

การถ่ายทอดสัญญาณเวลาและความถี่ด้วยระบบดาวเทียม นำทางสากล

GNSS Time and Frequency Transfer

ทยาทิพย์ ทองตัน*

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
* ผู้รับผิดชอบบทความ
thayathip@nimt.or.th

Received: 10 Jan 2021

Revised: 31 Mar 2021

Accepted: 29 Apr 2021

บทคัดย่อ

การกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากลอาศัยการวัดช่วงเวลาที่เดินทางจากดาวเทียมนำทางมายังเครื่องรับสัญญาณบนพื้นโลกโดยค่าความเที่ยงของพิกัดนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและประสิทธิภาพของนาฬิกาอะตอมที่บนดาวเทียมและการหาค่าความแตกต่างของการประสานเวลาที่เครื่องรับที่ระดับนาโนวินาที ดังนั้นระบบเวลาจึงเป็นส่วนที่สำคัญของการทำงานของระบบดาวเทียมนำทางสากล แต่ในทางกลับกันนั้นระบบดาวเทียมนำทางสากลจำเป็นต้องได้รับการเทียบสัญญาณเวลาและความถี่ระหว่างนาฬิกาอะตอมด้วยกันโดยใช้วัดและเปรียบเทียบสัญญาณเวลาและความถี่ในงานมาตรวิทยา รวมถึงการประยุกต์ใช้งานในเรื่องการระบุพิกัดและกำหนดพื้นหลักฐานด้านยื่อเดซีอีกด้วย บทความนี้อธิบายถึงหลักการทำงาน วิธีการรับสัญญาณ การประมวลผลการวัด และผลการเปรียบเทียบสัญญาณจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมที่ใช้สำหรับการกำหนดนิยามวินาทีในระบบหน่วยวัดระหว่างประเทศ การกำหนดเวลาสากลร่วมระหว่างประเทศ และการกำหนดเวลามาตรฐานประเทศไทย

คำสำคัญ: มาตรวิทยาเวลาและความถี่ การเทียบสัญญาณเวลา ความถี่จากนาฬิกาอะตอมด้วยการรับระบบดาวเทียมนำทางสากล

Abstract

Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning measures time intervals of travelling signals from satellites to ground station receivers. Its precision is based upon characteristics and performances of atomic clocks onboard and synchronisation difference determinations at receiving station on earth at nanosecond level. Timing is essential for GNSS. On the other hand, GNSS is widely used for atomic clocks' time and frequency comparisons especially in time and frequency metrology. Timing GNSS station is also used for precise positioning and geodetic datum determinations. This paper explains principle of GNSS time and frequency disseminations, observations, data processing and some results as to determine a second in the International System of Units (SI), a Coordinated Universal Time (UTC) and the official local time or Thailand Standard Time (TST).

Keywords: Time and frequency metrology, GNSS time, frequency comparison

1. บทนำ

การเทียบสัญญาณเวลาและความถี่ในระบบมาตรเวลาสากลนั้น เป็นการเทียบสัญญาณเวลาผ่านระบบดาวเทียม ปัจจุบันทำได้ 2 วิธี คือ การเทียบสัญญาณเวลาด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากล เป็นการรับสัญญาณในทางเดียวโดยรับสัญญาณแถบความถี่แอล (L band) เพื่อหาค่าความแตกต่างของช่วงเวลาระหว่างสัญญาณเวลามาตรฐานจากนาฬิกาอะตอมที่ที่รักษาโดยห้องปฏิบัติการเวลาที่ต่อเข้ามายังเครื่องรับสัญญาณและสัญญาณเวลาจากระบบดาวเทียมนำทางสากล และการเทียบสัญญาณเวลากับสัญญาณเวลาและความถี่จากระบบดาวเทียมสื่อสารค้างฟ้า (geostationary communication satellite) โดยใช้การรับส่งสัญญาณจากสถานีภาคพื้นผ่านช่องสัญญาณความถี่ย่านสื่อสารอาจจะเป็นแถบความถี่ซี (C band) หรือเคยู (Ku band) บทความนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการเทียบสัญญาณเวลาด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากลเป็นหลัก เนื่องด้วยการนำทางด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากลเป็นการวัดช่วงเวลาที่ยสัญญาณเดินทางมาจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ การประมวลผลความสามารถในการประสานเวลาหรือค่าความแตกต่างของสัญญาณเวลาที่เครื่องรับสัญญาณนั่นเอง สำหรับใช้ในการเทียบและถ่ายทอดสัญญาณเวลาที่ต้องการความเที่ยงสูงสำหรับนาฬิกาอะตอมหรือความถี่มาตรฐานที่ต้องใช้งานตลอดเวลาและอยู่ในระยะทางที่ห่างกันจะเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับงานมาตรวิทยาเวลาและความถี่

2. การถ่ายทอดสัญญาณเวลาและความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากล

หลักการทำงานของระบบดาวเทียมนำทางสากลคือการวัดช่วงเวลาจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณสามารถแสดงได้ตามสมการที่ 1

$$P = c(t_r(rec) - t_e(sat)) \quad (1)$$

โดยที่ c คือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

$t_r(rec)$ คือเวลาของการรับสัญญาณที่เครื่องรับ (วินาที)

