การพัฒนานาฬิกา NTP แบบฝังตัว

นายวีระวัฒน์ ดาทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED NTP CLOCK

Mr. Veerawat Dathong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนานาฬิกา NTP แบบฝังตัว
โดย	นายวีระวัฒน์ ดาทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ณัฐพล ประยงค์พันธุ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วีระวัฒน์ ดาทอง : การพัฒนานาฬิกา NTP แบบฝังตัว (DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED NTP CLOCK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 61 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนานาฬิกา NTP แบบฝังตัว ซึ่งได้ทำการประยุกต์ใช้ NTP โปรโตคอล ฝังตัวในนาฬิกาที่ทำการออกแบบขึ้นมา เพื่อสร้างนาฬิกาที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงและสามารถบอกถึงความน่าเชื่อถือและสถานะการทำงานต่างๆ ของตัวเองให้แก่ผู้ใช้งานได้ โดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องคอยตั้งเวลาให้ถูกต้องเสมอแบบนาฬิกาทั่วไป วิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายขั้นตอนการประยุกต์ใช้งาน, การวิเคราะห์ข้อมูลที่สำคัญ, และ Algorithm ต่างๆ ของโปรโตคอล NTP และ SNTP ซึ่งนาฬิกา NTP แบบฝังตัว ที่ทำการออกแบบขึ้นมานี้จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักที่สำคัญ คือส่วนของการประมวลผลหลักมีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานนาฬิกาและวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ของโปรโตคอล NTP, ส่วนของการบำรุงรักษาเวลามีหน้าที่ในการทำให้ข้อมูลเวลาให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดและส่วนของการแสดงผลมีหน้าที่ในการแสดงผลข้อมูลเวลาและสถานะต่างๆ ของนาฬิกา ซึ่งตัวนาฬิกาจะรองรับการใช้งานผ่านโปรโตคอล TCP/IP และผู้ใช้งานสามารถทำการปรับแต่งข้อมูลต่างๆ ของนาฬิกาผ่านทาง Webpage ที่ได้ทำการออกแบบสร้างไว้และนาฬิกาสามารถรองรับการเชื่อมต่อกับ NTP Server ได้สูงสุดถึง 5 NTP Server และด้วยการใช้ Algorithm ที่ได้ทำการออกแบบไว้ ข้อมูลเวลาของนาฬิกามีความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูงโดยมีอัตราการคลาดเคลื่อนของเวลาน้อยมากเพียง 0.0002% ถึง 0.00035% ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

5570383721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: NTP / SNTP / TIME MAINENANCE / HIGH PERFORMANCE CLOCK

VEERAWAT DATHONG: DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED NTP CLOCK. ADVISOR: ASST. PROF. MANOP WONGSAISUWAN, Ph.D., 61 pp.

This thesis describes the development of embedded NTP clock which applies NTP Protocol to embedded clock to realize the high accuracy and precision. The clock is able to inform the reliability and working status itself. By using the proposed system, users don't need to set the time habitually unlike other normal clocks. This thesis explains the process of applying, analyzing the data, and important detail of NTP and SNTP protocol. The embedded NTP clock consists of 3 main parts, which are the main processing part for controlling operation of the clock and analyzing NTP packet, the time maintenance process part for maintaining time data and keep its accuracy, and the display result process part for displaying the time data and the clock's working status. It's compatible with TCP/IP protocol and users can configure the embedded NTP clock via designed webpage. The clock support connectivity with NTP server up to 5 servers. By using proposed algorithm, the time data has high precision and accuracy, which appears the drift rate of time only 0.0002% to 0.00035% per second.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department: Electrical Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

กว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางและดูแลในทุกๆ ส่วนของวิทยานิพนธ์ตลอดมาเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา และ ดร. ณัฐพล ประยงค์พันธุ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและตรวจสอบเอกสารต่างๆ

ขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และวิทยาการ ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้และความสามารถในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับวิทยานิพนธ์ได้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบสมองกลฝังตัวและหุ่นยนต์ รวมถึงเพื่อนๆ จากห้องปฏิบัติการวิจัยอื่น สำหรับมิตรภาพอันดี การช่วยเหลือ และการให้กำลังใจ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยที่คอยให้ความเอื้อเฟื้อในเรื่องของสถานที่และอุปกรณ์

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในด้านการศึกษา การเรียนรู้และประสบการณ์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาอยู่ในสถาบันแห่งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่เลี้ยงดู อบรม และสั่งสอนข้าพเจ้า ญาติทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เป็นกำลังใจให้และให้คำแนะที่ดีจนทำให้โครงงานปริญญานิพนธ์ฉบับสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์ 1

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3. ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4. วิธีดำเนินงานวิจัย 2

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง 4

2.1. NTP Timestamp and Protocol Format 4

2.1.1. NTP Timestamp 5

2.1.2. NTP Protocol Message Format 5

2.1.3. Roundtrip Delay and Clock Offset 12

2.2. การศึกษา NTP Packet ขั้นต้น 13

2.3. Frequency Tolerance 18

2.4. DS3231 Extremely Accurate I^2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal 19

2.4.1. DS3231 Characteristics 20

บทที่ 3 การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบเครือข่ายทางด้านฮาร์ดแวร์ 21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.1. กระบวนการทำงานทางด้านฮาร์ดแวร์ 23
3.1.1. Communication Process 23
3.1.2. Update Time Process 23
3.1.3. Storage Data Process 24
3.1.4. Voltage Supply 25
3.2. การสร้าง Hardware 25
บทที่ 4 การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบเครือข่ายทางด้านซอฟต์แวร์ 28
4.1. กระบวนการทำงานทางด้าน Software 29
4.1.1. Preliminary Setup Process 29
4.1.2. Main Process 31
4.1.3. Check Drift Time and Notification Process 32
4.1.4. Display Process 33
4.2. การสร้าง Webpage 33
บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดลอง 36
5.1. Test Process 36
5.1.1. Communication Test 36
5.1.2. Display Data Test 39
5.1.3. Notification Test 40
5.1.4. Setup and Configuration Test 47
5.2. Experiment Process 52
บทที่ 6 ข้อสรุป และข้อเสนอแนะ 56
6.1. สรุปผล 56
6.2. ข้อเสนอแนะ 57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

รายการอ้างอิง 59

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 Leap Indicator of Message 6

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างการเกิด Leap Second ใน NTP Time Scales [5] 8

ตารางที่ 2-3 Mode of Message 9

ตารางที่ 2-4 Stratum of NTP 9

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่าง Kiss-o'Death Packet 10

ตารางที่ 2-6 ข้อมูล Timestamp ใน NTP Reply Packet 16

ตารางที่ 5-1 การแจ้งเตือนสถานะความน่าเชื่อถือของเวลาบนบอร์ดวงจรแสดงผล 41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 รูปแบบ Timestamp ของโปรโตคอล 5

รูปที่ 2-2 รูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างเซิร์ฟเวอร์และลูกข่าย NTP 5

รูปที่ 2-3 NTP Request/Reply Message 6

รูปที่ 2-4 ตัวอย่างการเกิด Leap Second 7

รูปที่ 2-5 Leap Second ที่เคยเกิดขึ้นในอดีตจนถึงปัจจุบัน และรูปที่ 2-6 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเวลา UTC และ UT1 8

รูปที่ 2-7 ลำดับ Stratum ของ NTP และตัวอย่างเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ให้บริการในประเทศไทย 10

รูปที่ 2-8 ตัวอย่าง Primary Reference Clock 11

รูปที่ 2-9 ลำดับเวลาการเกิด Timestamp 13

รูปที่ 2-10 NTP Request Message 13

รูปที่ 2-11 NTP Reply Message 14

รูปที่ 2-12 Header NTP Request Message 14

รูปที่ 2-13 การสื่อสารผ่าน UDP Port 123 15

รูปที่ 2-14 IP Address Header ของ NTP Reply Message 15

รูปที่ 2-15 Epoch Time 16

รูปที่ 2-16 Arrival Time (Destination Timestamp) 16

รูปที่ 2-17 กระบวนการปรับปรุงเวลา 17

รูปที่ 2-18 แสดงตัวอย่างการแจ้งเตือน Kiss Codes 17

รูปที่ 2-19 RTCC Block Diagram ของ PIC24FJ256GB106 18

รูปที่ 2-20 Tuning Fork Crystal Unit Standard Specification 18

รูปที่ 2-21 Typical Operating Circuit 19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2-22 I^2C Data Transfer Overview 20

รูปที่ 2-23 Data Write/Read (Write Pointer, Then Read)—Slave Receiver and Transmit 20

รูปที่ 3-1 System Architecture 21

รูปที่ 3-2 Hardware Block Diagram 22

รูปที่ 3-3 กระบวนการส่ง NTP request message ทางด้านฮาร์ดแวร์ 23

รูปที่ 3-4 กระบวนการรับ NTP reply message ทางด้านฮาร์ดแวร์ 23

รูปที่ 3-5 กระบวนการส่งข้อมูลจากหน่วยประมวลผลหลักไปยังอุปกรณ์ต่างๆ 24

รูปที่ 3-6 กระบวนการส่งข้อมูลไปยัง GPIO Interface เพื่อทำการแสดงผล 24

รูปที่ 3-7 Voltage Supply Interface 25

รูปที่ 3-8 Main Board 26

รูปที่ 3-9 Display Board 26

รูปที่ 3-10 12 VDC Lithium Polymer Battery และ 12 VDC Adapter 27

รูปที่ 3-11 ตัวนาฬิกาที่ทำการออกแบบและ Interface ต่างๆ สำหรับผู้ใช้งาน 27

รูปที่ 4-1 Software Block Diagram 29

รูปที่ 4-2 NTP Request Packet 30

รูปที่ 4-3 Preliminary Setup Flowchart 30

รูปที่ 4-4 Main Process Flowchart 31

รูปที่ 4-5 Check Drift Time Flowchart 33

รูปที่ 4-6 Index.html 34

รูปที่ 4-7 Ntppacket.html 34

รูปที่ 4-8 Ntpconfig.html 35

รูปที่ 4-9 Tcpconfig.html 35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5-1 ขั้นตอนการทดสอบและทดลอง 36
รูปที่ 5-2 สถานะการเชื่อมต่อถูกต้อง..... 37
รูปที่ 5-3 สถานะการเชื่อมต่อล้มเหลว..... 37
รูปที่ 5-4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อเครือข่าย LAN 37
รูปที่ 5-5 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน ในกรณีที่การเชื่อมต่อสำเร็จ 38
รูปที่ 5-6 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน ในกรณีที่การเชื่อมต่อล้มเหลว..... 38
รูปที่ 5-7 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านทาง Web Browser ในกรณีที่การเชื่อมต่อสำเร็จ 38
รูปที่ 5-8 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านทาง Web Browser ในกรณีที่การเชื่อมต่อล้มเหลว 39
รูปที่ 5-9 การแสดงผลข้อมูลผ่านบอร์ดวงจรแสดงผล..... 39
รูปที่ 5-10 การแสดงผลผ่านทางโปรแกรม Web Browser..... 40
รูปที่ 5-11 การแสดงผลเว็บเพจผ่านทางโทรศัพท์เคลื่อนที่ 40
รูปที่ 5-12 นาฬิกาแจ้งเตือนสถานะไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้ 41
รูปที่ 5-13 นาฬิกาแจ้งเตือนสถานะเชื่อถือได้ (Very High) และแสดงผลในกรณีที่นาฬิกาแจ้งเตือนเริ่มเกิดความคลาดเคลื่อน (High)..... 42
รูปที่ 5-14 นาฬิกาแจ้งเตือนสถานะไม่สามารถเชื่อถือได้ (Unreliable status)..... 42
รูปที่ 5-15 Ntppacket.html แสดงผลแจ้งเตือน Stratum = 0 43
รูปที่ 5-16 Ntppacket.html แจ้งเตือน ในกรณีที่ทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ Stratum-1 NTP.. 44
รูปที่ 5-17 Ntppacket.html แจ้งเตือน ในกรณีที่ทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ Stratum-2 NTP.. 44
รูปที่ 5-18 การแสดงผลของ NTPconfig.html ในกรณีที่นาฬิกาทำงานปรกติ..... 45
รูปที่ 5-19 การแสดงผลของ NTPconfig.html ในกรณีที่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP 46
รูปที่ 5-20 การทดสอบการเปลี่ยนการเชื่อมต่อเซิร์ฟเวอร์ NTP ของนาฬิกา..... 47
รูปที่ 5-21 Ntpconfig.html และการแสดงผลก่อนทดสอบปรับแต่งข้อมูล..... 48

รูปที่ 5-22 ผลจากการทดสอบตั้งค่าข้อมูลใหม่ 48
รูปที่ 5-23 ข้อมูล TCP/IP ของนาฬิกา ก่อนทำการทดสอบตั้งค่าใหม่ 49
รูปที่ 5-24 แสดงผลการใช้งาน Static IP Address 50
รูปที่ 5-25 ข้อมูล TCP/IP ของนาฬิกาหลังจากทดสอบทำการตั้งค่า 51
รูปที่ 5-26 การตั้งค่าเพื่อใช้งานโปรแกรม Docklight 51
รูปที่ 5-27 Prolific USB-to-Serial Communication และโปรแกรม Docklight เมื่อพร้อมใช้งาน 52
รูปที่ 5-28 UART Configuration Button และโปรแกรม Docklight หลังจากทำการกดปุ่ม UART Configuration Button 52
รูปที่ 5-29 เวลาเริ่มต้นในการทดลอง 53
รูปที่ 5-30 ข้อมูลเวลาเริ่มมีความคลาดเคลื่อน 53
รูปที่ 5-31 ทดลองทำการเชื่อมต่อกับ 2.europe.pool.ntp.org 54
รูปที่ 5-32 NTP Reply Packet ที่ได้รับ 54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

เวลาเป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่ง ที่มีบทบาทอย่างมาก ต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ทุกคน โดยเวลานั้นจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับการหมุนรอบตัวเองและการโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลก ซึ่งมนุษย์จะใช้ประโยชน์จากเวลา เพื่ออธิบาย เปรียบเทียบ หรือเป็นกฎเกณฑ์ร่วมกันในสังคมแห่งการดำรงชีวิต

ในปี พ.ศ. 2510 (ค.ศ.1967) ได้มีการประชุมด้านมาตรฐานหน่วยวัด (*The 13th General Conference on Weights and Measures*, French) ขึ้นที่ประเทศฝรั่งเศส ในการประชุมครั้งนี้ มีการกำหนดให้ การรับและปลดปล่อยพลังงานในการเปลี่ยนระดับสถานะของอะตอมซีเซี่ยม-133 (Cesium-133) ครบ 9,192,631,770 รอบ มีค่าเวลาเทียบเท่ากับเวลา 1 วินาที [1] และกำหนดเป็นมาตรฐานสากลเรียกว่า มาตรฐาน SI Second เพื่อเป็นมาตรฐานวินาที ให้มนุษย์สามารถใช้ในการอ้างอิงมาตรฐานเวลาเดียวกัน

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการบอกเวลาให้มีความถูกต้องและแม่นยำนั้นยังคงมีข้อจำกัดอยู่ ไม่ว่าจะเป็นเกิดขึ้นจากการถูกจำกัดทางกายภาพ (Physical) หรือเนื่องจากการถูกจำกัดด้วยความล่าช้าในการส่งข้อมูล (Transmission Delay) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนาโปรโตคอล NTP (Network Time Protocol) ขึ้น เพื่อเป็นโปรโตคอลเฉพาะด้านสำหรับใช้ในการทำให้คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ในระบบเครือข่ายนั้นสามารถทำงานทำงานได้อย่างมีมาตรฐานร่วมกัน

ในประเทศไทยได้มีการริเริ่มที่จะให้ความสำคัญกับความเที่ยงตรงและความแม่นยำของเวลาอย่างจริงจัง โดยในปี พ.ศ. 2556 รัฐสภาไทยได้ใช้งบประมาณเป็นจำนวนเงิน 15 ล้านบาท ในการวางระบบนาฬิกาบอกเวลาให้กับอาคารรัฐสภาเพื่อให้ได้มาซึ่งเวลาที่มีความแม่นยำสูง แต่ยังไรก็ตามหากเราพิจารณาที่ราคาจะเห็นว่าระบบที่กล่าวมานี้ยังคงมีราคาต้นทุนที่สูงมากอยู่ [2]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ การออกแบบระบบฝังตัวใช้งานร่วมกับโปรโตคอล NTP ประยุกต์เข้ากับกระบวนการักษาเวลา เพื่อสร้างนาฬิกานั้นมีความเที่ยงตรง แม่นยำ และรองรับการ

ประยุกต์ใช้ทฤษฎีและคุณสมบัติของโปรโตคอล NTP เข้ากับนาฬิกาได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้นาฬิกาที่มีราคาเหมาะสมและสามารถเชื่อถือได้

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทำการสร้าง Development of Embedded NTP Clock
2. เพื่อทดสอบ Development of Embedded NTP Clock
3. เพื่อสรุปผลทดลองการใช้งาน Development of Embedded NTP Clock

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

1. นาฬิกามีความเที่ยงตรงสูงที่สามารถรองรับมาตรฐานโปรโตคอล NTP (Network Time Protocol) และ SNTP (Simple Network Time Protocol)
2. นาฬิกาจะรองรับมาตรฐานโปรโตคอล NTP Version 1, 2, 3 และ 4 และ SNTP Version 1, 2 และ 3
3. นาฬิกาที่สร้างสามารถรองรับการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP สูงสุดได้ 5 เซิร์ฟเวอร์โดยตัวนาฬิกาจะทำหน้าที่เป็นลูกข่าย NTP (NTP Client)
4. นาฬิกาเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายผ่านโปรโตคอล TCP/IP Stack และตัวนาฬิกาจำเป็นต้องติดตั้งอยู่ในบริเวณที่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต
5. นาฬิกาจะประยุกต์ใช้ DS3231 Module เป็นอุปกรณ์จ่ายความถี่หลักใช้สำหรับกระบวนการบำรุงรักษาเวลา
6. นาฬิกาสามารถแจ้งเตือนถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของตัวนาฬิกาเองได้ โดยจะแบ่งระดับการแจ้งเตือนออกเป็น 5 ระดับ
7. ผู้ใช้งานสามารถทำการปรับแต่งค่าต่างๆ (Configuration) ของนาฬิกาผ่านทางหน้าเว็บเพจและ UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) Interface

1.4. วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับโปรโตคอล NTP อาทิเช่น RFC 958, RFC 1059, RFC 1305, RFC 4330, RFC 5905 ฯลฯ

2. ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานโปรโตคอล NTP
3. ศึกษาเกี่ยวกับ TCP/IP Stack และการประยุกต์ใช้งาน
4. ศึกษาเกี่ยวกับการเขียน MCU เพื่อใช้งานในด้านการเชื่อมต่อกับ TCP/IP Stack
5. ศึกษาการใช้งาน โปรโตคอล NTP ผ่าน MCU
6. เขียนโปรแกรมเพื่อประยุกต์ใช้งาน NTP เข้ากับ MCU และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับและออกแบบการแจ้งเตือนผู้ใช้งานที่เหมาะสม
7. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์และจัดหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการสร้างนาฬิกา
8. เขียน Schematic และออกแบบลายวงจรและประกอบอุปกรณ์
9. ทดสอบนาฬิกา
10. ตรวจสอบและแก้ไขอุปกรณ์และสรุปผล

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้นาฬิกาต้นแบบรองรับการประยุกต์ใช้งาน โปรโตคอล NTP
2. ได้นาฬิกาที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลความถูกต้องของเวลาที่ได้รับและสามารถในการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของตัวนาฬิกาเองได้ โดยที่ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องคอยทำการตั้งค่าความถูกต้องของเวลา
3. ได้นาฬิกาต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง มีความเที่ยงตรงสูง สามารถเชื่อถือได้และต้นทุนต่ำ

Chulalongkorn University

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

โปรโตคอล NTP (Network Time Protocol) เป็นโปรโตคอลประเภทหนึ่งที่มีใช้งานอยู่บนระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับใช้ในการเรียกข้อมูลเวลา เพื่อทำให้เวลาของคอมพิวเตอร์ในระบบเครือข่ายตรงกับมาตรฐาน Coordinate Universal Time (UTC) ตัวโปรโตคอลจะมีลักษณะพื้นฐานเป็น User Datagram Protocol (UDP) มีลักษณะการส่งข้อมูลแบบไร้การเชื่อมต่อ (Connectionless) ตัวโปรโตคอลถูกพัฒนาขึ้นมาจาก Time Protocol และโปรโตคอล ICMP (Internet Control Message Protocol) โดย Professor Devid L. Mills จาก University of Delaware ประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1985

โปรโตคอล SNTP (Simple Network Time Protocol) คือโปรโตคอลที่ประยุกต์ใช้โปรโตคอล NTP และสามารถใช้คุณสมบัติต่างๆ ของ โปรโตคอล NTP ได้ทั้งหมด รูปแบบโครงสร้างของโปรโตคอล SNTP จะสามารถปฏิบัติการบน IPV4, IPV6 และ OSI Model ต่างๆ ได้เต็มประสิทธิภาพ ตัวโปรโตคอล SNTP จะมุ่งเน้นไปยังการประยุกต์ใช้งานโปรโตคอล NTP เข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ทางด้านระบบเครือข่ายต่างๆ โดยเฉพาะ ซึ่งข้อกำหนดและข้อบังคับใช้ต่างๆ ที่มีในโปรโตคอล NTP จะไม่มีข้อแตกต่างเมื่อนำมาประยุกต์ใช้บนโปรโตคอล SNTP

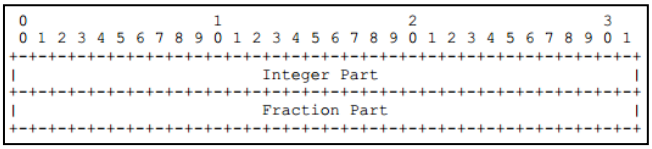
งานวิจัยมากมายที่เกี่ยวข้องกับโปรโตคอล NTP และโปรโตคอล SNTP จะมุ่งเน้นไปที่การรักษาเวลาให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรง ในสถานที่ๆ เวลาหรือนาฬิกานั้นไม่สามารถที่จะเชื่อถือได้

2.1. NTP Timestamp and Protocol Format

Request for Comment (RFC) คือพื้นฐานสำคัญสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาด้านเทคนิคและมาตรฐานโปรโตคอลต่างๆ ที่มีใช้งานอยู่บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จัดทำและรวบรวมข้อมูลโดย Internet Engineering Task Force (IETF) โดยเอกสาร RFC ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับโปรโตคอล NTP จะประกอบด้วย RFC 958, RFC 1059, RFC 1305, RFC 4330 และ RFC 5905 เป็นต้น

2.1.1. NTP Timestamp

ในเอกสาร RFC 958 : Network Time Protocol (NTP) [3] เริ่มแรกนั้น ได้มีการกำหนดให้ Timestamp ของโปรโตคอล NTP ให้มีรูปแบบเป็นโปรโตคอล 64 บิตแบ่งเป็นสองส่วนคือ 32 บิตแรกจะเป็นส่วนของ Integer และ 32 บิตหลังจะเป็นส่วนของ Fraction ดังรูปที่ 2-1

