การปรับเวลาให้ตรงกันที่มีความซับซ้อนต่ำและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำแบบเคลื่อนที่ได้

นายพลวัต วัลลภวิสุทธิ์

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

LOW COMPLEXITY AND ENERGY EFFICIENT TIME SYNCHRONIZATION FOR MOBILE UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS

Mr. Pollawat Vollopvisut

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	การปรับเวลาให้ตรงกันที่มีความซับซ้อนต่ำและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำแบบเคลื่อนที่ได้
โดย	นายพลวัต วัลลภวิสุทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.นิฏฐิตา เชิดชู

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.นิฏฐิตา เชิดชู)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นรรัตน์ วัฒนมงคล)

พลวัต วัลลภวิสุทธิ์ : การปรับเวลาให้ตรงกันที่มีความซับซ้อนต่ำและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำแบบเคลื่อนที่ได้ (LOW COMPLEXITY AND ENERGY EFFICIENT TIME SYNCHRONIZATION FOR MOBILE UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.นิฏฐิตา เชิดชู, 68 หน้า.

การปรับเวลาให้ตรงกันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของการบริการหลายอย่างในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยมีเป้าหมายให้นาฬิกาของโนดรอบข้างตรงกันกับโนดหัวหน้ากลุ่ม โพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ภาคพื้นดินได้ถูกศึกษาค้นคว้าและวิจัยอย่างแพร่หลาย ในขณะที่โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีการศึกษาและวิจัยค่อนข้างจำกัด อีกทั้งยังไม่สามารถนำเอาแนวคิดจากโครงข่ายภาคพื้นดินมาใช้งานได้โดยตรง เนื่องจากโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีคุณลักษณะเฉพาะ เช่น เวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนาน การเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์และไม่สามารถรับสัญญาณ GPS ได้ ด้วยเหตุนี้การปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำจึงได้รับความสนใจและมีการวิจัยเพิ่มมากขึ้นโดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบขั้นตอนการปรับเวลาโดยเฉพาะ โพรโทคอล MU-Sync เป็นตัวอย่างหนึ่งของโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันที่ถูกออกแบบมาสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ คุณสมบัติที่สำคัญของ MU-Sync คือมีความซับซ้อนต่ำ สะดวกแก่การนำไปใช้งานและประยุกต์ใช้กับในสภาพแวดล้อมโครงข่ายได้หลากหลาย อย่างไรก็ตามในบางสถานการณ์ที่โนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างมีการเคลื่อนที่เข้าหากันหรือออกจากกันในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร เป็นเหตุให้การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายมีความผิดพลาด ส่งผลทำให้การประมาณค่า skew และ offset ผิดพลาด เพื่อลดข้อบกพร่องนี้ผู้วิจัยจึงเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของ MU-Sync โดยเรียกว่า EMU-Sync ซึ่งมีการคำนวณค่า skew และ offset จากทั้งสองมุมมองทั้งฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้าง การทำเช่นนี้สามารถลดความผิดพลาดของการประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายได้ ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า EMU-Sync มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า MU-Sync ทั้งในแง่ของความแม่นยำในการประมาณค่าและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา 2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

5470294421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: TIME SYNCHRONIZATION / UNDERWATER ACOUSTIC SENSOR NETWORKS / LONG PROPAGATION DELAY / MOBILITY

POLLAWAT VOLLOPVISUT: LOW COMPLEXITY AND ENERGY EFFICIENT TIME SYNCHRONIZATION FOR MOBILE UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS. ADVISOR: ASSOC. PROF.LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, CO-ADVISOR: NITTHITA CHIRDCHOO, Ph.D., 68 pp.

Time synchronization is an important part for many services in wireless sensor networks, where local clocks of neighboring nodes need to be synchronized with a cluster head. Many time synchronization protocols have been investigated in literature mostly for terrestrial wireless sensor networks. For underwater wireless sensor networks, due to its unique characteristics such as long propagation delay, sensor node mobility and GPS signal unavailability, synchronization methods for terrestrial networks cannot be directly applied. Hence there has been an increasing research focus on designing synchronization algorithms specifically for underwater wireless sensor networks. MU-Sync is an example of time synchronization protocol designed for mobile underwater networks. Key features of MU-Sync are its low complexity, ease of implementation, and applicability to various network environments. However, under certain conditions, where the cluster head and its neighboring node are moving toward or away from each other, MU-Sync miscalculates the propagation delay and thus causing inaccurate estimation of skew and offset. To mitigate this shortcoming of MU-Sync, we propose an enhancement of MU-Sync (EMU-Sync) by calculating skew and offset from perspective of both cluster head and neighboring node. By doing so, the errors of propagation delay estimation are substantially redeced. Simulation results show that EMU-Sync has better performance than MU-Sync in both accuracy of estimation and energy efficiency

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่างไปด้วยดีจากการช่วยเหลือให้คำปรึกษาของรองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่คอยแนะนำ แก้ไข ตลอดจนให้ความรู้พร้อมแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

อีกหนึ่งท่านซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญโดยตรงของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ดร.นิฏฐิตา เชิดชู อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาอย่างดี ให้คำแนะนำและพร้อมนำความรู้ต่าง ๆ มาปรับปรุงและแก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มเครือข่ายไร้สายและการสื่อสารดิจิทัลทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ จนทำให้เกิดแนวคิดใหม่ ๆ

และสิ่งสำคัญที่สุด ขอขอบคุณพระคุณบิดามารดาที่ได้สนันสนุน ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญรูป ..... ฎ
สารบัญตาราง ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์ 4
1.3 ขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์ 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.4.1 สามารถทำนายค่า skew และ offset ของเวลาในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำได้ 4
1.4.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีการการปรับเวลาให้ตรงกันของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ 4
1.4.3 ได้ทราบข้อดี-ข้อเสียของโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบการปรับเวลาให้ตรงกัน ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมใต้น้ำ 4
1.4.4 ได้รับความรู้ของโพรโทคอลการทำงานของการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำและทำให้รู้ถึงผลกระทบเมื่อเวลาไม่ตรงกัน 4
1.4.5 สามารถนำการปรับเวลาให้ตรงกันไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับเวลาให้เหมาะสมกับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำได้ 4
1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์ 4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.1 ค่า skew และ offset 6
2.2 ช่องสัญญาณการสื่อสารใต้น้ำ 8
2.3 การเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ 10
2.4 ความไม่แน่นอนทางเวลา (Uncertainty time) 10
2.5 ปัญหาอื่นๆ 13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 13
2.6.1 การทำงานของโพรโทคอล MU-Sync 18
2.6.1.1 กระบวนการปรับเวลาให้ตรงกัน 20
2.6.1.1.1 การแลกเปลี่ยนข่าวสาร 20
2.6.1.1.2 การคำนวณเวลาการแพร่กระจาย 21
2.6.1.1.3 คำนวณหา skew และ offset 22
2.6.1.2 การปรับเวลาให้ตรงกัน 23
2.6.2 การทำงานของโพรโทคอล DA-Sync 23
2.6.2.1 การเก็บข้อมูล 25
2.6.2.2 การกลั่นกรองค่าประมาณความเร็วสัมพัทธ์ 25
2.6.2.3 การประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจาย 25
2.6.2.4 การหาค่า skew และ offset 25
2.6.2.5 การปรับเทียบ 25
2.6.3 ความแตกต่างของขั้นตอนการทำงานระหว่างโพรโทคอล MU-Sync และ DA-Sync . 26
2.7 ตัวอย่างการปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายหยุดนิ่ง 27
บทที่ 3 การปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ (EMU-Sync) 30
3.1 ความล้มเหลวของการปรับเวลาให้ตรงกันอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ 31

หน้า

3.2 การประมาณค่า skew จากมุมมองของโนดอ้างอิงและโนดรอบข้าง 37
3.3 การออกแบบโพรโทคอล EMU-Sync 40
3.3.1 การแลกเปลี่ยนข่าวสาร 42
3.3.2 การประมาณค่า skew และ offset ของโนดรอบข้าง 42
3.3.3 การประมาณค่า skew และ offset ของโนดหัวหน้ากลุ่ม 43
3.3.4 การประมาณค่าเฉลี่ย skew และ offset จากมุมมองทั้งสอง 44
3.3.5 การบอกค่าประมาณ skew และ offset ไปยังโนดรอบข้าง 44
บทที่ 4 ผลการทดลอง 45
4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบการจำลอง 45
4.2 ผลการทดลอง 46
4.2.1 ความผิดพลาดหลังการปรับเวลาให้ตรงกัน 47
4.2.2 ศึกษาผลกระทบจากความผิดพลาดของค่า skew 48
4.2.3 ศึกษาผลกระทบเมื่อความเร็วสูงสุดของโนดเซนเซอร์เพิ่มขึ้น 50
4.2.4 ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนทิศทางของโนดเซนเซอร์ 51
4.2.5 ศึกษาผลกระทบจากเวลารอคอยที่ยาวนานขึ้น 53
4.2.6 ศึกษาผลของการเพิ่มจำนวนข้อความในการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 57
4.2.7 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 58
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 63
5.1 บทสรุปผลการวิจัย 63
5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต 64
5.2.1 พัฒนาโพรโทคอล EMU-Sync ไปใช้ในทางปฏิบัติ 64
5.2.2 การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจาย 64
5.2.3 ผลกระทบจากจำนวนโนดเซนเซอร์ในโครงข่าย 64

หน้า

รายการอ้างอิง 65

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ทางเวลาระหว่าง Global time กับ Local time 7

รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดของความไม่แน่นอนทางเวลา 11

รูปที่ 2.3 ภาพแท่งความถี่ได้แสดงถึงการกระจายตัวของความแตกต่างทางเวลาระหว่างตัวรับ ซึ่งบันทึกได้ 1,478 ครั้ง มีการกระจายตัวแบบปกติ (Gaussian distribution) มี $\mu = 0, \sigma = 11.1\mu\sec$ โดยมีความเชื่อมั่นเท่ากับ 99.8% 12

รูปที่ 2.4 (ก) วิธีการบริหารจัดการระหว่างตัวรับกับตัวรับ (Receiver-receiver based approach) (ข) วิธีการบริหารจัดการตัวส่งกับตัวรับ (Sender-receiver based approach) 14

รูปที่ 2.5 สถาปัตยกรรมโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ (Mobi-Sync) 16

รูปที่ 2.6การปรับเวลาให้ตรงกันของโพรโทคอล MC-Sync 17

รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 20

รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอล DA-Sync 24

รูปที่ 2.9 ผังเวลาแสดงการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 2 รอบ 28

รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 31

รูปที่ 3.2 เวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบ 32

รูปที่ 4.1 ความผิดพลาดของเวลาหลังจากที่มีการปรับเวลาให้ตรงกันแล้ว 47

รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันผ่านไป 100 วินาที เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ skew ตั้งแต่ 5 ppm ถึง 100 ppm 49

รูปที่ 4.3 ผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ 50

รูปที่ 4.4 ผลกระทบจากช่วงเวลาเฉลี่ยในการเปลี่ยนความเร็วหรือทิศทางที่เพิ่มขึ้น 51

รูปที่ 4.5 ผลกระทบจากระยะเวลารอคอยที่เพิ่มขึ้น 53

รูปที่ 4.6 ผลกระทบเมื่อระยะเวลารอคอยฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่มเพิ่มขึ้น 54

รูปที่ 4.7 ผลกระทบเมื่อระยะเวลารอคอยฝั่งโนดรอบข้างเพิ่มขึ้น 56

รูปที่ 4.8 ผลของการเพิ่มจำนวนการการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 57

รูปที่ 4.9 ประสิทธิของการใช้พลังงาน 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของการสื่อสาร 8

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง MU-Sync และ DA-Sync 26

ตารางที่ 3.1 คำนวณค่า skew โดยใช้โพรโทคอล TSHL เมื่อเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีความเร็วในการเคลื่อนที่การระนาบแกน x (v_c เป็นความเร็วของโนดหัวหน้ากลุ่ม และ v_n เป็นความเร็วของโนดรอบข้าง) 33

ตารางที่ 3.2 การประมาณค่า skew โดยใช้โพรโทคอล MC-Sync เมื่อกำหนดให้โนดที่ต้องปรับเวลาหยุดอยู่กับที่ โดยมีโนดอ้างอิงสองตัวอยู่ในระนาบเดียวกันและเคลื่อนที่ในระนาบเดียวกัน (v_{R1} เป็นความเร็วของโนดอ้างอิงตัวที่หนึ่งและ v_{R2} เป็นความเร็วของโนดอ้างอิงตัวที่สอง) กำหนดให้ค่า skew มีความผิดพลาดเท่ากับ 1.00001 34

ตารางที่ 3.3 ค่าประมาณ skew โดยใช้โพรโทคอล MU-Sync เมื่อเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีความเร็วในการเคลื่อนที่การระนาบแกน x (v_c เป็นความเร็วของโนดหัวหน้ากลุ่ม และ v_n เป็นความเร็วของโนดรอบข้าง) 35

ตารางที่ 3.4 ค่าประมาณ skew หลังจากใช้โพรโทคอล MU-Sync ในการปรับเวลาให้ตรงกันโดยคำนวณในมุมมองทางฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่ม 37

ตารางที่ 3.5 ค่าประมาณ skew หลังจากใช้โพรโทคอล MU-Sync ในการปรับเวลาให้ตรงกันโดยคำนวณในมุมมองทางฝั่งโนดรอบข้าง 38

ตารางที่ 3.6 ค่าประมาณ skew จากมุมมองทั้งสองโนด 39

ตารางที่ 4.1 จำนวนครั้งของการปรับเวลาให้ตรงกันอีกครั้งภายในช่วงระยะเวลา 10 วัน 60

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนภาคพื้นดินได้ถูกนำมาศึกษาและพัฒนาจนมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในขณะที่โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำนั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มพัฒนา อีกทั้งยังมีข้อจำกัดหลายอย่าง เนื่องจากคุณลักษณะบางประการไม่เหมือนกันยกตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์มีขนาดจำกัด เวลาประวิงการแพร่กระจายยาวนาน (long propagation delay) หรืออัตราความผิดพลาดบิตสูง (high bit error rate) เป็นต้น ทำให้แนวคิดที่ใช้งานได้ดีบนโครงข่ายภาคพื้นดินกลับไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรงกับโครงข่ายใต้น้ำ

การปรับเวลาให้ตรงกัน (Time synchronization) คือการทำให้เวลาของนาฬิกาสองตัวหรือมากกว่าเดินตรงกัน เนื่องจากโพรโทคอลหลายตัวใช้ประโยชน์หรือจำเป็นต้องใช้เวลาที่ตรงกันในการปฏิบัติงานเพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เวลาที่ตรงกันเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของการสื่อสารแทบทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการสื่อสารบนภาคพื้นดินและใต้น้ำ ถึงแม้ว่านาฬิกาจะถูกผลิตออกมาจากโรงงานอย่างสมบูรณ์แบบมากขนาดไหนก็ตาม เมื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต่างกันการทำงานของนาฬิกาสามารถเกิดความผิดพลาดได้ และเมื่อเวลาของโนดเซนเซอร์ทั้งสองแตกต่างกันมาก โนดเซนเซอร์ทั้งสองต้องปรับเวลาให้ตรงกันใหม่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำแบบเคลื่อนที่ที่ชื่อว่า EMU-Sync ซึ่งพัฒนามาจากโพรโทคอล MU-Sync โดยเสนอปัญหาของ MU-Sync และวิธีแก้ปัญหาเพื่อลดความผิดพลาดในการประมาณค่าทางเวลา จึงทำให้โพรโทคอล EMU-Sync มีความแม่นยำกว่าโพรโทคอล MU-Sync

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการติดต่อสื่อสารเป็นปัจจัยที่สำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทำให้เกิดเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์ที่ต้องการสื่อสารจากสถานที่แห่งหนึ่งไปยังสถานที่อีกแห่ง ก่อให้เกิดแนวคิดต่าง ๆ เช่นความต้องการที่จะตรวจสอบอุณหภูมิในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง มนุษย์ไม่จำเป็นต้องเข้าไปตรวจสอบอุณหภูมิในพื้นที่ตลอดเวลา เพียงแค่เข้าไปติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิแล้วส่งข้อมูลกลับมายังศูนย์กลาง ซึ่งเป็นประโยชน์จากการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์เข้ามาติดตั้ง ทำให้มนุษย์มีความสะดวกสบายขึ้น โดยเทคโนโลยีเซนเซอร์มีคุณสมบัติดังนี้คือมีขนาดเล็ก แม่นยำสูง ใช้พลังงานต่ำ ราคาถูก ประมวลผลด้วยตัวเอง ส่งข้อมูลได้ถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันและเป็นโครงข่าย [1] ที่กล่าวว่าเป็นโครงข่ายคือสามารถ

นำเซนเซอร์ไร้สายมาติดตั้งและขยายพื้นที่จนครอบคลุมตามความต้องการในการใช้งานเกิดเป็นโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้แก่ การแพทย์ การทหาร อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และโครงข่ายในบ้าน เป็นต้น

ปัจจุบันนี้มีการศึกษาค้นคว้าโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ ซึ่งเป็นการนำโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายบนภาคพื้นดินมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ ได้แก่ การแจ้งเตือนภัยสึนามิในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดสึนามิ การสำรวจทรัพยากรธรรมชาติใต้ทะเลและการเฝ้าระวังทางทหารสำหรับตรวจจับวัตถุต้องสงสัยในบริเวณมหาสมุทร เป็นต้น แต่การใช้งานในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำดังกล่าวยังคงอยู่ในช่วงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีข้อจำกัดหลาย ๆ อย่าง ทำให้ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพราะโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำใช้คลื่นเสียงซึ่งแตกต่างจากโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดินที่ใช้คลื่นวิทยุ จึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำได้โดยตรง ด้วยจากคุณลักษณะที่แตกต่างกันของคลื่นเสียงและคลื่นวิทยุ คือ คลื่นวิทยุมีความเร็วประมาณ $3*10^8$ เมตรต่อวินาที เมื่อคำนึงถึงเวลาประวิงการแพร่กระจายมีค่าที่น้อยมากจนสามารถละเลยในส่วนนี้ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงเวลประวิงการแพร่กระจายของคลื่นเสียงใต้น้ำซึ่งมีความเร็วประมาณ 1,500 เมตรต่อวินาที [2-4] จึงไม่สามารถละเลยเวลาประวิงการแพร่การกระจายได้เป็นเพราะว่าความเร็วเสียงใต้น้ำที่ช้ากว่าคลื่นวิทยุถึง 200,000 เท่า อีกทั้งโนดเซนเซอร์มีการเคลื่อนที่ใต้น้ำ ไม่ว่าจะเป็นทั้งการเคลื่อนที่โดยอาศัยใบพัด หรือเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำ ส่งผลกระทบต่อเวลาประวิงการแพร่กระจายทั้งขาไปและขากลับไม่เท่ากัน จึงเป็นไปได้ยากที่จะคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายที่แท้จริง ซึ่งทำให้การออกแบบโพรโทคอลเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีความท้าทายในเรื่องการปรับเวลาให้ตรงกัน

นอกเหนือจากนี้เวลายังเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการทำงานหรือการออกแบบโพรโทคอล ทั้งในเรื่องของการรักษาความปลอดภัย การจัดการ การค้นหาตำแหน่ง และการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในโครงข่าย เป็นต้น ดังนั้นหากเวลาในโครงข่ายไม่ตรงกัน ความยุ่งยากในการจัดการข้อมูลหรือประสิทธิภาพของโพรโทคอลต่าง ๆ จะลดลง เช่น โพรโทคอล sleep-wake โนดเซนเซอร์ในโครงข่ายไม่จำเป็นต้องทำงานตลอดเวลา เพียงแค่ตื่นขึ้นมาทำงานเฉพาะในช่วงเวลาที่กำหนดเท่านั้น และเมื่อทำงานเสร็จแล้วโนดเซนเซอร์เหล่านั้นจะหลับไป ซึ่งแนวคิดนี้มีประโยชน์อย่างมากในการออกแบบโครงข่ายเซนเซอร์เพราะจะเป็นการช่วยเพิ่มอายุการใช้งานในโครงข่าย แต่โพรโทคอลนี้จำเป็นต้องมีเวลาที่ตรงกันทั้งโครงข่าย เนื่องจากโนดเซนเซอร์แต่ละตัวจะมีตารางเวลาทำงานที่จำเป็นต้องใช้เวลาที่ตรงกันในการตื่นขึ้นมาทำงานหรือหลับในช่วงเวลาที่ไม่ต้องทำงาน [5]

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการเสนอโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็น Network Time Protocol (NTP) [6], Global Positioning System (GPS) [7] โดย NTP ถูกออกแบบมาใช้ในโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (internet) ซึ่งไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เนื่องจากมีปัญหาการระบุลำดับชั้นในการปรับเวลาให้ตรงกัน เพราะโทโพโลยีของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา สำหรับ GPS นั้นในไม่สามารถใช้งานใต้น้ำได้เพราะคลื่นวิทยุแพร่ผ่านในพื้นผิวน้ำได้ไม่กี่เมตรเท่านั้น รวมถึงโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายภาพพื้นดินด้วย นั้นคือโพรโทคอลเหล่านี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ [8]

ในปัจจุบันการเดินของนาฬิกาอ้างอิงจากการสั่นของผลึกแร่ ซึ่งผลึกแร่ที่ถูกนำมาใช้จะมีอัตราการสั่นที่เสถียร เช่น แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่ซีเซียม (Cesium) เป็นต้น และเป็นที่ทราบกันดีว่านาฬิกาที่อ้างอิงการสั่นจากแร่ซีเซียมมีความแม่นยำมากกว่านาฬิกาที่อ้างอิงการสั่นจากแร่ควอตซ์ แต่อย่างไรก็ตามนาฬิกาที่ถูกใช้ในโนดเซนเซอร์เป็นนาฬิกาควอตซ์ เนื่องจากมีราคาถูก ขนาดเล็ก ดูแลง่ายและมีความแม่นยำสูง [9] เมื่อเทียบกับแร่ซีเซียมที่มีราคาแพง ขนาดใหญ่ ดูแลยาก อ่อนไหวง่าย เมื่อนาฬิกาถูกผลิตออกจากโรงงานไม่ว่าจะสมบูรณ์แค่ไหนก็ตามแต่ในการนำไปใช้งานจริงอัตราการสั่นของผลึกแร่สามารถเปลี่ยนแปลงไปจากอัตราการสั่นมาตรฐานได้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่นำไปใช้งานมีสภาพที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ความดัน การกัดกร่อนของเกลือ แรงดันจากแบตเตอร์รี่ เป็นต้น ดังนั้นเมื่อเวลาของทั้งสองโนดเซนเซอร์แตกต่างกันจนเกินกว่าค่าๆหนึ่งที่ยอมรับได้ เราจึงต้องมาทำการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง เพื่อให้ความผิดพลาดทางเวลาเกิดน้อยลง โดยความผิดพลาดทางเวลาเกิดจากนาฬิกามีเวลาไม่ตรงกันกับนาฬิกาอีกตัว ซึ่งทั่วไปแล้วความผิดพลาดทางเวลาแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ skew และ offset สำหรับปัญหาของ skew เกิดจากนาฬิกาสองตัวเดินไม่เท่ากันเนื่องจากอัตราการสั่นของผลึกแร่เปลี่ยนไปจากมาตรฐาน ส่วนปัญหาของ offset เกิดจากการตั้งเวลาเริ่มต้นของนาฬิกาไม่พร้อมกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ชัดว่าเวลามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบโครงข่ายแทบจะทุกโครงข่าย ซึ่งในงานวิจัยส่วนมากมักจะสมมติให้เวลาของแต่ละเซนเซอร์นั้นตรงกัน แต่ในทางปฏิบัติมีหลายปัจจัยที่ทำให้เวลาในเซนเซอร์แต่ละตัวคลาดเคลื่อนไปจากเวลามาตรฐานหรือเวลาของเซนเซอร์อีกตัว ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายเซ็นเซอร์ลดลงได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่โดยให้มีความแม่นยำ แต่ยังคงความซับซ้อนต่ำเพิ่มขึ้น ที่มีชื่อว่าโพรโทคอล EMU-Sync

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีการปรับเวลาให้ตรงกันของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำโดยประมาณค่า skew และ offset ของโนดรอบข้างจากมุมมองของทั้งโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างเพื่อให้มีความผิดพลาดให้น้อยที่สุด แต่ยังคงมีความซับซ้อนต่ำ โดยพิจารณาในสภาพแวดล้อมที่แต่ละโนดเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ

1.3 ขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์

1.3.1 พัฒนาวิธีการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำที่สามารถเคลื่อนที่ได้
1.3.2 จำลองเหตุการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของการปรับเวลาให้ตรงกันกับโพรโทคอล Mu-Sync และโพรโทคอล DA-Sync

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทำนายค่า skew และ offset ของเวลาในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำได้

1.4.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีการการปรับเวลาให้ตรงกันของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ

1.4.3 ได้ทราบข้อดี-ข้อเสียของโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำเพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบการปรับเวลาให้ตรงกัน ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมใต้น้ำ

1.4.4 ได้รับความรู้ของโพรโทคอลการทำงานของการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำและทำให้รู้ถึงผลกระทบเมื่อเวลาไม่ตรงกัน

1.4.5 สามารถนำการปรับเวลาให้ตรงกันไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับเวลาให้เหมาะสมกับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำได้

1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี: กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่นำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย คุณลักษณะของคลื่นเสียงในใต้น้ำ ปัญหาและความน่าท้าทายต่อการออกแบบการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำแบบเคลื่อนที่โดยใช้คลื่นเสียง การทำงานของโพรโทคอล MU-Sync

บทที่ 3 การออกแบบโพรโทคอล EMU-Sync: นำเสนอโพรโทคอล EMU-Sync ที่ลดผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์และเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนานในสภาพแวดล้อมใต้น้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4 ผลการทดสอบ: นำเสนอผลโดยเปรียบเทียบกับ MU-Sync และ DA-Sync ในด้านความแม่นยำ จำนวนรอบในการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ผลกระทบจากความเร็ว และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เป็นต้น

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: สรุปงานวิจัยทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และเสนอแนวทางในการพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ต่อไป

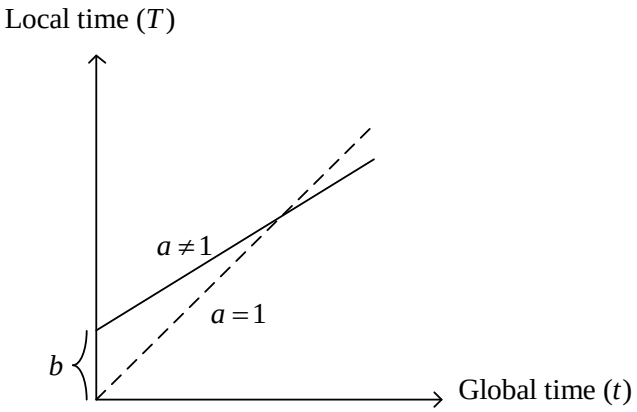
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

การปรับเวลาให้ตรงกันนั้นสำคัญสำหรับการสื่อสารในปัจจุบัน เพราะว่าในมุมมองของการจัดการ การรักษาความปลอดภัย หรือการวางแผน เป็นต้น ล้วนมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทั่วไปโนดเซนเซอร์ใช้ผลึกแร่ควอตซ์เพื่อบอกเวลา เนื่องจากผลึกแร่ควอตซ์มีราคาถูก อีกทั้งยังมีอัตราการสั่นที่คงที่ จึงเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้กับโนดเซนเซอร์ทั่ว ๆ ไปเพื่อบอกเวลา แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของผลึกแร่ควอตซ์นั้นต่ำและอ่อนไหวง่ายจากผลกระทบของสิ่งแวดล้อมภายนอก (เช่น อุณหภูมิ แรงดัน แรงดันจากแบตเตอร์รี่ เป็นต้น) ส่งผลทำให้ความถี่ในการสั่นของผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากอัตราการสั่นมาตรฐาน เป็นเหตุทำให้เวลาของโนดเซนเซอร์เดินไม่ถูกต้อง ดังนั้นการประมาณค่าความถี่ของการสั่นของผลึกที่ใช้งานอยู่ให้ตรงกับอัตราการสั่นมาตรฐานหรือปรับให้ตรงกับโนดอ้างอิง (reference node) จึงเป็นวิธีที่ทำให้เวลาของโนดเซนเซอร์ตรงกับเวลาจริงหรือเวลาของโนดเซนเซอร์ในกลุ่มโครงข่ายเซนเซอร์

2.1 ค่า skew และ offset

การปรับเวลาให้ตรงกัน คือ การปรับเวลาของนาฬิกาตัวหนึ่งให้ตรงกันกับอีกตัวหนึ่ง หรือปรับเวลาให้ตรงกันภายในโครงข่าย โดยไม่สนใจว่าโทโพโลยีของโครงข่ายจะเป็นแบบไหน ความผิดพลาดของเวลาที่ไม่ตรงกันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเกิดจากความถี่ในการสั่นของผลึกเปลี่ยนแปลงไปจากมาตรฐาน ทำให้เวลาของโนดเซนเซอร์เดินช้าหรือเร็วกว่าปกติ โดยความผิดพลาดของนาฬิกาในส่วนนี้เรียกว่า skew ส่วนที่สองเกิดจากการตั้งเวลาเริ่มต้นของโนดเซนเซอร์ไม่พร้อมกันเรียกว่า offset ซึ่งค่า skew และ offset ของนาฬิกาสองตัวสามารถแสดงได้ได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการเทียบกันระหว่างเวลาโลก (Global time) และเวลาท้องถิ่น (Local time) โดยที่เวลาโลกคือ เวลามาตรฐาน เช่น Greenwich Mean Time (GMT) และเวลาท้องถิ่นคือเวลาที่โนดเซนเซอร์วัดได้ด้วยตัวเอง สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้เวลาโลกคือเวลาของโนดอ้างอิงและเวลาท้องถิ่นเป็นเวลาของโนดรอบข้างที่ต้องการปรับเวลา เวลาโลกและเวลาท้องถิ่นมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ทางเวลาระหว่าง Global time กับ Local time

$$T = at + b \tag{2.1}$$

เมื่อ T คือเวลาท้องถิ่น (Local time)

t คือเวลาโลก (Global time)

a คือ skew

b คือ offset

รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ทางเวลาระหว่างเวลาโลกเทียบกับเวลาท้องถิ่น หากเวลาท้องถิ่นเดินตรงกับเวลาโลก ค่า skew มีค่าเท่ากับหนึ่งและ offset มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังเส้นประที่ถูกแสดงในรูป แต่เมื่อเวลาทั้งสองตัวไม่ตรงกัน ค่า skew จะไม่เท่ากับหนึ่ง หรือค่า offset มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เช่นหากมีค่า skew เป็น 1.001 หมายความว่า ใน 1 วินาทีของเวลาโลก เวลาท้องถิ่นจะผ่านไป 1.001 วินาที แต่หากค่า skew มีค่าเท่ากับหนึ่งและมีค่า offset เป็นหนึ่ง นั้นหมายความว่าไม่ว่าเวลาจะผ่านไปเท่าไร นาฬิกาทั้งสองตัวจะมีค่าความแตกต่างระหว่างเวลาเป็น 1 วินาทีเสมอ

โดยทั่วไปแล้วความผิดพลาดของ offset มีลักษณะคงที่ตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ จนกว่าจะมีการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง แต่ความผิดพลาดของ skew จะมีการสะสมความผิดพลาดทางเวลาตลอดเวลา ส่งผลให้มีความผิดพลาดทางเวลาที่เกินกว่าค่าที่ยอมรับได้จึงนำไปสู่ขั้นตอนการปรับเวลาให้ตรงกันอีกครั้ง ดังนั้นการออกแบบโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันที่มีความแม่นยำสูงมักมุ่งเน้นไปที่การประมาณค่าทั้ง skew และ offset

2.2 ช่องสัญญาณการสื่อสารใต้น้ำ

โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดินนิยมใช้คลื่นวิทยุในการติดต่อสื่อสารในการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน แต่เมื่อนำไปใช้ในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ คลื่นวิทยุสามารถแพร่ผ่านน้ำได้ไม่กี่สิบเมตรเท่านั้น [1-3] เพราะมีการลดทอนที่สูงมาก อย่างไรก็ตามคลื่นวิทยุสามารถใช้ในการสื่อสารระยะไกลใต้น้ำได้ที่ความถี่ต่ำเป็นพิเศษ (30 Hz – 300 Hz) แต่มันเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากสายอากาศที่ใช้รับ-ส่งสัญญาณต้องมีขนาดใหญ่และใช้เครื่องส่งที่มีกำลังสูงในการสื่อสาร ซึ่งขัดแย้งกับโนดเซนเซอร์ที่มีขนาดเล็กและประหยัดพลังงาน ดังนั้นคลื่นวิทยุจึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้งานใต้น้ำ

การสื่อสารโดยใช้สัญญาณแสงเป็นที่ทราบกันดีว่าสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วอยู่ในระดับกิกะบิตต่อวินาที แต่หากนำมาใช้สภาพแวดล้อมใต้น้ำ แสงจะถูกลดทอนและเกิดการกระเจิงอย่างมากในใต้น้ำ อีกทั้งยังมีราคาแพงและยากต่อการรับ-ส่งสัญญาณเนื่องจากต้องมีความแม่นยำสูงในการส่งเลเซอร์บีม (laser beam) ไปยังตัวรับสัญญาณของตัวรับ

คลื่นเสียงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารไร้สายใต้น้ำเพราะว่ามีการสูญเสียต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคลื่นวิทยุ ทำให้สามารถใช้ติดต่อสื่อสารระยะทางไกลได้ สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างคลื่นวิทยุกับคลื่นเสียงคือความเร็วในการแพร่กระจาย ความเร็วของเสียงใต้น้ำอยู่ที่ประมาณ 1500 เมตรต่อวินาทีเท่านั้น ยิ่งกว่านั้นความเร็วของเสียงในใต้น้ำสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ความหนาแน่นและความเค็มซึ่งส่งผลให้คลื่นเสียงสามารถเดินทางเป็นเส้นโค้ง อีกทั้งยังมีปัญหาจากการสูญเสียเนื่องจากการดูดซึม การสูญเสียเนื่องจากการกระเจิง การสะท้อนกลับหลายเส้นทางจากพื้นผิวทะเลและพื้นผิวใต้ทะเล เป็นต้น ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของการสื่อสาร [6] เป็นการเปรียบเทียบการสื่อสารบนภาคพื้นดินโดยใช้คลื่นวิทยุ การสื่อสารดาวเทียมและการสื่อสารใต้น้ำโดยใช้สัญญาณเสียง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของการสื่อสาร

คุณลักษณะ	**ดาวเทียม**	**802.11 RF**	**Chipcon RF**	**คลื่นเสียงใต้น้ำ (ระยะทางสั้น)**
Bit rate	155 Mb/s	11 Mb/s	20-50 kb/s	20-50 kb/s
Typical BER	10^{-10}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-2}
Propagation Delay	120 ms	< 1 us	< 1us	300 ms
Distance	42,000 km	< 3km	< .5 km	< .5km

เห็นได้ว่าการสื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงใต้น้ำมีประสิทธิภาพที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการสื่อสารด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น การสื่อสารด้วยเสียงใต้น้ำมีอัตราการส่งข้อมูลที่น้อยและมีอัตราการผิดพลาดของบิตสูง ทำให้ข้อมูลที่ถูกส่งออกจำเป็นต้องถูกเข้ารหัสที่ซับซ้อนมากขึ้นหรือต้องเพิ่มขนาดของพาริตีบิต (parity bit) ส่งผลให้ข้อมูลมีขนาดลดลง ยิ่งกว่านั้นเมื่ออัตราการส่งข้อมูลน้อย จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการสื่อสารนานขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียของข้อมูลในระหว่างการส่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อย คุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารคลื่นเสียงใต้น้ำ ทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการออกแบบโครงข่ายคลื่นเสียงใต้น้ำดังนี้

1. แบนด์วิดท์ที่ใช้ได้มีขนาดจำกัดมาก
2. ช่องสัญญาณใต้น้ำอ่อนแอมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาจากพหุวิถี (multipath) และการจางหายของสัญญาณ (fading)
3. ค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนาน ซึ่งสูงกว่าคลื่นวิทยุถึง 200,000 เท่า
4. อัตราความผิดพลาดบิตสูงและสามารถเกิดการสูญเสียสภาวะเชื่อมต่อชั่วคราว (shadow zone)
5. พลังงานแบตเตอร์รี่มีขนาดจำกัดและไม่สามารถเติมพลังงานให้แก่แบตเตอร์รี่ได้
6. การทำงานของเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีแนวโน้มที่จะทำงานล้มเหลวได้ง่ายเนื่องจากการเสื่อมสภาพและการกัดกร่อนของน้ำทะเล

จากที่กล่าวมาการสื่อสารใต้น้ำนั้นใช้ช่องสัญญาณคลื่นเสียง จึงแตกต่างกับการสื่อสารบนภาคพื้นดินที่ใช้คลื่นวิทยุ ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมโพรโทคอลที่ถูกวิจัยและพัฒนามาอย่างยาวนานในโครงข่ายภาคพื้นดินกลับไม่สามารถนำมาใช้งานในโครงข่ายใต้น้ำได้โดยตรง เช่นเดียวกันกับการปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำที่ไม่สามารถนำเอาโพรโทคอลของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดินมาใช้ได้โดยตรง โดยมีปัญหาหลักเกิดจากเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนาน ซึ่งจะอธิบายต่อในภายหลัง

2.3 การเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์

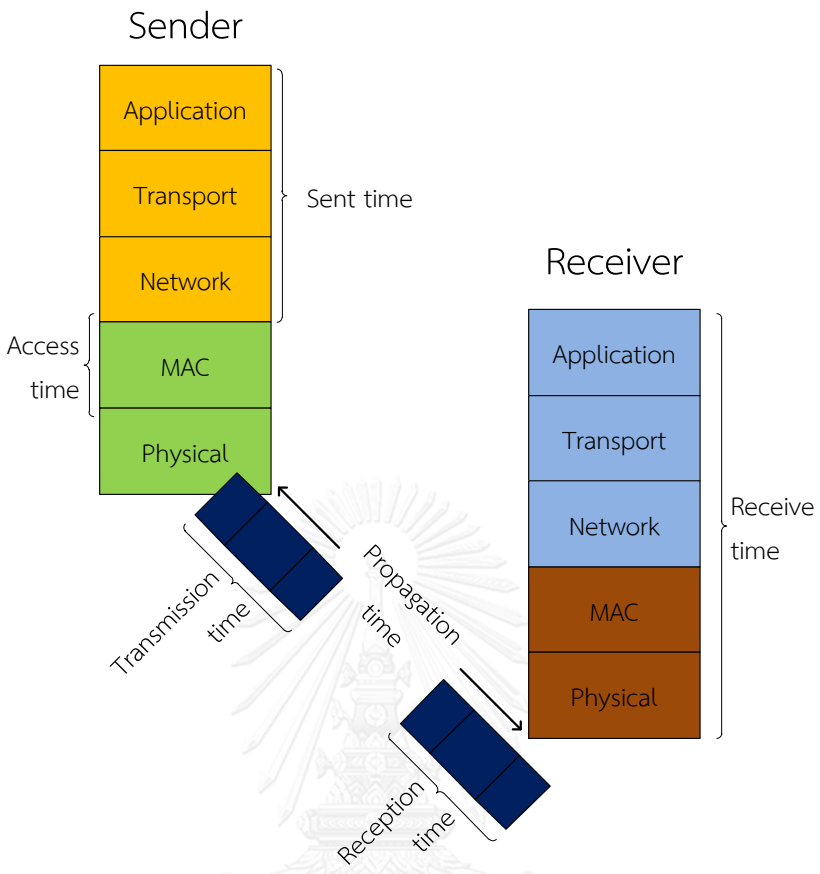
การเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ใต้น้ำแบ่งออกเป็น 2 ส่วน [10, 11] คือ

1. เคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเอง โดยอาศัยใบพัด เช่น Autonomous Underwater Vehicle (AUV)
2. เคลื่อนที่ตามกระแสน้ำ โดยอาศัยกระแสน้ำพาไป

โนดเซนเซอร์ใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำด้วยความเร็วถึง 2 เมตรต่อวินาที [12] อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนทิศทางได้ตามสภาพแวดล้อมใต้น้ำ เช่น ก้อนหินใต้น้ำ จากการที่โนดเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้นั้นจึงนำไปสู่โครงข่ายพลวัตเมื่อรวมกับความล่าช้าของคลื่นเสียง จึงเป็นไปได้ยากที่จะคำนวณหาค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายที่แท้จริง ซึ่งยากต่อการออกแบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำรวมถึงการปรับเวลาให้ตรงกันในใต้น้ำด้วย

2.4 ความไม่แน่นอนทางเวลา (Uncertainty time)

ความไม่แน่นอนทางเวลาเกิดจากเวลาที่ไม่สามารถกำหนดได้เนื่องจากเวลาที่โนดเซนเซอร์ดำเนินงานในแต่ละเหตุการณ์ใช้เวลาไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับภาระงานในขณะนั้น โดยปกติเวลาจะถูกประทับเวลา (Time stamp) ช่วงเวลาที่เริ่มทำงานและจะประทับเวลาอีกทีเมื่อสิ้นสุดการทำงาน แต่ในช่วงเวลาเหล่านั้นไม่มีใครกำหนดหรือประมาณเวลาได้ถูกต้อง ซึ่งทุก ๆ ขั้นตอนของการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำเริ่มต้นจากการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารระหว่างกันเพื่อเก็บข้อมูลทางเวลา ดังนั้นปัญหาความไม่แน่นอนทางเวลาเป็นอีกปัญหาหนึ่งสำหรับการปรับเวลาให้ตรงกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการปรับเวลาให้ตรงกันได้ ปัญหาความไม่แน่นอนทางเวลาสามารถเกิดจากขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสารดังรูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดของความไม่แน่นอนทางเวลา [13]



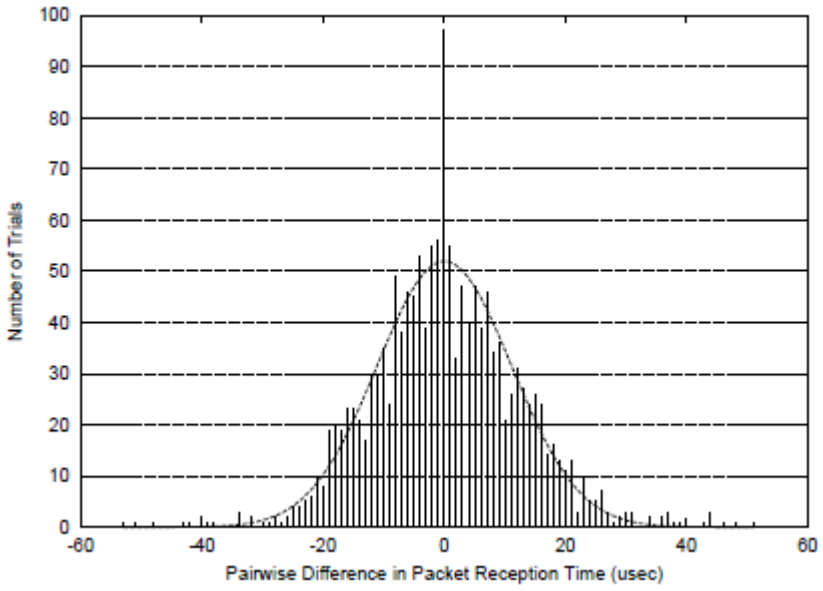
รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดของความไม่แน่นอนทางเวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. เวลาส่ง (Sent time) : เวลาที่ถูกใช้เพื่อสร้างสัญญาณและส่งคำร้องไปยังชั้น MAC (Media Access Control) เวลาส่งไม่สามารถกำหนดได้ขึ้นอยู่กับปริมาณงานในขณะนั้น ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากปัญหานี้ให้ส่งผลกระทบน้อยที่สุด เวลาจะถูกบันทึกที่ชั้น MAC ทางฝั่งผู้ส่ง
2. เวลาเชื่อมต่อ (Access time) : ค่าประวิงเวลาเกิดขึ้นขณะที่มีการรอเข้าใช้ช่องสัญญาณจนกระทั่งการส่งสัญญาณเริ่มต้นขึ้น เวลาเชื่อมต่อจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของช่องสัญญาณในขณะนั้นและเวลาที่ถูกใช้ในการทำงานของโปรโตคอล MAC

3. เวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation time) : คือเวลาที่ใช้ส่งข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับ ในระบบสื่อสารภาคพื้นดินเวลาการแพร่สัญญาณมีค่าน้อยมากจนถึงขั้นไม่สนใจได้เนื่องจากระบบสื่อสารภาคพื้นดินใช้สัญญาณวิทยุซึ่งมีความเร็วที่สูงมาก แต่อย่างไรก็ตามในระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำที่ใช้คลื่นเสียงในการติดต่อสื่อสาร เวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนานจะเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการปรับเวลาให้ตรงกันได้

4. เวลารับ (Receive time) : ความไม่แน่นอนของเวลารับเกิดตั้งแต่ข้อมูลบิตแรกที่ผู้รับได้รับจนกระทั่งผู้รับบันทึกเวลาเมื่อผู้รับได้รับข้อมูลบิตสุดท้ายที่ชั้นโปรแกรมประยุกต์ (application layer) โดยความไม่แน่นอนของเวลาสามารถเกิดได้จากระบบปฏิบัติการ หน่วยประมวลผล เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ภาพแท่งความถี่ได้แสดงถึงการกระจายตัวของความแตกต่างทางเวลาระหว่างตัวรับ ซึ่งบันทึกได้ 1,478 ครั้ง มีการกระจายตัวแบบปกติ (Gaussian distribution) มี $\mu = 0, \sigma = 11.1\mu\text{sec}$ โดยมีความเชื่อมั่นเท่ากับ 99.8%

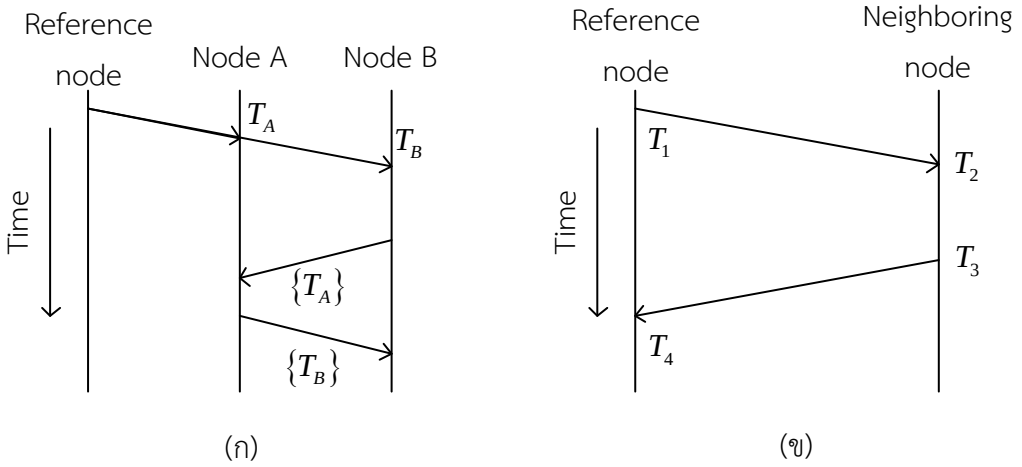
ผลการทดสอบในรูปที่ 2.3 นำมาจาก [4] โดยการใช้ Berkeley Mote รับ-ส่งข้อความ มีการส่งข้อความทั้งหมด 160 ครั้ง ในแต่ละครั้งสุ่มเวลาส่งให้ห่างกันในช่วง 200 มิลลิวินาทีถึง 2 วินาที โดยมีตัวรับ 5 ตัวเพื่อบันทึกผลในการส่งข้อความแต่ละครั้ง ความแตกต่างทางเวลาระหว่างตัวรับสามารถเป็นไปได้ 10 เหตุการณ์ต่อการส่ง 1 ครั้ง ในระหว่างการทดสอบมีการสูญเสียของข้อความ โดยมีการส่งสำเร็จ 1,478 ครั้ง จากผลการทดสอบพบว่าค่าความผิดพลาดที่มากที่สุดคือ 53.4 ไมโครวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 11.1 ซึ่งความไม่แน่นอนของเวลารับนี้สามารถทำให้การปรับเวลาให้ตรงกันเกินความผิดพลาดได้ เนื่องจากเวลาที่ผิดพลาดนี้อยู่ในหลักเดียวกับกับค่า skew