$t_r(rec)$ คือเวลาของการส่งสัญญาณจากดาวเทียม (วินาที) ซึ่งเป็นการวัดช่วงเวลาทีนาฬิกาอะตอมที่อยู่บนดาวเทียม

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่านาฬิกาบนดาวเทียมและนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณนั้นไม่ประสานกัน จึงมีค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา (synchronisation error) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned} t_r(rec) - t_e(sat) \\ = (t_r - t_e) + (t_{rec} - t_{sat}) + error \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ $(t_{rec} - t_{sat})$ คือค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา (วินาที) เป็นค่าที่วัดได้จากการวัด

$(t_r - t_e)$ คือค่าช่วงเวลาที่แท้จริง (วินาที) เป็นค่าที่ต้องหาค่า $errors$ คือค่าคลาดเคลื่อนของสัญญาณเวลา (วินาที)

จากสมการจะเห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลาที่สัญญาณเดินทางจริงคูณกับค่าความเร็วแสงจะได้ระยะจริงระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ ระยะเสมือนจริง (pseudorange) จากสมการที่ 1 คือผลรวมของระยะทางจริง ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลาและค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ เนื่องจากการที่สัญญาณเดินทางช้าลงในชั้นบรรยากาศ (atmospheric delay) คลื่นหลายวิถี (multipath) และสัญญาณรบกวนต่างๆ (noise) รวมถึงค่าความล่าช้าภายในเครื่องรับสัญญาณ สมการที่ 3 แสดงระยะเสมือน ดังนี้

$$P = \|x_s - x_r\| + c(t_{rec} - t_{sat}) + error \quad (3)$$

โดยที่ $\|x_s - x_r\|$ คือระยะทางที่แท้จริงระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ (เมตร)

สมการที่ 3 นี้ ประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (unknown) จำนวน 4 ตัวแปร คือ ค่าพิกัด จำนวน 3 ตัวแปร และค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา จำนวน 1 ตัวแปร การประมวลผลทำโดยการรับสัญญาณดาวเทียมหลายๆ ดวงพร้อมกันเพื่อใช้แก้สมการหาผลลัพธ์ของตัวแปรดังกล่าว นาฬิกาบนดาวเทียมแต่ละดวงก็ไม่ได้ประสานเวลาที่ตรงกัน แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา คือ $(t_{rec} - t_{sat})$ จะต่างกันออกไปสำหรับดาวเทียมแต่ละดวง และจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะมีจำนวนทั้งหมด $3 + k$ โดยที่ k คือจำนวนดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณได้ในแต่ละคาบเวลา ซึ่งถ้าเป็นแบบที่ได้อธิบายมานี้แล้ว สมการระยะเสมือนนี้จะไม่สามารถแก้สมการได้เลย ดังนั้นระบบดาวเทียมนำทางสากล แต่ละระบบจึงต้องมี

ระบบเวลาอ้างอิง (system time) ของตัวเองและบ่งชี้ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่นาฬิกาอะตอมบนดาวเทียม (satellite clock error) จะอ้างอิงกับระบบเวลาที่เป็นตัวอ้างอิงของระบบนั้นๆ ดังนั้น จากสมการที่ 3 จึงสามารถเขียนเป็นสมการที่ 4 ดังนี้

$$P = \|x_s - x_r\| + c(\Delta t_{rec} - \Delta t_{sat}) + error \quad (4)$$

โดยที่ $\Delta t_{sat} = t_{sat} - t_{ref}$

และ $\Delta t_{rec} = t_{rec} - t_{ref}$

โดยที่ Δt_{sat} คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาอะตอมบนดาวเทียม (วินาที) สามารถทราบค่าได้จาก navigation message และ Δt_{rec} คือค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณและเวลาอ้างอิง (reference time) ของระบบดาวเทียมนำทางสากล

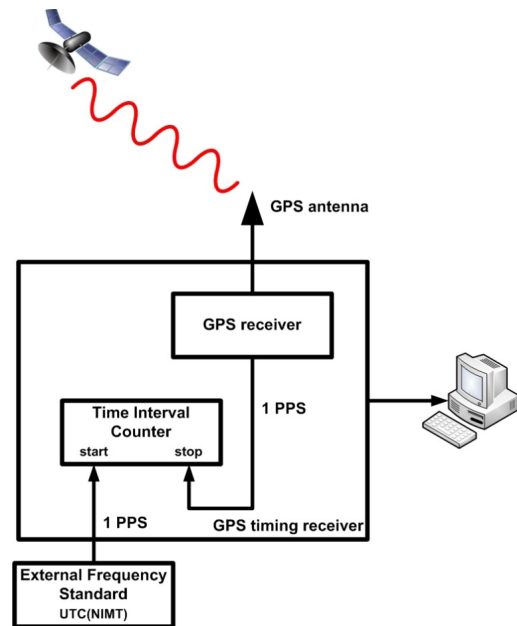
ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณและเวลาอ้างอิง นี้ Δt_{rec} เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและมีค่าเท่ากันสำหรับการรับสัญญาณจากดาวเทียมทุกดวงในการรับสัญญาณในแต่ละครั้งโดยใช้เครื่องรับสัญญาณเครื่องเดียวกัน ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาจึงพบว่าเวลาประมวลผลจากการรับสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากล จึงมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจำนวนทั้งหมด 4 ตัวแปร จากการใช้งานสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง เพื่อแก้สมการดังกล่าว การต่อสัญญาณจากนาฬิกาอะตอมที่อยู่ภายนอกเครื่องรับสัญญาณ (external atomic frequency standard) สำหรับการเทียบสัญญาณเวลาเป็นดังแสดงในรูปที่ 1

