

อุปกรณ์แปลงสัญญาณวิทยุวีเฮชเอฟเป็นสัญญาณวิทยุเอสแบนด์

อนิวัฒน์ ปลอดภัย¹ วินัย ศีลารวม² และ สาวัสดี บุญยะเวศ^{3*}

วันที่รับ 9 มกราคม 2566 วันที่แก้ไข 7 พฤษภาคม 2566 วันที่ตอบรับ 22 พฤษภาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แปลงความถี่ขึ้นและลงจากความถี่วีเฮชเอฟเป็นความถี่วิทยุเอสแบนด์สำหรับการใช้งานกับระบบสื่อสารกับดาวเทียมวงโคจรต่ำหรือยูเอวี อุปกรณ์แปลงความถี่ใช้สัญญาณไอเอฟเป็นความถี่มาตรฐาน 140 MHz โครงสร้างของอุปกรณ์แปลงความถี่แบ่งเป็นโมดูลโมดูลย่อยออกแบบและจำลองการทำงานเพื่อให้แต่ละระบบย่อยของอุปกรณ์แปลงความถี่มีผลการทำงานที่ดีที่สุดจากอุปกรณ์ที่จัดหาได้ สัญญาณแอลโอสร้างจากเฟสล็อกกลุ๊ป ซึ่งมีสัญญาณอ้างอิงภายใน 10 MHz เสถียรภาพสูง วงจรสร้างสัญญาณแอลโอสำหรับแปลงความถี่สามารถเฟสล็อกอย่างอัตโนมัติกับสัญญาณอ้างอิงจากภายนอกที่มีระดับสัญญาณเหมาะสม อุปกรณ์แปลงความถี่มีเฟสลอยส์ดีกว่ามาตรฐาน IESS-308/309

คำสำคัญ : เอสแบนด์, ทรานส์เวอร์เตอร์, อุปกรณ์แปลงความถี่, เฟสล็อกกลุ๊ป

¹ ศูนย์วิจัยดาวเทียมขนาดเล็กไทพัฒ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

² สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

³ สถาบันนวัตกรรมมหานคร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

* ผู้แต่ง, อีเมล: sawat@mut.ac.th

Design and Development of the VHF to S-Band Transverter

Aniwat Plodpai ¹ Vinai Silaroum ² and Sawat Bunnjaweht ^{3*}

Received 9 January 2023, Revised 7 May 2023, Accepted 22 May 2023

Abstract

This paper presents the design and construction of an S-band Up and Downconverters for LEO satellite and UAV applications. The Up & Down converters are constructed with subsystem modules. The modules are designed and built applying simulation techniques to optimize performance details using automotive grade components. The 140 MHz IF standard is used. The PLL reference clock oscillator in the converters is either locked to a highly stable internal 10 MHz reference or external reference signal. If the proper signal level is present, the LO PLL will automatically lock to the external reference. The spectral purity, low phase noise and stability of the LO signals exceed the requirements of IESS-308/309.

Keywords : S-Band, Transverter, Up & Downconverter, PLL

¹ Thaipath Small Satellite Research Centre, Mahanakorn University of Technology.

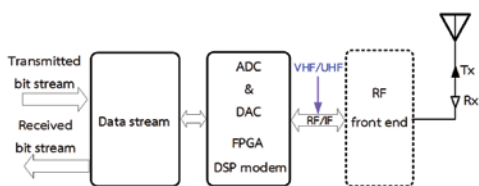
² Electrical and Electronics Institute, Mahanakorn University of Technology.

³ Mahanakorn Institute of Innovation, Mahanakorn University of Technology.

* Corresponding author: sawat@mut.ac.th

1. บทนำ

เครื่องรับส่งวิทยุแบบสมรรถนะสูง (High performance transceiver) ในปัจจุบันมักจะมีโครงสร้างเป็นแบบเอสดีอาร์ (Software-defined Radio: SDR) เอสดีอาร์ หมายถึง วิทยุ ซึ่งบางส่วนหรือทั้งหมดในชั้นกายภาพ (Physical layer: PHY) โดยใช้ซอฟต์แวร์ในระบบวิทยุเพื่อทำหน้าที่จัดการฟังก์ชันของเครื่องวิทยุ [1] เอสดีอาร์เป็นคำที่มีความมุ่งหมายถึงการจัดการรูปคลื่น (Waveform) ด้วยวงจรดิจิทัลในโดเมนสัญญาณดิจิทัล (Digital domain) ไม่เกี่ยวกับส่วนฟรอนต์เอนด์ความถี่วิทยุ (RF front end) เทคโนโลยีเอสดีอาร์ได้รับการพัฒนาและมีความก้าวหน้าอย่างมาก ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เอสดีอาร์กลายเป็นสิ่งที่มีความโดดเด่นในอุตสาหกรรม (Dominant industry standard) นับจากแทกติกัลเรดิโอ (Tactical radio) ในกิจการทหารจนถึงโทรศัพท์เซลลูลาร์ แรงผลักดันที่สำคัญของเอสดีอาร์คือเทคโนโลยีของวงจรรวมความถี่วิทยุ (RF Integrated Circuits: RFICs) และเอฟพีจีเอ (Field-programmable Gate Array: FPGA) ซึ่งเน้นฟังก์ชันดีเอสพี (Digital Signal Processing: DSP) หรือ DSP-intensive FPGAs รวมทั้งอัลกอริทึมและเทคนิคที่ใช้จนทำให้เอสดีอาร์เป็นองค์ประกอบหลักของวิทยุสมรรถนะสูงในปัจจุบัน [2] บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของวิทยุรับส่งแบบเอสดีอาร์แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ ๑ บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของวิทยุรับส่งแบบเอสดีอาร์ซึ่งอุปกรณ์แปลงความถี่ทำหน้าที่ฟรอนต์เอนด์