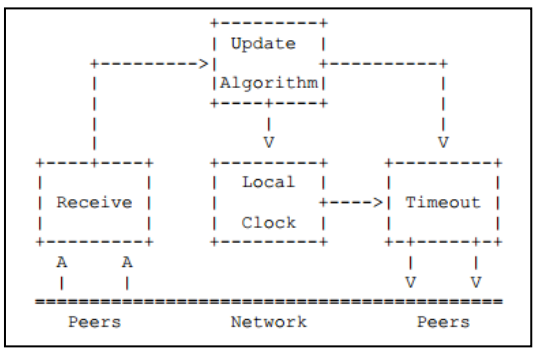


รูปที่ 2-1 รูปแบบ Timestamp ของโปรโตคอล

รูปแบบของโปรโตคอลลักษณะนี้จะช่วยให้การคำนวณความแม่นยำและการแปลงค่าต่างๆ สะดวกขึ้นเพราะเป็นรูปแบบที่ไม่ซับซ้อน โดยเวลาที่ใช้ในการแปลงค่า NTP Timestamp Message เป็น ICMP Timestamp Message นั้น จะใช้เวลาเพียงไม่กี่มิลลิวินาที ซึ่งแต่ละช่วงของ integer bit และ fraction bit จะใช้เวลาในการแปลงค่าเพียง 0.2 นาโนวินาทีต่อบิตเท่านั้น

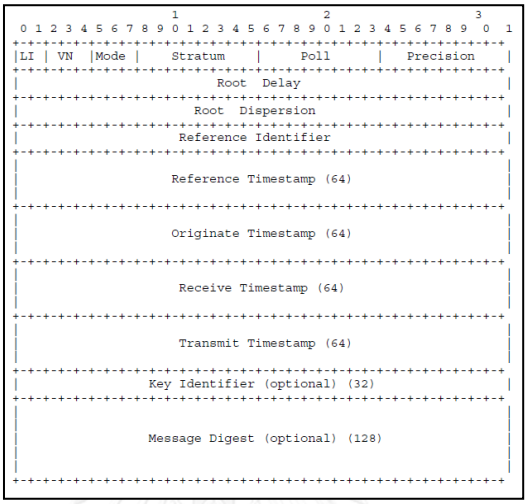
2.1.2. NTP Protocol Message Format

โปรโตคอล NTP และ SNTP จะมีลักษณะเป็นโปรโตคอล UDP และใช้ UDP port หมายเลข 123 เป็นช่องทางหลักในการติดต่อสื่อสาร เริ่มแรกลูกข่าย NTP หรือ SNTP จะทำการส่ง NTP request message สำหรับการเรียกข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ NTP เมื่อเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้รับ NTP request message ก็จะทำการสับเปลี่ยน Header ของ NTP request message บรรจุข้อมูลและตอบกลับเป็น NTP reply message ส่งไปยังลูกข่าย NTP แล้วลูกข่าย NTP ก็จะนำ NTP reply message ที่ได้รับมาทำการปรับปรุงเวลา ลักษณะตัวอย่างดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 รูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างเซิร์ฟเวอร์และลูกข่าย NTP

เมื่อลูกข่าย NTP ได้รับ NTP reply message แล้ว ก็จะเริ่มทำการนับ Timeout เป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อถึงครบเวลา Timeout ที่กำหนดแล้วลูกข่าย NTP ก็จะทำการวนส่ง NTP request message ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP อีกครั้ง โดยโครงสร้างรูปแบบของ NTP, SNTP request/reply message จะมีลักษณะดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 NTP Request/Reply Message

ส่วนประกอบและตัวแประต่างๆ ที่อยู่ใน NTP request/reply message จะประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ มีดังต่อไปนี้

- Leap Indicator (LI) เป็นตัวแปร 2 บิต สำหรับแจ้งเตือน Leap Indicator ลักษณะการแจ้งเตือนนั้น จะมีลักษณะที่จะเป็นตามลักษณะดังตารางที่ 2-1

Status	Meaning
0	No warning
1	Last minute has 61 seconds
2	Last minute has 59 seconds
3	Alarm condition (Clock not synchronized)

ตารางที่ 2-1 Leap Indicator of Message

โดยในปัจจุบันนี้มีการใช้นาฬิกา Cesium-Beam มากกว่า 200 เรือน จาก 50 ห้องปฏิบัติการวิจัยทั่วโลกในการบำรุงรักษาเวลาให้เวลาที่ได้มานั้นมีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด

เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลกใช้เวลาในการหมุนที่ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นกับโลก สถาบัน Bureau International de l' Heure (BIH) จากประเทศฝรั่งเศสได้ใช้ข้อมูลการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์จากสถาบัน US Naval Observatory ประเทศสหรัฐเมริกา เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยการหมุนรอบตัวเองของโลก หากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมากเกินไป จะทำการแจ้งเตือน Leap Second ขึ้น

Leap Second มีอยู่ 2 กรณีคือ Negative Leap Second และ Positive Leap Second ในกรณี Negative Leap Second จะมีการปรับเวลาในวินาทีสุดท้ายของวันเป็น 23:59:58 (Negative Leap Second ยังไม่เคยมีการเกิดขึ้น) ส่วน Positive Leap Second จะมีการปรับวินาทีสุดท้ายของวันเป็น 23:59:60

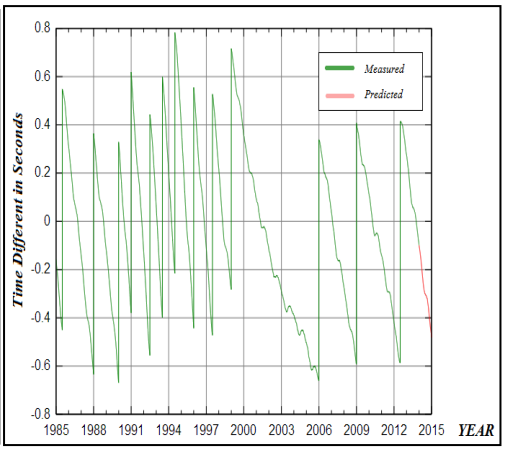
Leap Second จะมีการแจ้งเตือนและปรับค่าในวันสุดท้ายของเดือนมิถุนายนหรือเดือนธันวาคมแล้วแต่จะกำหนดดังรูปที่ 2-4 จะแสดงตัวอย่างของ Leap Second ที่เกิดขึ้นจริงในวันสุดท้ายของเดือนธันวาคมปี 2012 [4]

รูปที่ 2-4 ตัวอย่างการเกิด Leap Second

Leap Second ที่เกิดขึ้นมานี้ ทำให้เกิดความแต่งต่างระหว่างเวลา International Atomic Time (TAI) และ UTC Time เนื่องจากเวลา TAI นั้นนับวินาที SI Second อย่างต่อเนื่องและคงที่โดยไม่นับ Leap Second แต่เวลา UTC นั้นจะนับ Leap Second ด้วยเพื่อให้เวลาที่ได้นั้นสอดคล้องกับการหมุนของโลก โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1972 มาถึงปัจจุบันได้มีการเกิด Leap Second แล้ว 25 ครั้งด้วยกันและ UTC นั้นช้ากว่าเวลา TAI อยู่แล้ว 10 วินาที ทำให้มาตรฐานเวลา UTC ห่างจากเวลา TAI อยู่ 35 วินาที

ข้อดีของ Leap Second อีกประการคือการทำให้เวลา UTC และเวลา UT1 (Solar Time standard) มีความใกล้เคียงกันมากที่สุดและมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 วินาที เมื่อเกิด Leap Second ขึ้น NTP จะทำการหยุดเดินไป 1 วินาที (Freeze) และหลังจากนั้น เมื่อสิ้นสุดการแจ้งเตือนก็จะกลับมาเดินตามปกติ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2-2

Year	Jun 30	Dec 31	Year	Jun 30	Dec 31	Year	Jun 30	Dec 31
1972	+1	+1	1987	0	+1	2001	0	0
1973	0	+1	1988	0	0	2002	0	0
1974	0	+1	1989	0	+1	2003	0	0
1975	0	+1	1990	0	+1	2004	0	0
1976	0	+1	1991	0	0	2005	0	+1
1977	0	+1	1992	+1	0	2006	0	0
1978	0	+1	1993	+1	0	2007	0	0
1979	0	+1	1994	+1	0	2008	0	+1
1980	0	0	1995	0	+1	2009	0	0
1981	+1	0	1996	0	0	2010	0	0
1982	+1	0	1997	+1	0	2011	0	0
1983	+1	0	1998	0	+1	2012	+1	0
1984	0	0	1999	0	0	2013	0	0
1985	+1	0	2000	0	0	2014	0	
1986	0	0	*Total Leap Second (1972 - 2014) = 25 Seconds*					



รูปที่ 2-5 Leap Second ที่เคยเกิดขึ้นในอดีตจนถึงปัจจุบัน และรูปที่ 2-6 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเวลา UTC และ UT1

Date	Time	TAI/UTC Offset	NTP Leap	NTP Seconds
31 Dec 1998	23:59:59	31	01	3,124,137,599
	23:59:60	31	01	3,124,137,600
1 Jan 1999	00:00:00	32	00	3,124,137,600
	00:00:01	32	00	3,124,137,601

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างการเกิด Leap Second ใน NTP Time Scales [5]

- Version Number (LI) เป็นตัวแปร Integer 3 บิต สำหรับแสดงรุ่นของ NTP request message ที่ลูกข่าย NTP หรือ SNTP ใช้ โดยรุ่นล่าสุดของโปรโตคอล NTP คือ Version 4 (RFC 5905) และในปัจจุบันรุ่นของโปรโตคอล NTP ที่รองรับการใช้งานอยู่คือ NTP Version 1 (RFC 1059), NTP Version 2 (RFC 1119), NTP Version 3 (RFC 1305), และ NTP Version 4 (RFC 5905) กำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนา

- Mode เป็นตัวเลข 3 บิต สำหรับแสดงโหมดของ NTP request/reply message ในการติดต่อกันระหว่างเซิร์ฟเวอร์และลูกข่าย NTP นั้น ลูกข่าย NTP จะส่ง NTP request message โหมด 3 ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP แล้วเซิร์ฟเวอร์ NTP จะทำการใส่ข้อมูลต่างๆ ให้กับ Message แล้วเปลี่ยนโหมดของ Message เป็นโหมด 4 แล้วส่ง NTP reply message กลับไปยังลูกข่าย NTP, SNTP ซึ่งโหมดต่างๆ ของ Message แสดงดังตารางที่ 2-3

Status	Meaning
0	Reserved
1	Symmetric active
2	Symmetric passive
3	Client
4	Server
5	Broadcast
6	Reserved for NTP control message
7	Reserved for private use

ตารางที่ 2-3 Mode of Message

- Stratum เป็นตัวแปร Unsigned Integer 8 บิต สำหรับแสดง Stratum ของเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ลูกข่าย NTP, SNTP ทำการส่ง NTP request message ไปขอข้อมูล โดยค่าการแสดงผลของ Stratum แสดงดังตารางที่ 2-4

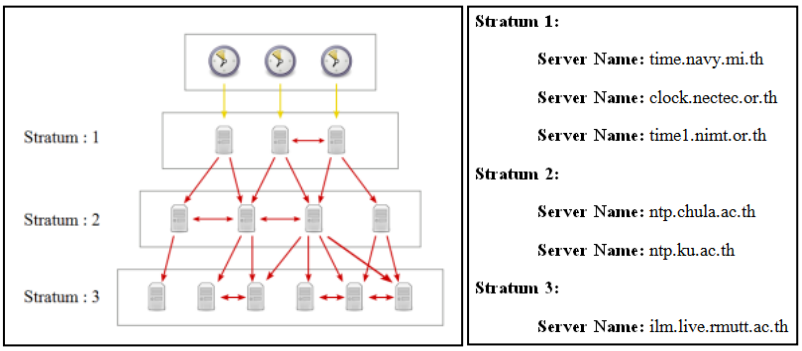
Status	Meaning
0	Kiss-o'-Death Message
1	Primary Reference (e.g., synchronized by radio clock)
2-15	Secondary Reference (synchronized by NTP or SNTP)
16-255	Reserved

ตารางที่ 2-4 Stratum of NTP

เนื่องจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซิร์ฟเวอร์และลูกข่าย NTP มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นลำดับชั้นหรือ Stratum โดยเซิร์ฟเวอร์ Stratum-1 NTP จะเชื่อมต่ออยู่กับนาฬิกาอ้างอิง (Reference Clock) เป็นเซิร์ฟเวอร์หลัก และเซิร์ฟเวอร์ Stratum-2 NTP เป็นเซิร์ฟเวอร์อันดับรองจะเชื่อมต่อใช้เวลาอ้างอิงจากเซิร์ฟเวอร์ Stratum-1 NTP เป็นต้น แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2-7

หาก Stratum ใน Message แสดงเป็นเลข 0 (Unspecified) หมายความว่าเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ลูกข่าย NTP ส่ง NTP request message ไปหานั้น มีปัญหาอยู่ ไม่พร้อมสำหรับการใช้งาน หรือการเชื่อมต่อนั้นไม่ถูกต้องเซิร์ฟเวอร์ NTP จะส่ง Packet ที่เรียกว่า Kiss-o'Death

(KoD) Packet (Kiss codes) เพื่อรายงานปัญหาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการเชื่อมต่อ ตารางที่ 2-5 แสดงตัวอย่างของ Kiss-o'Death Packet



รูปที่ 2-7 ลำดับ Stratum ของ NTP และตัวอย่างเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ให้บริการในประเทศไทย

Code	Meaning
ACST	The association belongs to a anycast server.
AUTH	Server authentication failed.
AUTO	Auto key sequence failed.
BCST	The association belongs to a broadcast server.
CRYP	Cryptographic authentication or identification failed
DENT	Access denied by remote server.
DROP	Lost peer in symmetric mode.
RSTR	Access denied due to local policy.
INIT	The association has not yet synchronized for the first time
MCST	The association belongs to a manycast server.
NKEY	No key found. Either the key was never installed is not trusted.
RATE	Rate exceeded. The server has temporarily denied access because the client exceeded the rate threshold.
RMOT	Somebody is tinkering with the association from a remote host running ntpdc. Not to worry unless some rascal has stolen your keys.
STEP	A step change in system time has occurred, but the association has not yet resynchronized.

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่าง Kiss-o'Death Packet

- **Poll Interval** เป็นตัวแปร Unsigned Integer 8 บิต สำหรับบอกค่าช่วงเวลามากสุดที่ใช้ในกระบวนการส่ง Message ค่าที่แสดงนี้จะอยู่ในรูปแบบของตัวเลขชี้กำลังสอง มีช่วงตั้งแต่ 4 (16 วินาที) ถึง 17 (131,072 วินาที หรือประมาณ 36 ชั่วโมง) ค่า Poll Interval เป็นสิ่งที่เซิร์ฟเวอร์ NTP แจ้งลูกข่าย NTP เกี่ยวกับระยะเวลาอย่างน้อยที่ลูกข่าย NTP จะส่ง NTP request message มายังเซิร์ฟเวอร์อีกครั้ง

ยกตัวอย่างเช่น หากใน NTP reply message แจ้งว่ามีค่า Poll Interval = 2 หมายความว่าลูกข่าย NTP จะต้องทิ้งระยะเวลาอย่างน้อย 4 วินาที ($2^{\text{Poll Interval}}$) จากการส่ง NTP request message ครั้งแรก ลูกข่าย NTP จึงสะสามารถส่ง Message ไปยังเซิร์ฟเวอร์ได้อีกครั้งหนึ่ง

- Precision เป็น Signed Integer 8 บิต มีค่าเป็นตัวเลขกำลังสอง สำหรับใช้บอกค่าความเที่ยงตรงของนาฬิกาอ้างอิงของเซิร์ฟเวอร์ NTP ในระดับวินาที โดยจะมีช่วงตั้งแต่ -6 ถึง -20

ยกตัวอย่างเช่น หากใน NTP reply message แจ้งค่า Precision = 16 หมายความว่าความเที่ยงตรงของนาฬิกาอ้างอิงของเซิร์ฟเวอร์ NTP มีค่าประมาณ $2^{(-\text{Precision})}$ = 15 มิลลิวินาที

- Root Delay เป็นตัวแปร Signed fixed-point number 32 บิต สำหรับแจ้งค่าความล่าช้าของในการส่งข้อมูลที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นทางข้อมูล ในกรณีที่เซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ลูกข่าย NTP ทำการเชื่อมต่อ เป็นเซิร์ฟเวอร์ Stratum-2 NTP ลงมา

- Root Dispersion เป็นตัวแปร Unsigned fixed-point number 32 บิต สำหรับแจ้งค่าความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดมาจาก Clock Frequency Tolerance ของเซิร์ฟเวอร์

- Reference Identifier เป็นตัวแปร String 32 บิต สำหรับระบุประเภทของนาฬิกาอ้างอิงที่เซิร์ฟเวอร์ NTP ทำการเชื่อมต่ออยู่ ตัวอย่างการแจ้งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2-8

Code	External Reference Source
LOCL	uncalibrated local clock
CESM	calibrated Cesium clock
RBDM	calibrated Rubidium clock
PPS	calibrated quartz clock or other pulse-per-second source
IRIG	Inter-Range Instrumentation Group
ACTS	NIST telephone modem service
USNO	USNO telephone modem service
PTB	PTB (Germany) telephone modem service
TDF	Allouis (France) Radio 164 kHz
DCF	Mainflingen (Germany) Radio 77.5 kHz
MSF	Rugby (UK) Radio 60 kHz
WWV	Ft. Collins (US) Radio 2.5, 5, 10, 15, 20 MHz
WWVB	Boulder (US) Radio 60 kHz
WWVH	Kauai Hawaii (US) Radio 2.5, 5, 10, 15 MHz
CHU	Ottawa (Canada) Radio 3330, 7335, 14670 kHz
LORC	LORAN-C radionavigation system
OMEG	OMEGA radionavigation system
GPS	Global Positioning Service

รูปที่ 2-8 ตัวอย่าง Primary Reference Clock

ในกรณีที่ Stratum ของ NTP reply message แจ้งเป็น 0 กล่าวคือ NTP Server ที่เรากำลังเชื่อมต่อมีปัญหาอยู่หรือการเชื่อมต่อนั้นไม่ถูกต้อง Reference Identifier ยังใช้เป็นตัวแปรที่ใช้แจ้ง Kiss-o' Death Packet เพื่อแจ้งปัญหาให้ลูกข่าย NTP ทราบอีกด้วย

- Reference Timestamp มีรูปแบบเป็น Timestamp 64 บิต แสดงข้อมูลเวลาล่าสุดที่ลูกข่าย NTP ได้ทำการปรับปรุงเวลา

- Originate Timestamp มีรูปแบบเป็น Timestamp 64 บิต แสดงข้อมูลเวลาที่ NTP request message ออกมาจากลูกข่าย NTP ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP

- Receive Timestamp มีรูปแบบเป็น Timestamp 64 บิต แสดงข้อมูลเวลาที่เซิร์ฟเวอร์ NTP นั้นได้รับ NTP request message ที่ถูกส่งมาจากลูกข่าย NTP

- Transmit Timestamp มีรูปแบบเป็น Timestamp 64 บิต แสดงข้อมูลเวลาที่ NTP reply message ถูกส่งจากเซิร์ฟเวอร์ไปยังลูกข่าย

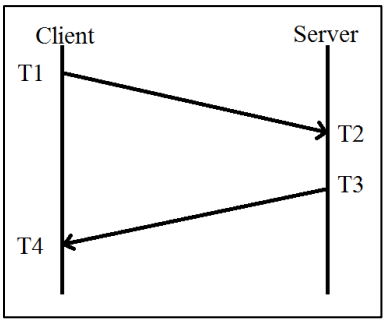
- Authenticator (Optional) เมื่อมีการประยุกต์ใช้ NTP authentication scheme จะมีการใช้ Message Authentication Code (MAC) ของลูกข่ายเป็นตัวระบุ Key Identifier (32 bit) และ Message digest fields (128 bit)

2.1.3. Roundtrip Delay and Clock Offset

จากข้อมูลข้างต้น เราสามารถใช้ข้อมูลจาก Originate Timestamp (t_1), Receive Timestamp (t_2), Transmit Timestamp (t_3), และเวลาที่ลูกข่าย NTP รับ NTP Reply Packet (t_4) สำหรับในการหาค่าเวลารับ/ส่ง NTP packet จากเซิร์ฟเวอร์ (Roundtrip Delay : δ) และเวลาที่แตกต่างกันระหว่างเซิร์ฟเวอร์และลูกข่าย (Clock Offset : θ) ด้วยสมการที่ 2-1 และสมการที่ 2-2 ตามลำดับ และรูปที่ 2-9 แสดงลำดับเวลาการเกิดขึ้นของแต่ละ Timestamp

$$\delta = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) \tag{2-1}$$

$$\theta = \frac{(t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)}{2} \tag{2-2}$$

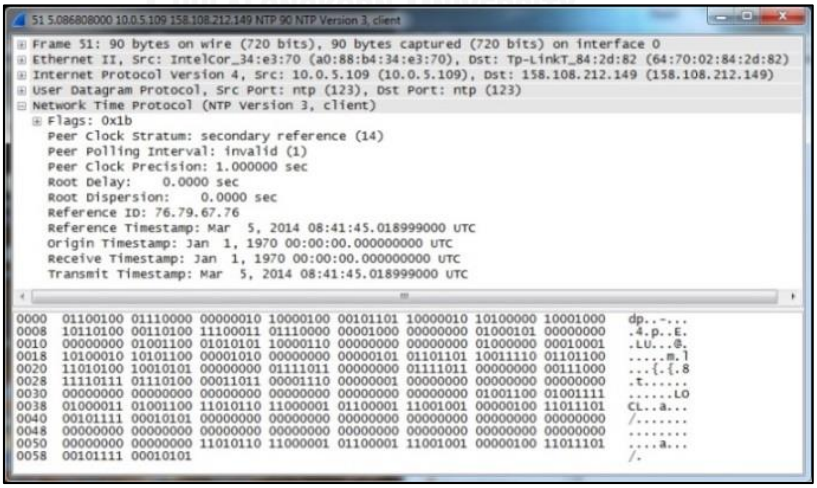


รูปที่ 2-9 ลำดับเวลาการเกิด Timestamp

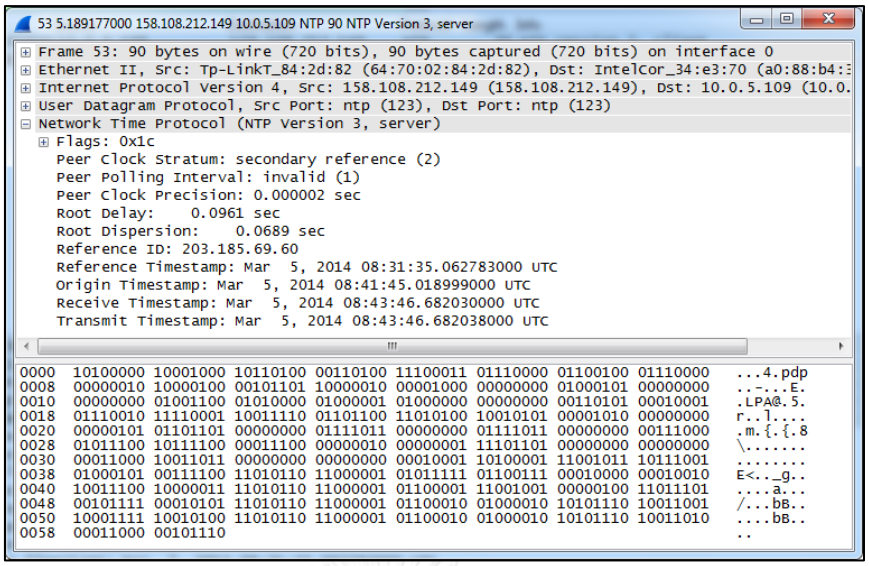
Roundtrip Delay เป็นสิ่งที่บอกถึงระยะเวลาที่ลูกข่าย NTP ใช้ในการส่ง NTP request message ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP และเซิร์ฟเวอร์ NTP ส่ง NTP reply message กลับไปยังลูกข่ายและ Clock Offset คือค่าเวลาที่แตกต่างกันระหว่างเซิร์ฟเวอร์และลูกข่าย โดยลูกข่ายจะใช้ข้อมูล Clock Offset นี้ มาทำการปรับปรุงเวลา ต่อไป

