บทความวิจัย (Research Article)

การวัดเวลาและความถี่

Time and Frequency Measurement

ทยาทิพย์ ทองตัน*

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ*
ผู้รับผิดชอบบทความ
thayathip@nimt.or.th

Received: 22 Nov 2021
Revised: 25 Mar 2022
Accepted: 30 Apr 2022

บทคัดย่อ

มาตรวิทยาเวลาและความถี่เป็นการวัดและบ่งชี้คุณลักษณะของมาตรฐานความถี่จากอะตอม รวมไปถึงการถ่ายทอดค่าและเปรียบเทียบค่าเวลาจากนาฬิกาอะตอมที่อยู่ระยะไกลเพื่อให้ได้เวลาที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำเพื่อให้บริการประสานเวลาที่มีค่าดีกว่าระดับนาโนวินาที ระบบดาวเทียมนำทางสากลได้เข้ามามีบทบาทสำหรับการเชื่อมโยงเวลาระหว่างสถาบันมาตรวิทยาของประเทศต่าง ๆ ที่ดำเนินการวัดคาบเวลาจากนาฬิกาอะตอมและระยะเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมนำทางสากลมาที่เครื่องรับสัญญาณสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณเวลาในการประมวลผลหาคุณลักษณะและประสิทธิภาพของนาฬิการวมไปถึงการสอบย้อนกลับไปยังการบอกเวลาในระบบเวลาสากลร่วม โดยบทความนี้ได้แสดงวิธีการดำเนินการ ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณเวลา คุณลักษณะและประสิทธิภาพของมาตรฐานการวัดเวลาและความถี่ของประเทศไทย

คำสำคัญ: มาตรวิทยาเวลาและความถี่ การได้มาซึ่งเวลา UTC โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

Abstract

Time and frequency metrology rely on measuring and characterise atomic frequency standards as well as disseminate and compare distant atomic clocks to get precise and accurate time with the aim of providing synchronisations at less than the nanosecond level. Global Navigation Satellite System (GNSS) is applied to deliver time link between national metrology institutes maintaining their primary clocks by measuring time intervals of travelling signals from satellites to ground station receivers before determining characteristics and performances of atomic clocks as well as providing traceability to the Coordinated Universal Time (UTC). Their measurement results, performances and characteristics are presented in this paper.

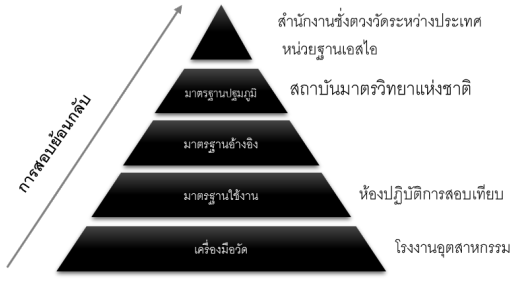
Keywords: Time and frequency metrology, UTC(NIMT) realisation

1. บทนำ

การวัดเวลาและความถี่ เป็นกระบวนการนับเพื่อบอกเวลาสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ โดยอาศัยนาฬิกาอะตอมเป็นอุปกรณ์สำหรับบอกเวลา เพื่อให้ได้เวลาที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำ สอดคล้องกับการที่โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์ในการบอกเวลาตามธรรมชาติบนโลก เช่น กลางวันและกลางคืนเป็นต้น ในอดีตมนุษย์อาศัยการวัดความนานของการวันและกลางคืนเพื่อบอกเวลาและใช้กำหนดเวลาสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ของสังคม [1]

ผลที่ได้จากการวัดทางเวลาและความถี่คือปริมาณ (quantity) ที่ต้องทราบคุณสมบัติของเครื่องมือมาตรฐาน เครื่องมือที่ใช้ในการวัด การใช้เครื่องมืออย่างถูกต้อง การวิเคราะห์ผลที่ได้จากข้อมูลที่ได้จากการวัด การแก้ไข (correction) ผลการวัดให้ถูกต้อง รวมไปถึงการหาค่าความคลาดเคลื่อน (error) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด [1]

บทความนี้เป็นการแสดงกระบวนการวัดเวลาและความถี่ เริ่มตั้งแต่มาตรฐานการวัด การสอบย้อนกลับ (traceability) ของมาตรฐานการวัดแห่งชาติและมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับระดับนานาชาติ การให้บริการค่าปริมาณเวลาเพื่อใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของประเทศ นอกเหนือไปจากการสอบเทียบเพื่อส่งเสริมโครงสร้างพื้นฐานทางด้านมาตรวิทยาให้เกิดขึ้นในประเทศ ทำให้เกิดการผลิตด้วยการวัดที่เป็นมาตรฐานเดียวกับระบบสากล เพื่อให้ได้สินค้าที่มีคุณภาพ สำหรับการแข่งขันสำหรับอุตสาหกรรมและนวัตกรรมเกิดใหม่การต่อสู้กับการกีดกันทางการค้าและการเปลี่ยนแปลงของธุรกิจ (digital transformation) ที่ต้องอาศัยการประสานเวลา (time synchronisation) ที่เที่ยงตรงและแม่นยำ โดยลำดับการสอบย้อนกลับและมาตรฐานของการวัดสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 การสอบย้อนกลับของเครื่องมือวัดไปยังหน่วยฐานเอสไอ

