

การวิเคราะห์รูปแบบของคลื่นเสียงใต้น้ำด้วยเทคนิคการทำ FFT ร่วมกับ การประมวลผลแบบขนาน

Analysis of underwater sound pattern by FFT with parallel computing Technique

ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์¹ และสว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

² กลุ่มวิจัยเฉพาะทางวิศวกรรมอากาศยานและทะเล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

*ติดต่อ: sawangtits@kmutnb.ac.th, 02-587-0026 ต่อ 401

บทคัดย่อ

การระบุชนิด หรือประเภทของแหล่งกำเนิดเสียงใต้น้ำ นอกเหนือจากการใช้เทคนิคการตรวจจับด้วยโซนาร์ (SONAR) งานวิจัยนี้ได้นำไฮโดรโฟนเพื่อทำการบันทึกเสียงใต้น้ำ เพื่อเก็บตัวอย่าง จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคำนวณหา FFT และใช้ Spectrogram เพื่อแสดงช่วงความถี่ของเสียงและเวลาที่ได้รับเข้ามา ซึ่งแถบของกลุ่มความถี่ดังกล่าวจะมีรูปแบบเฉพาะตัวสำหรับแหล่งกำเนิดเสียงแต่ละแบบ ถ้านำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจะสามารถบอกได้ว่าแหล่งกำเนิดเสียงเป็นประเภทใด โดยในกระบวนการวิเคราะห์นี้ได้ใช้การประมวลผลแบบขนานในการคำนวณหา FFT เพื่อเพิ่มความเร็วในการประมวลผลจากเดิม โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้และจำนวนหน่วยประมวลผลที่ต้องใช้ในการคำนวณ ซึ่งเป็นปัจจัยในการออกแบบการประมวลผลให้รองรับการคำนวณที่อาจจะมีข้อมูลของเสียงมากกว่าหนึ่งจุดในอนาคต ซึ่งจะส่งผลต่อภาระในการคำนวณหา FFT ของหน่วยประมวลผลที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

คำหลัก: FFT, ไฮโดรโฟน, Spectrogram, Parallel Computing

Abstract

In the specifying types or categories of underwater sound, we are normally using detection by sonar system. This research has used the hydrophones to record the underwater sounds as samples. Then they has been analyzed by the FFT technique and displayed by spectrogram. Analyze data will be shown the primary frequency range with receiving time. The group of frequency can be used to identify the sound source types. If it is compared with data in databases, we can exactly specify the type of the source. In the analyzing process, we used the parallel processing technique with FFT to increase the computing performance. We also study the possibilities and the number of processors that has been required in the calculation. The number of processors is the important factor in the design process for sound calculation in the future. Which will affect the cpu load on the FFT calculation accordingly.

Keywords: FFT, Hydrophone, Spectrogram, Parallel Computing

AME-154

1. บทนำ

เสียงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกรูปแบบ เพราะแม้ว่าเราจำเป็นต้องใช้ประสาทสัมผัสในการรับเสียงเพื่อใช้ในการสื่อสารก็ตาม ในขณะที่เดียวกันเสียงที่อยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมทั้งขนาดความเข้มเสียงที่มากเกินไป หรือความถี่ที่ไม่เหมาะสมก็จะกลายเป็นสิ่งรบกวนต่อการดำรงชีวิต[1], [2] ไปจนถึงระดับที่กลายเป็นมลภาวะต่อการดำรงชีวิต และยิ่งไปกว่านั้นเสียงยังเป็นสื่อรูปแบบเดียวที่มีความสำคัญมากในการเป็นประสาทรับรู้ข้อมูลหรือเป็นช่องทางสื่อสารใต้น้ำ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำ แม่น้ำ หรือแม้แต่ในทะเลก็ตาม เนื่องจากประสาทรับรู้ในการมองเห็นใต้น้ำนั้นจะถูกลดระดับลงเป็นอย่างมาก และจะแย่ลงไปมากกว่านั้นเมื่อน้ำในบริเวณดังกล่าวมีตะกอนหรือสารแขวนลอยมาก ในขณะที่เสียงกลับให้การตอบสนองที่แตกต่างกัน เนื่องจากเสียงเดินทางในน้ำได้ดีกว่าในอากาศ ดังนั้นการใช้เสียงเป็นช่องทางการสื่อสารจึงเป็นวิธีหลักที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