2.2. การศึกษา NTP Packet ขั้นต้น

ในขั้นต้นเราได้ทำการทดลองส่ง NTP request message ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP ntp.ku.ac.th หมายเลข IP Address คือ 158.108.212.149 (เซิร์ฟเวอร์ Stratum-2 NTP) และรอรับ NTP reply message โดยใช้โปรแกรม Wire Shark ในการตรวจจับ Packet แสดงดังรูปที่ 2-10 และรูปที่ 2-11 ตามลำดับ

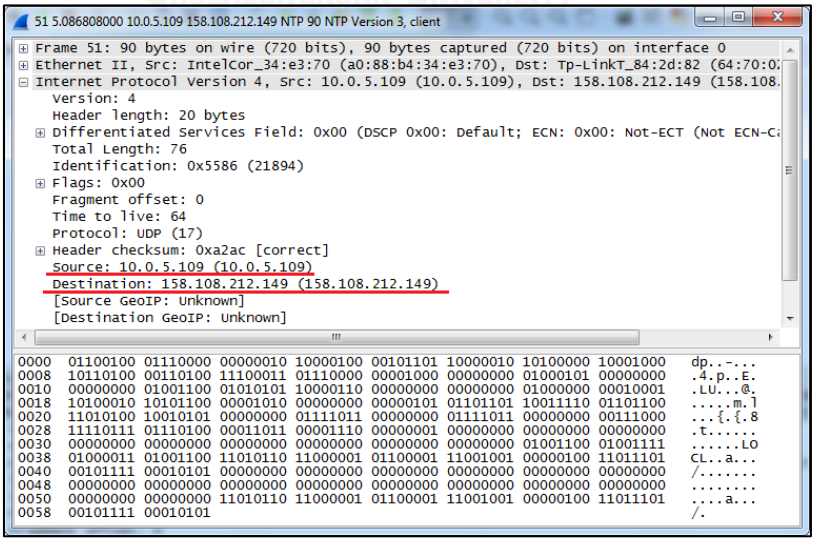


รูปที่ 2-10 NTP Request Message

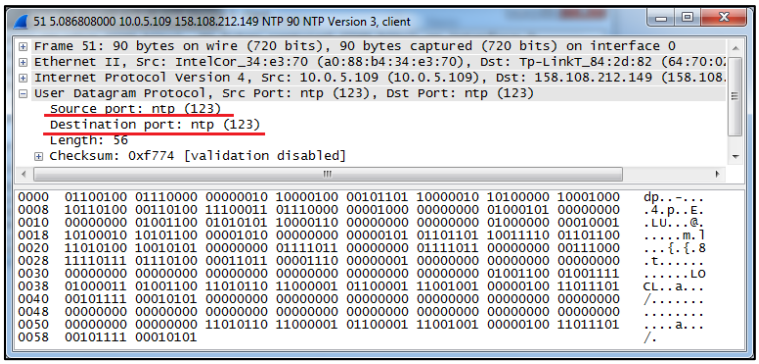


รูปที่ 2-11 NTP Reply Message

ส่วนของ NTP request message มีขนาด 720 บิต ประกอบด้วย Transmit Timestamp ซึ่งจะเป็นตัวบอกเวลาที่ส่ง NTP request message จากลูกข่าย NTP โดยใช้เวลาจากนาฬิกาของลูกข่าย NTP เป็นตัวระบุเวลา ในที่นี้ เวลาที่ใช้ส่ง NTP request message คือเวลา 08:41:45.01899 ตามมาตรฐาน UTC (GMT+0) และส่วนหัวของโปรโตคอลจะประกอบด้วย IP Address ของลูกข่าย NTP ในที่นี้คือ 10.0.5.109 (Source) และ IP Address ของเซิร์ฟเวอร์ NTP (Destination) คือ 158.108.212.149 แสดงดังรูปที่ 2-12 โดยสื่อสารกันผ่านทาง UDP Port 123 รูปที่ 2-13 ตามลำดับ

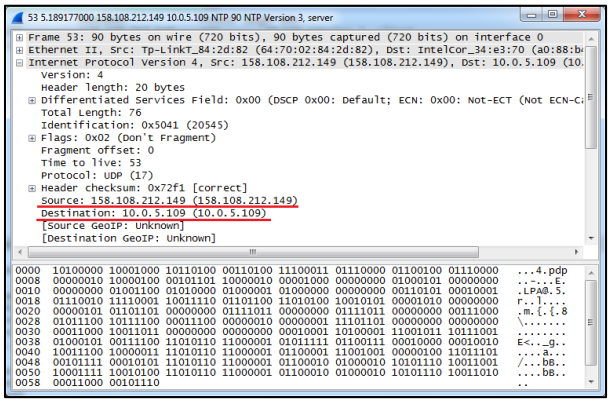


รูปที่ 2-12 Header NTP Request Message

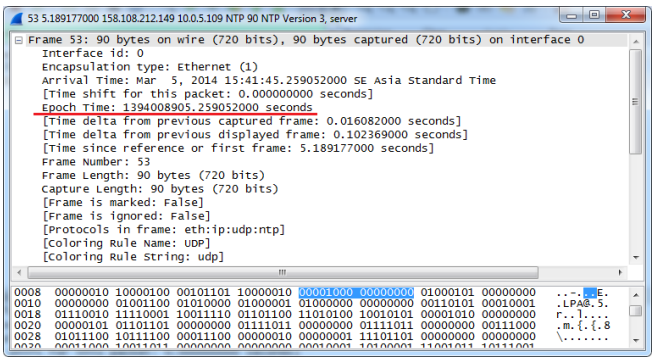


รูปที่ 2-13 การสื่อสารผ่าน UDP Port 123

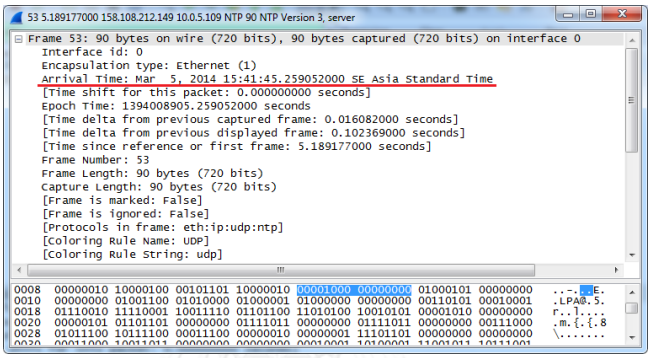
ส่วนของ NTP reply message มีขนาด 720 บิต โดยส่วนหัวของ Packet จะทำการสลับระหว่าง Source และ Destination IP Address ที่ได้รับจาก NTP request message และส่ง Packet กลับไปยังลูกข่าย ดังรูปที่ 2-14 โดยเซิร์ฟเวอร์จะติดต่อกลับไปยังลูกข่ายผ่านทาง UDP Port 123 เช่นเดียวกัน ส่วนหัวของโปรโตคอลนั้นจะประกอบด้วยตัวแปร Epoch Time เป็นตัวแปรที่แสดงวินาที UTC ที่ทำการเริ่มนับวินาทีตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ปี ค.ศ. 1900 เวลา 00:00:00 นาฬิกา จนถึงวินาทีปัจจุบัน ดังแสดงดังรูปที่ 2-15 ณ เวลาปัจจุบันจะมีค่าวินาทีเป็น 1,394,008,905.259052 วินาที ส่วนของตัวแประ Clock stratum จะแสดงค่า Stratum ของเซิร์ฟเวอร์ที่เราทำการเชื่อมต่อในที่นี้อยู่บน Stratum 2 ในส่วนของ Reference ID จึงแสดงข้อมูล IP Address อ้างอิงที่เซิร์ฟเวอร์ทำการเชื่อมต่ออยู่ ในที่นี้คือ 203.185.69.60 (time1.nmt.or.th เป็นเซิร์ฟเวอร์ NTP ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ) Reference Timestamp คือเวลาครั้งล่าสุดที่เซิร์ฟเวอร์ NTP ทำการปรับปรุงเวลาและ Arrive Time (Destination Timestamp) คือเวลาที่ลูกข่าย NTP ได้รับ NTP reply message (GMT+7) แสดงดังรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-14 IP Address Header ของ NTP Reply Message



รูปที่ 2-15 Epoch Time



รูปที่ 2-16 Arrival Time (Destination Timestamp)

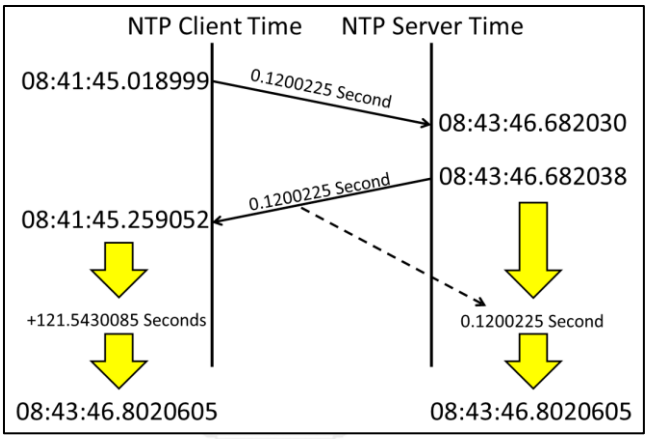
จากตัวอย่าง NTP reply message ที่ได้รับ เราจะสามารถคำนวณค่า Roundtrip Delay และ Offset Clock ระหว่างลูกข่ายและเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้จากสมการ 2-1 และ 2-2 ซึ่งจะกำหนดให้ตัวแปรต่างๆ มีค่าดังตารางที่ 2-6

Timestamp	ID	Time
Originate Timestamp	T1	08:41:45.018999
Receive Timestamp	T2	08:43:46.682030
Transmit Timestamp	T3	08:43:46.682038
Destination Timestamp	T4	08:41:45.259052

ตารางที่ 2-6 ข้อมูล Timestamp ใน NTP Reply Packet

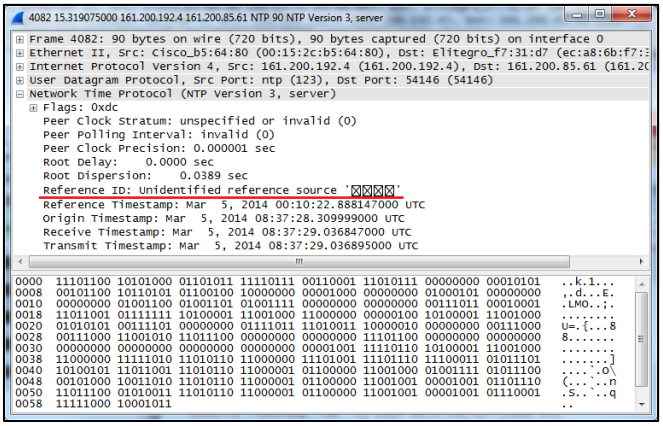
จากสมการและตัวแปรข้างต้น ผลที่ได้คือระบบจะมีค่า Roundtrip Delay = 0.240045 วินาที และมีค่า Offset Clock ระหว่างลูกข่ายและเซิร์ฟเวอร์ = +121.5430085 วินาที

เมื่อสามารถทำการหาค่า Roundtrip Delay และ Clock Offset มาแล้ว ลูกข่าย NTP จะนำค่า Clock Offset มาเพิ่มเข้ากับเวลาของลูกข่ายในกรณีที่ Clock Offset มีค่าเป็นบวก และจะนำค่า Clock Offset มาลบกับเวลาของตัวเองในกรณีที่ Clock Offset มีค่าเป็นลบ ในที่นี้ค่า Clock Offset มีค่าเท่ากับ +121.5430085 วินาที ลูกข่าย NTP จะทำการเพิ่มค่า Clock Offset เข้าไปในเวลาของตัวเองจะได้เวลาใหม่คือ 08:43:46.8020605 และในขณะเดียวกันเมื่อเวลาผ่านไป 0.1200225 วินาที (Roundtrip Delay/2) เวลาเซิร์ฟเวอร์ NTP จะมีค่าเวลาคือ 08:43:46.8020605 เวลาของลูกข่ายและเซิร์ฟเวอร์ NTP จะมีเวลาที่ตรงกัน แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 กระบวนการปรับปรุงเวลา

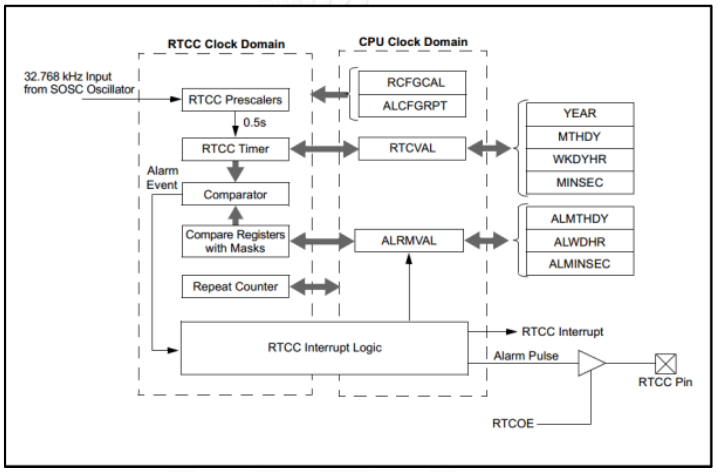
ในกรณีที่ NTP reply message นั้น มีการแจ้งเตือน Kiss-o'-Death packet (Kiss Codes) ซึ่งจะแจ้งเตือนลูกข่าย NTP ให้ทราบว่า ในขณะนี้เซิร์ฟเวอร์อยู่ในสถานะที่ไม่ปกติ โดยการแจ้งเตือนนี้จะแจ้งเตือนผ่านทางตัวแปร Stratum (มีค่า = 0) และ Reference ID แสดงดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 แสดงตัวอย่างการแจ้งเตือน Kiss Codes

2.3. Frequency Tolerance

ในการวิเคราะห์ค่า Drift Time ของนาฬิกาของลูกข่าย NTP สามารถวิเคราะห์ได้จากค่า Frequency Tolerance ของระบบ ค่า Frequency Tolerance คือค่าความคลาดเคลื่อนความถี่ของอุปกรณ์กำเนิดความถี่ของระบบ อาทิเช่น Crystal, Oscillator, หรือ Pulse Generator อื่นๆ เป็นต้น เราสามารถตรวจสอบค่า Frequency Tolerance ได้จากคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์กำเนิดความถี่ที่จ่ายสัญญาณนาฬิกาให้กับ RTCC (Real Time Clock and Calendar) ของหน่วยประมวลผล ดังรูปที่ 2-19 แสดงตัวอย่าง RTCC ของหน่วยประมวลผล PIC24FJ256GB106 โดยในคุณลักษณะเฉพาะของหน่วยประมวลผล ระบุให้ใช้ Crystal กำเนิดความถี่มีค่า = 35.768 kHz



รูปที่ 2-19 RTCC Block Diagram ของ PIC24FJ256GB106

ศูนย์วิทยทรัพยากร
Chulalongkorn University

และอุปกรณ์กำเนิดความถี่ที่ใช้สำหรับ RTCC ของ PIC24FJ256GB106 คือ Tuning Fork Crystal Units 32.7680 KHz Type CFS-308 จะมีค่า Frequency Tolerance = ± 20 PPM [6] แสดงดังรูปที่ 2-20

Item \ Model		CFS-308	CFS-206	CFS-145	CFV-206	Conditions
Nominal Frequency	f_0	32.768kHz			30kHz~100kHz	Need to contact us for the available frequency in CFV-206
Frequency Tolerance	$\triangle f/f_0$	±20ppm			±30ppm	at 25°C
Load capacitance	C_L	12.5pF		8.0pF	12.5pF	Need to specify your requirement
Operating Temperature Range	T_{OPR}	−20°C~+70°C				
Storage Temperature Range	T_{STR}	−40°C~+85°C				
Turnover Temperature	T_M	25°C±5°C				See figure 2 in P4
Temperature Coefficient	β	−0.034±0.006ppm/°C²				
Motional (series) resistance	R_1	35KΩ Max.		40KΩ Max.	50KΩ Max.	at 25°C
Level of drive	D_L	1μW Max.				
Aging (first year)	$\triangle f/f_0$	±3ppm Max.			±5ppm Max.	25°C±3°C
Quality Factor	Q	85000 Typ.	70000 Typ.	85000 Typ.	70000~100000 Typ.	Depend on frequency
Shunt capacitance	C_0	1.6pF Typ.	1.35pF Typ.	1.00pF Typ.	0.8~1.7pF Typ.	Depend on frequency

รูปที่ 2-20 Tuning Fork Crystal Unit Standard Specification

จากข้อมูลข้างต้น เราสามารถคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนเวลา (Drift Time) และอัตราการคลาดเคลื่อน (Drift Rate) ได้จากสมการที่ 2-3 และ 2-4 ตามลำดับ

$$\text{Drift Time} = \frac{(1{,}000{,}000 \times \text{Required Accuracy(Sec)})}{\text{Frequency Tolerance}} \quad (2\text{-}3)$$

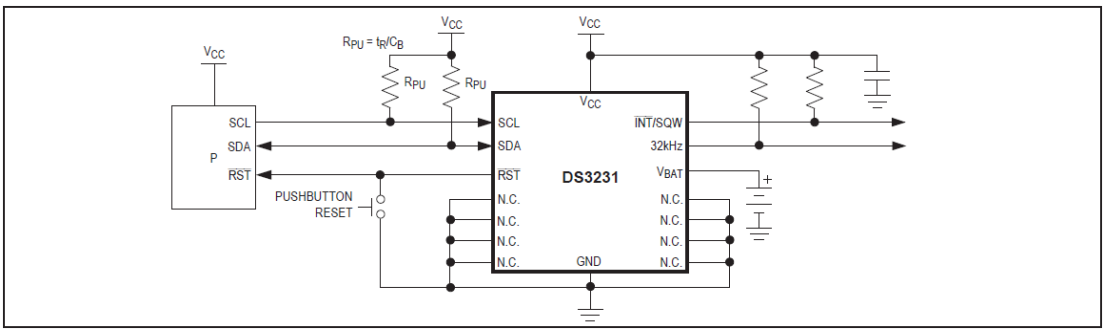
$$\text{Drift Rate} = \frac{\text{Frequency Tolerance} \times 100}{1{,}000{,}000} \quad (2\text{-}4)$$

จากสมการ เมื่อนำมาคำนวณข้อมูลโดยกำหนดให้ Required Accuracy = 1 และ Frequency Tolerance = 20 เราจะได้ค่า Drift Time = 50,000 หมายความว่าเมื่อเวลาผ่านไป 50,000 วินาที (13 ชั่วโมง 53 นาที 20 วินาที) เวลาของนาฬิกาจะคลาดเคลื่อนไป $\pm$ 1 วินาที และ Drift Rate มีค่าเท่ากับ 0.002% ต่อวินาที หมายความว่า System Clock มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2×10^{-5} ต่อวินาที

2.4. DS3231 Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

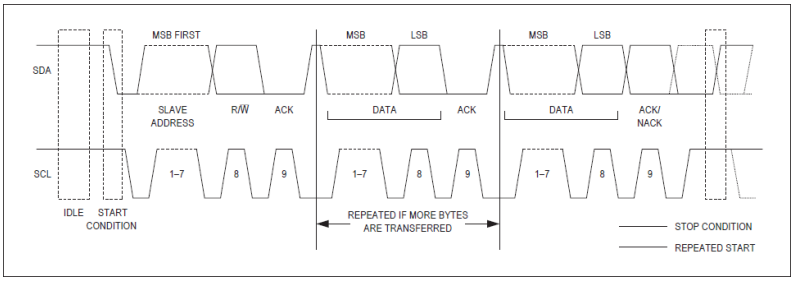
DS3231 Module คืออุปกรณ์ Real-Time Clock (RTC) ราคาต่ำ ภายในมีอุปกรณ์ Temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) สำหรับชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ใช้สำหรับรักษาเวลาของระบบ ประกอบด้วยข้อมูลเวลาในระดับ วินาที, นาที, ชั่วโมง, วัน, เดือน, ปี เป็นต้น

ข้อดีของอุปกรณ์ DS3231 Module อีกประการหนึ่งก็คือ การต่อวงจรเพื่อใช้งานนั้นไม่มีความซับซ้อนมากนัก แสดงดังรูปที่ 2-21

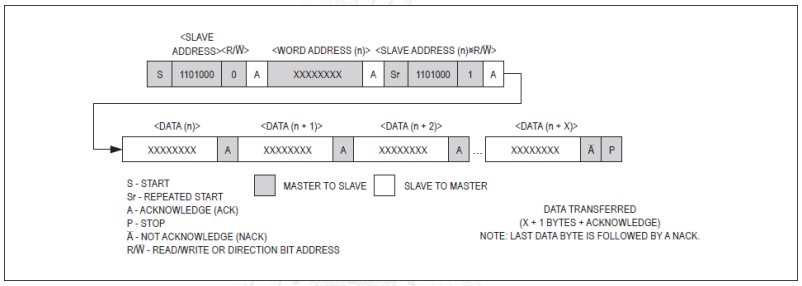


รูปที่ 2-21 Typical Operating Circuit

ในการใช้งานติดต่อสื่อสารระหว่างหน่วยประมวลผลกับอุปกรณ์ สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ผ่านทาง I^2C Interface แสดงรูปที่ 2-22 และรูปที่ 2-23 ตามลำดับ



รูปที่ 2-22 I^2C Data Transfer Overview



รูปที่ 2-23 Data Write/Read (Write Pointer, Then Read)—Slave Receiver and Transmit