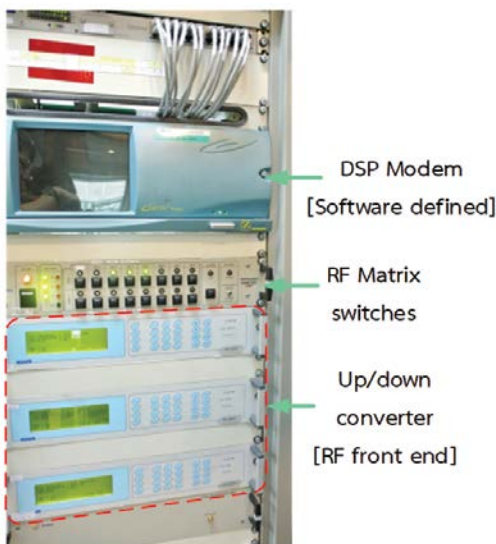
โครงสร้างของเอสดีอาร์ (เฉพาะส่วนเครื่องรับวิทยุ) อาจพิจารณาจากขั้นตอนการแปลงสัญญาณวิทยุจากวงจรส่วนหน้า (RF front end) ได้คือ (ก) ซุปเปอร์เฮเทอโรไดนา (Superheterodyne Receiver: SHR) โดยสัญญาณวิทยุจากสายอากาศถูกแปลงเป็นความถี่กลางหรือความถี่ไอเอฟ (Intermediate frequency: IF) ก่อนการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลหรือเอดีซี (Analog-to-Digital Converter: ADC) (ข) เครื่องรับวิทยุแบบแปลงความถี่โดยตรง (Direct Conversion Receiver: DCR) ซึ่งสัญญาณวิทยุถูกแปลงความถี่ลงเป็นช่องสัญญาณไอ (In-phase: I) และช่องสัญญาณควิ (Quadrature-phase: Q) ก่อนการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล และ (ค) เครื่องรับแบบสุ่มสัญญาณวิทยุโดยตรง (Direct RF Sampling: DRFS) เครื่องรับแบบนี้เป็นการแปลงสัญญาณวิทยุเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยตรง ซึ่งต้องใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีสมรรถนะสูงมากและใช้กำลังพลังงานมาก โครงสร้างเอสดีอาร์แบบ (ข) ถือเป็นโครงสร้างมาตรฐานของอาร์เอฟไอซี ซึ่งใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และระบบวายฟาย (Wi-Fi) ในปัจจุบัน ในขณะที่โครงสร้างเอสดีอาร์แบบ (ก) ใช้งานในระบบสื่อสารของดาวเทียม ไม่ว่าจะเป็นบนตัวดาวเทียม (On-board transceiver) หรือในสถานีภาคพื้นดิน (Ground station) ระบบถ่ายทอดสัญญาณของโดรน และแทกติกัลเรดิโอ เป็นต้น

บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 เป็นโครงสร้างที่ใช้กันแพร่หลายในระบบสื่อสารของระบบสื่อสารของดาวเทียมและยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ซึ่งมีวงจรส่วนหน้าเป็นอุปกรณ์แปลงความถี่ อุปกรณ์แปลงความถี่ของระบบสื่อสารดาวเทียมและยูเอวี ซึ่งมีอัตราบิตในช่วงไม่เกิน 10-20 Mbps

ใช้สัญญาณไอเอฟ 70 หรือ 140 MHz ซึ่งมีระบบประมวลสัญญาณดิจิทัลหรือดีเอสพีเป็นส่วนจัดการสัญญาณไอเอฟ (มอดูเลเตอร์/ดีมอดูเลเตอร์ หรือ โมเด็ม) โดยทั่วไปเรียกระบบทั้งหมดว่าเอสดีอาร์

ลักษณะของเอสดีอาร์อาจมีได้ตั้งแต่เป็นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์แผ่นเล็ก ๆ แผ่นเดียวจนถึงขนาดใหญ่ที่ติดตั้งในตู้แร็คมาตรฐาน รูปที่ 2 เป็นตัวอย่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณวิทยุย่านเอสแบนด์ในสถานีภาคพื้นดินของระบบสื่อสารดาวเทียมวงโคจรต่ำย่านเอสแบนด์

โครงการวิจัยนี้เป็นการสร้างต้นแบบอุปกรณ์แปลงความถี่ขึ้นและลง (มีฟังก์ชันการทำงานแบบอุปกรณ์ดังแสดงในกรอบเส้นประของรูปที่ 1 และรูปที่ 2) เพื่อมอดูเลตหรือดีมอดูเลตสัญญาณวิทยุด้วยดีเอสพีโมเด็ม



รูปที่ ๒ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณวิทยุย่านเอสแบนด์ในสถานีภาคพื้นดินของระบบสื่อสารดาวเทียมวงโคจรต่ำย่านเอสแบนด์

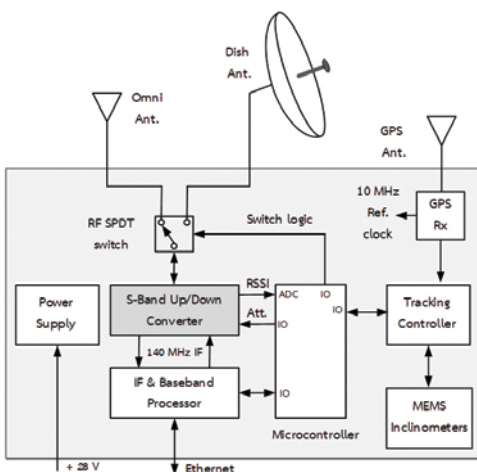
2. อุปกรณ์แปลงความถี่ (Up/down converter)

งานวิจัยเป็นการสร้างอุปกรณ์แปลงสัญญาณวิทยุไอเอฟ-ยูเอชเอฟเป็นสัญญาณวิทยุเอสแบนด์ อุปกรณ์แปลงความถี่มีลักษณะเป็นทรานส์เวอร์เตอร์ (Transverter) มีฟังก์ชันการแปลงสัญญาณวิทยุ ทั้งการแปลงความถี่ขึ้นและแปลงความถี่ลง มีสัญญาณอินพุต/เอาต์พุตความถี่ไอเอฟมาตรฐาน 140 MHz ในระบบส่งสัญญาณ 50 Ω การแปลงความถี่ขาขึ้นและขาลงเป็นการแปลงความถี่ไอเอฟเป็นความถี่ไมโครเวฟย่าน 2100 ถึง 2300 MHz อุปกรณ์แปลงความถี่นี้สามารถทำงานเป็นวงจรส่วนหน้าหรืออาร์เอฟพรอนต์เอ็นด์ของอุปกรณ์เอสดีอาร์ ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 สามารถใช้งานเป็นอุปกรณ์แปลงความถี่ของสถานีภาคพื้นดินของระบบสื่อสารสำหรับดาวเทียมวงโคจรต่ำในแบบรูปที่ 2 ได้ และเมื่อเลือกใช้อุปกรณ์ในส่วนที่จำเป็นบนพื้นฐานข้อจำกัดเรื่องน้ำหนัก (Mass budget) และกำลังงาน (Power budget) ก็สามารถใช้งานกับระบบดาวต่ำลิงก์ (Data link) ของยูเอวี