สำหรับในแม่น้ำ หรือทะเลซึ่งมีเรือวิ่งผ่านเป็นจำนวนมาก เสียงใต้น้ำจึงอาจจะอยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสม และยังสามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ใต้น้ำในบริเวณดังกล่าวได้ นอกจากนี้แล้วถึงแม้ว่าจะไม่ใช่บริเวณที่มีการจราจรทางน้ำคับคั่ง แต่เสียงเครื่องยนต์เรือขนาดใหญ่ที่อยู่ระยะไกลก็ยังสามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ใต้น้ำได้อีกเช่นกัน โดยมีความพยายามที่จะศึกษาถึงระบบนิเวศน์ใต้ทะเลจากแหล่งที่มีการสำรวจและขุดเจาะน้ำมัน รวมถึงบริเวณชายฝั่ง พบว่าเสียงที่เกิดขึ้นล้วนส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ในบริเวณดังกล่าว [3], [4]

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองหาวิธีเก็บบันทึกเสียงใต้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีเรือโดยสารวิ่งผ่าน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบไฮโดรโฟน จากอุปกรณ์รับสัญญาณเสียงแบบต่าง ๆ และนำเสียงที่ได้มาวิเคราะห์รูปแบบ [5] โดยในการประมวลผลแบบขนานเพื่อ

ประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้คำนวณ [6] จากเงื่อนไขการคำนวณแบบต่าง ๆ กันต่อไป

2. ทฤษฎีและการทดลอง

2.1 ไฮโดรโฟน

การรับสัญญาณเสียงที่ส่งผ่านโดยมีน้ำเป็นสื่อกลางนั้น จำเป็นต้องใช้ไฮโดรโฟน ซึ่งเป็นเครื่องมือเฉพาะในการรับสัญญาณเสียงใต้น้ำ ซึ่งมีการออกแบบโดยการใช้เซ็นเซอร์รูปแบบต่าง ๆ ในการรับสัญญาณเสียง อย่างง่ายที่สุดคือการใช้เปียโซอิเล็กทริกเป็นเซ็นเซอร์ หรือการใช้ไฟเบอร์ออปติกเป็นตัวรับสัญญาณ โดยจะเปลี่ยนจากพลังงานในรูปของเสียงที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถนำมาประมวลผลต่อไปได้ ไฮโดรโฟนต้องรับสัญญาณได้ดีในช่วงความถี่ที่สนใจ โดยที่มีผลเข้าไปรบกวนต่อเสียงในพื้นที่ใต้น้ำ โดยการตอบสนองของสัญญาณจากไฮโดรโฟนให้ความสัมพันธ์ของแรงดันจากพลังงานเสียงในบริเวณดังกล่าวต่อแรงดันไฟฟ้าเป็นโวลต์ต่อปาสคาล[7]



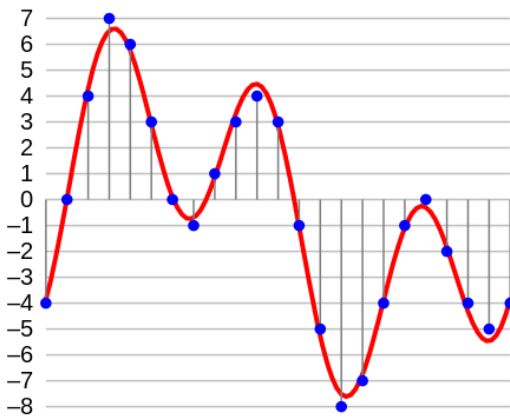
รูปที่ 1 ไฮโดรโฟน

2.2 การเปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นดิจิตอล

โดยปกติแล้ว สัญญาณเสียงที่ได้รับเข้ามานั้นจะอยู่ในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก ซึ่งเมื่อต้องการนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์หรือคำนวณโดยใช้การแปลงฟูรีเยร์ จะต้องมีการเปลี่ยนรูปแบบให้เป็นดิจิตอลที่มีการสุ่มข้อมูลจากสัญญาณอนาล็อกเสียก่อน โดยมีส่วนสำคัญคือ Sampling rate และ Resolution ซึ่ง Sampling rate เป็นเป็นอัตราการสุ่มอ่านค่าสัญญาณ