มาตรฐานเวลาอ้างอิง (reference time scale) ย่อว่า ref ขึ้นอยู่กับผลของนาฬิกาดาวเทียมที่นำมาใช้ประมวลผล เช่นการใช้ค่ามาตรฐานเวลาอ้างอิงจาก broadcast navigation message ก็จะเป็นมาตรฐานเวลาหนึ่ง แต่ถ้าหากเป็นการใช้ผลของนาฬิกาดาวเทียมจาก International GNSS Service (IGS) เพื่อการประมวลผลในภายหลัง (post process) ก็จะได้ผลที่ต่างกันอย่าง

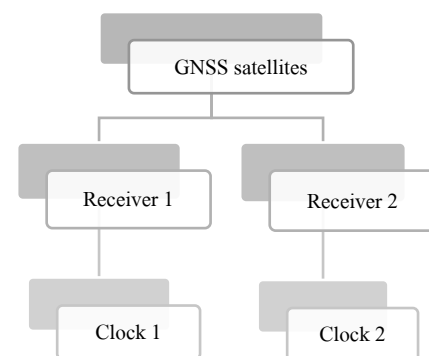
ออกไป

สำหรับการประยุกต์ใช้งานเรื่องการบอกและวัดเวลา ข้อมูลที่สำคัญที่สุดคือ ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา

ระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณและมาตรฐานเวลาอ้างอิง Δt_{rec} การได้มาซึ่งค่าดังกล่าวของเครื่องรับสัญญาณจำนวน 2 เครื่องที่รับสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากลที่เวลาเดียวกัน โดยไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของเครื่องรับก็จะได้ค่าความแตกต่างระหว่างนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 1 และเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 2 $t_{rec,1} - t_{rec,2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 การต่อสัญญาณจากนาฬิกาอะตอมมาที่เครื่องรับสัญญาณ GPS



รูปที่ 2 หลักการของการถ่ายทอดสัญญาณเวลาด้วย GNSS เพื่อเทียบเวลา

วิธีการคือ การหาค่า synchronisation error ระหว่างเวลาจากนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณกับเวลาอ้างอิงของ GNSS โดยการป้อนสัญญาณเวลาจากนาฬิกาไปยังเครื่องรับสัญญาณ

GNSS ในทางปฏิบัติค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลาจะสามารถวัดค่าได้อย่างต่อเนื่องจากการประสานเวลาของสัญญาณจากนาฬิกาที่อยู่ภายนอกเครื่องรับสัญญาณ (external clock) กับนาฬิกาที่อยู่ภายในเครื่องรับสัญญาณ (internal clock) โดยที่เครื่องรับสัญญาณจะวัดค่า $\Delta t_{rec,i} = (t_{rec,i} - t_{ref})$ ผลการวัดค่าสัญญาณเวลา T จากนาฬิกาที่ป้อนเข้ามาจากนาฬิกาที่อยู่ภายนอกเครื่องรับสัญญาณที่รักษาโดยห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ จะได้ค่าช่วงเวลาเป็นดังสมการที่ 5

$$(T_i - t_{ref}) = (t_{rec,i} - t_{ref}) - (t_{rec,i} - T_i) \quad (5)$$

การหาค่าผลต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา $(T_i - t_{ref})$ ของการรับสัญญาณ GNSS พร้อมๆ กัน ที่ 2 สถานี คือ $i = 1, 2$ ในขั้นนี้ จะสังเกตได้ว่าผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา ดังกล่าวไม่ควรมากกว่า 1 ไมโครวินาที

3. การหาค่า UTC จาก GNSS และการสอบกลับได้

การถ่ายทอดสัญญาณเวลาด้วย GNSS เป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการถ่ายทอดค่าสัญญาณเวลาที่ต้องการความเที่ยงที่ดีกว่ามิลลิวินาที ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน เช่น การบอกเวลาที่เที่ยง การประสานเวลาในระบบการเงินการธนาคารและโครงข่ายโทรคมนาคม รวมไปถึงการทำประสานเฟส (phase synchronisation) สำหรับโครงข่ายการส่งและถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้า โดยแต่ละสถานีฐานของโครงข่ายดังกล่าวจะมีการประสานเวลาด้วยสัญญาณเวลาที่ถูกต้องจาก GNSS เพื่อเวลาของแต่ละสถานีฐานจะประสานเวลากัน มาตราเวลาที่เป็นทางการสำหรับทุกๆ ประเทศในโลกคือ เวลาร่วมสากล (Universal Time Coordinated, UTC) เวลาท้องถิ่น (local time) และเวลาตามกฎหมาย (legal time) ซึ่งหาค่าจากการบวกค่าแก้ไขสำหรับ time zone เข้ากับเวลา UTC โดยระบบ GNSS แต่ละระบบจะบอกค่าความแตกต่างระหว่างมาตราเวลาของระบบนั้นๆ กับเวลา UTC ในข้อมูล navigation message ค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ (receiver clock) และค่า predicted UTC สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