2.5 ปัญหาอื่นๆ

ทั้งโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดินและโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำต่างใช้แบตเตอร์รี่ในการจ่ายพลังงานเพื่อการคำนวณและการติดต่อสื่อสาร แต่การเติมพลังงานให้แก่เซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำเป็นเรื่องที่ยากลำบาก ซึ่งไม่เหมือนกับเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดินที่อาจใช้เซลล์สุริยะในการเติมพลังงาน เมื่อพลังงานของเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำหมด การแทนที่ด้วยเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำตัวใหม่เป็นเรื่องที่ง่ายกว่าการเปลี่ยนแบตเตอร์รี่ให้กับเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ แต่อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีราคาแพง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ การออกแบบโพรโทคอลที่ดีควรมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนการคำนวณและลดขั้นตอนการติดต่อสื่อสารที่ไม่จำเป็น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้านการปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ มีการนำเสนอค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดิน อีกทั้งยังไม่สามารถนำแนวคิดจากโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดินมาใช้งานได้โดยตรง เนื่องจากคุณลักษณะของสื่อกลางไม่เหมือนกันดังที่เคยกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งความเร็วในการแพร่กระจายของคลื่นเสียงที่จะต้องใช้กับโครงข่ายใต้น้ำนั้นช้ากว่าคลื่นวิทยุที่ใช้กับโครงข่ายบนภาคพื้นถึง 200,000 เท่า ส่งผลให้เวลาประวิงการแพร่กระจายยาวนาน นอกจากนั้นโนดเซนเซอร์ใต้น้ำยังสามารถเคลื่อนที่ได้ตามกระแสน้ำทะเลในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้การออกแบบระบบการปรับเวลาใต้น้ำมีความน่าท้าทายมากยิ่งขึ้น จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้มีการนำเสนอวิธีการปรับเวลาให้ตรงกันภาคพื้นดินโดยมีการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่ receiver-receiver based approach และ sender-receiver based approach ดังแสดงในรูปที่ 1.1ก และรูปที่ 1.1ข ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 (ก) วิธีการบริหารจัดการระหว่างตัวรับกับตัวรับ (Receiver-receiver based approach) (ข) วิธีการบริหารจัดการตัวส่งกับตัวรับ (Sender-receiver based approach)

รูปที่ 2.4(ก) แสดงตัวอย่างโพรโทคอลที่ใช้ในการปรับเวลาให้ตรงกัน ที่ออกแบบด้วยแนวคิดของกลุ่มการบริหารจัดการระหว่างตัวรับกับตัวรับ (Receiver-receiver based approach) คือ Reference Broadcast Synchronization (RBS) scheme [14] การทำงานของ RBS นั้น เริ่มจากโนดอ้างอิงส่งสัญญาณไปยังโนดรอบข้างที่อยู่ในรัศมีการส่งทั้งหมด M ครั้ง (ในที่นี้โนดรอบข้างคือโนด A และโนด B) เมื่อโนด A และโนด B ได้รับสัญญาณจะทำการบันทึกเวลา จากนั้นโนด A และโนด B จะทำการแลกเปลี่ยนเวลาที่ได้รับกับระหว่างกัน โดยแนวคิดของ RBS สามารถกำจัดความไม่แน่นอนทางเวลาทางฝั่งตัวส่งได้อ้างอิง (เวลาส่งและเวลาเชื่อมต่อ) เนื่องจากทั้งโนด A และโนด B ได้รับสัญญาณมาจากโนดอ้างอิงที่เวลาเดียวกัน เมื่อสามารถกำจัดผลกระทบจากความไม่แน่นอนทางเวลาทางฝั่งตัวส่งได้ ทำให้ RBS มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง แต่เมื่อนำมาใช้ในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำที่ใช้สัญญาณเสียงประสิทธิภาพจะลดลงอย่างมาก เพราะเวลาประวิงการแพร่กระจายใต้น้ำนั้นยาวนาน อีกทั้งการส่งสัญญาณเป็นแบบทิศทางเดียว (one-way communication) ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจาย ส่งผลให้ให้การประมาณค่า skew และ offset ผิดพลาด

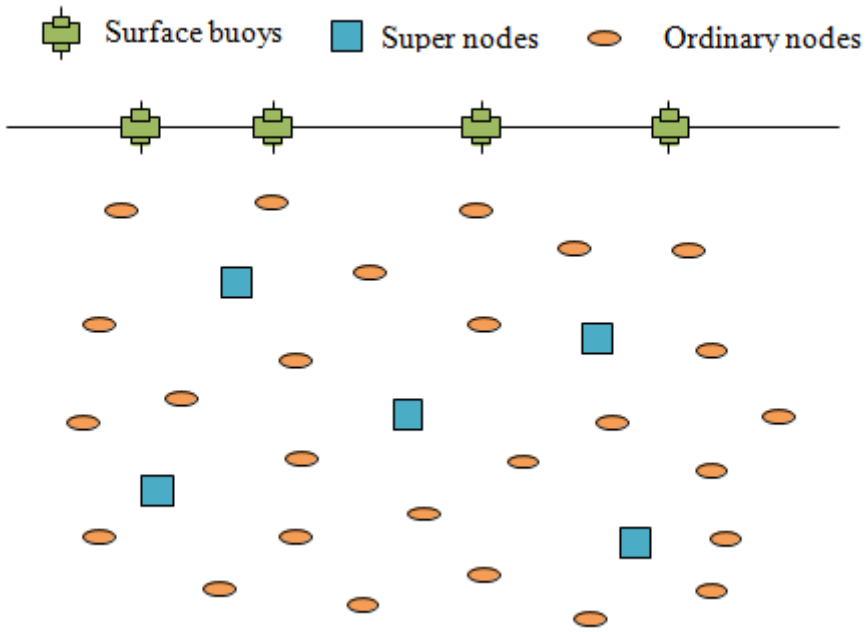
ในทางกลับกันแทนที่จะใช้การแลกเปลี่ยนข่าวสารแบบทิศทางเดียวตามแบบ RBS แนวคิดทางฝั่งการบริหารจัดการระหว่างตัวส่งกับตัวรับ (sender-receiver based approach) ดังในรูปที่ 2.4(ข) มีการนำเสนอการแลกเปลี่ยนข่าวสารแบบสองทิศทาง (two-way communication) โดย S.Ganeriwal ได้เสนอ โพรโทคอล Timing-Sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) [15] ซึ่งมีการทำงานอยู่สองช่วงโดยช่วงแรกจะเป็นการหาค้นหาเพื่อกำหนดโครงสร้างลำดับชั้นของโครงข่าย

ทั้งหมด ช่วงที่สองเป็นช่วงการปรับเวลาให้ตรงกัน โดยโนดเซนเซอร์แต่ละคู่สามารถเรียนรู้เวลาที่คลาดเคลื่อนไปโดยใช้การแลกเปลี่ยนข่าวสารแบบสองทิศทางด้วยการที่แต่ละโนดเซนเซอร์จะบันทึกเวลาที่ได้รับ-ส่งในช่วงการแลกเปลี่ยนข่าวสาร การใช้การแลกเปลี่ยนข่าวสารแบบสองทิศทางสามารถใช้คำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายได้ แต่ข้อด้อยของ TPSN เมื่อเทียบกับ RBS คือเวลาส่งและเวลาเชื่อมต่อยังคงมีอยู่ แต่อย่างไรก็ตามโพรโทคอลที่กล่าวมานั้นได้ถูกออกแบบมาสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดิน ซึ่งเวลาประวิงการแพร่กระจายมีค่าน้อยมากจนแทบไม่ส่งผลต่อการปรับเวลาให้ตรงกัน แต่การนำโพรโทคอลเหล่านี้มาใช้ในการสื่อสารใต้น้ำจะทำให้ประสิทธิภาพแย่ลงเป็นอย่างมาก โดยโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันในใต้น้ำนิยมใช้แนวคิดการบริหารจัดการระหว่างตัวส่งกับตัวรับ เนื่องจากแนวคิดนี้สามารถคำนวณหาค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายได้

แม้ว่าโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำโดยใช้สัญญาณเสียงจะมีการศึกษาอย่างกว้างขวางจากทั่วโลก แต่สำหรับการปรับเวลาให้ตรงกันยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย Syed and Heidemann ได้เสนอโพรโทคอล Time Synchronization for High Latency Acoustic Network (TSHL) [13] ซึ่งเป็นโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันที่ออกแบบมาเพื่อโครงข่ายที่มีความล่าช้าสูง และประมาณหาค่า skew และ offset โดยได้มีการบันทึกเวลาในชั้น MAC เพื่อลดปัญหาจากความไม่แน่นอนทางเวลาในตัวส่งและใช้การแลกเปลี่ยนข่าวสารแบบสองทิศทาง โดยกำหนดให้ทุกโนดเซนเซอร์ในโครงข่ายหยุดอยู่กับที่ TSHL ใช้สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อคำนวณหาค่า skew และ offset เนื่องจาก TSHL มีสมมติฐานที่กำหนดให้โนดเซนเซอร์หยุดนิ่ง แต่หากโนดเซนเซอร์มรการเคลื่อนที่ ประสิทธิภาพจะลดลงเป็นอย่างมาก

โพรโทคอล MU-Sync [16] เป็นโพรโทคอลตัวแรก ๆ ที่ถูกออกแบบมาสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำแบบเคลื่อนที่ โดยโพรโทคอล MU-Sync ใช้สมการเชิงเส้นถดถอยสองครั้ง ในครั้งแรกจะทำการทำนายค่า skew เพื่อลดผลกระทบจากเวลาตอบสนอง (เกิดจากโนดเซนเซอร์ไม่ส่งสัญญาณกลับไปได้ในทันทีที่ได้รับสัญญาณ) จากนั้นจึงลดผลกระทบจากเวลาประวิงการแพร่กระจายโดยคำนวณจากเวลาในการเดินทางไปกลับ (round trip time) หารสอง และทำการประมาณค่า skew และ offset ใหม่อีกครั้ง ซึ่งโพรโทคอล MU-Sync มีการพิจารณาถึงเวลาประวิงการแพร่กระจายในขั้นตอนการคำนวณ ทำให้โพรโทคอลตัวนี้มีความแม่นยำมากกว่าโพรโทคอลที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามโพรโทคอลตัวนี้คำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายไม่ถูกต้อง จึงทำให้การประมาณค่า skew และ offset ยังคงมีความผิดพลาดอยู่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

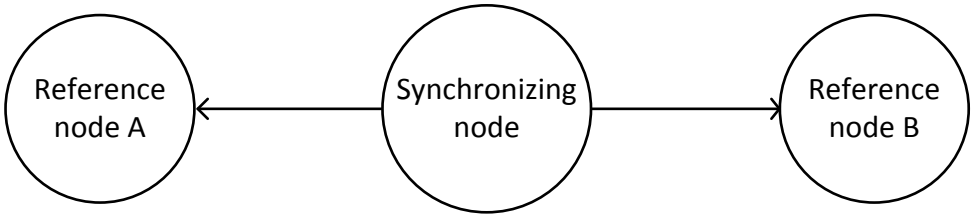


รูปที่ 2.5 สถาปัตยกรรมโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ (Mobi-Sync)

สำหรับโพรโทคอล Mobi-Sync [17] เล็งเห็นถึงปัญหาการประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายไม่ถูกต้อง ซึ่งส่งผลต่อการประมาณค่า skew และ offset ได้ ดังนั้นจึงได้ออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำใหม่ดังรูปที่ 2.5 โดยระบบเซนเซอร์ใต้น้ำประกอบไปด้วยทุ่นลอยน้ำ (Surface buoys) ซูเปอร์โนด (Super nodes) และโนดสามัญ (Ordinary nodes) โดยกำหนดให้ทุ่นลอยน้ำสามารถรับสัญญาณจาก GPS ได้ สำหรับซูเปอร์โนดสามารถติดต่อสื่อสารกับทุ่นลอยน้ำแบบทันทีทันใด (real time) ทำให้รู้ตำแหน่งตัวเองได้ และโนดสามัญไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับทุ่นลอยน้ำได้แต่สามารถสื่อสารกับซูเปอร์โนดได้ ในงานวิจัยนี้โนดสามัญต้องการปรับเวลาให้ตรงกันกับซูเปอร์โนด ซึ่งขั้นตอนวิธีของโพรโทคอล Mobi-Sync นั้นเริ่มจากโนดสามัญส่งสัญญาณไปยังซูเปอร์โนดรอบ ๆ ข้าง จากนั้นซูเปอร์โนดจะส่งสัญญาณที่มีข้อมูลตำแหน่งและความเร็วกลับไปยังโนดสามัญสองครั้ง เมื่อโนดสามัญได้รับข้อมูลจึงทำการคำนวณความเร็วของตัวเองโดยใช้ข้อมูลความเร็วจากซูเปอร์โนดเพื่อใช้ในการคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจาย จากนั้นจึงทำการประมาณค่า skew และ offset จะเห็นได้ว่าโพรโทคอล Mobi-Sync ได้มีคำนวณการหาเวลาประวิงการแพร่กระจายโดยใช้ประโยชน์จากซูเปอร์โนดที่สามารถติดต่อกับทุ่นลอยน้ำได้แบบทันทีทันใดได้ ทำให้การประมาณค่า skew และ offset มีความแม่นยำสูง แต่ข้อเสียของโพรโทคอล Mobi-Sync คือจำเป็นต้องมีซูเปอร์โนดอย่างน้อยสามตัวขึ้นไปเพื่อปฏิบัติงานและด้วยสถาปัตยกรรมเฉพาะทำให้ Mobi-Sync เป็นโครงข่ายที่มีความหนาแน่นสูง ยิ่งกว่านั้นซูเปอร์โนดที่สามารถติดต่อสื่อการกับทุ่นลอยน้ำแบบทันทีทันใดได้นั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ

โพรโทคอล D-Sync [18] และ DA-Sync [19] เป็นโพรโทคอลที่ใช้ประโยชน์จากการเคลื่อนดอปเพลอร์ (Doppler shift) [20]เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดเซนเซอร์และใช้ความเร็วสัมพัทธ์มาคำนวณหาค่าเวลาประวิงการแพร่กระจาย จากนั้นจึงนำเอาค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ประมาณได้ไปประมาณค่า skew และ offset เนื่องจากทั้งสองโพรโทคอลนี้คำนวณความเร็วสัมพัทธ์เพื่อใช้ในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจาย ทำให้การคำนวณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายมีความแม่นยำมากกว่าโพรโทคอลตัวอื่น สำหรับโพรโทคอล D-Sync เป็นโพรโทคอลตัวแรกที่เริ่มใช้ค่าความเร็วสัมพัทธ์ในการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์เพื่อคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจาย แต่ D-Sync เชื่อมั่นว่าความเร็วสัมพัทธ์ที่ได้จากการเคลื่อนดอปเพลอร์นั้นถูกต้องเสมอ ซึ่งสามารถส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการคำนวณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายและทำให้การคำนวณค่า skew และ offset เกิดความผิดพลาดตามมาได้ ดังนั้นโพรโทคอล DA-Sync จึงได้เสนอวิธีแก้ปัญหาเหล่านี้โดยการเพิ่มขั้นตอนการกลั่นกรองความเร็วสัมพัทธ์ก่อนจะนำไปใช้งาน และมีขั้นตอนการคำนวณค่า skew และ offset หลายรอบ ซึ่งในแต่ละรอบจะมีการคำนวณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายใหม่ ซึ่งทำให้ค่าประมาณ skew และ offset มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่า skew และ offset ในแต่ละรอบไม่แตกต่างจากรอบก่อนหน้ามากนักหรือครบรอบการวนซ้ำตามที่กำหนด ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพของโพรโทคอล DA-Sync จึงมีความแม่นยำมากที่สุดจากโพรโทคอลทั้งหมดที่ได้กล่าวมา อย่างไรก็ตามทั้งโพรโทคอล D-Sync และ DA-Sync ต่างมีความซับซ้อนมากกว่าโพรโทคอลตัวอื่น ๆ ในขั้นตอนการคำนวณความเร็วสัมพัทธ์ของโนดเซนเซอร์ อีกทั้งความเร็วของโนดเซนเซอร์ที่คำนวณได้เป็นความเร็วสัมพันธ์ ทำให้ความผิดพลาดในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายยังคงมีอยู่

อีกหนึ่งวิธีที่ถูกนำเสนอเพื่อปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับการใช้โนดอ้างอิงเวลาให้มากกว่าหนึ่งตัว ซึ่งโพรโทคอล MC-Sync [21] ได้ออกแบบมาแก้ไขปัญหาของการปรับเวลาให้ตรงกันใต้น้ำโดยใช้โนดอ้างอิงสองตัว และโนดที่ต้องการปรับเวลาให้ตรงกันอยู่ระหว่างโนดอ้างอิงทั้งสองตัวดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6การปรับเวลาให้ตรงกันของโพรโทคอล MC-Sync

ซึ่งกำหนดให้โนดอ้างอิงมีการเคลื่อนที่ตามสมมติฐานดังนี้ 1. โนดอ้างอิงมีสายเคเบิลผูกติดกัน ทำให้โนดอ้างอิงทั้งสองมีทิศทางการเคลื่อนที่และความเร็วที่เหมือนกัน 2. โนดอ้างอิงมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับกระแสคลื่น ด้วยสมมติฐานเหล่านี้ทำให้โพรโทคอล MC-Sync มีความแม่นยำสูง และใช้จำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารน้อย อย่างไรก็ตามถ้าโนดอ้างอิงมีการเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามข้อสมมติฐาน เช่น โนดอ้างอิงทั้งสองโนดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและทิศทางที่ไม่เท่ากัน การทำงานของโพรโทคอลจะเกิดความล้มเหลวในการปรับเวลาให้ตรงกัน อีกทั้งผลที่ได้จากการประมาณค่า skew และ offset จะมีความผิดพลาดมากกว่าการไม่ใช้โพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันอีกด้วย

ถึงแม้ว่าโพรโทคอล Mobi-Sync, MC-Sync, D-Sync และ DA-Sync จะมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอล MU-Sync แต่จากที่กล่าวมานั้นโพรโทคอลเหล่านี้มีการออกแบบที่ซับซ้อนรวมถึงการคำนวณที่ซับซ้อนกว่าเมื่อเทียบกับ MU-Sync และยังมีข้อจำกัดในตัวมันเอง เช่น Mobi-Sync ที่กำหนดให้ทุ่นลอยน้ำสามารถติดต่อสื่อสารกับซูเปอร์โนดแบบทันทีทันใดได้ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในการติดต่อสื่อสารโดยใช้คลื่นเสียง ในทางกลับกัน MU-Sync ที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าแต่ความซับซ้อนในการคำนวณที่น้อยกว่าและไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ เพิ่มเติมจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกที่จะปรับปรุงและพัฒนาโพรโทคอล MU-Sync ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเรียกว่า Enhancement of MU-Sync (EMU-Sync)

2.6.1 การทำงานของโพรโทคอล MU-Sync

โพรโทคอล MU-Sync เป็นโพรโทคอลที่มีการปรับเวลาให้ตรงกันแบบเป็นกลุ่มเพื่อปรับเวลาในกลุ่มให้ตรงกัน โดยวิธีการปรับเวลาให้ตรงกันนั้นจะทำการจับคู่กันระหว่างโนดหัวหน้ากลุ่ม (Cluster head) กับโนดรอบข้าง (Neighboring node) ซึ่งโนดหัวหน้ากลุ่มสามารถจับคู่เพื่อปรับเวลาพร้อมกันทั้งกลุ่มโครงข่ายได้ วิธีการปรับเวลาให้ตรงกันแบบนี้จะใช้โนดหัวหน้ากลุ่มเป็นโนดอ้างอิงเวลา คำนวณและบอกค่าประมาณ skew และ offset ที่ประมาณได้ไปยังโนดรอบข้างเพื่อปรับเวลาให้ตรงกัน

วิธีการปรับเวลาให้ตรงกันของ MU-Sync ประกอบไปด้วย 2 ส่วน

1. กระบวนการปรับเวลาให้ตรงกัน ในขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วย
    - การแลกเปลี่ยนข่าวสาร
    - การคำนวณหาเวลาการแพร่กระจาย
    - การประมาณค่า skew และ offset
2. ปรับเวลาให้ตรงกัน

- ส่งข้อความการปรับเวลาให้ตรงกันที่ประมาณได้ไปยังโนดรอบข้างเพื่อบอกค่าประมาณ skew และ offset

สำหรับโพรโทคอล MU-Sync มีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นดังนี้

a_c	Skew ของโนดหัวหน้ากลุ่ม
b_c	Offset ของโนดหัวหน้ากลุ่ม
a_n	Skew ของโนดรอบข้าง
b_n	Offset ของโนดรอบข้าง
$T_{1,i}$	เวลาส่งของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดหัวหน้ากลุ่ม)
$T_{2,i}$	เวลารับของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดรอบข้าง)
$T_{3,i}$	เวลาส่งของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดรอบข้าง)
$T_{4,i}$	เวลารับของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดหัวหน้ากลุ่ม)
$t_{1,i}$	เวลาส่งของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)
$t_{2,i}$	เวลารับของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)
$t_{3,i}$	เวลาส่งของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)
$t_{4,i}$	เวลารับของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)
t_r	ระยะเวลารอคอย
$d_i^{c\to n}$	เวลาประวิงการแพร่กระจายจากโนดหัวหน้ากลุ่มไปยังโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i
$d_i^{n\to c}$	เวลาประวิงการแพร่กระจายจากโนดรอบข้างไปยังโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i
$\hat{d}_i$	ค่าประมาณเวลาประวิงการแพร่กระจาย ณ รอบที่ i

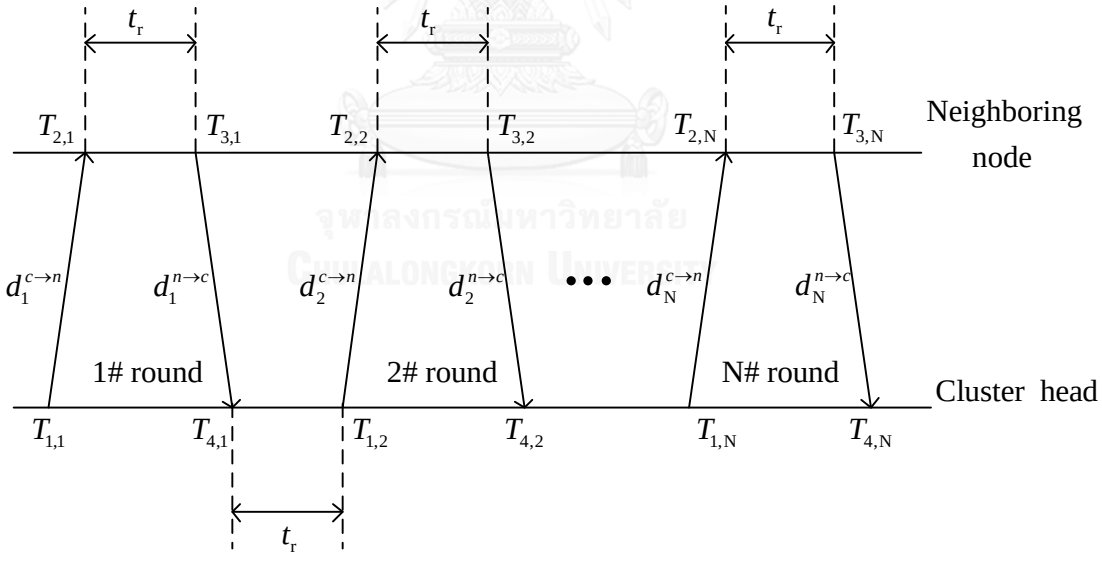
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$\hat{T}_{2,i}$	เวลารับของโนดรอบข้างหลังจากนำเวลาประวิงการแพร่กระจายมาหักออก ณ รอบที่ i
$\hat{a}$	ค่าประมาณ skew ครั้งแรก
$\hat{\hat{a}}$	ค่าประมาณ skew ครั้งสุดท้าย
$\hat{\hat{b}}$	ค่าประมาณ offset

2.6.1.1 กระบวนการปรับเวลาให้ตรงกัน

กระบวนการปรับเวลาให้ตรงกันของ MU-Sync ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ 1. การแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างโนดหัวหน้ากลุ่มกับโนดรอบข้าง 2. การคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายเพื่อลดผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโนดในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 3. การประมาณค่า skew และ offset โดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression)

