

การสร้างการเข้ารหัสคอนโวลูชันสำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นใต้น้ำ โดยใช้เอฟพีจีเอ

FPGA Implementation of Convolutional Code for Underwater Visible Light Communication Systems

กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี^{1,*} อัมพวรรณ ยินดีมาก² เอกพล ชันสาลี¹ และ กุริพงษ์ สุทธิโสภณพันธ์³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น เมือง เมือง ขอนแก่น 40000

² สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น เมือง เมือง ขอนแก่น 40000

³ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมือง เมือง ขอนแก่น 40000
Kidsanapong Punsri^{1,*}, Ampawan Yindeemak², Ekkaphong Kansaree¹ and Puripong Suttisopapan³

¹ Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang, Muang, Khonkhaen, 40000, Thailand

² Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang, Muang, Khonkhaen, 40000, Thailand

³ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Muang,
Khonkhaen 40000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: kidsanapong.pu@rmuti.ac.th

Received: Feb 11, 2022; Revised: Apr 26, 2022; Accepted: May 11, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและทดลองระบบการเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolutional code) เพื่อแก้ไขบิดผิดผลาดโดยใช้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) สำหรับการสื่อสารเชิงแสงที่มองเห็นใต้น้ำ (Underwater visible light communication: UVLC) โดยใช้อัลกอริทึมวิเทอบี (Viterbi algorithm) สำหรับการถอดรหัสเพื่อแก้ไขบิดผิดผลาด ส่วนของเครื่องส่งถูกวางใต้น้ำโดยใช้ค่าอุณหภูมิในน้ำ และค่าพีเอช (pH) เป็นตัวอย่งในการศึกษาการรับส่งข้อมูลเชิงแสงใต้น้ำไร้สายโดยใช้แอลอีดี (Light emitting diode: LED) ที่กำลังงาน 10W และอัตราบอด (Baud rate) สูงสุดเท่ากับ 9,600 b/s (baud per second) ส่วนที่เครื่องรับก็จะใช้วาเลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiodes: APD) ที่มีแถบสัญญาณเท่ากับ 25 MHz สำหรับการแปลงสัญญาณเชิงแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า APD จะถูกใช้ตัวรับแสงพร้อมกันที่เครื่องรับทั้งหมด 4 ตัวและสัญญาณจาก APD จะถูกนำไปขยายด้วยออปแอมป์เบอร์ OPA2380 เพื่อให้ได้แรงดันไม่ต่ำกว่า 3.3V เนื่องจากเป็นแรงดันที่ ESP8266 WiFi ทำงานได้ ถ้าับสุดท้าย ข้อมูลค่าอุณหภูมิและพีเอชที่ตรวจรู้ได้นี้จะถูกส่งไปยังเครื่องแม่ข่ายคลาวด์ NETPIE และแสดงผลบนเว็บไซต์ เพื่อยืนยันการทำงานของระบบผลการทดลองที่ทำการบันทึกและแสดงผลต่อเนื่อง 240 นาที ที่ระยะทาง 1.5 m โดยมีอัตราบิดผิดผลาดเท่ากับ 1.4×10^{-3} จากผลการทดลองพบว่าการเข้ารหัสคอนโวลูชันสามารถแก้ไขบิดผิดผลาดได้ และระบบสามารถทำงานได้ดีแสดงค่าที่ตรวจรู้ได้ตลอด การทดลองนี้เป็นการทดลองบนเวลาจริง (Real Time)

คำสำคัญ: การสื่อสารใต้น้ำ, การสื่อสารเชิงแสงที่มองเห็นได้สำหรับการส่งข้อมูลค่า pH และ อุณหภูมิ, การเข้ารหัสคอนโวลูชันด้วยไฟ, อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

Abstract

In this work, the error-correcting code, namely convolutional code, is developed and implemented using field-programmable gate array (FPGA) is proposed for underwater visible light communication (UVLC). The Viterbi decoding using the trellis diagram is used. The transmitter is located underwater with 10w LED and the baud rate is 9,600 b/s, which is compatible with the UART communication protocol. Four avalanche photodiodes with a bandwidth of 25 MHz is used to convert the light signal to an electrical signal at the receiver. Additionally, the output signal from the APDs is amplified by using OPA2380. The input voltage target is 3.3v, which is suitable for the ESP8266. Additionally, the measured data send to NETPIE for presented on the website in the following. To verify the system performance, the measurement data is recorded for 240 minutes with a communication distance of 1.45m. The bit error rate is 1.4×10^{-3} ; therefore, the system can correct the error and show it on NETPIE correctly. The data is measured in real-time.