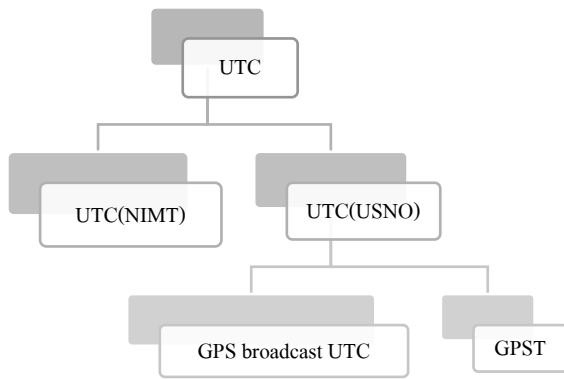
$$(t_{rec} - t_{ref}) + (t_{ref} - UTC) = (t_{rec} - UTC) \quad (6)$$

ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา คือ $(t_{rec} - t_{ref})$ ซึ่งคือเวลาที่มาจากนาฬิกาที่อยู่ภายในเครื่องรับสัญญาณ (receiver internal clock time) จะให้สัญญาณ 1 pulse per second (pps) ออกมา ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้ประสานเวลากับค่าเวลา UTC ที่ได้จากการประมาณการณ์ (predicted UTC) อยู่ตลอดเวลา

ข้อสังเกตคือเวลา UTC ไม่มีจริงในเวลาจริง (real-time) ขณะนั้นๆ เวลา UTC เป็นเวลาที่เกิดจากกระประมวลผลในภายหลังโดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (International Bureau of Weights and Measures, BIPM) ผู้ใช้งานที่ต้องการประยุกต์ใช้ค่าเวลาแบบเวลาจริง สามารถใช้มาตรเวลา UTC ที่มาจากการประมาณการณ์ได้ ค่าเวลา UTC ที่ดีที่สุดเกิดจากการประมวลผลจากนาฬิกาอะตอมทั้งหมดที่มีอยู่ของห้องปฏิบัติการเวลาทั่วโลกที่ใช้ในการหาค่าเวลา UTC ของแต่ละประเทศ มีชื่อว่า UTC(k) โดยที่ k คือชื่อย่อของห้องปฏิบัติการนั้นๆ BIPM ใช้เวลาประมวลผล 1 เดือน แล้วจะรายงานผลค่าความแตกต่างระหว่างค่า predicted UTC(k) และค่าเวลา UTC จริง พร้อมด้วยค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ในเชิงสถิติของผลการวัดดังกล่าว สามารถเข้าไปดูข้อมูลได้จากเว็บไซต์ของ BIPM ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นการยืนยันผลของการมีการสอบกลับได้ (traceability) ไปยังหน่วยวินาที BIPM แนะนำให้ห้องปฏิบัติการรักษามาตรเวลา UTC(k) ให้แตกต่างจากเวลา UTC น้อยกว่า 100 ns ห้องปฏิบัติการเวลาชั้นนำสามารถรักษาค่าความแตกต่างระหว่าง UTC และ UTC(k) ที่ไม่เกินวินาที

ระบบ GNSS แต่ละระบบก็จะมีมาตรเวลาอ้างอิงเป็นของตัวเองและถ่ายทอดค่าเวลาดังกล่าวตามมาตรเวลา UTC กล่าวคือเวลา UTC(USNO) ที่รักษาโดย US Naval Observatory เป็นมาตรเวลาอ้างอิงของ Global Positioning System ของประเทศสหรัฐอเมริกา (GPS) ดังแสดงใน รูปที่ 3

ส่วนเวลา UTC(SU) เป็นมาตรเวลาอ้างอิงสำหรับ Global Navigation Satellite System (GLONASS) ค่าเวลาเฉลี่ยจากห้องปฏิบัติการเวลาในยุโรปจำนวน 5 แห่ง UTC(k) ใช้เป็นเวลาอ้างอิงสำหรับระบบดาวเทียมนำทาง Galileo ของสหภาพยุโรป เวลา UTC(NTSC) โดย National Time Service Center ของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนได้ใช้เป็นเวลาอ้างอิงของระบบ BeiDou สำหรับเวลา UTC(NICT) โดย National Institute of Information and Communication Technology เป็นมาตร



รูปที่ 3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง UTC และ GPST

เวลาอ้างอิงสำหรับระบบ Quasi Zenith Satellite System (QZSS) ของประเทศญี่ปุ่น จะเห็นได้ว่า UTC ควรจะมีค่าที่เป็นเวลาจริง (real-time) สำหรับผู้ใช้งานที่หลากหลาย แต่ในความเป็นจริงแล้วผู้ใช้งานดังกล่าวจะต้องรอค่าที่ได้จากการประมวลผลที่ออกมาทุกเดือนในการประมวลผล UTC ของ BIPM จะพบว่าค่า UTC ที่ส่งออกมาจากระบบดังกล่าวจะมีค่า uncertainty เพียงไม่กี่นาโนวินาที ยกเว้นค่า UTC ของ GLONASS ที่มีความไม่แน่นอนของผลการวัด (measurement uncertainty) ระดับหลายร้อยนาโนวินาที การลดค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวสามารถทำได้โดยการสอบเทียบด้วยวิธีการที่เหมาะสม ในแง่ของผู้ใช้งานที่ต้องการค่าความถูกต้อง (accuracy) ระดับนาโนวินาทีสามารถที่จะรับสัญญาณจากระบบดาวเทียม GPS เท่านั้น การได้มาซึ่งค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดสัญญาณเวลาที่เครื่องรับระดับนาโนวินาทีได้นั้น เครื่องรับสัญญาณจะต้องได้รับการสอบเทียบและวัดค่าการคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่เสาอากาศ (antenna) สายอากาศ (antenna cable) รวมถึงเครื่องรับสัญญาณ ถ้าหากไม่วัดสัญญาณดังกล่าวค่าความถูกต้องของสัญญาณเวลาจะอยู่ที่ระดับไมโครวินาที ค่าความไม่แน่นอนสำหรับการถ่ายทอดสัญญาณเวลาและเปรียบเทียบค่าเวลาจากนาฬิกาจะแตกต่างกันไปตามประเภท A และ B ค่าความเที่ยง (precision) จะกำหนดด้วยความไม่แน่นอนประเภท A (type A uncertainty, u_A) ที่ได้จากการประมวลผลทางสถิติของค่า phase noise ในข้อมูลการรับสัญญาณ (observation data) และผลของการเปลี่ยนแปลงภายในระยะเวลา 1 เดือน ส่วนความไม่แน่นอนประเภท B (type B uncertainty, u_B) เป็นผลจาก

