของเครื่องรับ TVRO กรณีใช้งานสายอากาศแบบ Axial feed ขนาด $\varnothing$ 1.5 เมตร ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ค่า CINR ของระบบ VSAT มีแนวโน้มสูงกว่าของระบบ TVRO ในสถานการณ์ถูกรบกวนแบบเดียวกันโดยสัญญาณระบบ 5G ซึ่งค่า Sensitivity ของเครื่องรับสำหรับระบบ VSAT และ TVRO มีค่าประมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงคาดได้ว่า ระบบ VSAT จะสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากระบบ 5G ได้ดีกว่าระบบ TVRO โดยประสิทธิภาพที่ดีกว่าของระบบ VSAT มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อมุม Ω_S เพิ่มขึ้น (ดังเห็นได้จากกราฟในรูป 103) ตัวอย่างเช่น ในกรณีสถานีฐาน 5G อยู่ในทิศทำมุมในแนวราบกับทิศที่งานสายอากาศเล็งไปยังดาวเทียมเพิ่มมากขึ้น ($|\phi_S - \phi_B|$ มีค่ามากขึ้น)

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาทางทฤษฎีข้างต้นจึงสรุปได้ว่า ระบบ VSAT มีประสิทธิภาพในการทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากระบบ 5G ได้มากกว่าระบบ TVRO เนื่องจากใช้งานสายอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยประสิทธิภาพจะยิ่งดีขึ้นไปอีกในกรณีที่สถานีฐาน 5G และงานรับสัญญาณดาวเทียมไม่ได้หันเข้าหากันโดยตรง ดังนั้น ในทางปฏิบัติ ระบบ VSAT จึงอาจเข้าใกล้สถานีฐานระบบ 5G ได้มากกว่าระบบ TVRO โดยที่ระบบยังสามารถทำงานได้ปกติ ทั้งนี้ ข้อสรุปข้างต้นมาจากผลการศึกษาทางทฤษฎี และอาจต้องมีการตรวจสอบยืนยันจากการทดลองภาคสนาม

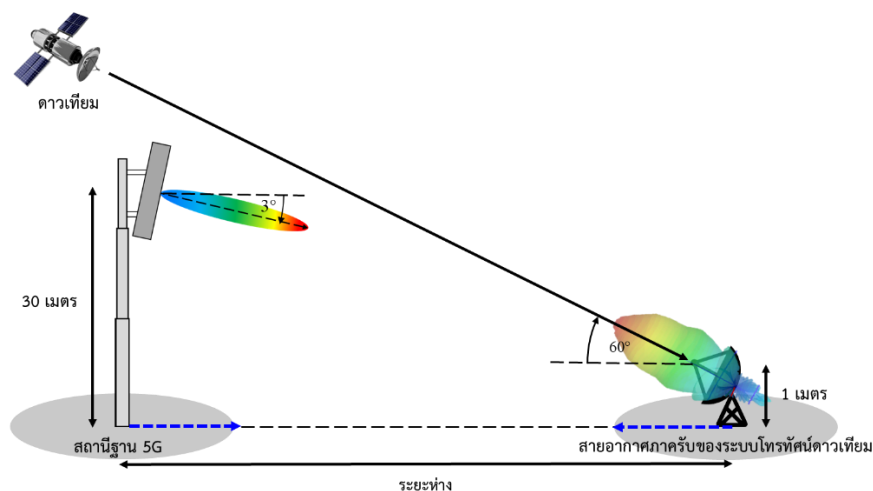
ทั้งนี้ จากผลการทดสอบภาคสนามในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรณีการรบกวนระบบ TVRO ในย่านความถี่ 3500 MHz โดยสถานีฐานระบบ 5G ติดตั้งภายนอกอาคารและหันหน้าเข้าหาจานรับสัญญาณดาวเทียมพอดิ โดยระบบ TVRO ใช้งานสายอากาศแบบ Axial feed ขนาด $\varnothing$ 1.5 เมตร หากกำหนดแถบความถี่ป้องกัน (Guard band) เท่ากับ 100 MHz พบว่าระยะทางในแนวราบระหว่างจานรับสัญญาณและสถานีฐานระบบ 5G ที่น้อยที่สุดที่ระบบ TVRO ยังสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ปกติ เท่ากับประมาณ 130 เมตร ข้อกำหนดนี้จึงสามารถนำมาใช้ได้กับระบบ VSAT ซึ่งใช้งานสายอากาศแบบ Offset feed ขนาด $\varnothing$ 2.4 เมตร เช่นเดียวกัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าในทางทฤษฎี

4.3 การจำลองเพื่อหาระยะห่างป้องกันสำหรับการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศนดาวเทียมในกรณีที่ใช้หัว LNB ที่ไม่มี 5G Filter

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศนดาวเทียม เพื่อหาระยะห่างป้องกันที่ทำให้ระบบโทรทัศนดาวเทียมสามารถทำงานได้อย่างราบรื่นในกรณีที่ไม่มี 5G Filter

ภาพรวมการจำลอง

ภาพเหตุการณ์ที่ใช้สำหรับการจำลองเพื่อหาระยะห่างป้องกันสำหรับกรณีใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศนดาวเทียมจะแสดงดังรูปด้านล่าง โดยจานดาวเทียมหรือสายอากาศภาครับของระบบโทรทัศนดาวเทียมจะหันหน้าและเล็งจานดาวเทียมไปยังดาวเทียมที่ให้บริการซึ่งในที่นี้จะพิจารณาว่าเป็นดาวเทียมไทยคม 6 ดังนั้นในการจำลองจึงกำหนดให้มุมเงยของจานดาวเทียมมีค่าเป็น 60 องศาซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงของมุมเงยจานดาวเทียมที่เล็งไปยังดาวเทียมไทยคม 6 ซึ่งมีค่าเป็น 59.7984 องศา ทั้งนี้เพื่อให้การจำลองเป็นการจำลองในกรณีเลวร้ายที่สุดที่อาจเกิดขึ้นในสถานการณ์จริง ในการจำลองนี้จึงได้กำหนดให้สายอากาศ 5G และจานดาวเทียมหันหน้าเข้าหากัน ซึ่งหมายถึง จานดาวเทียมจะอยู่ในตำแหน่งที่มุมเบี่ยงเบนตามแนวราบจากสายอากาศ 5G มีค่าเป็น 0 องศา และในทางเดียวกันนั้นสายอากาศ 5G ก็จะมีอยู่ในตำแหน่งที่มุมเบี่ยงเบนตามแนวราบจากจานดาวเทียมมีค่าเป็น 0 องศา ดังแสดงได้ด้วยลูกศรเส้นประสีน้ำเงินในรูปด้านล่าง

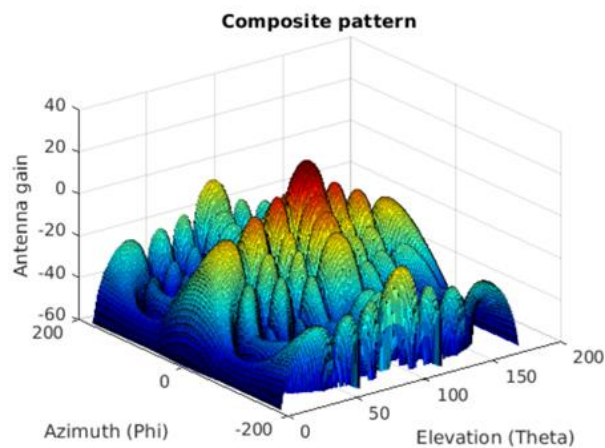


รูป 104 ภาพเหตุการณ์ที่ใช้ในการจำลองการใช้คลื่น 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศนดาวเทียม

สำหรับพารามิเตอร์ของสถานีฐาน 5G และจานดาวเทียมนั้น ในการจำลองนี้จะกำหนดให้สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz โดยใช้กำลังงานส่งเป็น 200 W และความกว้างแถบความถี่เป็น 20 และ 100 MHz ส่วนสายอากาศ 5G จะกำหนดให้สูงจากพื้น 30 เมตร มีมุมก้มเป็น 3 องศา และมีแบบรูปกระจายคลื่น

เป็นแบบรูปตามข้อกำหนด RECOMMENDATION ITU-R M.2101 พร้อมกับกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตามเอกสาร ITU-R WP5D Contribution 742 “AN OPEN-SOURCE IMPLEMENTATION OF RECOMMENDATION ITU-R M.2101” ซึ่งจะทำให้แบบรูปของสายอากาศมีลักษณะดังรูปด้านล่าง สำหรับพารามิเตอร์ของจานดาวเทียมนั้น ในการจำลองนี้จะกำหนดให้จานดาวเทียมสูง 1 เมตร มีมุมเงยเป็น 60 องศา และมีแบบรูปกระจายคลื่นเป็นแบบรูปตามข้อกำหนด ITU-R S.465-6 โดยจานดาวเทียมจะถูกวางไว้ที่ระยะห่างตั้งแต่ 1 เมตรจนถึง 5,000 เมตร

ค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐาน 5G และจานดาวเทียมจะถูกสรุปไว้ในตาราง 1 และตาราง 2 ตามลำดับ โดยการจำลองการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz นี้จะทำการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Planet ที่ผลิตโดยบริษัท INFOVISTA



รูป 105 แบบรูปสายอากาศ 5G ตามข้อกำหนด RECOMMENDATION ITU-R M.2101 เมื่อมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตามเอกสาร ITU-R WP5D Contribution 742 “AN OPEN-SOURCE IMPLEMENTATION OF RECOMMENDATION ITU-R M.2101”

ตาราง 1 พารามิเตอร์ของสถานีฐาน 5G สำหรับการจำลองการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรศัพท์ดาวเทียม

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	หน่วย
ความถี่กลาง	3.5	GHz
ความกว้างแถบความถี่	20, 100	MHz

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	หน่วย
กำลังงานส่ง	200	W
แบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ	ITU-R M.2101	-
มุมก้มสายอากาศ	3	องศา
ความสูงของสายอากาศจากพื้นดิน	30	เมตร

ตาราง 2 พารามิเตอร์ของจานดาวเทียมระบบโทรทัศนดาวเทียม สำหรับการจำลองการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศนดาวเทียม

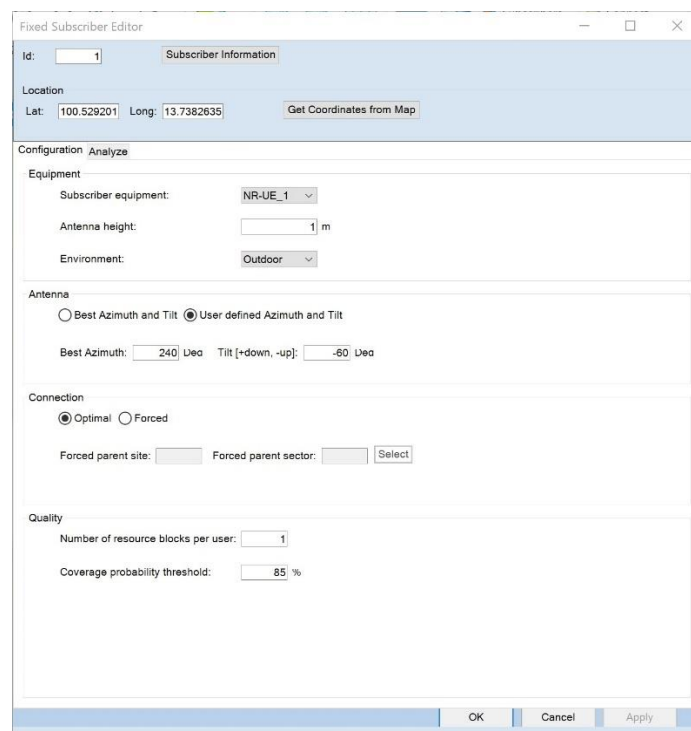
พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	หน่วย
แบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ	ITU-R S.465-6	-
ความสูงสายอากาศจากพื้นดิน	1	เมตร
ระยะห่างแนวราบจากสถานีฐาน 5G	1 ถึง 5,000	เมตร
มุมเงยจานดาวเทียม	60	องศา

4.3.1 การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Planet

ในการจำลองนั้น ค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐาน 5G และจานดาวเทียมในซอฟต์แวร์ Planet จะต้องถูกกำหนดค่าให้มีค่าตามตาราง 1 และตาราง 2 ตามลำดับ โดยรูป 106 จะแสดงหน้าต่างการตั้งค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐาน 5G โดยจากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า ในหน้าต่างการตั้งค่าได้มีการกำหนดคลื่นพาห์ของสถานีฐาน 5G ไว้ 2 รูปแบบ โดยคลื่นพาห์แบบแรก (ซึ่งก็คือ Carrier Number 1) นั้น ได้ถูกกำหนดขึ้นสำหรับกรณีที่ ต้องการให้สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 100 MHz ส่วนคลื่นพาห์แบบที่สอง (ซึ่งก็คือ Carrier Number 2) จะใช้สำหรับกรณีที่ต้องการให้สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 20 MHz

สำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของจานดาวเทียมที่ใช้ในการจำลองนั้น จะแสดงดังรูป 108 โดยจากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า จานดาวเทียมได้ถูกกำหนดให้มีความสูงเป็น 1 เมตรและมีมุมเงยเป็น 60 องศา ส่วนแบบรูปกระจายคลื่นของจานดาวเทียมนั้น จะแสดงดังรูป 109

สำหรับพื้นที่ที่ใช้ในการทำการจำลองนั้น จะกำหนดให้มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดสอบจริง ซึ่งดำเนินการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ Chula Sandbox ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสถานีฐาน 5G จะถูกติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งอาคารจามจุรี 5 ส่วนจานดาวเทียมจะถูกวางลงในตำแหน่งหน้าสายอากาศ 5G ที่มุมเบี่ยงเบนตามแนวราบจากหน้าสายอากาศ 5G มีค่าเป็น 0 องศา และทำการปรับระยะห่างตั้ง 1 จนถึง 5,000 เมตรดังแสดงในรูป 110

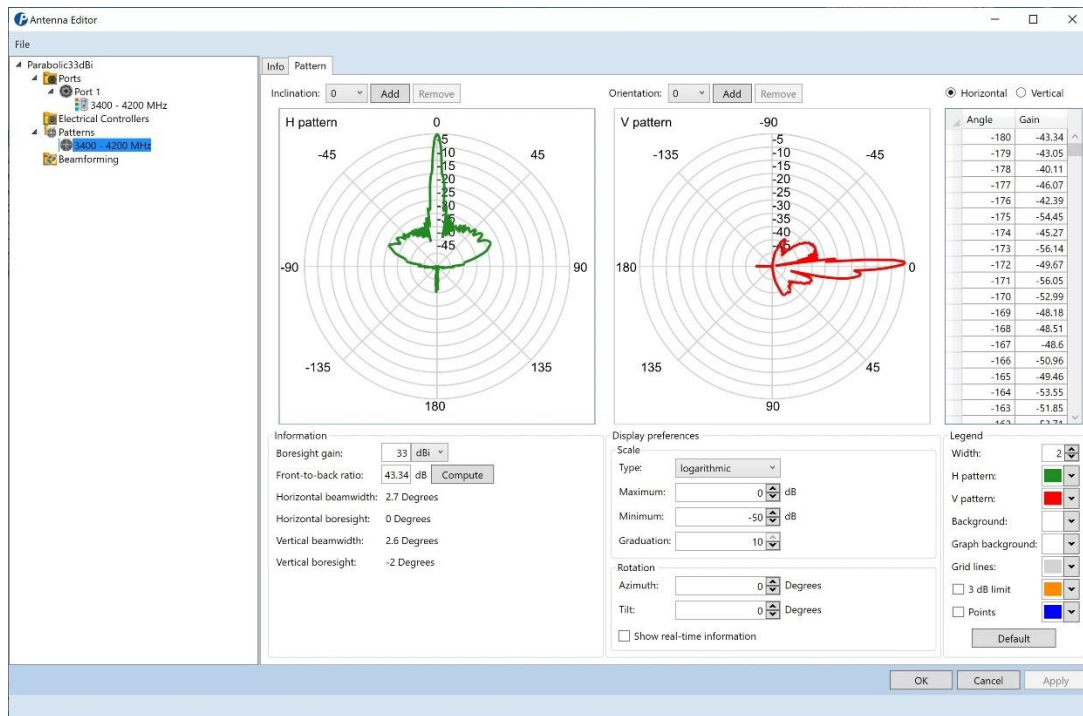


The image shows a software window titled "Fixed Subscriber Editor". It contains several sections for configuring a subscriber:

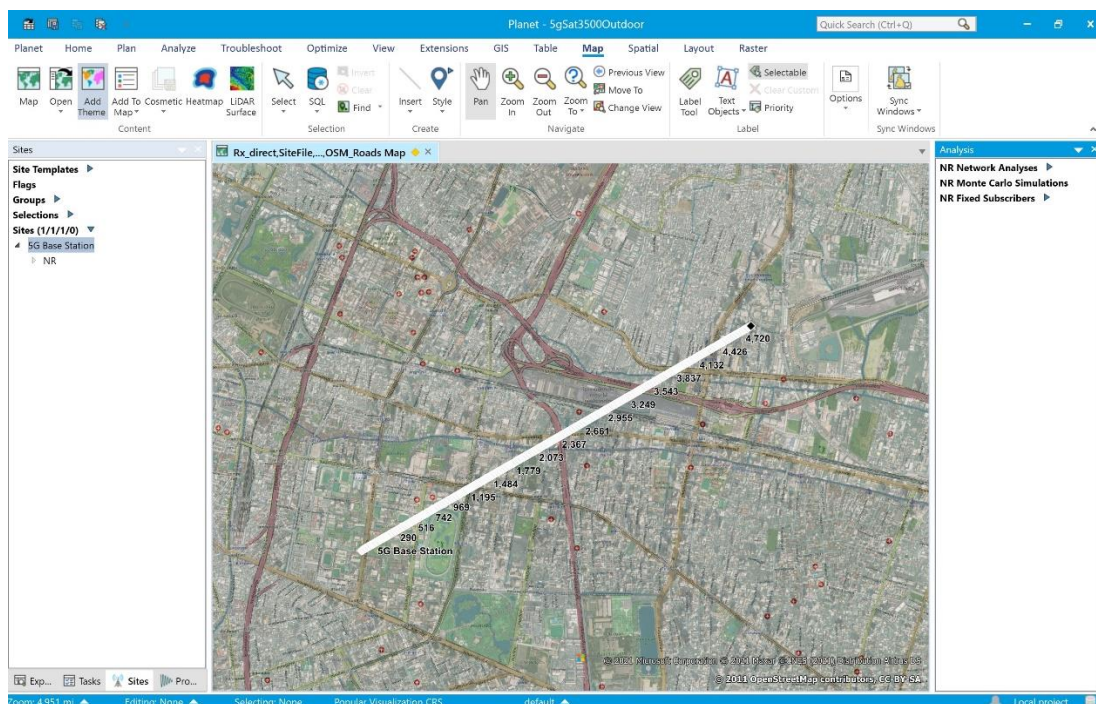
- Subscriber Information:** Includes a text field for "Id:" with the value "1".
- Location:** Includes text fields for "Lat:" (100.529201) and "Long:" (13.7382635), and a button "Get Coordinates from Map".
- Configuration:**
 - Equipment:** Includes a dropdown for "Subscriber equipment:" (NR-UE_1), a text field for "Antenna height:" (1 m), and a dropdown for "Environment:" (Outdoor).
 - Antenna:** Includes radio buttons for "Best Azimuth and Tilt" and "User defined Azimuth and Tilt" (selected). Below are text fields for "Best Azimuth:" (240 Ueq) and "Tilt [+down, -up]:" (-60 Ueq).
 - Connection:** Includes radio buttons for "Optimal" (selected) and "Forced". Below are text fields for "Forced parent site:" and "Forced parent sector:" with a "Select" button.
 - Quality:** Includes a text field for "Number of resource blocks per user:" (1) and a text field for "Coverage probability threshold:" (85 %).