Keywords: underwater communication, visible light communication for sending pH and temperature values, convolutional code using field programmable gate array

1. บทนำ

ในการเลี้ยงสัตว์น้ำเศรษฐกิจ คุณภาพและสิ่งแวดล้อมของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของน้ำให้เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีที่สุดและมากที่สุด ทั้งนี้การควบคุมต่าง ๆ จำเป็นต้องใช้ระบบการสื่อสารทั้งแบบมีสาย (Line communication: LC) และไร้สาย (Wireless communication: WC) อย่างไรก็ตามหากสามารถควบคุมด้วยระบบไร้สายได้ อาจทำให้มีความยืดหยุ่นและไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเทียบกับการใช้บุคลากรสำรวจและสัมผัสโดยตรง สำหรับการสื่อสารไร้สายประกอบไปด้วยระบบการสื่อสารโดยใช้คลื่นวิทยุ (Radio frequency: RF) และการสื่อสารเชิงแสงไร้สาย (Optical wireless communication: OWC) หรือในบางกรณีนำไปใช้งานอาจรวมไปถึงระบบการสื่อสารเชิงแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible communication: VLC) [1],[2]

สำหรับการสื่อสารใต้น้ำจากการศึกษาและเปรียบเทียบทั้งระบบ RF และ OWC พบว่าระบบ RF มีแถบสัญญาณ (Bandwidth signal) น้อยกว่า OWC ซึ่งมีขนาดประมาณ 100 KHz มีค่าการลดทอนสูงมาก (High loss) [1] ส่วน VLC สามารถรองรับความเร็วของระบบสื่อสารได้ถึงระดับกิกะบิต (Giga bit per second) [3] ทำให้มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้แสงที่ใช้สำหรับการสื่อสารใต้น้ำนิยมใช้แสงสีน้ำเงิน สี

ฟ้า เนื่องจากมีอัตราการลดทอนในน้ำน้อยที่สุด [4] ดังนั้นหากนำแสงสีฟ้ามาใช้สำหรับการส่งข้อมูลข่าวสารเพื่อควบคุมและส่งข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) คุณภาพน้ำพร้อมกับนำมาบูรณาการเข้ากับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing: IoT) ได้อีกด้วย จึงเป็นระบบที่น่าสนใจมาก อย่างไรก็ตามการศึกษาและวิจัยงานวิจัยดังกล่าวยังมีอยู่น้อยมาก เช่น A. Schuster [5] นำเสนอการตรวจวัดคลื่นหัวใจ และอุณหภูมิร่างกายสำหรับนักประดาน้ำ (Aquanaut) แต่การส่งข้อมูลข่าวสารดังกล่าวยังใช้สายทองแดงนำสัญญาณ ไปยังตัวรับที่ผิวน้ำจากนั้นส่งสัญญาณไปยังเครื่องแม่ข่ายคลาวด์ (Cloud Server) ด้วยระบบ IoT ด้วยบลูทูธ (Bluetooth) เมื่อไม่นานมานี้มีงานวิจัยที่ริเริ่มศึกษาระบบการนำเอาการสื่อสาร VLC สำหรับการสื่อสารใต้น้ำโดยใช้แสงสีฟ้า [6] โดยใช้ค่าอุณหภูมิในน้ำ และค่า pH เป็นตัวอย่างในการศึกษาระบบการสื่อสารข้อมูล และใช้สัญญาณแบบไม่กลับสู่ศูนย์ (Non return-to-zeros: NRZ) อย่างไรก็ตามจากการศึกษา พบว่ายังมีบิดผิดผลาดจึงจำเป็นต้องส่งซ้ำหลายรอบ

บิดผิดผลาดในระบบสื่อสารการเป็นอาณานิทัศน์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่สามารถแก้ไขได้ โดยที่การแก้ไขบิดผิดผลาดมีหลายเทคนิคเช่น รหัสคอนโวลูชัน (Convolution code) [7],[8] รหัสรีด-โซโลมอน (Reed-Solomon) [9] และการเข้ารหัสยุคใหม่ เช่น รหัสพาริตีเช็กความหนาแน่นต่ำ (Low Density

Parity Check: LDPC) [10] อย่างไรก็ตามที่ตีบทความนี้นำเสนอการ ออกแบบการเข้ารหัสคอนโวลูชัน สำหรับการแก้ไขบิต ผิดพลาดที่เครื่องรับสำหรับการสื่อสารเชิงแสงใต้น้ำ โดยใช้ อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) เนื่องจากเป็นการเข้ารหัสที่ได้รับความนิยมและ มีความซับซ้อนต่ำ อย่างไรก็ตามที่ RS-code และ LDPC code สามารถนำมาใช้ได้และอาจมีประสิทธิภาพมากกว่า แต่มีความซับซ้อนสูง และใช้ลอจิกเกตมากกว่า ทั้งนี้ในบทความนี้ ใช้ค่า pH และอุณหภูมิ เป็นตัวอย่างในการตรวจสอบคุณภาพ น้ำ ที่เครื่องส่งใช้ LED สีฟ้าขนาด 10W ความเร็วที่ใช้ในการ สื่อสาร (Baud rate) ระหว่างภาคส่งและภาครับเท่ากับ 9,600 บิตต่อวินาที และการกล้ำสัญญาณที่ใช้คือ OOK (On-off keying) ที่เครื่องรับใช้ APD (avalanche photodiode) ที่มีแถบ ความถี่เท่ากับ 25 MHz จำนวน 4 ตัว สำหรับการรับสัญญาณ

แสงและแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ผลการตรวจรู้ค่า ต่าง ๆ จะถูกนำไปแสดงผ่านทางเว็บไซต์ NETPIE โดย เว็บไซต์สามารถแสดงผลผ่านทางอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อ อินเทอร์เน็ตได้ทุกชนิด ผ่านการสื่อสารแบบไวไฟ (Wi-Fi) แต่จำเป็นต้องทำการถืออินเพื่อเข้าถึงข้อมูล และระยะทาง การสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับโดยรวมอยู่ที่ 1.2 เมตร