2. นิยามของเวลาและความถี่

เวลามีหน่วยฐานคือวินาทีในระบบหน่วยสากล โดยรู้จักกันว่าเป็นเวลาอะตอม (atomic time) จากนิยามที่ว่า วินาที (second, s) คือระยะเวลาเท่ากับ 9,192,631,770 คาบของการแผ่รังสีที่สมนัยกับการเปลี่ยนระดับไฮเปอร์ไฟน์สองระดับของอะตอมซีเซียม-133 ที่สถานะพื้น สำหรับการแกว่งที่ไม่กระจายของอะตอม โดยเป็นมติจากการประชุมใหญ่ว่าด้วยมาตราชั่งตวงวัด ครั้งที่ 13 ในปี พ.ศ. 2510 [1]

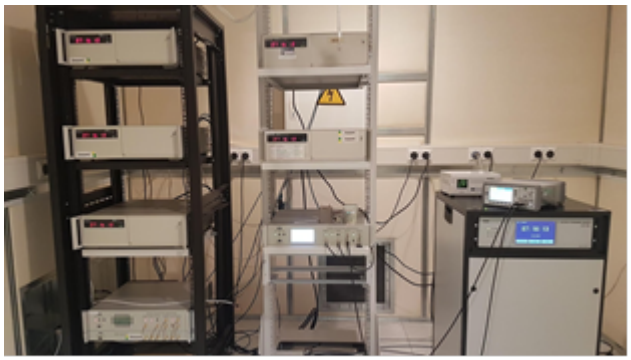
ความถี่คือจำนวนรอบของคาบการเกิดระหว่างช่วงเวลาของหนึ่งวินาที ซึ่งความถี่คือส่วนกลับของคาบและมีหน่วยเป็นหนึ่งรอบต่อวินาทีหรือคือ 1 เฮิรตซ์ (Hertz, Hz)

การนับเวลา ณ ที่ใดที่หนึ่งจะใช้เส้นเมอริเดียนที่ผ่านตำบลนั้น ๆ เป็นหลักในการนับเพื่อบอกเวลาบนโลกของแต่ละตำบล เวลาท้องถิ่นของแต่ละแห่งจะแตกต่างกันไป การอ้างอิงเวลาระหว่างประเทศจึงกำหนดให้เส้นเมอริเดียนที่ผ่านเมืองกรีนนิช (Greenwich) ประเทศอังกฤษ เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการนับเวลาและวันสากล (Universal Time, UT) ประเทศที่อยู่ทางด้านตะวันออกของเมืองกรีนนิชจะมีเวลาเร็วกว่าเวลาที่เมืองกรีนนิช ส่วนประเทศที่อยู่ทางตะวันตกของเมืองกรีนนิชก็จะมีเวลาที่ช้ากว่า [1]

เวลาสากลร่วม (Coordinated Universal Time) เป็นการผสมระบบเวลาระหว่าง เวลาอะตอมและเวลาดวงอาทิตย์สมมุติให้มีมาตราส่วนที่เข้ากันได้โดยใช้นิยามเวลาวินาทีของเวลาอะตอมเป็นความนานที่เท่ากันตลอด สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศจะทำการประมวลผลและปรับแก้ค่าเวลาโดยการบอกหรือลบเวลาสากลที่ได้แก่อัตราผิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งของขั้วโลก (polar motion) ที่ได้จากค่าเวลา UT2 การเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของการหมุนของโลกจากค่าเวลา UT1 และการแก้ไขจากเวลาสมมติ (mean solar time) จากเวลาจริง (apparent solar time) โดยเศษของเวลาจากสมการเวลาสำหรับการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่ของการหมุนของโลกจากค่าเวลา UT0 [2-3]

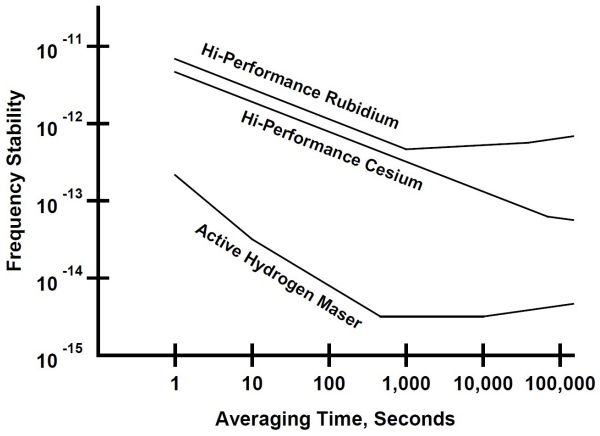
ระบบการรักษาเวลามาตรฐานสากลที่ใช้ระบบเวลาอะตอมนี้ จากนาฬิกาอะตอมที่เป็นอุปกรณ์ผลิตความถี่มาตรฐานหลักที่ควบคุมความถี่ด้วยพลังงานอะตอมจากธาตุซีเซียม (caesium frequency standard) และเครื่อง hydrogen maser frequency standard ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อใช้เป็นมาตรฐานหลักสำหรับเปรียบเทียบความถี่สำหรับเครื่องผลิตความถี่ที่ทำมาจากควอทซ์ (quartz oscillator) และนาฬิกาอะตอมรูบิเดียมต่อเพื่อเป็นมาตรฐานสำหรับนาฬิกาและออสซิเลเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้ค่าความถี่ที่ผลิตจากเครื่องผลิตความถี่ที่อยู่ในอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์และนาฬิกาสำหรับบอกเวลานั้นมีอัตราผิดที่คงที่และน้อยที่สุด มีความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ได้นานที่สุด [4]