At the bottom right, there are buttons for "OK", "Cancel", and "Apply".

รูป 108 หน้าต่างแสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์ของจานดาวเทียม



รูป 109 หน้าต่างแสดงการตั้งค่าแบบรูปกระจายคลื่นของจานดาวเทียม



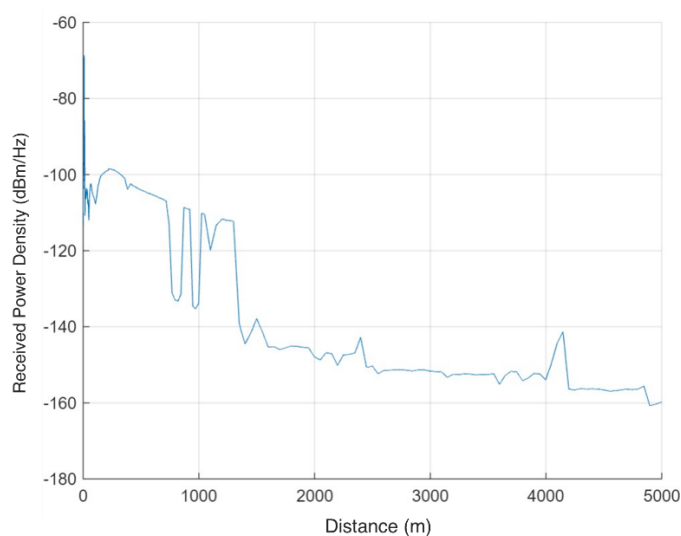
รูป 110 ตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน 5G และตำแหน่งการวางจานดาวเทียมที่ระยะ 1 ถึง 5,000 เมตรจากสถานีฐาน 5G

4.3.2 ผลการจำลอง

หลังจากที่ได้ทำการจำลองเพื่อหาความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแทรกสอดที่จันดาวเทียมได้รับจากสถานีฐาน 5G ที่ระยะต่าง ๆ นั้น ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแทรกสอดที่ได้จะถูกนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแทรกสอดกับระยะทาง จากนั้นกราฟดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการหาระยะห่างป้องกัน โดยในที่นี้ได้ทำการหาระยะห่างป้องกัน ณ ค่าขีดจำกัดการแทรกสอด (interference limit) ไว้หลายค่า และได้ทำการสรุประยะห่างป้องกันไว้ในรูปแบบของตาราง

สำหรับกราฟความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแทรกสอดกับระยะทาง และตารางสรุประยะห่างป้องกันของกรณีที่สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 20 MHz นั้น จะแสดงดังรูป 111 และตาราง 3 ตามลำดับ

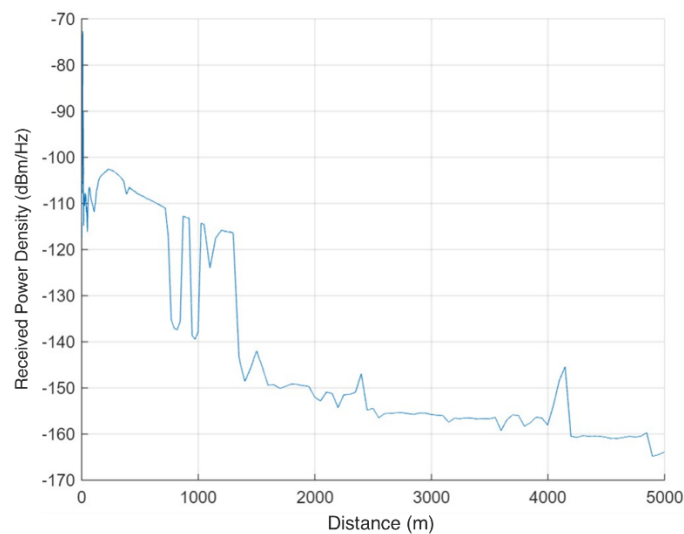
ส่วนในกรณีที่สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 100 MHz นั้น กราฟความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแทรกสอดกับระยะทาง และตารางสรุประยะห่างป้องกัน จะแสดงดังรูป 112 และตาราง 4 ตามลำดับ



รูป 111 กราฟความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณรบกวนที่จันดาวเทียมรับได้กรณีที่สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 20 MHz

ตาราง 3 ตารางสรุปค่าระยะห่างป้องกันการจำลองการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างสถานีฐาน 5G และระบบโทรทัศน์ดาวเทียม กรณีที่สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 20 MHz

Interference Limit (dBm/Hz)	ระยะห่างป้องกัน (เมตร)
-100	324
-105	579
-110	922
-115	1304
-120	1314
-125	1323
-130	1332
-135	1342
-140	1530
-145	4159
-150	4176
-155	4192
-160	>5000
-165	>5000
-170	>5000
-175	>5000
-180	>5000
-185	>5000
-190	>5000



รูป 112 กราฟความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณรบกวนที่งานดาวเทียมรับได้กรณีที่สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 100 MHz

ตาราง 4 ตารางสรุปค่าระยะห่างป้องกันการจำลองการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างสถานีฐาน 5G และระบบโทรทัศน์ดาวเทียม กรณีที่สถานีฐาน 5G ส่งคลื่นความถี่ 3.5 GHz ด้วยกำลังงาน 200 W โดยใช้ความกว้างแถบความถี่เป็น 100 MHz

Interference Limit (dBm/Hz)	ระยะห่างป้องกัน (เมตร)
-100	15
-105	356
-110	644
-115	1052
-120	1306
-125	1315
-130	1325
-135	1334
-140	1343
-145	1543
-150	4162
-155	4179
-160	4849
-165	>5000
-170	>5000
-175	>5000
-180	>5000
-185	>5000
-190	>5000

4.3.3 การนำตารางไปใช้งาน

จากตารางสรุประยะห่างป้องกันที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อที่แล้วนั้น จะเห็นได้ว่าตารางดังกล่าวได้ทำการสรุปค่าระยะห่างป้องกันไว้ ณ ค่าขีดจำกัดการแทรกสอดหลายค่า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้ตารางสามารถเลือกใช้ค่าระยะห่างป้องกันได้สอดคล้องตรงกันกับกรณีที่ต้องการ

สำหรับในหัวข้อนี้จะนำเสนอแนวทางการนำตารางสรุประยะห่างป้องกันที่มีอยู่ไปใช้งาน โดยขั้นตอนการใช้งานตารางจะประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักสองขั้นตอนคือ การเลือกขีดจำกัดการแทรกสอดที่จะใช้ในการหาระยะห่างป้องกัน และการนำค่าขีดจำกัดการแทรกสอดนั้นไปหาค่าระยะห่างป้องกันด้วยการใช้ข้อมูลในตาราง

ในขั้นตอนของการเลือกขีดจำกัดการแทรกสอดนั้น ในที่นี้จะเริ่มจากการพิจารณาในกรณีที่ LNB แบบไม่ใช่ตัวกรอง 5G (5G filter) รับสัญญาณ 5G และสัญญาณดาวเทียมเข้ามาพร้อมกัน แล้วเกิดการเพี้ยนจากการมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation Distortion: IMD) โดยสมการของสัญญาณที่เกิดการเพี้ยนจากการมอดูเลตระหว่างกันสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$y = a_1x + a_2x^3 = a_1(x + \frac{a_2}{a_1}x^3) \quad (1)$$

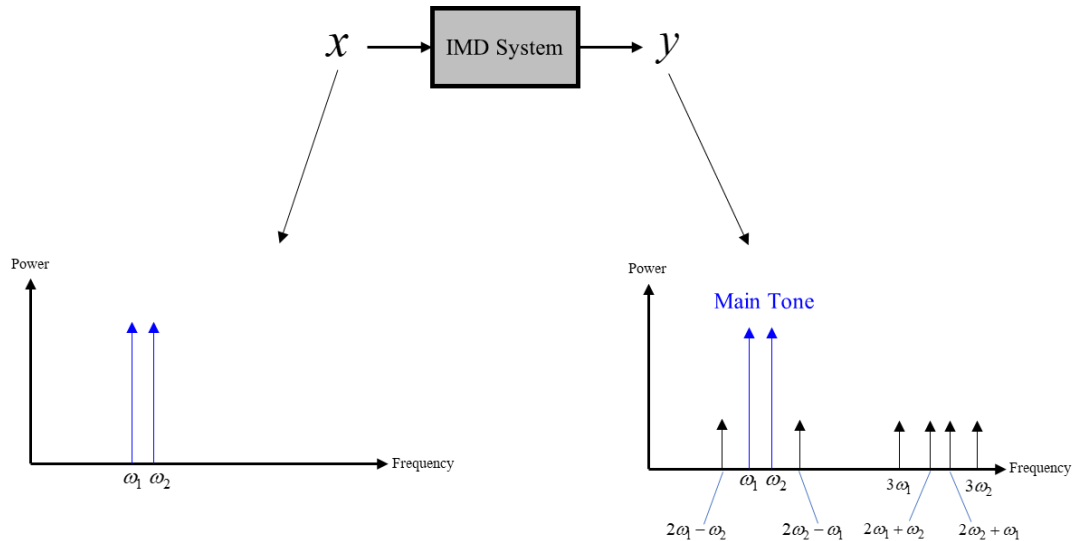
โดยที่สมการข้างต้นนี้จะเป็นการพิจารณาแค่ในส่วนของการมอดูเลตระหว่างกันลำดับที่ 1 (1st order intermodulation) และลำดับที่ 3 (3rd order intermodulation) เมื่อ y คือสัญญาณขาออกของ LNB x

คือสัญญาณขาเข้าของ LNB a_1 คือสัมประสิทธิ์ของเทอมลำดับที่ 1 และ a_2 คือสัมประสิทธิ์ของเทอมลำดับที่ 3

จากสมการข้างต้นหากได้ทำการกำหนดให้สัญญาณขาเข้าประกอบไปด้วยสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีแอมพลิจูดเท่ากันคือ A และมีความถี่เป็น ω_1 และ ω_2 ตามลำดับ ก็จะได้ว่า

$$x = A\cos(\omega_1 t) + A\cos(\omega_2 t) \quad (2)$$

โดยรูป 113 จะแสดงสเปกตรัมของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของระบบที่เกิดการเพี้ยนจากการมอดูเลตระหว่างกัน



รูป 113 สเปกตรัมของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของระบบที่เกิดการเพี้ยนจากการมอดูเลตระหว่างกัน เมื่อกำหนดให้แอมพลิจูดของสัญญาณทั้งสองเท่ากัน

เมื่อนำสมการ (2) แทนลงในสมการ (1) ก็จะได้ว่า

$$\begin{aligned} y &= a_1 [(A\cos(\omega_1 t) + A\cos(\omega_2 t))] + a_2 [(A\cos(\omega_1 t) + A\cos(\omega_2 t))]^3 \\ &= a_1 A [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)] + a_2 \left[A^3 \cos^3(\omega_1 t) + 3A^3 \cos^2(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + \right. \\ &\quad \left. 3A^3 \cos(\omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t) + A^3 \cos^3(\omega_2 t) \right] \\ &= a_1 A [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)] + a_2 A^3 \left[\cos^3(\omega_1 t) + 3\cos^2(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + \right. \\ &\quad \left. 3\cos(\omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t) + \cos^3(\omega_2 t) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

และจากสมการ (3) เมื่อนำเทอม $a_2 A^3 \{3\cos^2(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)\}$ และเทอม $a_2 A^3 \{3\cos(\omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t)\}$ มาพิจารณาก็จะได้ว่า

$$\begin{aligned} a_2 A^3 \{3\cos^2(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)\} &= a_2 3A^3 \{0.5[1 + \cos(2\omega_1 t)] \cos(\omega_2 t)\} \\ &= a_2 3A^3 \{0.5[\cos(\omega_2 t) + \cos(2\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)]\} \\ &= a_2 3A^3 \{0.5\cos(\omega_2 t) + 0.25[\cos((2\omega_1 - \omega_2)t) + \cos((2\omega_1 + \omega_2)t)]\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
a_2 A^3 \{3 \cos(\omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t)\} &= a_2 3A^3 \{ \cos(\omega_1 t) \times 0.5[1 + \cos(2\omega_2 t)] \} \\
&= a_2 3A^3 \{ 0.5[\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_1 t) \cos(2\omega_2 t)] \} \\
&= a_2 3A^3 \{ 0.5 \cos(\omega_1 t) + 0.25[\cos((\omega_1 - 2\omega_2)t) + \\
&\quad + \cos((\omega_1 + 2\omega_2)t)] \} \\
&= a_2 3A^3 \{ 0.5 \cos(\omega_1 t) + 0.25[\cos((2\omega_2 - \omega_1)t) + \\
&\quad + \cos((\omega_1 + 2\omega_2)t)] \}
\end{aligned} \tag{5}$$

โดยจากสมการ (4) และสมการ (5) นั้น เทอมที่จะทำให้เกิดผลการเพี้ยนจากการมอดูเลตระหว่างกันลำดับที่ 3 (3rd intermodulation product) ที่อยู่ใกล้กับโทนหลัก (main tone) นั้น คือเทอม $\cos((2\omega_1 - \omega_2)t)$ ในสมการที่ (4) และเทอม $\cos((2\omega_2 - \omega_1)t)$ ในสมการที่ (5)

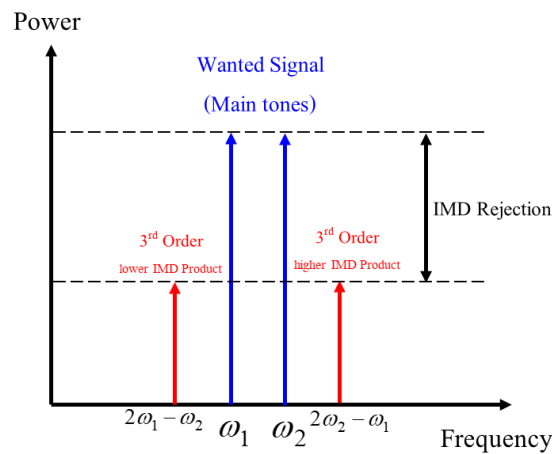
จากที่ได้กล่าวไป หากทำการพิจารณาสัญญาณ 2 ส่วน คือ สัญญาณที่ต้องการ (Wanted signal) และสัญญาณที่เป็น 3rd intermodulation product ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการให้มีแอมพลิจูดที่สูงนั้น จะได้ว่า

$$\text{Wanted_signal} = a_1 A [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)] \tag{6}$$

$$3^{\text{rd}}\text{order_IMD_signal} = 0.75a_2 A^3 [\cos((2\omega_1 - \omega_2)t) + \cos((2\omega_2 - \omega_1)t)] \tag{7}$$

และทั้งนี้ หากต้องการจะหาค่า IMD Rejection ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างสเปกตรัมกำลังของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณ 3rd intermodulation product ดังแสดงในรูป 114 ก็สามารถทำได้ด้วยการใช้สมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
\text{IMD_Rejection} &= 20 \log_{10} \left[\frac{\text{amplitude of wanted signal}}{\text{amplitude of } 3^{\text{rd}} \text{ order IMD product}} \right] \\
&= 20 \log_{10} \left(\frac{a_1 A}{0.75a_2 A^3} \right) \\
&= 20 \log_{10} \left(\frac{4}{3A^2} \times \frac{a_1}{a_2} \right)
\end{aligned} \tag{8}$$