2. ระบบใช้ในการทดลอง

วิธีดำเนินการวิจัยสำหรับการสร้างระบบการสื่อสารใต้น้ำ โดยใช้การเข้ารหัสคอนโวลูชัน แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดย ประกอบไปด้วยเครื่องส่งและเครื่องรับ

ที่เครื่องส่งประกอบไปด้วยฮาร์ดแวร์ (Arduino) สำหรับตัวประมวลผลสำหรับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ ที่นำมาใช้เป็นตัวอย่าง คือ pH และอุณหภูมิ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยัง FPGA สำหรับทำการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ก่อนส่งไปยังตัวขับโหลด LED แสงสีฟ้าขนาด 10W ส่วนวงจรขับโหลด LED แสดงได้ดังเอกสาร [6]

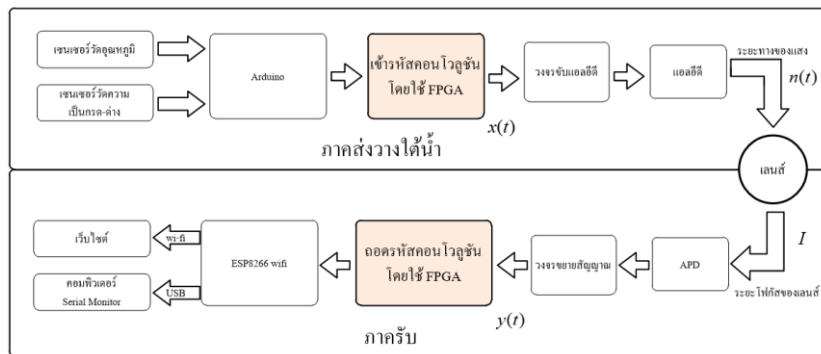
ที่เครื่องรับความเข้มแสงที่ APD รับได้สามารถอธิบายได้ตามกฎของเบียร์ (Beer's law) ได้ดังสมการที่ (1) [7]

$$I = R \cdot I_0 \exp(-e(\lambda) \cdot d) \tag{1}$$

เมื่อ I คือความเข้มแสงที่รับได้ I_0 คือความเข้มแสงที่ต้นทางเครื่องส่งและ R คือค่าความไวของ APD $e(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ เมื่อ $a(\lambda)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) และ $b(\lambda)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การกระจัดกระจายของแสง (Scattering coefficient) โดยทั่วไปค่าดูดกลืนแสงในน้ำสะอาดมีค่า $a(\lambda)$ เท่ากับ 0.053 m^{-1} และ $b(\lambda)$ เท่ากับ 0.003 m^{-1} [11] ส่วน d คือระยะทาง ดังนั้นสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ $y(t)$ สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2)

$$y(t) = I \cdot x(t) + n(t) \tag{2}$$

โดยที่ $x(t)$ คือสัญญาณที่ต้องการจะส่งที่เครื่องส่ง โดยในที่นี้คือสัญญาณไม่กลับคืนสู่ศูนย์ (non return-to-zeros) $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนในระบบทั้งเครื่องรับและเครื่องส่ง อย่างไรก็ตาม สัญญาณไฟฟ้าที่รับได้ถูกขยายเพื่อให้ได้แรงดันที่เหมาะสมกับ ESP8266 WiFi เพื่อนำไปบันทึกไว้ที่เครื่องแม่ข่าย NETPIE และแสดงผลค่าที่ตรวจรู้ได้ต่อไป



รูปที่ 1 ระบบที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการนำการเข้ารหัสโคโวลูชันนอลมาใช้งานจริงสำหรับการสื่อสารใต้น้ำ

3. การออกแบบรหัสการคอนโวลูชันโดยใช้ FPGA

รหัสคอนโวลูชันประกอบไปด้วยการเข้ารหัสโดยการประมวลผลการเข้ารหัสที่ภาคส่ง และการถอดรหัสที่ภาครับแสดงได้ดังที่จะกล่าวต่อไป

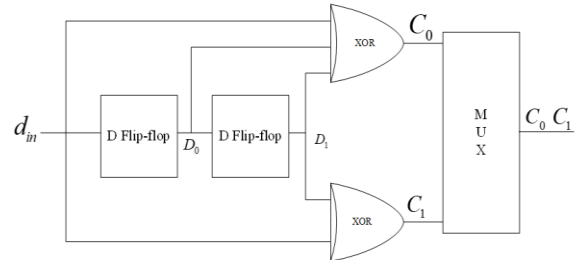
3.1 การสร้างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน FPGA

การเข้ารหัสคอนโวลูชันที่ภาคส่ง ประกอบไปด้วยชิพเรจิสเตอร์ (shift register) โดยมีแผนผังการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 2 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการเข้ารหัสประกอบไปด้วยสัญญาณ C_0 และ C_1 ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณดังกล่าวถูกเรียงต่อกันโดยให้ C_1 ถูกส่งออกก่อนต่อด้วย C_0 โดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer) ทั้งนี้ C_0 และ C_1 สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (3) [9]

$$\begin{aligned} C_0 &= d_{in} \oplus D_0 \oplus D_1 \\ C_1 &= d_{in} \oplus D_1 \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ C_0 คือ เอาต์พุตลำดับแรก C_1 คือ เอาต์พุตลำดับถัดไป \oplus คือ การบวกแบบมอดูโลสอง (Modulo-2 adder) d_{in} คือ สถานะข้อมูลบิตอินพุต D_0 คือ สถานะข้อมูลที่ได้จากการเลื่อนบิตลำดับหนึ่ง และ D_1 คือ สถานะข้อมูลที่ถูกเลื่อนลำดับที่สอง จากสมการที่ (8) สามารถสร้างด้วย FPGA แสดง