การสอบเทียบเครื่องรับสัญญาณ ค่าความถูกต้องของการวัดสัญญาณเวลาจะเป็นไปตามผลจากการรวมค่าความไม่แน่นอนโดยหาจากค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (mean square error) กล่าวคือ $U^2 = u_A^2 + u_B^2$

4. วิธีการประมวลผลข้อมูล

ในการประมวลผลแบบใช้ข้อมูลรหัสเพียงอย่างเดียวนั้นสัญญาณรบกวนและคลื่นหลายวิถีของการวัดข้อมูลรหัสจะส่งผลต่อการหาค่าเสถียรภาพระยะสั้นของนาฬิกาอะตอม เช่น นาฬิกาอะตอมไฮโดรเจน (hydrogen maser) ซึ่งเป็นนาฬิกาที่มีค่าเสถียรภาพสูงต้องวิเคราะห์จากผลการวัดคลื่นพาห์เพิ่มเติมจากการวัดข้อมูลรหัสซึ่งต้องอาศัยการวิเคราะห์ผลของข้อมูลการวัดรหัสและคลื่นพาห์ซึ่งวิธีการเป็นเหมือนการวิเคราะห์ผลของการหาค่าพิคกิ้งเพียงสูง

วิธีการหาค่าพิคกิ้งที่สามารถใช้ประมวลผลสำหรับการเทียบนาฬิกาคือ วิธี zero differencing เช่นวิธี precise point positioning หรือ single differencing เพราะถ้าเป็นวิธี double differencing ค่า receiver clock offset ก็จะถูกขจัดออกไปจากระบบการประมวลผล วิธีการ single differencing เป็นเหมือนกับหลักการของการเทียบเวลาด้วยวิธี common-view แต่ใช้ข้อมูลการวัดจากสัญญาณ code และ carrier phase ในขณะที่วิธีการ precise point positioning (PPP) ใช้หลักการเดียวกับวิธี all-in-view วิธีการ PPP ค่อนข้างเป็นที่นิยมเพราะว่าไม่ขึ้นอยู่กับระยะทาง (baseline) ระหว่างนาฬิกา ผลของการจัดเรียงตัวของดาวเทียม (geometry) ของวิธี single difference และวิธี PPP จะเห็นว่าผลการเปรียบเทียบที่ได้จากวิธี PPP จะได้ค่าความถูกต้องระดับนาโนวินาทีสำหรับการเปรียบเทียบนาฬิกาอะตอมที่อยู่ห่างกันระหว่างทวีป

การประมวลผลด้วยวิธีการ PPP สามารถให้ค่าพิคกิ้งของสถานีในการประมวลผลแบบสถิต (static) หรือจลน์ (kinematic) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ และผลจากนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ เมื่อนำวิธีการ PPP มาประยุกต์ใช้เทียบค่าเวลาจะต้องหาค่าพิคกิ้งที่สถานีเป็นแบบสถิตและหาค่า receiver clock ในสำหรับการรับค่าในแต่ละครั้ง ผลจากนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณคือ ($T_{rec} - t_{ref}$) ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

โดยที่ t_{ref} คือมาตรเวลาอ้างอิงของข้อมูลนาฬิกาดาวเทียมที่นำมาใช้ในการประมวลผลวิธี PPP ผลที่ได้จากการเทียบสัญญาณเวลาคือค่าเวลาที่แตกต่างกันระหว่างนาฬิกาเครื่องรับสองเครื่องที่อยู่ห่างกัน ข้อระวังในการประมวลผลวิธี PPP คือการประมวลผลสำหรับนาฬิกาเครื่องรับของทั้งสองสถานีจะต้องใช้ product สำหรับตำแหน่งดาวเทียมและค่าเวลาบนนาฬิกาอะตอมอันเดียวกันเพื่อเป็นการใช้ค่าอ้างอิงอันเดียวกัน ข้อสังเกตคือ IGS ประมวลผลค่านาฬิกาที่เครื่องรับ ($T_{rec} - t_{ref}$) สำหรับสถานีที่อยู่ในโครงข่าย ซึ่งเป็นการประมวลผลด้วยวิธี zero differencing โดยการหาค่าเวลาของนาฬิกาบนดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับในคราวเดียวกัน โดยกำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อนในบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์เป็นค่าคงที่ที่คำนวณจากการประมวลผลโครงข่ายด้วยวิธี double differencing ผลที่ได้จากการประมวลผลของ IGS มาจากศูนย์ประมวลผลหลายๆ แห่ง จึงถือได้ว่าผลนี้เป็นผลที่ดีที่สุดที่มีอยู่สำหรับโครงข่าย มาตรเวลาที่ใช้สำหรับ IGS เป็นมาตรเวลาที่ชื่อ IGS time scale ย่อว่า IGST สำหรับ time scale ของ IGS rapid product คือ IGRT