รูป 114 สเปกตรัมของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณ 3rd intermodulation product และ IMD Rejection

จากสมการ (8) นั้น หากทำการย้ายข้างสมการและจัดรูปใหม่เพื่อใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมลำดับที่ 1 a_1 และสัมประสิทธิ์ของเทอมลำดับที่ 3 a_2 ของระบบนั้น ก็จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{IMD_rejection} &= 20 \log_{10} \left(\frac{4}{3A^2} \times \frac{a_1}{a_2} \right) \\ \left(\frac{4}{3A^2} \times \frac{a_1}{a_2} \right) &= 10^{\frac{\text{IMD_rejection}}{20}} \\ \frac{a_1}{a_2} &= 0.75 \times A^2 \times 10^{\frac{\text{IMD_rejection}}{20}} \end{aligned} \quad (9)$$

โดยหากทำการแทนค่า IMD_rejection และ A ลงในสมการข้างต้น ก็จะสามารถทำการหาอัตราส่วน a_1 ต่อ a_2 ของระบบได้

ในเอกสารคู่มือ ACA Series C-Band VSAT Outdoor Low Noise Block ของบริษัท ACA Series C-Band VSAT Outdoor Low Noise Block ได้กำหนดค่า Intermodulation Products ต่ำสุดมีค่าเป็น 45 dB เมื่อป้อนสัญญาณพาห้ขาเข้า (input carrier) มีกำลังงานเป็น -75 dBm โดยหากนำค่าทั้งสองไปแทนลงในสมการ (9) ก็จะทำให้สามารถหา อัตราส่วน a_1 ต่อ a_2 ได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากสมการ (9) จะใช้ A ซึ่งเป็นค่าแอมพลิจูดของสัญญาณพาห้ขาเข้าในการคำนวณ ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณพาห้ขาเข้าที่มีกำลังงานเป็น -75 dBm ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Input_carrier(dBm)} &= 10 \log_{10} \left(\frac{A^2}{2} \times 10^3 \right) \\ -75 &= 10 \log_{10} \left(\frac{A^2}{2} \times 10^3 \right) \\ \left(\frac{A^2}{2} \times 10^3 \right) &= 10^{-7.5} \\ A^2 &= 2 \times 10^{-10.5} \\ A &= \sqrt{2 \times 10^{-10.5}} \\ &= 7.952707288 \times 10^{-6} \text{ Volts} \end{aligned} \quad (10)$$

และเมื่อแทนค่า $\text{IMD_rejection} = 45 \text{ dB}$ กับ $A = 7.9527 \times 10^{-6} \text{ Volts}$ ลงในสมการ (9) ก็จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{a_1}{a_2} &= 0.75 \times A^2 \times 10^{\frac{\text{IMD_rejection}}{20}} \\ &= 0.75 \times (7.952707288 \times 10^{-6})^2 \times 10^{\frac{45}{20}} \\ &= 8.4351199 \times 10^{-9} \end{aligned} \quad (11)$$

ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการกำหนด IMD_rejection ให้มีค่าเป็น 45 dB และทำการป้อนสัญญาณพาห้ขาเข้า 2 ความถี่ โดยสัญญาณทั้งสองที่มีแอมพลิจูดเป็น $7.9527 \times 10^{-6} \text{ Volts}$ นั้น อัตราส่วน a_1 ต่อ a_2 ของระบบจะมีค่าเป็น 8.4351199×10^{-9}

หลังจากที่ทราบค่าอัตราส่วน a_1 ต่อ a_2 ของระบบแล้ว การหาค่า a_1 และ a_2 ก็สามารถกระทำได้ โดย a_1 สามารถถูกพิจารณาว่าเป็นอัตราขยายของสายอากาศภาครับได้ เมื่อกำหนดให้สายอากาศภาครับ

ขยายกำลังงานสัญญาณที่รับเข้ามาแค่เฉพาะในช่วงความถี่หลักเท่านั้น ดังนั้น a_1 จึงสามารถหาค่าได้ด้วยการใช้สมการดังต่อไปนี้

$$G_{rx} = 20 \log_{10}(a_1) \quad (12)$$

ซึ่งถ้าหากได้ทำการกำหนดค่าอัตราขยายสายอากาศภาครับ G_{rx} แล้ว ก็จะสามารถหาค่า a_1 ได้ และหลังจากทราบค่า a_1 แล้ว ก็ให้นำ a_1 แทนลงในสมการ (11) ก็จะทำให้สามารถหาค่า a_2 ออกมาได้

หลังจากที่ทราบค่า a_1 และ a_2 ของระบบแล้วนั้น ในขั้นตอนต่อมาจะทำการกำหนดสัญญาณขาเข้าใหม่ โดยจะกำหนดให้สัญญาณขาเข้าประกอบไปด้วย สัญญาณของสถานีฐาน 5G และสัญญาณจากดาวเทียมของระบบโทรศัพท์ดาวเทียม โดยสัญญาณของสถานีฐาน 5G จะมีแอมพลิจูดเป็น A และความถี่เป็น ω_1 ส่วนสัญญาณจากดาวเทียมจะมีแอมพลิจูดเป็น B และความถี่เป็น ω_2 ซึ่งสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$x = A \cos(\omega_1 t) + B \cos(\omega_2 t) \quad (13)$$

เมื่อ $A \cos(\omega_1 t)$ คือเทอมของสัญญาณจากสถานีฐาน 5G และ $B \cos(\omega_2 t)$ คือเทอมของสัญญาณจากดาวเทียมของระบบโทรศัพท์ดาวเทียม โดยเมื่อทำการแทนสมการ (13) ลงในสมการ (1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} y &= a_1 [(A \cos(\omega_1 t) + B \cos(\omega_2 t))] + a_2 [(A \cos(\omega_1 t) + B \cos(\omega_2 t))]^3 \\ &= a_1 [A \cos(\omega_1 t) + B \cos(\omega_2 t)] + a_2 [A^3 \cos^3(\omega_1 t) + 3A^2 B \cos^2(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + \\ &\quad 3AB^2 \cos(\omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t) + B^3 \cos^3(\omega_2 t)] \end{aligned} \quad (14)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อนำเทอม $a_2 3A^2 B \{\cos^2(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)\}$ และ $a_2 3AB^2 \{\cos(\omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t)\}$ มาพิจารณาก็จะได้ว่า

$$\begin{aligned} a_2 3A^2 B \{\cos^2(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)\} &= a_2 3A^2 B \{0.5[1 + \cos(2\omega_1 t)] \cos(\omega_2 t)\} \\ &= a_2 3A^2 B \{0.5[\cos(\omega_2 t) + \cos(2\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)]\} \\ &= a_2 3A^2 B \{0.5 \cos(\omega_2 t) + 0.25[\cos((2\omega_1 - \omega_2)t) + \\ &\quad + \cos((2\omega_1 + \omega_2)t)]\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} a_2 3AB^2 \{\cos(\omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t)\} &= a_2 3AB^2 \{\cos(\omega_1 t) \times 0.5[1 + \cos(2\omega_2 t)]\} \\ &= a_2 3AB^2 \{0.5[\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_1 t) \cos(2\omega_2 t)]\} \\ &= a_2 3AB^2 \{0.5 \cos(\omega_1 t) + 0.25[\cos((\omega_1 - 2\omega_2)t) + \\ &\quad + \cos((\omega_1 + 2\omega_2)t)]\} \\ &= a_2 3AB^2 \{0.5 \cos(\omega_1 t) + 0.25[\cos((2\omega_2 - \omega_1)t) + \\ &\quad + \cos((\omega_1 + 2\omega_2)t)]\} \end{aligned} \quad (16)$$

โดยจากสมการ (15) และสมการ (16) นั้น เทอมที่จะทำให้เกิด 3rd intermodulation product ที่อยู่ใกล้กับ โทนหลักนั้น คือเทอม $\cos((2\omega_1 - \omega_2)t)$ ในสมการที่ (15) และเทอม $\cos((2\omega_2 - \omega_1)t)$ ในสมการที่ (16) และหากทำการพิจารณาสัญญาณ 2 ส่วนเช่นเดิม ก็จะได้ว่าสัญญาณที่ต้องการคือสัญญาณจากดาวเทียม ส่วนสัญญาณที่ไม่ต้องการคือสัญญาณที่เป็น 3rd intermodulation product ซึ่งสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Wanted_signal} = a_1 B [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)] \quad (17)$$

$$3^{\text{rd}}\text{order_IMD_signal} = 0.75a_2 [AB^2 \cos((2\omega_1 - \omega_2)t) + A^2 B \cos((2\omega_2 - \omega_1)t)] \quad (18)$$

และค่า IMD_Rejection ซึ่งในที่นี้คือค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจากดาวเทียมระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ดาวเทียมกับสัญญาณ 3rd intermodulation product จะมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{IMD_Rejection} &= 20 \log_{10} \left[\frac{\text{amplitude of wanted signal}}{\text{amplitude of } 3^{\text{rd}} \text{ order IMD product}} \right] \\ &= 20 \log_{10} \left[\frac{a_1 B}{0.75a_2 AB^2} \right] \\ &= 20 \log_{10} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \left(\frac{1}{AB} \right) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

จากสมการข้างต้นนี้ หากกำหนดให้สัญญาณจากดาวเทียมระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ดาวเทียมมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงกว่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของ 3rd intermodulation product มากกว่า 10 dB ขึ้นไปนั้น ก็จะได้ว่า IMD_Rejection จะต้องมีความมากกว่า 10 dB ซึ่งสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{IMD_Rejection} > 10 \quad (20)$$

ซึ่งเมื่อทำการแทนสมการ (19) ลงในสมการข้างต้น ก็จะได้ว่าสัญญาณ 5G จะต้องมีความแอมพลิจูดดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{IMD_Rejection} &> 10 \\ 20 \log_{10} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \left(\frac{1}{AB} \right) \right] &> 10 \\ \frac{4}{3} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \left(\frac{1}{AB} \right) &> 10^{0.5} \\ A &< \frac{4}{3} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \left(\frac{10^{-0.5}}{B} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

หรือสัญญาณ 5G จะต้องมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังเป็น

$$A_{\text{PSD}} < 20 \log_{10} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) (10^{-0.5}) \right] - B_{\text{PSD}} \quad (22)$$

เมื่อ A_{PSD} คือความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ 5G และ B_{PSD} คือความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณดาวเทียม

หากสมมติให้ สัญญาณจากดาวเทียมที่วัดได้ ณ ตำแหน่งขาเข้า (input) ของอุปกรณ์ LNB มีค่าเป็น -55 dBm/100 kHz ดังนั้นจึงได้ว่า

$$\begin{aligned}
A_{\text{PSD}} &< 20 \log_{10} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) (10^{-0.5}) \right] - B_{\text{PSD}} (\text{dBm}/100\text{kHz}) \\
&= 20 \log_{10} \left[\frac{4}{3} (8.4351199 \times 10^{-9}) (10^{-0.5}) \right] + 55 (\text{dBm}/100\text{kHz}) \\
&= -168.979 + 55 (\text{dBm}/100\text{kHz}) \\
&= -113.979 && \text{dBm}/100\text{kHz} \\
&= -113.979 - 50 && \text{dBm}/\text{Hz} \\
&= -163.979 && \text{dBm}/\text{Hz}
\end{aligned} \tag{23}$$

ซึ่งมีความหมายว่า หากต้องการให้สัญญาณจากดาวเทียมระบบโทรทัศนดาวเทียมมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงกว่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของ 3rd intermodulation product มากกว่า 10 dB ขึ้นไป (IMD_Rejection > 10 dB) นั้น สัญญาณ 5G จะต้องมียสเปกตรัมกำลังต่ำกว่า -163.979 dBm/Hz ที่ ณ ตำแหน่งขาเข้าของอุปกรณ์ LNB และหากต้องการทราบว่า สัญญาณ 5G จะต้องมียสเปกตรัมกำลังต่ำกว่าเท่าใด ณ ตำแหน่งขาเข้าของสายอากาศ ก็สามารถทำได้ด้วยการลบค่าอัตราขยายสายอากาศจากค่าสเปกตรัมกำลัง ณ ตำแหน่งขาเข้าของอุปกรณ์ LNB เช่น หากกำหนดให้สายอากาศ 5G มีอัตราขยายเป็น 30 dBi สัญญาณ 5G จะต้องมียสเปกตรัมกำลังดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
A_{\text{PSD_front_Ant}} &= A_{\text{PSD}} - G_{rx} \\
&= -163.979 - 30 \\
&= -193.979 && \text{dBm}/\text{Hz}
\end{aligned} \tag{24}$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า หากต้องการให้สัญญาณจากดาวเทียมระบบโทรทัศนดาวเทียมมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงกว่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของ 3rd intermodulation product มากกว่า 10 dB ขึ้นไป (IMD_Rejection > 10 dB) นั้น สัญญาณ 5G จะต้องมียสเปกตรัมกำลังต่ำกว่า -163.979 dBm/Hz ที่ ณ ตำแหน่งขาเข้าของอุปกรณ์ LNB และต่ำกว่า -193.979 dBm/Hz ที่ ณ ตำแหน่งขาเข้าของสายอากาศที่มีอัตราขยายสายอากาศเป็น 30 dBi โดยหากดูจากตารางที่ 4 จะพบว่าระยะทางป้องกันต้องมีค่ามากกว่า 5,000 เมตร ซึ่งในการคำนวณเราแสดงค่าระยะป้องกันไว้เพียงแค่ 5,000 เมตร (5 กิโลเมตร) เท่านั้น

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในความเป็นจริงผิวโลกมีลักษณะเป็นทรงกลม ทำให้สัญญาณที่รับอาจถูกบดบังด้วยระยะทางของขอบฟ้า ทำให้ระยะทางป้องกันจะมีค่าลดลงเท่ากับระยะทางของขอบฟ้า หากระยะทางของขอบฟ้ามีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้หากคำนวณระยะทางของขอบฟ้าในกรณีให้จานดาวเทียมมีความสูงจากพื้นดิน (h) 1 เมตร จะสามารถคำนวณระยะทางของขอบฟ้า (d) ได้จาก $d [\text{km}] = 3.57(h)^{1/2} = 3.57$ กิโลเมตร [อ้างอิงจาก *Applied Optics* 37, 3785–3792 (1998)] ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าระยะทางป้องกันจะลดลงเหลือ 3.57 กิโลเมตรในกรณีที่จานดาวเทียมมีความสูง 1 เมตรจากพื้นดิน

4.4 การจำลองเพื่อหาระยะห่างป้องกันสำหรับการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศน์ดาวเทียมในกรณีการติดตั้งสถานีฐานในพื้นที่ชนบท (Rural Area)

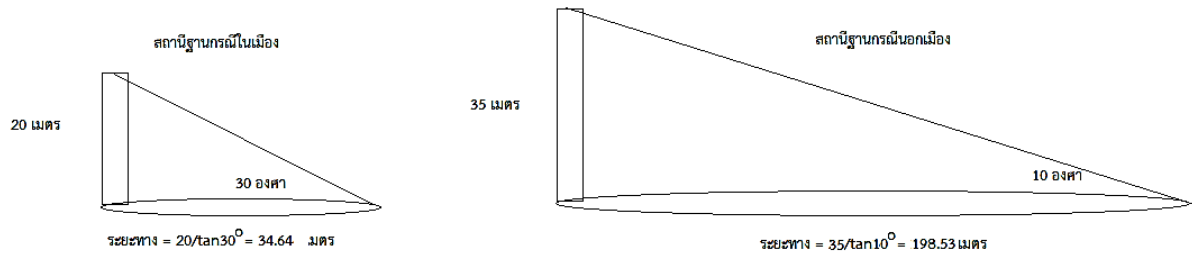
สำหรับการจำลองเพื่อหาระยะห่างป้องกันสำหรับการใช้คลื่นความถี่ 3.5 GHz ระหว่างระบบ 5G และระบบโทรทัศน์ดาวเทียมในกรณีการติดตั้งสถานีฐานในพื้นที่ชนบท (Rural Area) นั้น ในที่นี้ตารางด้านล่างจะถูกใช้เพื่อหาค่าความสูงและมุมก้มของสถานีฐาน 5G ในกรณีในเมือง (Urban) และกรณีชนบท หรือนอกเมือง (Rural) ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปภาพแสดงเปรียบเทียบสถานีทั้งสองที่มีค่าความสูงและมุมก้มที่แตกต่างกันได้

ดังรูป 115

Table 6-4: 5G Base Station Characteristics¹⁸ for 16 x 16 AAS Arrays

Environment	Urban	Suburban	Rural
Antenna Pattern	ITU-R M.2101-0	ITU-R M.2101-0	ITU-R M.2101-0
Array Size	16 x 16	16 x 16	16 x 16
Element Gain	6.4 dBi	7.1 dBi	7.1 dBi
Element Horizontal 3 dB Beamwidth	90 degrees	90 degrees	90 degrees
Element Vertical 3 dB Beamwidth	65 degrees	54 degrees	54 degrees
Front-to-Back Ratio	30 dB	30 dB	30 dB
Horizontal Array Spacing Coefficient	0.5	0.5	0.5
Vertical Array Spacing Coefficient	0.7	0.9	0.9
Vertical Scan Range ¹⁹	-30 to 0 degrees	-10 to 0 degrees	-10 to 0 degrees
Peak Array Gain	30.5 dBi	31.2 dBi	31.2 dBi
Mechanical Downtilt ²⁰	10 degrees	6 degrees	3 degrees
Mast Height	20 meters	25 meters	35 meters
Downlink Bandwidth	100 MHz	100 MHz	100 MHz
Activity Factor	50%	50%	50%
Conducted Power per Element	25 dBm	25 dBm	25 dBm
Peak Output EIRP	79.6 dBm	80.3 dBm	80.3 dBm
Peak Output PSD (EIRP) ²¹	59.6 dBm/MHz	60.3 dBm/MHz	60.3 dBm/MHz
Conducted PSD, Spurious	-20 dBm/MHz	-20 dBm/MHz	-20 dBm/MHz
Peak Output PSD, Spurious (EIRP) ²²	-13.6 dBm/MHz	-12.9 dBm/MHz	-12.9 dBm/MHz