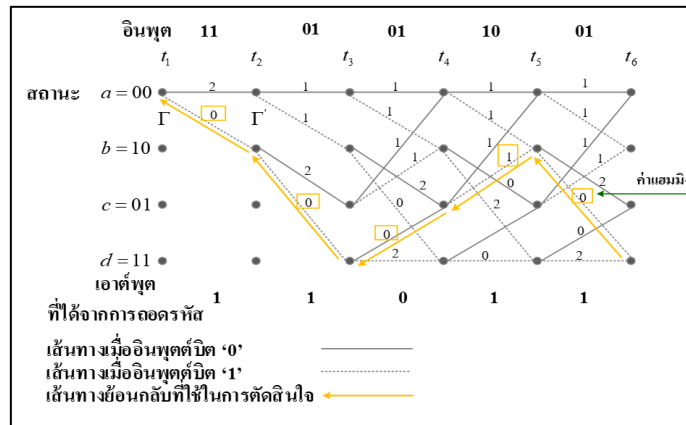
ได้ดังรูปที่ 2 โดยที่วงจรสำหรับชิพเรจิสเตอร์ใช้ดีฟลิปฟลิป (D Flip-flop) ส่วน การบวกแบบมอดูโลสองใช้ วงจร เอ็กซ์คลูซีฟออร์ (XOR) สุดท้ายก่อนส่งสัญญาณที่ถูกเข้ารหัส C_1 ออกไปก่อน ตามด้วย C_0 โดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์



รูปที่ 2 วงจรเข้ารหัสโคโวลูชันนอล

3.2 การถอดรหัสคอนโวลูชัน

ในบทความนี้ อัลกอริทึมวิเทอร์บี (Viterbi algorithm) [9] แบบมีการตัดสินใจอย่างหยาบ (Hard decision) ถูกนำมาใช้ถอดรหัสโดยใช้แผนภาพตามไดอะแกรมเทรลลิส (Trellis diagram) แสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปพบว่า มีจำนวนสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 สถานะ เนื่องจากใช้ข้อกำหนด 3 (Constrain 3) และมีเส้นทางการเปลี่ยนแปลงเส้นทางอยู่ 8 เส้นทาง สำหรับอินพุตเป็นบิต '0' และ '1'



รูปที่ 3 แผนภาพไดอะแกรมเทรลลิส

อัลกอริทึมวิเทอร์บีทำการคำนวณหาจำนวนข้อมูลบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนขั้น ณ เวลาปัจจุบันแทนด้วย G ไปยังขั้นถัดไป แทนด้วย Γ' ทั้ง 4 สถานะ โดยประกอบไปด้วยดังนี้ คือ $a = 00$ $b = 10$ $c = 10$ $d = 11$ แต่ละขั้นแทนด้วย t_i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots$ และทุกสถานะพิจารณาบิต

อินพุตเปรียบกับสถานะบิต จำนวนค่าที่ต่างกัน เรียกว่า ค่าแฮมมิง (Hamming)

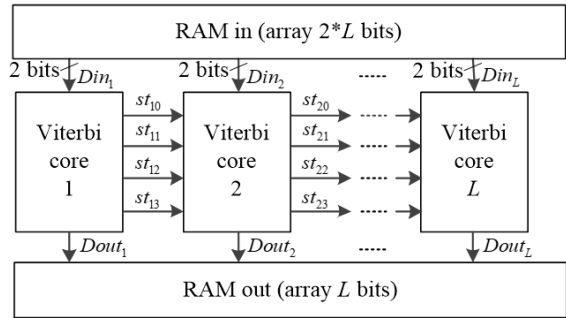
โดยการหาค่าแฮมมิง และเก็บค่าจำนวนข้อมูลบิตผิดพลาดที่น้อยที่สุด ถูกกำหนดให้เป็นเส้นทางที่มีความน่าจะเป็นไปได้สูงสุดที่บิตจะถูกต้อง สุดท้ายทำการเลือกบิตข้อมูล

ข่าวสาร โดยการเลือกสถานะที่ให้ค่าบิดผิดพลาดน้อยที่สุด ย้อนกลับโดยใช้อินพุตของเส้นทางที่มีความบิดผิดพลาดน้อยที่สุดเป็นตัวเลือก หรือเป็นคำตอบของการถอดรหัส

จากไดอะแกรมเทรลิสพบว่ามีการประมวลผล 3 ขั้นตอน แสดงได้ตามรูปที่ 3 และแต่ละขั้นตอนใช้การประมวลผลเพียง 2 บิต ประกอบไปด้วย ขั้นตอนที่ 1 จำนวน