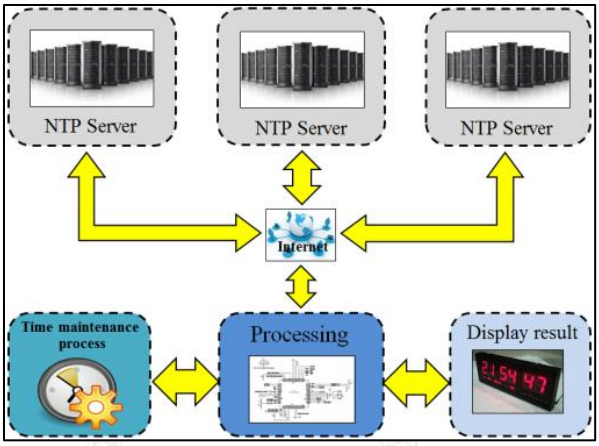
2.4.1. DS3231 Characteristics

คุณสมบัติที่สำคัญของอุปกรณ์ DS3231 คือตัวอุปกรณ์จะมีค่า Frequency Tolerance เพียงแค่ ± 2 PPM (DS3231S# : 0°C to +40°C) หรือมีค่า ± 3.5 PPM (DS3231SN# : -40°C to +85°C) [7] และจากการใช้สมการที่ 2-3 และ 2-4 ในการหาค่า Drift Time และ Drift Rate จะได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไป 500,000 วินาที (5 วัน 18 ชั่วโมง 53 นาที 20 วินาที) เวลาของนาฬิกาจะคลาดเคลื่อนไป ± 1 วินาที (± 2 PPM) และ Drift Rate มีค่าเท่ากับ 0.0002% ต่อวินาที หมายความว่านาฬิกาจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $2x10^{-6}$ ต่อวินาที (± 2 PPM) และอีกกรณีหนึ่ง คือ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 285,714 วินาที (≈ 3 วัน 7 ชั่วโมง 21 นาที 54 วินาที) เวลาของนาฬิกาจะคลาดเคลื่อนไป ± 1 วินาที (± 3.5 PPM) และ Drift Rate มีค่าเท่ากับ 0.00035% ต่อวินาที หมายความว่านาฬิกามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $3.5x10^{-6}$ ต่อวินาที (± 3.5 PPM) เป็นต้น

บทที่ 3

การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบเครือข่ายทางด้านฮาร์ดแวร์

ในส่วนของการออกแบบนาฬิกา NTP แบบฝังตัว (Embedded NTP Clock) ทางด้านฮาร์ดแวร์จะออกแบบโดยพิจารณาจาก 4 กระบวนการหลักคือ ส่วนของการติดต่อสื่อสารระหว่างนาฬิกาและเซิร์ฟเวอร์ NTP, ส่วนของหน่วยประมวลผลหลัก, ส่วนของการบำรุงรักษาความแม่นยำของข้อมูลเวลา, และส่วนของการแสดงผล แสดงดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 System Architecture

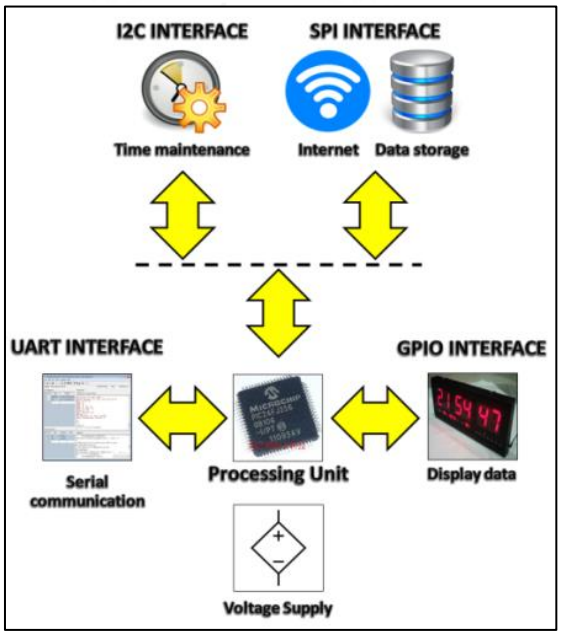
กระบวนการทำงานของนาฬิกาจะเริ่มต้นจาก ส่วนของการติดต่อสื่อสารระหว่างนาฬิกาและเซิร์ฟเวอร์ NTP โดยหน่วยประมวลผลจะทำการส่ง NTP request packet ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP และเมื่อหน่วยประมวลผลได้รับ NTP reply packet กลับมาจากเซิร์ฟเวอร์ NTP ก็จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของ Packet หาก NTP reply packet ที่หน่วยประมวลผลรับมานั้นถูกต้อง หน่วยประมวลผลจะทำการคำนวณ Roundtrip Delay (δ) และ Clock Offset (θ) โดยใช้สมการที่ 2-1 และ 2-2 ตามลำดับ

เมื่อกระบวนการขั้นต้นเสร็จสิ้น หน่วยประมวลผลจะทำการเริ่มนับ Request Timeout และวิเคราะห์ข้อมูลภายใน Packet แล้วส่งข้อมูลเวลาไปยังส่วนของการบำรุงรักษาเวลา และในส่วนนี้จะส่งข้อมูลเวลาไปยังส่วนของการแสดงผล ในขณะเดียวกันหน่วยประมวลผลจะคอยตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและแจ้งสถานะความถูกต้องแก่ผู้ใช้งาน จนกระทั่งครบรอบการนับ

เวลาของ Request Timeout หน่วยประมวลผลจึงทำการส่ง NTP request packet ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP อีกครั้งหนึ่ง

สำหรับการออกแบบและสร้างนาฬิกาในส่วนของฮาร์ดแวร์ ส่วนของหน่วยประมวลผลหลักของนาฬิกาจะใช้ PIC24FJ256GB106 Microcontroller เป็นตัวประมวลผลหลักของนาฬิกา NTP แบบฝังตัวและจะติดต่อสื่อสารข้อมูลกับส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- **SPI Interface** จะประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญหลักคือ ZG2100MC Wi-Fi Transceiver Module สำหรับติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและ 25LC1024 EEPROM สำหรับงานด้านหน่วยความจำและเก็บข้อมูลต่างๆ
- **I^2C Interface** จะเชื่อมต่อกับ DS3231 Module สำหรับกระบวนการด้านการบำรุงรักษาเวลา
- **GPIO Interface** ใช้สำหรับงานแสดงผลเวลาและสถานะต่างๆ ของนาฬิกา โดยจะใช้อุปกรณ์ 74HC595 Shift Register เพื่อแสดงผลชุดข้อมูล
- **UART Interface** สำหรับผู้ใช้งาน เพื่อทดสอบ กำหนดค่าและปรับแต่งข้อมูลต่างๆ ผ่านทาง Serial Communication Port
- **Voltage Supply** สำหรับจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ภายในนาฬิกา NTP

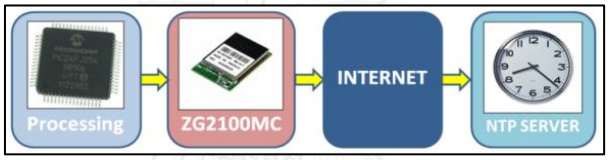


รูปที่ 3-2 Hardware Block Diagram

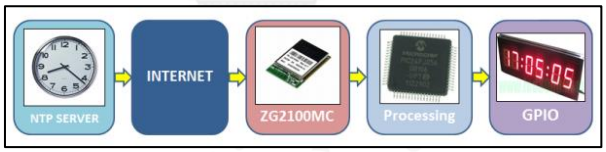
3.1. กระบวนการทำงานทางด้านฮาร์ดแวร์

3.1.1. Communication Process

ขั้นตอนแรกของการทำงานจะเริ่มต้นจากการสื่อสารระหว่างนาฬิกาและเซิร์ฟเวอร์ NTP โดยหน่วยประมวลผลหลักจะทำการส่ง NTP request message ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่กำหนดไว้ การส่งข้อมูล NTP request packet จะถูกส่งจาก Microcontroller Unit ไปยังอุปกรณ์ ZG2100MC Wi-Fi Transceiver Module ผ่าน SPI Interface ดังรูปที่ 3-3 และเมื่อเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้รับ NTP request packet ก็จะทำการส่ง NTP reply packet ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต กลับไปยังอุปกรณ์ ZG2100MC Wi-Fi Transceiver Module เข้าสู่หน่วยประมวลผลเพื่อทำการปรับปรุงข้อมูลต่างๆ ต่อไป แสดงดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-3 กระบวนการส่ง NTP request message ทางด้านฮาร์ดแวร์



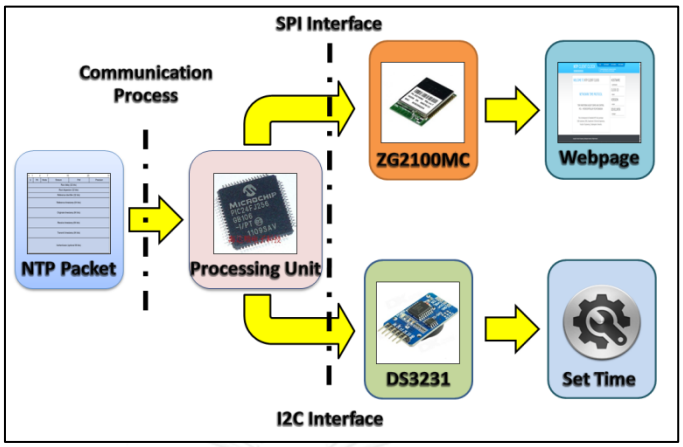
รูปที่ 3-4 กระบวนการรับ NTP reply message ทางด้านฮาร์ดแวร์

3.1.2. Update Time Process

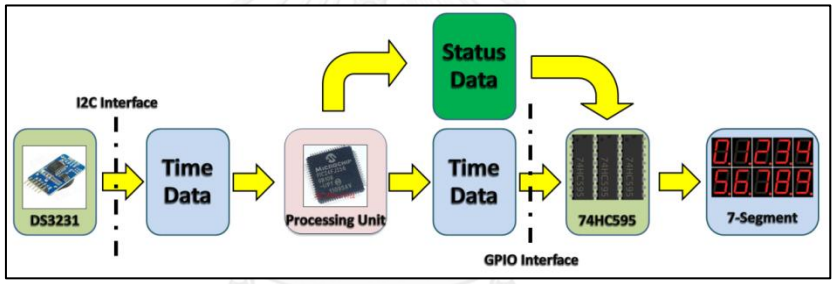
เมื่อหน่วยประมวลผลหลักได้รับ NTP reply packet กลับมาแล้ว ก็จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของ Packet (อธิบายเพิ่มเติมในบทที่ 4) เมื่อได้รับ NTP reply packet ที่ถูกต้อง ก็จะส่งข้อมูลเวลาผ่าน I^2C Interface ไปยังอุปกรณ์ DS3231 Module เพื่อตั้งค่าข้อมูลเวลาให้กับ DS3231 Module และจะส่งข้อมูลต่างๆ ของ NTP reply packet กลับไปยังอุปกรณ์ ZG3100MC เพื่อทำการบรรจุขึ้นไปแสดงบนหน้าเว็บเพจ แสดงดังรูปที่ 3-5

หลังจากที่อุปกรณ์ DS3231 Module ได้รับข้อมูลเวลา ก็จะทำการตั้งค่าเวลาใหม่แล้วส่งข้อมูลเวลากลับไปยังหน่วยประมวลผลหลัก แล้วหน่วยประมวลผลหลักก็ส่งชุดข้อมูลเวลาเหล่านี้ไปยัง 74HC595 shift register ผ่าน GPIO Interface เพื่อทำการแสดงผลบน LED 7-

Segment และในขณะเดียวกันหน่วยประมวลผลหลักก็จะแสดงผลสถานะต่างๆ ของนาฬิกา NTP แบบฝังตัวผ่านทาง GPIO Interface เช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-5 กระบวนการส่งข้อมูลจากหน่วยประมวลผลหลักไปยังอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 3-6 กระบวนการส่งข้อมูลไปยัง GPIO Interface เพื่อทำการแสดงผล

3.1.3. Storage Data Process

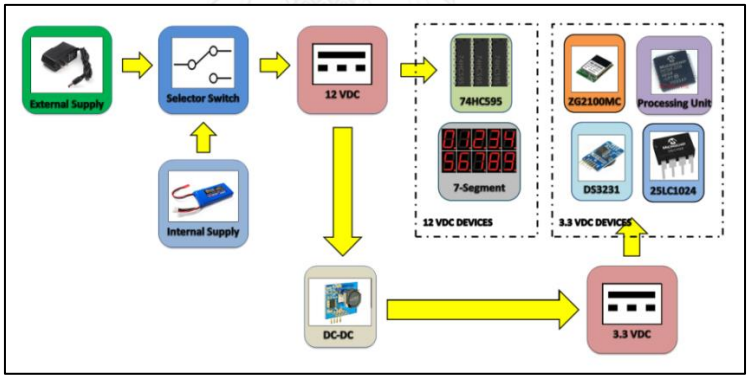
ในกรณีที่ผู้ใช้งานทำการเริ่มต้นการทำงานนาฬิกาใหม่อีกครั้งหนึ่ง หน่วยประมวลผลหลักจำเป็นต้องทำการเก็บบันทึกตัวแปรบางตัวไว้เพื่อใช่งานต่อ อาทิเช่น ข้อมูลรายชื่อเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่นาฬิกาทำการเชื่อมต่อ, ข้อมูลเกี่ยวกับทางด้านการเชื่อมต่อบนระบบเครือข่าย เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้อุปกรณ์ 25LC1024 EEPROM สำหรับเก็บข้อมูลดังกล่าวเอาไว้ เมื่อนาฬิกา NTP ทำการเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้ง ข้อมูลเหล่านี้ก็จะยังคงอยู่

ขณะที่หน่วยประมวลผลหลักกำลังทำงานอยู่ หากผู้ใช้งานทำการปรับแต่งค่าหรือเปลี่ยนข้อมูลต่างๆ ข้อมูลหรือตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงค่าไปนั้น จะถูกเก็บไว้ในอุปกรณ์ 25LC1024 EEPROM ด้วยเช่นกัน โดยเมื่อมีการเริ่มต้นการทำงานนาฬิกา NTP ใหม่อีกครั้ง การทำงานขั้นตอนแรกของนาฬิกาจะทำการตรวจสอบข้อมูลใน 25LC1024 ก่อน แล้วจึงดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

3.1.4. Voltage Supply

ส่วนของภาคจ่ายไฟ (Voltage Supply) จะใช้แรงดัน ขนาด 12 โวลต์และ 3.3 โวลต์ เป็นแรงดันให้กับนาฬิกาเป็นหลัก โดยแรงดันขนาด 12 โวลต์นั้น เป็นแรงดันสำหรับอุปกรณ์ที่อยู่ในส่วนของการแสดงผล และแรงดันขนาด 3.3 โวลต์สำหรับอุปกรณ์ที่อยู่ในส่วนของหน่วยประมวลผลหลัก ซึ่งแหล่งจ่ายไฟของนาฬิกานั้นออกแบบมาเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้ 2 ประเภท คือแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก (External Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟประเภทอแดปเตอร์ ที่ต้องทำการเชื่อมต่อกับไฟบ้าน (220 โวลต์) แล้วแปลงแรงดันเป็น 12 โวลต์ จากนั้นจึงจ่ายแรงดันให้กับนาฬิกา และแหล่งจ่ายไฟอีกประเภทคือแหล่งจ่ายไฟจากภายใน (Internal Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟประเภทแบตเตอรี่มีขนาด 12 โวลต์ จ่ายแรงดันให้กับตัวนาฬิกาโดยไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับไฟบ้าน แต่ผู้ใช้งานต้องทำการชาร์ตแบตเตอรี่ใหม่เสมอในกรณีที่แบตเตอรี่หมด

ภายในนาฬิกาจะมีอุปกรณ์ SB3AxV DC-DC สำหรับแปลงแรงดัน 12 โวลต์ เป็น 3.3 โวลต์ เพื่อเป็นแรงดันสำหรับอุปกรณ์ที่อยู่ในหน่วยประมวลผลหลัก โดยภาพรวมของการเชื่อมต่อระหว่างภาคจ่ายไฟและอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3-7

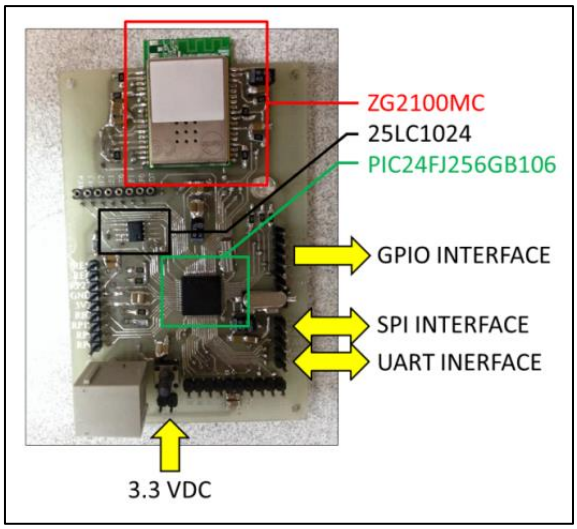


รูปที่ 3-7 Voltage Supply Interface

3.2. การสร้าง Hardware

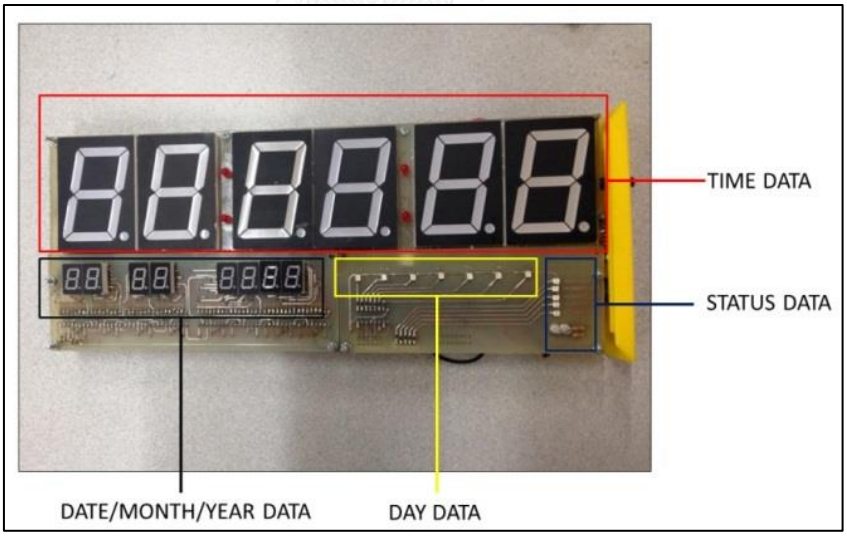
บอร์ดวงจรฮาร์ดแวร์ต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบสร้างมา จะแบ่งออกเป็น 2 บอร์ดวงจร ดังต่อไปนี้

- **บอร์ดวงจรหลัก (Main Board)** จะประกอบด้วย Interface หลักต่างๆ คือ Processing Unit, I^2C Interface, SPI Interface, และ UART Interface ที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้วในเบื้องต้น รวมไว้ในบอร์ดวงจรเดียวแสดงดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 Main Board

- **บอร์ดวงจรแสดงผล (Display Board)** จะประกอบด้วยส่วนของการแสดงผลข้อมูลเวลาและส่วนของการแสดงผลสถานะเชื่อมต่อต่างๆ รวมไว้ในบอร์ดวงจรเดียวแสดงดังรูปที่ 3-9

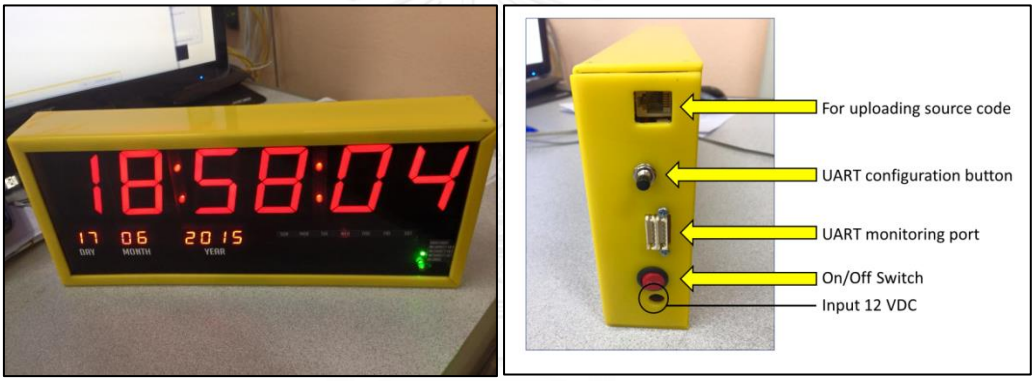


รูปที่ 3-9 Display Board

สำหรับส่วนของภาคจ่ายไฟ ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟจากภายในจะใช้อุปกรณ์ 12 VDC-2.2A Battery Lithium Polymer เชื่อมเป็นภาคจ่ายไฟภายใน และสำหรับแหล่งจ่ายไฟจากภายนอกจะใช้อแดปเตอร์ 12 VDC ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป ตัวอย่างแบตเตอรี่ Lithium Polymer และอแดปเตอร์ 12 VDC แสดงดังรูปที่ 3-10

รูปที่ 3-10 12 VDC Lithium Polymer Battery และ 12 VDC Adapter

เมื่อทำการออกแบบและสร้างบอร์ดวงจรทั้งหมดแล้ว ต่อมาจึงทำการสร้างกรอบของนาฬิกา โดยนาฬิกาที่สร้างขึ้นและ Interface ต่างๆ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 ตัวนาฬิกาที่ทำการออกแบบและ Interface ต่างๆ สำหรับผู้ใช้งาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

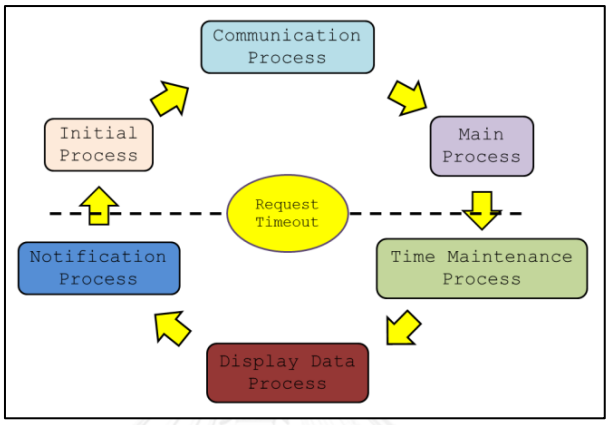
บทที่ 4

การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบเครือข่ายทางด้านซอฟต์แวร์

ในส่วนของการออกแบบนาฬิกา NTP แบบฝังตัว (Embedded NTP Clock) เพื่อให้นาฬิกาทำงานตามกระบวนการต่างๆ ที่วางไว้ได้อย่างถูกต้อง การออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์จะออกแบบโดยพิจารณาจากกระบวนการต่างๆ ดังต่อไปนี้