รูปที่ 2 ระบบการรักษาเวลามาตรฐานสากลที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ [5]

รูปที่ 3 ตัวอย่างของนาฬิกาและนาฬิกาอะตอมที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดความถี่ในภาคอุตสาหกรรม



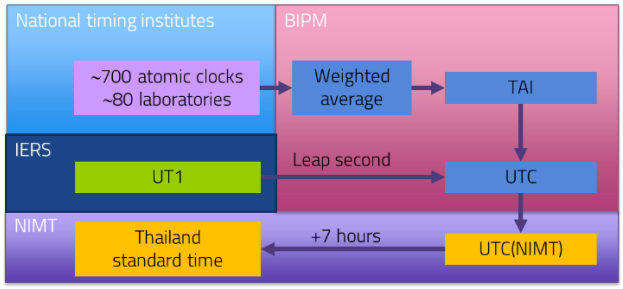
รูปที่ 4 ตัวอย่างความเสถียรด้านความถี่ของนาฬิกาอะตอมซีเซียม นาฬิกาอะตอมรูบิเดียม และเครื่อง active hydrogen maser

เครื่องผลิตความถี่ที่ทำมาจากอะตอมรูบิเดียม ซีเซียมและ active hydrogen maser นั้นมีสมรรถนะไม่เท่ากันในเรื่องของความเสถียรด้านความถี่ โดยมีค่าความเสถียรด้านความถี่เป็นดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่อง Active hydrogen maser ให้ค่าความเสถียรด้านความถี่ที่ดีที่สุด โดยมีค่าความเสถียรด้านความถี่ที่ 5×10-15 เฮิรตซ์/เฮิรตซ์ สำหรับค่าเวลาเฉลี่ยที่ 1 ชั่วโมง ส่วนนาฬิกาอะตอมซีเซียม จะมีค่าความเสถียรด้านความถี่ที่ราว 7×10-14 เฮิรตซ์/เฮิรตซ์ สำหรับค่าเวลาเฉลี่ยที่ 1 วัน [6-7]

3. การหาค่า UTC จาก GNSS และการสอบกลับได้

เวลาที่เป็นสากลและถูกต้องที่สุดที่ได้มาจากมาตรฐานแห่งชาติคือเวลา UTC โดยเวลา UTC ที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศไทยชื่อเวลา UTC(NIMT) เพื่อให้บริการเวลา UTC กับผู้ที่ต้องการใช้งานค่าความถูกต้องของเวลาที่ดีกว่า 20 นาโนวินาที [2] โดยเวลา UTC ได้มาจากการวัดสัญญาณเวลาจากนาฬิกาอะตอม จำนวนราว 700 เครื่อง ที่ตั้งอยู่จากห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ทั่วโลก จำนวนประมาณ 80 เครื่อง โดยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาอะตอมจะเทียบกับสัญญาณที่รับจาก GNSS และ/หรือ GPS แบบทางเดียวหรือเทียบสัญญาณจากระบบดาวเทียมสื่อสารโดยส่งสัญญาณค่าแก้ระหว่างห้องปฏิบัติการแบบสองทาง สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศจะดำเนินการประมวลผลข้อมูลจากนาฬิกาอะตอมและข้อมูลที่เปรียบเทียบสัญญาณจากระบบดาวเทียมเพื่อสร้างมาตรเวลาอะตอมระหว่างประเทศ (International Atomic Time, TAI) โดยการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับผลการวัดจากนาฬิกาอะตอมในแต่ละประเภท เพื่อคำนวณหาค่าเวลา UTC โดยปรับให้สอดคล้องกับเวลา UT1 ที่คำนวณจากการหมุนของโลกเทียบกับวัตถุบนท้องฟ้าในระยะไกล คือ ควาซาร์ ถ้าเวลา UT1 และเวลา UTC ต่างกันมากกว่า 0.9 วินาที จะต้องเพิ่มวินาทีทดเข้ามาในเวลา UTC โดย International Earth Rotation Services (IERS) เป็นหน่วยงานที่วัดและวิเคราะห์เวลาของการหมุนของโลก สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศจะคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างเวลา UTC และ UTC ที่วัดได้จากแต่ละห้องปฏิบัติการ พร้อมค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดที่เกิดจากค่าคลาดเคลื่อนในระบบของการวัด (Systematic error) และใน