2.6.1.1.1 การแลกเปลี่ยนข่าวสาร



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร

จากรูปที่ 2.7 ขั้นตอนนี้เริ่มต้นจากโนดหัวหน้ากลุ่ม (Cluster head) ส่งข้อความไปยังโนดรอบข้าง (Neighboring node) โดยโนดหัวหน้ากลุ่มจะทำการประทับเวลา $T_{1,1}$ ซึ่งอ้างอิงเวลาจากตัวมันเองที่ชั้น MAC ก่อนที่ข้อความจะถูกส่งออกไป และเมื่อโนดรอบข้างได้รับข้อความเรียบร้อยแล้ว โนดรอบข้างจะประทับเวลาที่ได้รับ $T_{2,1}$ โดยอ้างอิงเวลาของตัวมันเองเช่นเดียวกัน ซึ่งโนดรอบข้างอาจต้องใช้เวลารอคอยสักครู่ในการประมวลผลหรือหลบเลี่ยงการชนกันของข้อมูลก่อนที่จะส่งข้อความกลับไปยังโนดหัวหน้ากลุ่ม โดยช่วงระยะเวลาตรงนี้มีค่าเท่ากับ $\left(T_{3,1}-T_{2,1}\right)$ หรือ t_r หลังจากนั้นโนดรอบข้างจะประทับเวลา $T_{3,1}$ พร้อมกับส่งข้อความที่ประกอบไปด้วย $\left(T_{2,1},T_{3,1}\right)$ กลับไปยังโนดหัวหน้ากลุ่ม และโนดหัวหน้ากลุ่มจะได้รับข้อความที่เวลา $T_{4,1}$ และทำการส่งข้อความแบบนี้ซ้ำจนกระทั่งครบ N รอบ จากขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสารที่กล่าวมา โนดหัวหน้ากลุ่มเป็นโนดเดียวที่รู้ข้อมูล $\left(T_{1,i},T_{2,i},T_{3,i},T_{4,i}\right)$ ในแต่ละรอบ i และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน โนดหัวหน้ากลุ่มจึงเป็นโนดที่ต้องคำนวณค่า skew และ offset

จากสมการที่ (2.1) เวลาที่บันทึกได้จะเป็นดังนี้

$$T_{1,i} = a_c t_{1,i} + b_c \qquad (2.2)$$

$$T_{2,i} = a_n t_{2,i} + b_n \qquad (2.3)$$

$$T_{3,i} = a_n t_{3,i} + b_n \qquad (2.4)$$

$$T_{4,i} = a_c t_{4,i} + b_c \qquad (2.5)$$

เนื่องจากโพรโทคอล MU-Sync กำหนดให้โนดหัวหน้ากลุ่มเป็นตัวอ้างอิง ดังนั้นค่า skew จึงมีค่าเท่ากับ 1 และค่า offset เท่ากับ 0 $\left(a_1=1,b_1=0\right)$ ซึ่งสามารถจัดสมการที่ (2.2) และ (2.5) ใหม่ได้เป็นดังนี้

$$T_{1,i} = t_{1,i} \qquad (2.6)$$

$$T_{4,i} = t_{4,i} \qquad (2.7)$$

นั้นหมายความว่าโพรโทคอล MU-Sync ต้องคำนวณค่า a_2 และ b_2 ของโนดรอบข้าง โดยเทียบกับโนดหัวหน้ากลุ่ม

2.6.1.1.2 การคำนวณเวลาการแพร่กระจาย

ในการสื่อสารใต้น้ำปัญหาที่สำคัญและเป็นอุปสรรคต่อการออกแบบการปรับเวลาให้ตรงกัน คือ เวลาประวิงการแพร่กระจาย เนื่องจากความเร็วเสียงใต้น้ำเดินทางด้วยความเร็วประมาณ 1500 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนาน อีกทั้งเวลาประวิงการแพร่กระจายยัง

สามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ เวลาประวิงการแพร่กระจายมีค่าอยู่ในช่วงหลักมิลลิวินาทีถึงหลักวินาที ซึ่งมากกว่าอัตราการสั่นที่เพี้ยนไปของแร่ควอตซ์ที่มีความผิดพลาดอยู่ในหลักไมโครวินาที เวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนานและไม่คงที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณค่า skew และ offset อย่างมาก ดังนั้นการคำนวณหาเวลาการแพร่กระจายให้ถูกต้องโดยนำมาหักออกเพื่อลดผลกระทบจึงเป็นวิธีเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำในการประมาณค่า skew และ offset สำหรับโพรโทคอล MU-Sync กำหนดให้ $d_i^{c\to n} = d_i^{n\to c}$ หรือเวลาประวิงการแพร่กระจายทั้งขาไปและขากลับมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการคำนวณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายของโพรโทคอล MU-Sync คำนวณจากครึ่งหนึ่งของเวลาในการเดินทางไปกลับตามสมการที่ (2.8)

$$\hat{d}_i = \frac{\left(T_{2,i} - T_{1,i}\right) + \left(T_{4,i} - T_{3,i}\right)}{2} \tag{2.8}$$

แทนสมการที่ (2.3), (2.4), (2.6) และ (2.7) ในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\hat{d}_i = \frac{\left(t_{4,i} - t_{1,i}\right) + a_n\left(t_{2,i} - t_{3,i}\right)}{2} \tag{2.9}$$

แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลารอคอยสามารถส่งผลทำให้การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงประมาณหาค่า skew ครั้งแรก $\hat{a}$ เพื่อนำมาลดผลกระทบจากช่วงเวลารอคอยดัง โดยค่าประมาณ skew ครั้งแรกคำนวณได้ตามสมการที่ (2.10)

$$\hat{a} = \frac{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}T_{2,i} - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{2,i}}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} {T_{1,i}}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\right)^2} \tag{2.10}$$

นำค่าประมาณ skew ครั้งแรก ไปลดความผิดพลาดที่เกิดจากช่วงระยะเวลาตอบสนองจะได้

$$\hat{d}_i = \frac{\left(t_{4,i} - t_{1,i}\right) + \frac{a_n}{\hat{a}}\left(t_{2,i} - t_{3,i}\right)}{2} \tag{2.11}$$

2.6.1.1.3 คำนวณหา skew และ offset

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายในส่วนของกระบวนการปรับเวลาให้ตรงกัน หลังจากที่ได้ข้อมูลจากการแลกเปลี่ยนข่าวสารและคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายเสร็จเรียบร้อยแล้ว การลดผลกระทบจากเวลาประวิงการแพร่กระจายทำได้โดยการนำเอาค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายมาหักออกจากเวลาที่โนดเซนเซอร์รับได้ในแต่ละรอบตามสมการที่ (2.12)

$$\hat{T}_{2,i} = T_{2,i} - \hat{d}_i \tag{2.12}$$

จากนั้นจึงประมาณค่า skew และ offset โดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$\hat{\hat{a}} = \frac{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\hat{T}_{2,i} - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i} \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \hat{T}_{2,i}}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} {T_{1,i}}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\right)^2} \tag{2.13}$$

$$\hat{\hat{b}} = \bar{\hat{T}}_2 - \hat{\hat{a}}\bar{T}_1 \tag{2.14}$$

2.6.1.2 การปรับเวลาให้ตรงกัน

หลังจากที่โนดหัวหน้ากลุ่มได้ประมาณค่า skew และ offset ของโนดรอบข้างเทียบกับตัวเองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนนี้โนดหัวหน้ากลุ่มจะส่งข้อความที่ประมาณได้ไปยังโนดรอบข้างเพื่อทำการปรับเวลาให้ตรงกัน

2.6.2 การทำงานของโพรโทคอล DA-Sync

โพรโทคอลนี้เป็นโพรโทคอลที่ใช้การปรับเวลาระหว่างโนดสองโนด ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ได้ทุกโทโพลอยี ซึ่งเป็นโพรโทคอลแรกที่ใช้การทำงานร่วมกันระหว่างชั้นกายภาพ (Physical layer) และ data link layer โดยชั้นกายภาพจะถูกใช้ในการคำนวณความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดเซนเซอร์ [20] เพื่อใช้ในการคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายให้แม่นยำที่สุด อีกทั้งยังประมาณค่า skew และ offset โดยอาศัยการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least Square Estimation, WLSE)

ขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอล DA-Sync แบ่งออกเป็น 5 ส่วน

1 การเก็บข้อมูล (Data collection)

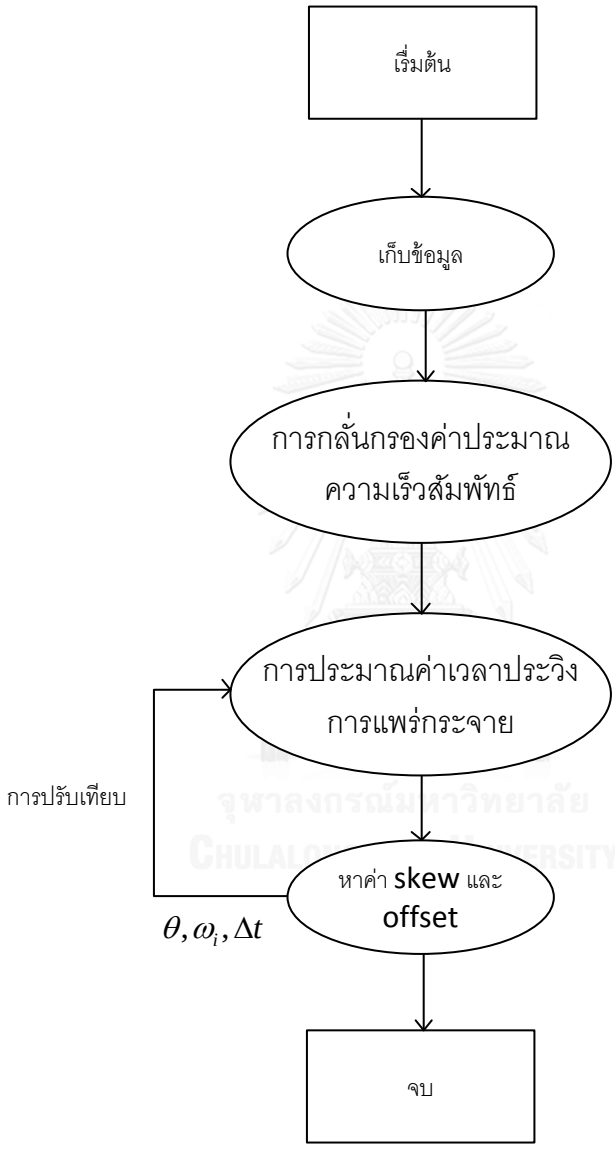
2 การกลั่นกรองค่าประมาณความเร็วสัมพัทธ์ (Velocity estimation refinement)

3 การประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation delay estimation)

4 หาค่า skew และ offset (Linear regression)

5 การปรับเทียบ (Calibration)

ขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอล DA-Sync แตกต่างจากโพรโทคอลอื่น ๆ เนื่องจากมีการปรับเทียบค่าต่าง ๆ ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นจนกว่าค่าประมาณ skew และ offset จะมีความผิดพลาดน้อยหรือมีการปรับเทียบจนกระทั่งครบรอบตามที่กำหนดไว้ ดังนั้นเพื่อให้เข้าการทำงานมากยิ่งขึ้น จึงเขียนขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอล DA-Sync ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอล DA-Sync

2.6.2.1 การเก็บข้อมูล

ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสารจะคล้ายกับโพรโทคอล MU-Sync คือมีบันทึกเวลารับ ส่งข้อความ แต่โพรโทคอล DA-Sync มีการคำนวณความเร็วสัมพัทธ์โดยการใช้ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect) ที่ชั้นกายภาพ ซึ่งทำให้การเก็บข้อมูลในแต่ละรอบมีทั้งหมดอยู่ 6 ค่า

2.6.2.2 การกลั่นกรองค่าประมาณความเร็วสัมพัทธ์

ในส่วนของขั้นตอนนี้เป็นการปรับค่าความเร็วสัมพัทธ์ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เนื่องจากโนดฝั่งรับสามารถเคลื่อนที่ได้ในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงเป็นการเพิ่มความแม่นยำให้กับความเร็วสัมพัทธ์โดยการใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) ซึ่งสมมติให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างโนดเซนเซอร์ทั้งสองมีการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงเท่านั้น

2.6.2.3 การประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจาย

ส่วนที่สำคัญของการปรับเวลาให้ตรงกันใต้น้ำคือการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายที่แท้จริง ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงได้ใช้ประโยชน์จากความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดเพื่อนำมาคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเวลาประวิงการแพร่กระจายทั้งขาไปและขากลับไม่เท่ากัน ดังนั้นการนำเอาความเร็วสัมพัทธ์มาใช้ในการคำนวณ ย่อมส่งผลให้เวลาประวิงการแพร่กระจายมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.6.2.4 การหาค่า skew และ offset

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการประมาณค่า skew และ offset ซึ่งประมาณจากการเทียบกันระหว่างเวลาที่โนดรอบข้างได้รับหักออกด้วยค่าประมาณเวลาประวิงการแพร่กระจายกับเวลาของโนดอ้างอิง โดยการใช้การประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก สำหรับรอบแรกนั้นค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกปรับให้เป็นหนึ่งหรือการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary Least Square Estimation, OLSE)

2.6.2.5 การปรับเทียบ

ขั้นตอนสุดท้ายของโพรโทคอล DA-Sync เป็นการปรับอัพเดตค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจาย โดยมีทั้งหมดสามพารามิเตอร์ คือ ค่า skew ค่าถ่วงน้ำหนัก และช่วงระยะเวลาตั้งแต่โนดรอบข้างได้รับข้อความจนกระทั่งถึงเวลาที่โนดอ้างอิงได้รับข้อความ ซึ่งทั้งสามพารามิเตอร์นี้จะถูกอัพเดตใหม่ทุกครั้งจึงทำให้การประมาณค่า skew มีความแม่นยำสูง และการทำงานในขั้นตอนนี้จะหยุดลงก็ต่อเมื่อวนลูปครบ 10 ครั้ง หรือค่าความแตกต่างระหว่างค่าประมาณ skew ที่คำนวณได้กับครั้งก่อนหน้านี้ต่ำกว่า 100 ppm

โพรโทคอล DA-Sync เป็นโพรโทคอลการปรับเวลาที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งใช้ประโยชน์จากความเร็วสัมพัทธ์เพื่อคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายให้ถูกต้อง อีกทั้งยังใช้การประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก ยิ่งทำให้ค่าประมาณ skew และ offset มีความแม่นยำยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการรู้ค่าความเร็วสัมพัทธ์ไม่ได้หมายความว่าการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายจะถูกต้องเสมอ เนื่องจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายให้ถูกต้องจำเป็นต้องรู้ความเร็วของแต่ละโนด

2.6.3 ความแตกต่างของขั้นตอนการทำงานระหว่างโพรโทคอล MU-Sync และ DA-Sync

การปรับเวลาให้ตรงกันใต้น้ำสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ขั้นตอนการคำนวณค่าประวิงการแพร่กระจายและขั้นตอนคำนวณค่า skew และ offset แม้ว่างานวิจัยที่ถูกนำเสนอนั้นมีขั้นตอนแต่ละส่วนแตกต่างกัน แต่จุดประสงค์หลักคือการคำนวณค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายให้ถูกต้องมากที่สุด เนื่องจากเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนานและไม่คงที่ส่งผลกระทบต่อการปรับเวลาให้ตรงกันใต้น้ำโดยตรงและทำให้เกิดความผิดพลาดได้มากกว่าผลกระทบจากความผิดพลาดอย่างอื่น โดยความแตกต่างของขั้นตอนการทำงานระหว่างโพรโทคอล MU-Sync และ DA-Sync สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง MU-Sync และ DA-Sync

ขั้นตอนการทำงาน	MU-Sync	DA-Sync
การแลกเปลี่ยนข่าวสาร	T_1, T_2, T_3, T_4	T_1, T_2, T_3, T_4 v_0 ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดรอบข้างเทียบกับโนดอ้างอิง v_1 ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดอ้างอิงเทียบกับโนดรอบข้าง
การกรั่นกรองค่าประมาณความเร็วสัมพัทธ์	ไม่มี	มี
การคำนวณค่าประวิงการแพร่กระจาย	$\frac{RTT}{2}$	$\tau_1 = \frac{v\eta - \theta t_r\left(\eta + v_0^e\right) - \frac{\alpha^e t_r^2}{2}}{2\theta\eta}$
คำนวณค่า skew และ offset	OLSE	WLSE
การปรับเทียบ	ไม่มี	มี

เมื่อ τ_1 คือ ค่าประมาณเวลาประวิงการแพร่กระจายทิศทางฝั่งขาไป

v คือ $T_4 - T_1$

η คือ ความเร็วเสียง (ประมาณ1500 เมตรต่อวินาที)

v_0^e คือ ค่าประมาณความเร็วสัมพัทธ์

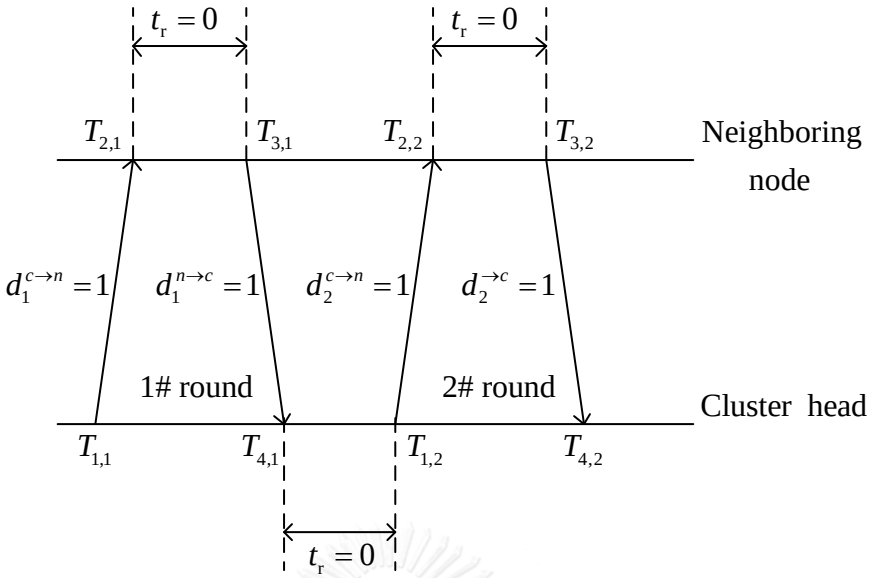
α^e คือ ค่าประมาณความเร่งสัมพัทธ์

โดยการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายของโพรโทคอล DA-Sync ต้องการลดผลกระทบจาก t_r ในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ดังนั้นจึงมีการประมาณค่าความเร็วสัมพัทธ์ v_0^e เพื่อนำไปลดผลกระทบดังกล่าว

2.7 ตัวอย่างการปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายหยุดนิ่ง

เพื่อให้เข้าใจขั้นตอนในการทำงานการปรับเวลาให้ตรงกัน จึงขอยกตัวอย่างวิธีการประมาณค่า skew และ offset แบบง่าย ซึ่งมีหลายวิธีในการประมาณค่า skew และ offset แต่ในหัวข้อนี้แสดงวิธีการประมาณค่า skew และ offset โดยใช้ชุดข้อมูลการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 2 รอบ สำหรับการประมาณค่า skew และใช้ชุดข้อมูลการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 1 รอบ สำหรับการประมาณค่า offset

กำหนดให้โนดเซนเซอร์ทั้งสองหยุดอยู่นิ่ง โดยในตัวอย่างนี้ให้โนดหัวหน้ากลุ่มเป็นโนดเริ่มต้นการแลกเปลี่ยนข่าวสารเพื่อประมาณค่า skew และ offset ของโนดรอบข้าง สมมุติให้นาฬิกาของโนดรอบข้างเดินเร็วกว่าโนดหัวหน้ากลุ่มอยู่ 10 ppm (part per million) หรือเมื่อเวลาของโนดหัวหน้ากลุ่มผ่านไปทุก ๆ 1 วินาที เวลาของโนดรอบข้างจะผ่านไป 1.00001 วินาที ซึ่งความผิดพลาดในส่วนนี้เราเรียกว่า skew และความผิดพลาดอีกหนึ่งตัวเราเรียกว่า offset เกิดจากการตั้งเวลาไม่พร้อมกัน โดยสมมุติให้มีค่าเท่ากับ 0.0008 วินาที และระยะห่างระหว่างโนดเท่ากับ 1500 เมตร เราสามารถสร้างผังเวลา ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผังเวลาแสดงการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 2 รอบ

จากรูปที่ 2.9 แสดงการแลกเปลี่ยนข้อความ 2 รอบ ซึ่งเพียงพอต่อการแก้ปัญหาค่า skew และ offset จากสมการที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าเวลาในแต่ละโนดเซนเซอร์อาจเดินเท่ากันหรือไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่า skew และ offset ดังนั้นหากต้องการปรับเวลาให้โนดเซนเซอร์ทั้งสองเดินเท่ากัน จึงจำเป็นต้องประมาณค่า skew และ offset ให้ถูกต้อง

เวลาที่โนดแต่ละตัวบันทึกได้เป็นดังนี้ สมมติให้โนดหัวหน้ากลุ่มส่งข้อความที่เวลา $t_1 = 1$ เนื่องจากเรากำหนดให้โนดอ้างอิงเป็นนาฬิกาที่ถูกต้อง จึงกำหนดให้ $a_c = 1, b_c = 0$ ดังนั้นค่าความสัมพันธ์ของ skew และ offset ของโนดรอบข้างจึงเท่ากับ $a_n = 1.00001, b_n = 0.0008$ สำหรับเวลาประวิงการแพร่กระจายมีค่าเท่ากับ 1 วินาที $\left(d_i^{c\to n} = d_i^{n\to c} = 1\right)$ และกำหนดให้ $t_r = 0$ ฉะนั้นเราสามารถหาเวลาที่โนดแต่ละตัวส่งหรือรับตามสมการที่ (2.2) ถึง (2.5) ดังนี้

$$T_{1,1} = a_c t_{1,1} + b_c = (1)(1) + 0 = 1$$

$$T_{2,1} = a_n t_{2,1} + b_n = a_n\left(t_{1,1} + d_1^{n\to c}\right) + b_n$$
$$= (1.00001)(1+1) + 0.0008 = 2.00082$$

$$T_{3,1} = a_n t_{3,1} + b_n = (1.00001)(2) + 0.0008 = 2.00082$$

$$T_{4,1} = a_c t_{4,1} + b_c = a_c\left(t_3 + d_2^{n\to c}\right) + b_c$$
$$= (1)(2+1) = 3$$

ดังนั้นเราสามารถประมาณค่า offset ได้ดังนี้

$$offset = \frac{\left(T_{2,1} - T_{1,1}\right) - \left(T_{4,1} - T_{3,1}\right)}{2}$$
$$= \frac{\left(2.00082 - 1\right) - \left(3 - 2.00082\right)}{2}$$
$$= 0.00082$$

สำหรับการประมาณค่า skew จำเป็นต้องใช้ข้อมูลอย่างน้อย 2 รอบ ดังนั้นจึงให้โนดหัวหน้ากลุ่มส่งข้อความอีกครั้งที่ $t_5 = 5$ ดังนั้นโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างจะได้รับข้อความที่เวลาดังต่อไปนี้

$$T_{1,2} = 5$$
$$T_{2,2} = 6.00086$$
$$T_{3,2} = 6.00086$$
$$T_{4,2} = 7$$

เมื่อเรามีข้อมูลเพียงพอแล้วเราสามารถประมาณค่า skew ได้ดังนี้

$$skew = \frac{\left(T_{2,2} - T_{2,1}\right)}{\left(T_{1,2} - T_{1,1}\right)}$$
$$= 1.00001$$

จะเห็นได้ว่าเราสามารถประมาณค่า skew ได้ถูกต้อง แต่สำหรับค่าประมาณ offset ยังมีผิดพลาด เนื่องจากค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายในช่วงการแลกเปลี่ยนข่าวสารใช้เวลาอยู่ 1 วินาที ทำให้เวลาของโนดรอบข้างเดินเพี้ยนไป 0.00001 วินาทีทั้งขาไปและขากลับ ส่งผลให้ค่าประมาณ offset ผิดพลาดไป 0.00002 วินาที แต่อย่างไรก็ตามการปรับเวลาให้ตรงกันวิธีนี้สามารถลดปัญหาความผิดพลาดทางเวลาได้ ในสถานการณ์แบบโครงข่ายหยุดนิ่งเท่านั้น แต่ในสถานการณ์โครงข่ายแบบพลวัต จำเป็นต้องมีการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่า skew และ offset โดยจะกล่าวถึงในบทที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
การปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ (EMU-Sync)

ประสิทธิภาพของการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายใต้น้ำขึ้นอยู่กับวิธีการคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจาย ซึ่งขั้นตอนการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ 1. การแลกเปลี่ยนข่าวสาร 2. การคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจาย 3. การประมาณค่า skew และ offset เนื่องจากโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำใช้คลื่นเสียงซึ่งทำให้มีเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนานและโนดเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ในใต้น้ำเป็นเหตุทำให้ยากต่อการหาเวลาประวิงการแพร่กระจายที่แท้จริง ดังนั้นจึงมีแนวคิดมากมายถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายให้แม่นยำที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมาณค่า skew และ offset แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายให้แม่นยำยิ่งขึ้นกลับเพิ่มความซับซ้อนและข้อจำกัดให้ระบบ เช่น เพิ่มจำนวนโนดอ้างอิงจากหนึ่งตัวเป็นสองตัว หรือมีการคำนวณที่ซับซ้อนจนไม่สามารถทำงานแบบทันทีทันใดได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอโพรโทคอล EMU-Sync ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่พัฒนามาจากโพรโทคอล MU-Sync ที่มีความซับซ้อนและข้อจำกัดน้อยกว่าโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันในใต้น้ำตัวอื่น โดยโพรโทคอล EMU-Sync ถูกออกแบบมาเพื่อลดข้อด้อยของโพรโทคอล MU-Sync ที่เกิดมาจากเคลื่อนที่ออกจากกันหรือเคลื่อนที่เข้าหากันของโนดเซนเซอร์ทั้งสองในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร

สำหรับบทที่ 3 ได้มีการเรียบเรียงแบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

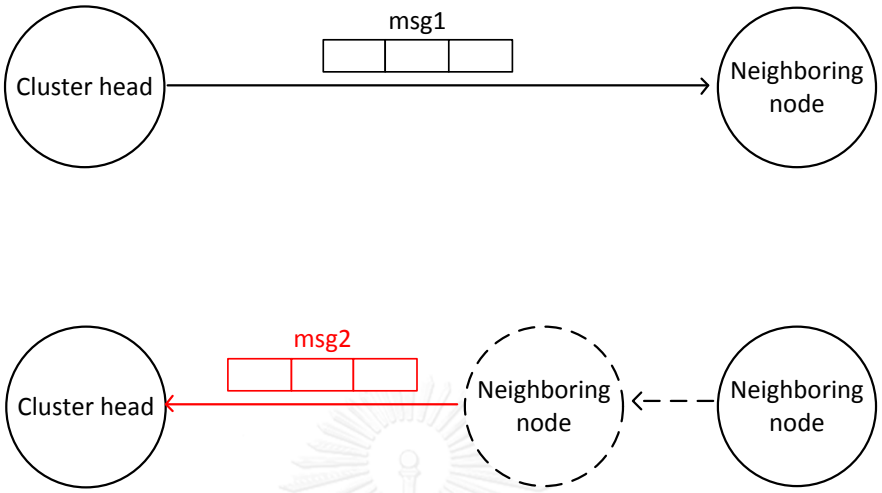
3.1 ความล้มเหลวของการปรับเวลาให้ตรงกันอันเนื่องมากจากการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ

3.2 การประมาณค่า skew จากมุมมองของโนดอ้างอิงและโนดรอบข้าง

3.3 การออกแบบโพรโทคอล EMU-Sync

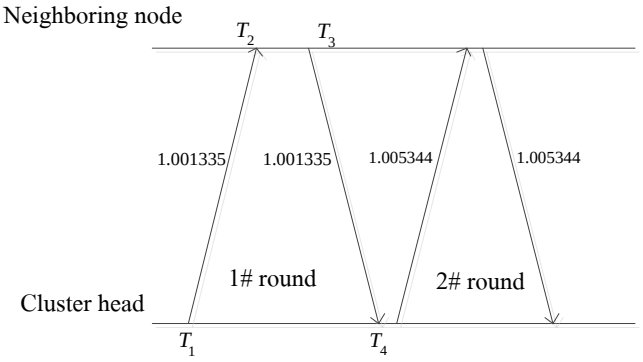
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1 ความล้มเหลวของการปรับเวลาให้ตรงกันอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ



รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสองปัญหาหลักซึ่งได้แก่ เวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนาน และการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำดังในรูปที่ 3.1 โดยทั้งสองปัญหานี้ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการปรับเวลาให้ตรงกัน จากที่กล่าวในหัวข้อ 2.7 เมื่อพิจารณาในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายแบบหยุดนิ่ง การปรับเวลาให้ตรงกันมีความแม่นยำและสามารถแก้ไขความผิดพลาดที่กำหนดให้ได้ แต่หากนำเอาการแก้ปัญหาแบบนี้ไปใช้โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำเคลื่อนที่ได้ การปรับเวลาให้ตรงกันจะมีความผิดพลาดมากและมากว่าความผิดพลาดเริ่มต้นหลายเท่า ซึ่งความผิดพลาดนี้เกิดจากโนดเซนเซอร์เคลื่อนที่ในระหว่างขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร โดยทั่วไปแล้วความผิดพลาดของ skew และ offset อยู่ในหลักไมโครวินาที แต่ผลกระทบจากเวลาประวิงการแพร่กระจายนี้อยู่ในหลักมิลลิวินาที เป็นเหตุทำให้แนวคิดการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาคพื้นดินและแบบอยู่กับที่ ไม่สามารถนำมาใช้งานในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำได้ หรือถ้านำมาใช้งานในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ จะไร้ประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้ กำหนดให้เวลาของโนดรอบข้างเดินเร็วกว่าโนดหัวหน้ากลุ่มเท่ากับ 10 ppm หรือ $a_n = 1.00001$ และมีค่า offset เท่ากับ 0.0008 วินาที หรือ $b_n = 0.0008$ ให้โนดทั้งสองเคลื่อนที่ในระนาบเดียวกันโดยให้โนดรอบข้างเคลื่อนที่ออกห่างจากโนดหัวหน้ากลุ่มด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที และให้โนดหัวหน้ากลุ่มหยุดอยู่กับที่โดยให้ระยะห่างระหว่างโนดหัวหน้ากลุ่มกับโนดรอบข้างห่างกัน 1500 เมตร เมื่อโนดหัวหน้ากลุ่มส่งข้อความครั้งแรก ซึ่งจะได้ค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบ

จากสมการที่ (2.2) ถึง (2.5) สามารถคำนวณหาเวลาที่แต่ละโนดเซนเซอร์ส่งหรือได้รับเป็นดังนี้

$$T_{1,1} = a_c t_{1,1} + b_c = (1)(1) + 0 = 1$$
$$T_{2,1} = a_n t_{2,1} + b_n = (1.00001)(1 + 1.001335) + 0.0008 = 2.002155$$
$$T_{3,1} = a_n t_{3,1} + b_n = (1.00001)(2.001335) + 0.0008 = 2.002155$$
$$T_{4,1} = a_c t_{4,1} + b_c = (1)(2.001335 + 1.001335) = 3.002670$$
$$T_{1,2} = a_c t_{1,2} + b_c = (1)(5) + 0 = 5$$
$$T_{2,2} = a_n t_{2,2} + b_n = (1.00001)(5 + 1.006675) + 0.0008 = 6.007535$$
$$T_{3,2} = a_n t_{3,2} + b_n = (1.00001)(6.006675) + 0.0008 = 6.007535$$
$$T_{4,2} = a_c t_{4,2} + b_c = (1)(6.006675 + 1.006675) = 7.014150$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่า skew ได้เท่ากับ

$$skew = \frac{(T_{2,2} - T_{2,1})}{(T_{1,2} - T_{1,1})}$$
$$= \frac{(6.007535 - 2.002155)}{(5 - 1)}$$
$$= 1.001345$$
$$offset = \frac{(T_{2,1} - T_{1,1}) - (T_{4,1} - T_{3,1})}{2}$$
$$= \frac{(2.002155 - 1) - (3.002670 - 2.002155)}{(2)}$$
$$= 0.00082$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อโนดเซนเซอร์มีการเคลื่อนที่ การประมาณค่า skew โดยไม่สนใจเวลาประวิงการแพร่กระจายนั้นไม่ถูกต้อง อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดความผิดพลาดมากกว่าเดิม ซึ่งกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์และความเร็วของเสียงที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างโนดเซนเซอร์ ส่งผลต่อการประมาณค่า skew และ offset

ตารางที่ 3.1 คำนวณค่า skew โดยใช้โพรโทคอล TSHL เมื่อเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีความเร็วในการเคลื่อนที่การระนาบแกน x (v_c เป็นความเร็วของโนดหัวหน้ากลุ่ม และ v_n เป็นความเร็วของโนดรอบข้าง)

v_c \ v_n	-2	-1	0	1	2
-2	1.000010	1.000676	1.001343	1.002011	1.002680
-1	0.999343	1.000010	1.000676	1.001344	1.002012
0	0.998678	0.999343	1.000010	1.000677	1.001345
1	0.998012	0.998677	0.999343	1.000010	1.000677
2	0.997346	0.998011	0.998676	0.999342	1.000011

จากตารางที่ 3.1 เมื่อให้โนดหัวหน้ากลุ่มเคลื่อนที่ตามระนาบแกน x ด้วยความเร็ว v_c และโนดรอบข้างเคลื่อนที่ตามระนาบแกน x ด้วยความเร็ว v_n พบว่าค่าประมาณ skew ที่คำนวณได้จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดเซนเซอร์ทั้งสอง ทำให้ค่าประมาณ skew เกิดความผิดพลาดและมากกว่าความผิดพลาดเริ่มต้นของค่า skew ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ส่งผลกระทบต่อการปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายเซ็นเซอร์ใต้น้ำ ทำให้ในบางครั้งความผิดพลาดทางเวลาที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์นั้นมากกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอกในใต้น้ำ เช่น แรงดันของแบตเตอร์รี่ อุณหภูมิ แรงดันใต้น้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 การประมาณค่า skew โดยใช้โพรโทคอล MC-Sync เมื่อกำหนดให้โนดที่ต้องปรับเวลาหยุดอยู่กับที่ โดยมีโนดอ้างอิงสองตัวอยู่ในระนาบเดียวกันและเคลื่อนที่ในระนาบเดียวกัน (v_{R1} เป็นความเร็วของโนดอ้างอิงตัวที่หนึ่งและ v_{R2} เป็นความเร็วของโนดอ้างอิงตัวที่สอง) กำหนดให้ค่า skew มีความผิดพลาดเท่ากับ 1.00001

v_{R1} \ v_{R2}	-2	-1	0	1	2
-2	1.00001	1.000344	1.000677	1.001011	1.001345
-1	0.999677	1.00001	1.000343	1.000677	1.001011
0	0.999344	0.999676	1.00001	1.000343	1.000677
1	0.999010	0.999343	0.999676	1.00001	1.000344
2	0.998678	0.999010	0.999344	0.999677	1.00001

แม้ว่าโพรโทคอล MC-Sync สามารถประมาณค่า skew และ offset ได้อย่างแม่นยำด้วยสถานการณ์เฉพาะ แต่เมื่อพิจารณาถึงสถานการณ์ที่แตกต่างออกไป โดยให้โนดอ้างอิงสามารถเคลื่อนที่ได้โดยที่ไม่มีสายเคเบิลผูกติดไว้ การประมาณค่า skew สามารถคำนวณได้ตามตารางที่ 3.2 เมื่อโนดที่ต้องการปรับเวลาหยุดอยู่นิ่งในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร และโนดอ้างอิงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ การปรับเวลาให้ตรงกันของโพรโทคอล MC-Sync จะเกิดความล้มเหลวเกิดขึ้น อีกทั้งความผิดพลาดในการประมาณค่า skew ที่ไม่ถูกต้องนั้นยังมากกว่าความผิดพลาดของค่า skew เริ่มต้นเนื่องจากโพรโทคอล MC-Sync ไม่มีการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายเพื่อนำไปลดกระทบ

ดังนั้นวิธีการออกแบบการปรับเวลาให้ตรงกันในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำต้องมีการคำนวณค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายให้ถูกต้อง เพื่อลดผลกระทบจากค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายที่ไม่คงที่ในแต่ละรอบการแลกเปลี่ยนข่าวสาร แต่นั้นเป็นไปได้ยากที่จะหาเวลาประวิงการแพร่กระจายที่แท้จริงในการสื่อสารใต้น้ำ เนื่องจากเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำไม่รู้ตำแหน่งของตัวเองเพราะไม่สามารถรับสัญญาณ GPS ในใต้น้ำได้ โนดเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ตามกระแสน้ำ อีกทั้งความเร็วของเสียงใต้น้ำยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แรงดัน จึงทำให้การออกแบบโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันในเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีความยากลำบาก

จากแนวคิดของโพรโทคอล MU-Sync ได้เสนอวิธีแก้ปัญหาโดยนำเวลาประวิงการแพร่กระจายที่คำนวณจาก $\frac{RTT}{2}$ ไปหักออกจากเวลาที่โนดรอบข้างได้รับก่อน หลังจากนั้นจึงประมาณค่า skew และ offset ซึ่งวิธีการนี้สามารถลดผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโนดได้ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าประมาณ skew โดยใช้โพรโทคอล MU-Sync เมื่อเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีความเร็วในการเคลื่อนที่การระนาบแกน x (v_c เป็นความเร็วของโนดหัวหน้ากลุ่ม และ v_n เป็นความเร็วของโนดรอบข้าง)

v_n / v_c	-2	-1	0	1	2
-2	1.000010	1.000009	1.000008	1.000007	1.000006
-1	1.000010	1.000010	1.000009	1.000009	1.000008
0	1.000010	1.000010	1.000010	1.000010	1.000010
1	1.000008	1.000009	1.000009	1.000010	1.000010
2	1.000006	1.000007	1.000008	1.000009	1.000010

จากตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล MU-Sync ประมาณค่า skew ได้แม่นยำกว่าโพรโทคอล TSHL ซึ่งประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่า skew ที่กำหนดให้ เนื่องจากสามารถลดผลกระทบจากเวลาประวิงการแพร่กระจายได้ อีกทั้งยังพบว่าโพรโทคอล MU-Sync สามารถคำนวณค่า skew ได้อย่างแม่นยำเมื่อโนดหัวหน้ากลุ่มหยุดอยู่นิ่งหรือทั้งโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและความเร็วเท่ากัน แต่สถานการณ์ทั้งสองนี้โอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก เพราะโนดเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำอีกทั้งการปรับเวลาให้ตรงกันในใต้น้ำใช้เวลานานส่งผลให้โนดเซนเซอร์สามารถเปลี่ยนทิศทางหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร

จากที่กล่าวไว้ในข้างต้นว่าความผิดพลาดในการประมาณค่า skew และ offset เกิดจากเวลาประวิงการแพร่กระจายที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบของการแลกเปลี่ยนข่าวสาร $\left(d_1^{c\to n} \neq d_1^{n\to c} \neq d_2^{c\to n} \neq \cdots \neq d_{\mathrm{N}}^{n\to c}\right)$ ซึ่งการคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายที่แท้จริงนั้นไม่สามารถทำได้ จึงทำให้ยังมีความผิดพลาดอยู่ วิธีการคำนวณความผิดพลาดในการประมาณค่า skew ของโพรโทคอล MU-Sync สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{T}_{2,i} &= a_n\left(t_{1,i} + d_i^{c\to n}\right) + b_n - \hat{d}_i \\ \hat{T}_{2,i} &= a_n t_{1,i} + b_n + a_n d_i^{c\to n} - \hat{d}_i \end{aligned} \tag{3.1}$$

แทนสมการที่ (3.1) ในสมการที่ (2.13) จะได้

$$\hat{\hat{a}}_c = \frac{a_n\left(\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\right)^2\right)}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\right)^2} + \frac{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\left(a_n d_i^{c\to n} - \hat{d}_i\right) - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}}\left(a_n d_i^{c\to n} - \hat{d}_i\right)}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\right)^2} \tag{3.2}$$

ในสมการที่ 3.2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 เทอม โดยที่เทอมแรกคือ x และเทอมที่สองคือ y

เมื่อพิจารณาเทอม x

$$x = \frac{a_n\left(\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\right)^2\right)}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\right)^2}$$

ในเทอมนี้คือค่า skew ที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถลดรูปได้เหลือ $x = a_n$

สำหรับเทอม y

$$y = \frac{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\left(a_n d_i^{c\to n} - \hat{d}_i\right) - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}}\left(a_2 d_i^{c\to n} - \hat{d}_i\right)}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} t_{1,i}\right)^2}$$

ในเทอมนี้คือค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายไม่ถูกต้อง ทำให้ความผิดพลาดยังคงเหลืออยู่ ซึ่งส่งผลให้การประมาณค่า skew ผิดพลาด นั้นหมายความว่าการคำนวณค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายที่ผิดพลาดส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมาณค่า skew ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากปัญหานี้ หลายโพรโทคอลจึงพยายามมุ่งเน้นแก้ไขไปที่ปัญหานี้เป็นหลัก แต่การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายให้แม่นยำไม่ใช่วิธีการเดียวที่สามารถเพื่อความแม่นยำในการประมาณค่า skew ได้ การประมาณค่า skew จากมุมมองของโนดอ้างอิงและโนดรอบข้างเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถลดความผิดพลาดได้เช่นกัน ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2

3.2 การประมาณค่า skew จากมุมมองของโนดอ้างอิงและโนดรอบข้าง

โดยทั่วไปการปรับเวลาให้ตรงกันต่างคำนวณในมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่มหรือโนดอ้างอิงเทียบกับโนดรอบข้าง เนื่องจากการปรับเวลาให้ตรงกันมักพิจารณาเป็นคู่ระหว่างโนดรอบข้างเทียบกับโนดอ้างอิง ซึ่งไม่ว่าจะให้โนดไหนเป็นตัวเทียบผลที่ได้จะเป็นส่วนกลับของกันและกัน เช่นเวลาของโนดรอบข้างเดินเร็วกว่าเวลาของโนดอ้างอิงสองเท่า นั้นหมายความว่าเวลาของโนดอ้างอิงเดินช้ากว่าเวลาของโนดรอบข้างครึ่งหนึ่งเช่นเดียวกัน แต่วิธีแบบนี้ไม่เป็นจริงสำหรับการปรับเวลาให้ตรงกันในใต้น้ำ เพราะเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนาน ดังที่แสดงในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ค่าประมาณ skew หลังจากใช้โพรโทคอล MU-Sync ในการปรับเวลาให้ตรงกัน โดยคำนวณในมุมมองทางฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่ม

v_c \ v_n	-2	-1	0	1	2
-2	1.000010	1.000009	1.000008	1.000007	1.000006
-1	1.000010	1.000010	1.000009	1.000009	1.000008
0	1.000010	1.000010	1.000010	1.000010	1.000010
1	1.000008	1.000009	1.000009	1.000010	1.000010
2	1.000006	1.000007	1.000008	1.000009	1.000010

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.5 ค่าประมาณ skew หลังจากใช้โพรโทคอล MU-Sync ในการปรับเวลาให้ตรงกัน โดยคำนวณในมุมมองทางฝั่งโนดรอบข้าง

v_c \ v_n	-2	-1	0	1	2
-2	0.999990	0.999990	0.999990	0.999988	0.999986
-1	0.999989	0.999990	0.999989	0.999989	0.999987
0	0.999988	0.999989	0.999990	0.999989	0.999988
1	0.999987	0.999989	0.999990	0.999990	0.999989
2	0.999986	0.999988	0.999990	0.999990	0.999990

จากตารางที่ 3.4 และ 3.5 เห็นได้ชัดว่าเมื่อความเร็วของโนดเซนเซอร์เคลื่อนที่แตกต่างกันส่งผลให้การประมาณค่า skew ของโพรโทคอล MU-Sync เกิดความผิดพลาดไม่ว่าจะเป็นมุมมองในด้านไหนก็ตามและความผิดพลาดก็ไม่ได้เป็นส่วนกลับของกันและกัน เช่นถ้าให้ความเร็วของทั้งโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างเคลื่อนที่ออกห่างจากกันในระนาบแกน x ด้วยความเร็วเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาทีทั้งคู่ ค่าประมาณ skew ในมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่มจะคำนวณได้ 1.000006 ซึ่งส่วนกลับจะได้ $\frac{1}{1.000006}$ หรือเท่ากับ 0.999994 แต่เมื่อพิจารณาในมุมมองของโนดรอบข้าง ค่าประมาณ skew จะได้ 0.999986 เห็นได้ว่าการประมาณค่า skew ในมุมมองที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าประมาณ skew แตกต่างกันด้วย

อีกหนึ่งวิธีที่สามารถลดความผิดพลาดในการค่าประมาณค่า skew คือการนำค่าประมาณ skew ทั้งจากมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างมาเฉลี่ยกัน เพื่อลดผลกระทบจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายไม่ถูกต้อง เนื่องจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายทั้งจากมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างใช้ข้อมูลร่วมกัน $\left(T_1, T_2, T_3, T_4\right)$ ดังนั้นการประมาณเวลาประวิงการแพร่กระจายส่วนมากในแต่ละครั้งย่อมมีความผิดพลาดไปในทิศทางเดียวกัน เช่น หากกำหนดให้โนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างเคลื่อนที่ออกจากกัน ค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายในช่วงแรกย่อมน้อยกว่าช่วงหลังเสมอ $\left(d_1^{c\to n} > d_1^{n\to c} > d_2^{c\to n} > \cdots > d_{\mathrm{N}}^{n\to c}\right)$ ดังนั้นการประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายจากครึ่งหนึ่งของเวลาไป-กลับจะมีค่ามากกว่าเวลาประวิงการแพร่กระจายแท้จริงเสมอ การนำเอาค่าประมาณ skew ของแต่ละมุมมองมาเฉลี่ยกันจะช่วยให้การ

ประมาณค่าเฉลี่ย skew (a_e)ใกล้เคียงกับค่า skew เช่นหากกำหนดให้โนดเซนเซอร์ทั้งสองเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ค่าประมาณ skew ของโนดรอบข้างจะเท่ากับ 1.000006 ตามตารางที่ 3.4 และค่าประมาณ skew ของโนดหัวหน้ากลุ่มจะเท่ากับ 0.999986 ตามตารางที่ 3.5 ดังนั้นเมื่อคำนวณค่าประมาณเฉลี่ย skew จะได้

$$\frac{\left(\frac{1}{0.999986}+1.00006\right)}{2}=1.00001$$

นั้นหมายความว่าเมื่อกำหนดให้โนดเซนเซอร์เคลื่อนที่ออกจากกันด้วยความเร็วที่เท่ากันและคงที่ตลอดเวลา การประมาณค่าเฉลี่ย skew โดยใช้ค่าประมาณ skew จากทั้งสองมุมมองของเซนเซอร์มีความแม่นยำกว่าการประมาณค่า skew จากมุมมองเดียว และหากพิจารณาการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ ค่าประมาณเฉลี่ย skew จะเป็นดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าประมาณ skew จากมุมมองทั้งสองโนด

v_c \ v_n	-2	-1	0	1	2
-2	1.000010	1.000009	1.000009	1.000009	1.000010
-1	1.000010	1.000010	1.000010	1.000010	1.000010
0	1.000011	1.000010	1.000010	1.000010	1.000011
1	1.000010	1.000010	1.000009	1.000010	1.000010
2	1.000010	1.000009	1.000009	1.000009	1.000010

จากตารางที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าการประมาณค่าเฉลี่ย skew จากสองมุมมองมีความแม่นยำกว่าการประมาณค่า skew จากมุมมองเดียวดังที่แสดงในตารางที่ 3.4 แต่นั้นไม่ได้หมายความว่าการประมาณค่า skew จากมุมมองเดียวจะมีความแม่นยำน้อยกว่า ในบางกรณีการประมาณค่า skew จากมุมมองเดียวอาจมีความแม่นยำมากกว่าการประมาณค่าเฉลี่ย skew จากสองมุมมองได้ เช่น ที่ความเร็ว $v_c=0, v_n=2$ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามค่าประมาณเฉลี่ย skew จากสองมุมมองมีความแม่นยำมากกว่าค่าประมาณ skew จากมุมมองเดียว เนื่องจากโดยส่วนมากแล้วการประมาณค่าเฉลี่ย skew จากสองมุมมองมีความแม่นยำมากกว่า

จากตารางที่ 3.1 ถึง 3.6 เป็นการกำหนดให้โนดเซนเซอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เสมอและไม่เปลี่ยนทิศทางในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร เพื่อศึกษาข้อดีและข้อเสียของแต่ละโพรโทคอล แต่สำหรับการจำลองการปรับเวลาให้ตรงกัน ความเร็วและทิศทางจะเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ซึ่งเป็นไปตามค่าพารามิเตอร์ที่ถูกตั้งไว้ในหัวข้อที 4.1