- **Initial Process** เป็นกระบวนการตั้งต้น (Initial) ตัวแปรและข้อมูลต่างๆ ของหน่วยประมวลผลหลักให้เสร็จสิ้น ก่อนที่จะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป
- **Communication Process** เป็นขั้นตอนในการเชื่อมต่อระหว่างนาฬิกาและเซิร์ฟเวอร์ NTP แล้วจึงทำการส่ง NTP request packet ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP ผ่านทาง UDP Port 123
- **Main Process** เป็นกระบวนการหลัก หลังจากที่กระบวนการสื่อสารทำการส่ง NTP request packet ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP และเซิร์ฟเวอร์ส่ง NTP reply packet กลับมา กระบวนการหลักจะทำหน้าที่ในการตรวจสอบความถูกต้องของ Packet และเมื่อ กระบวนการหลักได้รับ NTP reply packet ที่ถูกต้อง จึงทำการวิเคราะห์ Packet แล้วส่งข้อมูลให้กับกระบวนการต่างๆ ต่อไป
- **Time Maintenance Process** เป็นกระบวนการในการบำรุงรักษาความถูกต้องของข้อมูลเวลาให้มีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ตลอดเวลา
- **Display Process** เป็นขั้นตอนในการแสดงผลข้อมูลต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการแสดงผลผ่านบอร์ดวงจรแสดงผลสำหรับแสดงผลข้อมูลเวลาและสถานะต่างๆ ของนาฬิกาและอีกส่วนคือการแสดงผลผ่านทางเว็บเพจสำหรับแสดงผลข้อมูลต่างๆ ของ NTP reply packet ที่ได้รับจากเซิร์ฟเวอร์ NTP, สถานะการเชื่อมต่อต่างๆ ทางอินเทอร์เน็ตและระบบเครือข่าย
- **Notification Process** ขั้นตอนสำหรับแจ้งเตือนสถานะต่างๆ ของนาฬิกา รวมถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลเวลา (Reliability) ด้วย โดยการแสดงผลจะแสดงผลผ่านทางบอร์ดวงจรแสดงผล

ในส่วนของ Request Timeout นั้นจะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับนาฬิกาจับเวลาคือเมื่อกระบวนการหลัก ได้รับ NTP reply packet ที่ถูกต้องและทำการส่งข้อมูลไปยังส่วนต่างๆ กระบวนการหลักจะทำการเริ่มต้นนับเวลา Request Timeout แล้วจึงทำงานตามกระบวนการอื่นๆ จนกระทั่งครบกำหนด Request Timeout จึงจะเริ่มต้นกระบวนการตั้งต้นอีกครั้งหนึ่ง โดยขั้นตอนการทำงานทางด้านซอฟต์แวร์มีลักษณะดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 Software Block Diagram

4.1. กระบวนการทำงานทางด้าน Software

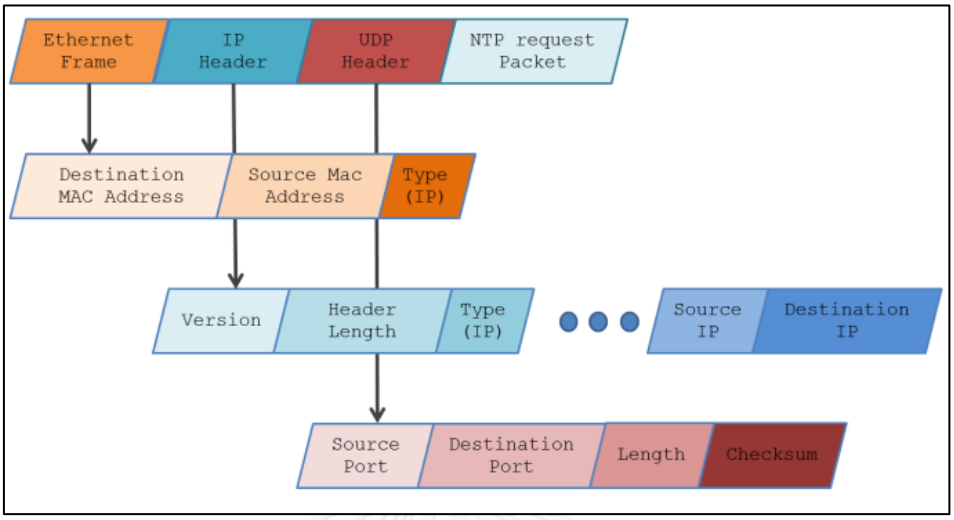
4.1.1. Preliminary Setup Process

ขั้นตอนแรกของการทำงานทางด้านซอฟต์แวร์จะเริ่มต้นจากกระบวนการตั้งต้น โดยจะทำการตรวจสอบข้อมูลใน 25LC1024 EEPROM ก่อนเป็นสิ่งแรกเพื่อเรียกข้อมูลและตัวแปรข้อมูลที่เก็บไว้มาปรับปรุงข้อมูลและใช้งาน หลังจากนั้นจึงจะทำการตั้งต้นอุปกรณ์ต่างๆ โดยการตั้งค่า Pin และ Port ต่างๆ ของ PIC24FJ256GB106 Microcontroller เพื่อใช้งานในโหมด UART, SPI, I^2C, และ GPIO ตามลำดับ

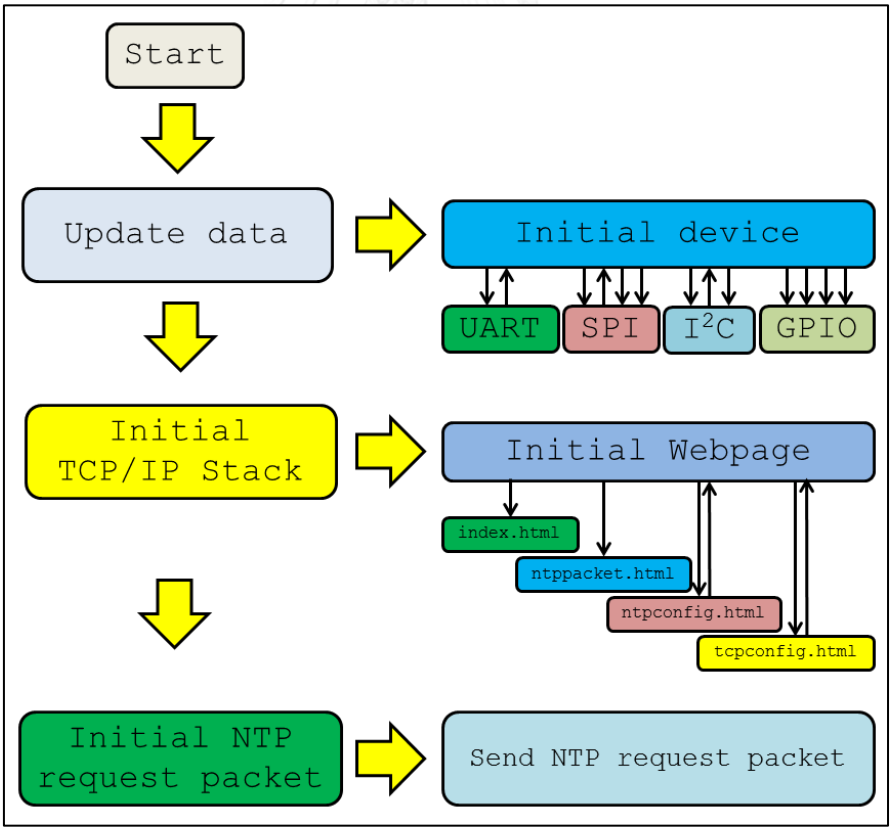
เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการตั้งค่า ในขั้นต้นแล้ว ต่อมาจึงทำการตั้งต้น TCP/IP Stack เพื่อทำการเชื่อมต่อนาฬิกา NTP เข้ากับระบบเครือข่ายเพื่อการใช้งานบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต สำหรับแสดงผลข้อมูลต่างๆ ผ่านเว็บเพจที่ทำการสร้างขึ้น

หลังจากที่ทำการตั้งต้นต่างๆ ในเบื้องต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงทำการตั้งต้น NTP request packet สำหรับส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP เพื่อทำการเรียกข้อมูลเวลา โดย NTP

request packet ที่สร้างขึ้นนั้น จะมีลักษณะดังรูปที่ 4-2 และขั้นตอนกระบวนการตั้งค่าเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 4-3



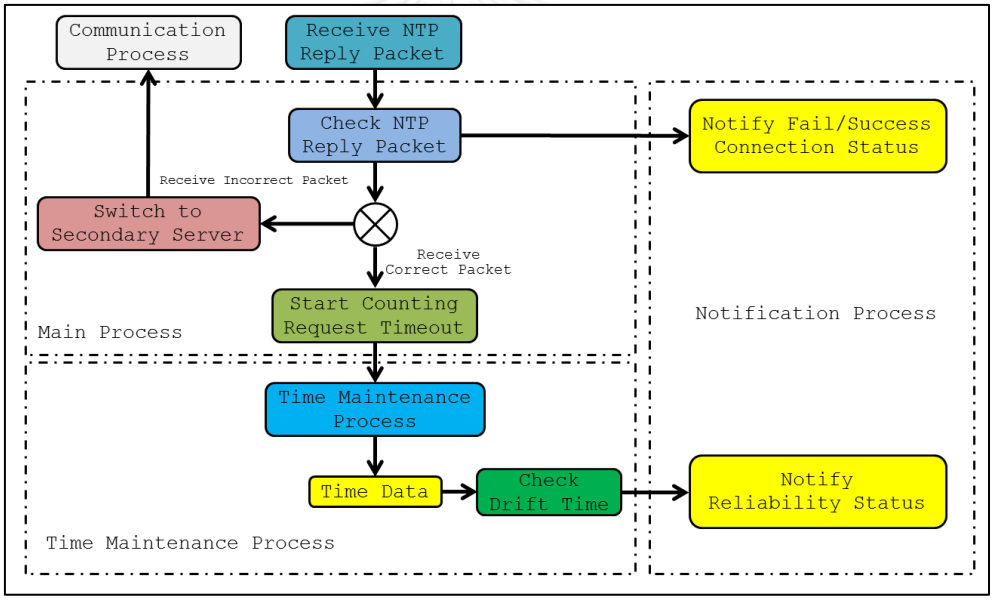
รูปที่ 4-2 NTP Request Packet



รูปที่ 4-3 Preliminary Setup Flowchart

4.1.2. Main Process

เมื่อนาฬิกา NTP ได้รับ NTP reply packet กระบวนการแรกคือ การตรวจสอบ NTP reply packet ที่ได้รับมาว่ามีความถูกต้องหรือไม่ หาก NTP reply packet ที่ได้รับมานั้นถูกแจ้งว่าเป็น Kiss-o'-Death Packet หรือเป็น Packet ที่ไม่สมบูรณ์ นาฬิกา NTP จะทำการเปลี่ยนการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP หลักไปเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP รองอื่นๆ ที่ได้ทำการกำหนดไว้และส่งข้อมูลกลับไปยังกระบวนการการสื่อสารอีกครั้ง เพื่อทำการส่ง NTP request packet จนกระทั่งเมื่อนาฬิกา NTP ได้รับ NTP reply packet ที่ถูกต้อง กระบวนการหลักจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลภายใน NTP reply packet, เริ่มต้นการนับ Request Timeout และส่งข้อมูลเวลาไปยังส่วนของกระบวนการบำรุงรักษาเวลาต่อไป ลักษณะการทำงานของกระบวนการหลักแสดงดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 Main Process Flowchart

รูปที่ 4-4 จะเห็นได้ว่าเมื่อกระบวนการหลักได้รับ NTP reply packet ไม่ว่าจะเป็น Packet ที่สมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์ก็ตาม กระบวนการหลักจะส่งข้อมูลสถานะการเชื่อมต่อไปยังกระบวนการแจ้งเตือนเพื่อทำการปรับปรุงข้อมูลบนหน้าเว็บเพจ โดยข้อมูลที่จะทำการแจ้งเตือนนี้คือข้อมูลจำนวนครั้งที่นาฬิกา NTP นั้นทำได้เชื่อมต่อได้สำเร็จ/ล้มเหลว (Fail/Success) ซึ่งผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบได้บนเว็บเพจที่สร้างขึ้น

4.1.3. Check Drift Time and Notification Process

ข้อมูลเวลาที่ส่งออกมาจากกระบวนการบำรุงรักษาเวลาจะมีกระบวนการตรวจสอบ Drift Time สำหรับคอยตรวจสอบความถูกต้องของเวลา โดยจะสร้างตัวแปรขึ้นมา 2 ตัวคือ Counter และ Reliability Status สำหรับกระบวนการนี้ ซึ่งขั้นตอนของตรวจสอบ Drift Time มีดังต่อไปนี้

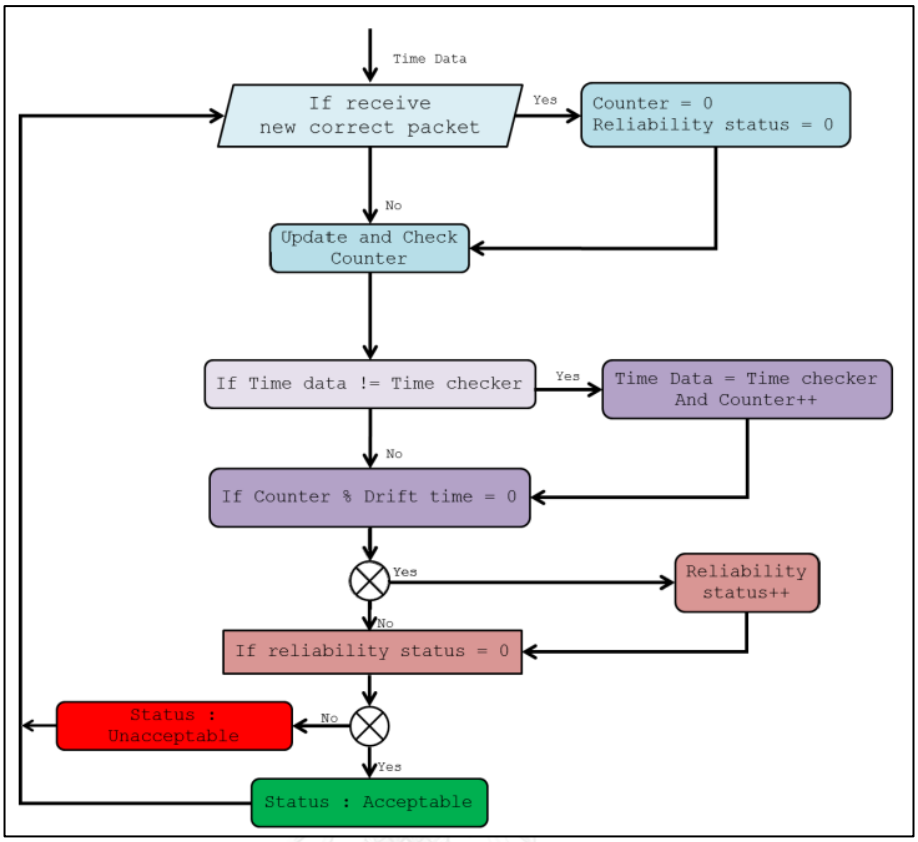
Check New Packet เป็นกระบวนแรก สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของ NTP reply packet ที่กระบวนการหลักรับเข้ามาว่าเป็น Packet ใหม่หรือไม่ หากเป็น Packet ที่เพิ่งรับเข้ามาใหม่ กระบวนการนี้จะทำการตั้งค่าตัวแปร Counter และ Reliability Status ให้มีค่า = 0 เพื่อทำการเริ่มต้นนับค่าใหม่ แต่หากกระบวนการหลักยังไม่ได้รับ Packet ใหม่ ก็จะข้ามกระบวนการนี้และไปยังกระบวนการต่อไป

Update and Check Counter จะเป็นกระบวนการที่จะคอยทำการปรับปรุงค่า Counter และ Reliability Status โดยจะทำการคอยตรวจสอบค่า Time Data หากค่า Time Data มีการเปลี่ยนแปลงไป ข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะเก็บไว้ในตัวแปร Time Checker ด้วย และทุกครั้งที่ข้อมูลเปลี่ยนแปลงไป จะทำการเพิ่มค่าตัวแปร Counter ด้วย กล่าวคือทุกครั้งที่เวลาเปลี่ยนไป (ในระดับวินาที) ค่า Counter ก็จะเพิ่มตามไปด้วย จากนั้นจึงนำค่าไปทำการเปรียบเทียบกับค่า Drift Time (สามารถคำนวณค่า Drift Time ได้โดยใช้สมการ 2-3) ด้วยวิธีการ Modulus Operation และหากผลที่ได้มีค่าไม่เท่ากับ 0 จะไปยังกระบวนการต่อไป แต่หากผลที่ได้จากการ Modulus Operation มีค่าเท่ากับ 0 จะทำการ เพิ่มค่าตัวแปร Reliability Status

Chulalongkorn University

ยกตัวอย่างเช่น จากหัวข้อ **2.4.1. DS3231 Characteristic** จะได้ว่าค่า Drift Time มีค่าเท่ากับ 500,000 วินาที (5 วัน 18 ชั่วโมง 53 นาที 20 วินาที) หากนาฬิกาเดินอย่างต่อเนื่องโดยไม่ได้ปรับปรุงข้อมูลเป็นเวลา 1 วัน (86400 วินาที) จะได้ว่า Counter = 86400 และ Drift time = 500,000 ดังนั้น Counter % Drift time = 86400 ไม่เท่ากับ 0 ถือว่า NTP Clock ยังคงอยู่ในสถานะที่เชื่อถือได้ แต่ในกรณีที่ Counter = 500,000 จะได้ว่า Counter % Drift time = 0 ทำให้ค่า Reliability Status มีค่าเพิ่มขึ้น 1 แสดงว่านาฬิกา เกิดการคลาดเคลื่อนไป $\pm$ 1 วินาที

Check Reliability Status ในกระบวนการนี้จะทำการตรวจสอบค่า Reliability Status หากมีค่า = 0 แสดงว่าข้อมูลเวลาของนาฬิกานั้นเชื่อถือได้ แต่ถ้าหากค่า Reliability Status = 1 แสดงว่าข้อมูลเวลาของนาฬิกานั้นเชื่อถือไม่ได้และภาพรวมการทำงานของกระบวนการทำงานในการตรวจสอบ Drift Time แสดงดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 Check Drift Time Flowchart

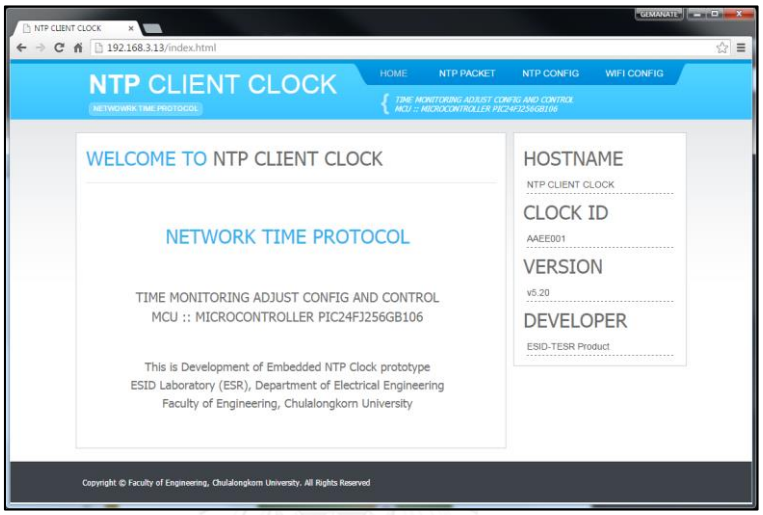
4.1.4. Display Process

ในส่วนของการแสดงผลข้อมูล ดังที่กล่าวมาข้างต้น การแสดงผลจะแบ่ง 2 ส่วน ส่วนแรกคือเว็บเพจ สำหรับแสดงผลข้อมูลต่างๆ และบอร์ดวงจรแสดงผล ใช้สำหรับแสดงผลข้อมูลเวลาและสถานะของนาฬิกา จะใช้ในการแสดงผลข้อมูลเวลาต่างๆ และสถานะความน่าเชื่อถือโดยสถานะความน่าเชื่อถือจะแบบออกเป็น 5 ระดับด้วยกัน ซึ่งในกรณีที่ค่า Reliability Status = 0 การแสดงผลจะอยู่ในช่วงระดับที่ 1-4 แสดงผลว่าข้อมูลยังอยู่ในสถานะที่เชื่อถือได้ แต่ในกรณีที่ Reliability Status = 1 สถานะจะอยู่ในระดับ 5 แสดงผลว่าข้อมูลเวลานั้นเชื่อถือไม่ได้

4.2. การสร้าง Webpage

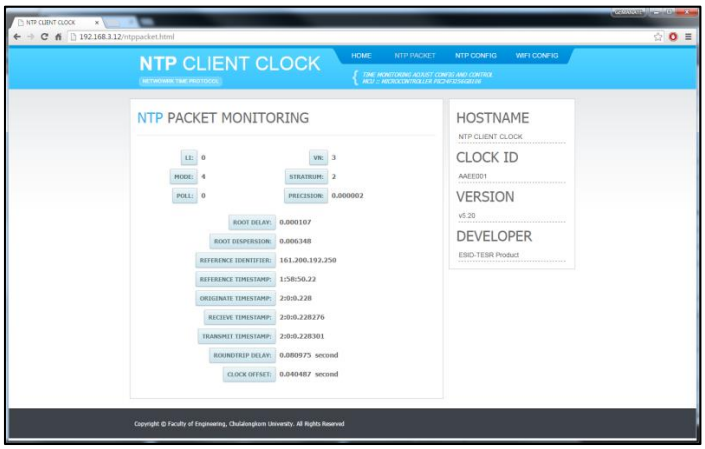
เว็บเพจที่สร้างขึ้นมานี้มีไว้สำหรับผู้ใช้งานเพื่อทำการตรวจสอบและปรับแต่งข้อมูลต่างๆ ของนาฬิกาผ่านทาง Web Browser โดยเว็บเพจที่สร้างขึ้นนี้จะประกอบด้วย 4 เว็บเพจหลัก ดังต่อไปนี้

- **Index.html** เป็นเว็บเพจหลักแสดงผลรายละเอียดข้อมูลเบื้องต้นของนาฬิกา อาทิเช่น Hostname, Clock ID, Version, และ Developer เป็นต้น เมื่อผู้ใช้งานทำการเปิดเว็บเพจของนาฬิกา ก็จะเข้าสู้หน้า Index.html เป็นเว็บเพจแรก โดย Index.html จะแสดงผลดังรูปที่ 4-6