การวัด (Measurement error) สำหรับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศไทยนั้นจะเป็นค่าเวลา UTC-UTC(NIMT) โดยเวลา UTC(NIMT) นี้ถือเป็นเวลามาตรฐานประเทศไทยและปรับให้เป็นเวลาท้องถิ่นโดยการเพิ่ม 7 ชั่วโมง ตามตำแหน่งที่ตั้งของประเทศที่อยู่ด้านตะวันออกจากเส้นเมอริเดียนที่ผ่านเมืองกรีนิช ประเทศอังกฤษนั้นเอง



รูปที่ 5 ระบบเวลาอ้างอิง TAI, UTC, UT1 และ UTC(NIMT) [1]

เวลามาตรฐานประเทศไทยได้ดำเนินการถ่ายทอดสัญญาณเวลาและความถี่มีการดำเนินการด้วยหลายวิธี เช่น การถ่ายทอดผ่านสถานีวิทยุความถี่ต่ำ (Low frequency) ที่อาศัยการกระจายสัญญาณความถี่ผ่านสถานีภาคพื้นดินที่ประสบปัญหาจากสัญญาณรบกวน

การถ่ายทอดสัญญาณเวลาและความถี่ผ่าน GNSS ทำให้สามารถใช้ถ่ายทอดสัญญาณเวลาและความถี่ได้ทั่วโลกและผู้รับสัญญาณสามารถรับสัญญาณเวลาและความถี่ที่อ้างอิงเวลากับเวลา UTC ได้ นอกจากนี้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ก็มีการใช้งานแพร่หลาย อยู่ในอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย ซึ่งมีราคาถูกและใช้งานง่าย GNSS จึงกลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการรักษาเวลาและความถี่ที่สามารถสอบกลับไปยังเวลา UTC [3-4]

ดาวเทียมนำทาง (Navigation satellite) ในระบบดาวเทียม GNSS ประกอบด้วยนาฬิกาอะตอม ที่เป็นมาอะตอมซีเซียม รูบิเดียม ไฮโดรเจนเมเซอร์ ซึ่งสามารถรักษาเวลาที่ผิดพลาดไม่เกิน 100 นาโนวินาที สัญญาณจาก GNSS ใช้ในการกำหนดตำแหน่งและเวลาที่ถูกต้องตามความต้องการบนพื้นโลกโดยอาศัยเครื่องรับสัญญาณ วิธีการรับสัญญาณและกระบวนการประมวลผล [3]

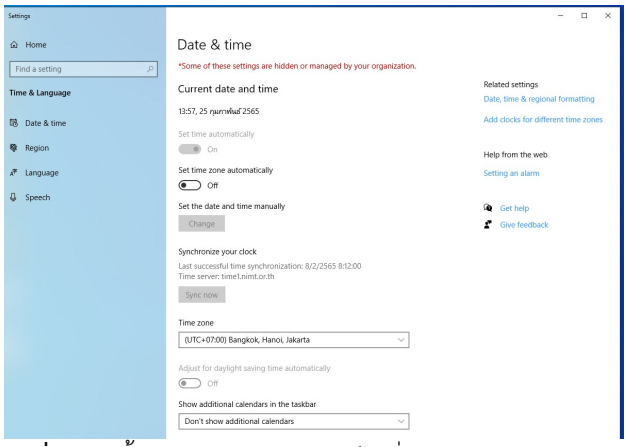
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงการอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม เป็นหน่วยงานของรัฐในภาคพลเรือน และ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ทำหน้าที่รักษาเวลามาตรฐานของประเทศไทย ตลอดจนบริการแจ้งสัญญาณเทียบเวลาให้แก่ประชาชนเพื่อให้ใช้เวลาตรงกันทั่วประเทศโดยใช้ระบบเวลาอะตอม UTC และระบบเวลาจาก GNSS สำหรับการเปรียบเทียบเวลาจากต่างประเทศเพื่อให้ได้เวลาสากลที่ทราบค่าความแตกต่างของเวลาอะตอม UTC ที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ UTC(NIMT) และเวลา UTC รวมถึงค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด ซึ่งขณะนี้ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 20 นาโนวินาที [2]

รูปที่ 6 ระบบการเปรียบเทียบสัญญาณเวลาระหว่างประเทศด้วย GNSS

การบริการเวลาเพื่อการเปรียบเทียบให้กับหน่วยงานต่าง ๆ และประชาชนทั่วไป ประกอบด้วยระบบ ดังนี้