3.3 การออกแบบโพรโทคอล EMU-Sync

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.2 การประมาณค่า skew จากทั้งสองมุมมองมีความแม่นยำกว่าการประมาณค่า skew แบบมุมมองเดียว ซึ่งการประมาณค่า skew จากทั้งสองมุมมองสามารถแก้ไขกรณีที่โพรโทคอล MU-Sync ประมาณค่าได้แย่อย่างมากได้ด้วย คือในกรณีที่โนดเซนเซอร์เคลื่อนที่ออกจากกันหรือเข้าหากัน โดยการทำงานของโพรโทคอล EMU-Sync แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ 1) การแลกเปลี่ยนข่าวสาร 2) การประมาณค่า skew และ offset ของโนดรอบข้าง 3) การประมาณค่า skew และ offset ของโนดหัวหน้ากลุ่ม 4) การประมาณค่าเฉลี่ย skew และ offset จากมุมมองทั้งสอง 5) การบอกค่าประมาณ skew และ offset ไปยังโนดรอบข้าง

พารามิเตอร์ของโพรโทคอล EMU-Sync มีดังนี้

a_c	Skew ของโนดหัวหน้ากลุ่ม
b_c	Offset ของโนดหัวหน้ากลุ่ม
a_n	Skew ของโนดรอบข้าง
b_n	Offset ของโนดรอบข้าง
$T_{1,i}$	เวลาส่งของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดหัวหน้ากลุ่ม)
$T_{2,i}$	เวลารับของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดรอบข้าง)
$T_{3,i}$	เวลาส่งของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดรอบข้าง)
$T_{4,i}$	เวลารับของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (คำนวณจากโนดหัวหน้ากลุ่ม)
$t_{1,i}$	เวลาส่งของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)
$t_{2,i}$	เวลารับของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)

$t_{3,i}$	เวลาส่งของโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)
$t_{4,i}$	เวลารับของโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i (เวลามาตรฐาน)
t_{Γ}	ระยะเวลารอคอย
$d_i^{c\to n}$	เวลาประวิงการแพร่กระจายจากโนดหัวหน้ากลุ่มไปยังโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i
$d_i^{n\to c}$	เวลาประวิงการแพร่กระจายจากโนดรอบข้างไปยังโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i
$\hat{d}_{1,i}$	ค่าประมาณเวลาประวิงการแพร่กระจายจากโนดหัวหน้ากลุ่มไปยังโนดรอบข้าง ณ รอบที่ i
$\hat{d}_{2,i}$	ค่าประมาณเวลาประวิงการแพร่กระจายจากโนดรอบข้างไปยังโนดหัวหน้ากลุ่ม ณ รอบที่ i
$\hat{T}_{2,i}$	เวลารับของโนดรอบข้างหลังจากนำเวลาประวิงการแพร่กระจายมาหักออก ณ รอบที่ i
$\hat{T}_{4,i}$	เวลารับของโนดหัวหน้ากลุ่มหลังจากนำเวลาประวิงการแพร่กระจายมาหักออก ณ รอบที่ i
$\hat{a}_c$	ค่าประมาณ skew ครั้งแรกของโนดหัวหน้ากลุ่ม
$\hat{\hat{a}}_c$	ค่าประมาณ skew ครั้งสุดท้ายของโนดหัวหน้ากลุ่ม
$\hat{a}_n$	ค่าประมาณ skew ครั้งแรกของโนดรอบข้าง
$\hat{\hat{a}}_n$	ค่าประมาณ skew ครั้งสุดท้ายของโนดรอบข้าง
$\hat{\hat{b}}_c$	ค่าประมาณ offset ของโนดหัวหน้ากลุ่ม
$\hat{\hat{b}}_n$	ค่าประมาณ offset ของโนดรอบข้าง
a_e	ค่าประมาณเฉลี่ย skew จากทั้งสองมุมมอง
b_e	ค่าประมาณเฉลี่ย offset จากทั้งสองมุมมอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.1 การแลกเปลี่ยนข่าวสาร

ในขั้นตอนการทำงานส่วนแรกเป็นการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างโนดหัวหน้ากลุ่มกับโนดรอบข้าง ดังรูปที่ 2.7 โดยเริ่มต้นจากโนดหัวหน้ากลุ่มส่งข้อความไปยังโนดรอบข้าง และโนดรอบข้างส่งข้อความที่มี T_2 และ T_3 กลับไปยังโนดหัวหน้ากลุ่ม โดยเป็นการส่งข้อมูลไป-กลับ(round trip time) 1 รอบ ทำให้โนดหัวหน้ากลุ่มมีข้อมูลเวลา T_1, T_2, T_3 และ T_4 ในแต่ละรอบ จากนั้นโนดหัวหน้ากลุ่ม ทำการแลกเปลี่ยนข่าวสารอีกจนครบ N รอบ

3.3.2 การประมาณค่า skew และ offset ของโนดรอบข้าง

หลังจากที่โนดหัวหน้ากลุ่ม ได้รับเวลา T_1, T_2, T_3 และ T_4 เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นค่าประมาณ skew ครั้งแรกของโนดรอบข้างจากสมการที่ (2.10)

$$\hat{a}_n = \frac{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}T_{2,i} - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{2,i}}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\right)^2}$$

จากนั้นจึงคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบ i วิธีคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายของโพรโทคอล EMU-Sync คำนวณจากเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลไป-กลับหารสองดังสมการที่ 2.11

$$\hat{d}_{1,i} = \frac{T_{4,i} - T_{1,i} + \frac{T_{2,i} - T_{3,i}}{\hat{a}_n}}{2}$$

จากนั้นนำค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายจากสมการที่ (2.11) มาหักออกจากเวลาที่โนดรอบข้างได้รับในแต่ละรอบจะได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\hat{T}_{2,1} = T_{2,1} - \hat{d}_{1,i}$$

คำนวณค่าประมาณ skew ครั้งสุดท้ายของโนดรอบข้างตามสมการที่ (2.13)

$$\hat{\hat{a}}_n = \frac{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\hat{T}_{2,i} - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \hat{T}_{2,i}}{\mathrm{N}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} T_{1,i}\right)^2}$$

คำนวณค่าประมาณ offset ครั้งสุดท้ายของโนดรอบข้างตามสมการที่ (2.14)

$$\hat{\hat{b}}_n = \overline{\hat{T}_2} - \hat{\hat{a}}_n \overline{T_1}$$

3.3.3 การประมาณค่า skew และ offset ของโนดหัวหน้ากลุ่ม

วิธีการคำนวณในขั้นตอนนี้จะคล้ายกับการคำนวณหาค่าประมาณ skew และ offset ของโนดหัวหน้ากลุ่ม โดยขั้นตอนนี้จะใช้โนดหัวหน้ากลุ่มเทียบกับโนดรอบข้างแทน ซึ่งในขั้นตอนแรกนั้นเริ่มจากประมาณค่า skew ครั้งแรกของโนดหัวหน้ากลุ่มตามสมการที่ (3.3)

$$\hat{a}_c = \frac{(\mathrm{N}-1)\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}T_{4,i} - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{4,i}}{(\mathrm{N}-1)\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}\right)^2} \tag{3.3}$$

จากนั้นจึงคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบ i ตามสมการที่ (3.4)

$$\hat{d}_{2,i} = \frac{T_{2,i+1} - T_{3,i} + \frac{T_{4,i} - T_{1,i+1}}{\hat{a}_c}}{2} \tag{3.4}$$

นำเวลาประวิงการแพร่กระจายมาหักออกจากเวลาที่โนดหัวหน้ากลุ่มได้รับในแต่ละรอบ i ได้ตามสมการที่ (3.5)

$$\hat{T}_{4,1} = T_{4,1} - \hat{d}_{2,i} \tag{3.5}$$

จากนั้นประมาณค่า skew ครั้งสุดท้ายของโนดหัวหน้ากลุ่มตามสมการที่ (3.6)

$$\hat{\hat{a}}_c = \frac{(\mathrm{N}-1)\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}\hat{T}_{4,i} - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} \hat{T}_{4,i}}{(\mathrm{N}-1)\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{\mathrm{N}-1} T_{3,i}\right)^2} \tag{3.6}$$

คำนวณค่าประมาณ offset ครั้งสุดท้ายของโนดรอบข้างตามสมการที่ (3.7)

$$\hat{\hat{b}}_c = \bar{\hat{T}}_4 - \hat{\hat{a}}_c \bar{T}_3 \tag{3.7}$$

Chulalongkorn University

3.3.4 การประมาณค่าเฉลี่ย skew และ offset จากมุมมองทั้งสอง

ขั้นตอนนี้เป็นการประมาณค่าเฉลี่ย skew และ offset จากทั้งสองมุมมอง โดยใช้ค่าประมาณ skew และ offset ของโนดรอบข้างและค่าประมาณ skew และ offset ของโนดหัวหน้ากลุ่มมาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าการประมาณค่าเฉลี่ย skew จากมุมมองทั้งสองคำนวณได้ตามสมการที่ (3.8)

$$a_e = \frac{\hat{\hat{a}}_n + \frac{1}{\hat{\hat{a}}_c}}{2} \tag{3.8}$$

ค่าการประมาณค่าเฉลี่ย offset จากมุมมองทั้งสองคำนวณได้ตามสมการที่ (3.9)

$$b_e = \frac{\hat{\hat{b}}_c - \hat{\hat{b}}_n}{2} \tag{3.9}$$

3.3.5 การบอกค่าประมาณ skew และ offset ไปยังโนดรอบข้าง

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของโพรโทคอล EMU-Sync หลังจากที่โนดหัวหน้ากลุ่มการประมาณค่าเฉลี่ย skew และ offset จากมุมมองทั้งสองเสร็จเรียบร้อย โนดหัวหน้ากลุ่มจะส่งข้อมูล (a_e, b_e) ไปยังโนดรอบข้าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ **4**
ผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของการออกแบบการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากค่า skew ที่เพิ่มขึ้น ศึกษาผลกระทบจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ ศึกษาระยะเวลาตอบสนอง ศึกษาการเปลี่ยนทิศทางของโนดเซนเซอร์ ศึกษาจำนวนข้อความสำหรับการแลกเปลี่ยนข่าวสารและศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบการจำลอง

วิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้จำลองการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ โดยจับคู่กันปรับเวลาให้ตรงกันระหว่างโนดหัวหน้ากลุ่ม (cluster head node) และโนดรอบข้าง (neighbor node) ซึ่งโนดหัวหน้ากลุ่มสามารถจับคู่กับโนดรอบข้างหลาย ๆ ตัวพร้อมกันเพื่อทำการปรับเวลาให้ตรงกันได้ แต่การปรับเวลาให้ตรงกันในแต่ละคู่จะไม่มีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นในการจำลองนี้จึงพิจารณาแค่คู่โนดเดียวเท่านั้น โดยที่ในแต่ละครั้งของการจำลองมีการสุ่มตำแหน่งของโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างขึ้นมาใหม่ในพื้นที่ 1000 x 1000 ตารางเมตร และทำการจำลองจนกระทั่งครบ 10,000 ครั้ง จากนั้นนำทุกผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย ภายใต้ค่าพารามิเตอร์และข้อสมมติฐานเป็นดังนี้ (หากมิได้กำหนดเป็นอย่างอื่น)

1. ไม่มีการชนกันของข้อมูลในระหว่างการปรับเวลาให้ตรงกัน
2. ค่าความผิดพลาดของ skew ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการปรับเวลาให้ตรงกัน โดยมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 50 ppm
3. ค่าความผิดพลาดของ offset เท่ากับ 800 ppm
4. มีการแลกเปลี่ยนข่าวสารเท่ากับ 20 ครั้ง
5. ค่าความไม่แน่นอนในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสารสมมติให้มีการกระจายตัวแบบ Gaussian โดยที่ $\mu = 0, \sigma = 11.1\mu\,\mathrm{sec}$
6. ความเร็วของเสียงใต้น้ำเท่ากับ 1500 เมตรต่อวินาที
7. เวลาตอบสนองเท่ากับ 1 วินาที $(t_r = 1)$

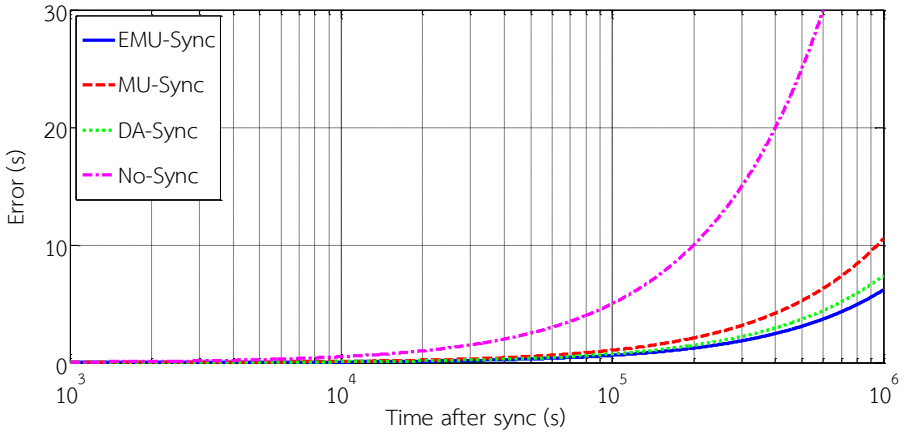
8. โนดเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่แบบสุ่มโดยการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม ด้วยความเร็วตั้งแต่ [0-2] เมตรต่อวินาที
9. โนดเซนเซอร์สามารถเปลี่ยนทิศทางในช่วงมุม -45 ถึง 45 องศา
10. โนดเซนเซอร์มีการเปลี่ยนความเร็วหรือทิศทาง โดยการกระจายตัวแบบเอกซ์โพแนนเชียลด้วยค่าเฉลี่ย 10 วินาที
11. Clock granularity เท่ากับ 1 ไมโครวินาที
12. สำหรับโพรโทคอล DA-Sync กำหนดให้รู้ความเร็วสัมพันธ์ได้อย่างถูกต้อง

4.2 ผลการทดลอง

ส่วนนี้กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการปรับเวลาให้ตรงกันสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ โดยมีการจำลองทั้งหมด 3 โพรโทคอล คือ EMU-Sync MU-Sync และ DA-Sync เนื่องจากโพรโทคอล EMU-Sync ได้พัฒนามาจากโพรโทคอล MU-Sync และโพรโทคอล DA-Sync เป็นโพรโทคอลที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในปัจจุบัน โดยในบางหัวข้อจะมีการเปรียบเทียบกับการไม่ปรับเวลาให้ตรงกันด้วย (No-Sync) สำหรับโพรโทคอลอื่น ผู้วิจัยไม่ได้ทำการจำลองผลเพื่อเปรียบเทียบเพราะโพรโทคอลเหล่านั้นมีข้อจำกัดในด้านสถาปัตยกรรมและมีเงื่อนไขต่าง ๆ มาก ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอล EMU-Sync MU-Sync และ DA-Sync ทีกำหนดให้โนดใดโนดหนึ่งเป็นโนดอ้างอิง จากนั้นจึงปรับเวลาของโนดรอบข้างให้ตรงกันกับโนดอ้างอิง และโนดรอบข้างที่ได้รับการปรับเวลาจะปรับเวลาโนดรอบข้างของตัวมันเองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบทั้งโครงข่าย

สำหรับผลการทดลอง ทางผู้วิจัยได้สนใจและศึกษาในหลายส่วนซึ่งประกอบไปด้วย 7 เรื่องหลักๆ ได้แก่

1. ความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกัน
2. ศึกษาผลกระทบจากความผิดพลาดของค่าของ skew
3. ศึกษาผลกระทบเมื่อความเร็วสูงสุดของโนดเซนเซอร์เพิ่มขึ้น
4. ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนทิศทางของโนดเซนเซอร์
5. ศึกษาผลกระทบจากเวลารอคอยที่ยาวนานขึ้น
6. ศึกษาผลของการเพิ่มจำนวนข้อความในการแลกเปลี่ยนข่าวสาร
7. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.1 ความผิดพลาดของเวลาหลังจากที่มีการปรับเวลาให้ตรงกันแล้ว

4.2.1 ความผิดพลาดหลังการปรับเวลาให้ตรงกัน

หลังจากโนดเซนเซอร์ปรับเวลาให้ตรงกันแล้ว ความแม่นยำในการประมาณค่า skew และ offset ของแต่ละโพรโทคอลย่อมมีความแตกต่างกัน โดยโพรโทคอลที่มีความแม่นยำมากกว่าย่อมเกิดความผิดพลาดทางเวลาน้อยกว่าดังในรูปที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดทางเวลาได้เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป หากไม่ใช้โพรโทคอลในการปรับเวลา (No-Sync) ความผิดพลาดทางเวลาจึงไม่ได้รับการแก้ไข ซึ่งหมายความว่าเมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งล้านวินาที ค่าความผิดพลาดทางเวลาของ No-Sync เท่ากับ 50 วินาที เมื่อเปรียบเทียบโพรโทคอล EMU-Sync MU-Sync และ DA-Sync หลังจากปรับเวลาให้ตรงกัน เมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งล้านวินาที ค่าความผิดพลาดทางเวลาของ EMU-Sync เท่ากับ 6.17 วินาที ค่าความผิดพลาดทางเวลาของ MU-Sync เท่ากับ 10.5 วินาที และค่าความผิดพลาดทางเวลาของ DA-Sync เท่ากับ 7.3 วินาที จะเห็นได้ชัดว่าโพรโทคอลทั้งสามนั้นสามารถลดค่าความผิดพลาดทางเวลาได้ ซึ่งโพรโทคอล EMU-Sync สามารถปรับเวลาได้แม่นยำที่สุด รองลงมาได้แก่ DA-Sync และ MU-Sync ตามลำดับ แม้ว่าโพรโทคอล DA-Sync จะใช้ประโยชน์จากความเร็วสัมพัทธ์เพื่อคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจาย แต่นั้นไม่ได้หมายความว่าจะสามารถคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายได้ถูกต้อง เนื่องจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายให้ถูกต้องจำเป็นต้องรู้ความเร็วของโนดเซนเซอร์ เช่นโนดเซนเซอร์ตัวรับเคลื่อนที่เข้าหาโนดเซนเซอร์ตัวส่ง และโนดเซนเซอร์ตัวส่งเคลื่อนที่หนีออกจากโนดเซนเซอร์ตัวรับด้วยความเร็วที่มากกว่า ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดเซนเซอร์จะมองว่าโนดเซนเซอร์ตัวรับเคลื่อนที่ออก จึงส่งผลให้การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายผิดพลาดได้ แต่อย่างไรก็ตามโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นน้อย ดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวมจึงดีกว่าวิธีการแบบครึ่งหนึ่งของเวลาที่ใช้ในการส่งไปและส่งกลับดังเช่น

MU-Sync ซึ่งเป็นผลทำให้ MU-Sync มีความผิดพลาดมากกว่า DA-Sync สำหรับโพรโทคอล EMU-Sync ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหาของโพรโทคอล MU-Sync โดยการประมาณค่าเฉลี่ย skew และ offset จากมุมมองของทั้งโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้าง เพื่อลดผลกระทบจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ไม่ถูกต้อง จึงทำให้โพรโทคอล EMU-Sync มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำดีที่สุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอล MU-Sync และ DA-Sync

4.2.2 ศึกษาผลกระทบจากความผิดพลาดของค่า skew

โดยปกติโนดเซนเซอร์ใช้แร่ควอซเพื่อวัดเวลาและบอกเวลา แต่เมื่อนำมาใช้งานใต้น้ำ ผลกระทบจากอุณหภูมิ แรงดันใต้น้ำ แรงดันจากแบตเตอร์รี่ หรือการกัดกร่อน สามารถทำให้นาฬิกาของโนดเซนเซอร์สามารถเดินผิดเพี้ยนได้ เป็นเหตุให้เวลาของโนดเซนเซอร์แต่ละตัวเดินไม่เท่ากัน ไม่ว่าจะเป็นโนดหัวหน้ากลุ่มหรือโนดรอบข้าง จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการปรับเวลาให้ตรงกัน โดยจุดประสงค์หลักของโพรโทคอล EMU-Sync คือการปรับเวลาของโนดรอบข้างให้ตรงกับโนดหัวหน้ากลุ่ม จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้ศึกษาผลกระทบจากค่า skew เมื่อกำหนดให้ความผิดพลาดเริ่มต้นตั้งแต่ 5 ppm จนถึง 100 ppm เพื่อศึกษาผลกระทบจากค่า skew ในแต่ละโพรโทคอลว่ามีขีดจำกัดในการหาค่า skew ต่ำสุดที่เท่าไรและเมื่อค่า skew มีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น แต่ละโพรโทคอลจะยังคงสามารถหาค่า skew ได้ถูกต้องอยู่หรือไม่ โดยวิธีการคำนวณความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันผ่านไป 100 วินาทีเป็นไปดังสมการที่ 4.1

$$e = \left| \left(\frac{a(100) + b - \hat{b}}{\hat{a}} \right) \right| \tag{4.1}$$

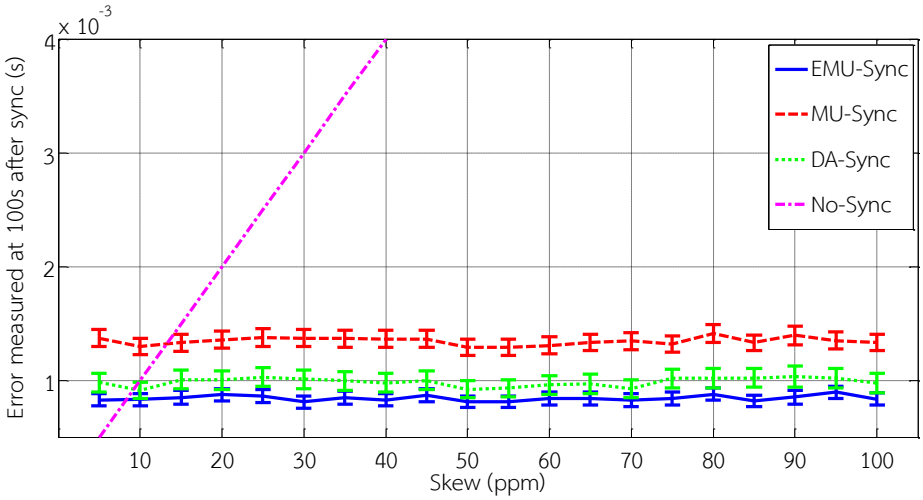
เมื่อ e คือ ความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันผ่านไป 100 วินาที

a คือ ค่า skew

b คือ ค่า offset

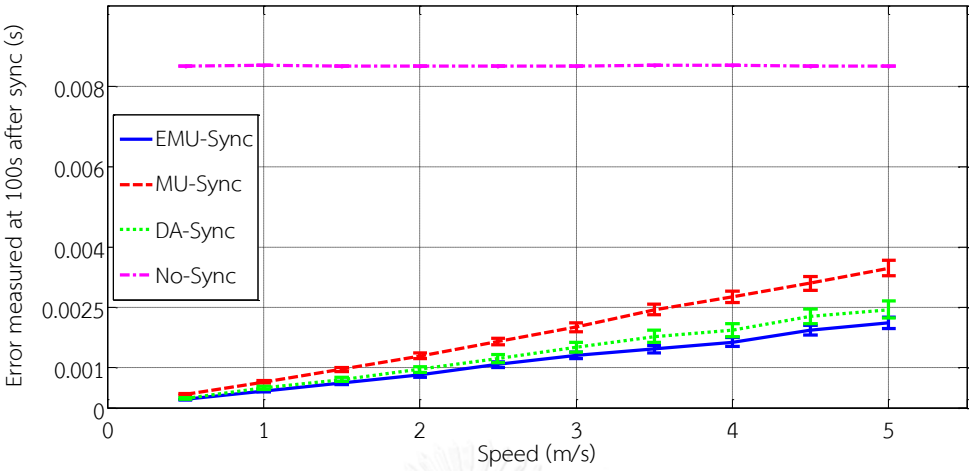
$\hat{a}$ คือ ค่าประมาณ skew

$\hat{b}$ คือ ค่าประมาณ offset



รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันผ่านไป 100 วินาที เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ skew ตั้งแต่ 5 ppm ถึง 100 ppm