The 50% activity factor is assumed based on Report ITU-R M.2292-0, using the deployment parameters for bands between 3 and 6 GHz given in Table 4 of Section 5.3 [24]. This factor is treated as a duty cycle in order to compute average output power from the base stations based on the peak power listed in the table. With a 50% activity factor,



รูป 115 ภาพเปรียบเทียบสถานีฐาน 5G กรณีภายในเมืองและนอกเมือง

ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบ เราจะพบว่ากรณีสถานีฐานตั้งอยู่ภายในเมืองจะมีพื้นที่สัญญาณครอบคลุมระยะทาง 34.64 เมตร ในขณะที่สถานีฐานที่ตั้งอยู่ภายนอกเมืองนั้นมีพื้นที่ครอบคลุมระยะทาง 198.53 เมตรตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ลักษณะภูมิประเทศภายในเมืองและภายนอกเมืองจะมีความแตกต่างกัน โดยพื้นที่ภายในเมืองจะมีตึกสูงและอาคารหนาแน่น ในขณะที่พื้นที่ภายนอกเมืองจะมีลักษณะเป็นพื้นที่โล่งกว้าง ทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นจากหลายทิศทาง (Multipath) ด้วยเฟสที่แตกต่างกัน เนื่องจากคลื่นบางเส้นทางไปกระทบสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขา ตึก อาคาร รถยนต์ ส่งผลให้เกิดการเสริมและหักล้างของคลื่นในแต่ละทิศทาง เกิดเป็นการลดทอนเนื่องจากระยะทาง (Path Loss) ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ จำนวนสถานีฐานกรณีนอกเมืองนั้น จะมีจำนวนน้อยกว่าสถานีฐานที่อยู่ภายในเมือง ซึ่งอาจทำให้ผลรวมของค่าความหนาแน่นของความเข้มของสัญญาณน้อยกว่าภายในเมือง ส่งผลให้เกิดระดับของสัญญาณรบกวน (Interference) ที่แตกต่างกัน

ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง จำต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบดังกล่าวเพิ่มเติม โดยการทดสอบในสนามจริง ต่อไป

4.5 การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจ

การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจมีแนวคิดจากการตั้งสมมติฐานในเชิงเศรษฐศาสตร์ในเรื่องของการประเมินต้นทุนการดำเนินงาน ทั้งในส่วนของ จำนวนครัวเรือนที่มีการใช้งานโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมประเภท C-Band ราคาเฉลี่ยของการจำนวนหัวรับสัญญาณดาวเทียม (LNB) ประเภท C-Band ค่าแรงการดำเนินงาน เป็นต้น

ระยะเวลา	ปี
ระยะเวลาในการเปลี่ยนหัวรับ LNB ทุกครัวเรือน	5
จำนวนครัวเรือนต่อปีที่ได้รับการเปลี่ยนหัวรับ LNB ต่อปี ⁸	2,532,000

ต้นทุนทั้งหมดต่อปี	บาท
ต้นทุนรวมครัวเรือนทั้งหมด	2,719,065,025

ต้นทุนทั้งหมดต่อปี (คาดการณ์เงินเพื่อ 5 ปี)	2022	2023	2024	2025	2026
ต้นทุนรวมครัวเรือนทั้งหมด	2,719,065,025	2,719,065,025	2,719,065,025	2,719,065,025	2,719,065,025
อัตราเงินเฟ้อของแต่ละปี	1.20%	1.24%	1.55%	1.75%	1.90%
รวมต้นทุนต่อปี (บาท)	2,751,693,805	2,752,781,431	2,761,210,533	2,766,648,663	2,770,727,261

จากสมมติฐานการคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการเปลี่ยนแปลงหัวรับ LNB ให้เป็นประเภท C Band ที่รองรับกับการป้องกันคลื่นความถี่ย่าน 3500 MHz ของกิจการโทรคมนาคมนั้น พบว่า มีต้นทุนในการเปลี่ยนให้กับจำนวนครัวเรือนที่มีโทรทัศน์ดาวเทียมทั้งประเทศภายในระยะเวลา 5 ปี ทั้งสิ้น 2,644,417,914 บาท ต่อปี

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงภายใน 5 ปี นั้นให้แก่ 2,532,000 ครัวเรือน พบว่า ในปีที่ 1 ใช้ต้นทุนจำนวน 2,676,150,929 บาท และเมื่อคิดอัตราเงินเฟ้อในทุกๆ ปี นั้น พบว่า ในปีที่ 5 จะมีต้นทุนอยู่ที่ 2,719,065,025 บาท

⁸ ผลสำรวจจำนวนครัวเรือนที่มีโทรทัศน์ดาวเทียม สำนักงานสถิติแห่งชาติ พ.ศ. 2562

4.6 ผลการศึกษาการรบกวนสัญญาณจากระบบ 5G ต่อเครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุของอากาศยาน

4.6.1 ข้อกังวลและคำเตือนโดย ICAO

องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) ได้ออกหนังสือ (เลขที่ SP 74/1-21/22 ลงวันที่ 25 มีนาคม 2564) แจ้งให้องค์กรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบินและหน่วยงานซึ่งทำหน้าที่กำกับดูแลและจัดสรรคลื่นความถี่ของประเทศต่าง ๆ ได้ตระหนักถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากสัญญาณของกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G ในย่านความถี่ใกล้เคียงกับช่วงความถี่ใช้งานของเครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Altimeter: RA) ของอากาศยาน ได้แก่ความถี่ในช่วง 4200 MHz – 4400 MHz ซึ่ง ICAO มีข้อกังวลว่าสัญญาณของระบบ 5G อาจมีโอกาสรบกวนสัญญาณของ RA และส่งผลให้การทำงานของ RA เกิดความผิดพลาด และก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อความปลอดภัยอย่างร้ายแรงต่อการบิน ผู้โดยสาร ลูกเรือ และประชาชนภาคพื้นดิน ดังนั้น ICAO จึงเรียกร้องให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องพิจารณาการจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับการใช้งานกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G ในย่านใกล้เคียงกับความถี่ของ RA โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของการบินและความปลอดภัยของสาธารณะเป็นลำดับสำคัญ ทางคณะวิจัยของโครงการนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดการรบกวนของสัญญาณในสถานการณ์ดังกล่าว และแนวทางในการบรรเทาการรบกวนของสัญญาณ โดยการศึกษา รวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยหรือแนวทางการกำกับดูแลในต่างประเทศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.6.2 เครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุ

เครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุ (RA) เป็นระบบเรดาร์ที่ใช้ระบุความสูงของอากาศยานเหนือภูมิประเทศ สำหรับเครื่องบินพาณิชย์ RA จะทำงานขณะเครื่องอยู่เหนือพื้นดินไม่เกินระดับความสูงประมาณ 2,500 ft. (~ 762 m) โดยจะใช้งานร่วมกับเครื่องวัดความสูงด้วยความดัน (Pressure Altimeter: PA) ซึ่งเป็นเครื่องมือระบุความสูงโดยใช้หลักการวัดความดันอากาศที่แปรผกผันกับระยะความสูงจากพื้นดิน ในการระบุความสูงของอากาศยานเหนือพื้นดินจะใช้ค่าที่ได้จากเครื่องวัดทั้งสองแบบตรวจสอบซึ่งกันและกันเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น

หลักการทำงานของ RA คือ ระบบจะส่งคลื่นวิทยุ (Transmitted wave) ออกไปกระทบกับพื้นดินหรือภูมิประเทศและรับคลื่นที่สะท้อน (Reflected wave) กลับมายังระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคลื่นสะท้อนที่รับมาและคลื่นที่ส่งออกไปสามารถคำนวณหาระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปและกลับ และแปลงเป็นระยะความสูงของระบบจากพื้นดินได้ RA เป็นระบบเรดาร์ชนิด Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) ซึ่งส่งสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบต่อเนื่องที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตามเวลา (Frequency sweep) เป็นฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมในช่วงความถี่ f_{min} และ f_{max} ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับ RA ที่ติดตั้งบนอากาศยานจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงในช่วง 4200 MHz – 4400

MHz จากผลต่างระหว่างความถี่ของคลื่นที่ส่งออกไป (f_2) และความถี่ของคลื่นสะท้อนที่รับเข้ามา (f_1) ณ เวลาใดๆ นั่นคือ

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

สามารถคำนวณหาระยะเวลาหน่วง (Delay time) Δt ระหว่างคลื่นทั้งสองได้จากสมการ

$$\Delta t = \frac{\Delta f}{df/dt}$$

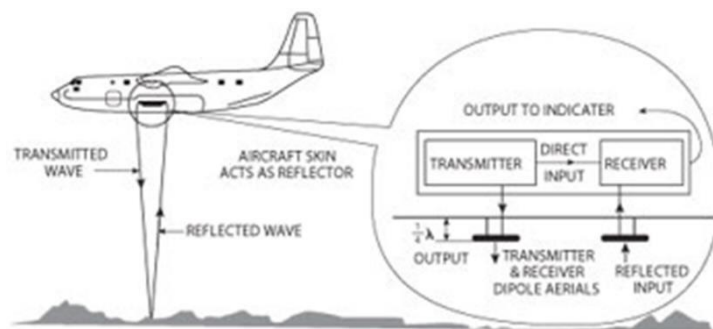
โดยที่ df/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณคลื่นเรดาร์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา (Hz/s)

ระยะเวลาหน่วง Δt คือระยะเวลาที่คลื่นเรดาร์ใช้ในการเดินทางไปและกลับระหว่างอากาศยานและพื้นดิน ดังนั้น สามารถคำนวณหาระยะความสูงของอากาศยานจากพื้นดิน H ได้จากสมการ

$$H = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c\Delta f}{2(df/dt)}$$

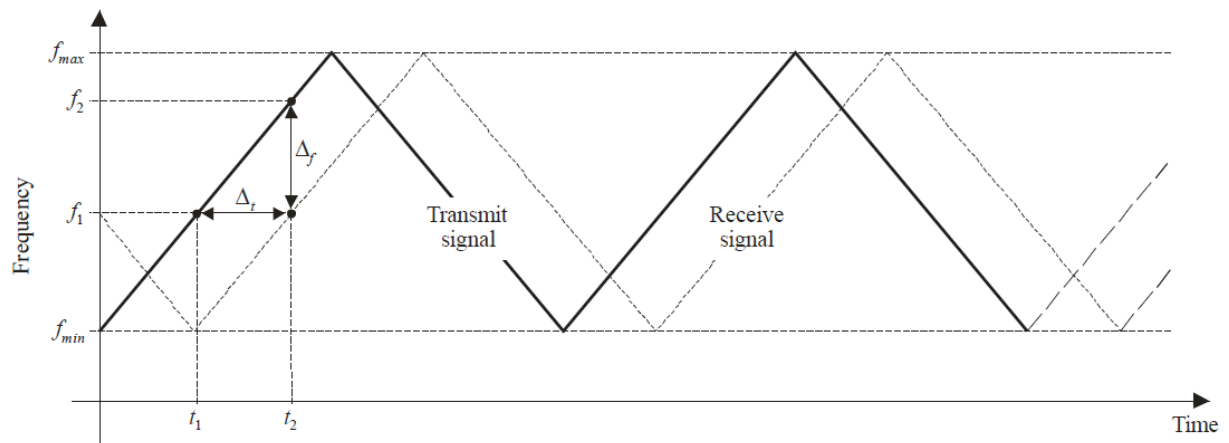
โดยที่ c คือ ความเร็วที่คลื่นเรดาร์เดินทางในอากาศ มีค่าประมาณ 3×10^8 m/s

ส่วนประกอบสำคัญของ RA ได้แก่ เครื่องส่ง (Transmitter) เครื่องรับ (Receiver) สายอากาศ (Antennas) ของเครื่องส่งและเครื่องรับ หน่วยประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing Unit) และหน่วยแสดงผล (Display Unit)



รูป 116 หลักการทำงานเบื้องต้นและส่วนประกอบของ Radio Altimeter ที่ติดตั้งบนอากาศยาน

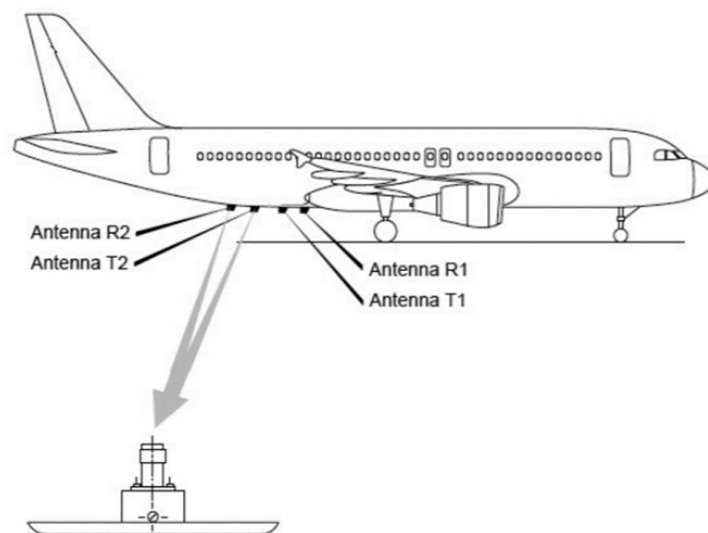
ที่มา : เว็บไซต์



รูป 117 ความถี่ของสัญญาณคลื่นเรดาร์ชนิด FMCW ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม (เส้นทึบแสดง ความถี่ของคลื่นที่ส่งออกไป และเส้นประแสดงความถี่ของคลื่นสะท้อนที่รับมา)

ที่มา : RCTA (2020)

รูปที่ 109 แสดงตัวอย่างตำแหน่งสายอากาศของเครื่องส่งและเครื่องรับของ RA จำนวน 2 ชุด ที่ติดตั้งบนเครื่องบิน Airbus A320 สายอากาศของ RA ที่ติดตั้งบนอากาศยานมีอัตราขยาย (Gain) ประมาณ 8 – 13 dBi และมีความกว้างลำคลื่นที่กำลังครึ่งหนึ่ง (Half-power beamwidth) ประมาณ 35 – 60 องศา เพื่อให้มีช่วงครอบคลุมสัญญาณกว้างเพียงพอสำหรับการเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนว pitch และ roll ขณะบิน สายอากาศมีโพลาไรเซชันในแนวนอน (Horizontally polarized)



รูป 118 สายอากาศของเครื่องส่ง (T1, T2) และเครื่องรับ (R1, R2) ของ RA ที่ติดตั้งบนเครื่องบิน Airbus A320

ที่มา : Baillion (2011)

ค่าระยะความสูงของอากาศยานเหนือพื้นดินที่วัดโดย RA จะถูกแสดงบนแผงหน้าปัด (Console) ของเครื่องบิน ดังรูปที่ 110 และถูกนำไปใช้ในระบบต่าง ๆ ของอากาศยาน ได้แก่

- Automatic Flight Control System (AFCS) สำหรับการนำเครื่องลงจอดแบบอัตโนมัติโดยระบบเครื่องช่วยการเดินอากาศ (Instrument Landing System: ILS)
- Ground Proximity Warning System (GPWS) ซึ่งใช้ข้อมูลระยะความสูงจากพื้นดินและอัตราการเปลี่ยนแปลงความสูง
- Terrain Awareness System
- Aircraft Collision Avoidance

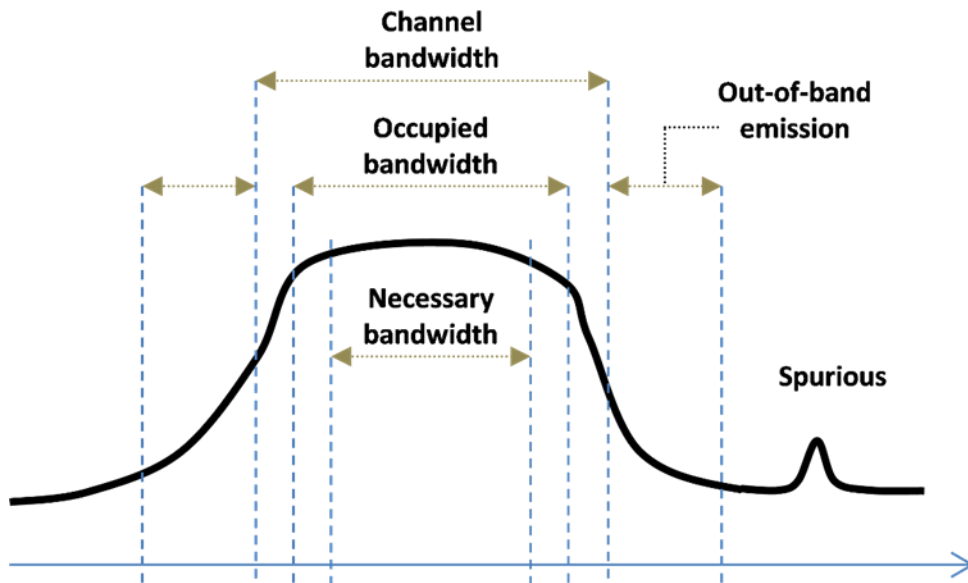


รูป 119 แผงหน้าปัดของเครื่องบินแสดงค่าระยะความสูงของอากาศยานเหนือพื้นดินที่วัดโดย RA