- การให้ค่าเวลาอ้างอิง UTC(NIMT) สำหรับโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการบอกพิกัดและเวลามาตรฐานประเทศไทยด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากลในการระบุพิกัด นำทางและบอกเวลา สำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ของประเทศ ซึ่งเป็นการดำเนินงานร่วมกันระหว่าง กรมแผนที่ทหาร กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
- การส่งสัญญาณเวลาผ่านระบบอินเทอร์เน็ต โดยใช้เครื่อง Network Time Protocol (NTP) server โดยผู้ที่ต้องการเทียบเวลาสามารถเทียบเวลาให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ server ของหน่วยงาน โดยเครื่อง server นั้นทำหน้าที่เป็น NTP client โดยไม่ต้องติดตั้ง NTP server ขององค์กรเป็นของตัวเอง โดย NTP time server ของกรมอุทกศาสตร์ คือ time.navy.mi.th และ time2.navy.mi.th และของสถาบัน

มาตรวิทยาแห่งชาติ คือ time1.nimt.or.th, time2.nimt.or.th และ time3.nimt.or.th เป็นการบอกเวลาในรูปแบบของชั่วโมง นาที และวินาที โดยผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าที่เครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่อง computer server ตัวอย่างของการตั้งค่าและประสานเวลา (Time synchronisation) เป็นดังแสดงในรูปที่ 7 ที่ synchronise your clock และตั้งการประสานเวลาไปที่ NTP time server ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งตัวอย่างนี้ได้ตั้งค่าไปที่ time1.nimt.or.th สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows 10 [9]



รูปที่ 7 การตั้งเวลาและประสานเวลาไปที่ NTP time server ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

รูปที่ 8 นาฬิกาดิจิตอลที่รับสัญญาณเวลาผ่านระบบอินเทอร์เน็ต

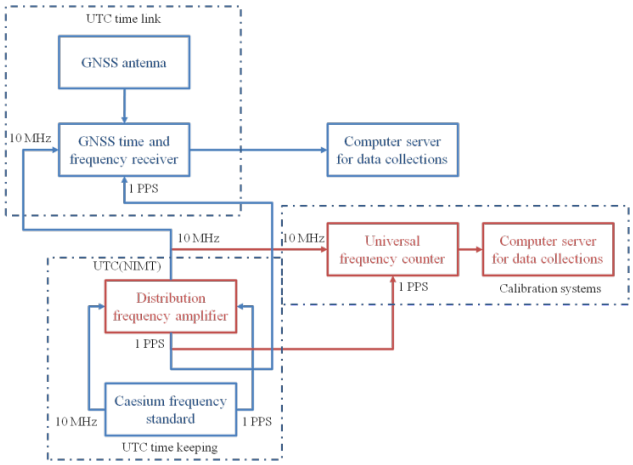
- การส่งสัญญาณเวลาผ่านระบบอินเทอร์เน็ต โดยใช้เครื่อง Network Time Protocol (NTP) server สามารถใช้สัญญาณนี้ในอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตั้งเวลาและประสานเวลาสำหรับนาฬิกาดิจิตอลให้มีเวลาที่ตรงและเป็นเวลามาตรฐานประเทศไทยได้ตลอด 24 ชั่วโมง ในทุก ๆ วันของสัปดาห์ รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างของนาฬิกาดิจิตอลที่ตั้งค่าและประสานเวลาโดยใช้สัญญาณเวลาผ่านระบบอินเทอร์เน็ต เป็นนาฬิกาบอกเวลาที่ติดตั้งอยู่หน้าอาคารมาตรธำรง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี
- การบอกเวลาผ่านระบบโทรศัพท์ เป็นการบอกเวลาทุก ๆ วินาทีด้วยเครื่องบอกเวลา (Speaking clock) โดยการโทรไปที่เบอร์ 1811 เมื่อต้องการเทียบเวลาผ่านการฟังสัญญาณเสียงบอกเวลาผ่านโทรศัพท์สาธารณะ ซึ่งเป็นการบริการสัญญาณเสียงตลอด 24 ชั่วโมง ผู้ใช้บริการสามารถตั้งเวลาที่นาฬิกาหลังสิ้นสุดสัญญาณ beep ที่ดำเนินการโดยกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ โดยกรมอุทกศาสตร์ [10] และสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติทำการเปรียบเทียบสัญญาณเวลาระหว่างนาฬิกาอะตอมซีเซียมของทั้งสองหน่วยงานโดยการรับสัญญาณจาก GNSS ดวงเดียวกันและรับสัญญาณพร้อม ๆ กันในทุก ๆ วัน ด้วยกระบวนการเทียบสัญญาณเวลาและความถี่ด้วย GNSS ที่เรียกว่า GNSS common-view [3]

4. การวัดเวลาและความถี่

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้วัดเวลาและความถี่ มีดังต่อไปนี้ เครื่อง Caesium frequency standard เป็นมาตรฐานปฐมภูมิ โดย caesium beam tube จะทำหน้าที่ผลิตความถี่ขาออก (Output frequency) โดยอาศัยหลักการทำงานของ Beam tube Ramsey response เพื่อให้ได้สัญญาณ resonance frequency ของอะตอม Caesium สัญญาณความถี่ที่ออกมาจากเครื่อง caesium frequency standard นั้นจะใช้การเปรียบเทียบเพื่อประมวลผลหาค่าความถูกต้องเพื่อใช้ในการสอบเทียบให้เครื่องกำเนิดมาตรฐานความถี่ประเภทอื่น ๆ ดังได้แสดงในรูปที่ 2