2.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์

อุปกรณ์แปลงความถี่ ซึ่งออกแบบพัฒนาขึ้น มีวัตถุประสงค์หลักในการใช้งานกับเครื่องรับส่งสัญญาณวิทยุแบบเคลื่อนที่ (ดาวเทียมวงโคจรต่ำหรือยูเอวี) เพื่อแปลงสัญญาณวิทยุจากสายอากาศรับสัญญาณเป็นความถี่อินพุต (ความถี่ไอเอฟ) ของระบบประมวลสัญญาณดิจิทัลในเอสดีอาร์และแปลงสัญญาณเอาต์พุตจากระบบประมวลสัญญาณดิจิทัลในเอสดีอาร์ไปเป็นสัญญาณวิทยุอินพุตของวงจรขยายกำลัง (RF power amplifier) ซึ่งต่ออยู่กับระบบสายอากาศส่งสัญญาณ อุปกรณ์แปลงความถี่

ต้องมีพิสัยพลวัต (Dynamic range) เพียงพอที่จะทำงานกับแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้ขนาดสัญญาณวิทยุเปลี่ยนแปลงมาก เช่น กรณีดาวเทียมอยู่ที่ตำแหน่งพื้นขอบฟ้าเทียบกับตำแหน่ง 90 องศา หรือเมื่ออยู่เอวอยู่ที่ระยะทำการไกลสุดเทียบกับตำแหน่งบินขึ้นจากสนามบินปล่อย ทั้งสองกรณีดังกล่าวอุปกรณ์แปลงความถี่ต้องสามารถแสดงความเข้มของสัญญาณวิทยุ (Signal strength) เพื่อควบคุมขนาดสัญญาณวิทยุมิให้เกิดการโอเวอร์โหลดกับวงจร สัญญาณอาร์เอสเอสไอ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) จากอุปกรณ์แปลงความถี่ใช้สำหรับ (ก) ปรับอัตราการลดทอนของอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณวิทยุให้เหมาะสมดังที่กล่าวแล้ว (ข) ใช้เป็นสัญญาณเพื่อประกอบการติดตาม (Tracking) ดาวเทียมหรืออยู่เอว และ (ค) เพื่อตัดสินใจเลือกใช้สายอากาศที่สถานีฐานของระบบควบคุมอยู่เอวให้เป็นแบบรอบทิศทางอัตราขยายต่ำเมื่ออยู่เอวอยู่ใกล้สถานีฐาน หรือเลือกสายอากาศแบบมีทิศทางอัตราขยายสูงเมื่ออยู่เอวอยู่ไกลจากสถานีฐาน ดังแสดงดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3



รูปที่ ๓ สถานีฐานของระบบอยู่เอว

อุปกรณ์แปลงความถี่ทำงานได้ด้วยสัญญาณนาฬิกาในตัวเอง (Internal clock signal) ภายในอุปกรณ์แปลงความถี่ ซึ่งสร้างจากคริสตัลอสซิลเลเตอร์ควบคุมอุณหภูมิคงที่ (Oven-controlled Crystal Oscillators: OCXO) และสามารถซิงโครไนซ์เฟส (phase locked) กับสัญญาณนาฬิกา 10 MHz ซึ่งมาจากสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับจีพีเอส (GPS disciplined clock) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นของระบบสื่อสารดาวเทียมวงโคจรต่ำและระบบสื่อสารแบบทีดีดี (Time Division Duplexing: TDD)

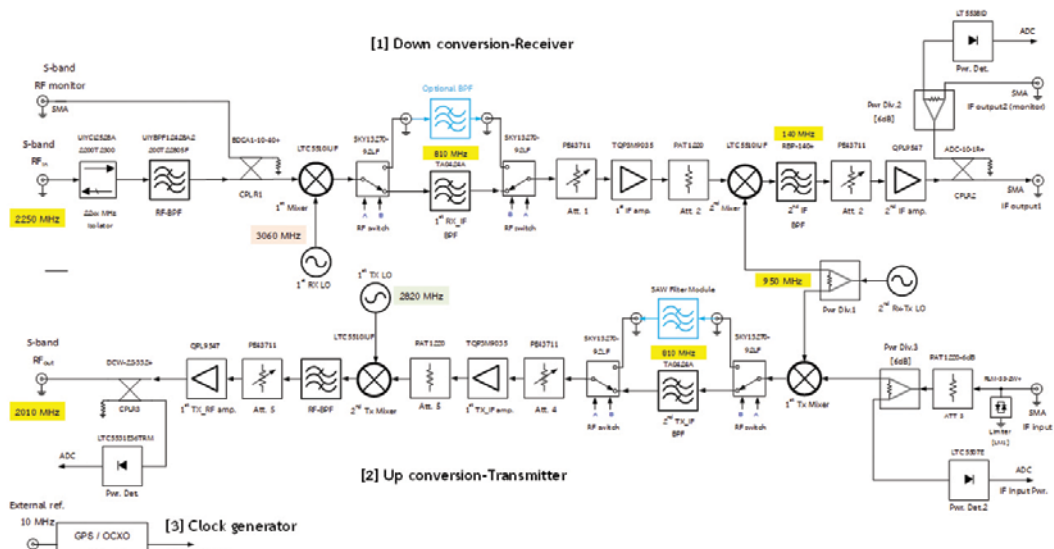
การอินเทอร์เฟซสัญญาณวิทยุเป็นอิมพีแดนซ์ระบบ 50 Ω ขั้วอินพุต/เอาต์พุตสามารถทนต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตแบบ HBM (Human body model) class 1B และขั้วอินพุตของอุปกรณ์แปลงความถี่ขึ้นสามารถทนทานต่อการป้อนสัญญาณอินพุตขนาดใหญ่ได้ไม่น้อยกว่า 30 dBm (1 วัตต์) โดยไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหาย

อุปกรณ์แปลงความถี่มีวงจรสร้างสัญญาณแอลโอ (Local oscillator) จำนวน 3 ชุด โดย 2 ชุดสำหรับผลิตสัญญาณแอลโอเพื่อแปลงความถี่ลงเป็นความถี่ไอเอฟครั้งที่ 1 (810 MHz) สำหรับภาครับสัญญาณ และแปลงความถี่ขึ้นครั้งที่ 2 สำหรับภาคส่งสัญญาณ วงจรสร้างสัญญาณแอลโอ ชุดที่ 3 สำหรับแปลงความถี่ไอเอฟที่ 1 (ภาครับ) เป็นลงเป็นไอเอฟที่ 2 ความถี่ 140 MHz และแปลงความถี่ไอเอฟที่ 1 (ภาคส่ง) ขึ้นเป็นความถี่ไอเอฟที่ 2 ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 4 วงจรสังเคราะห์ความถี่สำหรับสร้างสัญญาณแอลโอของงานวิจัยต้องการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน IESS-308 Rev.11 (Intelsat earth station standards: IESS) [3]

ตัวกรองผ่านแถบความถี่ไอเอฟของภาครับและภาคส่งสามารถเลือกติดตั้ง (install) ตัวกรองซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่สอดคล้องกับมอดูเลชันแบนด์วิดท์

ของสัญญาณวิทยุ (เช่นเลือกใช้ตัวกรองแบนด์วิดท์ 14 MHz สำหรับการรับสัญญาณจีเอ็มเอสเค ซึ่งมีอัตราบิต 10 Mbps เป็นต้น) แบนด์วิดท์ของ

ตัวกรองไอเอฟมีผลโดยตรงต่อออสฟลอร์ของระบบรับสัญญาณ



รูปที่ ๔ บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์แปลงความถี่

การควบคุมขนาดสัญญาณของอุปกรณ์แปลงความถี่ทำโดยวงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ปรับอัตราการลดทอนแบบดิจิทัลขั้นละ 0.5 dB มีอัตราการลดทอนรวม (สูงสุด) 60 dB

ในฝั่งการรับสัญญาณ อุปกรณ์แปลงความถี่มอนิเตอร์ขนาดสัญญาณวิทยุจากระบบฟรอนต์เอ็นด้วยตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง (Directional coupler) มีอัตราการเชื่อมต่อ 10 dB ที่ตำแหน่งอินพุตของสัญญาณอาร์เอฟ และ 16 dB ที่ตำแหน่งเอาต์พุตของสัญญาณไอเอฟ

ภาคส่งสัญญาณของอุปกรณ์แปลงความถี่มอนิเตอร์ขนาดอินพุตของสัญญาณไอเอฟวิทยุด้วยตัวแบ่งกำลัง (Power splitter) และที่สัญญาณเอาต์พุตด้วยตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางแล้วเปลี่ยนเป็นแรงดันดิจิตัลด้วยวงจรตรวจจับสัญญาณ (RF detector) แรงดันดิจิตัลดังกล่าวใช้เพื่อควบคุมขนาดสัญญาณ

วิทยุขาขึ้นผ่านอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณเพื่อป้องกันการทำงานเกินกำลังของวงจรขยายกำลัง (Power amplifier) ของระบบส่งสัญญาณ

อุปกรณ์แปลงความถี่มีอัตราขยายจากการแปลงผัน (Conversion gain) ด้านรับสัญญาณอย่างน้อย 40 dB และจ่ายสัญญาณเอาต์พุตได้ 10 dBm ฝั่งแปลงความถี่ขึ้น อุปกรณ์แปลงความถี่มีอัตราขยายจากการแปลงผัน 3 dB และจ่ายสัญญาณเอาต์พุตได้อย่างน้อย 0 dBm

การสร้างต้นแบบอุปกรณ์แปลงความถี่ดังรายละเอียดข้างต้นมีจุดประสงค์ต้องการให้อุปกรณ์ต้นแบบใช้งานเป็นอาร์เอฟฟรอนต์เอ็นสำหรับสถานีฐานของระบบสื่อสารดาวเทียมวงโคจรต่ำหรือยูเอวีแอมเอสแบนด์ โดยมุ่งหวังให้เครื่องรับมีคุณสมบัติชั้นกลาง (Mid-tier) [4] เป็นอย่างน้อย

3. การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์แปลงความถี่

การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์แปลงความถี่ไม่ใช่เป็นการวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในทางทฤษฎี แต่เป็นด้านตรงกันข้าม คือการนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์สร้างเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ขึ้นเพื่อให้ใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตาม ความรู้ทางทฤษฎีดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะทำงานวิจัยให้ลุล่วงไปได้ด้วยทรัพยากรที่จำกัดและการขาดองค์ความรู้ ทางสะดวกของการวิจัยในสภาพแวดล้อมเช่นนี้คือการศึกษาจากอุปกรณ์จริง ศึกษาจากเอกสารทางเทคนิค (เช่น service manual) [5]-[6] ของอุปกรณ์จริง (อาจหาได้ยากเนื่องจากเป็นข้อมูลปิด) ศึกษาจากเอกสารสิทธิบัตรของอุปกรณ์ที่ใช้จริง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติไม่สามารถสร้างหรือเลียนแบบอุปกรณ์ที่นำมาศึกษาได้โดยตรง จากการศึกษาอุปกรณ์แปลงความถี่ ซึ่งมีคุณสมบัติตามหัวข้อ 2.1 พบว่า ไม่ใช่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นจำนวนมาก (Mass production) แต่เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นจากระบบย่อย (System integration) จากผู้ผลิตหลายราย ทำให้ไม่สามารถสร้างเลียนแบบขึ้นใหม่ได้โดยง่าย เนื่องจากเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ล้ำสมัยเร็ว อุปกรณ์แปลงความถี่ที่ผลิตจำหน่ายปีนี้อาจใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นเทคโนโลยีเมื่อ 5 ปีที่แล้ว และระบบย่อยที่ใช้อาจล้ำสมัยจนอุปกรณ์ที่ใช้เลิกผลิตไปแล้ว