ที่มา : Baillion (2011)

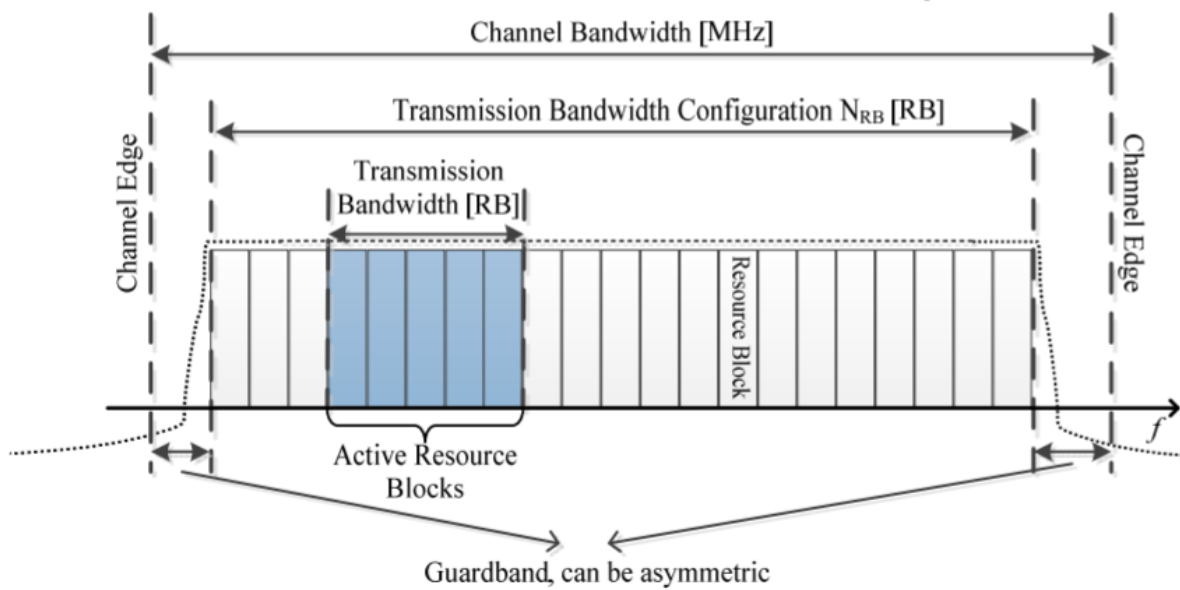
4.6.3 ลักษณะการรบกวนสัญญาณ RA

สเปกตรัมของสัญญาณระบบ 5G แสดงดังรูปที่ 110 ประกอบด้วย ส่วนที่อยู่ภายในความกว้างแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ (Channel bandwidth) ส่วนที่แพร่ล้าออกนอกช่องสัญญาณไปยังความถี่ที่อยู่ติดกัน เรียกว่า การแพร่นอกแถบ (Out-of-band emission) ซึ่งอาจเกิดจากมอดูเลชัน (Modulation) หรือความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ของเครื่องส่ง และส่วนหางของสเปกตรัมที่ต่อเนื่องยาวออกไปและมีระดับกำลังงานต่ำมาก เรียกว่า การแพร่แปลกปลอม (Spurious emission) ทั้งส่วนการแพร่นอกแถบและการแพร่แปลกปลอมถือเป็นการแพร่ที่ไม่ต้องการ (Unwanted emissions)



(a) ภาพรวมของสเปกตรัม

ที่มา : ECO (2017)



รูป 120 ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณระบบ 5G

(b) ส่วนของสเปกตรัมที่อยู่ภายในความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณ

ที่มา : 3GPP (2021)

การรบกวนของสัญญาณระบบ 5G ต่อสัญญาณเรดาร์ของ RA แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) Receiver front-end overload เกิดจากการที่สัญญาณรบกวนมีกำลังสูงมากพอจนทำให้อุปกรณ์ส่วนหน้า (Front-end) ของเครื่องรับเกิดภาวะอิ่มตัว (Saturated) และแสดงคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ทำให้เกิดผลอันไม่พึงประสงค์ เช่น Harmonic distortion และ Intermodulation ซึ่งเป็นสาเหตุให้ RA ทำงานผิดพลาดได้

ค่าเกณฑ์ (Threshold) ของกำลังเข้า (Input power) ที่ทำให้เครื่องรับของ RA เกิดภาวะโอเวอร์โหลด สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA ที่เป็นตัวแทนชนิดแอนะล็อก (Analog) และชนิดดิจิทัล (Digital) แสดงในตารางที่ 218 และ 219 พร้อมด้วยค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังเข้า (Input power spectrum density: Input PSD) สำหรับกรณีสัญญาณมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 100 MHz (*) จากข้อมูลดังกล่าวจะได้ว่า ค่าเกณฑ์ของกำลังเข้าที่ทำให้เครื่องรับเกิดภาวะโอเวอร์โหลดสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA ชนิดแอนะล็อกมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -56 dBm และสำหรับชนิดดิจิทัลมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -53 dBm

ตาราง 5 ค่าเกณฑ์ของกำลังเข้าที่ทำให้เครื่องรับเกิดภาวะโอเวอร์โหลด สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA ชนิดแอนะล็อก

ที่มา : ITU-R (2014)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Input Power Threshold (dBm)	-30	-53	-56	-40	-40	-40
Input PSD Threshold (dBm/Hz) *	-50	-73	-76	-60	-60	-60

ตาราง 6 ค่าเกณฑ์ของกำลังเข้าที่ทำให้เครื่องรับเกิดภาวะโอเวอร์โหลด สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA ชนิดดิจิทัล

ที่มา : ITU-R (2014)

	D1	D2	D3	D4
Input Power Threshold (dBm)	-30	-43	-53	-40
Input PSD Threshold (dBm/Hz) *	-50	-63	-73	-60

โดยทั่วไป อุปกรณ์ส่วนหน้าของ RA จะมีความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนในระดับปานกลาง นั่นคือ ตัวกรองสัญญาณวิทยุ (RF filter) มีช่วงการตัดความถี่ (Roll-off) ที่ไม่ชันมาก ดังตารางที่ 220 ดังนั้น RA จึงมีโอกาสถูกรบกวนจากสัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ใช้งาน (4200 MHz – 4400 MHz) หรือสัญญาณที่มีความถี่ติดกันหรือใกล้เคียงกับช่วงความถี่ดังกล่าว การรบกวนสัญญาณ RA โดยสัญญาณระบบ 5G ในลักษณะนี้จึงมีโอกาสเกิดจากกรณีที่สัญญาณระบบ 5G มีแถบความถี่ใกล้เคียงหรือติดกับช่วงความถี่ใช้งานของ RA

ตาราง 7 ลักษณะสมบัติการกรองสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ส่วนหน้าของ RA

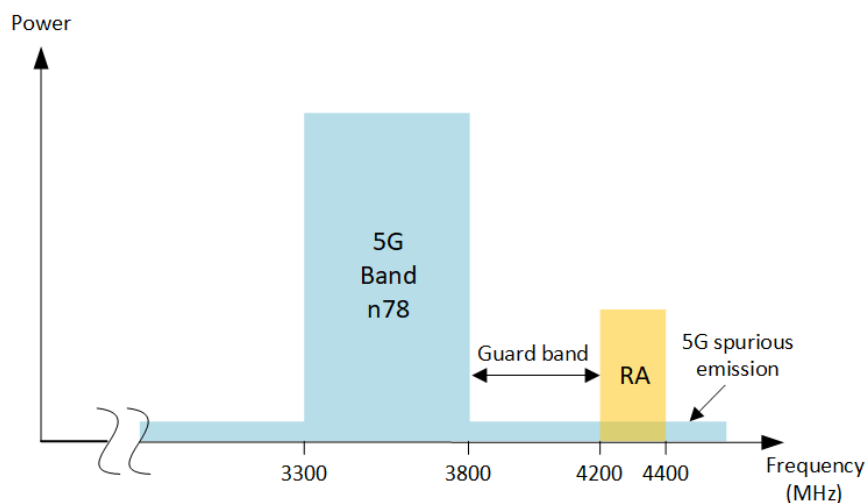
ที่มา : ITU-R (2014)

Interference frequency (MHz)	RF filter attenuation (dB)
$\leq 4,200$	Attenuated at 24 dB per octave to a maximum of 40 dB
4,200	0
4,300	0
4,400	0
$\geq 4,400$	Attenuated at 24 dB per octave to a maximum of 40 dB

- 2) การที่สัญญาณรบกวนที่มีความถี่ในช่วงความถี่ใช้งานของ RA ทำให้ Signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) ของเครื่องรับมีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณของเครื่องรับลดน้อยลง
- 3) การที่เครื่องรับตรวจจับและประมวลผลสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ในช่วงความถี่ใช้งานของ RA เสมือนเป็นสัญญาณเรดาร์ที่สะท้อนจากพื้นดิน ทำให้การคำนวณระยะความสูงเกิดความคลาดเคลื่อน

การรบกวนในลักษณะที่ 2) และ 3) อาจเกิดจากกรณีสัญญาณระบบ 5G มีแถบความถี่อยู่ห่างจากช่วงความถี่ใช้งานของ RA แต่มีการแพร่แปลกลอดล้ำเข้าไปในช่วงความถี่ใช้งานของ RA

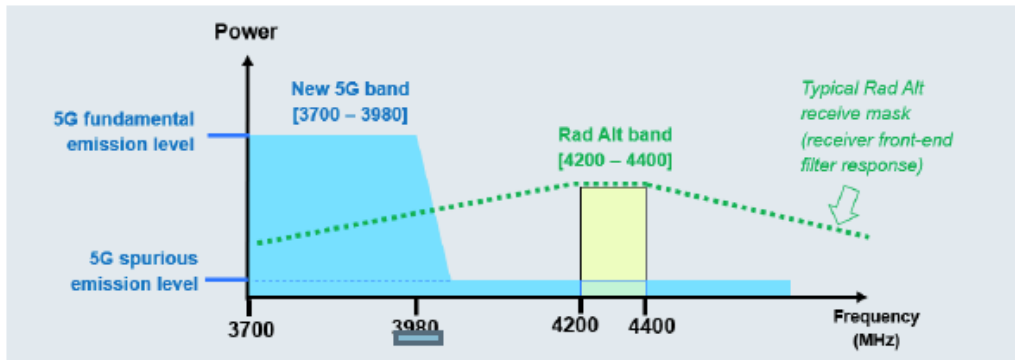
คลื่นความถี่ย่าน 3500 MHz ซึ่งคาดว่าจะถูกนำมาใช้ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G ในประเทศไทย ได้แก่ แถบความถี่ (Band) n78 (3300 MHz – 3800 MHz) ซึ่งจะมีระยะห่างจากช่วงความถี่ใช้งานของ RA (4200 MHz – 4400 MHz) อย่างน้อย 400 MHz เป็นแถบความถี่ป้องกัน (Guard band) ดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ หากจัดสรรคลื่นความถี่ย่าน 3500 MHz สำหรับระบบ 5G โดยให้มี Guard band จากช่วงความถี่ใช้งานของกิจการโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมเพื่อการรับชมโดยเฉพาะ (TVRO) ในย่านความถี่ C-Band อย่างน้อย 100 MHz ตามข้อเสนอแนะในโครงการนี้ นั่นคือ 3400 MHz – 3600 MHz จะทำให้มี Guard band จากช่วงความถี่ใช้งานของ RA อย่างน้อย 600 MHz ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดการรบกวนสัญญาณ RA โดยสัญญาณระบบ 5G ที่อยู่ภายในแถบความถี่โดยตรงและทำให้เครื่องรับของ RA เกิดภาวะโอเวอร์โหลตจึงไม่ควรจะเกิดขึ้น จะมีโอกาสเพียงแต่การแพร่แปลกล้อมของสัญญาณระบบ 5G ไปซ้อนทับกับช่วงความถี่ใช้งานของ RA ดังรูปที่ 112 และอาจเกิดการรบกวนสัญญาณในลักษณะที่ 2) หรือ 3) และทำให้ RA ทำงานผิดพลาดได้



รูป 121 สเปกตรัมของสัญญาณระบบ 5G แถบความถี่ n78 (3400 MHz – 3800 MHz) และสัญญาณของ RA

4.6.4 ตัวอย่างผลการศึกษาในสหรัฐอเมริกา

คณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal Communications Commission: FCC) ของสหรัฐอเมริกา ได้จัดสรรคลื่นความถี่ในช่วง 3700 – 4200 MHz ใหม่ โดยกิจการประจำที่ผ่านดาวเทียม (Fixed-Satellite Service: FSS) ถูกย้ายไปใช้งานในช่วงความถี่ 4000 – 4200 MHz และจัดสรรคลื่นความถี่ช่วง 3700 – 3980 MHz สำหรับใช้งานในกิจการอื่น ๆ รวมไปถึงกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล ระบบ 5G โดยเริ่มประมูลคลื่นความถี่ในย่านดังกล่าวในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2020 ทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการบินของสหรัฐอเมริกามีข้อกังวลเกี่ยวกับโอกาสที่สัญญาณระบบ 5G ในย่านความถี่ 3700 – 3980 MHz อาจไปรบกวนการทำงานของ RA บนอากาศยาน ซึ่งใช้คลื่นความถี่ในช่วง 4200 – 4400 MHz ที่อยู่ใกล้เคียงกับความถี่ของระบบ 5G ดังรูปที่ 326



รูป 122 สเปกตรัมของสัญญาณระบบ 5G และ Spurious Emission ที่ล้ำเข้าไปในช่วงความถี่ใช้งานของ RA

ที่มา : RTCA (2020)

ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการศึกษาและทดลอง-ทดสอบการรบกวนสัญญาณของระบบ 5G ย่านความถี่ 3700 – 3980 MHz ต่อ RA บนอากาศยาน ซึ่งใช้ความถี่ช่วง 4200 - 4400 MHz โดยสนใจการรบกวนทั้งที่เกิดจากสถานีฐาน (Base Station) และอุปกรณ์ผู้ใช้ (User equipment: UE) ในระบบ 5G ทั้งนี้ การทดลอง-ทดสอบของสหรัฐอเมริกาถือเป็นต้นแบบที่ประเทศต่าง ๆ ใช้ในการทดลอง-ทดสอบการรบกวนสัญญาณ RA ของแต่ละประเทศ

สัญญาณของระบบ 5G ที่มีโอกาสรบกวน RA อาจเกิดจากแหล่งกำเนิดดังต่อไปนี้

- สถานีฐาน
- UE ที่ใช้งานภาคพื้นดินหรือที่ใช้งานบนเครื่องบิน

ในการทดลอง-ทดสอบ นอกจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบ 5G แล้ว ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากการใช้งานของอากาศยาน เช่น การดำเนินการก่อนการแตะพื้นดิน อีกด้วย

แบบจำลองที่ใช้คำนวณกำลังสัญญาณรบกวน แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$P_{RX} = P_{source} + G_{source} - L_{prop} + G_{RA} - L_{RX}$$

โดยที่

P_{RX} คือ กำลังสัญญาณรบกวนที่พอร์ตาเข้าของเครื่องรับของ RA (dBm)

P_{source} คือ กำลังส่งออกของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (dBm)

G_{source} คือ อัตราขยายของสายอากาศแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (dBi)

L_{prop} คือ ค่าความสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยัง RA (dB)

G_{RA} คือ อัตราขยายของสายอากาศ RA (dBi)

L_{RX} คือ ค่าความสูญเสียในสายส่งระหว่างสายอากาศและเครื่องรับของ RA (dB)

แบบจำลองสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวนข้างต้น อาจแสดงในรูปของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power spectral density: PSD) ดังนี้

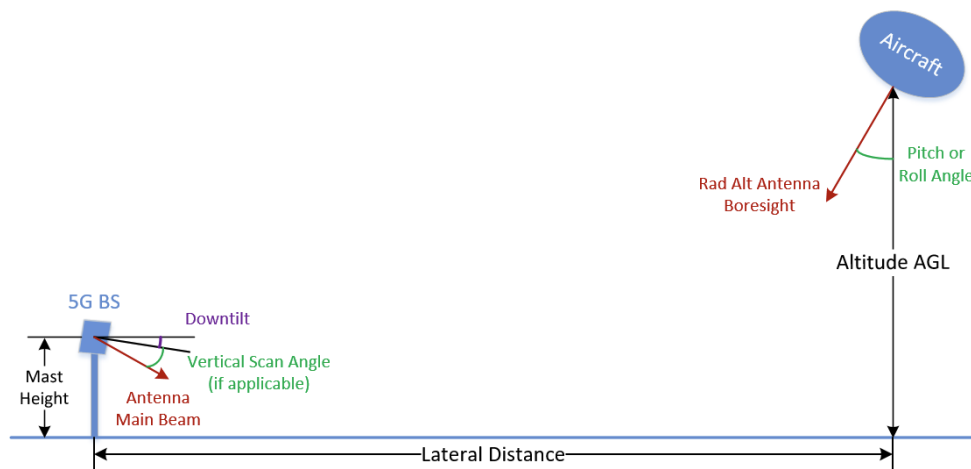
$$P_{RX} = P_{source} + G_{source} - L_{prop} + G_{RA} - L_{RX}$$

โดยที่

PSD_{RX} คือ PSD ของสัญญาณรบกวนที่พอร์ตาเข้าของเครื่องรับของ RA (dBm/MHz)