ค่าแฮมมิงระหว่างบิตอินพุตบิตกับบิตประจำสถานะ โดยใช้เอ็กซ์คลูซีฟออร์ ขั้นตอนที่ 2 เก็บค่าแฮมมิงที่คำนวณได้ของแต่ละสถานะและทุกขั้น t_i โดยใช้ ชิฟต์-เรจิสเตอร์ ขั้นตอนที่ 3 เลือกเส้นทางย้อนกลับตามค่าแฮมมิงที่น้อยที่สุด จากที่กล่าวมาสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3 พบว่าเส้นทางที่ได้คือเส้นทางตามลูกศร โดยเอาต์พุตสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 1 1 0 1 1 ตามลำดับ

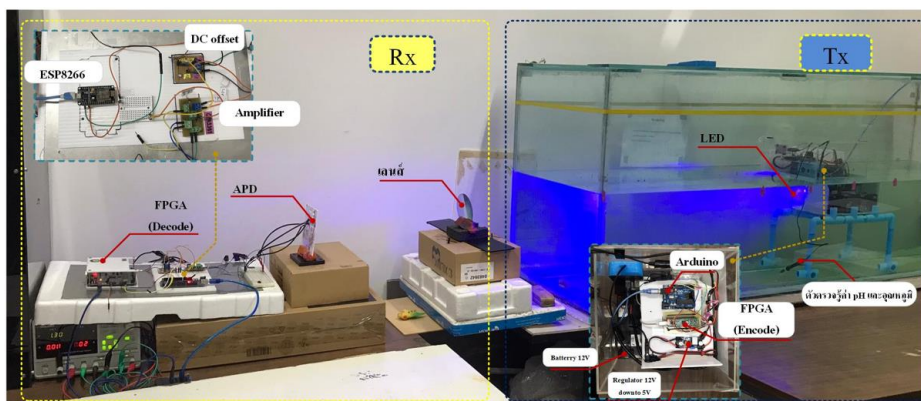
สำหรับการนำการถอดรหัสคอนโวลูชันมาใช้งานจริงด้วย FPGA สามารถแสดงวิธีการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 4 ประกอบด้วยสัญญาณอินพุตแทนด้วย D_{in} ขนาด $2L$ บิต เมื่อ L คือขนาดขั้นที่ใช้ในการถอดรหัส แต่ละวิเทอริบิคอร์ (Viterbi core) ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลหลัก และใช้ในการคำนวณหาค่าแฮมมิงและเลือกเส้นทางที่ให้ค่าแฮมมิงน้อยที่สุด สัญญาณเอาต์พุตแต่ละวิเทอริบิคอร์คือสถานะทั้งหมด 4 สถานะ ของแต่ละขั้น ส่วนเอาต์พุตที่ได้คือเอาต์พุตที่ได้จากการเลือกเส้นทางที่มีค่าแฮมมิงน้อยที่สุดและมีเพียงเส้นทางเดียว โดยเลือกจากเส้นทางตามอินพุตที่ให้แฮมมิงน้อยที่สุด แทนด้วย D_{out} โปรดพิจารณารูปที่ 3 ประกอบ ส่วนอินพุตประกอบไปด้วยบิต '0' และ '1' เท่านั้น



รูปที่ 4 วงจรถอดรหัสโควลูชันนอล

4. การติดตั้งอุปกรณ์

การติดตั้งระบบการสื่อสาร ไร้สายเชิงแสงใต้น้ำ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือภาคส่ง (Transmitter : Tx) วางไว้ใต้น้ำ ช่องสัญญาณ (Channel) ใต้น้ำ ภาครับ (Receiver: Rx) วางไว้ที่ผิวน้ำ แสดงได้ดังรูปที่ 5 ประกอบ จากรูปไปด้วย ส่วนของภาคส่ง ทำการตรวจรู้ข้อมูลใต้น้ำโดยใช้โมดูลตรวจรู้ค่าอุณหภูมิ และ โมดูลตรวจรู้ค่า pH ซึ่งการประมวลผลอ่านค่าตรวจรู้จากโมดูลด้วยบอร์ดอาดูโน จากนั้นส่งค่าตรวจรู้ที่ได้ ไปเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยใช้ FPGA (CMOD S6) ทั้งนี้อัตราบอดส์สำหรับระบบสื่อสารระหว่างอาดูโน ไปยัง FPGA มีค่าเท่ากับ 9,600 b/s (baud per second) หลังจากการเข้ารหัสสัญญาณที่ได้ประกอบไปด้วยสองบิตตามสมการที่ (8) ดังนั้นจึงต้องใช้ความเร็วของอัตราบอดสองเท่าในการส่งข้อมูล คือ 19,200 (9,600 × 2) b/s