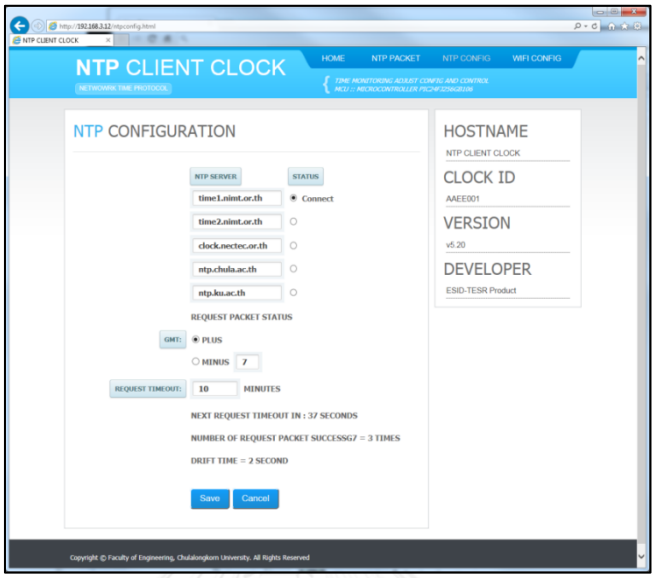
รูปที่ 4-6 Index.html

- **Ntppacket.html** เป็นเว็บเพจที่แสดงผลข้อมูลของ NTP reply packet ที่นาฬิกาทำการปรับปรุงใช้งานข้อมูล หน้าเว็บเพจนี้จะแสดงผลข้อมูลที่สำคัญต่างๆ ของ NTP reply packet อาทิเช่น Mode, Stratum, และ Timestamp ต่างๆ โดย Ntppacket.html จะแสดงผลดังรูปที่ 4-7



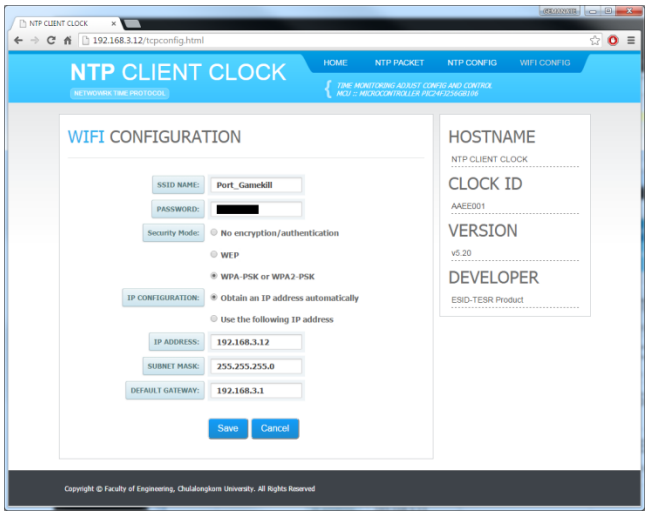
รูปที่ 4-7 Ntppacket.html

- **Ntpconfig.html** เป็นเว็บเพจที่ใช้ในการปรับแต่งค่าและข้อมูลต่างๆ ของ NTP request packet หน้าเว็บเพจจะมีการแสดงผลดังรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 Ntpconfig.html

- **Tcpconfig.html** เป็นเว็บเพจสำหรับการปรับแต่งและแสดงผลข้อมูลทางด้านระบบเครือข่ายของนาฬิกา โดยผู้ใช้งานสามารถตั้งค่า SSID และ Password ของ Wireless Access Point Router ที่นาฬิกาทำการเชื่อมต่อหรือ IP Address ของนาฬิกาเป็นต้น และเว็บเพจนี้จะมีการแสดงผลดังรูปที่ 4-9

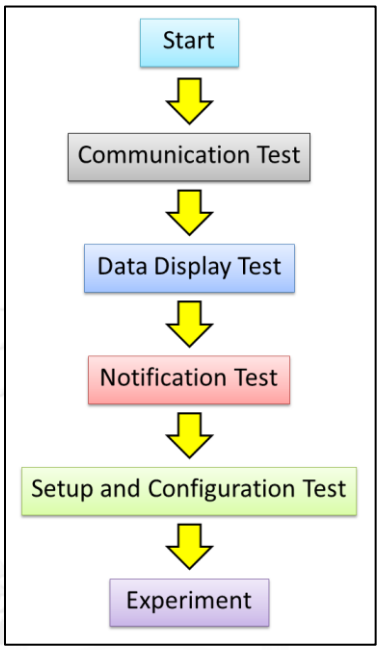


รูปที่ 4-9 Tcpconfig.html

บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบและสร้างนาฬิกา ขั้นตอนต่อมาคือทำการทดสอบและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ โดยจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 ขั้นตอนการทดสอบและทดลอง

5.1. Test Process

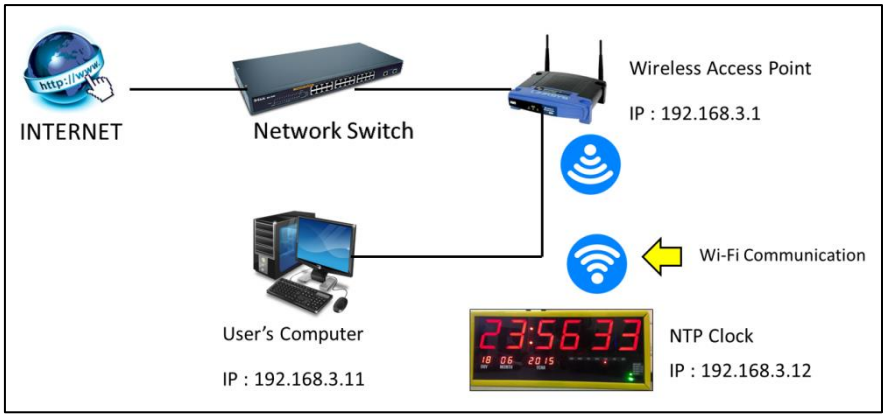
5.1.1. Communication Test

ขั้นตอนแรกของการทดสอบคือการทดสอบการติดต่อสื่อสารระหว่างนาฬิกาและเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เริ่มต้นเมื่อทำการเริ่มต้นการทำงานและจ่ายแรงดันให้กับนาฬิกา นาฬิกาจะทำการตั้งต้น Stack ข้อมูลตัวแปรต่างๆ ชั่วขณะหนึ่ง จากนั้นนาฬิกาจะเริ่มต้นทำการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตผ่าน Wireless Access Point Router ในกรณีที่นาฬิกาสามารถเชื่อมต่อได้สำเร็จ ไฟแจ้งเตือนสถานะการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตของนาฬิกาจะแสดงเป็นสีเขียว แต่ถ้าหากการเชื่อมต่อล้มเหลวสถานะการเชื่อมต่อจะแสดงเป็นสีแดง ดังรูปที่ 5-2 และรูปที่ 5-3 ตามลำดับ

รูปที่ 5-2 สถานะการเชื่อมต่อถูกต้อง

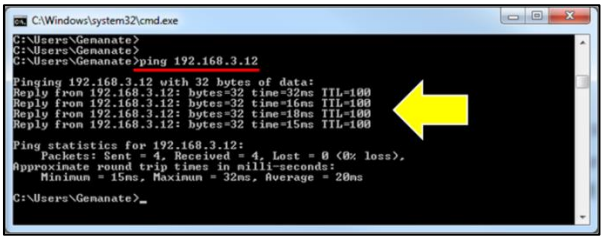
รูปที่ 5-3 สถานะการเชื่อมต่อล้มเหลว

อีกกรณีหนึ่ง ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของนาฬิกาได้ผ่านทางคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน โดยจะต้องอยู่ใน Local Area Network (LAN) เครือข่ายเดียวกับนาฬิกา ลักษะดังรูปที่ 5-4

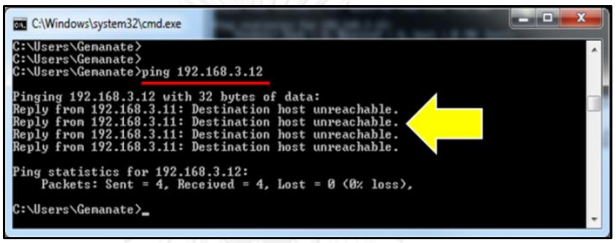


รูปที่ 5-4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อเครือข่าย LAN

จากรูปที่ 5-4 จะเห็นได้ว่า IP Address ของนาฬิกาคือ 192.168.3.12 เมื่อทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับเครือข่าย LAN แล้ว ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบการเชื่อมต่อผ่านทางโปรแกรม Command Line โดยใช้คำสั่ง ping 192.168.3.12 แสดงดังรูปที่ 5-5 และรูปที่ 5-6



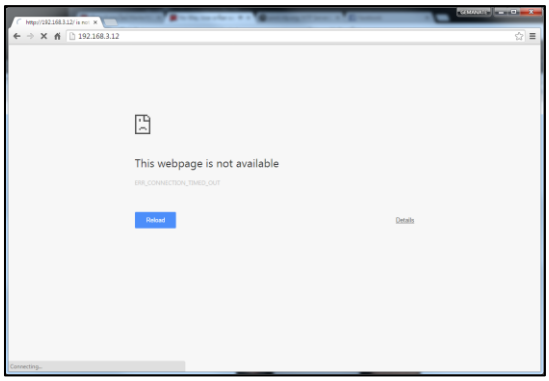
รูปที่ 5-5 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน ในกรณีที่การเชื่อมต่อสำเร็จ



รูปที่ 5-6 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน ในกรณีที่การเชื่อมต่อล้มเหลว

หรืออีกทางหนึ่งหลังจากที่นาฬิกาทำการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตแล้ว ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบการเชื่อมต่อผ่านทางโปรแกรม Web Browser ได้เลย ดังรูปที่ 5-7 จะแสดงผลหน้าเว็บเพจ ในกรณีที่นาฬิกาสามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ และรูปที่ 5-8 แสดงผลหน้าเว็บเพจในกรณีที่นาฬิกาไม่สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้

รูปที่ 5-7 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านทาง Web Browser ในกรณีที่การเชื่อมต่อสำเร็จ



รูปที่ 5-8 ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อผ่านทาง Web Browser ในกรณีที่การเชื่อมต่อล้มเหลว

5.1.2. Display Data Test

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการแสดงผล แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ดังนี้

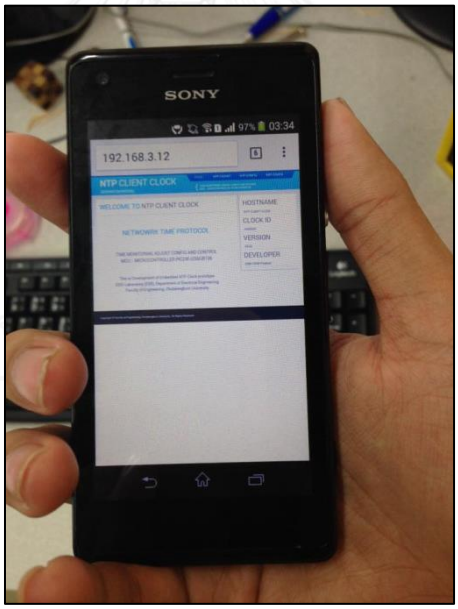
- **การแสดงผลหลัก (Display Board)** เป็นการแสดงผลผ่านทางบอร์ดวงจรแสดงผล (Display Board) ที่ได้ทำการออกแบบไว้ ในการทดสอบข้อมูลต่างๆ ผลที่ได้คือสามารถทำการแสดงผลได้อย่างถูกต้องและไม่ผิดพลาด ตามที่ได้ออกแบบไว้ แสดงดังรูปที่ 5-9 คือตัวอย่างการแสดงผลข้อมูลผ่านบอร์ดวงจรแสดงผล

รูปที่ 5-9 การแสดงผลข้อมูลผ่านบอร์ดวงจรแสดงผล

- **การแสดงผลผ่านเว็บเพจ (Webpage Display)** เป็นการแสดงผลทางเว็บเพจ โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่เว็บเพจได้ ผ่านทางโปรแกรม Web browser ของคอมพิวเตอร์ ด้วยการพิมพ์ URL เป็น IP Address ของนาฬิกาที่ผู้ใช้งานทำการตั้งค่าไว้ ในที่นี้ได้ทำการตั้งค่า IP Address ของนาฬิกาเป็น 192.168.3.12 อีกทั้งผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่เว็บเพจผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้อีกด้วย แสดงดังรูปที่ 5-10

และรูปที่ 5-11 เป็นตัวอย่างการแสดงผลผ่านทางโปรแกรม Web browser และการเข้าสู่เว็บเพจผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามลำดับ

รูปที่ 5-10 การแสดงผลผ่านทางโปรแกรม Web Browser



รูปที่ 5-11 การแสดงผลเว็บเพจผ่านทางโทรศัพท์เคลื่อนที่

5.1.3. Notification Test

สำหรับการทดสอบการแจ้งเตือน การแจ้งเตือนสถานะความน่าเชื่อถือและสถานะการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตของนาฬิกาจะแจ้งเตือนผ่านบอร์ดวงจรแสดงผล ในส่วนของข้อมูล NTP reply packet, Drift Time และสถานะการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP จะแสดงผ่านเว็บเพจ

ในส่วนของการแสดงผลผ่านทางบอร์ดวงจรแสดงผล ในกรณีที่นาฬิกาสามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP และทำงานได้ตามปกติ ไฟแจ้งสถานการณ์เชื่อมต่อจะแสดงเป็นสีเขียว แสดงรูปที่ 5-2 ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ในกรณีที่นาฬิกาไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้ นาฬิกาจะแจ้งเตือนเป็นไฟสีแดงกระพริบบนบอร์ดวงจรแสดงผล แสดงดังรูปที่ 5-12

รูปที่ 5-12 นาฬิกาแจ้งเตือนสถานะไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้

ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ **2.4.1 DS3231 Characteristic** จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ DS3231 Module มีค่า Frequency Tolerance = $\pm$ 2 PPM และเมื่อเวลาผ่านไป 500,000 วินาที (5 วัน 18 ชั่วโมง 53 นาที 20 วินาที) ข้อมูลเวลาจะมีเวลาคลาดเคลื่อนไป $\pm$ 1 วินาที โดยสถานะในการแจ้งเตือนบนนาฬิกาที่ทำการออกแบบไว้ จะแบ่งออกเป็น 5 ช่วง คือ Very High, High, Low, Very Low, และ Unreliable โดยเมื่อนำข้อมูล Frequency Tolerance ของอุปกรณ์ DS3231 Module มาประยุกต์ใช้แสผลความน่าเชื่อถือของนาฬิกา (Reliability Status) การแจ้งเตือนที่ได้ทำการออกแบบจะมีลักษณะ เป็นไปตามตารางที่ 5-1

Time (Seconds)	Status	Drift time	Light Status
0 – 125,000	Very High	≈ 0-250 Millisecond	Green
125,001 – 250,000	High	≈ 250-500 Millisecond	Orange
250,001 – 375,00	Low	≈ 500-750 Millisecond	Orange
375,001 – 500,000	Very Low	≈ 750-1000 Millisecond	Red
>500,000	Unreliable	> 1 Second	Red

ตารางที่ 5-1 การแจ้งเตือนสถานะความน่าเชื่อถือของเวลาบนบอร์ดวงจรแสดงผล

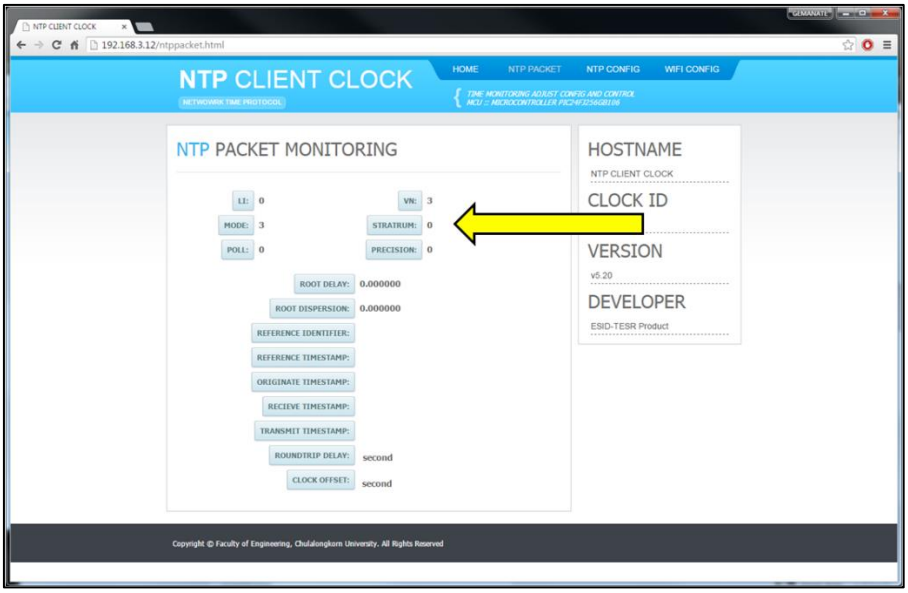
จากการออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์ ในหัวข้อ **4.1.3 Check Drift Time and Notification Process** การแจ้งเตือนจะแบ่งออกเป็น 5 สถานะ คือในกรณีที่นาฬิกาเดินต่อเนื่องเป็นเวลา 0-125,000 วินาที โดยไม่ได้รับการปรับปรุงเวลาจากเซิร์ฟเวอร์ NTP นาฬิกาจะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Drift time) อยู่ที่ประมาณ 250 มิลลิวินาที ถือว่าเวลายังอยู่ในช่วงที่เชื่อถือได้ (Very High) จะแสดงสถานะเป็นไฟสีเขียวแสดงดังรูปที่ 5-13 แต่ถ้าหากในกรณีที่นาฬิกาเดินต่อเนื่องเป็นเวลา 125,001 – 250,000 วินาที โดยไม่ได้รับการปรับปรุงเวลาจากเซิร์ฟเวอร์ NTP นาฬิกาจะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Drift time) อยู่ที่ประมาณ 500 มิลลิวินาที ถือว่านาฬิกาเริ่มมีความคลาดเคลื่อน (High) จะแสดงสถานะเป็นไฟสีส้ม แสดงดังรูปที่ 5-13 และในกรณีที่นาฬิกาเดินต่อเนื่องเป็นเวลามากกว่า 500,000 วินาที โดยไม่ได้รับการปรับปรุงเวลาจากเซิร์ฟเวอร์ NTP นาฬิกาจะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Drift time) มากกว่า 1 วินาที ถือว่านาฬิกานั้นไม่สามารถเชื่อถือได้ (Unreliable) จะแสดงสถานะเป็นไฟสีแดงแสดงดังรูปที่ 5-14

รูปที่ 5-13 นาฬิกาแจ้งเตือนสถานะเชื่อถือได้ (Very High) และแสดงผลในกรณีที่นาฬิกาแจ้งเตือนเริ่มเกิดความคลาดเคลื่อน (High)

รูปที่ 5-14 นาฬิกาแจ้งเตือนสถานะไม่สามารถเชื่อถือได้ (Unreliable status)

จากการทดสอบ ผลคือนาฬิกาสามารถแจ้งเตือนสถานะความน่าเชื่อถือบนบอร์ดวงจรแสดงผลได้อย่างถูกต้องไม่ผิดพลาด ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ ขั้นตอนต่อมาคือการทดสอบการแจ้งเตือนผ่านเว็บเพจ โดยในส่วนของการทดสอบการแจ้งเตือนทางด้านเว็บเพจนั้นจะแจ้งเตือนผ่านทางหน้า Ntppacket.html และ Ntpconfig.html

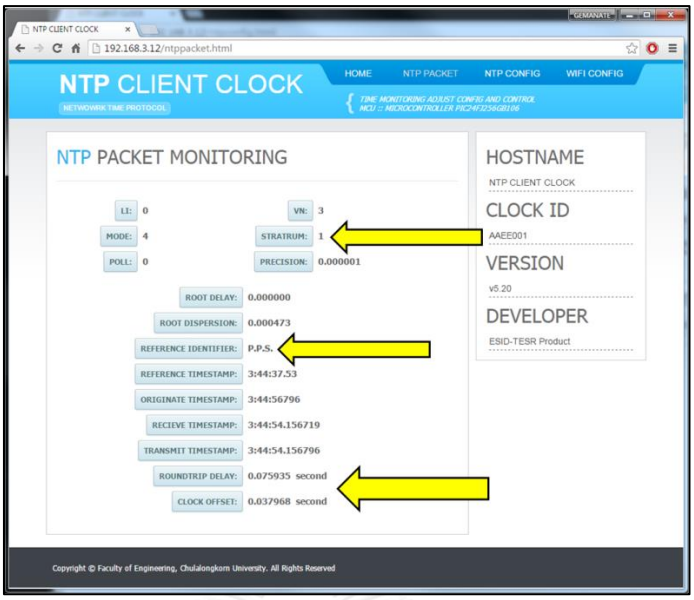
สำหรับการแจ้งเตือนในหน้า Ntppacket.html นั้น ในกรณีที่นาฬิกาไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้ ข้อมูล Stratum ของเว็บเพจจะแสดงค่าเป็น 0 และในส่วนของ NTP reply packet จะไม่มีการแสดงค่าข้อมูลใดๆ แสดงดังรูปที่ 5-15



CHULALONGKORN UNIVERSITY

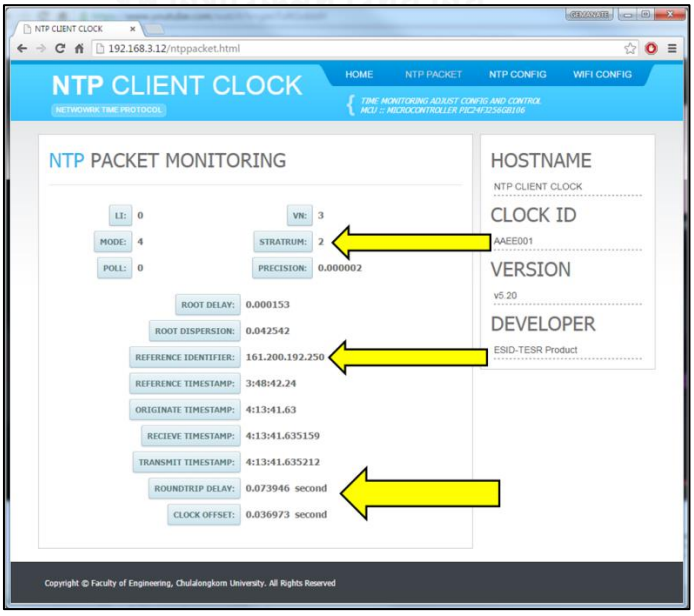
รูปที่ 5-15 Ntppacket.html แสดงผลแจ้งเตือน Stratum = 0