งานวิจัยต้นแบบอุปกรณ์แปลงความถี่สร้างระบบย่อยแต่ละส่วนโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หาได้จากตัวแทนจำหน่าย [7]-[8] โดยมีรายละเอียดการออกแบบคือ

3.1 โครงสร้างและวงจรของอุปกรณ์แปลงความถี่

พรอนต์เอ็นภาครับสัญญาณวิทยุประกอบด้วย ไอโซเลเตอร์ (Isolator) ย่านความถี่เอสแบนด์ UIYCI2528A2200T2300 และตัวกรองผ่านแถบโพรงคลื่น (Cavity band pass filter) UIYBPF12428 A2200T2280SF ทำหน้าที่เลือกแถบความถี่สัญญาณภาครับ (Band-selection Filters: BSF) ในช่วง 2200-2280 MHz โดยสามารถเลือกติดตั้งไอโซเลเตอร์และตัวกรองผ่านแถบให้มีผลตอบสนองสอดคล้องกับย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานได้โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์แปลงความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง การมอนิเตอร์สัญญาณอินพุตทำผ่านตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางชนิดแอลทีซีซี (Low temperature co-fired ceramics: LTCC)

การเลือกใช้วงจรมิกเซอร์พิจารณาจาก (ก) ระดับสัญญาณอาร์เอฟอินพุต (ข) กำลังขับของสัญญาณแอลโอมิกเซอร์ ซึ่งสามารถรับกำลังอินพุตได้สูงเป็นสวิตชิงมิกเซอร์แบบไดโอดหรือทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า มิกเซอร์แบบไดโอดบางแบบใช้งานกับสัญญาณอินพุตได้สูงถึง 24 dBm (250 มิลลิวัตต์) [9] แต่ต้องใช้กำลังขับจากสัญญาณแอลโอสูงถึง 27 dBm (500 มิลลิวัตต์) เช่นกัน ซึ่งไม่สะดวกกับการใช้งานในยูเอวี (นอกจากนี้วงจรมิกเซอร์แบบไดโอดจะมีคุณสมบัติที่สุดต้องทำงานร่วมกับตัวกรองที่ไม่สะท้อนคลื่น (reflection-less filters) อุปกรณ์แปลงความถี่ในงานวิจัยใช้วงจรมิกเซอร์ LTC5510 ซึ่งเป็นตัวคูณกิลเบิร์ตที่ใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ [10] ซึ่งไม่มีข้อจำกัดเรื่องคลื่นสะท้อนและใช้กำลังขับจากสัญญาณแอลโอต่ำ (0 dBm หรือ 1 มิลลิวัตต์) วงจรมิกเซอร์ใช้สัญญาณแอลโอแบบป้อนด้านสูง (high side injection)

ตัวกรองผ่านแถบสำหรับเลือกสัญญาณ ไอเอฟเป็นตัวกรองผ่านแถบแบบคลื่นอะคูสติกผิว (Surface acoustic wave: SAW) TA0424A มีความถี่กลาง 810 MHz แบนด์วิดท์ 14 MHz ตัวกรองไอเอฟเลือกติดตั้งได้ 2 ชุด การเลือกใช้งานตัวกรองทำโดยอาร์เอฟสวิตช์

อาร์เอฟสวิตช์สำหรับเลือกตัวกรองเป็นวงจรรวม SKY13270-92LF ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบพีเซม (Pseudomorphic High-electron-mobility Transistor: pHEMT)

ตัวลดทอนสัญญาณแบบโปรแกรมได้เป็นวงจรรวม PE43711 ซึ่งใช้เทคโนโลยีซีมอส (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor: CMOS) ซึ่งสามารถโปรแกรมการลดทอนได้ขึ้นลง 0.25 dB ได้ทั้งการควบคุมแบบอนุกรมและขนาน ตัวลดทอนสัญญาณมี 2 ชุด มีพิสัยควบคุมขนาดสัญญาณได้รวม 63.5 dB ทั้งด้านแปลงความถี่ลงและแปลงความถี่ขึ้น

วงจรรขยายสัญญาณไอเอฟทั้งฝั่งแปลงความถี่ลงและแปลงความถี่ขึ้นใช้วงจรรวม TQP3M9035 และ QPL9547 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบอีพีเซม (Enhancement Mode Pseudomorphic High-electron-mobility Transistor: E-pHEMT) วงจรรขยายสัญญาณมีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) ต่ำมาก (ต่ำกว่า 0.65 dB) และมีระดับกำลังงานสัญญาณวิทยุอิมพัลส์เบี่ยงเบน 1 dB (P1dB) มากกว่า 100 มิลลิวัตต์

ในส่วนแปลงความถี่ขึ้นการแปลงสัญญาณวิทยุที่แบ่งมอดูเลเตอร์ให้เป็นแรงดันดีซีทำโดยวงจรถูกเตอร์สัญญาณวิทยุด้วยขอตต์กีไดโอด (Schottky diode RF detector) แบบวงจรรวม LTC5507, LTC5531

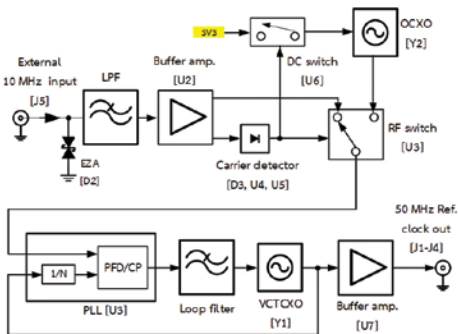
สำหรับภาคแปลงความถี่ลงอาศัยการแปลงสัญญาณวิทยุเป็นแรงดันดีซีด้วยวงจรรวมดีเทคเตอร์สัญญาณวิทยุแบบล็อก (Logarithmic RF power detector) LT5538 ซึ่งมีพิสัยพลวัตสูง (75 dB)