รูปที่ 5 การติดตั้งระบบการสื่อสาร ไร้สายเชิงแสงใต้น้ำ

สัญญาณที่ได้จากการเข้ารหัสจะถูกส่งไปยังวงจรขับโพลดิโอดที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ (Transistor) เบอร์ NSS1C201LT1G เพื่อให้โพลดิโอดส่องสว่างติดตามสัญญาณข้อมูล แอลอีดีเลือกใช้ แสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ 430–500 นาโนเมตรเนื่องจากแสงสีฟ้ามีค่าการลดทอนใต้น้ำต่ำ จากนั้นส่งข้อมูลทางแสงผ่านช่องสัญญาณใต้น้ำและอากาศ ในการทดลองนี้ใช้ตู้กระจกขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 1 เมตร และอากาศจากขอบกระจกถึง APD ระยะทาง 1 เมตร (100 เซนติเมตร) ส่วนของภาครับใช้วาแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode: APD) เป็นตัวรับแสง เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณ โดยใช้โอปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ OPA2380 เพื่อขยายสัญญาณโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ และสัญญาณถูกส่งไปยังวงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Offset) ระหว่าง 1.10 โวลต์ ถึง 1.32 โวลต์ เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้ให้อยู่ในช่วง ระดับการแปลความหมายระหว่างบิต “0” และ “1” ของ FPGA คือ 1.4 โวลต์ ขึ้นไป โดยที่สัญญาณที่ถูกเพิ่มระดับแรงดันถูกนำไปประมวลผลการถอดรหัสข้อมูลด้วย FPGA (Nexy4 DDR)

จากนั้นข้อมูลที่ี้จากการถอดรหัสจะถูกส่งไปยังบอร์ด ESP8266 WiFi ด้วยอัตราบอด 9,600 b/s เพื่อแสดงผลค่า pH และค่าอุณหภูมิ ไปยังเว็บไซต์ NETPIE หรือแสดงผลบนจอแสดงผล (Serial monitor) และเพื่อตรวจสอบค่า

ประสิทธิภาพ BER ของระบบ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้บอร์ด Arduino MEGA 2560 เพื่อคำนวณค่า BER ที่ได้จากการเข้ารหัสพร้อมแสดงผลผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial) ต่อไป

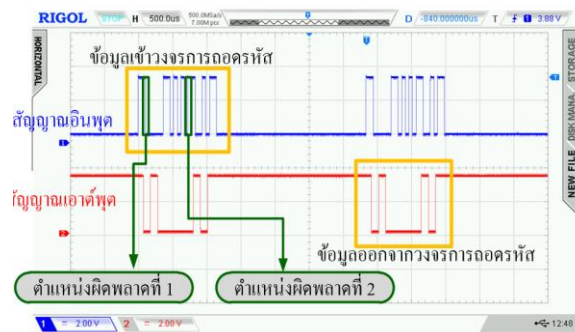
5. ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารไร้สายเชิงแสงใต้น้ำที่นำเสนอ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การแก้ไขบิตผิดพลาด และผล BER

อายุไดอะแกรม และการทดสอบระบบเวลาจริง ดังที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

5.1 ผลการแก้ไขบิตผิดพลาดของวงจรการเข้ารหัส และถอดรหัส

การทดสอบประสิทธิภาพการแก้ไขบิตผิดพลาดของวงจรการเข้ารหัส และถอดรหัสแสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยกำหนดให้ข้อมูลสำหรับทดสอบเป็นตัวอย่างคือ ตัวอักษร “A” ในรูปแบบรหัส ASCII (American Standard Code for Information Interchange) เลขฐานสองจำนวน 8 บิต คือ 1 0 0 0 0 1 0 จากนั้นเพิ่มส่วนหัวและท้ายสำหรับบิตเริ่มต้นและบิตหยุดสำหรับการสื่อสารแบบอนุกรม รวมทั้งหมด 10 บิต เมื่อนำไปเข้ารหัส จะได้ บิตข้อมูลดังนี้



รูปที่ 6 สัญญาณอินพุต และเอาต์พุตจากวงจรการถอดรหัส

1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 จำนวน 20 บิต เพื่อการทดลองการแก้ไขในการทดลองนี้กำหนดให้มีบิตผิดพลาดจำนวน 2 บิต ดังนี้ 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 (ตัวหนาเป็นข้อมูลที่กำหนดให้ผิด) จากนั้นนำข้อมูลเข้าวงจร

การถอดรหัส คือสัญญาณอินพุต เพื่อตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตหลังจากถอดรหัสสัญญาณ พบว่าสัญญาณเอาต์พุตสามารถแปลความหมายเป็น “A” กลับได้ถูกต้องคือ 0 1 0 0 0 0 1 0 1 แสดงได้ดังรูปที่ 6

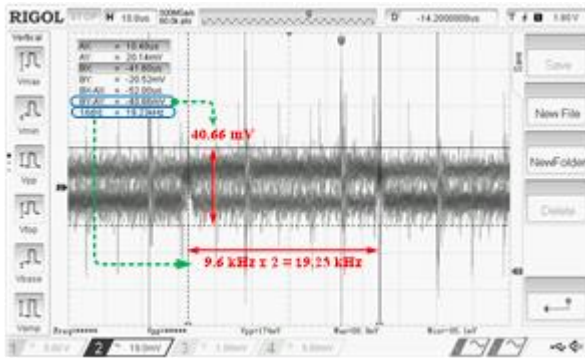
5.2 ผลของอายุไดอะแกรมและอัตราบิตผิดพลาด

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลอายุไดอะแกรม (Eye diagram) แสดงได้ดังรูปที่ 7 และผลของประสิทธิภาพอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) จากการทดลองเวลาจริงแสดงดังรูปที่ 8 โดยพิจารณาผลของระยะทาง และจำนวน