AME-154

เพื่อเก็บข้อมูล ณ เวลานั้นเช่น 96kHz จะแบ่งช่วงเวลา ในหนึ่งวินาทีเป็น 96000 ส่วนแล้วเก็บค่าแต่ละจุด ออกมา ส่วน Resolution คือการแบ่งค่าระดับสัญญาณ ตามขนาดของแอมพลิจูด ดังนั้นเมื่อมีการบันทึกข้อมูล ด้วย Sampling rate และ Sampling resolution สูงจะสามารถสร้างสัญญาณกลับมาได้ใกล้เคียงกับสัญญาณ ต้นแบบได้มากที่สุดตามที่แสดงในรูปที่ 2 แต่จะส่งผล ต่อปริมาณข้อมูลที่ใช้ และเวลาในการคำนวณที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยในงานวิจัยนี้ ได้มีการบันทึกเสียง ละเอียดที่สุดที่ 96kHz 24 bits โดยใช้รูปแบบ wav ที่ ไม่มีการบีบอัดข้อมูล



รูปที่ 2 การสุ่มสัญญาณเสียงเป็นข้อมูลดิจิทัล

2.3 FFT และการเขียนโปรแกรมเพื่อการคำนวณ แบบขนาน

จากสัญญาณ $x[n]$ ที่มีจำนวน n ของข้อมูลใน หนึ่งคาบสัญญาณ และคาบสัญญาณมีค่าเท่ากับ F ได้ว่าสัญญาณ

$$x[n] = \int_1 X(F) e^{j2\pi Fn} dF$$

ผลของการแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform, DFT) ได้สัมพันธ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ซึ่ง คำนวณได้จาก $x[n]$ ได้

$$X(F) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j2\pi Fn}$$

จากสัญญาณ $x[n]$ เมื่อทำการแปลงแล้วได้ สัญญาณในรูปของพลังงานที่มีขนาด $X(F)$ ด้วย วิธีการแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย

การคำนวณการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เนื่องจากการคำนวณเพื่อ ทำการแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วยต้องใช้ N^2 ครั้งของการ คูณและบวกจำนวนเชิงซ้อนทำให้การคำนวณมีการ เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของจำนวนของสัญญาณที่ต้องการ แปลงดังนั้นการคำนวณการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วจึง เป็นที่นิยมเนื่องจากใช้ระยะเวลาการคำนวณเท่ากับ สองยกกำลังขนาดของสัญญาณทำให้ลดเวลาการ คำนวณลง

2.4 ระบบประมวลผลแบบขนาน

จากปริมาณข้อมูลจำนวนมากที่ทำการเก็บบันทึก จากไฮโดรโฟนเพื่อให้การวิเคราะห์ทำได้เร็วขึ้นทาง ผู้วิจัยได้เลือกการนำเอาระบบประมวลผลแบบขนาน มาช่วยในการแบ่งงานของการทำ FFT

ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็น โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์และติดตั้งโปรแกรม สคริปเพื่อทำให้ MATLAB สามารถประมวลผลแบบ ขนานชื่อ MULTICORE พัฒนาโดย Dr.-Ing. Markus Buehren หลักการทำงานของโปรแกรมสคริป กำหนดให้มีตัวประมวลผลหลัก (Master) หนึ่งตัวทำ หน้าที่เตรียมและตัดแบ่งข้อมูลและคำสั่งให้เป็น ชุดคำสั่งแล้วสร้างเป็นแฟ้มข้อมูลเพื่อส่งต่อให้แก่ตัว ประมวลผลย่อย (Slave) นำไปทำการคำนวณโดยเมื่อ มีตัวประมวลผลย่อยหลายตัวทำให้เกิดการคำนวณ แบบขนานไปพร้อมกัน สำหรับตัวประมวลผลย่อยทำ การตั้งค่าตำแหน่งชั้นของแฟ้มข้อมูลร่วมกันเพื่อการ เข้าใช้ไฟล์ร่วมกันของคำสั่งจากตัวประมวลผลหลัก และตัวประมวลผลย่อยบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์ สำหรับแต่ละตัวประมวลผลย่อยต้องทำการเปิด โปรแกรม MATLAB ที่มี MULTICORE เปิดขึ้นพร้อม กัน

3 การออกแบบ และการทดลอง

ในการทดลองได้มีการออกแบบไฮโดรโฟนอย่าง ง่าย โดยพัฒนาขึ้นมาจากเซ็นเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก ที่สามารถหาได้โดยทั่วไป และมีราคาไม่แพง จากนั้นติดตั้งเอาไว้ในกรอบอคริลิกขนาดเล็กเพื่อ ป้องกันไม่ให้สัมผัสกับน้ำ และส่งผลให้อุปกรณ์เกิด