ในกรณีที่ผู้ใช้งานทำการเชื่อมต่อนาฬิกาเข้ากับเซิร์ฟเวอร์ Stratum-1 NTP ในหน้า Ntppacket.html ข้อมูล Stratum จะแสดงค่าเป็น 1, Reference Identifier จะแสดงประเภทของนาฬิกาอ้างอิง (Reference Clock) ของเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่นาฬิกาทำการเชื่อมต่อ ในส่วนล่างสุดของเว็บเพจจะแสดงข้อมูล Roundtrip Delay และ Clock Offset ของ NTP reply packet แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5-16 เป็นการทดสอบนาฬิกาเชื่อมต่อเรียกข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ Stratum-1 NTP ในที่นี้คือเซิร์ฟเวอร์ NTP ของกองทัพเรือ (time1.navy.mi.th) ข้อมูล Stratum จะแสดงผลแจ้งเตือนเป็น 1 และนาฬิกาอ้างอิงของเซิร์ฟเวอร์ NTP คือ P.P.S. (Pulse Per Second) ซึ่ง NTP reply packet มีค่า Roundtrip Delay และ Clock Offset เท่ากับ 0.075935 วินาที และ 0.037968 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 5-16 Ntppacket.html แจ้งเตือน ในกรณีที่ทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ Stratum-1 NTP

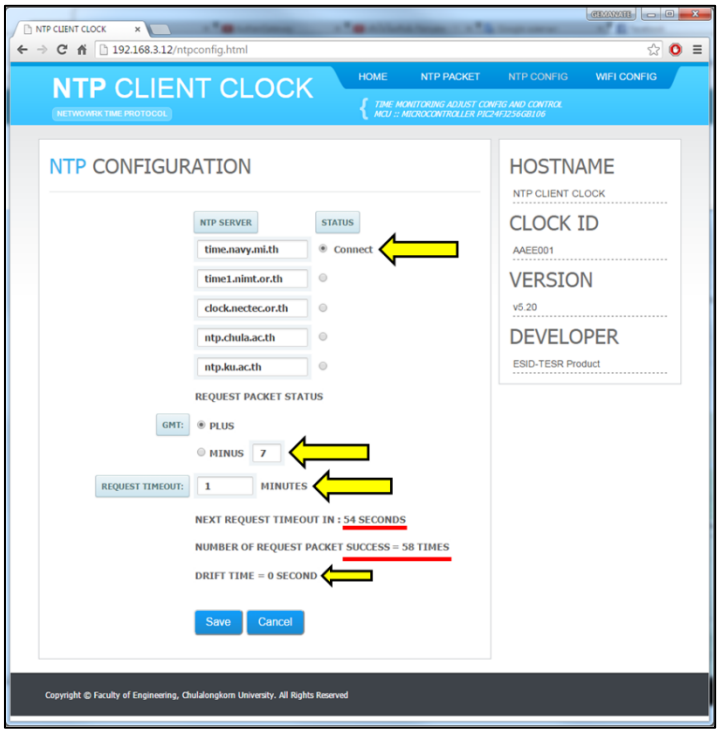
และในกรณีที่นาฬิกาทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ Stratum-2 NTP ในหน้า Ntppacket.html ในส่วนของ Stratum จะแสดงค่าเป็น 2, Reference Identifier จะแสดง IP Address ของเซิร์ฟเวอร์อ้างอิงของเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่เราเชื่อมต่ออยู่และในส่วนล่างสุดของเว็บเพจจะแสดงข้อมูล Roundtrip Delay และ Clock Offset ของ NTP reply packet เช่นเดียวกัน แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5-17



รูปที่ 5-17 Ntppacket.html แจ้งเตือน ในกรณีที่ทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ Stratum-2 NTP

จากรูปที่ 5-17 เป็นการทดสอบนาฬิกาเชื่อมต่อเรียกข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ Stratum-2 NTP ในที่นี้คือเซิร์ฟเวอร์ NTP ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ntp.chula.ac.th) ข้อมูล Stratum จะแสดงผลแจ้งเตือนเป็น 2 และ IP Address ของเซิร์ฟเวอร์อ้างอิงของเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ทำการเชื่อมต่อคือ 161.200.192.250 (ntp1.chula.ac.th)

ขั้นตอนต่อมาคือการทดสอบการแจ้งเตือนบนหน้า Ntpconfig.html ในกรณีที่การทำงานของนาฬิกาสามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้ปรกติ การแสดงผลของ Ntpconfig.html จะแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5-18

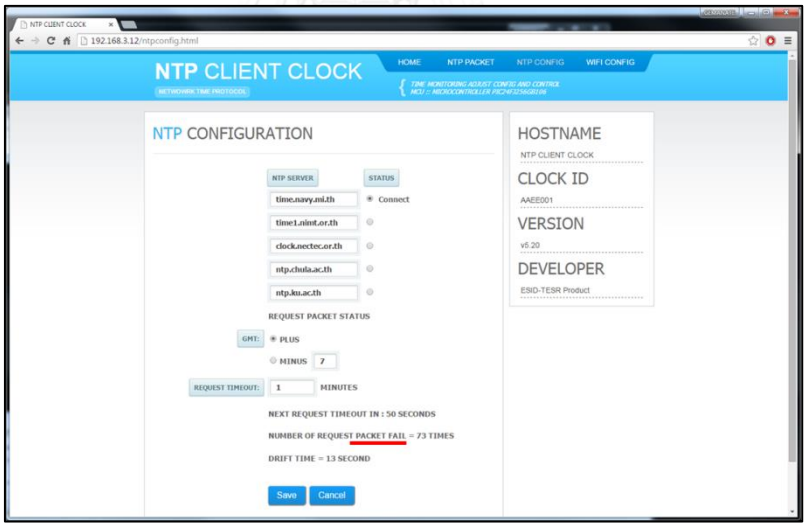


รูปที่ 5-18 การแสดงผลของ NTPconfig.html ในกรณีที่นาฬิกาทำงานปรกติ

จากรูปที่ 5-18 ใน Ntpconfig.html จะประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญดังต่อไปนี้

- **Connect** เป็นตัวแปรที่แสดงสถานะแจ้งแก่ผู้ใช้งานถึงเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่นาฬิกาทำการเชื่อมต่อเรียกข้อมูลอยู่ ณ ขณะนี้ ซึ่งในที่นี้นาฬิกากำลังทำการเชื่อมต่ออยู่กับเซิร์ฟเวอร์ NTP ของกองทัพเรือ (time.navy.mi.th)

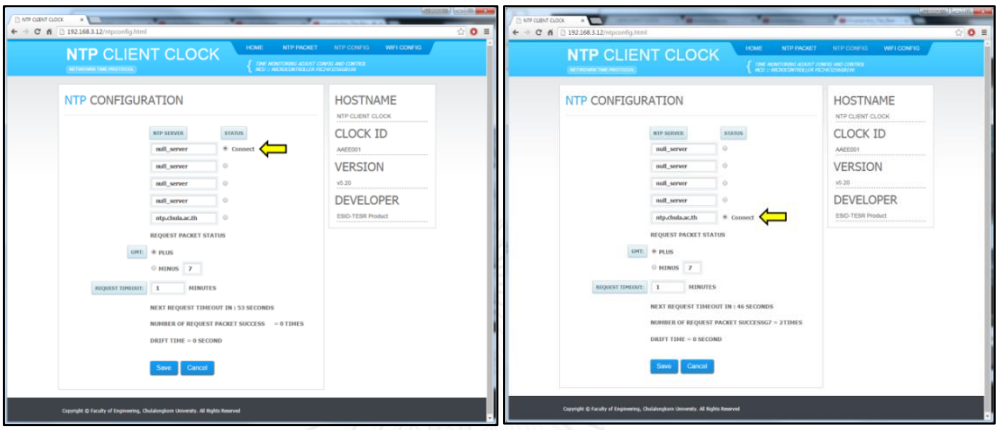
- **GMT** จะแสดงค่า GMT ของนาฬิกา ในที่นี้จะมีค่าเท่าเป็น GMT+7 (Bangkok, Hanoi, Jakarta, Kuala Lumpur, Singapore)
- **Request Timeout** แสดงค่าเวลาที่ใช้ในการส่ง NTP request packet ต่อ 1 ครั้ง ในที่นี้ตั้งค่าเท่ากับ 1 หมายความว่านาฬิกาจะทำการส่ง NTP request packet ทุกๆ 1 นาที
- **Next Request Timeout** จะแสดงผลเป็นเวลาที่นาฬิกาจะทำการส่ง NTP request packet ครั้งต่อไป ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 54 วินาที หมายความว่าอีก 54 วินาที นาฬิกาจะทำการส่ง NTP request packet ครั้งต่อไป
- **Number of Request Packet success/fail** จะแสดงจำนวนครั้งที่นาฬิกาทำการส่ง NTP request packet สำเร็จหรือล้มเหลว ในกรณีที่นับจำนวนการส่ง NTP request packet ที่สำเร็จจะแสดงผลดังรูปที่ 5-18 และรูปที่ 5-19 แสดงผลการนับจำนวนการส่ง NTP request packet ล้มเหลว
- **Drift Time** จะแสดงผลเวลาที่คลาดเคลื่อนในหน่วยวินาที



รูปที่ 5-19 การแสดงผลของ NTPconfig.html ในกรณีที่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP

กระบวนการต่อมาคือการทดสอบการเปลี่ยนเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ทำการเชื่อมต่ออย่างอัตโนมัติ ในกรณีที่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP หลักได้ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่นาฬิกาเชื่อมต่ออยู่กับเซิร์ฟเวอร์ NTP ลำดับที่ 1 หากเซิร์ฟเวอร์ NTP ลำดับที่ 1 มีปัญหาหรือนาฬิกาไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP server ลำดับที่ 1 ได้ นาฬิกาจะต้องสามารถเปลี่ยนการเชื่อมต่อ

จากเซิร์ฟเวอร์ NTP ลำดับที่ 1 ไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP ลำดับถัดไปได้ โดยในการทดสอบจะทำการตั้งค่าให้นาฬิกาเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ปลอม จำลองเหตุการณ์ว่าไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP หลักได้และตั้งค่าให้เซิร์ฟเวอร์ NTP ที่สามารถใช้งานได้จริงอยู่ในอับดับท้ายสุด และเมื่อเริ่มต้นการทำงานให้นาฬิกาทำงาน ผลที่ได้คือนาฬิกาสามารถเลื่อนอันดับการเชื่อมต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์ NTP ถัดไปจนกระทั่งสามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ใช้งานได้ดังรูปที่ 5-20



รูปที่ 5-20 การทดสอบการเปลี่ยนการเชื่อมต่อเซิร์ฟเวอร์ NTP ของนาฬิกา

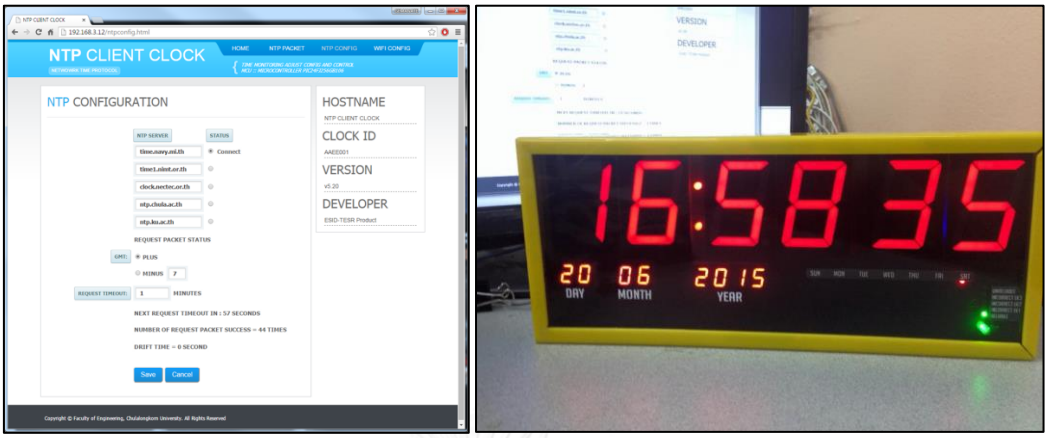
จากผลการทดสอบการแสดงผลและการแจ้งเตือนผ่านทางบอร์ดวงจรแสดงผลและเว็บเพจ ผลที่ได้คือนาฬิกาสามารถทำงาน แสดงผล และแจ้งเตือนได้ถูกต้อง ไม่ผิดพลาดตามกระบวนการต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไว้

5.1.4. Setup and Configuration Test

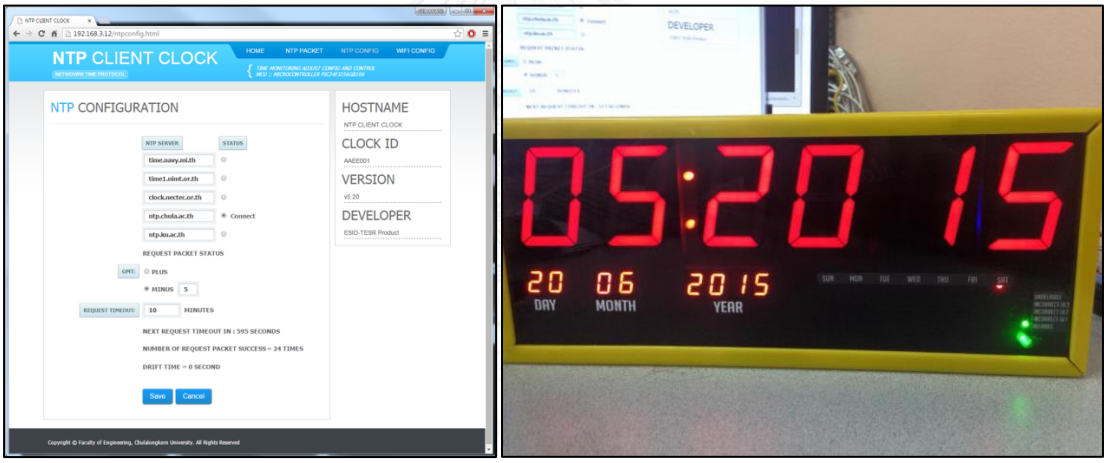
ในขั้นตอนนี้คือการทดสอบการตั้งค่า (Setup) และการปรับแต่งข้อมูล (Configure) ให้กับนาฬิกา โดยผู้ใช้งานสามารถทำการตั้งค่าและปรับแต่งข้อมูลให้กับนาฬิกาผ่านทางหน้า Ntpconfig.html และ Tcpconfig.html หรือผ่านทาง UART Interface

ขั้นตอนแรกจะทำการทดสอบการตั้งค่า NTP request packet ผ่านทางหน้า Ntpconfig.html โดยข้อมูลของ Ntpconfig.html ก่อนการปรับแต่งค่าจะแสดงดังรูปที่ 5-21 โดยได้มีการตั้งค่าให้ นาฬิกาทำการเชื่อมต่ออยู่กับเซิร์ฟเวอร์ NTP ของกองทัพเรือ (time.navy.mi.th) เป็นเซิร์ฟเวอร์ NTP หลัก มีค่า GMT+7 มีค่า Request Timeout = 1 นาที แสดงผลบนบอร์ดวงจรแสดงผลดังรูป ในการทดสอบตั้งค่าข้อมูลใหม่ จะทำการทดสอบเปลี่ยนการเชื่อมต่อจากเซิร์ฟเวอร์ NTP ของกองทัพเรือเป็นเซิร์ฟเวอร์ NTP ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ntp.chula.ac.th) และ

เปลี่ยนค่า GMT+7 เป็น GMT+5 และเปลี่ยนค่า Request Timeout จาก 1 นาที เป็น 10 นาที ผลการตั้งค่าใหม่แสดงดังรูปที่ 5-22



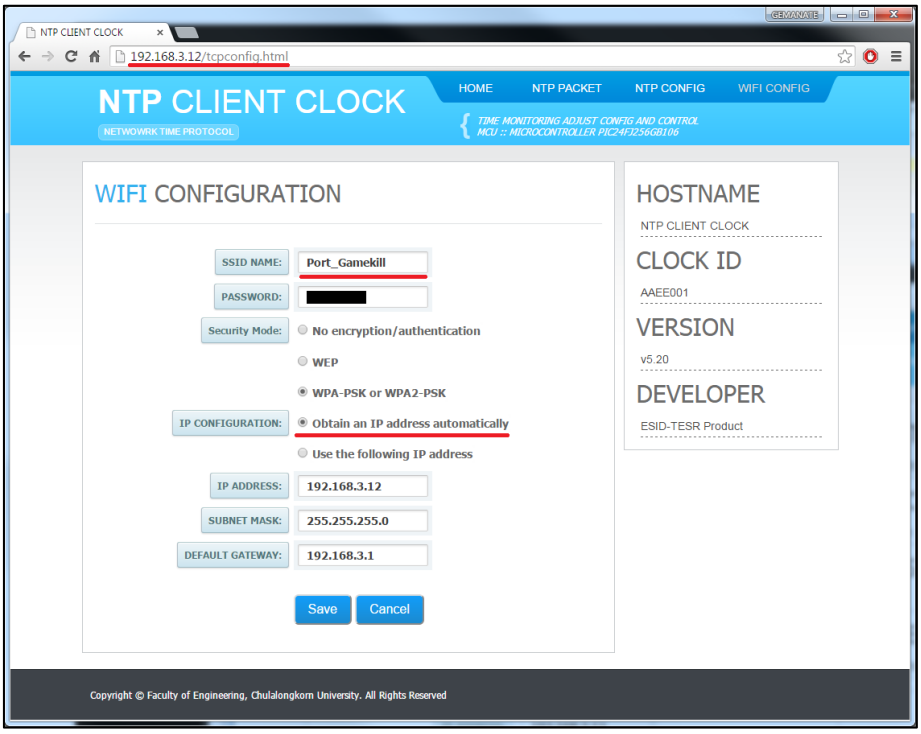
รูปที่ 5-21 Ntpconfig.html และการแสดงผลก่อนทดสอบปรับแต่งข้อมูล



รูปที่ 5-22 ผลจากการทดสอบตั้งค่าข้อมูลใหม่

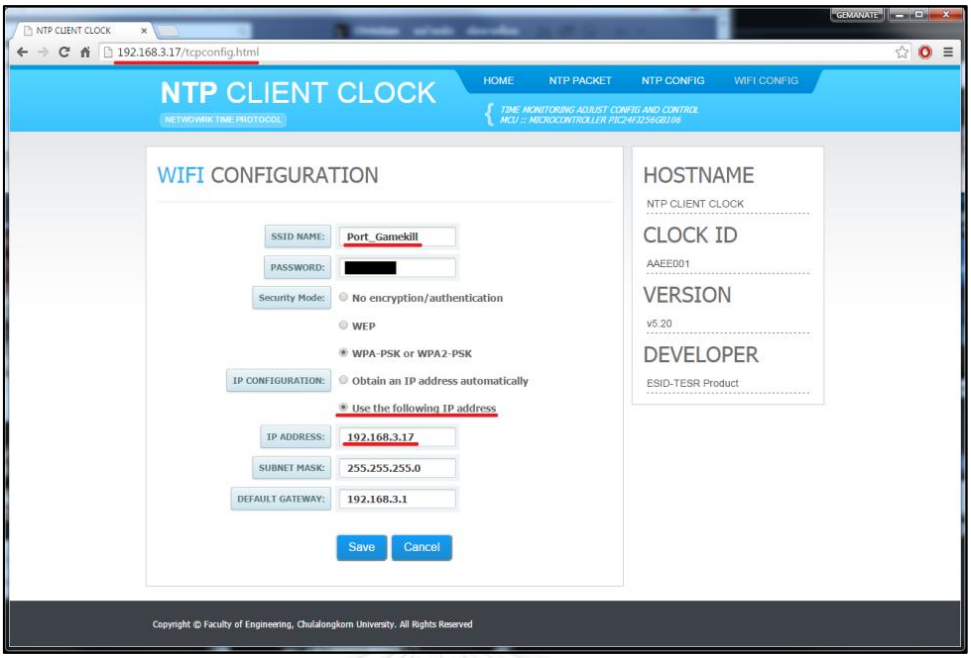
รูปที่ 5-22 แสดงผลของการตั้งค่าใหม่ให้กับนาฬิกา ผลคือนาฬิกาสามารถทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยตามที่ผู้ใช้งานทำการตั้งค่า และนาฬิกามีค่า GMT ใหม่คือ GMT-5 และ Request Timeout ใหม่คือ 10 นาที ซึ่งก่อนทำการตั้งค่า นาฬิกาจะทำการส่ง NTP request packet ทุกๆ 1 นาที ค่า Request Timeout ใหม่นี้ทำให้นาฬิกาทำการส่ง NTP request packet ทุกๆ 10 นาที และค่าเวลาที่แสดงผลบนบอร์ดแสดงผล จะแสดงผลค่าเวลาใหม่ เป็นเวลา GMT-5

ต่อมาคือการทดสอบการตั้งค่าทางการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยผู้ใช้งานสามารถทำการตั้งค่าผ่านทาง 2 ช่องทางคือผ่านทางหน้า Tcpconfig.html และ UART Interface ในขั้นแรกจะเป็นการทดสอบตั้งค่าข้อมูลใหม่ผ่าน Tcpconfig.html ซึ่งข้อมูลที่แสดงผลบนหน้า Tcpconfig.html ก่อนทำการทดสอบตั้งค่าข้อมูล นาฬิกาจะทำการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านทาง Wireless Access Point Router มีชื่อ SSID Name ว่า “*Port_Gamekill*” มีการ Encryption (Security) ด้วยวิธี WPA2-PSK และใช้ IP Address ที่นาฬิกาใช้งานเป็น Dynamic IP Address (Obtain IP address automatically) คือ 192.168.3.12 มี Subnet Mask คือ 255.255.255.0 และมี Default Gateway คือ 192.168.3.1 แสดงดังรูปที่ 5-23



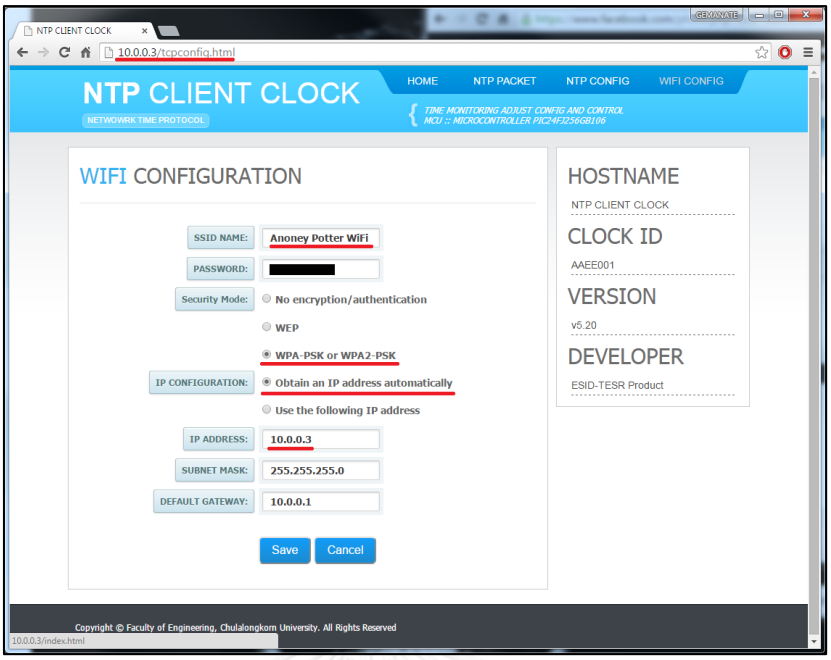
รูปที่ 5-23 ข้อมูล TCP/IP ของนาฬิกา ก่อนทำการทดสอบตั้งค่าใหม่