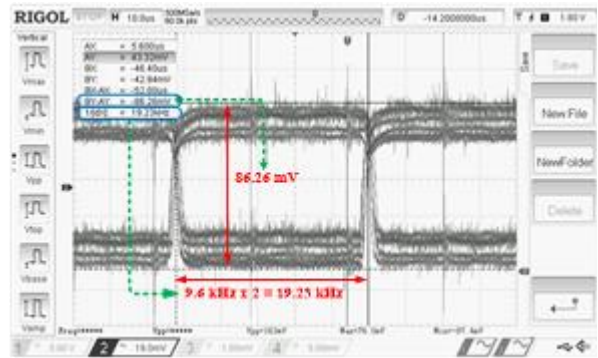
APD เป็น 1 2 3 และ 4 ตัวตามลำดับ โดยการส่งข้อมูล ข่าวสารทั้งหมด 5,000 บิตตามระบบที่ใช้ในการพิจารณา ตามหัวข้อที่ 4

จากรูปที่ 7 กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและ เครื่องรับมีระยะทาง 150 cm โดยพบว่าความกว้างของตา อายไดอะแกรมสำหรับ 4 APDs เปิดมากกว่าตาของ เครื่องรับที่มี 1 APD โดยจากผลของอายไดอะแกรม สามารถยืนยันต่อยอดในรูปของ BER ได้ดังแสดงตาม

รูปที่ 8 จากผลการทดลองเมื่อระยะทางการรับส่งข้อมูล เพิ่มขึ้นส่งผลให้ BER สูงขึ้น เนื่องจากพลังงานจากแสง LED ที่ตกกระทบ APD มีพลังงานลดลงตามระยะทางการ รับส่งข้อมูล ทำให้กำลังงานของสัญญาณรบกวน เช่น การกระเจิงของแสง ส่งผลต่อสัญญาณ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เมื่อเพิ่มจำนวน APD เป็น 4 ตัว เพื่อเพิ่มระดับแรงดัน ที่รับได้ให้มีค่ามากขึ้น และ BER ที่ 150 cm มีค่าเท่ากับ 1.4×10^{-3} สำหรับ APD 4 ตัว และ 2×10^{-1} สำหรับ APD 1 ตัว ตามลำดับ

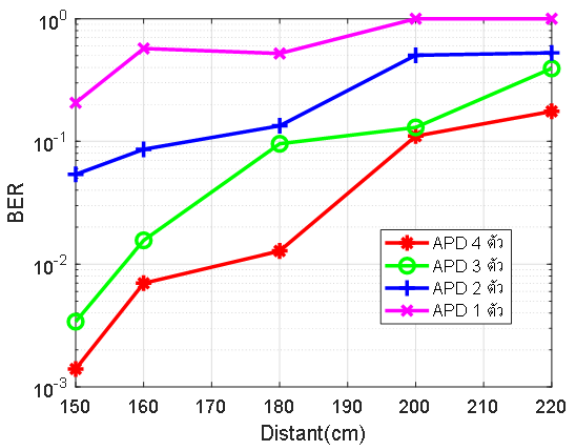


(ก)



(ข)

รูปที่ 7 อายไดอะแกรมที่ระยะทาง 150 cm สำหรับ ก. สำหรับ APD เพียงตัวเดียว และ ข. APD 4 ตัว ตามลำดับ (ก) APD เพียงตัวเดียว (ข) APD 4 ตัว

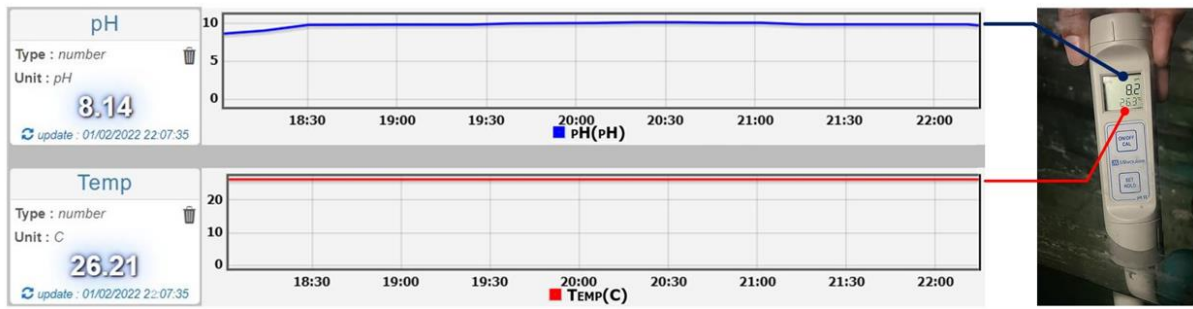


รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทาง ต่อ BER ที่ APD 1 2 3 และ 4 ตัว

สุดท้ายแสดงผลค่า pH และ อุณหภูมิ ได้ถูกต้องดัง แสดงด้วยเวลาจริงดังแสดงได้ดังรูปที่ 9 ทั้งนี้ยังแสดงผล

เปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานจากบริษัท Milwaukee KIT - Martini meter และเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากตัวตรวจ รู้พบว่ามีความใกล้เคียงกันโดยมีความผิดพลาดคูณ หกหมื่น และ pH เท่ากับ 0.37% และ 19.6% ตามลำดับ ทั้งนี้ในการ ทดลองทำการเปิดเครื่องให้ทำงาน 4 ชม. ต่อเนื่องไม่มี หยุด

จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าระบบสามารถ สื่อสารและแก้ไขบิดผิดพลาดได้จริง ทำให้สามารถ พัฒนาต่อยอดให้สามารถสื่อสารให้ไกลมากขึ้น และสามารถเข้าร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตใต้น้ำของสรรพสิ่ง (Internet of Underwater Things: IoUT) [12] หรือระบบ การทดสอบตัวกลางและหรือช่องสัญญาณใต้น้ำ เพื่อบ่ง บอกลักษณะตัวกลางที่ต้องการจะทดสอบดังแสดง ใน [13]



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่า pH และค่าอุณหภูมิ บนเว็บไซต์ NETPIE เปรียบเทียบเครื่องมือวัด Milwaukee KIT - Martini meter

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการแก้ไขข้อผิดพลาดโดยใช้การเข้ารหัสคอนโวลูชันโดยใช้ FPGA จากผลการทดลองอัลกอริทึมที่นำเสนอ สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ดี โดยค่า BER ลดลงเมื่อเพิ่มจำนวน APD สำหรับ APD 4 ตัว ที่ระยะทาง 1.5 เมตร มีค่า BER 1.4×10^{-3} ทั้งนี้ระบบการสื่อสารเชิงแสงได้น้ำยังสามารถแสดงและบันทึกค่าตัวตรวจรู้ อุณหภูมิ และ พีเอช บนเว็บไซต์ NETPIE โดยในบทความนี้บันทึกไว้ทั้งหมด 240 นาที เพื่อแสดงผลย้อนหลังบนระบบ IoT ได้ จากการทดลองเป็นการทดลองบนระบบเวลาจริง ทำให้มีความน่าเชื่อถือและต่อยอดให้สามารถนำไปใช้จริงได้ตาม บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้จริงและเป็นเทคโนโลยีใหม่อีกด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณธนาริป์ บัณฑิตคุณ บุษกร บุญศรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ช่วยติดตั้งระบบการทดลอง และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล-อีสาน ที่ให้การสนับสนุนตาม สัญญาเลขที่ ENG01/65

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.
- [2] T. Szili, B. Matolcsy and G. Fekete, "Water pollution investigations by underwater visible light communications," in *The 17th International*

Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Budapest, Hungary, 2015, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICTON.2015.7193516.

- [3] S. Watson, S. P. Najda, P. Perlin, M. Leszczynski, G. Targowski, S. Grzanka, M. A. Watson, H. White and A. E. Kelly, "Multi-gigabit data transmission using a directly modulated GaN laser diode for visible light communication through plastic optical fiber and water," in *2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM)*, Nassau, Bahamas, 2015, pp. 224–225, doi: 10.1109/PHOSST.2015.7248278.
- [4] K. Nakamura, I. Mizukoshi and M. Hanawa, "Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel," *Optics Express*, vol. 23, no. 2, pp. 1558–1566, 2015, doi: 10.1364/OE.23.001558.
- [5] S. Andreas, C. Olivier, S. Bruno, C. Tobias, S. Arne and G. Seabear, "Underwater monitoring system for body temperature and ECG recordings," *Underwater Technology*, vol. 34, no. 3, pp.135–139, 2017, doi: 10.3723/ut.34.135.
- [6] K. Puntsri, E. Khansalee and P. Suttisopapan, "Underwater environment sensors with visible light communication systems," *Journal of Current Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 269–276, 2021, doi: 10.14456/jcst.2021.27.
- [7] Z. Decai, L. Xiaochun, W. Haitao and X. Jinsong, "Implementation of convolutional code based on

- FPGA in OFDM-UWB system,” in *The 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Held, Singapore, pp. 1119–1122, 2008, doi: 10.1109/ICIEA.2008.4582692.
- [8] B. Sklar, “Channel Coding: Part2,” in *Digital communications: fundamentals and applications*, Hoboken, NJ, USA: Prentice Hall, 2001, ch. 7, sec. 7.1, pp. 381–435.
- [9] W. C. Cox, J. A. Simpson, C. P. Domizioli, J. F. Muth and B. L. Hughes, “An underwater optical communication system implementing Reed-Solomon channel coding,” in *OCEANS 2008*, QC, Canada, 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/OCEANS.2008.5151992.
- [10] J. Zhang, Y. Yang, Z. Gao, Y. Zhu, “Performance analysis of LDPC codes for wireless optical communication systems in different seawater environments,” in *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Hangzhou, China, 2018, pp. 1–3, doi: 10.1109/ACP.2018.8596282.
- [11] G. S. Spagnolo, L. Cozzella and F. Leccese, “Underwater optical wireless communications: overview,” *sensors*, vol. 20, no. 8, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/s20082261.
- [12] M. Jahanbakht, W. Xiang, L. Hanzo and M. Rahimi Azghadi, “Internet of underwater things and big marine data analytics—a comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 904–956, 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3053118.
- [13] B. Cochenour, K. Dunn, A. Laux and L. Mullen, “Experimental measurements of the magnitude and phase response of high-frequency modulated light underwater,” *Applied Optics*, vol. 56, no. 14, pp. 4019–4024, 2017, doi: 10.1364/AO.56.004019.