PSD_{source} คือ PSD ของสัญญาณรบกวนที่ส่งออกจากแหล่งกำเนิด (dBm/MHz)

รูปแบบการทดสอบการรบกวนสัญญาณ RA โดยสถานีฐาน 5G ขึ้นกับมุมก้ม (Down-tilt) ของสายอากาศสถานีฐาน 5G และระยะห่างในแนวราบ (Lateral distance) ดังแสดงในรูปที่ 114



รูป 123 รูปแบบสำหรับการคำนวณการรบกวนสัญญาณ RA ของอากาศยาน โดยสถานีฐาน 5G

ที่มา : RTCA (2020)

- Usage Category 2: All other fixed-wing aircraft not included in Usage Category 1, including regional, business aviation, and general aviation airplanes
- Usage Category 3: Both transport and general aviation helicopters

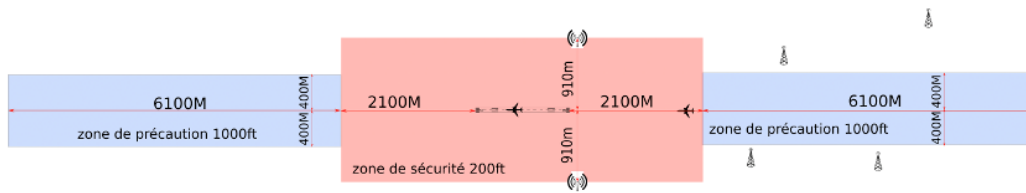
การทดสอบใช้สายอากาศของสถานีฐาน 5G ชนิด Array ขนาด 8 x 8 ซึ่งมีลักษณะเฉพาะแสดงดังตาราง 4 โดยใช้ตำแหน่งสถานีฐานของระบบ 4G ที่ติดตั้งอยู่แล้วในบริเวณโดยรอบสนามบิน ดังแสดงในรูป 117

ตาราง 8 ลักษณะเฉพาะของสายอากาศสถานีฐาน 5G ชนิด Array ขนาด 8 x 8 ที่ใช้ในการทดสอบ

ที่มา : RTCA (2020)

Environment	Urban	Suburban	Rural
Antenna Pattern	ITU-R M.2101-0	ITU-R M.2101-0	ITU-R M.2101-0
Array Size	8 x 8	8 x 8	8 x 8
Element Gain	6.4 dBi	7.1 dBi	7.1 dBi
Element Horizontal 3 dB Beamwidth	90 degrees	90 degrees	90 degrees
Element Vertical 3 dB Beamwidth	65 degrees	54 degrees	54 degrees
Front-to-Back Ratio	30 dB	30 dB	30 dB
Horizontal Array Spacing Coefficient	0.5	0.5	0.5
Vertical Array Spacing Coefficient	0.7	0.9	0.9
Vertical Scan Range ¹⁴	-30 to 0 degrees	-10 to 0 degrees	-10 to 0 degrees
Peak Array Gain	24.5 dBi	25.2 dBi	25.2 dBi
Mechanical Downtilt ¹⁵	10 degrees	6 degrees	3 degrees
Mast Height	20 meters	25 meters	35 meters
Downlink Bandwidth	100 MHz	100 MHz	100 MHz
Activity Factor	50%	50%	50%
Conducted Power per Element	25 dBm	25 dBm	25 dBm
Peak Output EIRP	67.5 dBm	68.2 dBm	68.2 dBm
Peak Output PSD (EIRP) ¹⁶	47.5 dBm/MHz	48.2 dBm/MHz	48.2 dBm/MHz
Conducted PSD, Spurious	-20 dBm/MHz	-20 dBm/MHz	-20 dBm/MHz
Peak Output PSD, Spurious (EIRP) ¹⁷	-13.6 dBm/MHz	-12.9 dBm/MHz	-12.9 dBm/MHz

ผลการทดสอบสามารถสรุปพื้นที่ปลอดภัย (Safety zone) และพื้นที่เฝ้าระวัง (Precaution zone) บริเวณโดยรอบทางวิ่งในสนามบิน แสดงดัง



รูป 126 ผลสรุป Safety zone และ Precaution zone จากการทดสอบการรบกวนสัญญาณ RA

ที่มา : RTCA (2020)

4.6.5 ตัวอย่างแนวทางการกำกับดูแลในต่างประเทศ

ตัวอย่างแนวทางการกำกับดูแลกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G ในย่านความถี่ใกล้เคียงกับช่วงความถี่ใช้งานของเครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุของอากาศยานเพื่อป้องกันการรบกวนสัญญาณ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของกิจการการบิน ในประเทศต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

1) สหรัฐอเมริกา

ผลการทดลอง-ทดสอบการรบกวนของสัญญาณระบบ 5G ต่อ RA ของอากาศยาน ที่สนามบินนานาชาติ O'Hare ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณากำหนดแนวทางการกำกับดูแล สรุปได้ดังนี้

การรบกวนสัญญาณ RA สำหรับอากาศยานแต่ละประเภท โดยสถานีฐานระบบ 5G มีดังนี้

- Usage Category 1: สถานีฐาน 5G อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนมากกว่า Safety interference limit ซึ่งขึ้นกับความสูงของอากาศยาน และระยะห่างระหว่างอากาศยานกับสถานีฐาน
- Usage Category 2: สถานีฐาน 5G ทำให้เกิดการรบกวน RA ที่อาจก่อให้เกิดอันตราย (Harmful Interference)
- Usage Category 3: สถานีฐาน 5G ทำให้เกิดการรบกวน RA ที่อาจก่อให้เกิดอันตราย ใกล้เคียงกับ Usage Category 2

การรบกวนสัญญาณ RA สำหรับอากาศยานแต่ละประเภท โดย 5G UE มีดังนี้

- 5G UE ที่ใช้งานภาคพื้นดิน พบว่าไม่ทำให้เกิดการรบกวน RA ที่เป็นอันตราย
- 5G UE ที่ใช้งานบนอากาศยาน ก่อให้เกิดการรบกวน RA ที่เป็นอันตรายต่ออากาศยานทั้ง 3 ประเภท

2) ออสเตรเลีย

ประเทศออสเตรเลียจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G โดยกำหนดความกว้างแถบความถี่ป้องกัน (Guard band) เท่ากับ 200 MHz จากช่วงความถี่ใช้งานของ RA (4200 MHz – 4400 MHz)

3) ญี่ปุ่น

ประเทศญี่ปุ่นจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G โดยกำหนด Guard band เท่ากับ 100 MHz จากช่วงความถี่ใช้งานของ RA (4200 MHz – 4400 MHz) และกำหนดให้สถานีฐานอยู่ห่างจากบริเวณทางวิ่ง (Runway) ในสนามบินอย่างน้อย 200 เมตร

4) ฝรั่งเศส

ประเทศฝรั่งเศสกำหนดให้กิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล เทคโนโลยี 5G ตั้งสถานีฐานห่างจากบริเวณทางวิ่งในสนามบิน ปรับทิศทางสายอากาศของสถานีฐานที่อยู่ใกล้บริเวณสนามบินให้ชี้ลงพื้นดิน และควบคุมความแรงของสัญญาณ อีกทั้งกำหนดให้ผู้โดยสารและลูกเรือปิดเครื่องโทรศัพท์มือถือระบบ 5G หรือใช้งานเฉพาะในโหมดเครื่องบิน (Airplane mode) ขณะอยู่บนเครื่องบิน

5) แคนาดา

ประเทศแคนาดาใช้แนวทางกำกับดูแลตามอย่างสหรัฐอเมริกา

4.6.6 ข้อเสนอแนะแนวทางกำกับดูแลสำหรับประเทศไทย

ประเทศไทยมีแผนที่จะนำโครงข่ายโทรคมนาคมระบบ 5G มาให้บริการในสนามบินและนำไปสู่การสร้างระบบนิเวศของสนามบินอัจฉริยะ (Smart Airport) เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวและขับเคลื่อนอุตสาหกรรมการบิน ตามยุทธศาสตร์ระดับชาติและนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ของรัฐบาล ดังนั้น หากมีการนำคลื่นความถี่ย่าน 3,500 MHz มาให้บริการโครงข่าย 5G ในบริเวณสนามบิน จะต้องมีการกำกับดูแลเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ระบบ 5G ไปรบกวนการทำงานของ RA บนอากาศยาน โดยคำนึงถึงความปลอดภัยด้านการบินเป็นลำดับสำคัญ แนวทางการกำกับดูแลฯ อาจเสนอแนะได้ดังนี้

1. ข้อกำหนดสำหรับ Guard band ระหว่างความถี่ใช้งานของระบบ 5G และความถี่ใช้งานของ RA ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการป้องกันการรบกวนสัญญาณ ทั้งนี้ หากกำหนด Guard band โดยใช้หลักเกณฑ์เดียวกับที่เสนอแนะสำหรับการป้องกันการรบกวนกิจการ TVRO ในย่านความถี่ C-Band นั่นคือ จัดสรรคลื่นความถี่สำหรับระบบ 5G ในช่วง 3400 MHz – 3600 MHz ก็จะมี Guard band ที่น่าจะเพียงพอ โดยอ้างอิงจากตัวอย่างในต่างประเทศข้างต้น

2. ข้อกำหนดสำหรับสถานีฐานของโครงข่ายระบบ 5G ที่ตั้งใกล้กับบริเวณสนามบิน ได้แก่

- ระยะห่างของสถานีฐานจากทางวิ่งในสนามบินอย่างน้อย 200 เมตร (อ้างอิงจากตัวอย่างในต่างประเทศ)
- ปรับทิศทางของสายอากาศให้ชี้ลงสู่พื้นดิน

3. ผู้โดยสารบนเครื่องบินจะไม่สามารถได้รับอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด รวมทั้งคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป แท็บเล็ต และโทรศัพท์มือถือ ขณะที่เครื่องบินทะยานขึ้นหรือร่อนลงจอดที่สนามบิน เมื่อเครื่องบินบินที่ระดับสูงประมาณ 3 กม. จากพื้นดินหรือมากกว่า ผู้โดยสารจึงจะได้รับอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ส่วนโทรศัพท์มือถือและแท็บเล็ตอนุญาตให้ใช้งานเฉพาะใน “โหมดเครื่องบิน” (Airplane mode) เท่านั้น ซึ่งทุกสายการบินในประเทศไทยและสายการบินต่างชาติส่วนใหญ่ใช้กฎนี้

4.6.7 ข้อคิดเห็นของผู้ใช้งาน

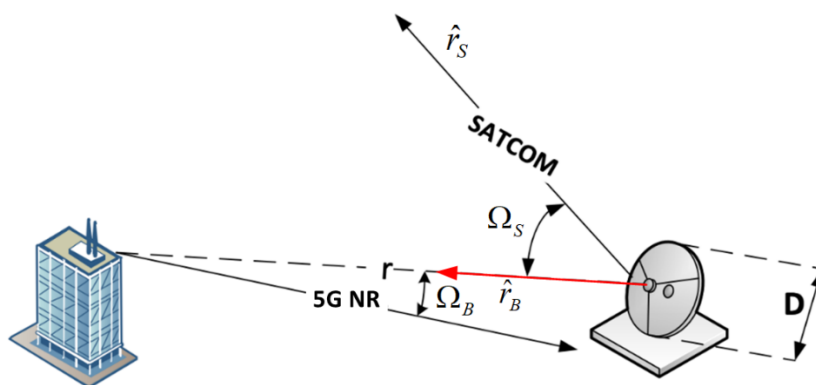
จากการสอบถามความเห็นของนักบินพาณิชย์ของสายการบินภายในประเทศ ซึ่งเป็นผู้ใช้งาน RA โดยตรง จำนวน 4-5 ท่าน สามารถสรุปข้อคิดเห็นได้ดังนี้

- 1) ในกรณีสภาพอากาศดี ทักษณวิสัยชัดเจน นักบินสามารถมองเห็นทางวิ่ง (Runway) ได้ชัดเจนจากระยะไกล หาก RA ถูกสัญญาณอื่นรบกวนการทำงานขณะเครื่องบินร่อนลงจอด อาจไม่成为ปัญหาร้ายแรงมากนัก เนื่องจากนักบินสามารถใช้การบินลงจอดโดยใช้สายตา (Visual landing) แทนการใช้ระบบเครื่องช่วยการเดินอากาศ (ILS) ในการนำเครื่องบินลงจอดได้อย่างปลอดภัย
- 2) ในกรณีสภาพอากาศเลวร้าย ทักษณวิสัยไม่ดี เครื่องบินต้องพึ่งพาระบบ ILS เป็นหลัก ซึ่งใช้ข้อมูลระยะความสูงเหนือพื้นดินที่วัดได้จาก RA ตรวจสอบกับระยะความสูงที่วัดได้จาก PA หากข้อมูลที่วัดได้จากอุปกรณ์ทั้งสองระบบไม่ตรงกันและนักบินเกิดความไม่มั่นใจ นักบินก็จะตัดสินใจไม่นำเครื่องบินร่อนลงจอด
- 3) โดยทั่วไปเครื่องบินแต่ละลำจะมี RA จำนวน 2-3 ชุด ติดตั้งบนเครื่อง ตัวอย่างเช่น ติดตั้งเรียงกันทางด้านซ้าย ตรงกลาง และด้านขวา โดยนำค่าที่วัดได้จากแต่ละชุดมาตรวจสอบกันโดยมีหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกค่าที่น่าเชื่อถือได้สำหรับกรณีค่าที่อ่านได้ไม่ตรงกัน หากมี RA ชุดใดเกิดขัดข้องหรือค่าที่วัดได้ผิดพลาด และ RA ที่เหลืออีก 2 ชุดยังสามารถทำงานได้ปกติ ก็ยังสามารถระบุความสูงของเครื่องบินได้ แต่หาก RA ขัดข้องพร้อมกันทั้งหมดหรือเกิดกรณีที่ไม่สามารถตัดสินใจเลือกค่าที่น่าเชื่อถือได้ ระบบจะมีสัญญาณเตือนระดับ Fatal alarm แจ้งให้นักบินทราบ เพื่อตัดสินใจดำเนินการต่อไป
- 4) ปกติผู้โดยสารบนเครื่องบินไม่สามารถใช้โทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์สื่อสารทุกชนิดขณะเครื่องบินขึ้น-ลง หรือขณะแล่นอยู่บนทางวิ่ง โดยลูกเรือจะทำการแจ้งเตือนและควบคุมดูแลอย่างเข้มงวด

5) เท่าที่ผู้ให้ข้อมูลทราบ ที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีรายงานกรณี RA ถูกรบกวนจากสัญญาณระบบสื่อสารอื่นๆ

4.7 ผลของทิศทางสถานีฐาน

พิจารณาสถานการณ์ที่สัญญาณของโครงข่ายระบบ 5G รบกวนระบบรับสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (TVRO system) ย่านความถี่ C-band แสดงดัง รูป 127



รูป 127 สถานการณ์ที่สัญญาณของโครงข่ายระบบ 5G รบกวนระบบรับสัญญาณโทรศัพท์ผ่านดาวเทียม

ที่มา : Ardavan (2020)

ในการใช้งานระบบ TVRO จานรับสัญญาณดาวเทียมจะชี้ไปยังทิศทางของดาวเทียม (SATCOM) นั่นคือ ทิศทางที่อัตราขยายหรือแบบรูปการแผ่กำลังงาน (หรือรับกำลังงาน) ของจานรับสัญญาณมีค่าสูงสุด หรือทิศทางของแกนของลำคลื่นหลัก (Boresight direction) จะเล็งไปยังตำแหน่งของดาวเทียม ในที่นี้แทนด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{r}_S$ ซึ่งสัมพันธ์กับมุมในแนวตั้ง θ_S และมุมในแนวราบ ϕ_S ในระบบพิกัดอ้างอิง

กำหนดให้สถานีฐานระบบ 5G อยู่ห่างจากจานรับสัญญาณดาวเทียมเป็นระยะทาง r ในทิศทางแทนด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{r}_B$ ซึ่งสัมพันธ์กับมุมในแนวตั้ง θ_B และมุมในแนวราบ ϕ_B ในระบบพิกัดอ้างอิง ดังแสดงด้วยแนวเส้นประในรูป 127 ดังนั้น มุมระหว่างทิศของสถานีฐาน 5G และทิศของดาวเทียมเท่ากับ

$$\Omega_{\varsigma} = \cos^{-1}(\hat{r}_{\varsigma} \cdot \hat{r}_B)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}\hat{r}_S &= \hat{x} \sin \theta_S \cos \phi_S + \hat{y} \sin \theta_S \sin \phi_S + \hat{z} \cos \theta_S \\ \hat{r}_B &= \hat{x} \sin \theta_B \cos \phi_B + \hat{y} \sin \theta_B \sin \phi_B + \hat{z} \cos \theta_B \\ \hat{r}_S \cdot \hat{r}_B &= \sin \theta_S \sin \theta_B \cos(\phi_S - \phi_B) + \cos \theta_S \cos \theta_B\end{aligned}$$

สัญญาณรบกวนจากสถานีฐานระบบ 5G จะถูกรับเข้ามาทางลำคลื่นรอง (Side lobe) ของจานรับสัญญาณดาวเทียมในทิศทางทำมุม Ω_S กับแกนของลำคลื่นหลัก (ซึ่งเล็งไปยังดาวเทียม) ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการรับสัญญาณ ได้แก่ Carrier-to-Interference-plus-Noise Ratio (CINR) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{CINR} &= \text{EIRP} + G_{r_0} - \text{LOSSES} - P_N - \text{EIRP}_I - G_r(\Omega_s) + 20 \log(r) - 20 \log(\lambda_l/(4\pi)) \\ &= \text{EIRP} + G_{r_0} - \text{LOSSES} - P_N - \text{EIRP}_I - G_r(\Omega_s) + 20 \log(r) - 20 \log(\lambda_l/(4\pi)) \end{aligned}$$