ในบทความนี้นำเสนอวิธีการประมวลผลข้อมูลภายหลังการรับข้อมูลใน 1 วัน เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยคาบ (epoch) ของการรับสัญญาณคือ 30 วินาที โดยอาศัยบริการประมวลผลผ่านเว็บไซต์ที่มีชื่อว่า Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) ของ Natural Resources Canada (NRCAN) ประเทศแคนาดา

การรับสัญญาณทำโดยการรับสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากลด้วยเครื่องรับสัญญาณแบบภูมิมาตรศาสตร์ (geodetic receiver) ที่สามารถรับสัญญาณได้หลายความถี่และจากหลายวงโคจร การรับสัญญาณดำเนินการตลอด 24 ชั่วโมง ข้อมูลที่ได้จากการรับสัญญาณจะอยู่ในรูปแบบของ Receiver Independent Exchange (RINEX) แล้วจึงนำไปในระบบประมวลผลของ CSRS-PPP เป็นการประมวลผลด้วยวิธีการระบุตำแหน่งที่เรียกว่า Precise Point Positioning (PPP) วิธีการนี้ใช้หลักการของการประมวลผลจากการหาตำแหน่งด้วยเฟสของคลื่นพาห์โดยใช้เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียว แต่จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลวงโคจรของดาวเทียมและนาฬิกาบนดาวเทียมที่มีความเที่ยงสูงจาก IGS ที่อยู่ในรูปแบบของ Standard Product 3 (SP3) หรือ ข้อมูล RTCM-SSR เป็นต้น

จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอีกเครื่องเพื่อเป็นสถานีอ้างอิงค่าพิกัด การกำหนดมูลฐาน (datum) จะใช้กรอบอ้างอิง (reference frame) ที่ได้จากการประมวลผลวงโคจรดาวเทียมนาฬิกาบนดาวเทียม ไบแอส (bias) ต่างๆ เช่น differential code bias และแผนที่ของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric map) โดยปกติจะใช้กรอบอ้างอิงที่ชื่อว่า International Terrestrial Reference Frame (ITRF) ค่าความถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลด้วยวิธีนี้จะดีกว่าระดับเซนติเมตรสำหรับการรับสัญญาณเพื่อหาตำแหน่งสถิต (static positioning) แต่วิธีการนี้จะมีข้อเสียเรื่องการใช้เวลาค่อนข้างนานกว่าค่าพิกัดที่คำนวณได้จะลู่เข้า (converge) อาจใช้เวลาประมาณ 20 ถึง 40 นาที สำหรับเครื่องรับสัญญาณแบบหลายความถี่และแม่นยำ (accurate) สูง เป็นเพราะค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากวิธีการประมวลผลที่ใช้สมการผลรวมเชิงเส้นเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความล่าช้าของการเดินทางของสัญญาณในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ของข้อมูลการวัดสัญญาณรหัส (code measurement) ที่ชื่อ ionosphere-free linear combination แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าของการประมวลผลคลื่นพาห์จะเร็วกว่าข้อมูลสัญญาณรหัสจะให้ค่าพิกัดที่แม่นยำกว่า วิธีการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในพื้นที่ห่างไกลตัวเมืองที่โครงสร้างพื้นฐานในการระบุพิกัดไม่ครอบคลุมการใช้งาน

5. ผลลัพธ์

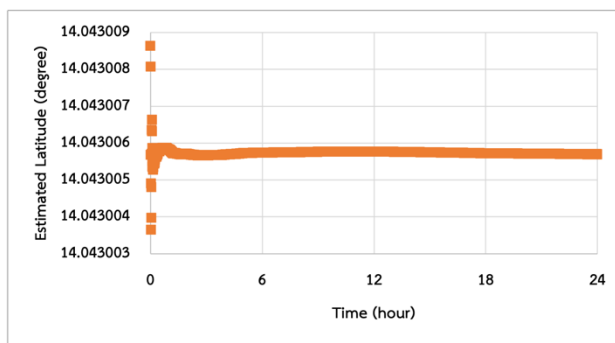
ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลผ่านเว็บไซต์ CSRS-PPP จะได้ค่าพิกัดในรูปแบบของพิกัดทรงกลม (spherical coordinate) ประกอบด้วยค่า ละติจูด (latitude) ลองจิจูด (longitude) และความสูงบนทรงรี (ellipsoidal height) ดังแสดงในรูปที่ 1-3 ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณและเวลาอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และค่าความล่าช้าของสัญญาณที่เดินทางผ่านบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ส่วนเปียก (wet part) ที่ได้จากการประมวลผลและส่วนแห้ง (dry part) ที่เกิดจากการค่าประมาณการล่วงหน้า (a priori value) ดังแสดงในรูปที่ 7-8 ตัวอย่างที่แสดงในกราฟเป็นผลใน 1 วัน คือวันที่ 31 ธันวาคม 2563 ตรงกับวันที่ 366 ของปี ตำแหน่ง