AME-154

ความเสียหาย โดยที่ช่องว่างภายในได้เติมน้ำมัน mineral oil เข้าไปจนเต็มเพื่อไล่อากาศออก เพื่อลดปัญหาการสะท้อนของเสียงออกจากเซ็นเซอร์ เนื่องจากความหนาแน่นของตัวกลางระหว่างอากาศ และน้ำที่แตกต่างกันมากเกินไป[8]



รูปที่ 3 ไฮโดรโฟนอย่างง่ายที่มีการพัฒนาขึ้น

ในการเก็บตัวอย่างเสียง มีการดำเนินการในเบื้องต้น โดยใช้การ์ดเสียงสำหรับคอมพิวเตอร์ บันทึกผลโดยใช้ความละเอียดสูงสุดที่ 96kHz 24bits แล้วบันทึกเก็บเป็นไฟล์ตัวอย่างเอาไว้ก่อนจะส่งไปประมวลผลด้วย MATLAB โดยสร้างสัญญาณจำลองขึ้นมาในเวลาที่กำหนด จากนั้นจึงปล่อยให้เซ็นเซอร์รับสัญญาณ โดยใช้สถานที่ทดสอบในสระว่ายน้ำของกองเรือยุทธการ ฐานทัพเรือสัตหีบเพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมในการเก็บข้อมูล และมีการทดสอบบันทึกเสียงเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณหน้าศาลว่าการจังหวัดนนทบุรี เพื่อนำข้อมูลมาประเมินความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ในแบบเวลาจริง



รูปที่ 4 การติดตั้งไฮโดรโฟนเพื่อทดสอบในสระว่ายน้ำ

ในส่วนของโปรแกรมสคริปสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณด้วย FFT มีหลักการออกแบบโปรแกรมดังนี้

1. ตัวประมวลผลหลัก (Master) เตรียมค่าตั้งค่าเป็นพารามิเตอร์สำหรับส่งไปตัวประมวลผลย่อย
2. ตัวประมวลผลหลักเตรียมข้อมูลสำหรับการคำนวณแบ่งข้อมูลเสียงจำนวน 4096 ข้อมูลต่อชุด จำนวน 30 ชุด สำหรับเตรียมส่งเพื่อการคำนวณของตัวประมวลผลย่อย
3. ตัวประมวลผลหลักส่งคำสั่ง FFT และข้อมูลเสียงจำนวน 30 ชุด สำหรับการคำนวณสร้างเป็นแฟ้มข้อมูล
4. ตัวประมวลผลย่อย (Slave) แต่ละตัวดึงแฟ้มข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณ
5. ตัวประมวลผลย่อยคำนวณเสร็จส่งผลเป็นแฟ้มข้อมูลกลับ
6. ตัวประมวลผลหลักรวบรวมข้อมูลทั้ง 30 ชุด สร้างเป็นแฟ้มข้อมูลสำหรับการประมวลต่อไป

หลังจากได้ผลการคำนวณซึ่งเป็นแฟ้มข้อมูลของแต่ละชุดการคำนวณ เมื่อต้องการประมวลผลเพื่อแสดงผลในรูปของกราฟมีขั้นตอนการดังนี้

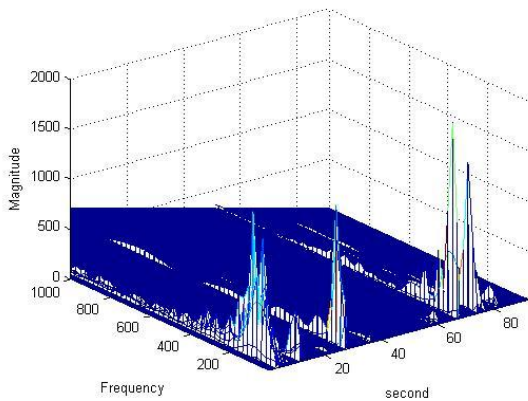
1. กำหนดจำนวนแฟ้มข้อมูลที่ได้หลังจากการประมวลผล เพื่อดึงข้อมูลเข้าโปรแกรม MATLAB
2. ทำการต่อข้อมูลแต่ละชุด เพื่อเตรียมข้อมูล
3. นำข้อมูลสร้างรูปของผลจากการคำนวณ