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาขีดจำกัดของโพรโทคอล EMU-Sync, MU-Sync และ DA-Sync โดยกำหนดให้ค่าความผิดพลาดของ skew เริ่มต้นตั้งแต่ 5 ppm และเพิ่มขึ้นทีละ 5 ppm จนกระทั้งถึง 100 ppm พบว่าค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดที่วัดได้หลังจากการปรับเวลาให้ตรงกันผ่านไป 100 วินาที ในแต่ละโพรโทคอลนั้นมีลักษณะคงที่แทบไม่แตกต่างกัน นั้นหมายความว่าความผิดพลาดของค่า skew เริ่มต้นไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ต่อการคำนวณ อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดที่วัดหลังจากการปรับเวลาให้ตรงกันผ่านไป 100 วินาที บางช่วงของแต่ละโพรโทคอลมีค่าความผิดพลาดมากกว่าการไม่ใช้โพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกัน นั้นคือโพรโทคอลนั้นไม่แก้ไขปัญหาค่า skew ในช่วงนั้นได้ หรือหากใช้โพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันเพื่อแก้ไขปัญหาเวลา การไม่ใช้โพรโทคอลเลยกลับให้ผลที่ดีกว่า เช่น ที่ค่า skew ที่ผิดพลาดไป 5 ppm ทุกโพรโทคอลไม่สามารถแก้ไขให้ดีกว่าการไม่ใช้โพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันได้ นั้นหมายถึงขีดจำกัดของโพรโทคอล โดยแต่ละโพรโทคอลมีขีดจำกัดในการแก้ไขปัญหาการปรับเวลาไม่เท่ากัน สังเกตได้ว่าเมื่อค่า skew เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ค่าความผิดพลาดทางเวลาเมื่อไม่ทำการปรับเวลาให้ตรงกัน (No-Sync) มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งเส้นของ No-Sync ตัดผ่านเส้นของโพรโทคอล MU-Sync ที่ 13 ppm และตัดผ่านเส้นของโพรโทคอล EMU-Sync ที่ 9.8 และโพรโทคอล DA-Sync 9.2 ppm หมายความว่าโพรโทคอล EMU-Sync ไม่สามารถแก้ไขปัญหาค่า skew เริ่มต้นที่ต่ำกว่า 9.2 ppm ได้หรือหากใช้โพรโทคอล EMU-Sync แก้ไขปัญหาค่า skew เริ่มต้นที่ต่ำกว่า 9.2 ppm ประสิทธิภาพจะแย่กว่าการไม่ใช้โพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกัน (No-Sync) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโพรโทคอล EMU-Sync มีขีดจำกัดอยู่ที่ 9.2 ppm โพรโทคอล MU-Sync มีขีดจำกัดอยู่ที่ 13 ppm และโพรโทคอลมีขีดจำกัดอยู่ที่ 9.8 ppm



รูปที่ 4.3 ผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์

4.2.3 ศึกษาผลกระทบเมื่อความเร็วสูงสุดของโนดเซนเซอร์เพิ่มขึ้น

ปกติแล้วเซ็นเซอร์โนดสามารถเคลื่อนที่ใต้น้ำโดยให้กระแสน้ำพัดพาไป ซึ่งความเร็วของโนดเซนเซอร์ใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุดถึง 2 เมตรต่อวินาที แต่หัวข้อนี้ศึกษาความเร็วสูงสุดของโนดเซนเซอร์เคลื่อนที่ได้ตั้งแต่ 0.5 เมตรต่อวินาที จนถึง 5 เมตรต่อวินาที เนื่องจากความเร็วของโนดเซนเซอร์มีผลกระทบโดยตรงต่อการปรับเวลาให้ตรงกัน เพราะเมื่อโนดเซนเซอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง การประมาณเวลาประวิงการแพร่กระจายมีโอกาสคำนวณได้ผิดพลาดมากกว่าโนดเซนเซอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าทั้งโพรโทคอล EMU-Sync MU-Sync และ DA-Sync ได้รับผลกระทบจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ เมื่อให้ความเร็วสูงสุดของโนดเซนเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าความผิดพลาดทางเวลาก็เพิ่มขึ้นและมีค่าความความแปรปรวนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการประมาณค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายมีความผิดพลาดสูง อย่างไรก็ตามการปรับเวลาให้ตรงกันของทั้งโพรโทคอล EMU-Sync, MU-Sync และ DA-Sync ยังคงมีประสิทธิภาพดีกว่าการไม่ใช้โพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกัน แม้ว่าทั้งสามโพรโทคอลจะมีค่าความผิดพลาดทางเวลาที่ต่ำ แต่โพรโทคอล EMU-Sync มีความแม่นยำมากที่สุด เช่นเมื่อความเร็วสูงสุดของโนดเซนเซอร์ที่สามารถเคลื่อนที่ใต้น้ำเท่ากับ 4 เมตรต่อวินาที ค่าความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันแล้วผ่านไป 100 วินาทีของทั้งสามโพรโทคอลมีดังนี้

โพรโทคอล EMU-Sync มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.45 มิลลิวินาที

โพรโทคอล MU-Sync มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 2.75 มิลลิวินาที

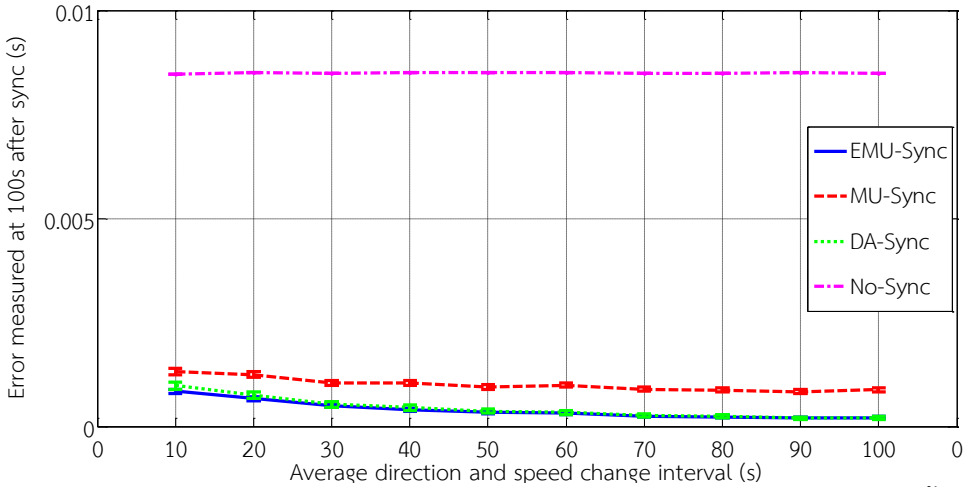
โพรโทคอล DA-Sync มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.92 มิลลิวินาที

โพรโทคอล MU-Sync ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์มากที่สุด เนื่องจากการประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายมีความผิดพลาดสูง แม้ว่าโพรโทคอล EMU-Sync จะประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายเช่นเดียวกัน แต่ได้พัฒนาวิธีการประมาณค่า skew และ offset จากค่าเฉลี่ยในมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้าง ทำให้ลดผลกระทบที่เกิดจากการแพร่ประวิงเวลาลงได้

4.2.4 ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนทิศทางของโนดเซนเซอร์

หัวข้อนี้นำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนความเร็วและทิศทางของโนดเซนเซอร์ในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำ โดยปกติการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ใต้น้ำเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำ ซึ่งหมายความว่าการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ใต้น้ำไม่สามารถกำหนดและควบคุมได้ อีกทั้งโนดเซนเซอร์ไม่ได้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและเคลื่อนด้วยอัตราเร็วคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ช่วงระยะเวลาในการเปลี่ยนความเร็วหรือทิศทางของโนดเซนเซอร์มีกระจายตัวการสุ่มแบบเอกซ์โปเนนเชียล โดยศึกษาค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวการสุ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลเริ่มต้นตั้งแต่ 10 จนถึง 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

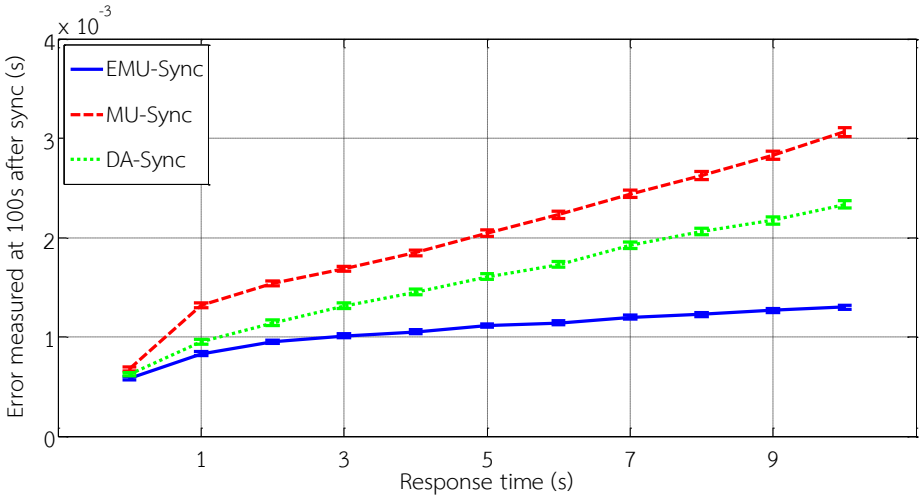


รูปที่ 4.4 ผลกระทบจากช่วงเวลาเฉลี่ยในการเปลี่ยนความเร็วหรือทิศทางที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าเมื่อช่วงเวลาเฉลี่ยในการเปลี่ยนความเร็วหรือทิศทางเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความผิดพลาดทางเวลาของทั้งสามโพรโทคอลลดลงเล็กน้อย เนื่องจากช่วงระยะเวลาในการเปลี่ยนความเร็วหรือทิศทางที่มีค่ามาก การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบจะผิดในอัตราส่วนแทบจะคงเดิม ซึ่งจะทำให้การประมาณค่า skew และ offset มีความแม่นยำมากกว่าช่วงระยะเวลาในการเปลี่ยนความเร็วและทิศทางที่มีค่าน้อยคำนวณการเปลี่ยนแปลงนานกว่าช่วงระยะเวลาในการเปลี่ยนความเร็วหรือทิศทางที่มีค่าน้อย อย่างไรก็ตามทั้งสามโพรโทคอลมีค่าความผิดพลาดทางเวลาน้อยกว่าการไม่ใช้โพรโทคอลปรับเวลาให้ตรงกัน ซึ่งหมายความว่าถึงแม้โนดเซนเซอร์มีการเปลี่ยนทิศทางหรือความเร็วที่ไวขึ้น โพรโทคอลทั้งสามยังสามารถปรับเวลาให้ตรงกันได้

แม้ว่าโพรโทคอลทั้งสามมีขั้นตอนการประมาณค่าเวลาประวิงการแพร่กระจาย แต่โพรโทคอล MU-Sync มีความแม่นยำในการคำนวณน้อยที่สุดและเมื่อโนดเซนเซอร์มีการเปลี่ยนความเร็วและทิศทางบ่อย จะทำให้ความแม่นยำในการประมาณค่า skew และ offset มีค่าต่ำที่สุดในบรรดาโพรโทคอลทั้งสามด้วย โพรโทคอล DA-Sync ได้มีการใช้ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจาย แต่หากความเร็วหรือทิศทางของเซนเซอร์โนดมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ความผิดพลาดในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายย่อมผิดพลาดได้ สำหรับโพรโทคอล EMU-Sync สามารถลดความผิดพลาดในการประมาณค่า skew และ offset ได้ ทำให้ความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันจะน้อยกว่า MU-Sync และใกล้เคียงกับ DA-Sync ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.5 ผลกระทบจากระยะเวลารอคอยที่เพิ่มขึ้น

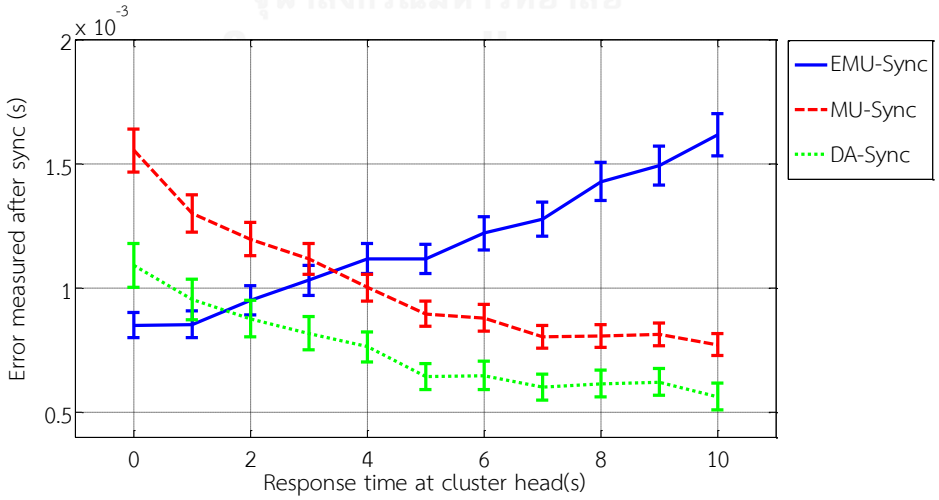
4.2.5 ศึกษาผลกระทบจากเวลารอคอยที่ยาวนานขึ้น

ในหัวข้อนี้ศึกษาผลกระทบจากระยะเวลาตอบสนองของโนดเซนเซอร์ที่ยาวนาน ซึ่งระยะเวลาตอบสนองของโนดเซนเซอร์นี้เกิดจากการที่โนดเซนเซอร์ไม่สามารถส่งข้อความกลับไปได้ทันทีที่โนดเซนเซอร์ได้รับข้อความ โดยเกิดได้จากเวลาที่ฮาร์ดแวร์ใช้ในการเปลี่ยนจากตัวรับเป็นตัวส่งหรือการเว้นระยะเวลาในการส่งข้อความเพื่อหลบเลี่ยงปัญหาการชนกันของข้อมูล เมื่อระยะเวลาตอบสนองของโนดเซนเซอร์ (t_r) ยาวนานขึ้น มักส่งผลให้เวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบไม่เท่ากัน $(d_{1,1} \neq d_{2,1} \neq d_{1,2} \neq \cdots \neq d_{2,n})$ ยิ่งกว่านั้นถ้าระยะเวลาตอบสนองของโนดเซนเซอร์ยิ่งยาวนานขึ้นและโนดเซนเซอร์มีการเคลื่อนที่ที่เร็ว ส่งผลทำให้เวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบมีความแตกต่างกันมาก

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองของทั้งสามโพรโทคอลเมื่อกำหนดให้ระยะเวลาตอบสนองเริ่มต้นจาก 0 วินาที จนถึง 10 วินาที ซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้เมื่อทั้งโพรโทคอล EMU-Sync MU-Sync และ Da-Sync ได้รับผลกระทบจากระยะเวลาตอบสนองที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาตอบสนองที่ยาวนานทำให้การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายมีความผิดพลาดสูง เป็นเหตุให้ความแม่นยำในการประมาณค่า skew และ offset ต่ำ และหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันเสร็จแล้ว 100 วินาที ค่าความผิดพลาดทางเวลาของทั้งสามโพรโทคอลจึงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาตอบสนอง อย่างไรก็ตามทั้งสามโพรโทคอลมีขั้นตอนการทำงานที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องของการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายและการประมาณค่า skew และ offset ค่าความผิดพลาดทางเวลาจึงแตกต่างกันไปด้วย สำหรับทุกโพรโทคอลเมื่อกำหนดให้ระยะเวลาตอบสนองเป็นศูนย์หรือเมื่อโนดเซนเซอร์ส่งข้อความออกไปในทันทีที่ได้รับข้อความ ค่าความผิดพลาดทางเวลามีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่าความผิดพลาดของ

การประมาณค่าเวลาประวิงกระแพร่กระจายมีค่าน้อย และช่วงระยะเวลาตอบสนองตั้งแต่ 1วินาที จนถึง 10 วินาที ความผิดพลาดทางเวลามีแนวโน้มเพิ่มในลักษณะคงที่ หากพิจารณาโพรโทคอลแต่ละอันจะเห็นได้ชัดว่าโพรโทคอล MU-Sync มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด เพราะความผิดพลาดในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายสูง โดยมีโพรโทคอล EMU-Sync มีประสิทธิภาพดีที่สุด เพราะสามารถลดความผิดพลาดจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ไม่ถูกต้องโดยใช้การประมาณค่า skew และ offset แบบทั้งสองมุมมอง

เพื่อให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแต่ละโพรโทคอลได้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพิ่มเติมคือกำหนดให้ระยะเวลาตอบสนองเพิ่มขึ้นเฉพาะทางฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่มเท่านั้น และกำหนดให้ระยะเวลาตอบสนองทางฝั่งโนดรอบข้างเท่ากับ 1 วินาที เพื่อทำการวิเคราะห์ผลระทบจากระยะเวลารอคอยที่เพิ่มขึ้นทางฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่ม เนื่องจากโพรโทคอล MU-Sync และ DA-Sync ใช้วิธีการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละรอบเริ่มต้นจากโนดหัวหน้ากลุ่มส่งข้อความไปยังโนดรอบข้างและโนดรอบข้างส่งข้อความกลับมายังโนดหัวหน้ากลุ่ม ซึ่งในแต่ละรอบของการคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจาย ระยะเวลารอคอยที่นานขึ้นทางฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่มไม่ส่งผลต่อการคำนวณหาเวลาประวิงการแพร่กระจายของโพรโทคอล MU-Sync และส่งผลต่อโพรโทคอล DA-Sync เล็กน้อยเท่านั้น (เนื่องจากโพรโทคอล DA-Sync มีการคำนวณหาความเร่ง ดังนั้นเมื่อระยะเวลารอคอยเพิ่มขึ้นโอกาสผิดพลาดจึงเป็นไปได้สูง) แตกต่างจากโพรโทคอล EMU-Sync ที่ใช้วิธีการคำนวณค่า skew และ offset จากทั้งสองมุมมอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายในแต่ละมุมมอง ซึ่งระยะเวลารอคอยที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อการคำนวณของโพรโทคอล EMU-Sync



รูปที่ 4.6 ผลกระทบเมื่อระยะเวลารอคอยฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่มเพิ่มขึ้น

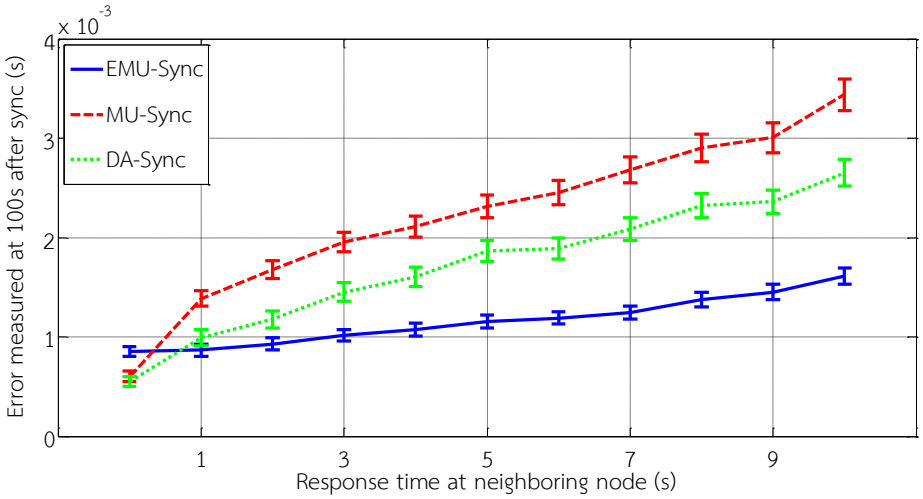
จากรูปที่ 4.6 พบว่าโพรโทคอล MU-Sync และ DA-Sync มีแนวโน้มความผิดพลาดทางเวลาไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าความผิดพลาดทางเวลาลดลงเมื่อระยะเวลาตอบสนองเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาตอบสนองของโนดหัวหน้ากลุ่มที่ยาวนานขึ้นส่งผลให้โพรโทคอลทั้งสองมีความ-แม่นยำขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการที่ 3.2

$$\hat{\hat{a}}_n = \frac{a_n\left(n\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}^2 - \sum_{i=1}^{n} t_{1,i}\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}\right)}{n\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}\right)^2} + \frac{n\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}\left(a_n d_{1,i} - \hat{d}_{1,i}\right) - \sum_{i=1}^{n} t_{1,i}\sum_{i=1}^{n}\left(a_n d_{1,i} - \hat{d}_{1,i}\right)}{n\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}\right)^2}$$

จากสมการที่ 3.2 ถ้าให้ระยะเวลาตอบสนองของโนดหัวหน้ากลุ่มเพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่า $n\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}\right)^2$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อตัวส่วนของสมการเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดลดน้อยลง สำหรับตัวเศษของสมการนั้นยังคงมีค่าเท่าเดิมเนื่องจากกำหนดให้ระยะเวลาตอบสนองของโนดรอบข้างมีค่าคงที่ (ระยะเวลารอคอยเป็น 1 วินาที) สำหรับโพรโทคอลของ DA-Sync มีความแม่นยำในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายมากกว่าโพรโทคอล MU-Sync จึงทำให้ค่าความผิดพลาดทางเวลาของโพรโทคอล DA-Sync มีความผิดพลาดน้อยกว่าโพรโทคอล MU-Sync

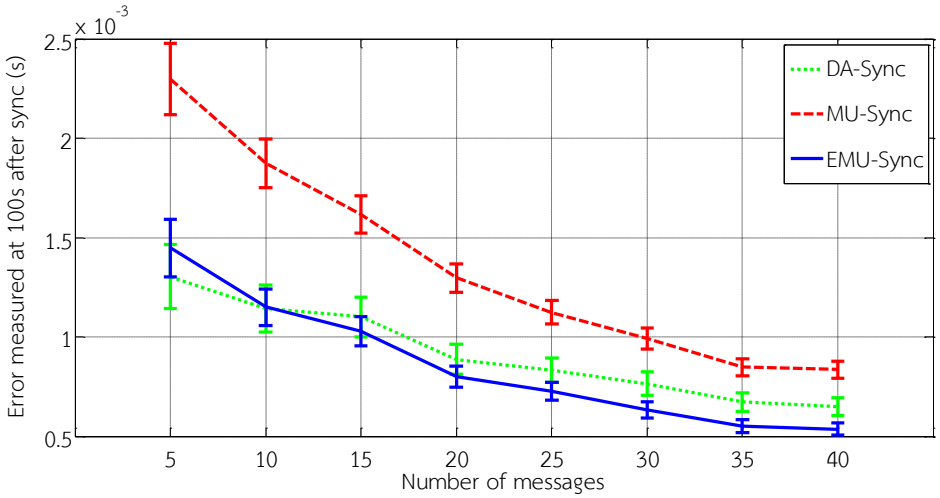
โพรโทคอล EMU-Sync มีการประมาณค่า skew และ offset จากทั้งมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้าง แม้ว่าความแม่นยำในการประมาณค่า skew และ offset ในมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่มจะมีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อให้ระยะเวลาตอบสนองของโนดหัวหน้ากลุ่มมีระยะเวลานานขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในมุมมองของโนดรอบข้างค่าความผิดพลาดในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาตอบสนองที่นานขึ้นเช่นกัน เมื่อนำมาเฉลี่ยแล้วค่าความผิดพลาดทางเวลาจึงเพิ่มขึ้น

ในทางกลับกันเมื่อให้ระยะเวลาตอบสนองของโนดรอบข้างเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาตอบสนองของโนดหัวหน้ากลุ่มเท่ากับ 1 วินาที ทั้งโพรโทคอล MU-Sync และโพรโทคอล DA-Sync ต่างคำนวณในมุมมองของโนดหัวหน้ากลุ่ม ดังนั้นค่าความผิดพลาดของเวลาประวิงการแพร่กระจายจึงผิดพลาดสูงขึ้นอยู่ตามระยะเวลาตอบสนองของโนดรอบข้าง โดยเวลาที่ผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกันผ่านไป 100 วินาทีแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลกระทบเมื่อระยะเวลารอคอยฝั่งโนดรอบข้างเพิ่มขึ้น

เมื่อให้ระยะเวลาตอบสนองทางฝั่งโนดรอบข้างเพิ่มขึ้น ผลที่ได้เป็นดังคาด โดยทั้งสามโพรโทคอลต่างมีความผิดพลาดทางเวลาเพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาที่ระยะเวลาตอบสนองของโนดรอบข้างเป็นศูนย์ ทั้งโพรโทคอล MU-Sync และโพรโทคอล DA-Sync ต่างมีประสิทธิภาพดีกว่าโพรโทคอล EMU-Sync เนื่องจากคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายได้ใกล้เคียงกับเวลาประวิงการแพร่กระจายที่แท้จริง แต่เมื่อระยะเวลาตอบสนองของโนดรอบข้างเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดในการคำนวณเวลาประวิงกระแพร่กระจายจึงสูงขึ้น ส่งผลให้ความแม่นยำในการประมาณ skew และ offset ลดลง เมื่อเทียบกับโพรโทคอล EMU-Sync เห็นได้ว่าช่วงระยะเวลาตอบสนองของโนดรอบข้างตั้งแต่ 1 วินาทีจนถึง 10 วินาที ค่าความผิดพลาดทางเวลาของโพรโทคอล EMU-Sync มีค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่าโพรโทคอล MU-Sync และโพรโทคอล DA-Sync