ขั้นตอนการทดสอบแรก เราจะทำการเปลี่ยนค่า IP Address ของนาฬิกาจาก 192.168.3.12 (Dynamic IP Address) เป็น 192.168.3.17 (Static IP Address) ผลที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 5-24 ผลที่ได้คือนาฬิกาจะทำการเปลี่ยนค่า IP Address ของตัวเองใหม่จาก 192.168.3.12 เป็น 192.168.3.17 และจะแสดงผลว่าขณะนี้นาฬิกาใช้ Static IP Address อยู่ (Use the following IP address) โดยผู้ใช้งานสามารถเข้ามายังหน้าเว็บเพจของนาฬิกาผ่าน URL ใหม่คือ 192.168.3.17



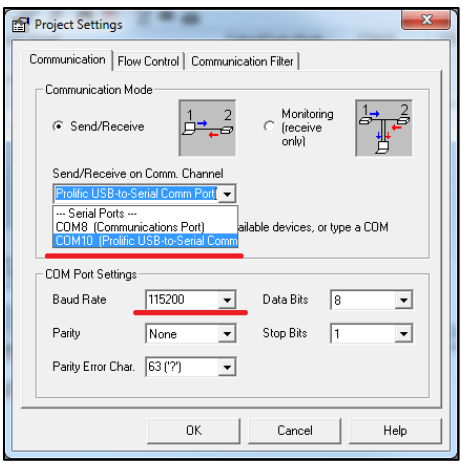
รูปที่ 5-24 แสดงผลการใช้งาน Static IP Address

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบเปลี่ยนการเชื่อมต่อ Wireless Access Point Router โดยก่อนจะทำการตั้งค่าการเชื่อมต่อใหม่ นาฬิกาทำการเชื่อมต่ออยู่กับ Wireless Access Point Router มีชื่อ SSID Name ว่า “*Port_Gamekill*” แสดงดังรูปที่ 5-23 และรูปที่ 5-24 จะทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อไปยัง Wireless Access Point Router อื่นในที่นี้จะทำการทดสอบเปลี่ยนการเชื่อมต่อไปยัง Wireless Access Point Router ที่มีชื่อ SSID Name ว่า “*Anoney Potter WiFi*” ต่อมาจึงใส่ Password ของ Wireless Access Point Router (ขออนุญาตไม่เปิดเผย Password) ทำการ Encryption แบบ WPA2-PSK และเรียกใช้งาน IP Address แบบ Dynamic IP Address เมื่อผู้ใช้งานทำการกดปุ่ม Save นาฬิกาจะทำการตั้งค่าข้อมูลต่างๆ ใหม่ แล้วทำการเริ่มต้นการทำงานตัวเองใหม่ จะใช้เวลาในการเริ่มต้นชั่วขณะหนึ่งแล้วเริ่มต้นการทำงานใหม่ ผลการทดสอบที่ได้ จะมีลักษณะดังรูปที่ 5-25 หลังจากที่นาฬิกาทำการเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้งหนึ่ง ผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่หน้าเว็บเพจของนาฬิกาได้ ผ่าน URL ใหม่ (ในที่นี้ Wireless Access Point Router จ่าย IP Address ให้แก่นาฬิกาเป็น 10.0.0.3) ผลที่ได้ในหน้า Tcpconfig.html คือ นาฬิกาจะทำการแสดงผล SSID Name, Password, และชุด IP Address ใหม่ ตามที่ได้รับจาก Wireless Access Point Router (Dynamic IP Address) ผลที่ได้จากการทดสอบคือ นาฬิกาสามารถเปลี่ยนการเชื่อมต่อกับ Wireless Access Point Router ได้อย่างถูกต้องและทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ



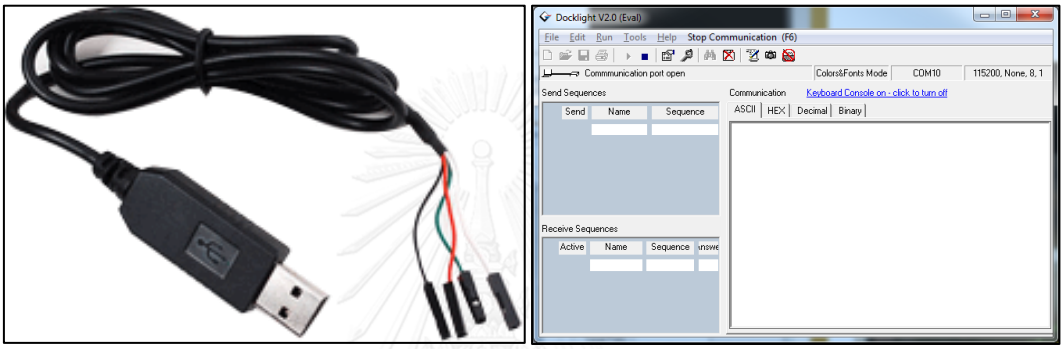
รูปที่ 5-25 ข้อมูล TCP/IP ของนาฬิกาหลังจากทดสอบทำการตั้งค่า

ขั้นตอนต่อมาคือการทดสอบตั้งค่าและปรับแต่งข้อมูลผ่าน UART Interface ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งข้อมูลทางด้านระบบเครือข่ายต่างๆ ได้ ผ่านทาง UART Interface เช่นกัน โดยการใช้โปรแกรม Serial Port อาทิเช่น Hyper Terminal, Docklight, หรือ puTTY เป็นต้น ในที่นี้จะใช้โปรแกรม Docklight สำหรับการทดสอบตั้งค่าข้อมูลผ่านทาง UART Interface โดยขั้นตอนแรก ผู้ใช้งานต้องทำการเปิดโปรแกรม Docklight เข้าไปยัง Project Setting เพื่อทำการตั้งค่าต่างๆ เพื่อทำการใช้งานโปรแกรม Docklight แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5-26

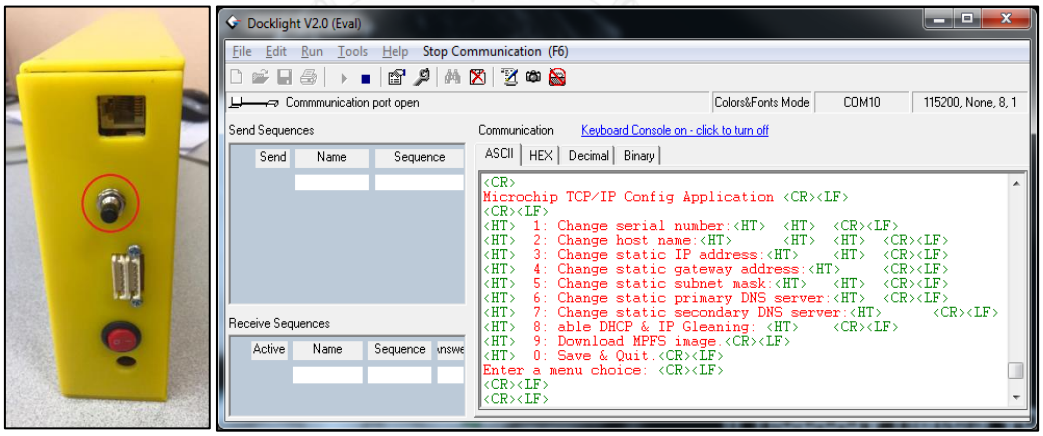


รูปที่ 5-26 การตั้งค่าเพื่อใช้งานโปรแกรม Docklight

เมื่อเข้าสู่หน้า Project Setting แล้ว ต่อมาทำการเลือกอุปกรณ์ Serial Port ที่เราใช้ ในที่นี้ การสอบการเชื่อมต่อระหว่างนาฬิกาและคอมพิวเตอร์จะใช้อุปกรณ์ Prolific USB-to-Serial Communication แสดงดังรูปที่ 5-27 และตั้งค่า Baud Rate ในที่นี้นาฬิกาจะใช้ Baud Rate ที่ 115,000 Bit/Sec เมื่อตั้งค่าทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ทำการกดปุ่ม OK จะเข้าสู่หน้า Program ลักษณะดังรูปที่ 5-27 เมื่อทำการตั้งค่าโปรแกรม Docklight ในขั้นต้นเสร็จสิ้นแล้ว เราจะสามารถทำการทดสอบการตั้งค่าผ่านทาง UART Interface ได้โดยทำการกดปุ่ม UART Configuration Button บนหน้าโปรแกรม Docklight จะแสดงข้อมูลดังรูปที่ 5-28



รูปที่ 5-27 Prolific USB-to-Serial Communication และโปรแกรม Docklight เมื่อพร้อมใช้งาน



รูปที่ 5-28 UART Configuration Button และโปรแกรม Docklight หลังจากทำการกดปุ่ม UART Configuration Button

5.2. Experiment Process

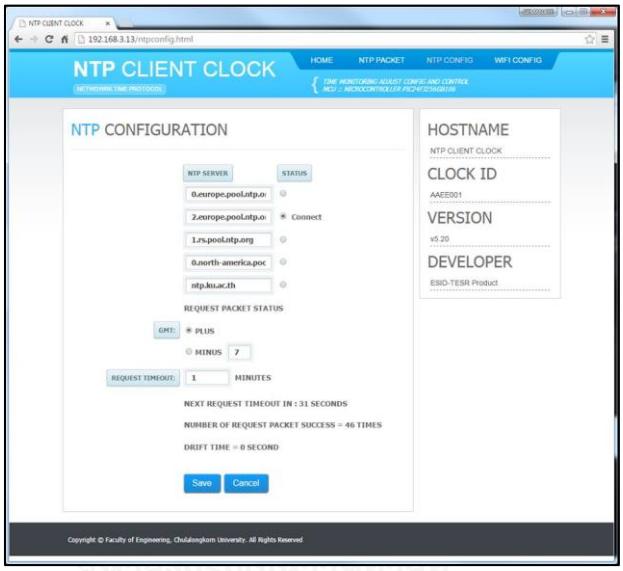
เมื่อทำการทดสอบกระบวนการทำงานต่างๆ ของนาฬิกาเป็นที่เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อมา คือการทดลองการทำงานของนาฬิกาเพื่อทำการหาประสิทธิภาพของนาฬิกา สำหรับ

กระบวนการทดลอง จะทำการตรวจสอบและเปรียบเทียบข้อมูลจากตารางที่ 5-1 ซึ่งหากทำการปล่อยให้นาฬิกาทำงานโดยปราศจากการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP (Stand Alone) นาฬิกาจะสามารถเดินไปได้นานเท่าใดจะเกิดความคลาดเคลื่อน (Drift Time) โดยจะทำการเริ่มต้นจับเวลาตั้งแต่วันจันทร์ที่ 22 มิถุนายน ค.ศ. 2015 เวลา 21:57:38 (GMT+7) แสดงดังรูปที่ 5-29 ผลที่ได้คือเมื่อนาฬิกาทำงาจนถึงวันพุธที่ 24 เวลา 11:52:09 (GMT+7) นาฬิกาทำการเดินต่อเนื่องเป็นเวลา 208,187 วินาที นาฬิกาสามารถแจ้งเตือนสถานะได้ถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 5-30 นาฬิกาจะเริ่มทีความคลาดเคลื่อนปรากฏขึ้นมาให้เห็นได้ชัด

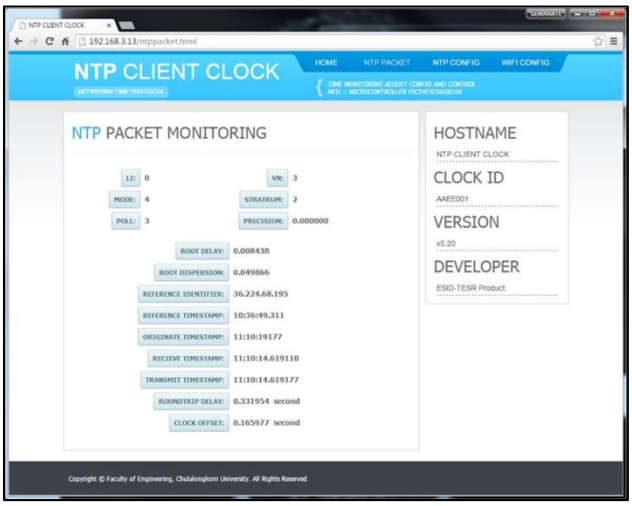
รูปที่ 5-29 เวลาเริ่มต้นในการทดลอง

รูปที่ 5-30 ข้อมูลเวลาเริ่มมีความคลาดเคลื่อน

จากการทดสอบเบื้องต้นในส่วนของการส่ง NTP request packet และได้รับข้อมูล NTP reply packet กลับมา จะเห็นได้ว่าในกรณีที่นาฬิกาเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทย ค่า Roundtrip Delay และค่า Clock Offset จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.075 วินาที 0.04-0.08 วินาที ตามลำดับ ในขั้นตอนต่อมาคือการทดลองให้นาฬิกาทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ของต่างประเทศ ในที่นี้ทำการทดลองเชื่อมต่อกับ 2.europe.pool.ntp.org Stratum-2 เป็นเซิร์ฟเวอร์ NTP ของประเทศเซอร์เบีย (Republic of Serbia) ผลที่ได้คือ NTP Reply Packet มีค่า Roundtrip Delay และ Clock Offset อยู่ที่ประมาณ 0.3 วินาที และ 0.6 วินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5-32



รูปที่ 5-31 ทดลองทำการเชื่อมต่อกับ 2.europe.pool.ntp.org



รูปที่ 5-32 NTP Reply Packet ที่ได้รับ

ผลที่ได้คือค่า Roundtrip Delay และ Clock Offset ของ NTP reply packet ที่ได้รับจากเซิร์ฟเวอร์ NTP ต่างประเทศ จะมีค่าสูงกว่า NTP reply packet ที่ได้รับจากเซิร์ฟเวอร์ NTP ภายในประเทศ จากการทดลองเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ของประเทศอื่น อาทิเช่น 0.north-america.pool.ntp.org (North-America), cn.pool.ntp.org (China), jp.pool.ntp.org (Japan), sg.pool.ntp.org (Singapore), es.pool.ntp.org (Spain) เป็นต้น ผลคือค่า Roundtrip Delay และ Clock Offset ของ NTP reply packet จะมีช่วงอยู่ที่ประมาณ 0.1 – 0.6 วินาที แต่ NTP reply packet ที่ได้รับจากเซิร์ฟเวอร์ NTP ภายในประเทศ มีค่า Roundtrip Delay และ Clock Offset ของ NTP reply packet จะมีช่วงอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 0.1 วินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6

ข้อสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทสุดท้ายนี้ได้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย ว่าสามารถนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อได้อย่างไรบ้าง มีสิ่งใดที่ทำแล้วไม่ประสบผลสำเร็จบ้าง และข้อเสนอแนะ จากการทำงานวิจัยนี้

6.1. สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบและพัฒนาโปรโตคอล NTP เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเข้ากับนาฬิกา เพื่อแสดงผลข้อมูลเวลาที่ถูกต้อง เชื่อถือได้ และแม่นยำให้แก่ผู้ใช้งาน โดยนาฬิกาสามารถระบุถึงความน่าเชื่อถือของตัวเองได้ และผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งและตั้งค่านาฬิกา ผ่านกระบวนการต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างได้

จากระบบที่ได้นำเสนอ ผู้วิจัยได้เริ่มต้นจากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับโปรโตคอล NTP และโปรโตคอลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาวิเคราะห์และทดลองหาประสิทธิภาพของโปรโตคอลโดยจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของการประยุกต์ใช้โปรโตคอลจะขึ้นอยู่กับสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าความแม่นยำข้อมูลเวลาของเซิร์ฟเวอร์ NTP ที่ทำการเชื่อมต่อ และประเภทของนาฬิกาอ้างอิงของของเซิร์ฟเวอร์ NTP (Reference Clock)
- ข้อมูล Roundtrip Delay และ Clock Offset ของ NTP reply packet โดยผลการทดลองคือข้อมูล Roundtrip Delay จะมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.075 วินาที และข้อมูล Clock Offset มีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.04-0.08 วินาที ในกรณีที่เชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ภายในประเทศ และจะมีค่าโดยประมาณ 0.1–0.6 วินาที ในกรณีที่เชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ของต่างประเทศ
- กระบวนการการบำรุงรักษา (Maintenance) ข้อมูลเวลาของนาฬิกา และความแม่นยำของอุปกรณ์จ่ายสัญญาณนาฬิกา (Clock Generator) ของนาฬิกา

นาฬิกา NTP แบบฝังตัวที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ สามารถรองรับการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ได้ถึง 5 เซิร์ฟเวอร์มีเว็บเพจสำหรับผู้ใช้งานในการปรับแต่งค่าและข้อมูลต่างๆ

นาฬิกาสามารถแจ้งเตือนสถานะความน่าเชื่อถือของตัวเองได้ และนาฬิกาจะมีค่าความคลาดเคลื่อนของเวลาไม่เกิน $\pm$ 1 วินาที โดยที่ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องคอยปรับแต่งเวลาให้ถูกต้องแบบนาฬิกาทั่วไป

จากการทดสอบ ผลที่ได้คือนาฬิกาสามารถทำงานตามกระบวนการ และขั้นตอนต่างๆ ที่ออกแบบและสร้างได้อย่างถูกต้องไม่ผิดพลาด ทั้งในส่วนของทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ นาฬิกาสามารถบำรุงรักษาเวลาได้อย่างหน้าพึงพอใจ ในกรณีที่นาฬิกาไม่สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP เพื่อทำการปรับปรุงข้อมูลเวลา นาฬิกาสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาถึง 500,000 วินาที (5 วัน 18 ชั่วโมง 53 นาที 20 วินาที) ก่อนจะเกิดการคลาดเคลื่อนไป $\pm$ 1 วินาที

6.2. ข้อเสนอแนะ

1. Microcontroller Unit ที่ใช้เป็นตัวประมวลผลหลักของนาฬิกาคือ PIC 24FJ256GB106 Microcontroller มีความละเอียดของเวลาอยู่ในระดับมิลลิวินาที ในการพัฒนาเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น ผู้พัฒนาสามารถพัฒนาโดยใช้ Microcontroller Unit ที่มีความละเอียดของเวลาอยู่ในระดับไมโครวินาทีหรือสูงกว่านั้น

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตคืออุปกรณ์ ZG2100MC Wi-Fi Transceiver Module [8] นั้นยังมีข้อจำกัดและความซับซ้อนในการใช้งานอยู่พอสมควร แต่ ณ ปัจจุบันมีอุปกรณ์ MRF24WB0BA/RM Wi-Fi Transceiver Module [9] เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจาก ZG2100MC เพื่อลดข้อจำกัดและความซับซ้อนในการใช้งานต่างๆ ทำให้ผู้ใช้งานและผู้พัฒนาสามารถพัฒนาการใช้งานและประสิทธิภาพของนาฬิกาได้มากยิ่งขึ้น แต่ก็จะมีราคาที่สูงมากยิ่งขึ้นเช่นกัน

3. ในการเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องของนาฬิกา ผู้พัฒนาสามารถพัฒนาประสิทธิภาพของนาฬิกาได้โดยใช้ อุปกรณ์จ่ายสัญญาณนาฬิกาที่มีค่า Frequency Tolerance ที่น้อยกว่า 2 PPM อาทิเช่น Si5334 Pin-Controlled Any-Frequency, Any-Output Quad Clock, Generator Module ซึ่งมีค่า Frequency Tolerance เพียง 0-1 PPM ในอีกกรณีหนึ่ง เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ NTP reply packet ได้จากการใช้งานนาฬิกาบนระบบเครือข่ายที่มีประสิทธภาพและจากผลการทดลอง ทราบได้ว่าการเชื่อมต่อนาฬิกาเข้ากับเซิร์ฟเวอร์ NTP ภายในประเทศจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ NTP ของต่างประเทศ

4. ความล่าช้าของการแพร่กระจายข้อมูล (Propagation Delay) ที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งหนึ่งที่มีผลต่อการเสถียรภาพของระบบเครือข่ายเช่นกันและการนำ Respond ของระบบเครือข่ายมาคิดด้วย เป็นอีกวิธีหนึ่งในการพัฒนาประสิทธภาพของนาฬิกา

5. เพื่อรองรับการใช้งานโปรโตคอลต่างๆ ในระบบเครือข่ายที่มีมากยิ่งขึ้น นอกจากประยุกต์ใช้โปรโตคอล NTP เป็นหลักแล้ว ผู้ใช้งานและผู้พัฒนาสามารถประยุกต์ใช้โปรโตคอลต่างๆ ด้านระบบเครือข่ายเข้ากับนาฬิกาได้อีกด้วย อาทิเช่น FTP (File Transfer Protocol), SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), SNMP (Simple Network Management Protocol), ICMP (Internet Control Message Protocol) และ Telnet Server เป็นต้น เพื่อรองรับการขยายตัวของการใช้งานโปรโตคอลและเป็นอีกช่องทางหนึ่งในการติดต่อสื่อสารส่งผ่านข้อมูลต่างๆ บนระบบเครือข่าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. Morgan, D.E.B.a.A.H., *Precision Measurement and Calibration : Frequency and Time.* . 1972, US Government Printing Office. 7.
2. ผู้จัดการออนไลน์, A. สภาฯ แจงนาฬิกา *15* ล้าน รวมค่าจัดการเวลาแถมเชื่อมดาวเทียม อ้างใช้ตามต่างประเทศ. 2013 [cited 2013 13]; August]. Available from: http://www.manager.co.th/politics/viewnews.aspx?NewsID=9560000101366.
3. Mills, D.L. *Request for Comments: 958* 1985 [cited 2013 12 August]; Available from: https://tools.ietf.org/html/rfc958.
4. WIKIPEDIA. *Leap second*. [cited 2013 13 August]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Leap_second.
5. Carroll, L. *The NTP Timescale and Leap Seconds*. 2012 12 May 2012 [cited 2013 13 August]; Available from: https://www.eecis.udel.edu/~mills/leap.html.
6. Humantech, C.M. *TUNING FORK CRYSTAL UNITS RoHS Compliant Standard CFS-308.CFS-206.CFS-145.CFV-206*. [cited 2013 13 August]; Available from: http://www.es.co.th/Schemetic/PDF/CFS.PDF.
7. Maxim Integrated Products, I., *DS3231 Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal.* 2015 p. 1.
8. Technology, M. *ZG2100M/ZG2101M Wi-Fi® Module Data Sheet 2.4 GHz 802.11b Low Power Transceiver Module*. 2010 March 2010 [cited 2013 13 August]; 2.4:[Available from: https://www.element14.com/community/.../ZG2100MC.pdf.
9. Inc., M.T. *MRF24WB0MA/MRF24WB0MB Data Sheet 2.4 GHz IEEE 802.11b™*. 2010 May 2013 [cited 2013 13 August]; Revision C [Available from: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70632C.pdf.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีระวัฒน์ ดาทอง เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2554 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบสมองกลฝังตัวและหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University