4. ผลการทดลอง

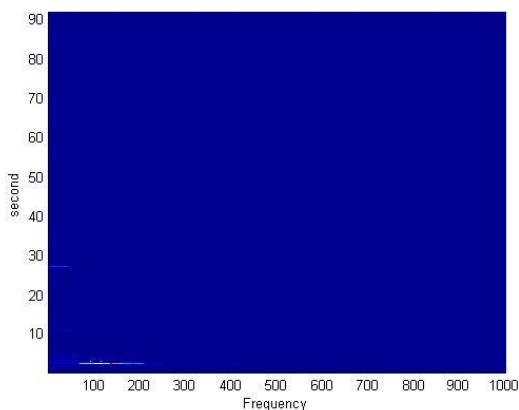
4.1 ข้อมูลที่ทำการเก็บเพื่อวิเคราะห์

จากผลการคำนวณ FFT จำนวน 4096 จุด โดยทำการคำนวณแบบขนาน และแสดงผลจากข้อมูลของเสียงใต้น้ำในช่วงระยะเวลา 90 วินาทีได้ตามรูปที่ 5 และรูปที่ 6

AME-154

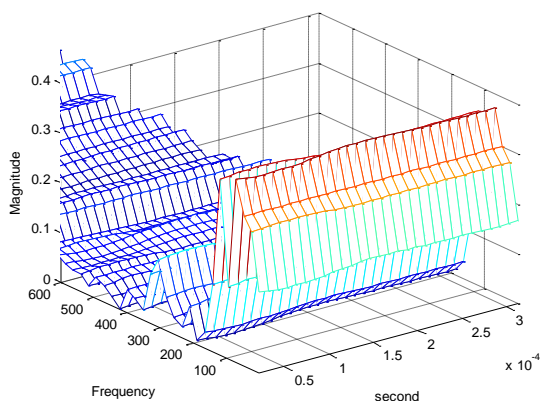


รูป 5 แสดงผลการคำนวณ FFT ของเสียง

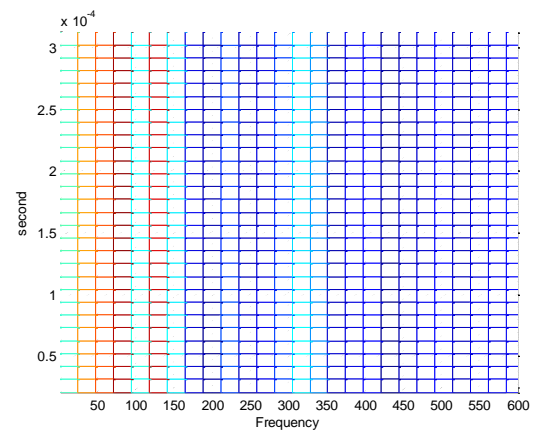


รูป 6 สเปกโตรแกรมของเสียง

เนื่องจากปริมาณข้อมูลมีจำนวนมากในการแสดงในภาพรวมอาจไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากข้อจำกัดของหน่วยความจำเพื่อเก็บข้อมูลและช่วงของข้อมูลที่ดึงมาเพื่อแสดงผล ก่อนประมวลผลเป็นกราฟ ดังนั้นในการดูการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสามารถดึงข้อมูลเพื่อแสดงผลในช่วงสั้นๆ เพื่อให้เห็นความถี่และการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลานั้นได้ตามรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูป 7 FFT ของเสียงช่วง 0.00005-0.0003 วินาที



รูป 8 สเปกโตรแกรมช่วง 0.00005-0.0003 วินาที

4.2 ผลการคำนวณ

ในขณะที่ให้โปรแกรมสคริปต์ทำการคำนวณได้ทำการจับเวลาในแต่ละชุดของข้อมูล โดยกำหนดให้คำนวณ 30 ชุดข้อมูลของสัญญาณเสียงในแต่ละรอบการคำนวณ เพื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนหน่วยประมวลผลหลักและหน่วยประมวลผลย่อยกับระยะเวลาในการคำนวณในแต่ละรอบ ได้ผลตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงระยะเวลาในการคำนวณ

จำนวนโปรแกรมประมวลผล	ระยะเวลา
Master	16.75 s
Master + 1 Slave	12.06 s
Master + 2 Slave	9.58 s
Master + 3 Slave	7.14 s

ระบบที่คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสร้างเป็นเครือข่ายในการคำนวณแบบขนานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลหลักเป็น Intel Core i5 2.4GHz Ram 4 GB จำนวน 1 เครื่อง และคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลหลักเป็น Intel Core2Duo 2.2GHz Ram 4 GB จำนวน 1 เครื่อง