การสอบเทียบเวลาและความถี่ จะดำเนินงานภายในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เป็นไปตามมาตรฐานระหว่างประเทศสำหรับการวัดทางไฟฟ้า ISO/IEC 17025 เวอร์ชัน 2017 ซึ่งเป็นฉบับปัจจุบัน โดยแผนภูมิแสดงอุปกรณ์สำหรับการรักษามาตรฐานให้เป็นไปตามมาตรฐานของ

นานาชาติ เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำและเชื่อถือได้ สำหรับการวัดเวลาของประเทศซึ่งเป็นดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เครื่องวัดเวลาและความถี่ที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

5. ผลลัพธ์

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลโดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (International Bureau of Weights and Measures ย่อว่า BIPM) สำหรับค่าความแตกต่างระหว่างเวลา UTC และ UTC(NIMT) จะเป็นการรายงานผลทุก ๆ 5 วัน คือทุก ๆ วันลงท้ายของปฏิทิน MJD ในวันที่ 5 และ 9 โดยผลการเทียบเวลาจำนวน 21 วัน นับตั้งแต่วัน MJD 59337 ถึง 59357 (ระหว่างวันที่ 3 ถึง 23 พฤษภาคม 2564) ดังแสดงในรูปที่ 10 ส่วนค่าความแตกต่างของเวลา UTCr และ UTC(NIMT) จะเป็นการแสดงผลในทุก ๆ วันของสัปดาห์ โดยผลเป็นดังแสดงในรูปที่ 11

การดำเนินการวัดสัญญาณรหัส (Code) ของสัญญาณจาก GNSS โดยแต่ละคาบเวลาของการวัดสัญญาณ (Epoch) จะเป็นการหาค่าความแตกต่างของเวลาที่เครื่องรับสัญญาณซึ่งคือเวลา UTC(NIMT) และเวลา UTC จากสมการเริ่มต้น ดังแสดงในสมการที่ 1 กล่าวคือ

$$P = \|x_s - x_r\| + c(\Delta t_{rec} - \Delta t_{sat}) + errors \quad (1)$$

โดยที่ $\Delta t_{sat} = t_{sat} - t_{ref}$ เป็นข้อมูลที่ได้จาก navigation message

$\Delta t_{rec} = t_{rec} - t_{ref}$ เป็นค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา (Synchronisation error) ระหว่างเวลาที่เครื่องรับวสัญญาณและมาตรเวลาอ้างอิง (Reference time scale) ของระบบดาวเทียม GNSS ซึ่งในการประมวลผลครั้งนี้กำหนดให้เป็นเวลาระบบของ GPS (GPS system time) จะเห็นได้ว่าค่าเวลา Δt_{rec} เป็นค่าที่ต้องการหาค่าและมีค่าเท่ากันสำหรับการรับสัญญาณจากดาวเทียมทุกดวงที่รับสัญญาณในเวลาเดียวกัน

การเปรียบเทียบสัญญาณเวลาระหว่างเวลา UTC(NIMT) หรือเวลาที่เครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติและเวลา UTC จะเป็นดังแสดงในสมการที่ 2

$$t_{rec} - UTC = \left(t_{rec} - t_{ref}\right) + \left(t_{ref} - UTC\right) \quad (2)$$

ซึ่งเป็นการวัดสัญญาณ 1 PPS ที่ออกมาจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS โดยที่สัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณขาเข้า (Input) มายังเครื่องรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมที่กำหนดให้เป็นเวลา UTC(NIMT) ดังแสดงในรูปที่ 9 กระบวนการเทียบสัญญาณเวลาจะใช้รูปแบบของข้อมูลจากการรับสัญญาณแบบมาตรฐานคือ CGGTTS โดยมีการใช้ ค่าแก้สำหรับตำแหน่งของดาวเทียมนำทางและเวลาจากนาฬิกาบนดาวเทียม ค่าแก้สำหรับค่าคลาดเคลื่อนจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ จาก International GNSS services (IGS) โดยการรับสัญญาณจะเป็นทุก ๆ 780 วินาที (13 นาที) และใส่ค่าการถ่วงน้ำหนักในการหาค่าเฉลี่ยของการรับสัญญาณที่แต่ละเครื่องรับสัญญาณโดยขึ้นอยู่กับชนิดของนาฬิกาอะตอม [3] สมการของการเปรียบเทียบสัญญาณเวลาโดยวิธี Common-view เป็นดังแสดงในสมการที่ 3

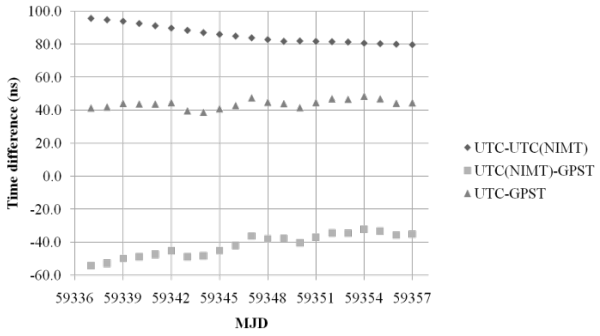
$$(T_1 - T_2)(t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^{N(t)} \omega_i \left[\left(T_1 - t_{ref}\right)_i(t) - \left(T_2 - t_{ref}\right)_i(t)\right] \quad (3)$$