โดยที่ **CINR** คือ Carrier-to- interference-plus-noise ratio (หน่วย dB)

EIRP คือ Equivalent isotropic radiated power ของสัญญาณดาวเทียม (หน่วย dBW)

G_{r0} คือ อัตราขยายสูงสุดของจานรับสัญญาณดาวเทียมในทิศแกนของลำคลื่นหลัก (หน่วย dBi)

LOSSES คือ ค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดตลอดเส้นทางการรับส่งสัญญาณ (หน่วย dB)

P_N คือ กำลังของสัญญาณรบกวน (Noise) (หน่วย dBW)

$EIRP_I$ คือ Equivalent isotropic radiated power ของสัญญาณรบกวน (หน่วย dBW)

$G_r(\Omega_s)$ คือ อัตราขยายของจานรับสัญญาณดาวเทียมในทิศทางมุม Ω_s กับแกนของลำคลื่นหลัก (หน่วย dBi)

$\tilde{G}_r(\Omega_s) = G_r(\Omega_s) - G_{r0}$ คือ อัตราขยายสัมพัทธ์เทียบกับอัตราขยายสูงสุดของจานรับสัญญาณดาวเทียมในทิศทางมุม Ω_s กับแกนของลำคลื่นหลัก (หน่วย dB)

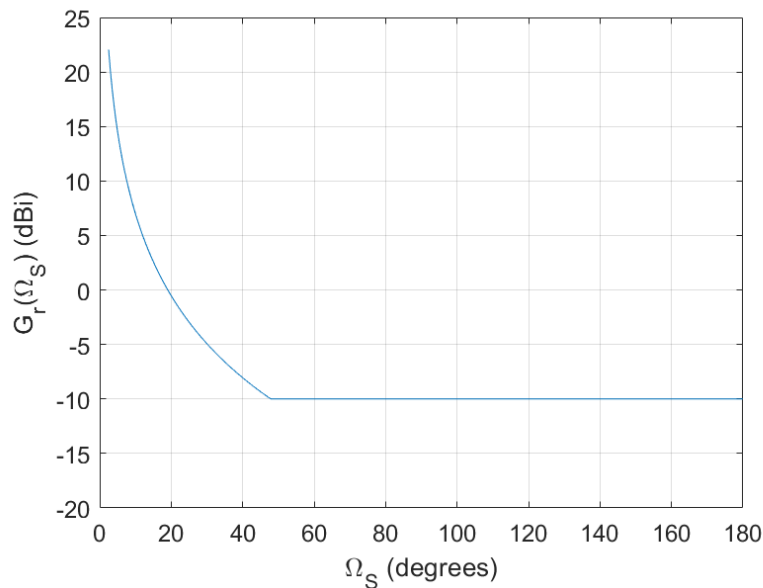
r คือระยะห่างระหว่างจานรับสัญญาณดาวเทียมและสถานีฐานระบบ 5G (หน่วย m)

λ_l คือความยาวคลื่นของสัญญาณรบกวน (หน่วย m)

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า ค่า CINR เปลี่ยนแปลงตามอัตราขยายของจานรับสัญญาณดาวเทียม $G_r(\Omega_s)$ ในทิศทางมุม Ω_s กับแกนของลำคลื่นหลัก ซึ่งตามข้อกำหนดของ ITU-R ใน Recommendation ITU-R S.465-6 จะต้องมียกเว้นค่าขอบเขตตามสมการต่อไปนี้

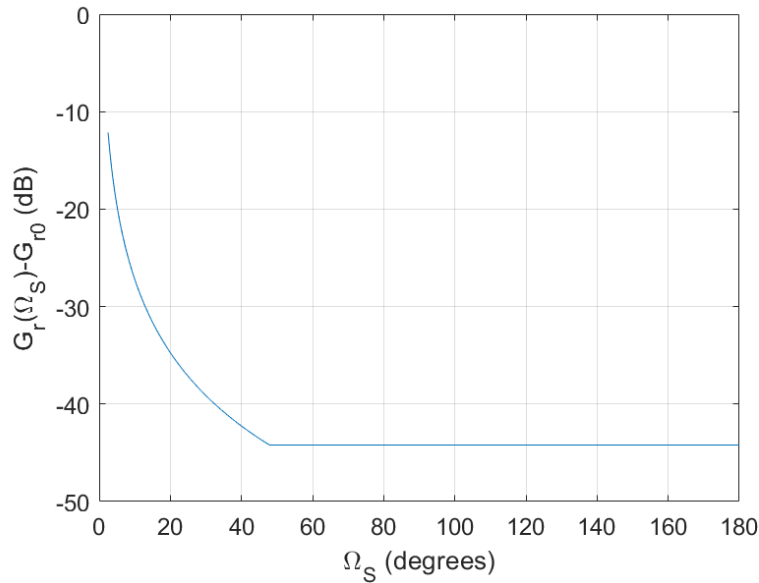
$$G_r(\Omega_s) \leq \begin{cases} 32 - 25 \log \Omega_s \text{ dBi}, & \Omega_{\min} \leq \Omega_s < 48^\circ \\ -10 \text{ dBi}, & 48^\circ \leq \Omega_s < 180^\circ \end{cases}$$

โดยที่ $\Omega_{\min} = 2.5^\circ$ สำหรับจานรับสัญญาณดาวเทียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบกับความยาวคลื่น $D/\lambda < 33.3$ ค่าขอบเขตของอัตราขยายในทิศทางนอกลำคลื่นหลักตามข้อกำหนดของ ITU-R ดังกล่าวข้างต้น สามารถแสดงในรูปกราฟได้ดังรูป 128



รูป 128 ค่าขอบเขตของอัตราขยายในทิศทางนอกลำคลื่นหลักของจานรับสัญญาณดาวเทียมตามข้อกำหนดของ ITU-R ใน Recommendation ITU-R S.465-6

สำหรับจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร มีอัตราขยายสูงสุด $G_{r0} \approx 34.2$ dBi ดังนั้น ตามข้อกำหนดของ ITU-R ดังกล่าวข้างต้น ค่าขอบเขตของอัตราขยายสัมพัทธ์ (เทียบกับค่าสูงสุด) $\tilde{G}_r(\Omega_s)$ ในทิศทางนอกลำคลื่นหลัก สามารถแสดงในรูปกราฟได้ดังรูป 129



รูป 129 ค่าขอบเขตของอัตราขยายสัมพัทธ์ในทิศทางนอกลำคลื่นหลักของจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 m ตามข้อกำหนดของ ITU-R ใน Recommendation ITU-R S.465-

ค่าของมุม Ω_S เทียบกับแกนของลำคลื่นหลัก ซึ่งเป็นทิศทางที่รับสัญญาณระบบ 5G เข้ามา ขึ้นกับตำแหน่งและทิศทางของสถานีฐานเมื่อเทียบกับตำแหน่งและทิศทางของจานรับสัญญาณดาวเทียม ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของมุมในแนวตั้ง $|\theta_S - \theta_B|$ และความแตกต่างของมุมในแนวราบ $|\phi_S - \phi_B|$ ในสถานการณ์จริง มุม $\theta_S < \theta_B$ เนื่องจากตำแหน่งของดาวเทียมอยู่สูงกว่าสถานีฐานมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจานรับสัญญาณดาวเทียมตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรเช่นประเทศไทย สำหรับดาวเทียม ไทยคม 6 และจานรับสัญญาณดาวเทียมติดตั้งในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ทิศทางของจานรับสัญญาณดาวเทียมจะชี้ไปยังมุม $\theta_S = 90^\circ - 54.7^\circ = 35.3^\circ$ ในระบบพิกัดอ้างอิง ส่วนมุม θ_B ขึ้นกับความสูงของสถานีฐานและระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับจานรับสัญญาณดาวเทียม

สำหรับความแตกต่างของมุมในแนวราบ $|\phi_S - \phi_B|$ ขึ้นกับทิศทางในแนวราบของสถานีฐานเมื่อเทียบกับทิศของจานฯ ซึ่งเล็งไปยังดาวเทียม กรณีที่สถานีฐาน 5G และจานรับสัญญาณดาวเทียมหันเข้าหากันโดยตรง ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นกรณีที่ได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุด (Worst-case scenario) นั่นคือมุม $\phi_S = \phi_B$ จะได้ว่า

$$\hat{r}_S \cdot \hat{r}_B = \sin \theta_S \sin \theta_B + \cos \theta_S \cos \theta_B = \cos(\theta_S - \theta_B)$$

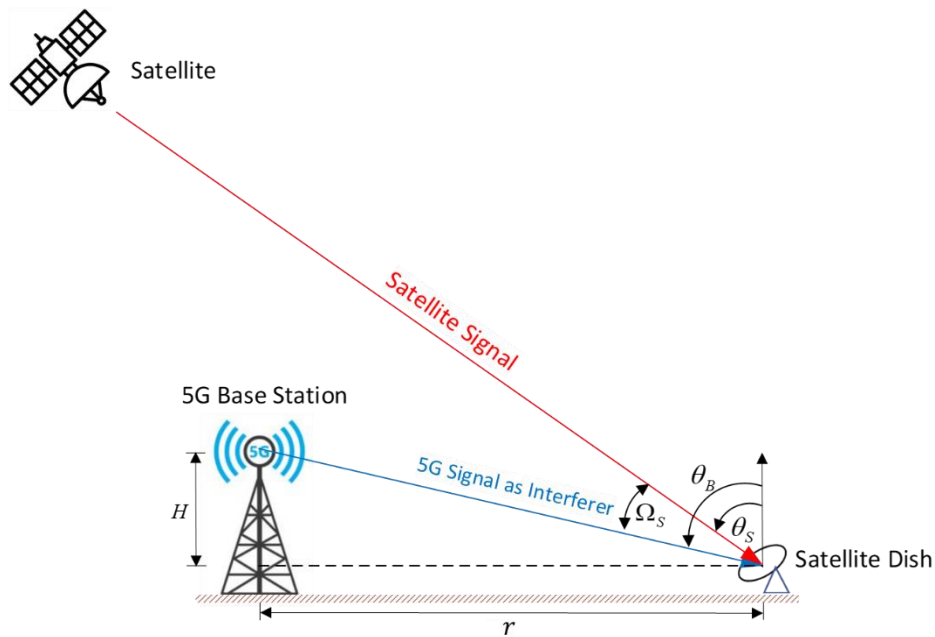
$$\Omega_S = \cos^{-1}(\hat{r}_S \cdot \hat{r}_B) = |\theta_S - \theta_B|$$

นั่นคือ มุม Ω_S ขึ้นกับ $|\theta_S - \theta_B|$ เท่านั้น

ตัวอย่างการทดลองภาคสนามในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นกรณีที่สถานีฐาน 5G และจานรับสัญญาณดาวเทียมหันเข้าหากันโดยตรง (โดยประมาณ) มีค่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องแสดงดังรูป 129 ค่าขอบเขตของอัตราขยายสัมพัทธ์ในทิศทางนอกลำคลื่นหลักของจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 m ตามข้อกำหนดของ ITU-R ใน Recommendation ITU-R S.465- โดยที่

- ความสูงของสถานีฐาน 5G เท่ากับ 37.5 เมตร จากพื้นดิน
- ความสูงของศูนย์กลางจานรับสัญญาณดาวเทียมจากพื้นดินเท่ากับ 1.8 เมตร
- ระยะความสูง $H = 37.5 - 1.8 = 35.7$ เมตร
- มุม $\theta_S = 35.3^\circ$ สำหรับดาวเทียมไทยคม

- มุม $\theta_B = 90^\circ - \tan^{-1}(H/r)$
- มุม $\Omega_S = |\theta_S - \theta_B|$



รูป 130 ค่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องในการทดลองภาคสนามในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างของค่ามุม Ω_S ซึ่งเป็นทิศทางเทียบกับแกนของลำคลื่นหลักที่จานดาวเทียมรับสัญญาณระบบ 5G เข้ามา สำหรับระยะทาง r เท่ากับ 130, 200 และ 280 เมตร ตามลำดับ แสดงดังตาราง 9 จะเห็นว่ามุม Ω_S อยู่ในช่วงระหว่าง 39 – 48 องศา จากกราฟในรูป 129 จะได้ว่าอัตราขยายสัมพัทธ์ของจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ในทิศทางดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า -40 dB

r (m)	θ_B (degree)	Ω_S (degree)
130	74.6	39.3
200	79.9	44.6
280	82.7	47.4

ตาราง 9 ค่าของมุม Ω_S สำหรับการทดลองภาคสนามในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ระยะทางต่าง ๆ

กรณีที่สถานีฐาน 5G และจานรับสัญญาณดาวเทียมไม่ได้หันเข้าหากันโดยตรง นั่นคือมุม $\phi_S \neq \phi_B$ จะทำให้มุม Ω_S มีค่ามากกว่ากรณีที่ $\phi_S = \phi_B$ ยิ่งทิศทางในแนวราบของสถานีฐาน 5G แตกต่างจากทิศที่จานรับสัญญาณดาวเทียมหันไปมากขึ้น จะทำให้มุม Ω_S มีค่ามากขึ้น นั่นคือ อัตราขยายของจานรับสัญญาณดาวเทียม $G_r(\Omega_S)$ ในทิศดังกล่าวมีค่าลดลง (อ้างอิงตามค่าขอบเขตที่กำหนดโดย ITU-R) ส่งผลให้ค่า CINR มีค่ามากขึ้น หรือผลกระทบของสัญญาณรบกวนมีค่าลดลงตามความแตกต่างของมุมในแนวราบที่เพิ่มมากขึ้น

ในการทำงานของโครงข่ายระบบ 5G สัญญาณคลื่นจะแพร่กระจายจากสายอากาศของสถานีฐานในลักษณะหลายลำคลื่น (Multiple beams) ซึ่งไปยังทิศทางของอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (User Equipment: UE) ต่างๆ ที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานดังกล่าว สำหรับในรูป 130 ค่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องในการทดลองภาคสนามในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทิศทางของ ลำคลื่นสัญญาณ 5G ที่เล็งไปในบริเวณ

ใกล้เคียงกับงานรับสัญญาณดาวเทียมแสดงด้วยลูกศรที่มีป้ายกำกับว่า “5G NR” ทิศทางของแต่ละลำคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานซึ่งโดยทั่วไปมีการเคลื่อนที่ หากลำคลื่นสัญญาณ 5G เล็งไปยังตำแหน่งงานรับสัญญาณดาวเทียมพอดี สัญญาณที่ตกกระทบหน้างานฯ ก็จะมีค่าความเข้มสูง นั่นคือ ค่า $EIRP_f$ ในสมการของ CINR จะมีค่ามาก แต่หากลำคลื่นสัญญาณ 5G ไม่ได้เล็งไปยังตำแหน่งงานรับสัญญาณดาวเทียมโดยตรง สัญญาณที่ตกกระทบหน้างานฯ ก็จะมีค่าความเข้มต่ำกว่า

5 สรุปผลการดำเนินงานโครงการ

5.1 ข้อสรุปคุณสมบัติทางเทคนิค

5.1.1 การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor) ย่าน 3500 MHz

การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายในอาคาร (Indoor) ย่าน 3500 MHz		
1. กรณีทดสอบที่ 1 (Case 1): LNB = 3400 ถึง 4200 MHz	ค่ากำลังส่งที่หน้าสถานีฐาน 1W ปล่อยสัญญาณในช่วงความถี่ 3500 ถึง 3600 MHz	-45 dBm/Hz
	ค่ากำลังส่งสถานีฐานด้านข้าง อาคารที่ระยะ 25 เมตร	- สัญญาณถูกลดทอนลงไป เหลือที่ -120.28 dB/Hz - สัญญาณ (Channel Power) ที่ วัดหน้าจานรับดาวเทียมมี ขนาดน้อยกว่า -110 dBm/Hz

คณะวิจัยพบว่าการตั้งสถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคารที่มีกำลังส่ง 1W ปล่อยสัญญาณในช่วงความถี่ 3500 ถึง 3600 MHz ด้วยแบนด์วิธ 100 MHz ได้ (โดยทั่วไปสถานีฐาน 5G ภายในอาคารจะใช้กำลังส่งและแบนด์วิธที่น้อยกว่าสถานีฐานภายนอกอาคาร) ไม่ส่งผลกระทบต่อและสร้างสัญญาณรบกวนมากพอ จนทำให้ระบบโทรทัศน์ดาวเทียมที่ยังใช้หัวรับ LNB แบบปกติ (3.4 – 4.2 GHz) ทำงานผิดปกติ ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน 5G และจานรับดาวเทียมไม่น้อยกว่า 25 เมตร แต่ก็ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าไม่จำเป็นต้องกำหนดแถบความถี่ป้องกันการรบกวน (Guard band) ระหว่างกิจการทั้งสอง แล้วกิจการทั้งสองจะสามารถใช้งานแถบความถี่ร่วมกันได้จริง เนื่องจากความถี่ของสถานีฐาน 5G ที่ใช้ในการทดสอบจริง สามารถปล่อยสัญญาณได้ในช่วงแถบความถี่ 3500 MHz ถึง 3600 MHz เท่านั้น ไม่ใช่ 3500 MHz ถึง 3700 MHz จึงต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนต่อไป

5.1.2 การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร (Outdoor) ย่าน 3500 MHz

5.1.2.1 การสังเกตภาพด้วยสายตา (No Macro blocking , Blackout, Freeze และ Audio Silence)