4.3 วิจัยรณผลการทดลอง

จากระบบคอมพิวเตอร์และโปรแกรมสคริปต์ของ MATLAB ที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการวิเคราะห์เสียงที่มีปริมาณข้อมูลและความละเอียดดังกล่าวได้

AME-154

อีกทั้งข้อดีของการพัฒนาโปรแกรมดังกล่าวสามารถที่จะเพิ่มคอมพิวเตอร์เข้าช่วยประมวลผลได้โดยติดตั้งโปรแกรมให้ทำงานเป็นตัวประมวลผลย่อยและสามารถหยุดการประมวลผลได้หากมีความจำเป็นต้องใช้ทำงานอื่น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อทำให้โปรแกรมที่กำลังคำนวณต้องหยุดลง ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำการวิเคราะห์ปัญหาที่ต้องใช้ปริมาณข้อมูลจำนวนมากดังกล่าวได้

จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FFT ผู้วิจัยต้องการศึกษาต่อไปถึงความเหมาะสมในการเลือกช่วงความถี่ที่เป็นตัวแทนของเครื่องยนต์เรือ การสร้างคลื่นของเรือในแต่ละแบบ จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นพบว่า เรือเร็ว (speed boat) สามารถตรวจจับสัญญาณเสียงได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเรือบรรทุกทราย หรือเรือโดยสาร ดังนั้นนอกเหนือจากกลุ่มของเรือที่สนใจ ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกเสียงเพื่อให้ได้เสียงของเรือ เสียงของคลื่นในแม่น้ำ รวมถึงระบบที่ทำการบันทึกเสียงที่เหมาะสม จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อออกแบบระบบบันทึกเสียงที่มีประสิทธิภาพต่อไป

5. สรุปผลการวิจัย

จากการเตรียมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อเข้าเป็นเครือข่ายเพื่อการคำนวณแบบขนานสามารถทำให้ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่มีปริมาณมากได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง แต่อย่างไรก็ตามหากมีการติดตั้งเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงย่อมส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลงได้ตามลำดับเช่นกัน ดังนั้นการวิเคราะห์เสียงใต้น้ำที่มีปริมาณข้อมูลจำนวนมากและข้อมูลมีความละเอียดสูงสามารถทำการวิเคราะห์และวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์และลักษณะของสัญญาณเสียงเฉพาะที่เกิดขึ้นใต้น้ำได้ต่อไปในอนาคต

ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้แสดงผลการวิเคราะห์ในเชิงของสัญญาณเสียงที่ได้ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองเรือดำน้ำ กองเรือยุทธการ ฐานทัพเรือสัตหีบ สำหรับความช่วยเหลือทางด้านข้อมูลสถานที่ และเจ้าหน้าที่ในการดำเนินการทดสอบ

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Bittencourt, R. R. Carvalho, J. Lailson-Brito, and A. F. Azevedo, "Underwater noise pollution in a coastal tropical environment.," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 83, no. 1, pp. 331–336, May 2014.
- [2] A. Tsouvalas and A. V. Metrikine, "A three-dimensional vibroacoustic model for the prediction of underwater noise from offshore pile driving," *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 8, pp. 2283–2311, Apr. 2014.
- [3] P. Consoli, T. Romeo, M. Ferraro, G. Sarà, and F. Andaloro, "Factors affecting fish assemblages associated with gas platforms in the Mediterranean Sea," *J. Sea Res.*, vol. 77, pp. 45–52, Mar. 2013.
- [4] H. Slabbekoorn, N. Bouton, I. van Opzeeland, A. Coers, C. ten Cate, and A. N. Popper, "A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish.," *Trends Ecol. Evol.*, vol. 25, no. 7, pp. 419–27, Jul. 2010.
- [5] L. Freitag and J. Catipovic, "A Signal Processing. System for Underwater Acoustic ROV Communication," *Proc. 6th Int. Symp. Unmanned Untethered Submers. Technol.*, pp. 34–41, 1989.

AME-154

- [6] N. Ahmed, W. Bin Abbas, and A. a. Syed, "A low-cost and flexible underwater platform to promote experiments in UWSN research," *Proc. Seventh ACM Int. Conf. Underw. Networks Syst. - WUWNet '12*, p. 1, 2012.
- [7] J.-P. Marage and Y. Mori, *Sonar and Underwater Acoustics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [8] E. V. Glushkov, N. V. Glushkova, and O. a. Godin, "The effect of anomalous transparency of the water-air interface for a volumetric sound source," *Acoust. Phys.*, vol. 59, no. 1, pp. 6–15, Jan. 2013.