อุปกรณ์แปลงความถี่มีวงจรกำเนิดสัญญาณแอลโอ 3 ชุด ประกอบด้วย 1 ชุด สำหรับแปลงสัญญาณวิทยุภาครับให้เป็นสัญญาณไอเอฟที่ 1 เช่น ถ้ารับสัญญาณความถี่ 2250 MHz วงจรกำเนิดสัญญาณแอลโอที่ 1 ทำงานที่ความถี่ 3060 MHz เพื่อแปลงสัญญาณอินพุตตาลงเป็นความถี่ไอเอฟที่ 1 (810 MHz) โดยมีวงจรสร้างสัญญาณแอลโอที่ 2 ทำงานที่ความถี่ 950 MHz เพื่อแปลงสัญญาณอินพุตตาลงเป็นความถี่ไอเอฟที่ 2 (140 MHz) ในส่วนการแปลงความถี่ขึ้น สัญญาณไอเอฟที่ 2 (140 MHz) ถูกแปลงความถี่ขึ้นเป็น 810 MHz ด้วยสัญญาณแอลโอที่ 2 ชุดเดียวกับการแปลงความถี่ลง จากนั้นจะแปลงเป็นความถี่ขาขึ้น 2010 MHz ด้วยวงจรสร้างสัญญาณแอลโอชุดที่ 3 ความถี่ 2820 MHz วงจรสร้างสัญญาณแอลโอทั้ง 3 ชุด ออกแบบและสร้างขึ้นจากวงจรรวม HMC829LP6GE ซึ่งเป็นวงจรรสังเคราะห์ความถี่แบบตัวหาร N เป็นเลขทศนิยม (Fractional-N phase-locked loop frequency synthesizer) โดยมีความถี่อ้างอิง 50 MHz วงจรรวม HMC829LP6GE มีเฟสจอยส์ต่ำมากและทำให้วงจรแปลงความถี่มีคุณลักษณะเฟสจอยส์ (Phase noise profile) ดีกว่าข้อกำหนดของ IESS-308

3.2 วงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง

สัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณนาฬิกาสำหรับสร้างสัญญาณแอลโอในอุปกรณ์แปลงความถี่ทำงานได้ด้วยตัวเอง (Standalone) โดยอาศัยออสซิลเลเตอร์แบบ VCTCXO (Voltage controlled temperature

compensated crystal oscillators) ซึ่งผลิตความถี่ทำงานอิสระ (Free-running frequency) เท่ากับ 50 MHz [11] โดยมีเสถียรภาพของความถี่เท่ากับ ± 0.28 ppm และสามารถชดเชยไครโนสเฟส/ความถี่กับสัญญาณนาฬิกาภายนอกจากระบบจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) ได้ด้วยระบบเฟสล็อกกลูป ขณะทำงานด้วยตัวเองวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาใช้สัญญาณอ้างอิงที่มาจากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบคริสตัลควบคุมอุณหภูมิด้วยเตาอบ (Oven controlled crystal oscillator: OCXO) ความถี่ 10 MHz (Y2) ซึ่งมีเสถียรภาพของความถี่เท่ากับ ± 100 ppb [12] เมื่อใช้สัญญาณอ้างอิง 10 MHz จากระบบจีเอ็นเอสเอส โอซีเอกซ์โอจะถูกปลดออกจากวงจรโดยอัตโนมัติเพื่อประหยัดพลังงาน บล็อกไดอะแกรมของวงจรสร้างสัญญาณอ้างอิงแสดงในรูปที่ 5

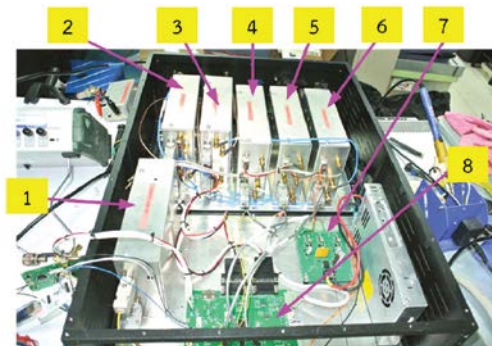


รูปที่ ๕ บล็อกไดอะแกรมของวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

3.3 อุปกรณ์แปลงความถี่ต้นแบบ

ระบบย่อย (Subsystem) แต่ละส่วนของอุปกรณ์แปลงความถี่ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4 สร้างขึ้นในแบบโมดูลย่อยบนแผ่นวงจรแบบ FR-4 แบบ 2 และ 4 ชั้น และใช้อุปกรณ์พาสซีฟตามมาตรฐาน AEC-Q200 การทำงานของอุปกรณ์แปลง

ความถี่ควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ATMEGA2560-16AU อุปกรณ์แปลงความถี่หรือทรานส์เวอร์เตอร์ต้นแบบแสดงในรูปที่ 6



- (1) Reference clock (2) Down-converter
(3) Up-converter (4) Tx local oscillator
(5) Rx local oscillator (6) IF2 local oscillator
(7) DC-to-DC converter (8) Microcontroller

รูปที่ ๖ อุปกรณ์แปลงความถี่ต้นแบบ

ตัวอย่างระบบย่อยของอุปกรณ์แปลงความถี่ซึ่งออกแบบและสร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์แปลงความถี่ลงหมายเลข (2) ของรูปที่ 6 แสดงในรูปที่ 7

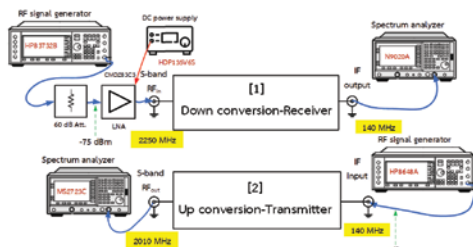


รูปที่ ๗ วงจรแปลงความถี่ลงย่านเอสแบนด์เป็นวีเอชเอฟต้นแบบ

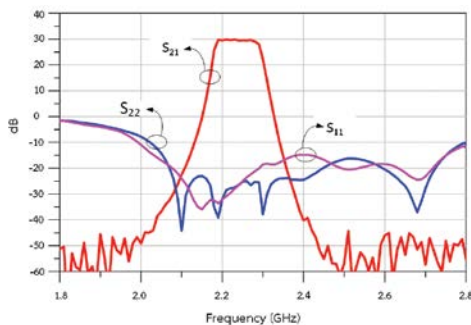
3.4 การทดสอบอุปกรณ์แปลงความถี่ต้นแบบ

การทดสอบอุปกรณ์แปลงความถี่ต้นแบบทำตามเอกสาร [13]-[14] โดยวิธีการทดสอบแสดง

เป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 8 การทดสอบคุณสมบัติของวงจรแปลงความถี่ลงทำโดยกำหนดค่าเริ่มต้นการลดทอนสัญญาณเป็น 10 dB ฟังخالลงป้อนสัญญาณอินพุต -75 dBm ผ่านวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ ซึ่งต่อเรียงกับวงจรกรองผ่านแถบแบบโพรงคลื่น (cavity filter) ซึ่งผลตอบสนองความถี่ของวงจรแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ ๘ บล็อกไดอะแกรมการทดสอบอุปกรณ์แปลงความถี่