โดยที่ $\left(T_x - t_{ref}\right)_i(t)$ เป็นค่าที่ได้จากการรับสัญญาณที่เครื่องรับตัวที่ x และดาวเทียมนำทางตัวที่ i ที่เวลา t ในการรับสัญญาณครั้งนี้จะเป็น $\left(T_{UTC(NIMT)} - t_{GPST}\right)_i(t)$

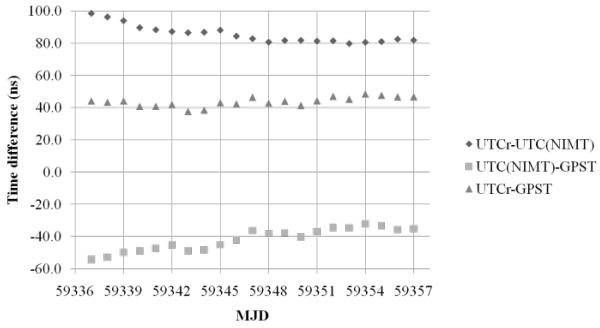
ω_i เป็นการให้ค่าน้ำหนักสำหรับการวัดสัญญาณเวลาจากดาวเทียมนำทางแต่ละดวง โดยกำหนดให้มีค่าเป็น

$sin^2(E)$ โดยที่ E เป็นมุมเงยของดาวเทียมนำทางจากเครื่องรับสัญญาณ

$N(t)$ เป็นจำนวนของดาวเทียมนำทาง



รูปที่ 10 ค่า UTC-UTC(NIMT)



รูปที่ 11 ค่า UTCr-UTC(NIMT)

ค่าความแตกต่างระหว่างเวลา UTC และ UTC(NIMT) เป็นค่าที่ได้จากการประมวลผลจากสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 85.6 นาโนวินาที และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.3 นาโนวินาที ซึ่งเป็นผลจากการวัดค่าความแตกต่างระหว่างเวลา UTC(NIMT) และเวลาระบบของระบบดาวเทียมนำทางสากล (Global Positioning System Time ย่อว่า GPST) ในทุก ๆ วัน มีค่าความแตกต่างเฉลี่ย -41.9 นาโนวินาที แปลว่าเวลา UTC(NIMT) เดินช้ากว่าเวลาของเวลาระบบ GPS อยู่ 41.9 นาโนวินาที และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 7.0 นาโนวินาที เวลา UTC-GPST เกิดจากการเทียบเวลาระหว่างเวลา UTC-UTC(NIMT) และ UTC(NIMT)-GPST จะเห็นได้ว่าเวลา UTC-GPST ค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 43.7 นาโนวินาที และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 2.6 นาโนวินาที

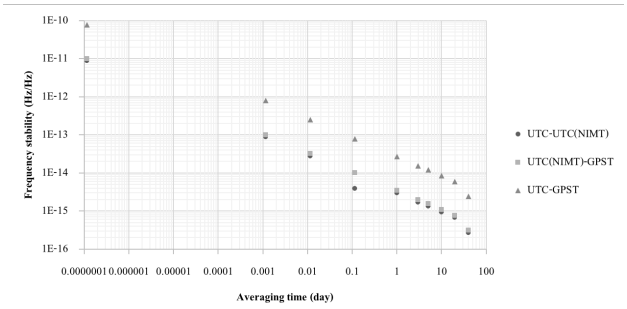
ผลของค่าความแตกต่างของเวลา UTCr และเวลา UTC(NIMT) ในรายวันมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประมวลผลในรายเดือนอยู่ที่ 85.4 นาโนวินาที

ค่าความเสถียรทางความถี่ (Frequency stability) เป็นการคุณสมบัติของนาฬิกาและมาตรเวลาโดยการนิยามจาก Allan variance เป็นการคำนวณจากการหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ไม่มีจุดสิ้นสุด กับค่าเฉลี่ยของการคำนวณเวลาจากการวัดสัญญาณจากนาฬิกาที่มีจุดสิ้นสุด ดังแสดงในสมการที่ 4 [11] ดังนี้

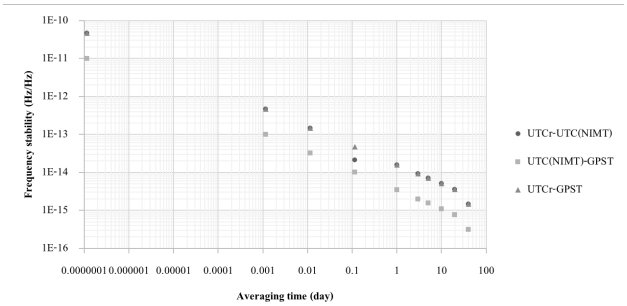
$$\sigma_y^2(\tau) \approx \frac{1}{2(N-1)}\sum_{i=1}^{N-1}(\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 = \frac{1}{2(M-2)\tau^2}\sum_{i=1}^{M-2}(x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2 \quad (4)$$