การทดสอบในกรณีที่สถานีฐาน 5G อยู่ภายนอกอาคาร (Outdoor) ย่าน 3500 MHz		
ประเภทหัว LNB_F	ความถี่ป้องกัน (Guard band)	ระยะทางสั้นที่สามารถใช้งานได้
1. กรณีทดสอบที่ 1 (Case 1): LNB = 3400 ถึง 4200 MHz หมายเหตุ ค่าความถี่ IMT ที่ทดสอบ อยู่ในช่วง 3400 ถึง 3500 MHz	ไม่สามารถหาได้⁹	อาจจะมากกว่า 280 เมตร¹⁰
2. กรณีทดสอบที่ 2 (Case 2): LNB, LNB_F, BPF = 3700 ถึง 4200 MHz หมายเหตุ ค่าความถี่ IMT ที่ทดสอบ อยู่ในช่วง 3400 ถึง 3600 MHz	มีค่า 80-100 เม็กกะเฮิร์ตซ์ หมายเหตุ ค่า 100 เม็กกะเฮิร์ตซ์ จะถูกใช้เป็นค่าตั้งต้นเนื่องจากเป็นค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	130 เมตร

5.1.2.2 การวัดค่า Signal Quality, C/N margin และค่า Bit error rate ของสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม

ประเภท LNB	กรณีทดสอบ	Signal Quality		C/N margin (dB)	Bit error rate
		PWR กับระยะทาง (dB)	MER กับระยะทาง (dB)		
รุ่นที่ 1	กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz	-45 ถึง -58	6.5 – 14.5	7 – 14.3	1.0E-07 ถึง 0.5E+00
	กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz	-44 ถึง -57	6.9 – 14.7	6.5 – 14.5	1.0E-07 ถึง 0.6E+00
รุ่นที่ 2	กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz	-42 ถึง -54	6.1 ถึง 14.8	8.1 – 16.4	1.0E-07 ถึง 0.6E+00

⁹ เนื่องจากระยะทางสั้นที่สุดที่สามารถใช้งานได้สำหรับหัว LNB ชนิดความถี่ 3400 – 4200 MHz มีค่ามากกว่าระยะทดสอบไกลสุดคือ 280 เมตร ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าด้วยใช้สายตา จึงไม่สามารถหาค่าความถี่ป้องกัน (Guardband) ได้

¹⁰ ระยะการทดลองจำกัดที่ 280 เมตร เนื่องจากคณะวิจัยไม่สามารถถอยร่นงานรับสัญญาณดาวเทียมไม่ได้ เพราะมีสิ่งปลูกสร้างกีดขวางอยู่

ประเภท LNB	กรณีทดสอบ	Signal Quality		C/N margin (dB)	Bit error rate
		PWR กับ ระยะทาง (dB)	MER กับ ระยะทาง (dB)		
	กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz	-43 ถึง -52	6.0 ถึง 14.8	7.6 – 16.4	5.2E-07 ถึง 0.2E+00
รุ่นที่ 3	กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz	-46 ถึง -55	6.2 ถึง 14.1	6.0 – 14.2	5.3E-07 ถึง 0.1E+00
	กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz	-46 ถึง -55	6.0 ถึง 13.8	6.8 – 13.1	2.2E-07 ถึง 0.0E+00
รุ่นที่ 4	กรณีทดสอบที่ 1 ความถี่ 3.4-3.5 GHz	-42 ถึง -68	5.8 ถึง 14	5.0 – 19.8	0.00021 ถึง 0
	กรณีทดสอบที่ 2 ความถี่ 3.5-3.6 GHz	-42 ถึง -68	5.8 ถึง 14	5.2 – 19.8	0.00049 ถึง 0

5.2 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย ปัญหา อุปสรรค หรือข้อเสนอแนะอื่นๆ

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการกำกับดูแลใช้งานคลื่นความถี่ในย่าน 3500 MHz ระหว่างการสื่อสารเคลื่อนที่ 5G และกิจการอื่น

- 1) กรณีการติดตั้งและใช้งานสถานีฐาน 5G ภายในอาคาร หากจำเป็นต้องมีการใช้งานคลื่นความถี่ IMT ในช่วง 3400 – 3600 MHz ในประเทศไทย คณะวิจัยพบว่าการตั้งสถานีฐาน 5G ชนิดภายในอาคาร ที่มีกำลังส่ง 1W ปลอยสัญญาณในช่วงความถี่ 3500 ถึง 3600 MHz ด้วยแบนด์วิดธ์ 100 MHz ได้ (โดยทั่วไปสถานีฐาน 5G ภายในอาคารจะใช้กำลังส่งและแบนด์วิดธ์ที่น้อยกว่าสถานีฐานภายนอกอาคาร) ไม่ส่งผลกระทบและสร้างสัญญาณรบกวนมากพอ จนทำให้ระบบโทรทัศนดาวเทียมที่ยังใช้หัวรับ LNB แบบปกติ (3.4 – 4.2 GHz) ทำงานผิดปกติ ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน 5G และจานรับดาวเทียมไม่น้อยกว่า 25 เมตร ทำให้ในกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องกำหนดแถบความถี่ป้องกันการรบกวน (Guard band) ระหว่างกิจการทั้งสองและกิจการทั้งสองสามารถใช้งานแถบความถี่ร่วมกัน

- 2) ในระยะสั้น กรณีการติดตั้งและใช้งานสถานีฐาน 5G ภายนอกอาคาร หากจำเป็นต้องมีการใช้งานคลื่นความถี่ IMT ในช่วง 3400 – 3700 MHz ในประเทศไทย เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้รายเดิมของระบบโทรทัศน์ดาวเทียม คณะวิจัยควรกำหนดให้ใช้คลื่นความถี่ในช่วง 3400 - 3600 MHz ด้วยแบนด์วิธ 200 MHz ให้ใช้กับบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G เสียก่อน และจัดให้คลื่นความถี่ที่ใช้ในกิจการดาวเทียมในช่วง 3.7 – 4.2 GHz จำนวน 500 MHz ดังเดิม โดยมีแถบความถี่ป้องกันการรบกวน (Guard band) ขนาด 100 MHz ป้องกันไว้ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน 5G และจานรับดาวเทียม (ขนาด 1.5 เมตรและ 1.8 เมตร) ไม่น้อยกว่า 130 เมตร และสถานีฐาน 5G ใช้กำลังส่ง (EIRP) ไม่เกิน 200 Watt โดยใช้หัวรับ LNB_F¹¹ ที่มีวงจรกรองความถี่ที่มีมาตรฐาน (คุณลักษณะขั้นต่ำตามที่คณะวิจัยใช้งาน)
- 3) ในระยะยาว (5 ปี เป็นต้นไป) กรณีการติดตั้งและใช้งานสถานีฐาน 5G ภายนอกอาคาร หากจำเป็นต้องมีการใช้งานคลื่นความถี่ IMT ในช่วง 3300 – 3800 MHz (N78) ในประเทศไทย ที่มากกว่าช่วง 3400 - 3600 MHz เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้รายเดิมของระบบโทรทัศน์ดาวเทียม คณะวิจัยอาจต้องกำหนดกรอบเวลาในการทำการเรียกคืนความถี่ในช่วง 3700-3900 MHz ที่ใช้งานสำหรับย่านกิจการดาวเทียมในปัจจุบัน มาเป็นการให้บริการ 5G หากคณะวิจัยพบว่ายังไม่มีเทคโนโลยีใหม่ๆ ทางด้านกิจการดาวเทียมที่ต้องการใช้ย่านความถี่ดังกล่าว เพื่อให้การให้บริการ 5G ทำได้เต็มประสิทธิภาพ
- 4) กรณีการติดตั้งและใช้งานสถานีฐาน 5G ภายนอกอาคาร นั้น คณะวิจัยได้ตั้งสถานการณ์การทดสอบให้เป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Worst case) ดังนั้นระยะห่างระหว่างสถานีฐาน 5G และจานรับดาวเทียมไม่น้อยกว่า 130 เมตรนั้น อาจจะมีการปรับให้ลดน้อยลงได้ในอนาคต หากได้มีการเริ่มใช้งานและติดตั้งสถานีฐาน 5G แบบภายนอกอาคารจริง อาจจะมีการพิจารณาค่อยๆ ปรับลดระยะห่างดังกล่าวลงได้ หากไม่มีการรายงานว่าเกิดผลกระทบระหว่างกัน เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วช่วงติดตั้งระบบจานรับสัญญาณดาวเทียมได้ถูกฝึกอบรม ให้สามารถหลบเลี่ยงการรบกวนสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอื่นได้ เช่นการติดตั้งจานรับสัญญาณดาวเทียมให้ต่ำลง หรือการอาศัยมุมของดาดฟ้าในการบดบังสัญญาณรบกวนจากสถานีฐาน 5G ในบริเวณข้างเคียงได้
- 5) ในระยะยาว (5-10 ปี) กรณีการติดตั้งและใช้งานสถานีฐาน 5G ภายนอกอาคาร หากจำเป็นต้องมีการใช้งานคลื่นความถี่ IMT ในช่วง 3300 – 3800 MHz (N78) ในประเทศไทย อย่างเต็มรูปแบบ ทำให้แบนด์วิธของระบบโทรทัศน์ดาวเทียมลดลงเหลือแค่ 200 MHz ในช่วงความถี่ 4000 – 4200 MHz และไม่เพียงพอต่อการใช้งาน คณะวิจัยอาจต้องพิจารณาย้ายความถี่ดาวเทียมไปใช้ย่านอื่นแทนเช่น Ka-band ในช่วงความถี่ 26-40 GHz เพื่อให้รองรับกับเทคโนโลยีใหม่ๆ ของดาวเทียมในอนาคต ทั้งนี้ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความไปเป็นได้ ให้เกิดความสอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้บริโภค ไม่ว่าจะเป็น

¹¹ หัวรับสัญญาณดาวเทียม (Low-Noise Block Downconverter + 5G Filter (LNB_F)) ชนิดมีตัวกรองสัญญาณ 5G หรือ 5G Filter

เป็นในเมืองหรือชานเมือง เนื่องจากประชาชนในเมืองจะเน้นพักอาศัยกันภายในห้องพักบน คอนโดมิเนียมที่ไม่สะดวกในการติดตั้งจานดาวเทียม C-band ที่มีขนาด 1.5 เมตร ซึ่งแตกต่างจาก ประชาชนที่พักอาศัยชานเมือง ที่มีพื้นที่ในการติดตั้งจานขนาดใหญ่ได้

- 6) ทั้งนี้ เนื่องจากข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของหัวรับ LNB LNB_F และ BPF นั้นสำคัญต่อการใช้งานระบบการรับสัญญาณดาวเทียมมาก คณะวิจัยจึงสนับสนุนให้เกิดข้อกำหนดและห้องปฏิบัติการในการทดสอบหัวรับ LNB LNB_F และ BPF ขึ้น โดยในการทดสอบครั้งนี้ คณะวิจัยได้รับความอนุเคราะห์การทดสอบจากห้องปฏิบัติการคลื่นความถี่ไมโครเวฟ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งเป็นห้องทดสอบในระดับปฐมนูมิและได้รับการรับรองในระดับนานาชาติ เป็นผู้ทดสอบให้ โดยในการทดสอบแท้จริงแล้ว จะต้องมีการวัดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ประกอบด้วยคือ ค่า 1 dB Gain Compression และค่า Noise Figure ของหัวรับ LNB LNB_F และ BPF เพื่อให้คณะวิทยาทราบถึงประสิทธิภาพของหัวรับ LNB LNB_F และ BPF อย่างเต็มรูปแบบ ดังนั้นในการทดลองนี้ คณะวิจัยจึงเพียงแค่สรุปว่าหากคณะวิจัยมีหัวรับ LNB_F ชนิดที่ต่างกันจะได้ผลลัพธ์ที่ต่างกันโดย LNB ที่พึงประสงค์จะส่งผลให้ต้องใช้ความถี่ป้องกัน (Guard band) 100 MHz ที่ระยะห่าง 130 เมตร สำหรับการทดสอบกรณีภายนอกอาคาร
- 7) ผลการทดสอบในครั้งนี้เป็นผลการทดสอบจริง ในสถานที่จริง ทั้งนี้ เนื่องจากคณะวิจัยต้องการจำลองกรณีศึกษาที่ใช้จริง บริเวณที่มีตึกหนาแน่นในเมืองเป็นหลัก หากมีการทดสอบบริเวณชานเมือง อาจได้รับผลการทดสอบที่แตกต่างออกไป และอุปกรณ์ทดสอบของสถานีฐาน 5G นั้นอาจมีความหลากหลายในแต่ละตราอักษรและรุ่น ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการทดลองจริง

5.2.2 รายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคขั้นต่ำของหัวรับ LNB ที่พึงประสงค์

ทั้งนี้ จากผลการศึกษาวิจัย พบว่า คุณลักษณะที่เหมาะสม ของหัวรับ LNB ที่พึงประสงค์สำหรับการใช้งานรับสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมในครัวเรือน เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการใช้งานคลื่นความถี่ย่าน 3500 MHz ในกิจการโทรคมนาคม มีดังนี้

Specification	Value
Input Frequency	3.7-4.2 GHz
Output Frequency	950-2150 MHz
Frequency Stability	+/- 2MHz (-40 ถึง 70 องศาเซลเซียส)
Local Leak Input	-45 dBm
Lower Frequency Slope	>400 dB/GHz
Upper Frequency Slope	< -125 dB/GHz
Conversion Gain	เป็นไปตามผู้ผลิตกำหนด
Gain Flatness	+/- 4dB
Output VSWR	2.5:1 (ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้)
Output Spurious	-60 dBm (Max)
Power Supply	13-24 v
Waveguide	WC-229
Image Rejection	45 dB (Min)
Output Connector	Type “F” Female
Input Connector	Circular W G with Horn Ring

5.3 มาตรการบรรเทาการรบกวน และเงื่อนไขในการใช้คลื่นความถี่ร่วมกัน

- 1) ผู้ให้บริการโทรคมนาคมที่มีการใช้งานสถานีฐาน 5G ย่าน 3500 MHz หรือหน่วยงานกำกับดูแลการ
ใช้งานคลื่นความถี่ควรมีการพิจารณาเกี่ยวกับการจัดสรรงบประมาณเพื่อเยียวยาหรือชดเชยผู้ได้รับ
ผลกระทบจากการใช้งานย่านความถี่ 3500 MHz (ประชาชนผู้รับสัญญาณโทรทัศน์ดาวเทียม)¹² และ
สนับสนุนการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ (Bandpass filter) หรือเปลี่ยนหัวรับ LNB เป็น LNB_F ที่มี
วงจรกรองความถี่ที่มีมาตรฐาน
- 2) ควรมีระยะเวลาในการปรับเปลี่ยนหัวรับ LNB เป็น LNB_F ในลักษณะค่อยเป็นค่อยไป ในประกาศ
ควรมีเวลาเพื่อในการติดตั้งหัวรับ LNB_F ให้กับผู้บริโภคด้วย
- 3) ควรมีการจัดทำคู่มือแนวทางปฏิบัติสำหรับการติดตั้งจานดาวเทียมและสถานีฐาน 5G กรณีมีข้อจำกัด
ของระยะห่างระหว่างสถานีฐาน 5G และจานรับดาวเทียม

¹² ต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility) รวมถึงผลกระทบและค่าชดเชยเพิ่มเติม

6 บรรณานุกรม

- 3GPP. (2021, January). 3GPP TS 38.104 version 16.6.0 Release 16. 5G NR Base Station (BS) radio transmission and reception.
- Ardavan, M. (2020). Mitigating 5G Interference Signals in the C-Band. SatMagazine. Retrieved November 1, 2021, from <http://www.satmagazine.com/story.php?number=2132459167>
- Ayre, K. (2021, February 25). Losing connections: 5G wireless technology and the potential risk for aviation. Retrieved July 8, 2021, from <https://www.blg.com/en/insights/2021/02/losing-connections-5g-wireless-technology>
- Baillion, M. and De Baudus, L. (2011, January). Radio Altimeter erroneous values. Safety first. 11, 15-18. Airbus.
- Balanis, C. A. (2016). Antenna Theory: Analysis and Design. (4th Edition). Wiley.
- Iida, T. and Wakana, H. (2003). Communications Satellite Systems. in **Encyclopedia of Physical Science and Technology**. (3rd Edition). (pp. 375-408). Academic Press.
- European Communications Office. (2017, June). Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool (SEAMCAT) Handbook. Retrieved August 1, 2021, from <https://wiki.cept.org/display/SH/SEAMCAT+Handbook>
- ICAO. (2021, March 25). Potential safety concerns regarding interference to radio altimeters. Ref. SP 74/1-21/22. Retrieved July 8, 2021, from <https://www.icao.int/MID/Documents/2021/FM%20WG2/74-1e.pdf>
- ITU-R. (2014, February). Recommendation ITU-R M.2059-0 Operational and technical characteristics and protection criteria of radio altimeters utilizing the band 4200-4400 MHz. Retrieved August 2, 2021, from <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2059-0-201402-I/en>
- Slaney, A. (2014). The Challenges of Micro-VSAT Design. SatMagazine. Retrieved November 15, 2021, from <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1101796062>
- RTCA. (2020, October 7). Assessment of C-Band Mobile Telecommunications Interference Impact on Low Range Radar Altimeter Operations. RTCA Paper No. 274-20/PMC-2073.

Roadmap for C-band spectrum in ASEAN. (2019, August). The GSMA.

<https://www.gsma.com/spectrum/resources/releasing-cband-asean>

สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย. (2564, 20 พฤษภาคม). ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการให้บริการระบบ 5G ต่อเครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นวิทยุของอากาศยาน (Radio Altimeter). เลขที่ กพท 15/3563.