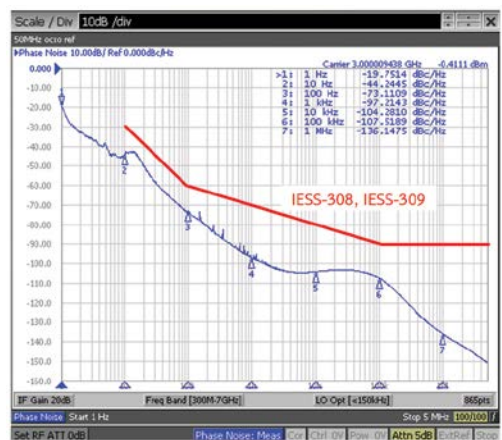
รูปที่ ๙ ผลตอบสนองความถี่ของพอร์นดเอ็นของอุปกรณ์แปลงความถี่

วงจรสังเคราะห์ความถี่สำหรับสร้างสัญญาณแอลโอที่ 1 มีคุณสมบัติของเฟสnoiseดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IESS-308/309

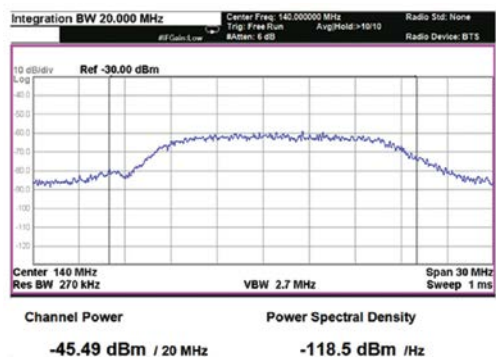
อุปกรณ์แปลงความถี่ลงมีอัตราขยายจากการแปลงผัน (Conversion gain: Gc) 56.3 dB และด้านแปลงความถี่ขึ้นมีอัตราขยายจากการแปลงผัน 9 dB นอยส์ฟลอร์ (noise floor) ในช่องสัญญาณอย่างง่ายอาจคำนวณได้จากสมการ

$$P_n(\text{dBm}) = -174 + NF_{LNA}(\text{dB}) + 10\log(BW) + G_c(\text{dB}) \quad (1)$$

ทั้งนี้ เนื่องจาก LNA มีอัตราขยายสูง (มากกว่า 30 dB) และมีตัวเลขนสัญญาณรบกวนต่ำ (0.55 dB) ในย่านความถี่รับสัญญาณ เมื่อกำหนดให้แบนด์วิดท์ (BW) ซึ่งต้องการวัดกำลังสัญญาณรบกวนมีความกว้าง 20 MHz อุปกรณ์แปลงความถี่ลงมีกำลังสัญญาณรบกวน -44.12 dBm การทดลองวัดกำลังในช่องสัญญาณ (channel power) ขณะไม่มีสัญญาณอินพุตแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ ๑๐ เฟสnoiseแบบแถบความถี่ด้านเดียว (single sideband phase noise) ของสัญญาณแอลโอที่ 1



รูปที่ ๑๑ ระดับสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ

4. อภิปรายและสรุป

งานวิจัยต้นแบบอุปกรณ์แปลงสัญญาณวิทยุวีเอชเอฟ-ยูเอชเอฟเป็นสัญญาณวิทยุเอสแบนด์หรืองานวิจัยในลักษณะนี้เป็นงานที่ต้องใช้ความรู้ความชำนาญหลายสาขา (multidisciplinary) และมีเครื่องมือวัดและทดสอบราคาสูงหลายอย่าง (เช่น อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณดิจิทัลมอดูเลชันที่สามารถทดสอบอัตราผิดพลาดบิต หรืออุปกรณ์เลียนแบบช่องสัญญาณสื่อสาร) ถึงจะทำให้อุปกรณ์แปลงความถี่ที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติด้านโปรแกรมหรือเฟิร์มแวร์ (Firmware) ทดเทียมอุปกรณ์ที่จำหน่ายในตลาด ซึ่งทีมวิจัยขาดองค์ประกอบในส่วนพัฒนาซอฟต์แวร์และส่วนการอินเทอร์เฟซกับผู้ใช้ผ่านระบบอินเทอร์เนต อุปกรณ์แปลงความถี่ต้องการเฟิร์มแวร์ที่สอดคล้องกับการใช้งานและสามารถปรับตัวได้ และยังต้องการโครงสร้างของกล่องอุปกรณ์ที่ประกอบทางกลที่เหมาะสม สามารถป้องกันการรบกวนเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ที่จะใช้งานเช่นกัน กล่องบรรจุวงจรสังเคราะห์ความถี่ต้องรับการสั่นสะเทือนทางกลได้โดยไม่มีผลทำให้เฟสของสัญญาณเปลี่ยนแปลง หรือถ้ากล่องบรรจุวงจรมิกเซอร์สามารถลดทอนสัญญาณวิทยุได้สูง ก็จะสามารถใช้อุปกรณ์ไดโอดมิกเซอร์ที่พิสัยพลวัตสูง แต่มีอัตราการแยกระหว่างพอร์ต (RF-LO port isolation) ไม่มากได้ หรืออุปกรณ์ที่ใช้งานบนยูเอวีต้องมีน้ำหนักน้อย มิกเซอร์แบบไดโอดอาจไม่เหมาะสม เป็นต้น