ประมาณการของเสาอากาศของเครื่องรับสัญญาณ เป็นดังแสดงในตารางที่ 1

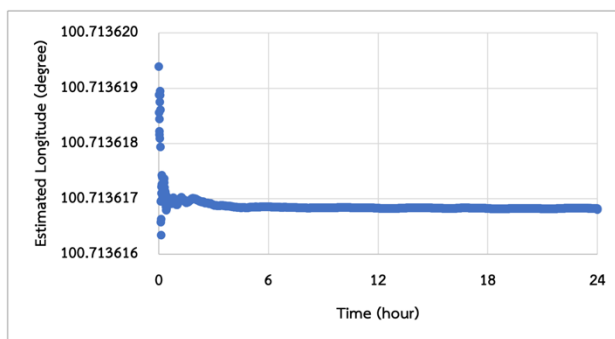
ตารางที่ 1 ค่าพิกัดและเวลาก่อนประมวลผล

ค่าพิกัดและเวลา	องศา ลิปตา ฟิลิปตา
ละติจูด	14.043006 North
ลองจิจูด	100.713606 East
ความสูงบนทรงรี	-7.4856 m
ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลา ระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับ สัญญาณและเวลาอ้างอิง	-13.90 ns

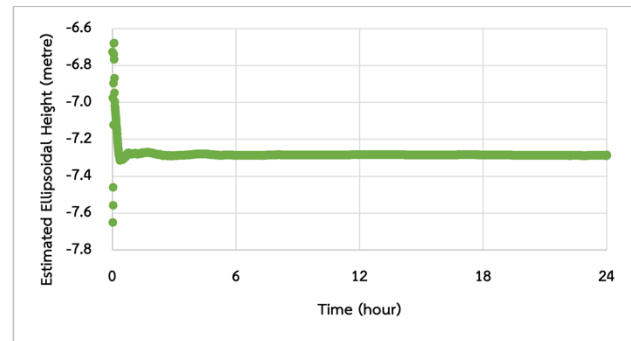
ค่าพิกัดก่อนการประมวลผลมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 1.23 เมตรในแนวราบและ 1.93 เมตรในแนวดิ่ง โดยการจัดเรียงตัวของดาวเทียมในขณะนั้นมีค่า HDOP = 0.3, VDOP = 0.6 และ GDOP = 1.0



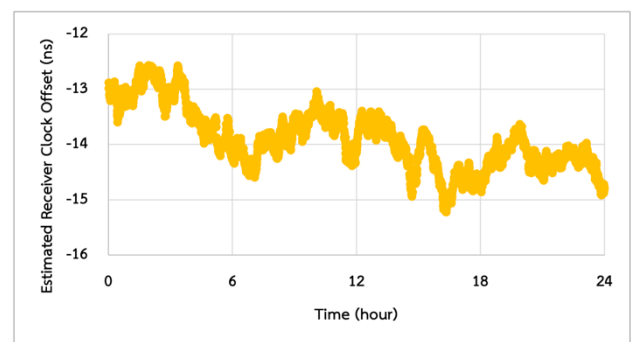
รูปที่ 4 ค่าละติจูด



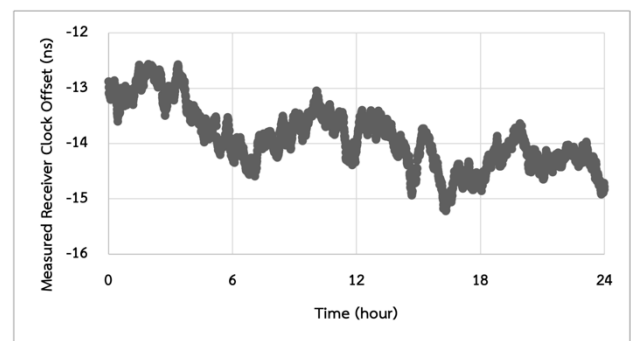
รูปที่ 5 ค่าลองจิจูด



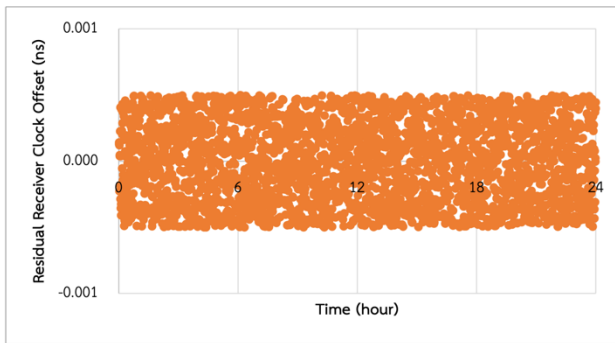
รูปที่ 6 ค่าความสูงบนทรงรี



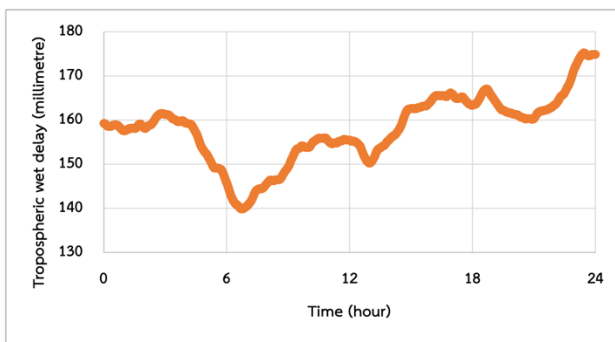
รูปที่ 7 ค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการคำนวณสำหรับการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ



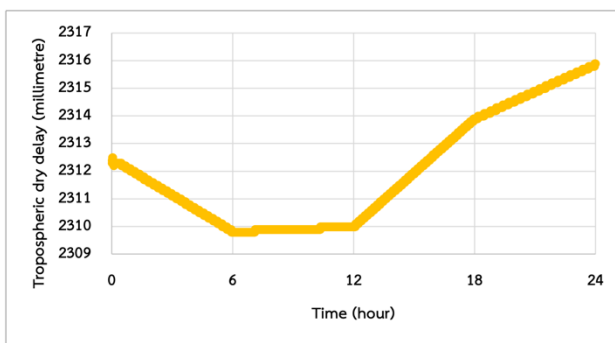
รูปที่ 8 ค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดสำหรับการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ



รูปที่ 9 ค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดลบค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ



รูปที่ 10 ค่าความล่าช้าของสัญญาณที่เดินทางผ่านบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนเปียก



รูปที่ 11 ค่าความล่าช้าของสัญญาณที่เดินทางผ่านบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) เพื่อแสดงผลในเชิงคุณภาพของการประมวลผลได้แก่ค่าความแม่นยำ ความเที่ยงตามลำดับ

ตารางที่ 2 สรุปผลค่าพิกัด เวลาและค่าความล่าช้าของสัญญาณที่เดินทางผ่านบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์หลังการประมวลผล

ค่าที่ได้จากการรับสัญญาณ GNSS	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ละติจูด	14.043006 North	1.01×10^{-07}
ลองจิจูด	100.713617 East	1.26×10^{-07}
ความสูงบนทรงรี	-7.2808 m	0.0327 m
ค่าคลาดเคลื่อนจากการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณและเวลาอ้างอิง	-13.90 ns	0.5531 ns
ค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดลบค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับการประสานเวลาระหว่างค่าเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ	-2.61×10^{-07} ns	3.0×10^{-04} ns
ค่าความล่าช้าของสัญญาณที่เดินทางผ่านบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนเปียก	157.93 mm	1.97 mm
ค่าความล่าช้าของสัญญาณที่เดินทางผ่านบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนแห้ง	2311.97 mm	7.62 mm
ผลรวม		0.0336 m

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการประมวลผลในภายหลังด้วยบริการชื่อ CSRS-PPP ของ Natural Resources Canada เป็นวิธีการระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำโดยอาศัยการรับสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากลทั้งสัญญาณรหัสและคลื่นพาห์รวมถึงค่าแก้ไขที่เที่ยงจาก IGS สำหรับตำแหน่งดาวเทียม เวลาของนาฬิกาบนดาวเทียมและค่าความล่าช้าที่เกิดจากการเดินทางของสัญญาณในชั้นบรรยากาศต่างๆ การรับสัญญาณครั้งนี้เป็นการใช้เครื่องรับสัญญาณแบบหลายความถี่และสามารถรับสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางได้หลายระบบเพื่อให้ได้ค่าพิกัดและค่าเวลาที่มีความเที่ยงระดับเซนติเมตรและนาโนวินาทีตามลำดับ หลังจากที่ใช้เวลาการลู่เข้าของสัญญาณประมาณ 40 นาที สำหรับการรับสัญญาณแบบสถิติ เพื่อใช้ในการเทียบสัญญาณเวลาของนาฬิกาอะตอมที่เครื่องรับสัญญาณ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบพระคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่ให้ดำเนินการศึกษาในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] BIPM. (9 February 2021). Time. [Online] Available: <https://www.bipm.org/en/bipm/tai/>
- [2] BIPM. (9 February 2021). BIPM Time Department Database. [Online] Available: <https://webtai.bipm.org/database/>
- [3] E.D. Kaplan and C.J. Hegarty (Editors), *Understanding GPS principles and applications*, second edition, Artech house, London, 2006.
- [4] IGS. (6 January 2021). FTP + HTTPS ACCESS, Orbit and Station and satellite clock products. [Online] Available: <https://www.igs.org/ftp-https-access/>
- [5] IGS. (9 February 2021). GNSS data center. [Online] Available: <https://igs.bkg.bund.de/dataandproducts/browse>

- [6] N. Pothikunkupatarak, T.Thongtan and C. Satirapod, "Estimations of GNSS receiver internal delay using precise point positioning algorithm," *Journal of Applied Geodesy*, September 2018.
- [7] NASA. (4 January 2021). CDDIS: NASA's Archive of Space Geodesy Data. GNSS product holdings. [Online] Available: https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/GNSS_product_holdings.html
- [8] NRCAN. (4 January 2021). Precise Point Positioning. Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) service. [Online] Available: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>
- [9] P. J. Teunissen and O. Montenbruck, *Carrier Phase Integer Ambiguity Resolution, Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (Springer Handbooks)*, Switzerland, Springer, 2017, p. 1327.
- [10] P. J. Teunissen and O. Montenbruck, *Surveying, Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (Springer Handbooks)*, Switzerland, Springer, 2017, p. 1327.