รูปที่ 4.8 ผลของการเพิ่มจำนวนการการแลกเปลี่ยนข่าวสาร

4.2.6 ศึกษาผลของการเพิ่มจำนวนข้อความในการแลกเปลี่ยนข่าวสาร

ในหัวข้อนี้ศึกษาผลจากการเพิ่มจำนวนข้อความในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร เนื่องจากทั้งสามโพรโทคอล EMU-Sync, MU-Sync และ DA-Sync ใช้สมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อประมาณค่า skew และ offset ดังนั้นเมื่อมีข้อมูลสำหรับการคำนวณในสมการถดถอยเชิงเส้นจำนวนมาก ความแม่นยำในการประมาณค่า skew และ offset ย่อมเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 เมื่อเพิ่มจำนวนข้อความในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร เวลาที่วัดได้หลังจากปรับเวลาให้ตรงกันมีความคลาดเคลื่อนของเวลาจากโนดทั้งสองจะน้อยลง ดังนั้นประสิทธิภาพของการปรับเวลาให้ตรงกันมีความแม่นยำตามจำนวนข้อความที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มจำนวนข้อความในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสารตั้งแต่ 5 ถึง 40 ข้อความ จะเห็นได้ว่าถ้าจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารน้อย เช่น มีการแลกเปลี่ยนข่าวสาร 5 ครั้ง ค่าความผิดพลาดจะสูงที่สุดและจะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร เมื่อช่วงการแลกเปลี่ยนข่าวสารมีจำนวนเท่ากับ 5 ถึง 20 ลักษณะแนวโน้มของความผิดพลาดจะลดลงในอัตราที่มากกว่าช่วงการแลกเปลี่ยนข่าวสารที่ 25 ถึง 40 เนื่องจากข้อมูลที่มากขึ้นความแม่นยำในการหาค่า skew และ offset ยิ่งสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวที่เท่ากัน โพรโทคอล MU-Sync ยังคงมีความผิดพลาดมากที่สุด เนื่องจากความผิดพลาดในการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายสูง สำหรับโพรโทคอล EMU-Sync และ DA-Sync เมื่อจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารเป็น 5 ข้อความ โพรโทคอล EMU-Sync มีค่าความผิดพลาดมากกว่าโพรโทคอล DA-Sync เนื่องจากข้อมูลในการประมาณค่า skew และ offset น้อย อีกทั้งโพรโทคอล EMU-Sync ใช้วิธีคำนวณเวลาการประวิงการแพร่กระจายจากครึ่งหนึ่งของเวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนข่าวสารหนึ่งรอบ ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงกว่าการคำนวณเวลาเวลาประวิง

การแพร่กระจายของโพรโทคอล DA-Sync ที่ใช้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโนดเซนเซอร์ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ผลกระทบที่เกิดจากการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ผิดพลาดสามารถลดลงได้โดยการประมาณค่าเฉลี่ยของ skew และ offset จากทั้งสองมุมมอง และเนื่องจากโพรโทคอล EMU-Sync ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหาของโพรโทคอล MU-Sync จึงทำให้มีความแม่นยำที่มากกว่าโพรโทคอล MU-Sync แต่เมื่อเพิ่มจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร อัตราการลดลงของความผิดพลาดเริ่มน้อยลงจนถึงช่วงจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารในช่วงตั้งแต่ 35 ข้อความถึง 40 ข้อความที่ค่าความผิดพลาดแทบไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับผลการศึกษาการเพิ่มจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารสรุปได้ว่า ความแม่นยำในการปรับเวลาให้ตรงกันขึ้นอยู่กับจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ยิ่งจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารมีจำนวนมากความแม่นยำย่อมสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจำนวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารที่เพิ่มขึ้นจำเป็นต้องใช้พลังงานมากขึ้นไปด้วย ซึ่งพลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการออกแบบระบบ อีกทั้งพลังงานของเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำมีจำกัด ดังนั้นการออกแบบที่ดีควรเน้นไปที่ประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วย ซึ่งการศึกษาเรื่องประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ในหัวข้อ 4.2.7

4.2.7 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ดังหัวข้อที่ 4.2.6 ได้กล่าวถึงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณโดยการเพิ่มจำนวณการแลกเปลี่ยนข่าวสารของทั้งโพรโทคอล EMU-Sync MU-Sync และ DA-Sync แต่ไม่ว่าทั้งการติดต่อสื่อสารและการคำนวณยังคงจำเป็นต้องใช้พลังงานในการปฏิบัติงาน อีกทั้งพลังงานที่ถูกใช้ในการติดต่อสื่อสารใต้น้ำนั้นมากกว่าขั้นตอนการคำนวณหลายเท่า [19] ดังนั้นการออกแบบโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันในใต้น้ำโดยการเพิ่มจำนวนของข้อความในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข่าวสารเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการคำนวณอย่างไม่จำเป็น ถือเป็นการใช้พลังงานอย่างไร้ประสิทธิภาพ ดังนั้นการออกแบบโพรโทคอลที่ดีควรต้องหาจุดที่เหมาะสมระหว่างความแม่นยำและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

เมื่อเวลาของโนดเซนเซอร์แต่ละตัวเดินไม่ตรงกัน โนดเซนเซอร์จำเป็นต้องมีการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง ความต้องการเวลาที่ตรงกันในแต่ละโปรแกรมประยุกต์อาจแตกต่างกันออกไป เช่น บางโปรแกรมประยุกต์อาจต้องการเวลาที่ตรงกันระหว่างโนดเซนเซอร์ที่เที่ยงตรงสูง โดยยอมรับค่าความผิดพลาดทางเวลาได้ไม่เกิน 1 มิลลิวินาที เมื่อเวลาของโนดเซนเซอร์มีความผิดพลาดเกิน 1 มิลลิวินาที โนดเซนเซอร์เหล่านั้นจะเริ่มทำการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง เป็นต้น จากตัวอย่างที่ได้ยกขึ้นมา หมายความว่าโพรโทคอลใดที่มีความแม่นยำในการปรับเวลาให้ตรงกันสูง ระยะเวลาที่จะต้องปรับเวลาใหม่อีกครั้งก็ยาวนานกว่าโพรโทคอลที่มีความแม่นยำในการปรับเวลาให้ตรงกันต่ำ หรือในอีกมุมหนึ่งหากโพรโทคอลใดมีประสิทธิภาพมากกว่า จำนวนครั้งที่ต้องปรับเวลาให้ตรงกันใหม่

อีกครั้งย่อมน้อยกว่าโพรโทคอลที่ไม่มีประสิทธิภาพภายในระยะเวลาช่วงหนึ่ง ดังนั้นหากจำนวนครั้งในการปรับเวลามีน้อยครั้งเท่าไหร่ พลังงานที่ต้องใช้ในการปรับเวลาให้ตรงกันย่อมน้อยตามไปด้วย วิธีการคำนวณจำนวนครั้งของการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่ภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.2 [19]

$$\kappa = \frac{\vartheta}{\frac{\theta - e_b}{e_a}} \tag{4.2}$$

เมื่อ κ แทน จำนวนครั้งของการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง

ϑ แทน ระยะเวลาที่สนใจ

θ แทน ขีดแบ่งความผิดพลาดทางเวลาที่ยอมรับได้

e_a แทน ค่าประมาณความผิดพลาดของความสัมพันธ์ของ skew หลังจากที่ได้ทำการปรับเวลาให้ตรงกันเรียบร้อยแล้ว

e_b แทน ค่าประมาณความผิดพลาดของความสัมพันธ์ของ offset หลังจากที่ได้ทำการปรับเวลาให้ตรงกันเรียบร้อยแล้ว

ตัวอย่างวิธีการคำนวณจำนวนครั้งของการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง (κ) ในช่วงระยะเวลา (ϑ) โดยไม่ให้ค่าความผิดพลาดทางเวลาเกินขีดแบ่งความผิดพลาดทางเวลาที่ยอมรับได้ (θ)

กำหนดให้ ϑ เท่ากับ 10 วัน

θ เท่ากับ 0.05 วินาที

โดยความผิดพลาดค่าประมาณ skew (e_a) และ offset (e_b) โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล EMU-Sync เมื่อระยะเวลารอคอยเป็น 1 วินาที เป็นดังนี้

e_a เท่ากับ 0.0000062

e_b เท่ากับ 0.000158

$$\kappa = \frac{10 \times 24 \times 60 \times 60}{\frac{0.05 - 0.000158}{0.0000062}}$$

$$\kappa = 108$$

นั้นหมายความว่าโพรโทคอล EMU-Sync ต้องมีการปรับเวลาให้ตรงกันอีกครั้ง 108 ครั้ง ในช่วงระยะเวลา 10 วัน เพื่อไม่ให้ค่าความผิดพลาดเกินกว่า 0.05 วินาที ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนค่าขีดแบ่ง

ความผิดพลาดที่ยอมรับได้หรือเปลี่ยนโพรโทคอลที่ใช้ในการปรับเวลาให้ตรงกัน ทำให้จำนวนครั้งของการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง (κ) เปลี่ยนไปดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนครั้งของการปรับเวลาให้ตรงกันอีกครั้งภายในช่วงระยะเวลา 10 วัน

Protocol synchronization	Response time (t_r)	Error tolerance	Error of skew after Sync	Error of offset after Sync	(κ)
EMU-Sync	0	0.01	5 ppm	112 ppm	437
		0.05			87
	1	0.01	6.2 ppm	158 ppm	545
		0.05			108
MU-Sync	0	0.01	5.9 ppm	155 ppm	518
		0.05			103
	1	0.01	10 ppm	589 ppm	919
		0.05			175
DA-Sync	0	0.01	5.2 ppm	116 ppm	455
		0.05			91
	1	0.01	6.8 ppm	174 ppm	598
		0.05			118

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าหากใช้โพรโทคอลที่มีความแม่นยำต่ำ จำนวนครั้งที่ต้องปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้งภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งจะมีค่ามาก อีกทั้งระยะเวลารอคอยในการส่งข้อความที่นาน ส่งผลทำให้จำนวนครั้งที่ต้องปรับเวลาให้ตรงกันอีกครั้งยิ่งเพิ่มขึ้นไปอีก ทุก ๆ ครั้งที่มี

การปรับเวลาให้ตรงกันจะต้องใช้พลังงานทั้งส่วนของการติดต่อสื่อสารและการคำนวณ แต่พลังงานส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในขั้นตอนการปรับเวลาให้ตรงกันใต้น้ำนั้นคือพลังงานที่ถูกใช้ในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งแต่ละโพรโทคอลมีการออกแบบที่แตกต่างกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเอาวิธีคำนวณประวิทธิภาพการใช้พลังงานในส่วนของการติดต่อสื่อสารมากจาก [19] โดยคำนวณได้ตามสมการที่ (4.3)

$$\rho = \frac{\vartheta}{\kappa\varsigma\gamma} \tag{4.3}$$

เมื่อ ρ แทน ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ϑ แทน ระยะเวลาที่สนใจ

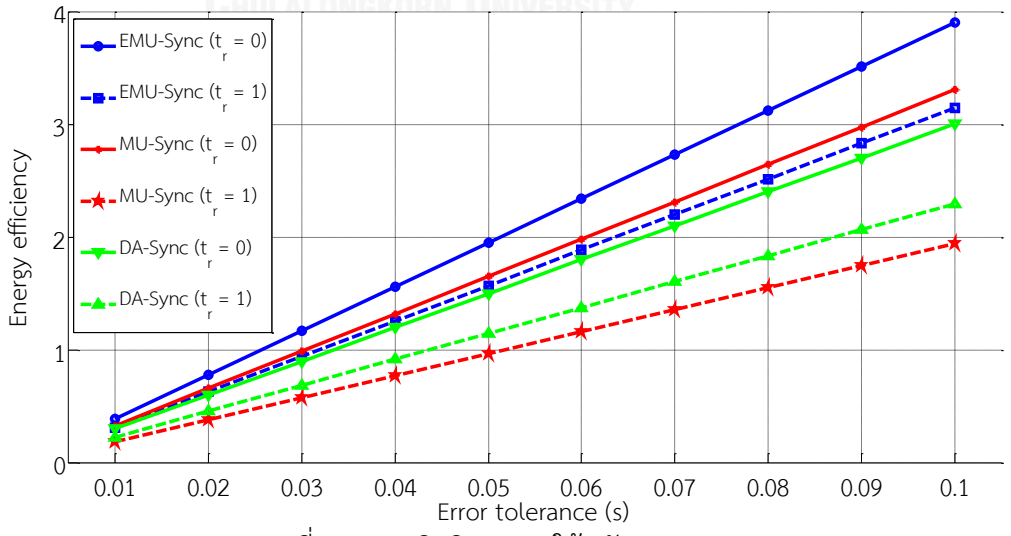
κ แทน จำนวนครั้งของการปรับเวลาให้ตรงกันใหม่อีกครั้งในระยะเวลา ϑ

ς แทน จำนวนของข้อความสำหรับขั้นตอนการปรับเวลาให้ตรงกัน

γ แทน ขนาดของแพ็กเก็ต

สำหรับขนาดของแพ็กเก็ตของโพรโทคอล EMU-Sync และโพรโทคอล MU-Sync ตั้งไว้ที่เท่ากับ 32 ไบต์ ส่วนโพรโทคอล DA-Sync ตั้งไว้ที่ 40 ไบต์ เนื่องจากโพรโทคอล DA-Sync จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของแพ็กเก็ตเพื่อคำนวณความเร็วสัมพันธ์ ในขณะที่พลังงานที่ถูกใช้สำหรับการคำนวณไม่ถูกนำมาพิจารณา เพราะว่าพลังงานที่ใช้ในการคำนวณมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.9 ประสิทธิของการใช้พลังงาน

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของทั้งสามโพรโทคอล เมื่อเพิ่มขีดแบ่งความผิดพลาดทางเวลาที่ยอมรับได้ (Error tolerance) ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของทั้งสามโพรโทคอลจะสูงขึ้นเนื่องจากจำนวนครั้งที่ต้องการปรับเวลาให้ตรงกันจะลดลง แต่หากเพิ่มระยะเวลาตอบสนอง (t_r) ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของทั้งสามโพรโทคอลก็จะน้อยลงด้วย เพราะทั้งสามโพรโทคอลต่างมีความผิดพลาดกันเพิ่มขึ้น

เมื่อให้ระยะเวลาตอบสนองเป็นศูนย์วินาที ความแม่นยำในการคำนวณความสัมพันธ์ของ skew และ offset ของโพรโทคอล DA-Sync มีความแม่นยำมากกว่าโพรโทคอล MU-Sync แต่โพรโทคอล DA-Sync จำเป็นต้องใช้ขนาดของข้อมูลต่อรอบในการแลกเปลี่ยนข่าวสารมากกว่าโพรโทคอล MU-Sync เนื่องจากโพรโทคอล DA-Sync ต้องส่ง cyclic prefix (CP) เพื่อใช้ในการคำนวณความเร็วสัมพัทธ์ เป็นเหตุทำให้โพรโทคอล DA-Sync ที่มีความแม่นยำมากกว่าโพรโทคอล MU-Sync แต่กลับมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่แย่กว่า แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาตอบสนองเป็นหนึ่งวินาที ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโพรโทคอล DA-Sync ดีกว่าโพรโทคอล MU-Sync เนื่องจากโพรโทคอล DA-Sync มีความแม่นยำสูงกว่ามาก สำหรับโพรโทคอล EMU-Sync มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานดีที่สุดในบรรดาทั้งสามโพรโทคอล ซึ่งเกิดจากโพรโทคอล EMU-Sync มีความแม่นยำสูงและใช้จำนวนบิตต่อการแลกเปลี่ยนข่าวสารที่น้อยกว่าโพรโทคอล DA-Sync และเท่ากันกับโพรโทคอล MU-Sync

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอโพรโทคอล EMU-Sync ซึ่งเป็นโพรโทคอลการปรับเวลาให้ตรงกันใต้น้ำสำหรับโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำที่พัฒนามาจากโพรโทคอล MU-Sync เพื่อปรับเวลาของโนดเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำให้ตรงกันภายในกลุ่มโครงข่าย โดยแบ่งประเภทของโนดเซนเซอร์ที่อยู่ภายในโครงข่ายออกเป็น 2 ประเภทคือ โนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้าง ซึ่งกำหนดให้โนดหัวหน้ากลุ่มประมาณค่า skew และ offset ของโนดรอบข้าง แต่ปัญหาหลักที่ทำให้การปรับเวลาให้ตรงกันเกิดความผิดพลาดคือเวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนานและการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ ส่งผลให้เกิดปัญหาความผิดพลาดในการประมาณค่า skew และ offset

ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยของ skew และ offset จากทั้งสองมุมมอง คือมุมมองทางฝั่งโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างแล้วนำค่าประมาณ skew และ offset มาหาค่าเฉลี่ยกัน ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหาของการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ที่เคลื่อนออกจากกันหรือเข้าหากัน ถึงแม้ว่าวิธีการประมาณค่า skew และ offset ด้วยวิธีนี้อาจมีผลเสียในบางสถานการณ์ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีความถูกต้องมากกว่าวิธีของโพรโทคอล MU-Sync ทำให้โพรโทคอล EMU-Sync มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความผิดพลาดทางเวลาน้อยและมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

จากการใช้คลื่นเสียงในการติดต่อสื่อสารทำให้เกิดปัญหายุ่งยากต่าง ๆ แต่สองเรื่องหลักที่สำคัญของการปรับเวลาให้ตรงกันที่ต้องพิจารณาคือ 1. เวลาประวิงการแพร่กระจายที่ยาวนานและการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ 2.พลังงานที่มีจำกัด ดังนั้นผลการทดลองในวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาผลกระทบจากสองเรื่องนี้เป็นหลักได้แก่

1. ความผิดพลาดหลังจากปรับเวลาให้ตรงกัน
2. ศึกษาผลกระทบจากความผิดพลาดของค่าของ skew
3. ศึกษาผลกระทบเมื่อความเร็วสูงสุดของโนดเซนเซอร์เพิ่มขึ้น
4. ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนทิศทางของโนดเซนเซอร์
5. ศึกษาผลกระทบจากเวลารอคอยที่ยาวนานขึ้น
6. ศึกษาผลของการเพิ่มจำนวนข้อความในการแลกเปลี่ยนข่าวสาร

7. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ซึ่งผลจากการศึกษาเหล่านี้ล้วนยืนยันว่าโพรโทคอล EMU-Sync นั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าทั้งโพรโทคอล MU-Sync และ DA-Sync ไม่ว่าจะในด้านของความแม่นยำและประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

5.2.1 พัฒนาโพรโทคอล EMU-Sync ไปใช้ในทางปฏิบัติ

ผลการทดลองนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ โดยนำเอาแนวคิดต่าง ๆ มาใช้เพื่อให้มีความสมจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามการจำลองนี้อาจผิดเพี้ยนไปจากผลการทดสอบในทางปฏิบัติได้ เนื่องจากข้อสมมติฐานต่าง ๆ เป็นการประมาณเท่านั้น อีกทั้งการเคลื่อนที่ของโนดเซนเซอร์ที่ไม่สามารถคาดเดาได้และการสูญเสียในระหว่างการสื่อสารใต้น้ำมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่าย ดังนั้นจึงควรนำโพรโทคอล EMU-Sync ไปทดสอบในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายใต้น้ำจริง

5.2.2 การคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจาย

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้คำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายจากครึ่งหนึ่งของช่วงเวลาการส่งข้อความไป-กลับ ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดสูง ดังนั้นการคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายให้แม่นยำขึ้นและใช้แนวคิดการประมาณค่าเฉลี่ย skew และ offset จากสองมุมมอง น่าจะส่งผลทำให้มีความแม่นยำในการประมาณ skew และ offset เพิ่มมากขึ้น

5.2.3 ผลกระทบจากจำนวนโนดเซนเซอร์ในโครงข่าย

โพรโทคอล EMU-Sync จะจับคู่ระหว่างโนดหัวหน้ากลุ่มและโนดรอบข้างทีละคู่ เมื่อปรับเวลาให้ตรงกันคู่แรกเสร็จแล้ว จึงจับคู่ใหม่โดยโนดหัวหน้ากลุ่มจะจับคู่กับโนดรอบข้างที่เหลือจนกระทั่งครบทุกคู่โนด ซึ่งหากจำนวนของโนดเซนเซอร์มีจำนวนมาก นั้นหมายความว่าระยะเวลาที่ต้องใช้จนกว่าที่โนดรอบข้างจะได้รับการปรับเวลาให้ตรงกันครบนั้นยิ่งนาน อาจส่งผลกระทบต่อการสื่อสารในช่วงระยะเวลาขณะนั้นได้

รายการอ้างอิง

1. J Heidemann, W.Y., J Wills, et al., *Research challenges and applications for underwater sensor networking.* IEEE Wireless Communication and Networking Conference, 2006: p. 228-235.
2. I.F.Akyildiz, D.P., and T.Melodia, *Underwater acoustic sensor network*: *Research challenges.* Elsevier's Journal of AdHoc network, 2005. 3: p. 257-279.
3. J.Heidemann, Y.L., A.Syed, J.Will, and W.Ye, *Research challenges and application for underwater sensor networking.* in Proc. Of the IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC), 2006.
4. J.-H.Cui, J.K., M.Gerla, and S.Zhou, *Challenges: Bulding Scalable mobile underwater wireless sensor network for aquatic applications.* IEEE Network, 2006. 20(Special Issue on Wireless Sensor Networking): p. 12-18.
5. I. Khalil, S.B., N. B. Shroff, *SLAM: Sleep-Wake Aware Local Monitoring in Sensor Networks* International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'07), 2007.
6. D.L.Mills, *Measured Performance of the Network Time Protocol in the internet System.* RFC-1128, 1989.
7. B. Hofmann-Wellenhof, H.L., and J. Collins., *Global Positioning System: Theory and Practice.* Text Book, Fifth edition, 2001.
8. Lasassmeh, S.M. and J.M. Conrad. *Time synchronization in wireless sensor networks: A survey*. in *IEEE SoutheastCon* 2010 (*SoutheastCon), Proceedings of the*. 2010.
9. Vanier, J.G., J.J.; Riley, W.J.; Walls, F.L.; Granveaud, M., *Aging, warm-up time and retrace: important characteristics of standard frequency generators.* Proceedings of the 1992 IEEE, 1992: p. 807-815.
10. S. P. BEERENS, H.R.a.J.T.F.Z., *An Analytical Study of Chaotic Stirring in Tidal Areas.* Netherlands Institute for Sea Research, 1994. 4: p. 1011-1029.
11. Novikov, A.C.B.a.A., *CHAOTIC BEHAVIOR AND POLLUTION DISPERSION CHARACTERISTICS IN ENGINEERED TIDAL EMBAYMENTS: A NUMERICAL*

INVESTIGATION. JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION, 2007. 43.

12. Cui, P.X.a.J.H., *SDRT: A Reliable Data Transport Protocol for Underwater Sensor Networks," Technical Report.* 2006.
13. A.Syed, a.J.H., *Time Synchronization for High Latency Acoustic Networks.* in Proc. IEEE Infocom, 2006.
14. J.Elson, L.G., and D.Estrin, *Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts.* in Proceedings of the Fifth Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI2002), 2002: p. 147-163.
15. S.Ganeriwal, R.K., and M.Srivasava, *Timeing-Sync Protocol for Sensor Networks.* in

Proc. 1st int. conf. on Embedded networked sensor systems, 2002.

16. N.Chirdchoo, W.-S.S., and K.C.Chua, *Mu-sync: A time synchronization protocol for underwater mobile networks.* in WuWNet'08, 2008.
17. Jun Liu; Zhong Zhou; Zheng Peng; Jun-Hong Cui; Zuba, M.F., L., *Mobi-Sync: Efficient Time Synchronization for Mobile Underwater Sensor Networks.* IEEE Transactions, 2013. 24: p. 406-416.
18. F.Lu, D.M., and C.Schurgers, *D-sync: Doppler-based time synchronization for mobile underwater sensor networks.* WuWNet'10, 2010.
19. Jun Liu, Z.W., Michael Zuba, Zheng Peng, Jun-Hong Cui, Shengli Zhou, *DA-Sync: A Doppler Assisted Time Synchronization Scheme for Mobile Underwater Sensor Networks.* IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, 2014.
20. S. F. Mason, C.R.B., S. Zhou, and P. Willett, *Detection, Synchronization, and Doppler Scale Estimation with Multicarrier Waveforms in Underwater Acoustic Communication.* IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 2008. 26.
21. Liu, Y.G.a.Y., *Time Synchronization for Mobile Underwater Sensor Networks.* JOURNAL OF NETWORKS, 2013. 8.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพลวัต วัลลภวิสุทธิ์ เกิดวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2530 ที่กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒในปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาในปี 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University