4.1 บทเรียน (Lessons learned)

จากประสบการณ์วิจัยที่ผ่านมา ทีมวิจัยพบว่าการเรียนรู้สาเหตุของปัญหา (Root cause) ที่เกิดมีค่ามากกว่าผลสำเร็จ เนื่องจากผลสำเร็จมาจาก

องค์ความรู้ที่มี ส่วนปัญหามาจากความรู้หรือประสบการณ์ที่ขาด บทเรียนที่ได้จากการวิจัยคือ (ก) สัญญาณรบกวนเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญควรวางแผนไว้ล่วงหน้า วงจรดีเทคเตอร์สำหรับตรวจวัดสัญญาณวิทยุทำงานได้ดีเมื่อทดสอบแยกส่วน (Unit test) แต่มีปัญหาใช้งานไม่ได้ดีเมื่อส่งพารามิเตอร์ออกนอกกระบบย่อย เนื่องจากต้องเผชิญสัญญาณสวิตชิงนอยส์ขนาดใหญ่จากวงจรดิจิทัลและวงจรจ่ายกำลัง การแก้ปัญหาอาจเป็นการใช้วงจรรวมดีเทคเตอร์ ซึ่งมีวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายใน เช่น LTC5587 [15] และส่งสัญญาณในแบบดิจิทัลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงแทนการส่งสัญญาณแอนะล็อกขนาดเล็กไปยังตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ (ข) ในช่วง 4 ปีที่ผ่านมา ปัญหาห่วงโซ่อุปทานเป็นปัญหาใหญ่ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การบริหารความเสี่ยงจากการขาดสต็อกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นสิ่งจำเป็น อาจต้องจัดหาอุปกรณ์ไว้ล่วงหน้าก่อนการผลิต ในงานวิจัยนี้ทีมวิจัยต้องออกแบบและสร้างต้นแบบวงจรมิกเซอร์ใหม่หลังจากวงจรเดิม ซึ่งได้ทดสอบ (Unit test) ไปแล้ว ผู้แทนจำหน่ายไม่สามารถส่งอุปกรณ์ได้เมื่อจะผลิตต้นแบบ

4.2 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

ผู้วิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ประการแรก ถ้าพิจารณาว่าผลิตขึ้นเพื่อทดแทนการนำเข้า เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 อุปกรณ์แปลงความถี่ขึ้น 1 ชุดแปลงความถี่ลง 2 ชุด (สำหรับรับสัญญาณจากสายอากาศแบบคลื่นหมุนวนซ้าย 1 ชุด คลื่นหมุนวนขวา 1 ชุด) ราคาชุดละประมาณหนึ่งล้านแปดแสนบาท โดยไม่รวมอุปกรณ์สำรองที่ต้องเตรียมไว้สนับสนุนอุปกรณ์หลักที่อาจขัดข้อง เนื่องจากการซ่อมบำรุงต้องทำโดยการส่งกลับไปให้ผู้ผลิตต่างประเทศ ประการที่สอง

งานวิจัยสร้างประสบการณ์และองค์ความรู้ในด้านการออกแบบและสร้างวงจรและอุปกรณ์ไมโครเวฟซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารหลายประเภท

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ซึ่งสนับสนุนทุนวิจัย งานวิจัยอุปกรณ์แปลงสัญญาณวิทยุเฮซเอพ-ยูเฮซเอพเป็นสัญญาณวิทยุเอสแบนด์ โดยได้รับการสนับสนุนโครงการวิจัยตามสัญญาเลขที่ 630201

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. F. Collins, R. Getz, D. Pu and A. M. Wyglinski, in *Software-Defined Radio for Engineers*. Boston, MA, USA: Artech House, 2018, pp. 3 - 4.
- [2] U. L. Rohde, J. C. Whitaker and H. Zahnd, in *Communication Receivers Principle and Design*, 4th ed, New York, USA: McGraw-Hill, 2017, pp. 13 - 23.
- [3] *Intelsat Earth Station Standards (IESS)*, Document IESS-308 (Rev.11), Mar. 10, 2005.
- [4] A. Luzzatto and M. Haridim, "Transceiver Architectures," in *Wireless Transceiver Design: Mastering the Design of Modern Wireless Equipment and Systems*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2017, ch. 2, pp. 28 - 29.
- [5] D. Balfet, J-F. Tessier, and L. Devaux, "Operating Manual for UPC 2021-2," *SMP*, Toulouse, France, OM-DRA300896-MP, Revision: 2, 2006.

- [6] *Satellite Downconverter Type VSCD/VHCH User Manual*, WORK Microwave GmbH, Holzkirchen, Germany, V160512, 2017.
- [7] Mouser Electronics. "Products." TH.MOUSER.com. <https://www.digikey.co.th/> (accessed Dec. 24, 2022).
- [8] DigiKey. "Products." DIGIKEY.co.th. <https://www.digikey.co.th/> (accessed Dec. 24, 2022).
- [9] R. Setty and D. Ji, "Triple Balanced Mixer, CU.S. Patent 6 917 796, Jul. 12, 2005.
- [10] *LTC5510: 1MHz to 6GHz Wideband High Linearity Active Mixer*, Linear Technology, Milpitas, CA, USA, 2013.
- [11] *Improved Performance TB/TVB Model Series: TCXO/VCTCXO*, Connor Winfield, Aurora, IL, USA, 2022.
- [12] *Surface Mount Oven Stabilized Oscillator DOC Series: OCXO/VCOCXO*, Connor Winfield, Aurora, IL, USA: 2021.
- [13] P. l. Lopez *et al.*, "Theos S-Band TM/TC Earth Station Down and Up Converters Test Results," Indra Espacio S.A., Madrid, Spain, THEO-IE-TRE-025, Revision: 1/1, 2006.
- [14] M. Stangl and G. Berwanger, "Test Setup Procedures for synthesized IF Up- and Downconverters (VSCU/VSCD, VCH/VHCD)," WORK Microwave GmbH, Holzkirchen, Germany, Test-procedures VSCU-VSCD_VHCU-VHCD Version: v1.0, 2017.
- [15] *LTC5587: 6GHz RMS Power Detector with Digital Output*, Linear Technology, Milpitas, CA, USA, 2010.