โดยที่ N เป็นเลขจำนวนเต็มที่เกิดจากการหาค่าเฉลี่ยของ fractional frequency โดยที่ $M = N + 1$ สำหรับจำนวนเฟส

ค่าความเสถียรที่คำนวณได้สำหรับค่า UTC-UTC(NIMT), UTCr-UTC(NIMT), UTC-GPST และ UTCr-GPST เป็นดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 ค่าความเสถียรของ UTC-UTC(NIMT)



รูปที่ 13 ค่าความเสถียรของ UTCr-UTC(NIMT)

ค่าความเสถียรของเวลา UTC-UTC(NIMT) ใน 1 วัน อยู่ที่ 3.0×10^{-15} เฮิรตซ์/เฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าความเสถียรดีกว่าค่าเวลาที่วัดเทียบจากสัญญาณ GPS โดยผลของค่าความเสถียรของเวลา UTC(NIMT)-GPST ที่ 3.5×10^{-15} เฮิรตซ์/เฮิรตซ์ ค่าความเสถียรของสัญญาณจากเวลา UTC-GPST มีค่า 2.7×10^{-15} เฮิรตซ์/เฮิรตซ์ เป็นผลจากค่าคลาดเคลื่อนที่สัญญาณ GPS

ผลการคำนวณค่าความเสถียรรายวันของเวลา UTCr-UTC(NIMT) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเสถียรของเวลา UTC-GPST แต่ค่าความเสถียรของเวลา UTC(NIMT)-GPST ก็มีค่าดีกว่าค่าเสถียรที่ได้จากการประมวลผล จะเห็นได้ว่าค่าเสถียรของเวลา UTC(NIMT) ใน 1 วันมีค่า 1.6×10^{-14} เฮิรตซ์/เฮิรตซ์

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการวัดเวลาและความถี่จากนาฬิกาอะตอมซีเซียมและเชื่อมโยงค่าเวลา UTC ที่วัดที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติไปยังมาตรเวลาอะตอม UTC ที่ประมวลผลโดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงเวลาไปยังนิยามสำหรับการนับเวลาในระบบหน่วยสากลเพื่อกำหนดนิยามสำหรับวินาที โดยได้แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณจากระบบดาวเทียม GNSS สำหรับเวลา UTC(NIMT) กับเวลา UTC ด้วยค่าความถูกต้องและค่าเสถียรภาพของค่าเวลาอะตอมที่วัดได้เป็นระยะเวลา 21 วัน เพื่อพิจารณาการใช้งานค่าความถูกต้องและเสถียรภาพของสัญญาณเวลามาตรฐานให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] BIPM, “Values of the differences between UTC and its local representations by individual time laboratories,” BIPM, 2021. [ออนไลน์]. Available: ftp://tai.bipm.org/. [%1 ที่เข้าถึง7 September 2021].

[2] P. Tirawanichakul, T. Thongtan และ C. Satirapod, “Estimations of system time differences using GNSS precise point positioning technique,” ใน Geoinfotech, Bangkok, 2017.

[3] P. Defraigne, “GNSS time and frequency transfer,” ใน Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Switzerland, Springer International Publishing, 2017, p. 1335.

[4] C. Audoin และ B. Guinot, The measurement of time: time, frequency and the atomic clock, Cambridge: Cambridge university press, 2006.

[5] T. Thongtan, “GNSS time and frequency transfers,” ใน Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Conference on Application Research and Development, Nakhon Phanom, 2021.

[6] Microsemi, “5071A,” Cesium Clock Primary Frequency Standard, 2020. [ออนไลน์]. Available: https://www.microsemi.com/product-directory/cesium-frequency-references/4115-5071a-cesium-primary-frequency-standard. [%1 ที่เข้าถึง20 April 2021].

[7] Kvarz, “Kvarz Institute of Electronic Measurements,” CH1-95 Active Hydrogen Maser, 2020. [ออนไลน์]. Available: http://www.kvarz.com/general/1-95E.html. [%1 ที่เข้าถึง20 April 2021].

[8] P. Defraigne และ G. Petit, “CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS Time Transfer,” Metrologia, เล่มที่ G1,%1http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/52/6/G1, p. 52, 2015.

[9] NIMT, “เวลามาตรฐานประเทศไทย,” 2017. [ออนไลน์]. Available: https://www.nimt.or.th/main/?page_id=36686. [%1 ที่เข้าถึง20 April 2021].

[10] กรมอุทกศาสตร์ , “เวลามาตรฐานประเทศไทย,” [ออนไลน์]. Available: http://www.hydro.navy.mi.th/TIME/. [%1 ที่เข้าถึง20 April 2020].

[11] D. Howe, “Frequency stability,” ใน National Institute of Standard and Technology (NIST), Boulder, Colorado.